

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Isabela Naia Talhacoli

**COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PRISMAS DE
ALVENARIA COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO DE BAIXA
RESISTÊNCIA E ELEVADO TEOR DE AR INCORPORADO**

**Santa Maria, RS
2023**

Isabela Naia Talhacoli

**COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PRISMAS DE
ALVENARIA COM ARGAMASSA ESTABILIZADA DE BAIXA
RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: André Lübeck

**Santa Maria, RS
2023**

Talhacoli, Isabela
COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PRISMAS DE
ALVENARIA COM ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO DE BAIXA
RESISTÊNCIA E ELEVADO TEOR DE AR INCORPORADO / Isabela
Talhacoli.- 2023.
112 f.; 30 cm

Orientador: André Lübeck
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2023

1. Argamassa Estabilizada 2. Argamassa Ensacada 3.
Deformabilidade 4. Prismas I. Lübeck, André II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ISABELA TALHACOLI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Isabela Naia Talhacoli

**COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PRISMAS DE ALVENARIA
COM ARGAMASSA ESTABILIZADA DE BAIXA RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 08 de fevereiro de 2023

André Lübeck, Dr. (UFSM)
(Orientador)

Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UFSM)

Alisson Simonetti Milani, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter chegado até aqui, por não ter me deixado desistir e apesar de todas as dificuldades no caminho, ter concluído esse mestrado é motivo de muito orgulho e agradecimento.

Agradeço aos professores e membros do PPGEC por todo auxílio ao longo desses quase 3 anos de luta e em especial ao André Lubeck, meu orientador, por toda compreensão, paciência, conhecimento ao qual em mim foram confiados.

Agradeço aos meus pais, família e amigos, por toda a ajuda e em especial a minha mãe que sempre me apoiou nos meus sonhos, apesar das dificuldades sempre me deu todo o suporte para que eu pudesse fazer acontecer.

Agradeço a Mikaele Kuriki, por todo suporte incondicional, por ter colocado a mão na massa junto comigo nos ensaios e por todo auxílio ao longo de todos esses anos.

Agradeço também aos amigos que Santa Maria me deu, Elaise, Paula, Helena, Paola, Andréia, Beto, vocês com certeza foram minha família do Rio Grande do Sul. Obrigada.

RESUMO

COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE PRISMAS DE ALVENARIA COM ARGAMASSA ESTABILIZADA DE BAIXA RESISTÊNCIA

AUTORA: Isabela Naia Talhacoli

ORIENTADOR: André Lübeck

A alvenaria estrutural é um importante e competitivo sistema construtivo, por ser racional, flexível, rápido e eficiente. Apesar de ser um dos processos construtivos mais antigos, só nos últimos anos esse sistema foi impulsionado e aprimorado, tornando-se uma alternativa vantajosa para edifícios habitacionais. Dessa forma, o comportamento da alvenaria frente a esforços de compressão tem sido tema de diversos estudos, buscando estimar e fornecer equações que representem o comportamento desses elementos até o processo de ruptura. A alvenaria é um compósito formado pela combinação dos blocos e da argamassa de assentamento formando um compósito. E, à medida que novos materiais vão sendo desenvolvidos, são necessárias análises para a caracterização desses novos compósitos. Por essas razões a análise da interação entre bloco e os diversos tipos de argamassas que estão disponíveis no mercado, são importantes para se ter um domínio maior sob as variáveis que interferem nessa ruptura e entender as restrições de cada tipo de combinação. Dessa forma, o objetivo desse estudo é avaliar comportamento tensão *versus* deformação específica de prismas comprimidos moldados com argamassas estabilizadas de baixa resistência, de 36 e 72 horas, e argamassa industrializada ensacada, combinadas com blocos de concreto e cerâmicos, de paredes vazadas e maciças. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica de todos os materiais utilizados na pesquisa segundo as normas brasileiras. Para a verificação de deformabilidade dos prismas comprimidos, foram moldados prismas de dois blocos, instrumentados com dois LVDT's, colados em faces opostas, para a medição das deformações. Concluiu-se que prismas de argamassa de baixa resistência e alto teor de ar incorporado combinada com blocos de concreto apresentaram comportamento linear até próximo à tensões de 4 MPa, e a partir desse nível comportavam-se de forma não linear. Observou-se também o poro colapso, com a destruição dos poros da argamassa para níveis em que a tensão ainda não tinha atingido a ruptura máxima. Nos prismas de blocos cerâmicos de parede vazada conforme aumentou-se a resistência da argamassa houve aumento também o fator de resistência entre o prisma e o bloco e em prismas com blocos cerâmicos de parede maciça e blocos de concreto ocorreu aumento desse fator conforme aumentou-se o teor de ar incorporado.

Palavras-chave: Argamassa Estabilizada. Argamassa Ensacada. Deformabilidade. Prismas.

ABSTRACT

STRESS-DEFORMATION BEHAVIOR OF MASONRY PRISMS WITH STABILIZED LOW STRENGTH MORTAR

AUTHOR: Isabela Naia Talhacoli

ADVISOR: André Lübeck

Structural masonry is an important and competitive construction system, as it is rational, flexible, fast and efficient. Despite being one of the oldest construction processes, only in recent years has this system been boosted and improved, becoming an advantageous alternative for residential buildings. Thus, the behavior of masonry under compressive stresses has been the subject of several studies, seeking to estimate and provide equations that represent the behavior of these elements until the failure process. Masonry is a composite formed by the combination of blocks and laying mortar. And, as new materials are being developed, analyzes are necessary for the characterization of these new composites. For these reasons, the analysis of the interaction between the block and the different types of mortar that are available in the market is important to have a greater domain over the variables that interfere in this rupture and to understand the restrictions of each type of combination. Thus, the objective of this study is to evaluate stress behavior versus specific deformation of compressed prisms molded with stabilized low strength mortars, of 36 and 72 hours, and bagged mortar, combined with concrete and ceramic blocks, with hollow and solid walls. For this, physical and mechanical characterization tests were carried out on all materials used in the research according to Brazilian standards. To verify the deformability of the compressed prisms, prisms of two blocks were molded, instrumented with two LVDT's, glued on opposite faces, to measure the deformations. It was concluded that low resistance mortar prisms with high incorporated air content combined with concrete blocks showed a linear behavior close to stresses of 4 MPa, which from that level onwards behaved with stress relaxation and proportional deformations until they reached rupture. Pore collapse was also observed, with the destruction of the mortar pores to levels where the stress had not yet reached the maximum rupture. In the prisms of hollow wall ceramic blocks, as the resistance of the mortar increased, there was also an increase in the resistance factor between the prism and the block and in prisms with solid wall ceramic blocks and concrete blocks, there was an increase in this factor as it increased. the content of entrained air.

Keywords: Stabilized Mortar. Bagged Mortar. Deformability. Prisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos blocos de acordo com a NBR 15270-3, a) bloco cerâmico estrutural de parede vazada; b) bloco cerâmico estrutural de parede maciça; c) bloco cerâmico estrutural com paredes maciças e paredes internas vazadas; d) bloco cerâmico estrutural perfurado.	25
Figura 2 – Espessura mínima para septos (mm), a) bloco estrutural de parede vazada; b) bloco estrutural de parede maciça.	27
Figura 3 – Aderência adequada entre o revestimento e o substrato.	28
Figura 4 – a) Argamassa sem aditivo incorporador; b) Argamassa com aditivo incorporador.	30
Figura 5 - Resistência média à compressão para argamassas estabilizadas armazenadas com e sem lâmina d'água.	32
Figura 6 – Resistência à compressão dos elementos de ensaio.	33
Figura 7 – Eficiência de prisma/bloco normas internacionais.	34
Figura 8 – Resistência a compressão do bloco <i>versus</i> da alvenaria com relação h/t de 2 a 4, para diferentes tipos de argamassa de acordo com a BS 5628:1.	35
Figura 9 - Avaliação de diferentes módulos de elasticidade.	36
Figura 10 – Resistência prismas, argamassa e blocos.	38
Figura 11 – Tensões no conjunto bloco/argamassa.	39
Figura 12 – Deformação gerada no conjunto bloco/argamassa pelo confinamento.	40
Figura 13 – Curva tensão-deformação para amostras de argamassa confinada e não confinada.	41
Figura 14 – Curva tensão-deformação para diferentes valores de esbeltez e coeficiente de atrito (a: $\lambda = 0.15$ e b: $\lambda = 1.0$).	42
Figura 15 – Esmagamento da argamassa pela destruição dos poros.	43
Figura 16 - Modelos de Prismas que podem ser utilizados nos ensaios.	45
Figura 17 - Resultados da resistência do bloco, argamassa e alvenaria em função do tipo: a - três blocos inteiros, b - dois blocos inteiros com junta vertical e c - paredes.	46
Figura 18 - Resultado do diagrama de nível de tensão-deformação específica dos blocos BC10 parte frontal, strain gauges e GOM.	48

Figura 19 - Curvas de tensão-deformação em argamassa do software DIC. (a) argamassa M2 (b) argamassa M3 (c) argamassa M4. Tradução: <i>Mortar joints</i> : Juntas de argamassa. <i>Gauge length for average strains</i> : comprimento do medidor para deformações médias. <i>Polygon for strain in mortar</i> : Polígono para deformação em argamassa.....	49
Figura 20 - Correlações entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de diferentes tamanhos de espécimes cilíndricos.	50
Figura 21 - Modos de ruptura em diferentes cenários	51
Figura 22 - Curvas tensão-deformação para os três tipos de bloco analisados.	52
Figura 23 - Curvas tensão-deformação para os três tipos de bloco vazados analisados (B1, B2 e B3).....	54
Figura 24 - Prisma e parede para o teste de compressão	56
Figura 25 - Curvas de tensão-deformação dos prismas.	56
Figura 26 - Curvas de tensão-deformação dos prismas estudados.	58
Figura 27 - Prisma 6F rompido.....	59
Figura 28 - Curvas tensão-deformação da média dos LVDTs para os prismas de 2 MPa, 6 MPa, e 12 MPa.....	59
Figura 29 - Tipos de falha observados no teste de cisalhamento.	61
Figura 30 - Modos de ruptura dos prismas após a falha. a) vista frontal, b) vista lateral, c) corpo desmontado.	62
Figura 31 - Padrão típico de fissuras em prismas conforme estudo experimental para tijolo tipo B1 e argamassa tipo M2 (1:5).....	63
Figura 32 - Curvas tensão-deformação dos prismas. a) Prisma P50, b) Prisma P100.....	64
Figura 33 – Blocos utilizados na pesquisa a) bloco cerâmico de parede vazada, b) bloco cerâmico de parede maciça, c) bloco de concreto.	73
Figura 34 - Esquema de reservatório para manutenção de lâmina d'água.	77
Figura 35 - Geometria dos prismas da pesquisa.	80
Figura 36 - Esquematisação e modelo real dos prismas (medidas em cm).	81
Figura 37 - Geometria dos prismas da pesquisa.	87
Figura 38 - Esquematisação dos prismas (medidas em cm).....	88
Figura 39 – Curvas tensão-deformação específica para os espécimes analisados.	91

Figura 40 - Curva tensão-deformação para a) bloco cerâmico de parede vazada, b) bloco cerâmico de parede maciça e c) bloco de concreto.	93
Figura 41 - Curva tensão - deformação específica de prismas de concreto com argamassa estabilizada de 72 horas.	94
Figura 42 - Esmagamento da junta de argamassa conjunto CES72	95
Figura 43 - Curva tensão-deformação em função dos tipos de blocos para a) argamassa ensacada, b) argamassa estabilizada de 36 horas e c) argamassa estabilizada de 72 horas.	96
Figura 44 - Ruptura de prismas com argamassa estabilizada de 36 horas.	97
Figura 45 - Prismas com argamassa estabilizada de 72 horas.	98
Figura 46 - Prismas com argamassa ensacada.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões normativas para fabricação de blocos cerâmicos estruturais.	26
Tabela 2 – Classificação das argamassas conforme NBR 13281 (ABNT, 2005).	28
Tabela 3 – Resistência a compressão dos blocos.	67
Tabela 4 – Fator de redução β	69
Tabela 5 – Fator de segurança parcial γ_m	69
Tabela 6 - Valores de K para uso geral, camada fina e argamassas leves.	71
Tabela 7 – Ensaio do programa experimental.	72
Tabela 8 – Dimensões médias blocos cerâmicos.	74
Tabela 9 – Dimensões médias blocos de concreto.	74
Tabela 10 – Dimensões mínimas blocos de concreto.	75
Tabela 11 - Absorção individual blocos em estudo.	76
Tabela 12 – Massa aparente, área líquida, área bruta e AL/AB dos blocos.	76
Tabela 13 – AAI para blocos cerâmicos.	77
Tabela 14 – Resistência dos blocos na área bruta e área líquida.	78
Tabela 15 – Caracterização das argamassas.	79
Tabela 16 – Combinação e nomenclatura dos materiais utilizados no estudo.	80
Tabela 17 - Resultados dos ensaios de caracterização dos blocos em estudo.	85
Tabela 18 - Resistência média dos blocos na área bruta e área líquida e resistência característica.	86
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas.	86
Tabela 20 - Combinação e nomenclatura dos materiais utilizados no estudo.	87
Tabela 21 - Resistência máxima e deformação máxima de ruptura dos conjuntos em estudo.	89
.....	89
Tabela 22 - Resistências e fatores de resistências dos conjuntos.	89
Tabela 23 - Módulo de deformação, resistência média e característica dos prismas.	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.1.1 Objetivo geral	21
1.1.2 Objetivos específicos	21
1.2 JUSTIFICATIVA.....	21
1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	22
2 REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1 ALVENARIA ESTRUTURAL.....	24
2.1.1 Tipos de blocos	25
2.1.2 Argamassas	27
2.1.2.1 Argamassa estabilizada.....	29
2.2 COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES	32
2.2.1 Comportamento do bloco	32
2.2.1.1 Relação entre a resistência à compressão do prisma e do bloco	33
2.2.1.2 Módulo de elasticidade do bloco.....	35
2.2.2 Comportamento da argamassa	37
2.2.3 Comportamento da alvenaria na ruptura	38
2.2.3.1 Deformabilidade e modo de ruptura de prismas.....	44
2.2.3.2 Previsão da resistência de acordo com normas	65
3 METODOLOGIA	72
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	72
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS	73
3.2.1 Caracterização dimensional	74
3.2.2 Absorção de água e área líquida	75
3.2.3 Resistência dos blocos	78
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	78
3.4 PREPARAÇÃO DOS PRISMAS	79
4 ARTIGO – Efeito de argamassas de baixa resistência na capacidade de deformação e suportes de prismas	82

4.1 RESUMO.....	82
4.2 INTRODUÇÃO	83
4.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	85
4.2.1 Caracterização dos blocos	85
4.2.2 Caracterização das argamassas	86
4.2.3 Preparação dos prismas.....	87
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.4.1 Resistência à compressão e comportamento tensão <i>versus</i> deformação específica.....	88
4.4.2 Resistências médias e módulo de elasticidade dos prismas	95
4.4.3 Comparação do tipo de argamassa e tipo de bloco	96
4.5 MODO DE RUPTURA DOS PRISMAS	97
4.5.1 Prismas com argamassa estabilizada de 36 horas.....	97
4.5.2 Prismas com argamassa estabilizada de 72 horas.....	97
4.5.3 Prismas com argamassa industrializada encasada	98
4.6 CONCLUSÕES	100
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
REFERÊNCIAS	104

1 INTRODUÇÃO

O constante processo de evolução da humanidade permitiu ao longo dos anos grandes saltos na história da engenharia, estabelecidos através da ligação entre o desenvolvimento prático e o conhecimento através do senso comum, que avançaram de forma simultânea desde o início da civilização moderna. Nas épocas passadas, as construções eram arquitetadas com base em regras generalistas e na inexatidão de obras já realizadas e, apesar dessas limitações e falta de recursos, grandes obras foram criadas e deixaram suas marcas até os dias atuais, com suas arquiteturas robustas que se tornaram símbolo da capacidade humana.

As construções em alvenaria até o início do século XX se fundamentavam em regras empíricas e no pouco conhecimento técnico e científico. Somente com os avanços no desenvolvimento de métodos e materiais como as argamassas e o processo de fabricação dos blocos foi possível tornar a alvenaria um elemento estrutural para obras de grande vulto.

Com o crescimento das populações e consequente aumento das obras civis, houve a necessidade de atender a demanda que a urbanização proporcionou, de modo que a racionalização dos materiais se tornou essencial para se obter construções mais eficientes. Neste contexto a alvenaria estrutural ganhou mais espaço no mercado da construção, apesar de ser um dos processos construtivos mais antigos da humanidade, e só nos últimos anos, a partir da escassez do aço e do concreto, que esse sistema foi impulsionado e aprimorado (CAMACHO, 2006; DIAMANTINO e OLIVEIRA, 2021).

A alvenaria estrutural é um importante e competitivo sistema construtivo por possibilitar maior flexibilidade, rapidez e otimização nas etapas e permitindo eficiência nas obras. Além disso, diversas pesquisas apontam este método como mais econômico e racional quando comparado com outros sistemas construtivos.

Dessa maneira, para proporcionar estruturas com maior durabilidade, segurança e conforto, parâmetros mais refinados usados no dimensionamento estrutural se tornaram imprescindíveis para atender projetos mais elaborados e estruturas mais complexas. No caso da alvenaria estrutural, a resistência à compressão é um dos principais fatores de projeto de estruturas e é influenciada pela resistência à compressão dos blocos, como também pelas características da argamassa (LIMA, 2010).

Da mesma forma, a deformabilidade da alvenaria é um parâmetro imprescindível de controle. A deformação de prismas quando submetidos a esforços de compressão tem sido tema de diversos estudos, por permitir a correlação com os esforços gerados nas paredes de alvenaria. Mohamad, Lourenço e Roman (2006), realizaram ensaios de prismas à compressão confeccionados com diferentes blocos de concreto e argamassas, com o intuito de estabelecer a relação entre o modo de ruptura e as características mecânicas dos materiais isolados e concluíram que a alvenaria se rompe por indução de tração no bloco e por esmagamento da junta, quando a argamassa fica confinada. Mohamad (2007), analisou o comportamento de prismas de blocos de concreto utilizando duas resistências de argamassas. O objetivo do trabalho foi avaliar o modo de ruptura e o comportamento tensão-deformação de cada conjunto. De maneira geral, foi concluído que a argamassa comanda a forma de ruptura da alvenaria. Schnkoski, Prudência Jr. e Pilar (2015) analisaram o desempenho de argamassas industrializadas e argamassas mistas com diferentes traços comumente utilizados no Brasil. Os autores concluíram que as argamassas estruturais utilizadas com blocos de concreto não possuem capacidade de gerar alvenarias com desempenho totalmente satisfatório, devido a ocorrência de ruptura por esmagamento da junta, a qual se iniciava em níveis de tensões inferiores à de ruptura.

Os resultados desses trabalhos indicam que a argamassa de assentamento, especialmente a de baixa resistência, tem influência sobre o modo de ruptura da alvenaria, e de acordo com a combinação das propriedades entre argamassa e bloco, o resultado pode ser a degradação severa das juntas de argamassa, devido ao esmagamento, para cargas muito inferiores à carga considerada de ruptura. Dentro desse contexto, a argamassa estabilizada tem sido mais utilizada nos últimos anos Brasil, inclusive no assentamento de alvenaria, e ganhado destaque por proporcionar maior agilidade no canteiro de obras. São materiais dosados em central e prontos para aplicação, podendo ser utilizadas entre 36 ou 72 horas após a mistura, possuindo na sua composição aditivos incorporador de ar e estabilizador. Devido a esses componentes na mistura, essas argamassas se caracterizam por apresentar uma elevada quantidade de ar incorporado, o que apesar de proporcionar maior trabalhabilidade, atua de forma desfavorável em relação às resistências mecânicas (CARASEK, 2007). O elevado teor de ar incorporado e a baixa resistência à compressão são fatores chave para a ocorrência do esmagamento das juntas de assentamento afetando o desempenho da alvenaria comprimida (LÜBECK *et al.*, 2016; MACHADO *et al.*, 2019).

Entretanto, o que se percebe é que a literatura técnica-científica relacionada a argamassa de baixa resistência e elevado teor de ar incorporado ainda é escassa, apesar de seu uso já ser recorrente no assentamento de alvenaria estrutural, assim, é primordial estudos que abordem as características e limitações, quando utilizadas para este fim. Nesse panorama, evidencia-se a necessidade de realizar pesquisas que objetivam apresentar contribuições ao campo do comportamento de prismas de alvenaria com argamassa de baixa resistência e elevado teor de ar incorporado e ainda, de forma comparativa, com argamassa industrializada ensacada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento da alvenaria, quanto a deformabilidade e resistência de prismas comprimidos produzidos com argamassas de baixa resistência e elevado teor de ar incorporado.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento estrutural de prismas comprimidos para a combinação entre três tipos de blocos (bloco cerâmico de parede vazada, bloco cerâmico de parede maciça e bloco de concreto) e três tipos de argamassa (argamassa estabilizada de 36 horas, argamassa estabilizada de 72 horas e argamassa ensacada);
- Verificar a influência do teor de ar incorporado no comportamento de prismas;
- Avaliar a influência da argamassa sobre o modo de ruptura dos prismas executados com cada tipo de bloco;

1.2 JUSTIFICATIVA

Um dos grandes desafios da construção civil é o desenvolvimento de métodos e tecnologias que proporcionem economia e eficiência no uso de materiais e sistemas construtivos. A alvenaria estrutural surgiu como uma tendência no setor, devido a incorporação de técnicas que diminuían custos e agilizavam processos.

Porém, quando se trata do seu dimensionamento, percebe-se que as normas de alvenaria estrutural tendem a tratar a argamassa apenas como um elemento ligante, de pouca influência sobre o comportamento à compressão, mas alguns estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de demonstrar que a argamassa é um elemento chave sobre o comportamento da alvenaria. Lübeck (2016) afirma que as normas vigentes deveriam definir a resistência da alvenaria como sendo uma função da razão entre resistência do bloco e da argamassa, indicando que, em alguns casos, pode tender a acontecer o esmagamento das juntas de argamassa para um nível de tensão menor que a máxima resistente, comprometendo o comportamento do sistema.

Alguns estudos já tentaram estimar e fornecer equações que representem o comportamento da alvenaria comprimida, inclusive próximo à ruptura, todavia, à medida que novos materiais vão sendo desenvolvidos, são necessárias novas análises que forneçam mais subsídios e complementem o conhecimento técnico.

As argamassas com elevado teor de ar incorporado, como a argamassa estabilizada, por exemplo, são relativamente recentes no mercado nacional, especialmente quando usada para assentamento de alvenaria, e vem se destacando pela maior agilidade na execução de obras. Todavia, é um material com grande quantidade de vazios quando no estado endurecido, o que por sua vez pode interferir na deformabilidade dos prismas ou até mesmo resultar no esmagamento da junta de argamassa devido a presença de poros potencialmente colapsáveis. Sendo essencial estudar suas principais características e limitações quando utilizadas para esse fim.

Dessa forma, justifica-se a necessidade de pesquisas que possam fornecer subsídios para estudos relacionados a melhoria das propriedades mecânicas da alvenaria, por meio da difusão de conhecimento quanto ao entendimento dos mecanismos de ruptura da alvenaria e de como as argamassas de baixa resistência e elevado teor de ar incorporado influenciam no comportamento de prismas frente a esforços de compressão simples.

1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Este trabalho encontra-se dividido em cinco itens: 1. Introdução; 2. Revisão da Literatura; 3. Metodologia; 4. ARTIGO - Efeito de argamassas de baixa resistência na capacidade de deformação e suportes de prismas; 5. Considerações Finais.

A Introdução apresenta um breve histórico sobre o uso da alvenaria estrutural nas construções com o passar dos anos. De modo mais específico, aborda-se a problemática sobre o comportamento de prismas de alvenaria com argamassa de baixa resistência e elevado teor de ar incorporado.

A Revisão da Literatura aborda assuntos que constroem a temática estudada, como os tipos de blocos e argamassas, bem como seus respectivos comportamentos na avaliação da ruptura de prismas. Por fim, é apresentada uma síntese dos resultados de algumas pesquisas relacionadas aos objetivos desse projeto.

A Metodologia aborda os materiais e métodos empregados para obtenção dos resultados e realização dos objetivos propostos, como por exemplo a caracterização dos blocos, argamassa e preparação dos prismas.

Após a apresentação da Metodologia, é apresentado o Artigo que reflete o produto desta pesquisa, apresentando a avaliação do comportamento da alvenaria, quanto a deformabilidade e resistência de prismas comprimidos produzidos com argamassas de baixa resistência e elevado teor de ar incorporado.

E por fim o último capítulo com as conclusões gerais do estudo, sugestões para estudos futuros e referências bibliográficas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria portante é o sistema construtivo mais antigo que se tem informações, utilizado desde o início da história do homem. Pressupõe-se que a alvenaria tenha sido criada por nômades há 15.000 anos, como forma de se abrigar das intempéries como o frio, empilhando pedras como forma de construir um local seguro (GALLEGOS, 1991).

Accetti (1998) discorre que a alvenaria tem sido amplamente utilizada pelo homem na construção de templos religiosos e monumentos. Os materiais mais antigos que foram comumente usados são os blocos de pedra, principalmente pelos gregos, egípcios e romanos na construção de pirâmides, fortalezas e igrejas (CUNHA, 2001).

Considerada até o final do século XIX como um dos principais métodos construtivos, a alvenaria tem uma larga história na antiguidade, caracterizada por obras de grande vulto e perenes (SILVA, 2003). O pouco conhecimento em técnicas e materiais não foram obstáculo para a construção de obras monumentais de alvenaria, como as pirâmides do Egito, o Coliseu de Roma, o Partenon na Grécia e a muralha da China, demonstrando a durabilidade e confiabilidade do sistema (VILLAR, 2005).

A alvenaria estrutural moderna é um tipo de sistema construtivo onde as paredes são elementos portantes, constituídos por elementos de alvenaria, que são unidos por juntas de argamassa com capacidade de resistir a cargas além do seu peso próprio (PRUDÊNCIO JR *et al.*, 2002). De acordo com Ramalho e Corrêa (2003), a alvenaria estrutural está ligada ao conceito de transmissão de ações por meio de tensões de compressão. Sendo a definição mais relevante a ser discutida quando se trata de alvenaria como processo construtivo de estruturas. As tensões de tração devem ser restritas a regiões limitadas da estrutura e a não devem ser de valor elevado.

Compondo os materiais utilizados na alvenaria estrutural estão os blocos, com uma vasta gama de diferentes tipologias, espessuras e formatos, sendo necessário o desenvolvimento de produtos com eficiência e capacidade de resistência maiores (RIZZATTI *et al.*, 2011).

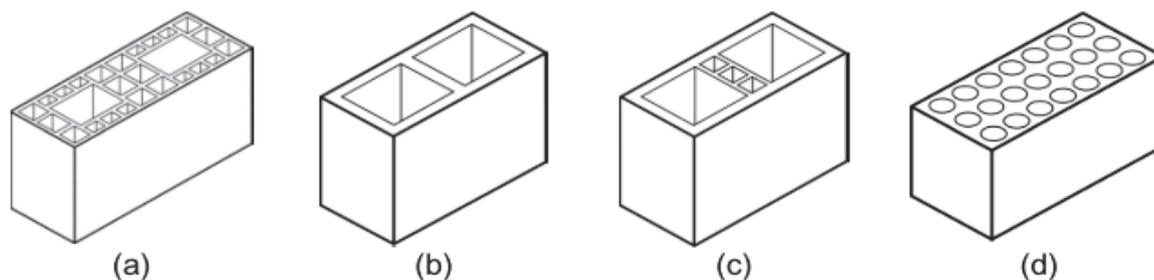
2.1.1 Tipos de blocos

Os blocos são componentes fundamentais para a execução da alvenaria, correspondendo a aproximadamente 80% do volume total das paredes e, assim, desempenham papel importante para a sua resistência e comportamento. Geralmente quanto mais resistente o bloco, maiores os esforços que a alvenaria suportará. No Brasil os tipos de blocos mais utilizados são o cerâmico e os de concreto, ambos empregados na alvenaria estrutural (GALLEGOS, 1991).

Os blocos cerâmicos geralmente são fabricados por extrusão da mistura, com um ou mais tipos de argilas e adições, com temperatura de queima variando entre 800 e 1100 °C em fornos do tipo capela ou os mais modernos do tipo túnel (PARSEKIAN; SOARES, 2010). Já os blocos de concreto envolvem processos de moldagem da mistura em consistência rija, em equipamentos vibro-compactadores e, posteriormente, passados para a etapa de cura e armazenagem (SALVADOR FILHO, 2007).

De acordo com a norma brasileira NBR 15270-1 (ABNT, 2017), blocos estruturais são elementos com furos prismáticos perpendiculares ao carregamento principal ao qual estão submetidos. São assentados com os furos na vertical quando possuem função estrutural e furos na horizontal quando funcionam como vedação. Ainda segundo a norma, os blocos cerâmicos podem ser classificados de acordo com os aspectos de suas paredes internas e externas, como visto na Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos blocos de acordo com a NBR 15270-3, a) bloco cerâmico estrutural de parede vazada; b) bloco cerâmico estrutural de parede maciça; c) bloco cerâmico estrutural com paredes maciças e paredes internas vazadas; d) bloco cerâmico estrutural perfurado.



Fonte: (NBR 15270-3).

No mercado da construção existem diversos tipos de unidades que são comercializadas e variam de acordo com a função que exercem na estrutura. Além dos blocos paralelepípedicos, também são encontrados os do tipo canaleta que permitem a utilização em cintas de amarração, montagem de lajes, vergas e contravergas. Variam ainda de acordo com a família (dimensões de 29 e 39 cm) e possuem dimensões mínimas que devem ser atendidas no processo de fabricação, em consonância com a NBR 15270-1 (ABNT, 2017) (Tabela 1).

Tabela 1 - Dimensões normativas para fabricação de blocos cerâmicos estruturais.

Dimensões L x H x C	Dimensões de fabricação cm					
	Largura (L)	Altura (H)	Comprimento (C)			
			Bloco principal	½ Bloco	Amarração (L)	Amarração (T)
(5/4)M x (5/4)M x (5/2)M	11,5	11,5	24	11,5	-	36,5
(5/4)M x (2)M x (5/2)M		19	24	11,5	-	36,5
(5/4)M x (2)M x (3)M			29	14	26,5	41,5
(5/4)M x (2)M x (4)M			39	19	31,5	51,5
(3/2)M x (2)M x (3)M	14	19	29	14	-	44
(3/2)M x (2)M x (4)M			39	19	34	54
(2)M x (2)M x (3)M	19	19	29	14	34	49
(2)M x (2)M x (4)M			39	19	-	59

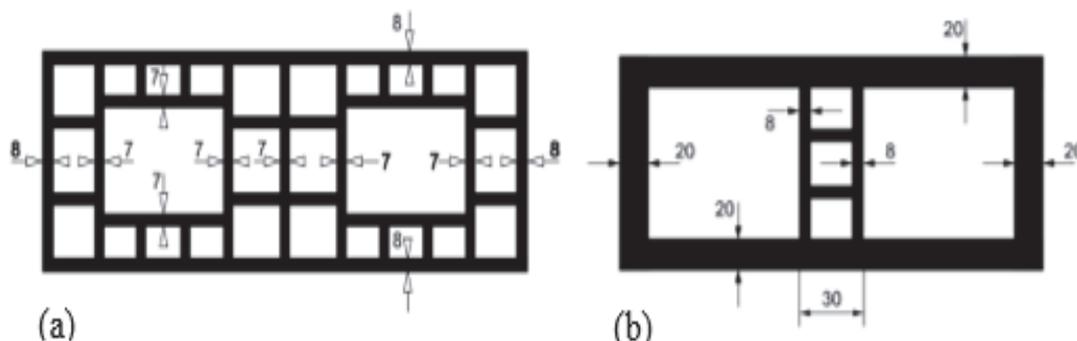
Bloco L – bloco para amarração em paredes em L

Bloco T – bloco para amarração em paredes em T

Fonte: (ABNT, 2017).

Além das dimensões mínimas, os blocos devem atender às características geométricas de medidas padronizadas para septos (Figura 2), as tolerâncias de desvio em relação ao esquadro (no máximo 3 mm), planeza ou flecha (no máximo 3 mm) e o índice de absorção de água não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%. A NBR 15270-2 (ABNT, 2017), especifica também que o bloco deve ter resistência característica a compressão de no mínimo 3 MPa, medido em sua área bruta.

Figura 2 – Espessura mínima para septos (mm), a) bloco estrutural de parede vazada; b) bloco estrutural de parede maciça.



Fonte: (ABNT, 2017).

2.1.2 Argamassas

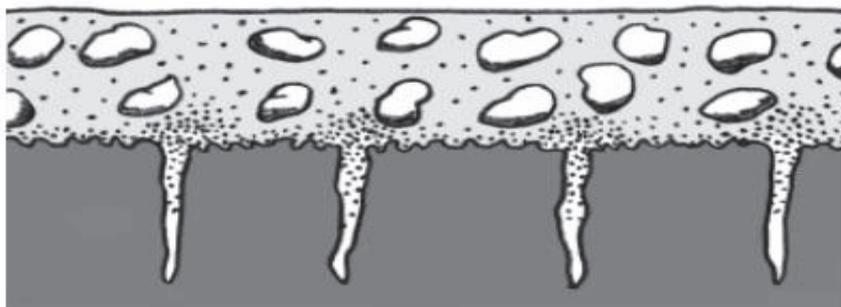
Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), a argamassa é uma mistura de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, podendo ou não conter aditivos, de forma que tenha propriedades de aderência e endurecimento, sendo dosada em obra ou em instalação própria. De acordo com seu tipo, pode ser utilizada para assentamento de alvenaria, revestimento de paredes e tetos, uso geral, para reboco, decorativa em cama fina e decorativa em monocamada.

De acordo com Mota (2001), as argamassas podem ser de cal, quando este é o único aglutinante da mistura, de cimento, o qual adquire resistência com maior velocidade, e as mistas que são compostas tanto por cal quanto por cimento. Assim, Sabbatini (1998) explica que quanto maior quantidade de cal na mistura, menor a resistência a compressão e quanto maior a quantidade de cal, maior a trabalhabilidade.

As principais funções da argamassa são: distribuição uniforme e união entre os blocos, absorção das deformações as quais a alvenaria estiver sujeita, impermeabilização das juntas impedindo a infiltração de água e a passagem de insetos (CARVALHO, 2003).

Esse material vai aglutinando ao substrato à medida que vai penetrando os poros presentes na superfície dos blocos, gerando uma aderência entre a argamassa e a unidade. Uma adequada aderência ocorre quando há sucção dos poros da base onde ocorre o endurecimento e através das reentrâncias e saliências macroscópicas da superfície (Figura 3) (ABCP, 2013).

Figura 3 – Aderência adequada entre o revestimento e o substrato.



Fonte: (ABCP, 2013).

A aderência é uma característica importante porque solidariza e regulariza as unidades, permitindo um melhor desempenho do conjunto. No caso da alvenaria estrutural, as propriedades mais importantes da argamassa são a trabalhabilidade, consistência, aderência e a capacidade de absorver deformações, sua resistência à compressão teria uma influência significativa nas características da parede (SANTOS, 2008). A resistência à compressão da argamassa quando aplicada nas juntas de alvenaria tende a crescer de acordo com a qualidade da unidade e das tensões de confinamento, mas esse aumento é menos significativo do que aquele ocorrido pelo aumento da resistência das unidades (RIZZATTI, 2003).

A NBR 16868 (ABNT, 2020) recomenda que, para evitar risco de fissuras, a resistência à compressão da argamassa para assentamento seja limitada a 1,5 vez da resistência característica especificada para bloco na área líquida. Já NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as argamassas de acordo com as características que apresentam na resistência à compressão, densidade no estado endurecido, resistência a tração na flexão, capilaridade, densidade de massa no estado fresco, retenção de água e resistência de aderência na tração, determinados através de ensaios (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação das argamassas conforme NBR 13281 (ABNT, 2005).

Classe	Resistência compressão axial (MPa)
P1	≤ 2,0
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,5 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	> 8,0

Fonte: (ABNT, 2005).

2.1.2.1 Argamassa estabilizada

As argamassas estabilizadas têm suas origens atreladas às argamassas industrializadas, que apesar desta última ter origem na década de 50 (SILVA, 2007), no Brasil essa utilização ocorreu de forma mais tardia, com seu emprego com mais amplitude deu por volta dos anos 90 quando houve maior investimento de indústrias cimenteiras (SELMO *et al.*, 2002).

A necessidade de maior racionalização das construtoras permitiu então o aparecimento da argamassa estabilizada, que ainda possui uma produção baixa em relação à Europa, mas vem sendo empregada com maior frequência nos últimos anos como revestimento ou como assentamento de alvenaria. De acordo com Shmid (2011), no Brasil, no ano de 2007, existiam apenas 12 fabricantes de argamassa estabilizada, com produção anual de 0,4 mil m³, enquanto na Europa haviam 500 fábricas produzindo 18 mil m³ ao ano.

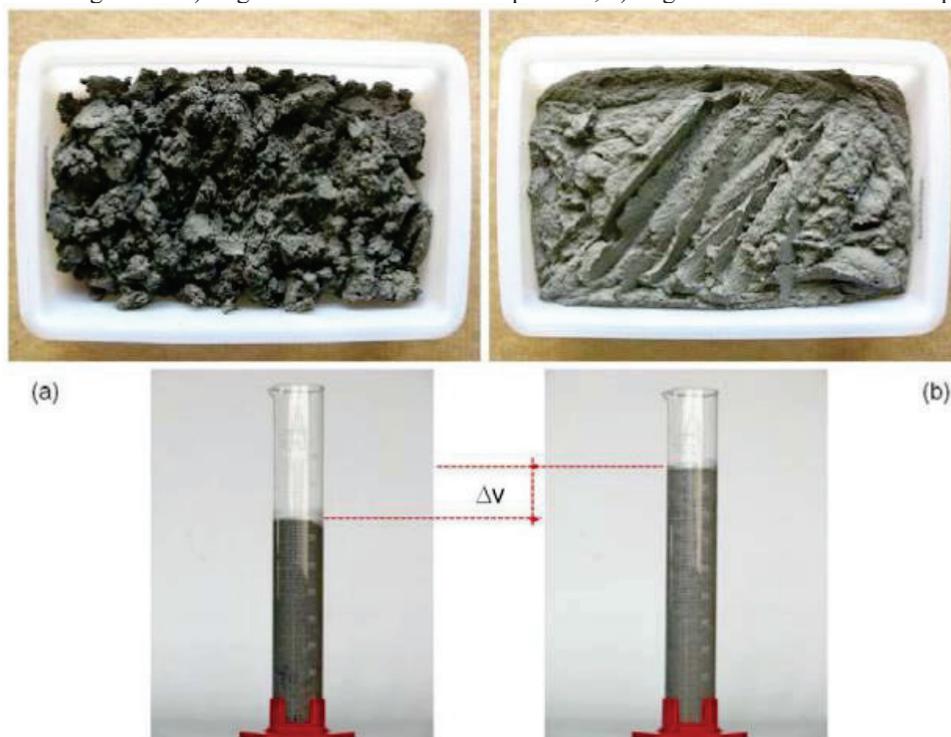
De forma geral, as argamassas estabilizadas são produtos fabricados em centrais de dosagem e transportadas para a obra já prontas para o uso. Sua composição emprega os mesmos materiais que as argamassas industrializadas, exceto que algumas não possuem cal e são incrementadas com aditivos para se manterem trabalháveis por mais tempo.

Segundo Matos (2013), os benefícios da utilização desse tipo de argamassa incluem o aumento do rendimento, a redução de perdas, maior limpeza da obra, redução de responsabilidade quanto a dosagens dentro do canteiro de obras, maior precisão no traço, melhora da logística e redução da demanda de mão de obra.

Conforme alguns fabricantes, são encontradas no mercado argamassas com tempo de estabilização de 24, 36 e 72 horas, nas quais são utilizados aditivos retardadores de pega, para manter o tempo de estabilização de forma a prolongar o início do processo de hidratação, e aditivos incorporadores de ar para colaborar na trabalhabilidade e na retenção de água.

Os aditivos incorporadores de ar são tensoativos aniônicos, os quais tendem a adsorver nas partículas sólidas da pasta através da sua parte polar, dando um caráter hidrofóbico às partículas de cimento, assim são formadas bolhas de ar pelos tensoativos que estão livres na fase aquosa e não foram adsorvidos (ALVES, 2002). Essas bolhas de ar que são criadas tornam a argamassa mais porosa e, por consequência, alteram sua trabalhabilidade e plasticidade e, portanto, aumentam o volume da pasta (Figura 4). Assim, quanto mais aditivo incorporador na mistura, menor é a resistência de aderência entre a argamassa e o substrato, devido à presença das bolhas que diminuem a área de contato (BAUER *et al.*, 2015).

Figura 4 – a) Argamassa sem aditivo incorporador; b) Argamassa com aditivo incorporador.



Fonte: (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018).

Na literatura é possível encontrar resultados de ensaios experimentais que apontam a argamassa convencional com teores de até 12% de ar incorporado, enquanto nas estabilizadas, dependendo da quantidade de aditivo, é possível encontrar variações entre 16 e 32%. Essa quantidade de ar incorporado gera efeitos nas características tanto no estado fresco quanto no endurecido, de modo que há ganhos na consistência e a resistência a compressão e a flexão acabam sendo inferiores nas argamassas com esse tipo de aditivo do que em argamassas ditas convencionais (MONTE; UEMOTO; SELMO, 2003).

Antoniazzi (2019) avaliou o uso de aditivo estabilizador de hidratação em misturas de argamassa variando a porcentagem em 0,0%, 0,6% e 0,9% de aditivos estabilizador de hidratação (AEH) e em 0,0%, 0,2% e 0,4% de aditivo incorporador de ar (AIA). A pesquisadora constatou que quando o aditivo AEH foi utilizado de forma isolada e em teor moderado, como na argamassa (0,6/0,0), com 0,6% de aditivo AEH e 0% de AIA, houve um ganho de resistência, como também verificado em estudos realizados por Bauer e Oliveira (2017). A resistência a compressão aos 7 e 28 dias foi 15% superior à argamassa de referência com (0,0/0,0), passando a 23,7% em 42 dias.

A argamassa com maior teor de AEH isolado (0,9/0,0), atingiu a metade da resistência da de referência (0,0/0,0) aos 7 dias. Essa diferença diminuiu em 42 dias, todavia, ainda resultou em um valor 15% menor que o obtido pela argamassa de referência nessa idade. Isso se deve principalmente pelo emprego de AEH em altos teores, pois elevou o tempo de pega das argamassas e retardou a hidratação do cimento e a formação dos compostos resistentes. Essa diminuição de resistência mecânica relacionada a altos teores de AEH também foi verificada por Fioravante (2014), Bellei e Caten (2014) e Bauer e Oliveira (2017). Já o emprego isolado de AIA diminuiu a resistência das argamassas em todas as idades ensaiadas. Mesmo com o menor teor empregado (0,0/0,2), a resistência à compressão atingiu 53% da resistência da argamassa de referência aos 28 dias. Enquanto o teor (0,0/0,4) alcançou apenas 39% da resistência.

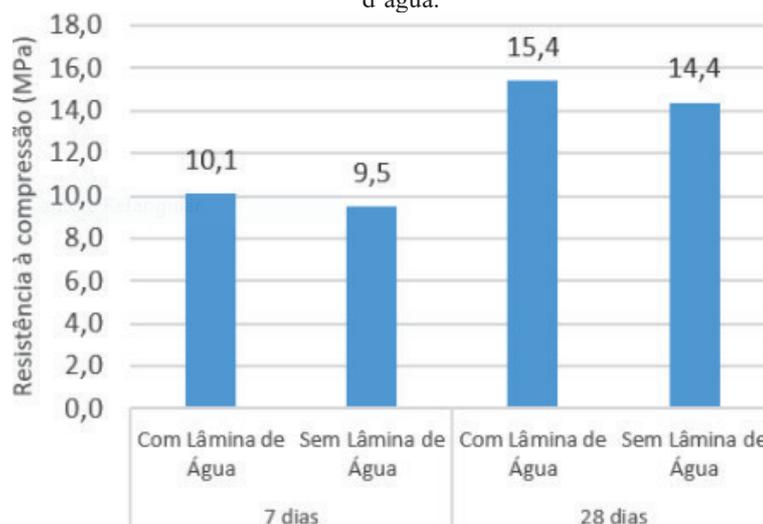
Nas pesquisas de Casali *et al.* (2011), observou-se que o alto teor de ar incorporado é recorrente tratando-se de argamassas estabilizadas. Em argamassas sem esse aditivo, os teores de ar incorporado são significativamente mais baixos, entre 4% e 12% (BRUGALI; CASAGRANDE; STOLZ, 2019; SCHACKOW *et al.*, 2019). Nos ensaios da resistência à compressão em estado endurecido, foi verificado que o traço de 36h apresentou resistência maior que o traço de 72h. O fato se justifica devido a argamassa de 72h ter recebido maior quantidade de aditivo estabilizador de hidratação, o que reflete na redução da sua resistência mecânica, conforme também obtido por Bauer e Oliveira (2017) e Schackow *et al.* (2019).

Os estudos de Guindani (2018) demonstraram uma redução significativa na resistência à compressão das argamassas com base na alta dosagem de aditivos estabilizadores, encontrando uma diferença de mais de 10 vezes para amostras com aditivo, que são pastas que apresentam comportamento irregular, com queda brusca da fluidez. Estudos realizados por Oliveira (2019) demonstraram que na condição de estado fresco, o aumento do módulo de finura também elevou o teor de ar incorporado, reduziu a coesão e a retenção de água, e elevou da consistência. As mesmas variações foram encontradas nas argamassas dosadas com menor teor de aditivo incorporador de ar e nas com maior teor de aditivo. Já os aditivos estabilizadores prolongam a reação do cimento enquanto o material está saturado e, devido a isso, há a necessidade de armazenar esse tipo de argamassa com uma película de água sobre a superfície (BAUER *et al.*, 2015).

Os estudos de Arnez, Girardi e Hastenpflug (2017) visaram avaliar as características da argamassa estabilizada com e sem a lamina d'água em condições pré-saturadas e seca. Os autores concluíram que o armazenamento com lâmina apresenta ganhos de resistência à compressão (Figura

5), havendo um incremento de 5,94% na resistência aos 7 dias e 6,5% aos 28 dias. Esse aumento, nessas condições, também foi observado por Casali *et al.* (2011).

Figura 5 - Resistência média à compressão para argamassas estabilizadas armazenadas com e sem lâmina d'água.



Fonte: (ARNEZ; GIRARDI; HASTENPFLUG, 2017).

2.2 COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES

Para compreender os mecanismos de ruptura da alvenaria é importante entender os comportamentos de cada elemento isolado, o efeito do conjunto e os fatores que influenciam nessa ruptura, os itens a seguir descrevem a influência desses fatores.

2.2.1 Comportamento do bloco

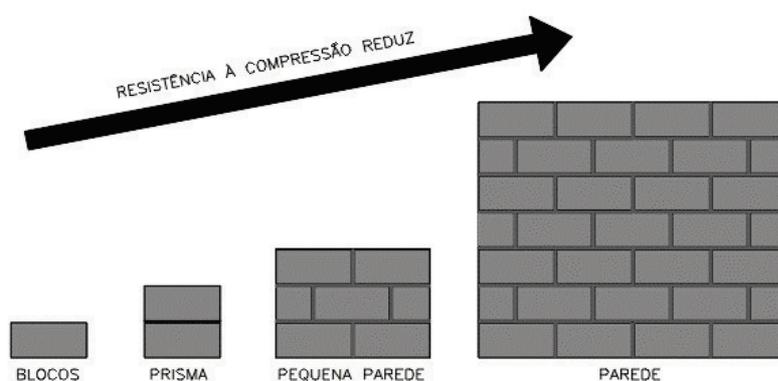
O bloco é o principal componente da alvenaria estrutural, desse modo suas características mecânicas influenciam de forma direta no desempenho da alvenaria. De acordo com Mohamad (1998), as principais características influentes do bloco no comportamento da alvenaria são: resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração e coeficiente de Poisson.

2.2.1.1 Relação entre a resistência à compressão do prisma e do bloco

A resistência à compressão do bloco é uma medida indireta da sua qualidade e uma das principais características que deve ser levada em consideração no momento de análise de resistência de prismas e paredes. Em projetos, normalmente utiliza-se a resistência à compressão na área bruta, sem descontar os vazios.

De forma geral, a resistência a compressão da parede é menor que a do prisma e ambas são menores que a resistência do bloco (Figura 6). Garcia (2000) explica que embora os valores de resistência de cada conjunto sejam diferentes, há correlações que podem ser feitas entre bloco e parede ou bloco e prisma afim de determinar a capacidade última de cálculo. Em algumas referências essas relações são chamadas de fator de eficiência, contudo, atualmente esse termo tem caído em desuso por não representar uma eficiência propriamente dita.

Figura 6 – Resistência à compressão dos elementos de ensaio.



Fonte: (GARCIA, 2000).

Através da NBR 16868 (ABNT, 2020), a resistência característica da alvenaria (f_k) pode ser estimada como 70% da resistência característica do prisma (f_{pk}) ou ainda 85% da resistência característica de pequena parede (f_{ppk}), todos em relação a área bruta. Além disso, existe um fator de eficiência entre a resistência do bloco ou prisma e a resistência da parede, fator esse utilizado para determinação dos valores a serem empregados em projetos (GARCIA, 2000). Esse fator pode ser estipulado através da Equação (1):

$$\eta = \frac{f_{pk}}{f_{bk}} \quad (1)$$

Sendo:

η – fator de eficiência.

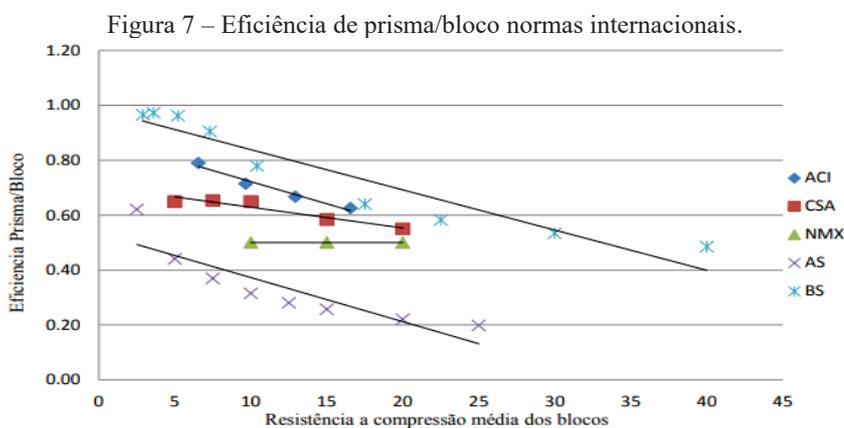
f_{pk} – resistência a compressão do prisma ou da parede.

f_{bk} – resistência a compressão do bloco.

Fortes (2012) ilustrou a relação entre a resistência média de prismas e blocos de acordo com normas internacionais (Figura 7). Embora cada autor leve em consideração um tipo de fator, pode-se observar que quanto maior a resistência dos blocos menor é a eficiência prisma/bloco.

Ramalho e Corrêa (2003) citam que em geral no Brasil o valor de eficiência varia entre 0,2 e 0,5 para blocos cerâmicos e 0,3 e 0,6 para prismas. Em seus estudos, Mohamad (1998) teve como resultado que prismas de argamassa com resistência igual à do bloco na área líquida apresentaram um fator de eficiência próximo a 1, assim conforme a resistência da argamassa foi sendo reduzida, ocorreu também uma redução do fator de eficiência.

Para Rizzatti *et al.* (2011), quanto maior a resistência do bloco, consideravelmente maior será a resistência da alvenaria, porém essa relação não é proporcional. Fatores como resistência a tração e geometria do bloco influenciam nesse valor (MOHAMAD *et al.*, 2017). Hendry (1998) presume que a resistência da alvenaria é próxima a raiz quadrada do valor de compressão do bloco.

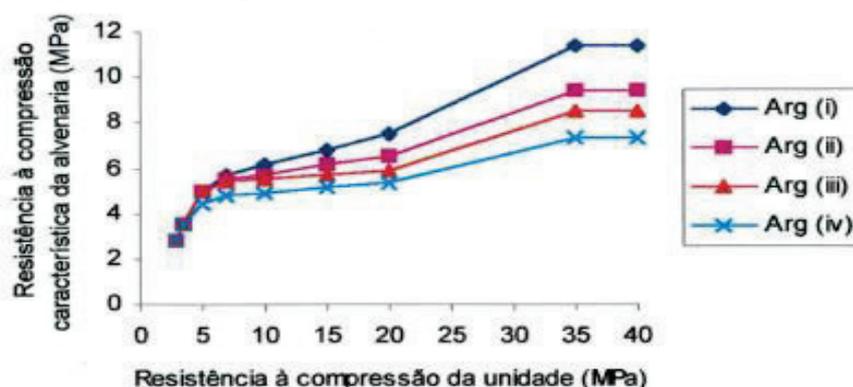


Fonte: (FORTES, 2012).

Portella (2015) avaliou o fator de eficiência prisma/bloco a partir de centenas de resultados de testes de prismas de alvenaria executados com blocos cerâmicos. Segundo o autor, quanto maior a resistência do bloco, menor o fator de eficiência obtido. Para blocos cerâmicos de até 8,5 MPa de resistência à compressão na área bruta, o fator de eficiência obtido foi de 50%, já para blocos de até 15 MPa de resistência, o fator de eficiência obtido foi de 35%.

A Norma Inglesa BS 5628:1 (BSI, 2005) estipula as curvas de relações entre a resistência do bloco com a resistência da parede, a partir de quatro tipos de argamassa (Figura 8). Para blocos acima de 35 MPa, a norma considera uma estabilização na resistência à compressão característica da alvenaria.

Figura 8 – Resistência a compressão do bloco *versus* da alvenaria com relação h/t de 2 a 4, para diferentes tipos de argamassa de acordo com a BS 5628:1.



Fonte: (ROMAGNA, 2000).

2.2.1.2 Módulo de elasticidade do bloco

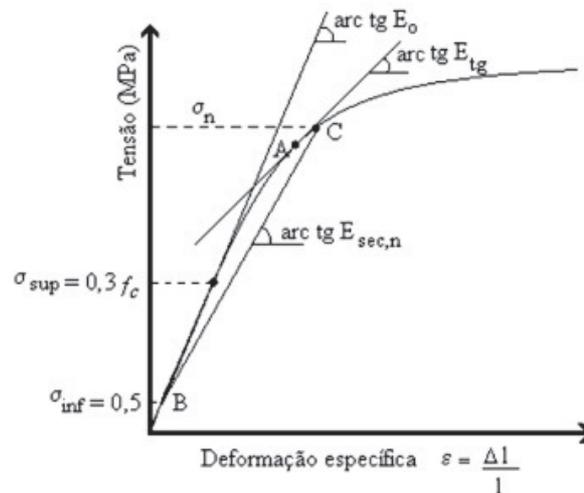
O módulo de elasticidade (E) é um coeficiente que determina a proporção entre a tensão e a deformação específica de um material quando submetido a um carregamento enquanto no regime elástico.

No Brasil, não existe normatização específica que regulamente o ensaio de módulo de elasticidade em blocos cerâmicos ou de concreto, entretanto, essa propriedade é determinada a partir de ensaios que seguem os procedimentos adaptados da NBR 8522 (ABNT, 2017). Como

nem sempre o comportamento tensão-deformação é linear, esta norma permite calcular três tipos de módulos de elasticidade, sendo eles (Figura 9):

- Módulo de elasticidade inicial (E_0) – inclinação de reta que passa o ponto de tensão igual a 0,5 MPa (σ_{inf}) e pelo ponto com tensão igual a 30% da tensão de ruptura (σ_{sup});
- Módulo de elasticidade secante (E_s) – declividade da reta que passa pelo ponto de tensão igual a 0,5 Mpa e a qualquer tensão maior que σ_n ;
- Módulo de elasticidade tangente (E_{tg}) – declividade de uma reta tangente à curva tensão-deformação em qualquer ponto dela.

Figura 9 - Avaliação de diferentes módulos de elasticidade.



Fonte: (ABNT, 2017).

O ACI – Building Code 318 (ACI, 1995) também adota a mesma equação de elementos de concreto, com massa específica variando entre 1442 e 2483 kg/m³, para cálculo do módulo de elasticidade secante (Equação 2).

$$E_b = 0,0428 \cdot f_b^{1/2} \cdot w_b^{1,5} \quad (2)$$

Sendo:

E_b – módulo de elasticidade do bloco (MPa).

f_b – resistência a compressão do bloco (MPa).

w_b – massa unitária do bloco (kg/m^3).

Santos (2008) discorre que se emprega o comportamento de tensão-deformação para uma carga de 40 a 60% da carga última para a determinação do módulo secante e 30% para o módulo tangente inicial. Drysdale *et al.* (1994) explana que o módulo de elasticidade do bloco varia na faixa de 500 a 1000 vezes sua resistência a compressão, os autores ainda indicam que a relação entre módulo de deformação e resistência a compressão para blocos cerâmicos está entre 210 e 1670, faixas de variação extremamente amplas.

2.2.2 Comportamento da argamassa

A argamassa de assentamento tem a função de elo de ligação na alvenaria, contribuindo no desempenho do conjunto, solidarizando os blocos e formando um compósito monolítico. A influência as propriedades da argamassa, em especial a resistência, tem sobre o comportamento da alvenaria já foi avaliada por diferentes autores em diferentes épocas e a concordância comum é que não se tem ganhos significativos na alvenaria ao aumentar a resistência da argamassa, entretanto a mesma tem grande influência no modo de ruptura dos prismas.

Gomes (1983) avaliou a influência do aumento da resistência da argamassa no comportamento de paredes de alvenaria, o autor explanou que quando há um aumento da resistência da argamassa, a ruptura da alvenaria torna-se excessivamente frágil e o conjunto acaba não acompanhando os movimentos da estrutura. Entretanto, quando se utilizam argamassas de baixa resistência, não acontece uma adequada distribuição das tensões, diminuindo a resistência à tração e a aderência. O autor recomenda que a resistência à compressão da argamassa deve ser maior que 70% da resistência do bloco, no entanto menor que a resistência à compressão dos mesmos.

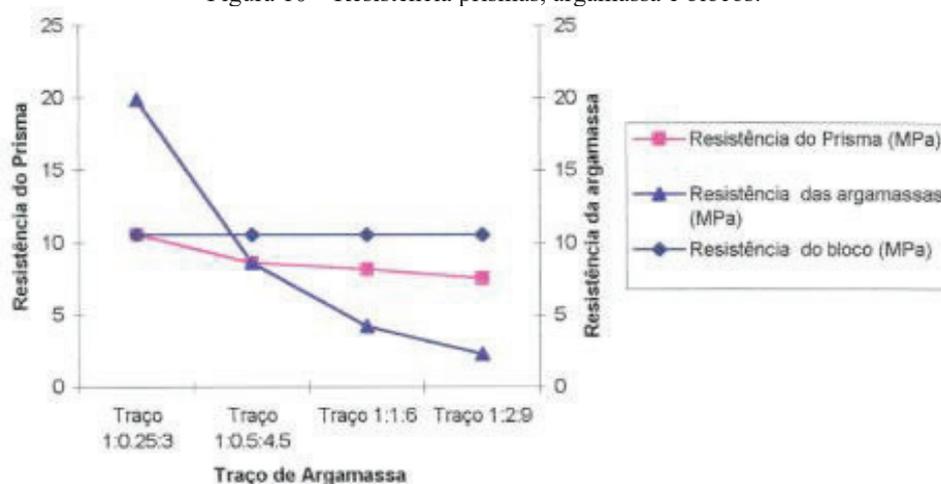
Mohamad (1998) sugere que a resistência da argamassa seja entre 0,7 e 1,0 da resistência do bloco na área bruta. Entretanto, a NBR 16868 (ABNT, 2020) preconiza que as argamassas tenham uma resistência a compressão máxima de 1,5 da resistência do bloco na área bruta.

Os estudos de Mohamad (1998) avaliaram a resistência de prismas para um mesmo nível de resistência de bloco, variando a resistência da argamassa (Figura 10). Analisou-se que o aumento da resistência de prismas não é proporcional ao aumento da resistência da argamassa, com

argamassas fracas a variação na resistência dos prismas é mais perceptível que com argamassas fortes.

Para Freitas (2008) é necessária uma argamassa com menor relação rigidez/resistência que o bloco para compensar o efeito das deformações do conjunto, pois a alvenaria seria mais sensível às variações no coeficiente Poisson da argamassa do que a sua resistência.

Figura 10 – Resistência prismas, argamassa e blocos.



Fonte: (MOHAMAD, 1998).

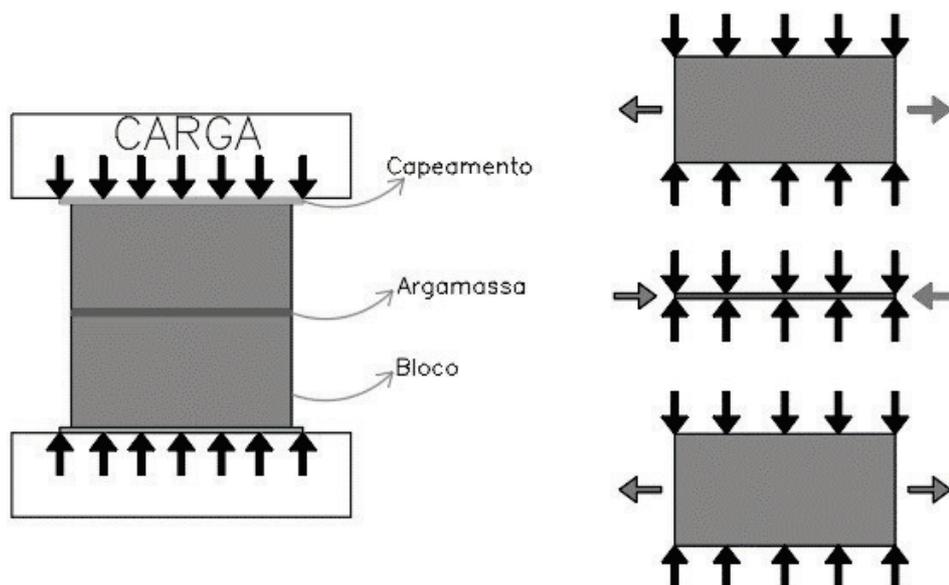
2.2.3 Comportamento da alvenaria na ruptura

A determinação da resistência à compressão do conjunto bloco-argamassa é de extrema importância para verificação dos mecanismos de resistência do sistema construtivo. A compressão é um dos principais esforços que a alvenaria estrutural está sujeita, uma vez que esse método construtivo é autoportante e que grande parte das paredes da edificação tem função estrutural, devendo transmitir/resistir forças compressivas advindas de pavimentos superiores e descarregá-las na fundação.

De forma geral, a alvenaria quando submetida a um esforço de compressão, resulta sob um estado de tensões biaxial gerado pelas diferenças de características entre o bloco e a argamassa (GOMES, 2001). Pela aderência existente na superfície de contato bloco-argamassa, quando o conjunto é comprimido axialmente, a argamassa normalmente mais deformável que o bloco, fica impedida de se expandir lateralmente, ficando confinada. A mesma ação que confina a argamassa,

demanda os blocos à tração lateral (PARSEKIAN; SOARES, 2010). O efeito das tensões pode ser visualizado através da Figura 11.

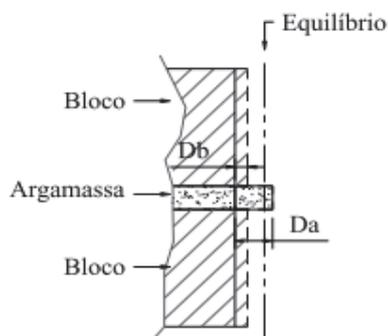
Figura 11 – Tensões no conjunto bloco/argamassa.



Fonte: (ADAPTADO DE PARSEKIAN; SOARES, 2010).

Na Figura 12 exemplifica-se as tendências de deformação da argamassa de assentamento e dos blocos quando o conjunto é comprimido. A alvenaria ao sofrer compressão tem a tendência de gerar uma expansão lateral na argamassa (D_a) maior que no bloco (D_b). Desse modo, quanto maior a diferença entre o módulo de elasticidade da argamassa e do bloco, maiores as tensões que se desenvolvem horizontalmente (LÜBECK, 2016).

Figura 12 – Deformação gerada no conjunto bloco/argamassa pelo confinamento.



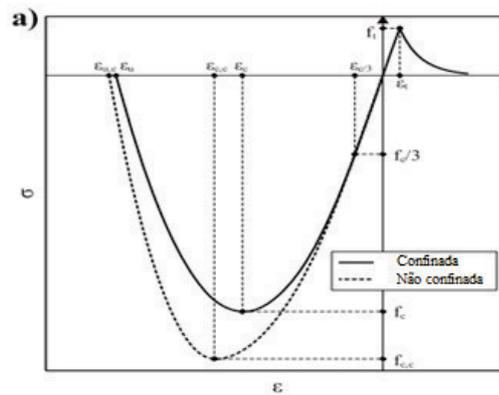
Fonte: (LÜBECK, 2016).

Khoo (1972) foi um dos pioneiros a verificar o comportamento triaxial da argamassa confinada. Seus estudos pontuaram uma dificuldade em manter as pressões laterais constantes, devido as mudanças no volume das amostras. Seus ensaios indicaram uma não correspondência nos resultados de argamassas devido a forma do corpo-de-prova. Assim o autor concluiu que a resistência à compressão da argamassa eleva-se de forma linear com o aumento da tensão confinante.

Atkinson e Noland (1985) também verificaram a curva tensão-deformação das argamassas triaxialmente e puderam concluir o comportamento frágil para baixos níveis de tensão e um comportamento dúctil para altas tensões de compressão. Seus estudos evidenciaram a comportamento não-linear das argamassas confinadas, na proporção de carregamento superior a 50% da carga última.

Os estudos de Drougkas *et al.* (2019) indicam que ocorre um aumento na resistência a compressão da argamassa devido ao confinamento. Esse comportamento foi observado através da curva tensão-deformação devido a diferença de picos de tensão máxima para amostras confinadas e não confinadas (Figura 13).

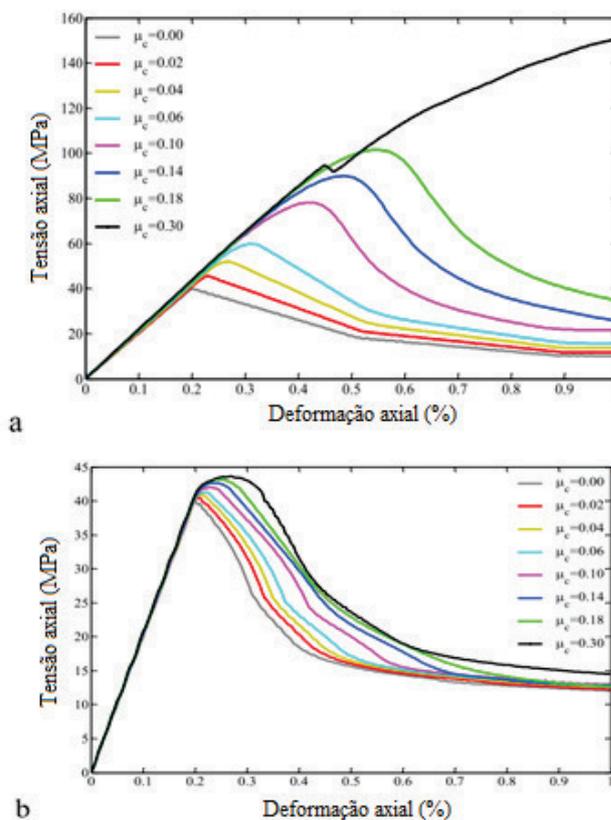
Figura 13 – Curva tensão-deformação para amostras de argamassa confinada e não confinada.



Fonte: (DROUGKAS *et al.*, 2019).

Zheng, Liu e Li (2017) também verificaram esse incremento na resistência. O estudo ainda analisou a questão do atrito (entre bloco e argamassa) e da espessura da junta de argamassa (esbeltez), utilizando um parâmetro λ que correlaciona a espessura, o diâmetro e o coeficiente de Poisson do material, variando o coeficiente de atrito (0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.10, 0.14, 0.18 e 0.30). Os resultados estão indicados na Figura 14 e permitiram avaliar que o atrito e a esbeltez (espessura) influenciam na resistência do conjunto e que a ausência de atrito não altera a variação de esbeltez sob carga se não houver restrições nas extremidades da amostra.

Figura 14 – Curva tensão-deformação para diferentes valores de esbelteza e coeficiente de atrito (a: $\lambda = 0.15$ e b: $\lambda = 1.0$).



Fonte: (ZHENG; LIU; LI, 2017).

Santos (2008) complementa que juntas com espessuras menores comprometem a capacidade da argamassa em acomodar tensões e espessuras maiores que 10 mm influenciam na resistência da alvenaria pelo aparecimento de maiores tensões de tração nas unidades.

Para De Lima (2010) conforme aumenta-se a espessura da junta, ocorre também uma diminuição significativa na resistência do prisma quando sujeito à compressão, além de redução do fator de eficiência da alvenaria e maior potencial de esmagamento para as argamassas mais fracas.

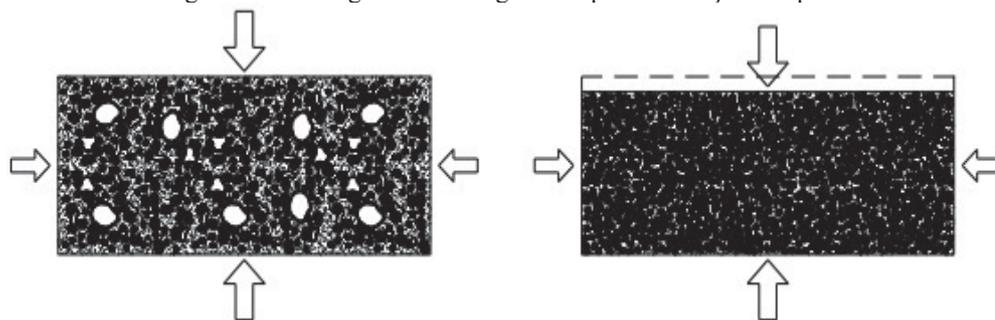
Outros fatores que também interferem na ruptura da alvenaria são: tipo de assentamento da argamassa, ao serem aplicadas só nas paredes longitudinais e verticais podem ocasionar aumento de tensões na alvenaria, o tipo de capeamento e a geometria do bloco. O estudo de Rizzatti (2003) comprovou que em blocos vazados, a disposição e tipo dos furos podem gerar aumento nas concentrações de tensões e reduzir a resistência de forma que há indução de ruptura frágil. Ainda,

o índice de absorção inicial, resistência à compressão da argamassa, o fator de eficiência, e a proporção entre o módulo de elasticidade da argamassa e bloco também interferem no modo de ruptura (MOHAMAD, 1998; SANTOS, 2008).

O tipo de material também causa diferenças na ruptura, os blocos cerâmicos, por exemplo, apresentam uma ruptura mais frágil, com fissuras entre o encontro de paredes longitudinais e no bloco transversalmente e fator de eficiência prisma/bloco menores. Já nos blocos de concreto, a ruptura tende a ocorrer de forma mais dúctil, com fissuração distribuída, com a ruptura iniciando-se pelo esmagamento da junta ou indução de tração no bloco (DE MARCO, 2016).

Outro fenômeno também observado no comportamento da alvenaria próximo à ruptura é o esmagamento da junta de argamassa pelo poro-colapso, esse efeito está relacionado com a destruição dos poros do material. Uma vez que ocorre o fechamento dos macroporos (Figura 15) a junta se compacta e degrada a estrutura resistente da argamassa. A diminuição dos poros resulta inicialmente em diminuição do coeficiente de Poisson até que os poros se fechem, posteriormente ocorre um estado de fissuração excessiva e aumento desse coeficiente (LÜBECK, 2016). Os estudos de Mohamad (1998) concluíram que o poro-colapso acontece quando a deformação de compressão atinge níveis de 0,003 a 0,004 para argamassas com resistência de 5 MPa.

Figura 15 – Esmagamento da argamassa pela destruição dos poros.



Fonte: (LÜBECK, 2016).

Schossler (2019) avaliou o modo de ruptura de prismas de blocos de concreto com resistência na área líquida de 19,89 Mpa e 11,39 Mpa, combinando-os com argamassas de assentamento dosadas em laboratório, com 30 e 70% de resistência média do bloco na área líquida. Ele observou-se que para argamassas de menor resistência, as deformações são mais nítidas na

junta de assentamento, com esmagamento da junta. Já para argamassas de maiores resistências, a deformação ocasiona fissuras nos blocos em níveis maiores de tensão. O autor ainda pontua que a resistência da argamassa não influenciou a resistência última, mas afetou o modo de ruptura dos prismas. A avaliação dos prismas por correlação de imagens, apontou que nos prismas com argamassa menos resistente, a junta de assentamento já apresentava sinais de esmagamento em níveis de carregamento significativamente menores que o máximo medido, com falha da aderência, indicando que a carga máxima não é um parâmetro seguro de avaliação.

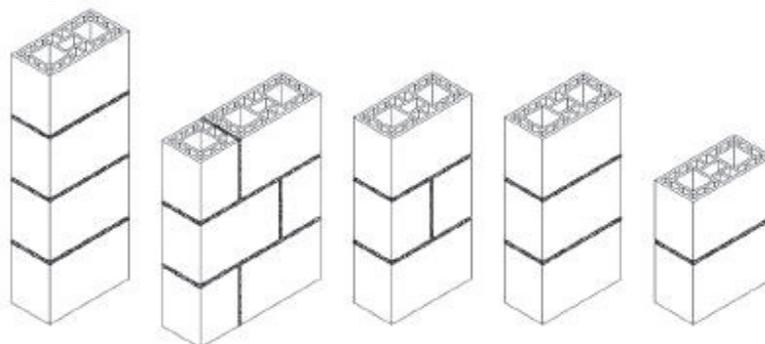
Otoni (2020) analisou o comportamento de prismas comprimidos utilizando blocos cerâmicos de paredes vazadas e de paredes maciças, com resistências médias na área bruta de 9,85 MPa e de 22,50 MPa, respectivamente, com argamassas dosadas em laboratório com resistência média de 30 e 70% da do bloco na área líquida. Segundo os ensaios realizados pelo autor, prismas com blocos de parede maciça e relação $f_a/f_{bm,líquida} = 0,70$ tiveram um comportamento homogêneo, mas quando a relação passou para $f_a/f_{bm,líquida} = 0,30$, os prismas perderam linearidade de comportamento por volta de 40 a 50% da tensão máxima. Já prismas com blocos cerâmicos de parede vazada e $f_a/f_{bm,líquida} = 0,70$, a não linearidade se apresentou por volta de 70 a 80% da tensão máxima do conjunto e para $f_a/f_{bm,líquida} = 0,30$, a perda de linearidade se deu em 30 e 40% da tensão máxima.

2.2.3.1 Deformabilidade e modo de ruptura de prismas

A NBR 16868 (ABNT, 2020) caracteriza prismas como a superposição de dois ou mais blocos, unidos por argamassa com 10 ± 3 mm de espessura, que são destinados a ensaios de resistência à compressão. A NBR 16868 (ABNT, 2020) não especifica os diferentes modelos de prismas que podem ser considerados para o ensaio, porém a NBR 15961 (2011) apresentava diferentes composições de prismas variando o número de blocos, a altura e a espessura da junta de argamassa (Figura 16). O desempenho mecânico de prismas sob compressão é afetado diretamente pelos modos de falha associados às propriedades mecânicas de seus materiais constituintes. O comportamento estrutural das unidades e argamassa em um elemento misto de alvenaria é significativamente diferente do observado em corpos de prova isolados submetidos a ensaios de compressão uniaxial. A resposta mecânica de cada componente individual é função de um comportamento triaxial resultante da complexa interação entre eles. Portanto, os mecanismos de

ruptura de um prisma de alvenaria são uma sequência de efeitos diretamente relacionados à resistência relativa da argamassa e unidades (NALON *et al.*, 2020).

Figura 16 - Modelos de Prismas que podem ser utilizados nos ensaios.



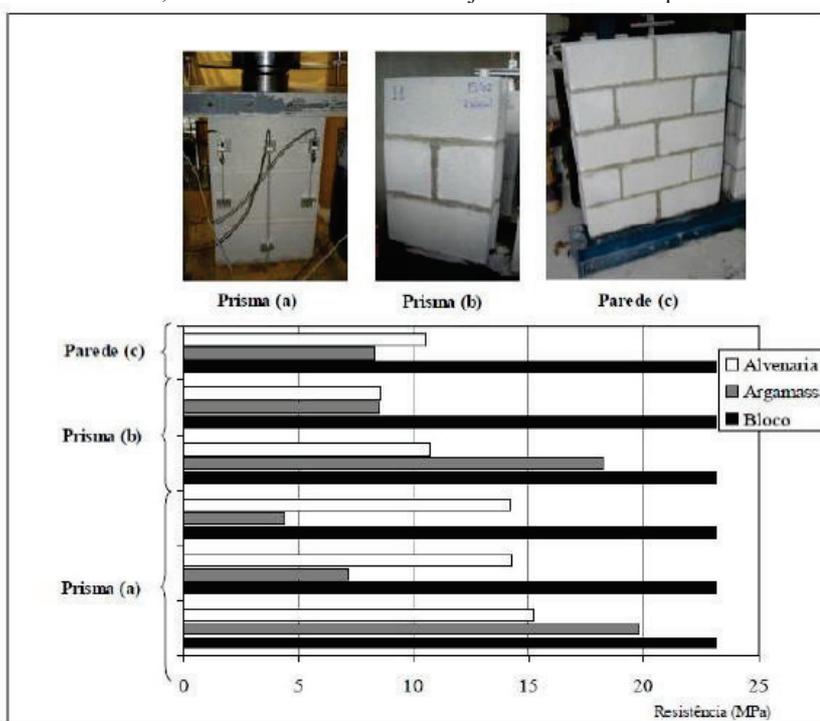
Fonte: (ABNT, 2011).

De modo a avaliar o comportamento da resistência à compressão dos componentes no conjunto da alvenaria e estimar uma combinação de materiais padrão, muitos estudos foram realizados a respeito da compressão de prismas em blocos. De maneira geral, a maioria dos estudos detalha o uso de blocos de concreto, sendo os blocos cerâmicos de parede maciça e parede vazada pouco explorados na literatura internacional. Os estudos citados a seguir abordam esses três tipos de materiais.

2.2.3.1.1 Blocos de concreto

Mohamad (2007) avaliou a resistência à compressão e eficiência de componentes de alvenaria de três formas: a primeira considerando prismas de três blocos inteiros (prisma a); a segunda forma levou em conta prismas de dois blocos inteiros e dois blocos de meio bloco, com uma junta vertical (prisma b) e, por fim, pequenas paredes com dimensão de 0,80 m de comprimento por 1 m de altura (prisma c). Dentre os resultados encontrados, a resistência à compressão foi significativamente diferente entre os prismas do tipo a em relação aos outros dois. Entretanto, ao se comparar os prismas b e c, resultados semelhantes de resistência foram observados (Figura 17).

Figura 17 - Resultados da resistência do bloco, argamassa e alvenaria em função do tipo: a - três blocos inteiros, b - dois blocos inteiros com junta vertical e c - paredes.



Fonte: (MOHAMAD, 2007).

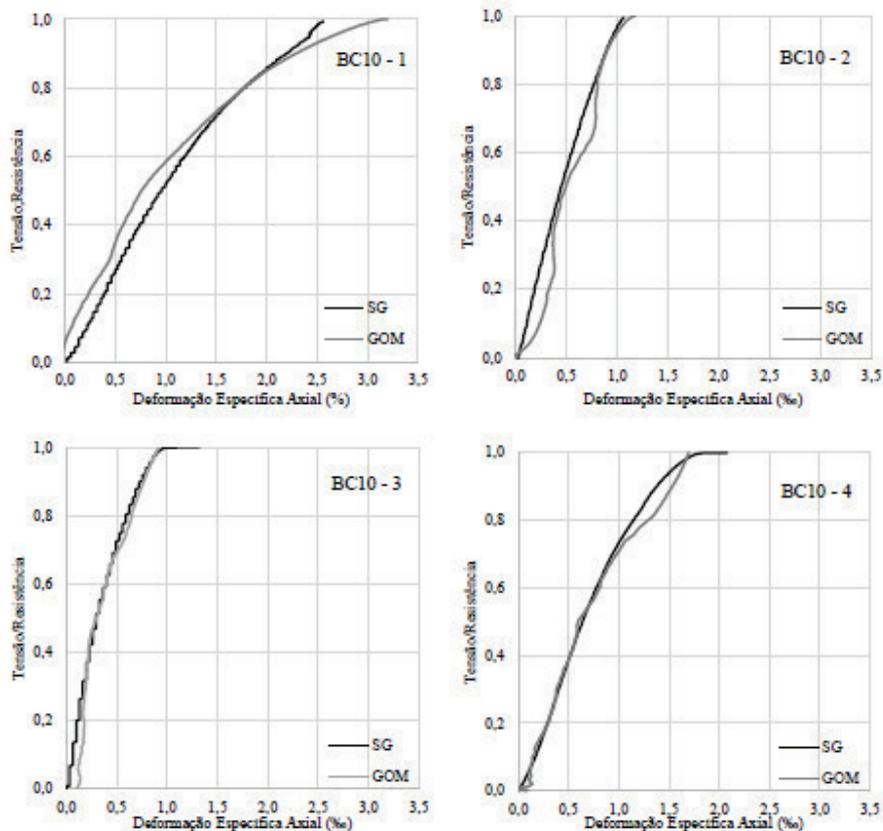
Lübeck (2016) avaliou a influência da argamassa de assentamento no modo de ruptura da alvenaria estrutural, por meio de análises de imagens com sequências elaboradas quadro a quadro da ruptura de prismas, quando submetidos à compressão axial. Foram avaliadas diferentes geometrias de prismas, com duas ou três fiadas de altura, com ou sem juntas verticais; três tipos de blocos, cerâmicos de paredes vazadas, cerâmicos de paredes maciças e bloco de concreto, e, argamassa de alta e baixa resistência. Duas argamassas foram avaliadas, ambas industrializadas, a primeira com resistência à compressão nominal de 4 MPa (fraca) e a segunda com 15 MPa (forte). Foram avaliados prismas de dois blocos de altura, executados com blocos cerâmicos de paredes maciças e vazadas, além de blocos de concreto. Além disso, o autor analisou o comportamento tensão-deformação de corpos-de-prova de argamassa com pequena altura sujeitos a compressão confinada e, por meio da viabilização de um modelo numérico em elementos finitos. Na primeira análise (visual) foi constatado que a argamassa de assentamento pode sofrer esmagamento e alterar o modo de ruptura da alvenaria. Na segunda abordagem adotada (resistência a compressão

confinada) pode-se notar que a propagação de trincas no material próximo a ruptura altera as propriedades mecânicas e poderia ser usada como uma medida do avanço da degradação.

O estudo de Mohamad *et al.* (2017) relata os modos de ruptura de prismas de alvenaria de concreto vazado, levando em consideração o comportamento tensão-deformação do bloco e da argamassa. Os autores realizaram ensaios experimentais em prismas de três blocos de altura, construídos por uma combinação de um tipo de bloco oco e três argamassas com diferentes resistências. A resistência à compressão das argamassas (3 tipos de traços) variou entre 3,8 MPa a 20,6 MPa, já a resistência à compressão dos blocos variou de 20,0 MPa a 26,2 MPa. A principal conclusão foi que a argamassa em todos os casos governa o mecanismo de falha da alvenaria. O modo de falha típico observado durante os ensaios para alvenaria com argamassa forte foi devido às tensões de tração desenvolvidas no bloco. Para alvenaria construída com duas argamassas fracas diferentes, à medida que a relação tensão/resistência aumentava, a razão entre os módulos de elasticidade da alvenaria e da argamassa diminuía para 0,32 e 0,55, para a argamassa fraca e a mais fraca, respectivamente. O modo de ruptura observado para essas duas argamassas foi semelhante, em ambos os casos a alvenaria falhou devido ao esmagamento localizado da argamassa. De maneira geral, os autores recomendam que uma previsão robusta e confiável da resistência à compressão da alvenaria requer o uso da relação tensão-deformação não linear dos materiais componentes.

Schossler *et al.* (2019) avaliaram a resistência e o modo de ruptura de prismas constituídos de dois tipos de blocos de concreto tendo eles resistências na área líquida de 19,89 MPa e 11,39 MPa, respectivamente, por meio de correlação digital de imagem e do GOM *Correlate*. Cada tipo de bloco foi combinado com duas resistências de argamassa de assentamento moldadas em laboratório equivalendo a uma resistência característica do bloco na área líquida de 0,30 e 0,70. Os autores concluíram que a ruptura dos prismas se deu devido ao esmagamento da junta de argamassa, por meio da avaliação do comportamento da curva tensão *versus* deformação. Os autores concluíram ainda que a resistência da argamassa não teve interferência na resistência última dos prismas, mas sim no desencadeamento do processo do modo de ruptura. As deformações começaram a se tornar perceptíveis, inicialmente na junta de argamassa, se desenvolvendo até o rompimento dos prismas por esmagamento da junta, quando se trata de prismas com uma argamassa de resistência menor, a Figura 18 apresenta a média das deformações para os blocos testados.

Figura 18 - Resultado do diagrama de nível de tensão-deformação específica dos blocos BC10 parte frontal, strain gauges e GOM.

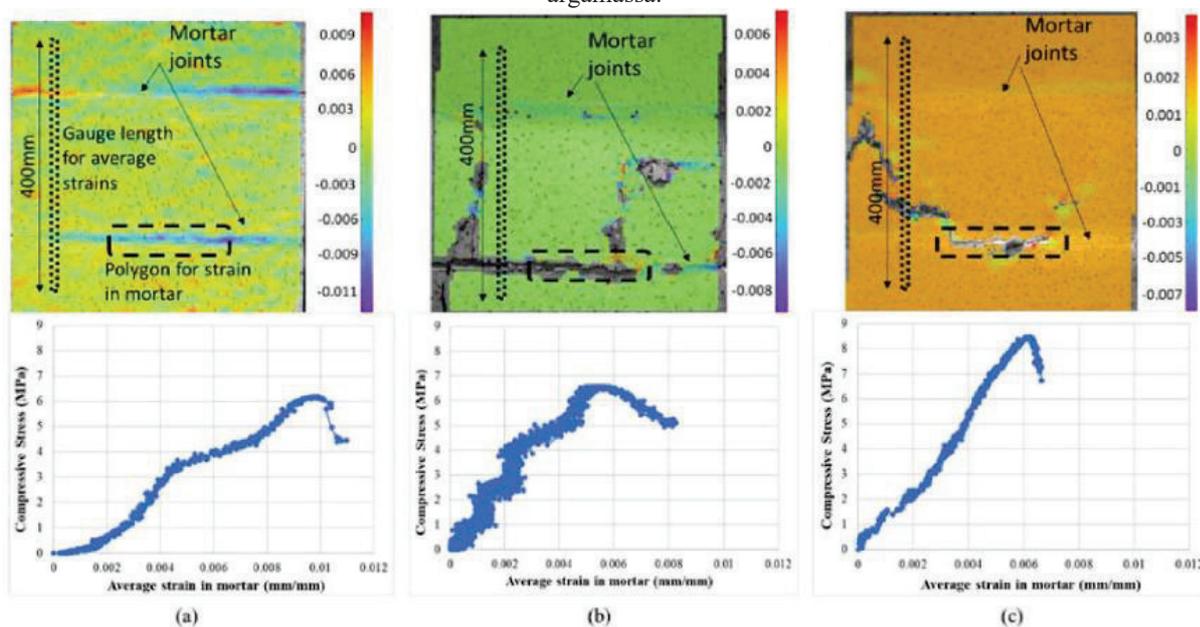


Fonte: (SCHOSSLER, 2019).

Zahra *et al.* (2021) investigaram as características de resistência à compressão e deformação de alvenarias de diferentes tipos blocos de concreto e diferentes tipos de argamassa de assentamento. No total, 40 prismas de alvenaria de blocos de concreto maciços (resistência à compressão igual 15,4 MPa a 21 MPa) e vazados (15,6 MPa) foram construídos e testados com três tipos diferentes de argamassas, dois tipos de assentamento, argamassamento total e apenas nas faces longitudinais (*full e face-shell bedding*), e dois tipos de blocos de concreto. Além disso, as deformações e a forma de ruptura das juntas de argamassa, blocos e prismas foram investigados em detalhes usando o método de correlação digital de imagem (DIC, *em inglês*). Os resultados experimentais revelaram que os prismas de argamassa de menor resistência falharam por esmagamento da argamassa e fissuração dos blocos, enquanto os outros prismas de argamassa falharam principalmente por fendilhamento à tração nos blocos. Os autores afirmam também que a resistência à compressão da alvenaria de concreto não foi significativamente comprometida para

prismas de argamassa de resistência inferior em comparação com outras combinações de prismas de argamassa. A Figura 19 mostra as curvas tensão-deformação obtidas com o DIC para cada tipo de argamassa.

Figura 19 - Curvas de tensão-deformação em argamassa do software DIC. (a) argamassa M2 (b) argamassa M3 (c) argamassa M4. Tradução: *Mortar joints*: Juntas de argamassa. *Gauge length for average strains*: comprimento do medidor para deformações médias. *Polygon for strain in mortar*: Polígono para deformação em argamassa.

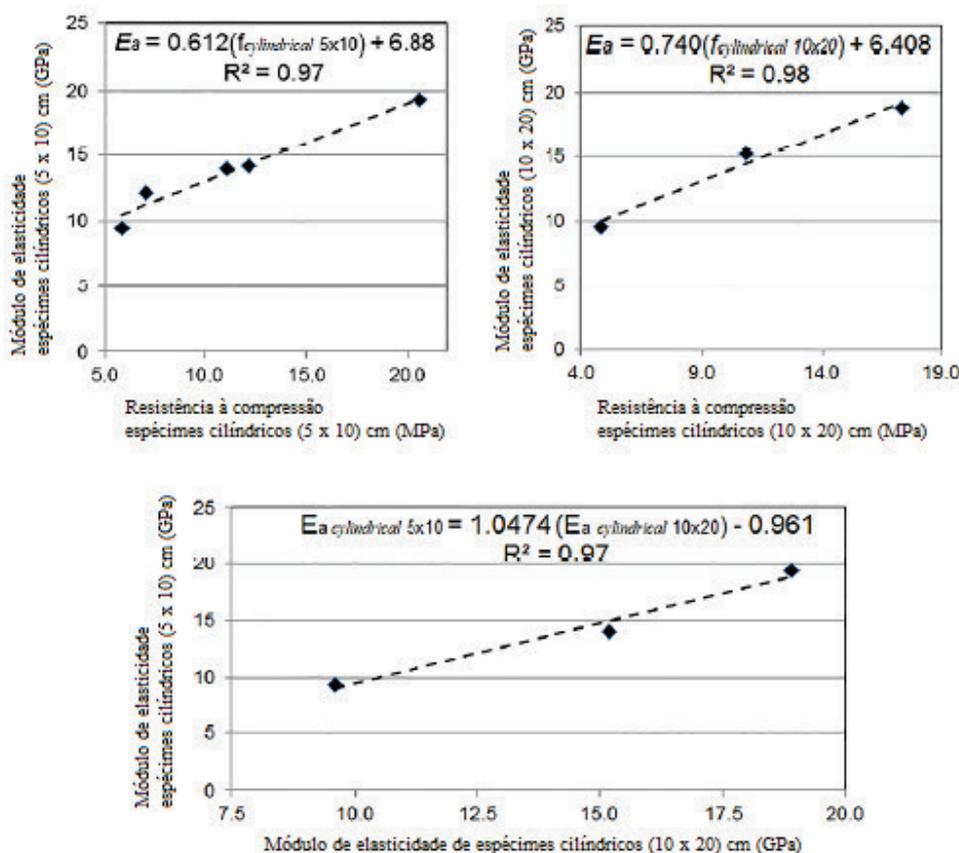


Fonte: (ZAHRA *et al.*, 2021).

Nalon *et al.* (2018) realizaram análises comparativas do efeito da forma e tamanho dos corpos de prova na resistência à compressão e módulo de elasticidade de argamassas. Foram produzidas misturas de argamassa com resistência à compressão entre 5 e 20 MPa. Ensaios experimentais determinaram a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 5 x 10 cm e 10 x 20 cm, e também de corpos de prova cúbicos de 4 cm de lado. Os autores concluíram que a resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos foi superior à resistência à compressão do cilindro de 10 x 20 cm e inferior à resistência à compressão do cilindro de 5 x 10 cm. No entanto, não afetou o módulo de elasticidade estático do material. Além disso, os resultados indicaram que a resistência à compressão aumenta conforme o módulo de elasticidade é maior,

para blocos de 5 x 10 cm e 10 x 20 cm, entretanto, nesses casos, o tamanho do corpo de prova não influenciou significativamente os resultados (Figura 20).

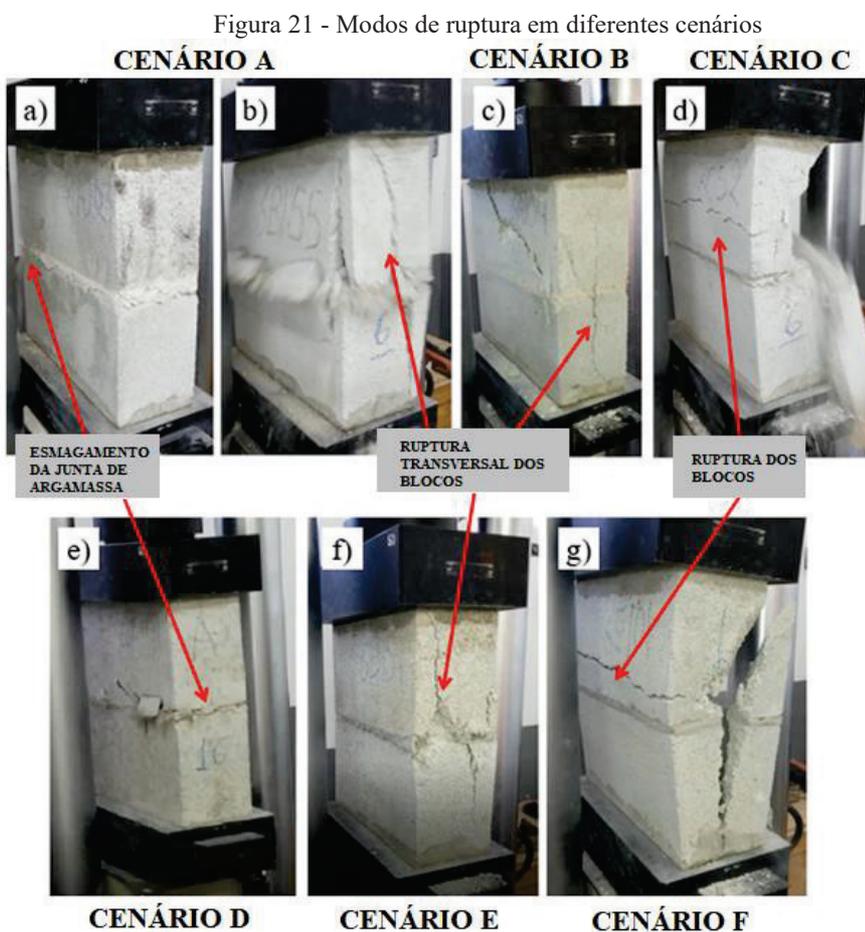
Figura 20 - Correlações entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de diferentes tamanhos de espécimes cilíndricos.



Fonte: (NALON *et al.*, 2018).

Caldeira *et al.* (2020) realizaram ensaios em prismas com dois tipos de blocos de concreto vazados medindo 14×19×39cm (B09 e B27), além de diferentes composições de argamassas mistas de canteiro produzidas com cimento CII E-32, cal hidratada CHIII e areia natural, com diferentes níveis de resistência à compressão e em conformidade com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005). Foram produzidos 120 prismas de dois blocos e submetidos a testes de resistência à compressão, a fim de analisar a influência mútua da espessura da junta e resistência à compressão da argamassa na resistência, módulo de elasticidade e mecanismos de falha dos prismas. Os autores consideraram

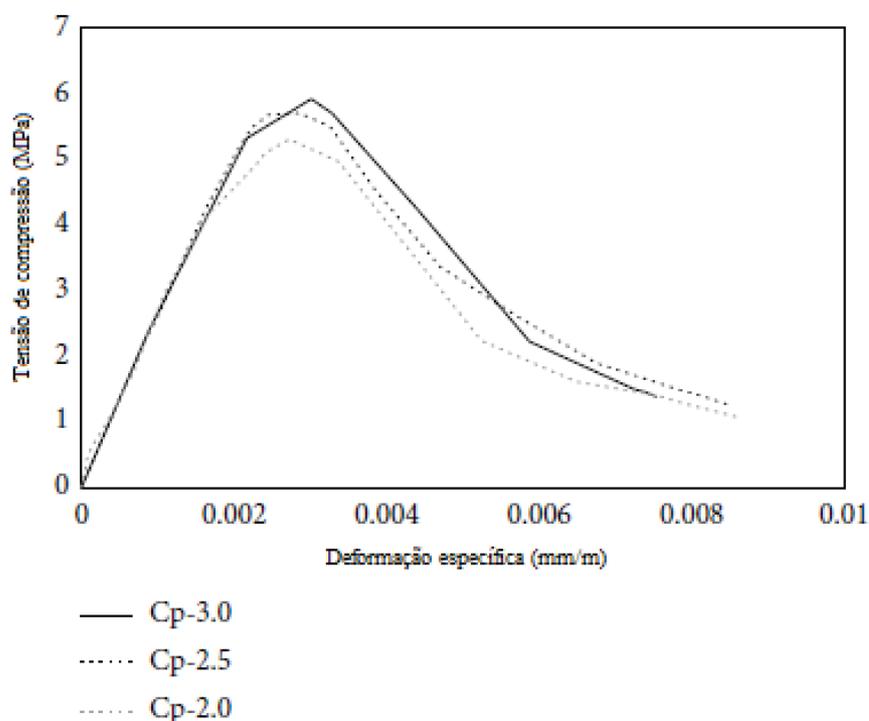
as faixas de espessura da junta de $5\pm 2,5$ mm, $10\pm 2,5$ mm, $15\pm 2,5$ mm e $20\pm 2,5$ mm. Como conclusão, teve-se que a influência da espessura da junta no comportamento estrutural dos elementos de alvenaria parece ser mais significativa quando a resistência da argamassa é muito inferior à resistência dos blocos, pois o aumento da espessura da junta diminuiu o confinamento lateral da argamassa. Por outro lado, quando foram utilizadas argamassas mais resistentes, a ruptura ocorreu com a formação de trincas transversais ou esmagamento dos blocos e, conseqüentemente, o impacto da espessura da junta na resistência à compressão e módulo de elasticidade dos prismas de alvenaria não foi estatisticamente significativa, como pode ser visto na Figura 21.



Fonte: (CALDEIRA *et al.*, 2020).

Yang, Lee e Hwang (2019) avaliaram a resistência à compressão de prismas de três tijolos de concreto (190 x 90 x 57 mm), com três diferentes resistências de argamassa: (1) duas vezes a resistência mínima do tijolo (8MPa) denominado Cp-2.0, (2) duas vezes e meia a resistência mínima do tijolo, denominado de Cp2.5, e (3) três vezes a resistência mínima do tijolo de concreto, denominado de Cp-3.0. A resistência à compressão média dos tijolos era de 8,23 MPa e as resistências das argamassas eram de 16,4 MPa, 19,4 MPa e 23,3 MPa. Dois LVDTs foram instalados em ambos os lados do prisma, com capacidade de medir deslocamentos de até 25 mm, a carga foi aplicada por uma máquina universal de capacidade de 500 kN. Os resultados indicaram que a resistência à compressão do prisma variou de acordo com a resistência da argamassa. No entanto, a taxa de aumento da resistência do prisma não foi exatamente proporcional à taxa de aumento da argamassa. Em relação a curva tensão-deformação, a Figura 22 mostra que o módulo de elasticidade dos três tipos de prisma foi o mesmo.

Figura 22 - Curvas tensão-deformação para os três tipos de bloco analisados.

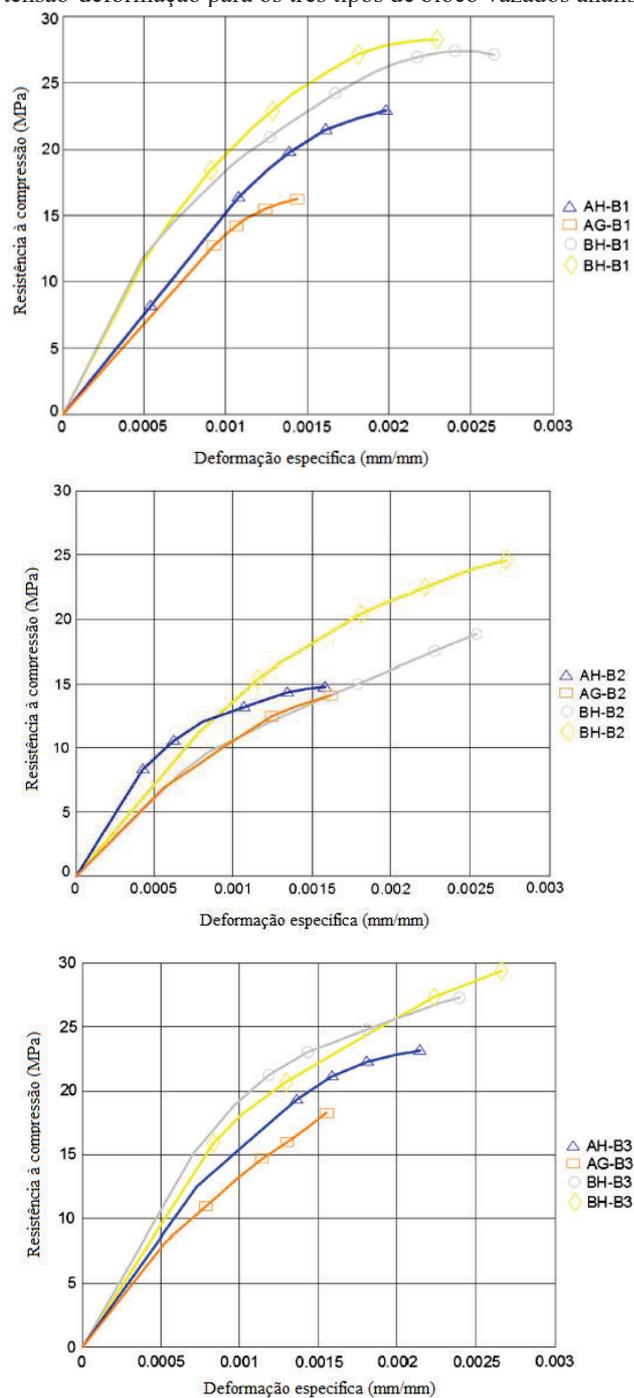


Fonte: (YANG; LEE; HWANG, 2019).

Martins *et al.* (2018) desenvolveram um experimento fatorial, variando a resistência à compressão na área líquida de blocos de concreto de dimensões $14 \times 19 \times 39$ cm (10,9, 14,8 e 21,2 MPa) e a resistência à compressão da argamassa (0,0, 15,0, 20,0 e 25,0 MPa). Os deslocamentos foram obtidos a uma taxa de 5 Hz por meio de um dispositivo de aquisição de dados QuantumX MX840B. O principal objetivo do estudo foi caracterizar os componentes de alvenaria e analisar a resposta de prismas de alvenaria constituídos por blocos de baixa e alta resistência, e verificar a influência da argamassa. Os autores concluíram que o módulo de elasticidade e resistência à compressão dos prismas grauteados e não grauteados aumentaram com o aumento da resistência dos blocos de concreto. A resistência à compressão da argamassa do prisma foi definida entre 70% e 150% da resistência à compressão da área bruta do bloco. De acordo com os autores e Parsekian, Hamid, Drysdale (2012), dentro dessa faixa, não se espera grande influência da argamassa na resistência do prisma. Então, os autores supõem que a variação da resistência à compressão e rigidez dos prismas se deva principalmente à variação dos blocos e da resistência à compressão do graute.

Fortes *et al.* (2018) avaliaram as resistências à compressão axial e à flexão e as propriedades de deformação de prismas de alvenaria de blocos de concreto de alta resistência de dimensões 140 x 190 x 390 mm. Setenta e dois prismas de 5 blocos foram construídos e testados para avaliar a capacidade e o comportamento de alvenaria estrutural de alta resistência, a partir da combinação de três tipos de argamassa (com resistências de 13,8, 24,1 e 28,1 MPa) e três tipos de graute. Os autores variaram as resistências dos blocos de 43,7, 57,4 e 68,6 MPa. Deformações verticais também foram medidas ao longo das laterais dos prismas usando transdutores analógicos para monitorar a distribuição da carga ao longo da largura dos corpos de prova. As deformações verticais foram medidas dentro de um comprimento de referência de 800 mm. Os resultados mostraram um aumento da resistência à compressão à flexão de 15 a 29% para os prismas ocos e de 70 a 79% para os prismas rebocados em comparação com a resistência à compressão axial. A deformação última medida variou de 0,14 a 0,19% para a compressão axial e de 0,20 a 0,25% para a compressão flexural. Os prismas apresentaram modo de falha típico de ampulheta. A resistência do prisma vazado variou de 52 a 62% da resistência do bloco, enquanto a resistência do prisma grauteado variou de 43 a 59% da resistência do bloco, Figura 23, onde “A” representa prismas testados sob uma carga compressiva concêntrica e “B” prismas carregados com uma excentricidade de $t = 6$ (23,3 mm), “G” representa prismas grauteados e “H” vazados.

Figura 23 - Curvas tensão-deformação para os três tipos de bloco vazados analisados (B1, B2 e B3).



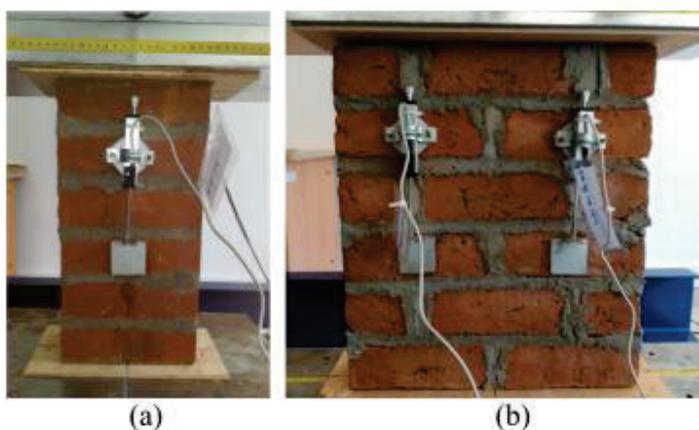
Fonte: (FORTES *et al.*, 2018).

2.2.3.1.2 Blocos cerâmicos de paredes maciças

Estudos de ruptura de prismas compostos por blocos cerâmicos são menos comuns na literatura, já que o sistema de blocos de concreto é mais amplamente utilizado internacionalmente. Entretanto, alguns estudos relacionaram a influência da argamassa na ruptura de prismas cerâmicos. Blocos cerâmicos de paredes maciças, tais como os usados no Brasil não são costumeiramente usados em outros países, assim, nesta seção foram citados estudos nacionais e internacionais que utilizam blocos de paredes maciças e tijolos maciços pois ambos tendem a mobilizar o confinamento da argamassa das juntas.

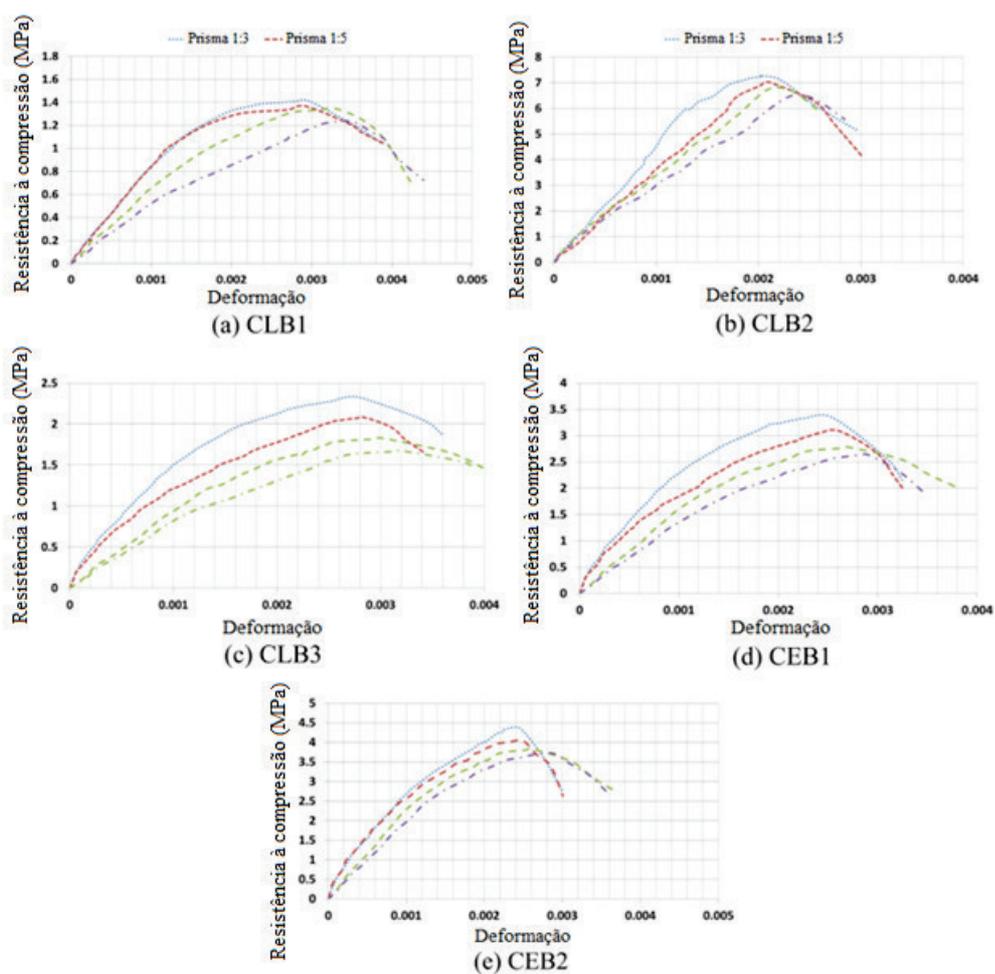
Thamboo e Dhanasekar (2019) avaliaram três tipos de tijolos cerâmicos: CLB1 (200 x 90 x 65 mm), com resistência a compressão de 3,8 MPa; CLB2 (210 x 100 x 60 mm) de 15,8 MPa; CLB3 (225 x 150 x 90 mm) e 5,3 MPa; e dois tijolos de terra compactada: CEB1 (220 x 140 x 90 mm) e resistência de 6,5 MPa e CEB2 (280 x 140 x 90 mm), de 7,9 MPa. Dois tipos de argamassas foram usados para construir os prismas e a parede em combinação com cinco tipos de unidades, com relação de 1:3 e 1:5 e denominadas de MO1 e MO2, respectivamente. Os prismas eram compostos de 6 tijolos e as paredes com 6 fiadas de dois a três blocos por fiada (Figura 24). Os autores concluíram que a relação empírica desenvolvida por meio de análise de regressão linear sugeriu que a resistência à compressão do prisma é aproximadamente 25% maior que a resistência das paredes. A Figura 25 demonstra as curvas de tensão-deformação dos prismas. Os prismas e paredes de alvenaria exibiram um comportamento quase frágil sob compressão uniaxial. Todos os espécimes exibiram um comportamento tensão-deformação quase linear até 30-50% da resistência última e, a partir daí, um comportamento não linear foi observado até a falha. O comportamento não linear dos corpos de prova esteve associado principalmente ao aparecimento de trincas verticais nos corpos de prova. Portanto, pode-se inferir que a resistência do tijolo e as propriedades de deformação influenciaram muito o comportamento tensão-deformação geral da alvenaria. A mudança no tipo de argamassa afetou as curvas tensão-deformação dos corpos de prova. Pode-se observar que os corpos de prova da argamassa MO1 (maior resistência) apresentaram menor compressibilidade do que a argamassa MO2 (menor resistência).

Figura 24 - Prisma e parede para o teste de compressão



Fonte: (THAMBOO; DHANASEKAR, 2019).

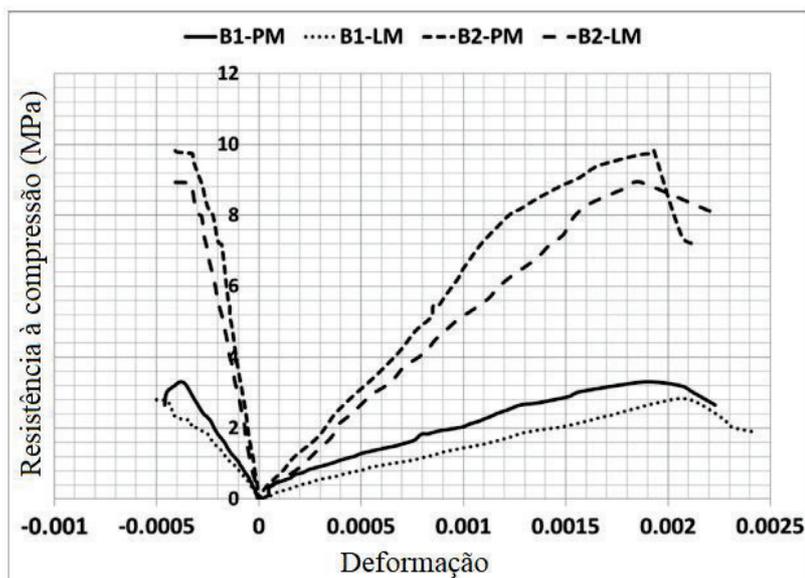
Figura 25 - Curvas de tensão-deformação dos prismas.



Fonte: (THAMBOO; DHANASEKAR., 2019).

Thamboo (2020) analisou alvenarias compostas por camadas finas de argamassa (TLM) com dois tipos diferentes de tijolos cerâmicos: B1 ($200 \times 90 \times 65$ mm), com resistência à compressão média de 5,4 MPa, e B2 ($210 \times 100 \times 60$ mm), com resistência de 15,8 MPa, em prismas de 6 tijolos. O autor também analisou dois tipos de argamassa: argamassa adesiva polimérica (PM) com resistência de 14,2 MPa e, argamassa de cimento misturada em laboratório (LM) com resistência de 11,5 MPa. Ambas com resistência maior que os tijolos B1 e menor que o tijolo B2, ou seja, na alvenaria executada com os tijolos B1 não acontece o fenômeno de confinamento da argamassa como descrito na literatura. Principalmente separações de tração na interface unidade-argamassa foram observadas em todos os espécimes depois de rompidos. No entanto, alguns dos espécimes do tipo B1-PM mostraram um modo de falha ligeiramente misto na interface e na unidade. Todos os prismas falharam de maneira semelhante com fissuração vertical iniciada na interface unidade-argamassa. O autor concluiu que as características de resistência de aderência da alvenaria de argila TLM feita com argamassa LM são semelhantes às alvenarias argamassadas convencionais e, conseqüentemente, os modos de falha foram semelhantes aos da alvenaria convencional. A Figura 26 apresenta as curvas de tensão-deformação elaboradas pelos autores. Todos os prismas de alvenaria de cerâmica TLM exibiram um comportamento tensão-deformação quase linear até 70-80% da resistência máxima e, posteriormente, um comportamento de desaceleração não linear foi observado até a falha. Além disso, o comportamento não linear foi associado principalmente ao início de trincas verticais nos prismas. Nota-se também que os corpos de prova de argamassa (PM), mais rígidos, se mostraram menos deformáveis do que os corpos de prova de argamassa (LM) mais deformáveis. Portanto, pode-se inferir que a diminuição da resistência da argamassa na construção de alvenaria de cerâmica TLM pode tornar o sistema mais deformável à compressão.

Figura 26 - Curvas de tensão-deformação dos prismas estudados.



Fonte: (THAMBOO, 2020).

Jank (2021) realizou ensaios de compressão em prismas de alvenaria estrutural compostos por dois blocos cerâmicos de paredes maciças, assentados com argamassa industrializadas de resistências de 2,0, 6,0 e 12,0 Mpa, e analisou a influência da resistência da argamassa na forma de ruptura do prisma. Com os dados obtidos nas filmagens e processados pelo software GOM Correlate, o autor verificou que a resistência da argamassa afeta o modo de ruptura do prisma. Ao se utilizar argamassa mais resistente, a ruptura ocorreu de forma mais frágil em relação à utilização da argamassa menos resistente, a qual resultou em rupturas menos enérgicas, mas com esmagamento da junta de argamassa. A Figura 27 apresenta as fissuras verticais no prisma 6F, em conjunto com o deslocamento do bloco perto da junta na face posterior e na face lateral direita, além do esmagamento da argamassa. A Figura 28 apresenta os diagramas tensão *versus* deformação específica da média dos LVDTs para os prismas de 2 MPa, 6 MPa, e 12 MPa. Os autores afirmam que os valores das tensões de ruptura dos prismas apresentaram-se ligeiramente menores que os dados obtidos com os ensaios na argamassa, mesmo sendo esperado melhor desempenho devido ao seu confinamento, em especial o prisma 6A, que apresentou desempenho bem abaixo do esperado, provavelmente devido a trincas pré-existentes que passaram à inspeção visual. Os prismas com argamassa de 12 MPa foram os que apresentaram a ruptura mais frágil de todas, isso

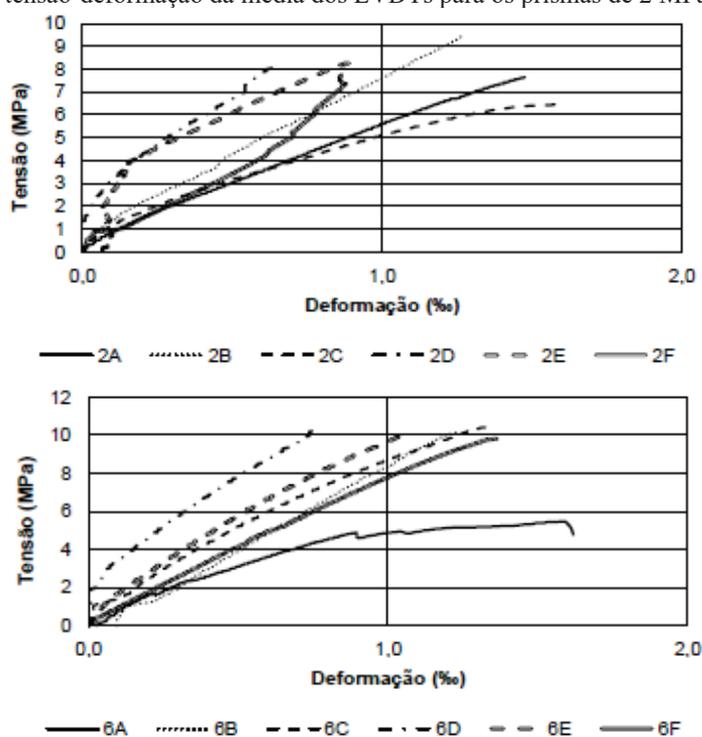
porque não houve esmagamento da junta de argamassa, consequentemente não houve as trincas que os outros prismas tiveram, resultando em rupturas bruscas e repentinas.

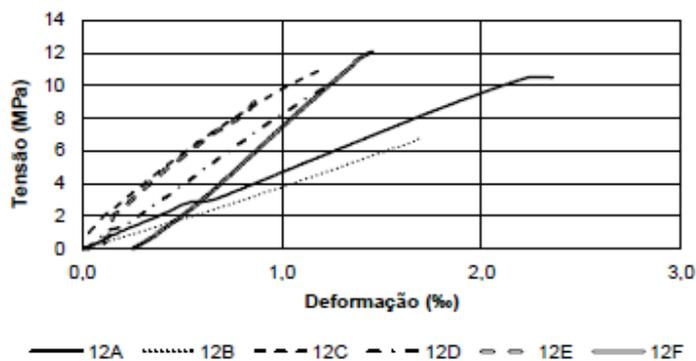
Figura 27 - Prisma 6F rompido.



Fonte: (JANK, 2021).

Figura 28 - Curvas tensão-deformação da média dos LVDTs para os prismas de 2 MPa, 6 MPa, e 12 MPa.





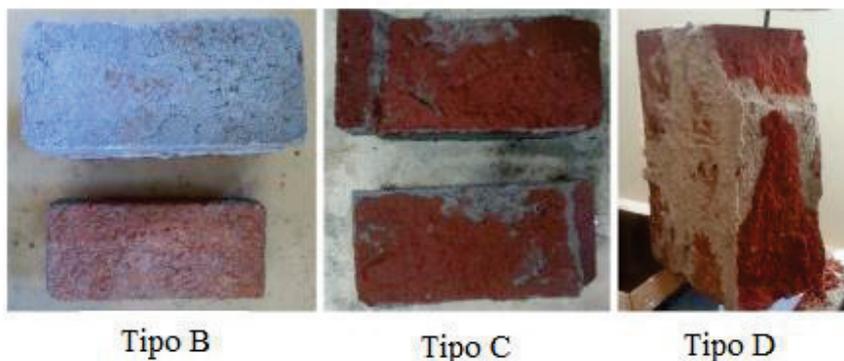
Fonte: (JANK, 2021).

Sathiparan e Rumeshkumar (2018) avaliaram a influência da umidade nas propriedades mecânicas de tijolos, argamassas e alvenarias, por meio de prismas de tijolos maciços cerâmicos com dimensões de 205 x 105 x 55 mm³. Para as argamassas foram selecionados três tipos: ii, iii e iv de acordo com a BS EN 1996 (BS EN, 2012). As argamassas foram preparadas em betoneira com proporção de cimento e areia de 1:3, 1:5 e 1:7 e resistências à compressão iguais a 18,08 MPa, 7,44 MPa, e 3,78 MPa, respectivamente. Os resultados experimentais demonstraram que a umidade reduz significativamente a resistência à compressão da alvenaria; quanto maior o teor de umidade, menor a resistência à compressão. No entanto, a resistência à compressão da alvenaria não melhora na condição seca em estufa, mas diminui na condição úmida. Além disso, a resistência ao cisalhamento e de ligação da alvenaria reduz com o aumento da condição de umidade. A Figura 29 mostra os tipos de falha observados no teste de cisalhamento, sendo:

- Tipo A: falha por cisalhamento apenas na argamassa.
- Tipo B: falha por cisalhamento na área de ligação unidade/argamassa em uma ou dividida entre duas faces.
- Tipo C: falha por cisalhamento na unidade;
- Tipo D: falha por esmagamento e/ou divisão nas unidades.

O padrão de falha tipo A não foi observado devido à argamassa de alta resistência e aos tijolos de baixa qualidade utilizados para a construção dos prismas de alvenaria. Os pesquisadores concluíram que essa falha ocorreu principalmente quando a resistência à flexão da argamassa da junta era menor do que a resistência de ligação da interface tijolo/argamassa.

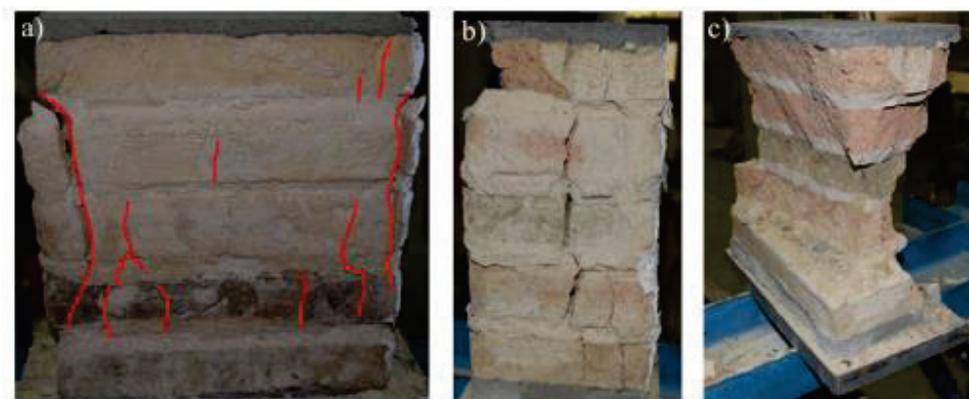
Figura 29 - Tipos de falha observados no teste de cisalhamento.



Fonte: (SATHIPARAN; RUMESHKUMAR, 2018).

Segura, Pelà e Roca (2018) realizaram um programa experimental de caracterização mecânica de alvenaria sob compressão uniaxial monotônica e cíclica. Foram testadas paredes com 11 fiadas de altura e prismas de 5 fiadas de altura, usando tijolos cerâmicos artesanais e argamassa de cal hidráulica. Foram escolhidos tijolos maciços com dimensões médias de $311 \times 149 \times 45 \text{ mm}^3$ e densidade de 1700 kg/m^3 , com resistência média de $17,99 \text{ MPa}$. Os autores selecionaram uma argamassa de cal pré-misturada comercial à base de cal hidráulica natural NHL 3.5, com categoria de resistência M5, considerada elevada demais para reproduzir a resistência à compressão esperada da argamassa de cal em alvenaria histórica. Assim, uma nova mistura foi estudada e preparada em laboratório com a adição de uma quantidade de material não reativo (pó calcário) para reduzir a resistência da argamassa. A proporção em volume de argamassa pré-misturada para assentamento e água foi de 1:1:0,65. As leituras dos transdutores LVDT foram divididas de acordo com seus comprimentos de referência e calculadas as médias para obtenção das deformações axiais. Os autores observaram que os dois tipos de elementos forneceram resultados muito semelhantes tanto em resistência quanto em rigidez. A Figura 30 mostra os modos de ruptura dos prismas após os ensaios.

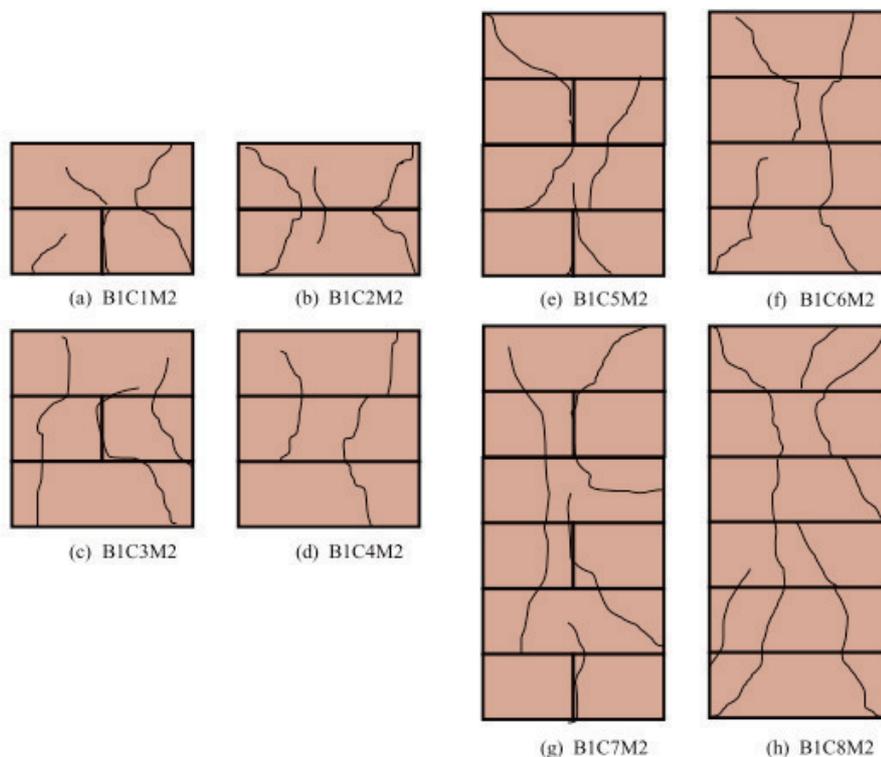
Figura 30 - Modos de ruptura dos prismas após a falha. a) vista frontal, b) vista lateral, c) corpo desmontado.



Fonte: (SEGURA; PELÀ; ROCA, 2018).

Thaickavil e Thomas (2018) avaliaram 64 grupos de prismas compostos por 3 espécimes cada. As variáveis consideradas no programa experimental foram tipo de tijolo, resistência da argamassa e relação altura/espessura (h/t) do corpo de prova de prismas com blocos de solo-cimento ($190 \times 113 \times 100$ mm), com resistência igual à 4,56 MPa, e cerâmica ($210 \times 96 \times 50$ mm), com resistência igual a 6,68 MPa. Argamassa de cimento e areia de quatro diferentes proporções: M1 (1:6), com resistência de 35,5 MPa, M2 (1:5) e 35,6 MPa, M3 (1:4) e 35,7 MPa e M4 (1:3), com 35,8 MPa de resistência, foram usadas. Os resultados indicaram que prismas feitos de tijolos de solo-cimento apresentaram menor resistência quando comparados aos prismas de tijolos cerâmicos. Um aumento médio de 70% na resistência do prisma foi observado com o aumento da resistência do tijolo. Os achados do estudo concordam com as observações de Bennet, Boyd e Flanagan (1997), Kaushik, Rai e Jain (2007), Gumaste *et al.* (2006) e Lumantarna, Biggs e Ingham (2014). Observou-se que a resistência à compressão do prisma de alvenaria aumenta com o aumento da resistência da argamassa na faixa de 13,6-14,2 MPa. Em relação ao tipo de ruptura, trincas verticais foram formadas no meio dos corpos de prova. Isso se deve à força de ruptura externa desenvolvida na amostra devido o efeito de Poisson (Figura 31). Nos corpos de prova mais baixos as trincas inclinadas foram predominantes, pois há influência do atrito exercido pelos pratos da prensa. Nas juntas de assentamento, exceto em algumas regiões, as trincas se estenderam pela junta até a próxima fiada.

Figura 31 - Padrão típico de fissuras em prismas conforme estudo experimental para tijolo tipo B1 e argamassa tipo M2 (1:5).



Fonte: (THAICKAVIL; THOMAS, 2019).

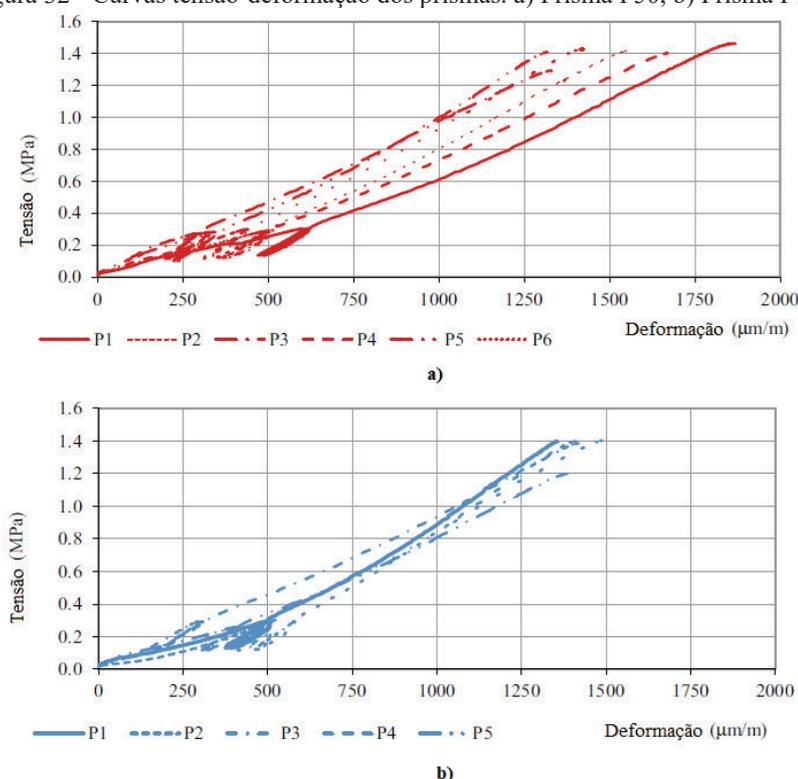
2.2.3.1.3 Blocos cerâmicos de paredes vazadas

Blocos cerâmicos de paredes vazadas são utilizados apenas no Brasil e, por isso, estudos que avaliem a deformabilidade desse tipo de prismas são menos frequentes. Estes blocos, pela pequena espessura das paredes cerâmicas, tendem a mobilizar menos o efeito de confinamento da argamassa das juntas. Dessa forma, os estudos com blocos cerâmicos de paredes vazadas foram avaliados em separado dos de blocos de paredes maciças e tijolos maciços.

Alvarenga *et al.* (2017) avaliaram a influência das propriedades mecânicas da argamassa no comportamento da alvenaria cerâmica. Foram realizados ensaios de compressão axial em seis prismas de dois blocos cerâmicos de parede vazada, com dimensões de 140 x 190 x 390 mm e resistência de 4,9 MPa. Os autores utilizaram duas composições de argamassa que apresentaram resistência à compressão de 94,7 (M100) e 50,4% (M50) da resistência à compressão da área líquida dos blocos. Após a mistura da argamassa, seis corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm e 4 cilíndricos de 50 x 100 mm foram moldados. Transdutores de deslocamento DT-100A

Kyowa com 100 mm de capacidade nominal foram calibrados e colocados nas laterais dos prismas para medida das deformações. Os resultados indicaram um ligeiro aumento da resistência à compressão e módulo de elasticidade entre as argamassas. As curvas tensão *versus* deformação específica dos prismas P50 e P100 são demonstradas na Figura 32. Prismas construídos com argamassas flexíveis tiveram uma ruptura dúctil e colapsaram sob menores tensões de compressão, enquanto prismas feitos com argamassas rígidas resistiram a maiores tensões de compressão embora tenham apresentado uma ruptura frágil. A resistência e rigidez da argamassa não afeta tão significativamente a resistência à compressão e rigidez da alvenaria. Por outro lado, a resistência e rigidez da argamassa afetaram muito os mecanismos de ruptura da alvenaria. De maneira geral, os autores não recomendam uma argamassa muito resistente para o assentamento, já que a utilização de argamassas mais flexíveis não compromete a resistência e a rigidez da alvenaria e evita a ruptura frágil da estrutura. Ao usar a argamassa mais fraca, os prismas não romperam repentinamente, ao usar a argamassa mais forte, a alvenaria falhou abrupta e explosivamente, uma vez que a argamassa muito rígida não poderia acomodar efetivamente os movimentos diferenciais

Figura 32 - Curvas tensão-deformação dos prismas. a) Prisma P50, b) Prisma P100.



Fonte: (ALVARENGA *et al.*, 2017).

Outro estudo que avaliou a influência da argamassa no comportamento da ruptura em prismas cerâmicos foi elaborado por Machado (2019). A autora analisou três diferentes tipos de blocos: cerâmicos de paredes maciças, com resistência de 10,0 MPa e com dimensões de 290 x 140 x 190 mm, cerâmicos de paredes vazadas, de 7,0 MPa e dimensões de 290 x 140 x 190 mm, e de concreto, de 4,0 MPa e com dimensões de 390 x 140 x 190 mm. A autora utilizou cinco argamassas com resistências nominais iguais à 4,0, 6,0, 8,0, 10,0 e 15,0 MPa. Cada tipo de bloco foi combinado com três tipos de argamassa, formando prismas de dois blocos. Os resultados indicaram a influência da proporção entre a resistência à compressão da argamassa e do bloco sobre a resistência e o modo de ruptura dos prismas. Observou-se que o modo de ruptura de prismas se dá pelo esmagamento para razão entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco na área líquida de até 49% em blocos cerâmicos de paredes maciças, para uma razão de até 47% em blocos cerâmicos de paredes vazadas e até 84% para blocos de concreto. O modo de ruptura se dá por tração no bloco para razões acima de 61% em blocos cerâmicos de paredes maciças e acima de 59% para paredes vazadas. Não foi possível observar a partir de qual razão o processo de falha se dá por tração no bloco de concreto.

Otoni (2020) avaliou a deformação e modo de ruptura em prismas de alvenaria de blocos cerâmicos e obteve como resultado no estudo que a resistência da argamassa não tem interferência significativa na resistência última dos prismas, mas sim no desencadeamento do modo de ruptura, podendo acelerar ou retardar o início do processo

2.2.3.2 Previsão da resistência de acordo com normas

2.2.3.2.1 NBR 16868:2020

A norma brasileira NBR 16868-1 (ABNT, 2020) prevê o dimensionamento de paredes estruturais de alvenaria à compressão simples através do esforço resistente de cálculo dado na Equação 3, considerando o esforço solicitante de cálculo menor ou igual ao esforço resistente.

$$N_{rd} = f_d \cdot A \cdot R \quad (3)$$

Sendo:

N_{rd} – força normal resistente de cálculo;

f_d – resistência a compressão de cálculo da alvenaria;

A – área da seção resistente;

$$R = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^3 \right] - \text{coeficiente redutor devido à esbeltez da parede}$$

Sendo o índice de esbeltez da parede calculado por uma relação entre a altura efetiva e a espessura efetiva da parede.

Ainda, as tensões normais de compressão para alvenaria não armada devem satisfazer a Equação 4 para flexo-compressão sendo que, caso não ocorra tensão de tração, seu valor máximo deve ser menor ou igual a resistência de tração da alvenaria (f_{td}).

$$\frac{N_d}{A.R} + \frac{M_d}{W.K} \leq f_d \quad (4)$$

Sendo:

N_d – força normal de cálculo;

M_d – momento fletor de cálculo;

f_d – resistência à compressão de cálculo de alvenaria;

A – área da seção resistente;

W – mínimo módulo de resistência de flexão de seção resistente;

R – coeficiente redutor devido à esbeltez do elemento;

$K = 1,5$ – fator de ajuste da resistência à compressão na flexão.

Quando calculadas na combinação de estado-limite último, as tensões de normais de tração são restringidas a resistência de tração da alvenaria f_{td} .

2.2.3.2.2 BS 5628:2005

A norma inglesa *British Standard Institution 5628* (BSI, 2005) é dividida em três partes, sendo a primeira sobre o uso estrutural de alvenaria não armada, a segunda para uso de estrutural de alvenaria armada e protendida e a terceira sobre materiais e componentes, projeto e mão de obra.

Essa norma ainda especifica que a resistência à compressão característica da alvenaria (f_k) deve ser determinada através de testes, entretanto, a norma apresenta a Tabela 3, com resultados obtidos em laboratório, que permitem relacionar a resistência à compressão das unidades de alvenaria de acordo com a classificação da argamassa e ainda possibilita uma interpolação linear dentro dos limites da tabela.

Tabela 3 – Resistência a compressão da alvenaria.

a) Construídos com tijolos de formato padrão de argila e silicato de cálcio, com no máximo 25% de vazios formados ou 20% da depressão do tijolo											
Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)										
Classe/ Designação	5	10	15	20	30	40	50	75	100	125	150
M12 / (i)	2,5	4,0	5,3	6,4	8,3	10,0	11,6	15,2	18,3	21,2	23,9
M6 / (ii)	2,5	3,8	4,8	5,6	7,1	8,4	9,5	12,0	14,2	16,1	17,9
M4 / (iii)	2,5	3,4	4,3	5,0	6,8	7,4	8,4	10,5	12,3	14,0	15,4
M2 / (iv)	2,2	2,8	3,6	4,1	5,1	6,1	7,1	9,0	10,5	11,6	12,7
b) Construído com blocos de concreto aerados autoclavados com uma proporção de altura para a dimensão horizontal mínima de 0,6											
Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)										
Classe/ Designação	2,9	3,6	5,2	7,3	10,4						
M12 / (i)	1,4	1,7	2,5	3,4	4,4						
M6 / (ii)	1,4	1,7	2,5	3,2	4,2						
M4 / (iii)	1,4	1,7	2,5	3,2	4,1						
M2 / (iv)	1,4	1,7	2,5	2,8	3,5						
c) Construído com blocos de concreto agregados com uma razão entre a altura e a dimensão horizontal mínima de 0,6											
Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)										
Classe/ Designação	2,9	3,6	5,2	7,3	10,4	17,5	22,5	30	40 ou mais		
M12 / (i)	1,4	1,7	2,5	3,4	4,4	6,3	7,5	9,5	11,2		
M6 / (ii)	1,4	1,7	2,5	3,2	4,2	5,5	6,5	7,9	9,3		
M4 / (iii)	1,4	1,7	2,5	3,2	4,1	5,1	6,0	7,2	8,2		
M2 / (iv)	1,4	1,7	2,2	2,8	3,5	4,6	5,3	6,2	7,1		
d) Construído com blocos de concreto agregados que não excedam 25% dos vazios formados e uma relação entre a altura e a dimensão horizontal mínima entre 2,0 e 4,5											
Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)										
Classe/ Designação	2,9	3,6	5,2	7,3	10,4	17,5	22,5	30	40 ou mais		
M12 / (i)	2,8	3,5	5,0	6,8	8,8	12,5	15,0	18,7	22,1		
M6 / (ii)	2,8	3,5	5,0	6,4	8,4	11,1	13,0	15,9	18,7		
M4 / (iii)	2,8	3,5	5,0	6,4	8,2	10,1	12,0	14,5	16,8		
M2 / (iv)	2,8	3,5	4,4	5,6	7,0	9,1	10,5	12,5	14,5		
e) Construído com blocos de concreto aerados autoclavados com uma razão de altura para a dimensão horizontal mínima entre 2,0 e 4,5											

(CONTINUAÇÃO TABELA 2)

Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)				
Classe/ Designação	2,9	3,6	5,2	7,3	10,4
M12 / (i)	2,8	3,5	5,0	6,8	8,8
M6 / (ii)	2,8	3,5	5,0	6,4	8,4
M4 / (iii)	2,8	3,5	5,0	6,4	8,2
M2 / (iv)	2,8	3,5	4,4	5,6	7,0

f) Construídos com blocos de concreto agregados com mais de 25% e menos de 60% de vazios formados e uma relação entre a altura e a dimensão horizontal mínima entre 2,0 e 4,5

Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)									
Classe/ Designação	2,9	3,6	5,2	7,3	10,4	17,5	22,5	30	40 ou mais	
M12 / (i)	2,8	3,5	5,0	6,6	8,1	11,2	13,1	16,0	19,4	
M6 / (ii)	2,8	3,5	5,0	6,4	7,5	9,9	11,6	14,0	16,7	
M4 / (iii)	2,8	3,5	5,0	6,1	7,1	9,0	10,2	12,0	14,0	
M2 / (iv)	2,8	3,5	4,4	5,8	6,7	8,0	8,9	10,2	11,5	

g) Construído com blocos de concreto agregados sólidos com uma taxa de altura / espessura de parede entre 1,0 e 1,2 como uma parede articulada

Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)									
Classe/ Designação	2,9	3,6	5,2	7,3	10,4	17,5	22,5	30	40 ou mais	
M12 / (i)	2,8	3,4	4,4	5,5	7,0	9,7	11,6	14,2	16,5	
M6 / (ii)	2,5	2,8	3,5	4,5	5,7	7,9	9,4	11,6	13,5	
M4 / (iii)	2,3	2,4	3,1	4,0	5,1	7,0	8,3	10,3	12,0	
M2 / (iv)	2,2	2,3	2,5	3,2	4,1	5,7	6,8	8,2	9,5	

h) Construídos com blocos de concreto agregados maciços, nivelados, com uma relação de altura / espessura de parede entre 0,4 e menos de 0,6

Resistência da argamassa	Resistência à compressão da unidade (N / mm²)									
Classe/ Designação	2,9	3,6	5,2	7,3	10,4	17,5	22,5	30	40 ou mais	
M12 / (i)	2,8	3,5	4,5	5,6	7,2	9,7	11,3	13,5	15,4	
M6 / (ii)	2,5	2,9	3,7	4,6	5,9	7,9	9,1	10,8	12,3	
M4 / (iii)	2,3	2,5	3,2	4,1	5,2	7,0	8,1	9,6	11,1	
M2 / (iv)	2,2	2,1	2,6	3,3	4,3	5,7	6,6	7,8	9,0	

Fonte: (BSI, 2005).

Além disso, essa norma permite calcular a resistência à carga vertical de projeto de uma parede por unidade de comprimento através da Equação (5).

$$\frac{\beta \cdot t \cdot f_k}{\gamma_m} \quad (5)$$

Sendo:

β – fator de redução para os efeitos de esbeltez e excentricidade (Tabela 4).

t – espessura da parede.

f_k – resistência a compressão característica (Tabela 2).

γ_m – fator de segurança parcial do material (Tabela 5).

Tabela 4 – Fator de redução β .

Razão de esbeltez	Excentricidade até o topo da parede			
	até 0,5t	0,1t	0,2t	0,3t
0	1,00	0,88	0,66	0,44
6	1,00	0,88	0,66	0,44
8	1,00	0,88	0,66	0,44
10	0,97	0,88	0,66	0,44
12	0,93	0,87	0,66	0,44
14	0,89	0,83	0,66	0,44
16	0,83	0,77	0,64	0,44
18	0,77	0,70	0,57	0,44
20	0,70	0,64	0,51	0,37
22	0,62	0,56	0,43	0,30
24	0,53	0,47	0,34	
26	0,45	0,38		
27	0,40	0,33		

Fonte: (BSI, 2005).

Tabela 5 – Fator de segurança parcial γ_m .

	Categoria das unidades de alvenaria	Categoria de controle da construção	
		Especial	Normal
Compressão	Categoria I	2,5	3,1
	Categoria II	2,8	3,5
Flexão	Categoria I e II	2,6	3,0

Fonte: (BSI, 2005).

2.2.3.2.3 EN 1996-1-1:2005

A norma europeia EN 1996-1-1 (EUROCODE, 2005) permite determinar a resistência a compressão característica através da Equação (6), a qual relaciona outras três equações (7 a 9) de acordo com as especificações dos materiais empregados.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (6)$$

Sendo:

f_k – resistência a compressão característica da alvenaria (N/mm²);

K – constante (Tabela 6).

α e β – constante (Equação 6).

f_b – resistência normalizada a compressão média da unidade (N/mm²).

f_m – resistência a compressão da argamassa (N/mm²).

Para alvenaria produzida com argamassa de uso geral e argamassa leve utiliza-se a Equação (7).

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad (7)$$

Para alvenaria com uma camada fina de argamassa de espessura de 0,5 mm a 3 mm e unidades cerâmicas do grupo 1 e 4, silicato de cálcio, e unidades de concreto aerado autoclavado emprega-se a Equação (8).

$$f_k = K \cdot f_b^{0,85} \quad (8)$$

Para alvenaria feita com argamassa fina, com espessura de 0,5 a 3 mm e unidades cerâmicas dos grupos 2 e 3, aplica-se a Equação (9).

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \quad (9)$$

Ainda, a norma considera que:

- f_b – não é considerado superior a 75 N/mm² quando as unidades são feitas com argamassa de uso geral;

- f_b – não é considerado superior a 50 N/mm² quando as unidades são feitas com uma camada fina de argamassa;

- f_m – não é considerado superior a 20 N/mm² e nem superior à $2f_b$ quando as unidades são feitas com argamassa de uso geral;

- f_m – não é considerado superior a 10 N/mm² quando as unidades são feitas com argamassa leve.

Tabela 6 - Valores de K para uso geral, camada fina e argamassas leves.

Unidade de alvenaria		Argamassa de uso geral	Argamassa de camada fina (junta $\geq 0,5$ mm e ≤ 3 mm)	Argamassa de densidade leve	
				$600 \leq \rho_d \leq 800$ kg/m ³	$800 \leq \rho_d \leq 1300$ kg/m ³
Argila	Grupo 1	0,55	0,75	0,30	0,40
	Grupo 2	0,45	0,70	0,25	0,30
	Grupo 3	0,35	0,50	0,20	0,25
	Grupo 4	0,35	0,35	0,20	0,25
Silicato de cálcio	Grupo 1	0,55	0,80	-	-
	Grupo 2	0,45	0,65	-	-
Agregado de concreto	Grupo 1	0,55	0,80	0,45	0,45
	Grupo 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Grupo 3	0,40	0,50	-	-
	Grupo 4	0,45	-	-	-
Concreto Aerado Autoclavado	Grupo 1	0,55	0,80	0,45	0,45
Pedra fabricada	Grupo 1	0,45	0,75	-	-
Pedra Natural Dimensionada	Grupo 1	0,45	-	-	-

(-) Combinação de argamassa / unidade não utilizada normalmente, portanto, nenhum valor é fornecido.

Fonte: (EUROCODE, 2011).

3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como as variáveis de resposta desse estudo são a deformabilidade e resistência à compressão de prismas quando submetidos a esforços de compressão, tratou-se como variáveis independentes as características dos materiais que foram utilizados na pesquisa, tipos de bloco e de argamassa, obtidos por meio de ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas de cada um dos componentes, assim, neste capítulo são detalhados os processos adotados para essa investigação.

A primeira variável independente é o tipo de bloco. Foram utilizados três tipos: cerâmicos de parede maciça, cerâmico de parede vazada e de concreto. A segunda variável independente é o tipo de argamassa de assentamento. Foram avaliados três tipos de argamassa: industrializada ensacada, estabilizada de 36 horas e estabilizada de 72 horas. Cabe ressaltar que todos os três tipos de argamassa utilizadas apresentavam baixa resistência à compressão.

Os ensaios necessários para caracterização das argamassas e blocos foram realizados na Universidade Federal de Santa Maria, no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC). A Tabela 7 apresenta os ensaios adotados para o desenvolvimento do programa experimental.

Tabela 7 – Ensaios do programa experimental.

Material	Ensaio	Equipamento	Objetivo	Norma associada
Bloco	Absorção individual	Estufa, esquadro, régua e balança	Determinar as características físicas dos blocos	NBR 12118 (2013)
	Área líquida (AL)			
	Área bruta (AB)			
	Relação AL/AB			NBR 15270-2 (2017)
	AAI	Reservatório com água		
Argamassa	Índice de consistência	Mesa do tipo " <i>Flow table</i> "	Caracterizar as argamassas em estudo	NBR 13276 (2016)
	Teor de ar incorporado	Recipiente com volume conhecido		NBR 13728 (2005)
	Densidade da massa no estado fresco			NBR 13728 (2005)
	Retenção de água (%)	Funil de Buchner ligado a uma bomba de vácuo		NBR 13277 (2005)
	Resistência à flexão (MPa)			NBR 13279 (2005)

Prismas	Resistência à compressão (MPa)	Prensa hidráulica da marca Contenco, modelo HD 20T		NBR 13279 (2005)
	Coefficiente de capilaridade	Reservatório com água		NBR 15259 (2005)
	Compressão de prismas	Prensa servo-controladora 1500HDX da marca Instron, com software de aquisição de dados e de operação Bluehill 3.0	Obter a curva tensão x deformação específica dos prismas	NBR 16868-3 (2020)
	Determinação do deslocamento	LVDT'S e sistema de aquisição de dados do tipo HBM SPIDER 8		

Fonte: (AUTORA, 2022).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS

Os blocos de concreto foram denominados BC e possuem resistência característica declarada pelo fabricante igual a 9 MPa. Os blocos cerâmicos de parede maciça têm resistência característica declarada pelo fabricante de 10 MPa e foram denominados de BCPM, e os blocos cerâmicos de parede vazada têm resistência característica declarada de 7 MPa e foram chamados de BCPV. Todos os blocos possuem a mesma dimensão nominal de 14 x 19 x 29 cm. A Figura 33 apresenta os blocos utilizados nesse estudo.

Figura 33 – Blocos utilizados na pesquisa a) bloco cerâmico de parede vazada, b) bloco cerâmico de parede maciça, c) bloco de concreto.



Fonte: (AUTORA, 2022).

3.2.1 Caracterização dimensional

Para a caracterização dimensional dos blocos foram utilizados esquadro e paquímetro, seguindo as recomendações das normas NBR 15270 (ABNT, 2017) para os blocos cerâmicos e NBR 12118 (ABNT, 2014) para blocos de concreto. As determinações de largura, altura e comprimento foram medidas na face externa de maior espessura dos blocos, assim como as dimensões de paredes externas e septos que também foram obtidas a partir da maior face do bloco.

Na análise das dimensões dos blocos cerâmicos foram ensaiadas amostras de 13 espécimes de cada tipo de bloco. A Tabela 8 apresenta os valores médios encontrados.

Tabela 8 – Dimensões médias blocos cerâmicos.

(mm)	BCPV	Sd	BCPM	Sd
Largura	139	1,74	141,9	0,58
Altura	192,7	2,72	193	0,58
Comprimento	289,9	2,74	292,1	0,49
Externa	32,2	1,40	20,8	0,87
Septo	9,4	1,52	9,9	0,58
Parede vazada	77,7	0,92	55,2	0,72
Vazado	73,2	2,24	97,2	0,59
Esquadro	2,9	0,64	2,5	0,48
Flecha	3,1	0,53	3,3	0,47

Fonte: (AUTORA, 2022).

Para os blocos de concreto ensaiou-se 6 blocos, os quais na largura, altura, comprimento e transversais internas foram feitas três medições e utilizada a média como medida do bloco e para as longitudinais internas, quatro determinações para compor a média do bloco. Por fim, para cada uma das dimensões foram determinadas as médias das 6 unidades em estudo e apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões médias blocos de concreto.

(mm)	BCPV	Sd
Largura	141	0,40
Altura	185,75	1,04
Comprimento	291,1	0,79
Longitudinais internas	29,575	1,45
Transversais internas	26,15	0,56

Fonte: (AUTORA, 2022).

Ainda na caracterização dimensional dos blocos de concreto, foram determinadas quatro medidas das mísulas dos dois furos dos blocos conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Dimensões mísulas blocos de concreto.

Corpo de prova	Raio das mísulas			
	Furo 1		Furo 2	
	1	2	3	4
1	49,8	48,1	47,2	45,3
2	50,4	47,1	45,3	45,9
3	48,8	49,7	47,9	46,3
4	46,1	47,1	48,2	45,1
5	49,6	46,1	47,6	45,9
6	48,9	49,8	46,2	47,9
Média	49,3	47,6	47,4	45,9

Fonte: (AUTORA, 2022).

3.2.2 Absorção de água e área líquida

Na determinação da absorção de água inicial (AAI) e área líquida de blocos cerâmicos seguiram-se as prerrogativas da NBR 12118 (ABNT, 2014) e para medição de absorção individual e área líquida de blocos de concreto seguiu-se a NBR 15270-2 (ABNT, 2017).

Para a medição da absorção individual foram analisadas amostras de 6 blocos cerâmicos e de 3 blocos de concreto. Os corpos-de-prova foram recebidos, identificados, pesados e então submetidos a secagem em estufa a 105 ± 5 °C por 24 horas, para se obter a massa seca (m_s), sendo posteriormente colocados em um tanque preenchido com água, à temperatura ambiente, mantendo submersos por mais 24 horas para que se pudesse fazer a leitura da massa úmida (m_u).

A absorção inicial individual dos blocos foi calculada através da Equação (10) e os resultados estão apresentados na

Tabela 11.

$$AA (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

AA – índice de absorção de água (%).

m_u – massa úmida do bloco (g).

m_s – massa seca do bloco (g).

Tabela 11 - Absorção inicial médias blocos em estudo.

	BCPV	Sd	BCPM	Sd	BC	Sd
Massa recebida (g)	6444	210,07	7305	29,8	10216	414,2
Massa seca (g)	6442	193,68	7297	32,5	9924	413,6
Massa úmida (g)	7153	200,75	7975	45,7	10520	411,3
Absorção inicial (%)	10,76	6,84	9,44	0,29	6,01	0,311

Fonte: (AUTORA, 2022).

Após saturados, os blocos foram pesados imersos em água para que se pudesse obter a massa aparente (ma). Dessa forma, foi encontrada a área líquida dos blocos através da Equação 11. Para a medição da área líquida foram utilizadas amostras de 6 blocos cerâmicos de cada tipo e de 3 blocos de concreto. Os resultados médios são apresentados na Tabela 12.

$$A_{liq} = \frac{m_u - ma}{\gamma \cdot H} \quad (11)$$

Onde:

A_{liq} – área líquida do bloco (cm²).

m_u – massa úmida do bloco (g).

ma – massa aparente do bloco (g).

γ – massa específica da água (1 g/(cm³)).

H – altura do bloco(cm).

Tabela 12 – Massa aparente, área líquida, área bruta e AL/AB dos blocos.

	BCPV	Sd	BCPM	Sd	BC	Sd
Massa saturada (g)	7153	200,75	7975	29,84	10520	414,23
Massa aparente (g)	3731	136,19	4111	32,52	5800	413,58
Altura do bloco (cm)	19,43	0,20	19,33	0,21	18,32	0,34
Área líquida (cm²)	174,02	18,35	199,53	1,85	257,64	3,43
Área bruta (cm²)	417,52	6,54	415,49	1,45	409,74	1,72
AL/AB	0,42	0,05	0,48	0,01	0,63	0,01

Fonte: (AUTORA, 2022).

Para os blocos cerâmicos, também foram determinados os índices de absorção de água inicial (AAI), por meio da montagem de um esquema para nivelamento da lâmina d'água conforme

prescrito na NBR 15270-3 (ABNT, 2017) (Figura 34), calculados através da Equação 12 e os resultados são apresentados na Tabela 13.

$$AAI = 193,55 \times \frac{\Delta_p}{\text{área}} \quad (12)$$

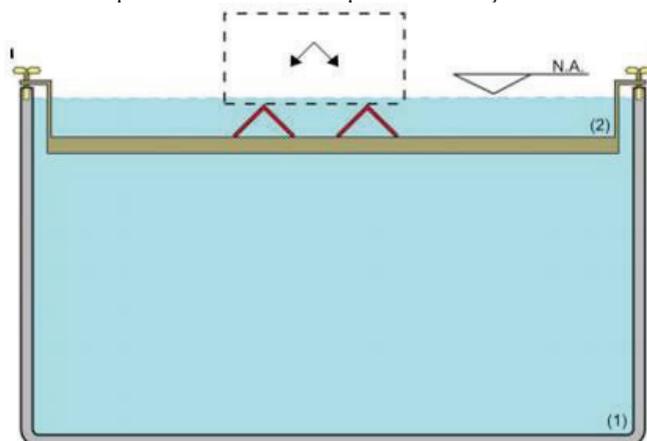
Onde:

AAI – índice de absorção de água inicial (g/193,55 cm²)/min.

Δ_p – variação de massa (g).

Área - área bruta ou líquida dos blocos (cm²).

Figura 34 - Esquema de reservatório para manutenção de lâmina d'água.



Fonte: (ABNT, 2017).

Tabela 13 – AAI médio para blocos cerâmicos.

	BCPV7	Sd	BCPM10	Sd
AAI (g/193,55cm²/min)	43,89	7,36	29,92	5,90

Fonte: (AUTORA, 2022).

3.2.3 Resistência dos blocos

Os blocos foram submetidos ao ensaio de compressão conforme as prescrições das normas NBR 12118 (ABNT, 2014) e NBR 15270-2 (ABNT, 2017), utilizando uma prensa hidráulica da marca Instron, modelo 1500HDX, com velocidade de carregamento controlada em 0,005 mm/s e *software* de aquisição de dados Bluehill, versão 3.13.1260.

Para a avaliação da resistência dos blocos foram utilizadas amostras de 13 blocos tanto para BCPV e BCPM e 10 blocos do BC. A Tabela 14 apresenta o resultado da análise da resistência dos blocos tanto na área bruta quanto na área líquida.

Tabela 14 – Resistência dos blocos na área bruta e área líquida.

Tipo de Bloco	Classe de Resistência (Mpa)	Área Bruta			Área Líquida			
		f_{bm} (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	f_{bm} (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	f_{bk} (MPa)
BCPV	7,0	7,28	1,08	14,90	17,47	2,60	14,90	5,22
BCPM	10,0	11,32	1,85	16,30	23,57	3,84	16,30	8,00
BC	9,0	11,79	2,25	19,09	18,75	3,58	19,09	8,81

Fonte: (AUTORA, 2022).

Dos resultados obtidos, percebe-se que a resistência característica à compressão dos blocos é diferente da declarada pelos fabricantes.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Nesse estudo foram utilizadas argamassa ensacada de múltiplo uso e argamassas estabilizadas de 36 e 72 horas. As amostras das argamassas ensacadas foram retiradas de um caminhão betoneira que estava indo para o canteiro de obras. Para caracterização desses materiais foram realizados ensaios de índice de consistência, teor de ar incorporado, retenção de água, densidade da massa no estado fresco, resistência à flexão, resistência à compressão e coeficiente de capilaridade.

O índice de consistência foi obtido conforme procedimento estabelecido pela NBR 13276 (ABNT, 2016), utilizando uma mesa do tipo “*flow table*” para medir o espalhamento da argamassa.

O teor de ar incorporado foi medido através das prescrições da NBR 13278 (ABNT, 2005), utilizando um recipiente de volume conhecido, encontrando assim a densidade da massa no estado fresco e posteriormente o teor de ar incorporado.

Para a retenção de água seguiu-se as recomendações da NBR 13277 (ABNT, 2005), utilizando um funil de Buchner ligado a uma bomba de vácuo, determinando a retenção de água através da variação de massa entre a aparelhagem vazia e a massa da aparelhagem preenchida com a argamassa após a sucção, e pelo fator água/argamassa fresca.

Nos ensaios para determinação da resistência à flexão e resistência à compressão seguiu-se os procedimentos estabelecidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005), moldando para isso três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, para cada tipo de argamassa em estudo, curados ao ar em temperatura ambiente e ensaiados após 28 dias. O coeficiente de capilaridade foi medido através do posicionamento de 3 corpos de prova prismáticos de cada tipo de argamassa em um recipiente com nível d'água em 5±1 mm, determinando a massa aos 10 minutos e 90 minutos, de acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005).

A Tabela 15 apresenta os valores médios obtidos em cada ensaio de caracterização, para os três tipos de argamassa em estudo.

Tabela 15 – Caracterização das argamassas.

Parâmetros	Ensacada	Argamassa estabilizada 36 horas	Argamassa estabilizada 72 horas
Índice de Consistência: (mm)	255	220	235
Teor de ar incorporado (%)	-	21,40	23,00
Densidade da massa no estado fresco (kg/m ³)	2.183	1.755	1.648
Retenção de água (%)	92,00	95,20	97,50
Resistência à flexão (MPa)	0,80	1,50	1,20
Resistência à compressão (MPa)	1,80	3,00	2,70
Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	19,93	4,57	6,02

Fonte: (AUTORA, 2022).

3.4 PREPARAÇÃO DOS PRISMAS

A fim de facilitar a identificação dos prismas adotou-se um esquema de nomenclaturas a partir da combinação de cada argamassa com cada tipo de bloco utilizado no estudo. A Tabela 16 apresenta as combinações entre os componentes e a nomenclatura atribuída na pesquisa.

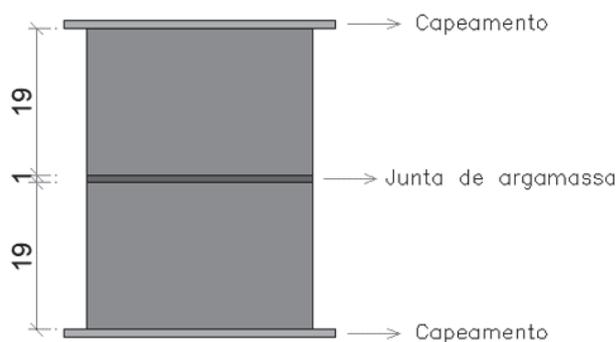
Tabela 16 – Combinação e nomenclatura dos materiais utilizados no estudo.

BLOCO	Resistência nominal (MPa)	ARGAMASSAS		
		Ensacada	Estabilizada 36 horas	Estabilizada 72 horas
Cerâmico de parede vazada	7	V7EN	V7ES36	V7ES72
Cerâmico de parede maciça	10	M10EN	M10ES36	M10ES72
Concreto	9	C9EN	C9ES36	C9ES72

Fonte: (AUTORA, 2022).

Os prismas foram moldados com dois blocos assentados com argamassa com espessura de 10 ± 3 mm e capeados nas extremidades utilizando argamassa de cimento e areia de alta resistência conforme a configuração apresentada na Figura 35. A argamassa foi aplicada em toda a superfície de contato entre os blocos e, para evitar a perda excessiva de água da argamassa, os blocos cerâmicos foram molhados antes do assentamento.

Figura 35 - Geometria dos prismas da pesquisa.



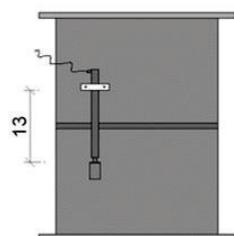
Fonte: (AUTORA, 2022).

Nos ensaios de prismas seguiu-se os procedimentos da NBR 16868-3 (ABNT, 2020), utilizando uma prensa hidráulica de marca Instron, modelo 1500HDX, com *software* de aquisição de dados e de operação Bluehill, com carga sendo aplicada a uma velocidade de 0,005 mm/s. Para as medidas de deformação dos prismas e blocos, foram utilizados dois LVDT's de marca HBM (modelo WA-T), verticais, fixados um em cada face, com suportes de acrílico e cantoneiras de

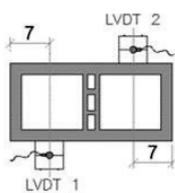
alumínio, sendo ligados a um sistema de aquisição de dados do tipo HBM SPIDER 8, conforme esquema da Figura 36.

Durante o ensaio, seguiu-se os procedimentos da NBR 8522-1 (2021) onde define-se que devem ser realizados três ciclos de carga e descarga até um nível de tensão de 30% da tensão máxima para que aconteça a acomodação do conjunto.

Figura 36 - Esquemática e modelo real dos prismas (medidas em cm).



Vista frontal



Vista superior



Fonte: (AUTORA, 2022).

4 ARTIGO – EFEITO DE ARGAMASSAS DE BAIXA RESISTÊNCIA NA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO E SUPORTES DE PRISMAS

4.1 RESUMO

O aprimoramento do sistema construtivo de alvenaria no país evidenciou a carência de conhecimento aprofundado dos diversos materiais que podem ser combinados para sua utilização, tornando-se fundamental entender o comportamento da alvenaria estrutural sob as mais diversas óticas, como por exemplo a deformabilidade dos prismas compostos por argamassas de baixa resistência e alto teor de ar incorporado. O objetivo deste trabalho é avaliar a curva tensão *versus* deformação e modo de ruptura de prismas comprimidos moldados com blocos de concreto e cerâmicos, com paredes vazadas e maciças, utilizando-se argamassas estabilizadas de baixa resistência, com tempo em aberto de 36 e 72 horas, em comparação com a argamassa ensacada. Os materiais foram caracterizados física e mecanicamente de acordo com as normas brasileiras. Para a verificação deformabilidade dos prismas comprimidos, foram moldados prismas de dois blocos, instrumentados com dois LVDT's, colados em faces opostas, para a medição dos deslocamentos. A partir da análise dos resultados, foi possível concluir que os prismas com blocos de concreto e argamassa de baixa resistência e alto teor de ar incorporado apresentaram comportamento linear até tensões próximas a 4 MPa, nesse nível ocasionando um relaxamento de tensão e deformações proporcionais até atingirem a ruptura. Foi observado também o poro colapso, ocorrendo destruição dos poros das argamassas para níveis de tensão menores que a máxima medida. Nos prismas de blocos cerâmicos de parede vazada conforme aumentou-se a resistência da argamassa houve aumento também o fator de resistência entre o prisma e o bloco e em prismas com blocos cerâmicos de parede maciça e blocos de concreto ocorreu aumento desse fator conforme aumentou-se o teor de ar incorporado.

Palavras-chave: resistência à compressão, deformabilidade, teor de ar incorporado, modo de ruptura.

4.2 INTRODUÇÃO

O emprego da alvenaria estrutural tem sido frequente na construção de edifícios de maior porte e grandes alturas, submetendo o sistema construtivo a cargas mais intensas, devido a vantagens como a construção racionalizada, quantidade reduzida de mão de obra, redução no tempo de realização e principalmente economia (ROMAN *et al.* 1998; CAMACHO, 2006; CAMACHO *et al.*, 2015; MOHAMAD *et al.*, 2017; DIAMANTINO; OLIVEIRA, 2021).

A principal característica do sistema construtivo de alvenaria estrutural é suportar e transmitir as cargas verticais e laterais aos elementos de fundação por meio de paredes, preenchidos ou não por groute e armadura, formando prismas (MOHAMAD; LOURENÇO; ROMAN, 2006; MARTINS *et al.* 2018). Para entender melhor o comportamento da alvenaria estrutural e aprimorar as diretrizes de projeto, são necessárias pesquisas focadas na interação entre os componentes da alvenaria. De acordo com Camacho *et al.* (2015), a combinação adequada dos componentes da alvenaria é indispensável para otimizar e maximizar o desempenho da estrutura. Entretanto, é enfatizada a falta de pesquisas que relacionem a interação entre bloco, junta de argamassa e graute, sujeitos à diferentes estágios de carregamento (elástico, inelástico e de ruptura) (THANOON *et al.*, 2008; LÜBECK, 2016; MARTINS *et al.*, 2018).

Dessa maneira, para proporcionar estruturas com maior durabilidade, segurança e conforto, parâmetros mais refinados usados no dimensionamento estrutural se tornam imprescindíveis para atender projetos mais elaborados e estruturas mais complexas. A resistência à compressão e o modo de falha de elementos de alvenaria não armados estão diretamente relacionados à interação muito complexa entre tijolos/blocos e a argamassa, seus diferentes processos de produção e propriedades mecânicas (HILSDORF, 1967; ATKINSON; NOLAND; ABRAMS, 1985; DRYSDALE; WONG, 1985). As unidades são as principais responsáveis por resistir às cargas compressivas e a argamassa garante a transmissão de carga, proporciona aderência entre as unidades e acomoda as deformações (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2012; RAMALHO; CORRÊA, 2003). No caso da alvenaria estrutural, a resistência à compressão é um dos principais determinantes no projeto de estruturas e é influenciada principalmente pela resistência à compressão dos blocos, como também pelas características da argamassa (LIMA, 2010). O funcionamento da alvenaria comprimida resulta no confinamento da argamassa, fazendo com que ela tenha um incremento de resistência e, por isso, muitas vezes é considerada como pouco influente no comportamento da alvenaria (MOHAMAD, 2007; LIMA, 2010; MOTA *et al.*, 2012; MOHAMAD *et al.*, 2017). A NBR 16868

(ABNT, 2020) recomenda que, para evitar risco de fissuras, a resistência à compressão da argamassa para assentamento seja limitada a 1,5 vez da resistência característica especificada para bloco na área líquida.

Ramalho e Correa (2003) afirmam que a resistência à compressão da argamassa não afeta significativamente a resistência à compressão das paredes de alvenaria, exceto quando a capacidade da argamassa for inferior a 40% da resistência à compressão do bloco. Mesmo aumentando em grande parte a resistência à compressão da argamassa, Parsekian *et al.* (2012) verificaram um pequeno aumento na resistência à compressão da alvenaria. Esses autores afirmam que quando a resistência à compressão da argamassa está entre 70% e 150% da resistência à compressão na área bruta do bloco, não se espera grande influência da argamassa na resistência dos prismas.

À medida que o nível de tensão/resistência aumenta, a argamassa torna-se suficientemente confinada e o seu comportamento torna-se predominante. O comportamento da argamassa passa a controlar o comportamento da alvenaria, de modo que a alvenaria passa a atuar como um sistema bicomponente (KAUSHIK; RAI; JAIN, 2007; MOHAMAD *et al.* 2017; MOHAMAD *et al.* 2018; THAMBOO; DHANASEKAR, 2019).

Quando se utilizam argamassas de baixa resistência, acontece uma inadequada distribuição das tensões, diminuindo a resistência à tração e a aderência. Recomenda-se que a resistência à compressão da argamassa seja entre 70% e 100% da resistência à compressão do bloco. De modo contrário, ao se aumentar a resistência da argamassa, a ruptura da alvenaria torna-se excessivamente frágil e o conjunto acaba não acompanhando os movimentos da estrutura. Além disso, uma argamassa com menor relação rigidez/resistência que o bloco, compensa o efeito das deformações do conjunto, já que é mais sensível às variações no coeficiente de Poisson da argamassa do que sua resistência, embora o aumento da resistência dos prismas não seja proporcional ao aumento da resistência da argamassa (GOMES, 1983; MOHAMAD, 1998; FREITAS, 2008; YANG; LEE; HWANG, 2019; THAMBOO; DHANASEKAR, 2019).

Diferentes tipos de bloco, geometrias e composições influenciam na deformabilidade e modo de ruptura de prismas. Blocos cerâmicos possuem uma ruptura mais explosiva se comparados a blocos de concreto (DE MARCO, 2016; LÜBECK, 2016; ALVARENGA *et al.*, 2017). Ao se considerar blocos cerâmicos, vários autores afirmam que a diminuição da resistência da argamassa pode tornar o sistema mais deformável à compressão, ou seja, corpos de prova com blocos cerâmicos e argamassa mais rígida são menos deformáveis do que corpos de prova com argamassa

menos resistente, além de apresentarem um comportamento não linear associado principalmente ao início de trincas verticais no prisma (THAMBOO; DHANASEKAR, 2019; THAMBOO, 2020).

Também para o projeto de alvenaria é importante entender os parâmetros mecânicos que envolvem o comportamento de unidades de bloco/tijolos e prismas quando expostos a esforços de compressão até que ocorra sua falha. Nesse contexto o objetivo desse estudo é avaliar o comportamento tensão-deformação de argamassas estabilizadas de forma a verificar a influência e as particularidades no uso desse material como componente da alvenaria estrutural. São estudados a resistência das unidades de alvenaria, a deformabilidade de prismas e o modo de ruptura dos mesmos, para argamassas de 36 e 72 horas de estabilização e ainda argamassa ensacada uso de forma a comparar o comportamento e blocos cerâmicos e de concreto.

4.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesse estudo, foram avaliados a combinação de três tipos diferentes de blocos e três tipos de argamassas, todas elas de baixa resistência: blocos cerâmicos de parede maciça (BCPM), bloco cerâmico de parede vazada (BCPV) e blocos de concreto (BC), todos com dimensões de 14x19x29, e argamassa industrializada ensacada de múltiplo uso, argamassa estabilizada de 36 horas e argamassa estabilizada de 72 horas. Todos os blocos foram combinados com todos os tipos de argamassas. Os ensaios necessários para caracterização das argamassas e blocos foram realizados na Universidade Federal de Santa Maria, no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

4.2.1 Caracterização dos blocos

Para a caracterização dos blocos em estudo foi utilizado a média de 13 amostras de cada tipo de bloco e os resultados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de caracterização dos blocos em estudo.

Parâmetros	Norma	BCPV	BCPM	BC
Absorção individual (%)	NBR	10,76	9,44	6,01
Área líquida (cm ²)	12118/2013	174,02	199,53	257,64
Área bruta (cm ²)		417,52	415,48	409,74
Relação AL/AB	NBR 15270-	0,42	0,48	0,63
AAI (g/193,55cm ² /min)	2/2017	43,89	29,92	-

Fonte: (AUTORA, 2022).

Os valores para as resistências médias a compressão na área bruta, área líquida e resistência característica dos blocos foram expressos na Tabela 18. **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Observa-se que a resistência característica dos blocos utilizados ficaram abaixo que a resistência nominal.

Tabela 18 - Resistência média dos blocos na área bruta e área líquida e resistência característica

Tipo de Bloco	Classe de Resistência (Mpa)	Área Bruta			Área Líquida			f_{bk} (Mpa)
		f_{bm} (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	f_{bm} (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	
BCPV	7	7,28	1,08	14,90	17,47	2,60	14,90	5,22
BCPM	10	11,32	1,85	16,30	23,57	3,84	16,30	8,00
BC	9	11,79	2,25	19,09	18,75	3,58	19,09	8,81

Fonte: (AUTORA, 2022).

4.2.2 Caracterização das argamassas

No estudo foram utilizadas argamassa industrializada ensacada de múltiplo uso e argamassas estabilizadas de 36 e 72 horas, produzidas em uma usina na cidade de Santa Maria/RS, e coletadas em uma obra onde estava sendo usada no assentamento de alvenaria estrutural.

Para caracterização desses materiais foram realizados ensaios de índice de consistência, teor de ar incorporado, retenção de água, densidade da massa no estado fresco, resistência à flexão, resistência à compressão e coeficiente de capilaridade, como apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas

Parâmetros	Norma	Ensacada	Argamassa estabilizada 36 horas	Argamassa estabilizada 72 horas
Índice de Consistência: (mm)	NBR 13276/2016	255	220	235
Teor de ar incorporado (%)	NBR 13728/2005	-	21,4	23,0
Densidade da massa no estado fresco (kg/m³)	NBR 13728/2005	2.183	1.755	1.648
Retenção de água (%)	NBR 13277/2005	92,0	95,2	97,5
Resistência à flexão (MPa)	NBR 13279/2005	0,80	1,50	1,20
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279/2005	1,80	3,00	2,70
Coefficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2})	NBR 15259/2005	19,93	4.57	6.02

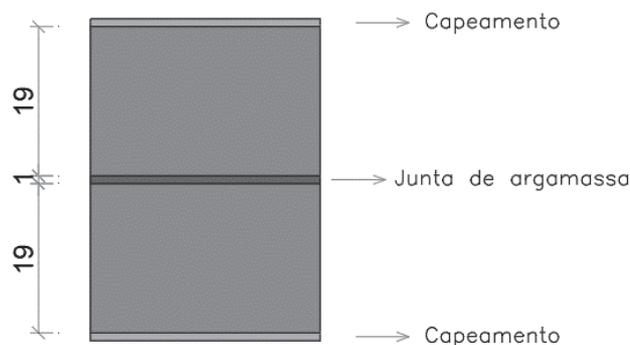
Fonte: (AUTORA, 2022).

4.2.3 Preparação dos prismas

Os prismas foram moldados com dois blocos assentados com argamassa e capeados nas extremidades conforme a configuração apresentada na Figura 37. A fim de facilitar a identificação dos conjuntos adotou-se um esquema de nomenclaturas a partir da combinação de cada argamassa com cada tipo de bloco utilizado no estudo. A Tabela 20 apresenta o esquema de arranjo entre os componentes e a nomenclatura atribuída na pesquisa. Foram moldados seis prismas para cada conjunto.

As argamassas foram aplicadas em toda a área útil do bloco, com espessura de 10 ± 3 mm, sendo capeados nas extremidades em toda a superfície do bloco com argamassa de cimento e areia de elevada resistência, a fim de manter as amostras niveladas e não ocasionar a concentração de cargas. Antes da moldagem, os blocos cerâmicos foram molhados a fim de diminuir a perda de água da argamassa de assentamento. Depois de moldados, os prismas foram curados ao ar e ensaiados 28 dias de idade.

Figura 37 - Geometria dos prismas da pesquisa.



Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela 20 - Combinação e nomenclatura dos materiais utilizados no estudo

Bloco	Prismas		
	Ensacada	Estabilizada 36 horas	Estabilizada 72 horas
Cerâmico de parede vazada	VEN	VES36	VES72
Cerâmico de parede maciça	MEN	MES36	MES72
Concreto	CEN	CES36	CES72

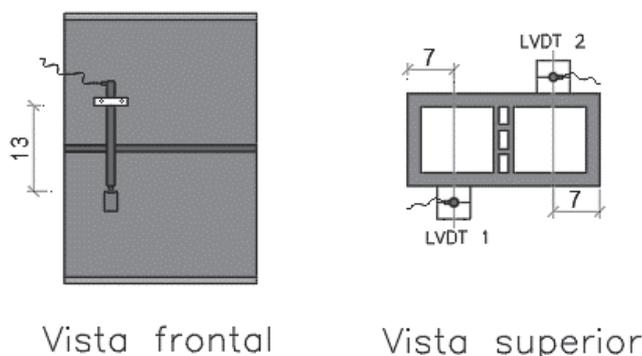
Fonte: (AUTORA, 2022).

Nos ensaios de prismas comprimidos axialmente seguiu-se os procedimentos da NBR 16868-3:2020. Os ensaios foram realizados em uma prensa servo-controlada modelo 1500HDX da marca Instron, com software de aquisição de dados e de operação Bluehill 3.0, com o controle de deslocamento e uma velocidade de avanço de 0,005 mm/s.

Para as medidas de deslocamentos de prismas e blocos foram utilizados dois LVDT's da marca HBM (modelo WA-T) WA-50, verticais, fixados um em cada face com suportes de acrílico e cantoneiras de alumínio colados à parede dos blocos, conforme Figura 38. Os LVDT's foram ligados a um sistema de aquisição de dados do tipo HBM SPIDER 8. A base de medida das deformações dos LVDT's era de 13cm e englobava parte dos blocos e a argamassa da junta.

Para o ensaio de resistência à compressão e medida das deformações, os prismas foram submetidos primeiramente a três ciclos prévios de carga e descarga até uma tensão de aproximadamente 30% da resistência estimada antes da realização do ensaio de compressão de maneira a acomodar as deformações no conjunto. Depois dos ciclos, os prismas foram carregados de maneira contínua até a ruptura.

Figura 38 - Esquemática dos prismas (medidas em cm).



Fonte: (AUTORA, 2022).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.4.1 Resistência à compressão e comportamento tensão *versus* deformação específica

Para os seis espécimes em estudo de cada amostra, foram determinados seus deslocamentos, através da média das leituras entre os dois LVDT's e a deformação específica calculada, gerando

assim as curvas tensão-deformação específica (tensão *versus* deformação) para cada combinação de prisma em análise (Figura 39). Para obtenção das curvas foi considerado o ponto em que fosse obtida a máxima resistência e máxima deformação específica do prisma. Leituras espúrias foram desconsideradas da média das amostras.

Os resultados médios dos conjuntos para a resistência máxima, coeficiente de variação da resistência e deformação específica de ruptura média entre os seis prismas de cada combinação de materiais utilizadas no estudo são apresentados na Tabela 21. As médias foram calculadas excluindo os valores espúrios e apresentadas através da média \pm desvio padrão das seis amostras.

Tabela 21 - Resistência máxima e deformação máxima de ruptura dos prismas em estudo.

Conjunto	σ_{max} (MPa)	Sd	CV	ϵ_{rupt} (%)	Sd
VEN	3,45	0,59	17,18	1,56	0,53
VES36	5,20	0,29	5,62	2,97	0,24
VES72	4,16	0,67	16,02	2,30	0,48
MEN	4,66	0,26	5,60	2,17	0,26
MES36	6,30	0,81	12,86	1,89	0,68
MES72	6,78	0,71	10,49	2,83	0,26
CEN	6,83	0,97	14,27	3,07	0,67
CES36	5,20	0,59	11,42	1,81	0,43
CES72	7,73	1,01	13,05	2,44	0,15

Fonte: (AUTORA, 2022).

A Tabela 22 apresenta a resistência média de prismas, blocos e argamassas obtidos através dos ensaios experimentais, além das resistências características para blocos e prismas e a as relações entre as resistências da argamassa e do bloco (f_{arg}/f_{bm}), prisma e bloco característica (f_{pk}/f_{bk}) e prisma e bloco média (f_{pm}/f_{bm}).

Tabela 22 - Resistências e fatores de resistências dos prismas.

Conjunto	f_{pm}	Sd	f_{pk}	f_{bm}	Sd	f_{bk}	f_{arg}	f_{arg}/f_{bm}	f_{pk}/f_{bk}	f_{pm}/f_{bm}
VEN	3,45	0,59	2,7	7,28	1,08	5,22	1,8	0,25	0,52	0,47
VES36	5,20	0,29	4,28				3	0,41	0,82	0,71
VES72	4,16	0,67	2,95				2,7	0,37	0,57	0,57
MEN	4,66	0,26	4,13	11,32	1,85	8	1,8	0,16	0,52	0,41
MES36	6,30	0,81	5,24				3	0,27	0,66	0,56
MES72	6,78	0,71	5,8				2,7	0,24	0,73	0,60
CEN	6,83	0,97	5,56	11,79	2,25	8,31	1,8	0,15	0,67	0,58
CES36	5,20	0,59	4,05				3	0,25	0,49	0,44
CES72	7,73	1,01	6,79				2,7	0,23	0,82	0,66

Fonte: (AUTORA, 2022).

A relação entre resistência média prisma/bloco na área bruta para blocos cerâmicos de parede vazada variou entre 0,47 e 0,71. Para blocos cerâmicos de parede maciça a relação de resistências prisma/bloco variou entre 0,41 e 0,60. Já os prismas de concreto, a relação de resistências prisma/bloco entre 0,44 e 0,66.

Portella (2015) verificou para bloco cerâmico de parede vazada com resistência do bloco entre 6 MPa e 8,5 MPa, um fator de eficiência característico de 0,48 e eficiência média de 0,55, utilizando argamassas de baixas resistências mas com limite mínimo de 1,5 MPa.

Pode-se observar que o emprego de argamassa estabilizada no conjunto aumentou o fator de eficiência em relação a modelos com argamassa ensacada, exceto a amostra CES36 que por sua vez diminuiu o fator eficiência em relação a argamassa ensacada e a argamassa estabilizada de 72 horas, sendo necessário verificá-los juntos com a curva tensão *versus* deformação para avaliação do esmagamento da junta e o conseqüente efeito no prisma. Observa-se também que para prismas com blocos cerâmicos de parede vazada, conforme aumenta-se a resistência da argamassa, aumenta-se também a relação entre o prisma e o bloco, entretanto, esse comportamento não é observado nos prismas com blocos cerâmicos maciços e blocos de concreto, para os quais ocorreu um aumento da relação conforme aumento do teor de ar incorporado da argamassa.

Nos conjuntos com bloco cerâmico de parede vazada a resistência da argamassa foi quem governou o desempenho do prisma, uma vez que quanto maior a resistência da argamassa utilizada, maior também a resistência média e a deformação específica na ruptura, esse comportamento pode ser explicado devido a área de contato do bloco cerâmico de parede vazada ser pequena (relação A_L/A_B 0,42), diminuindo o efeito do confinamento da junta de argamassa.

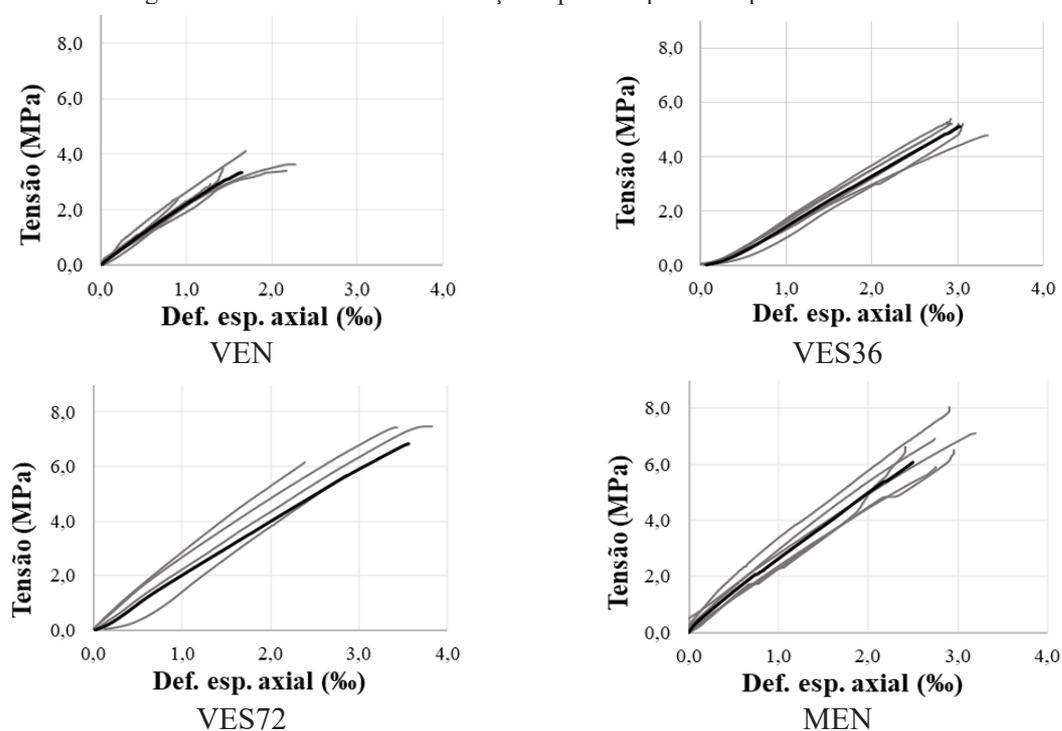
Em conjuntos com bloco cerâmico de parede maciça e blocos de concreto, onde a largura da parede do bloco é maior e o confinamento tem maior condições de se desenvolver, o teor de ar incorporado afetou a resistência e deformação específica dos prismas, uma vez que quanto maior o teor de ar incorporado também foi maior a deformação na ruptura, ocorrendo o poro colapso.

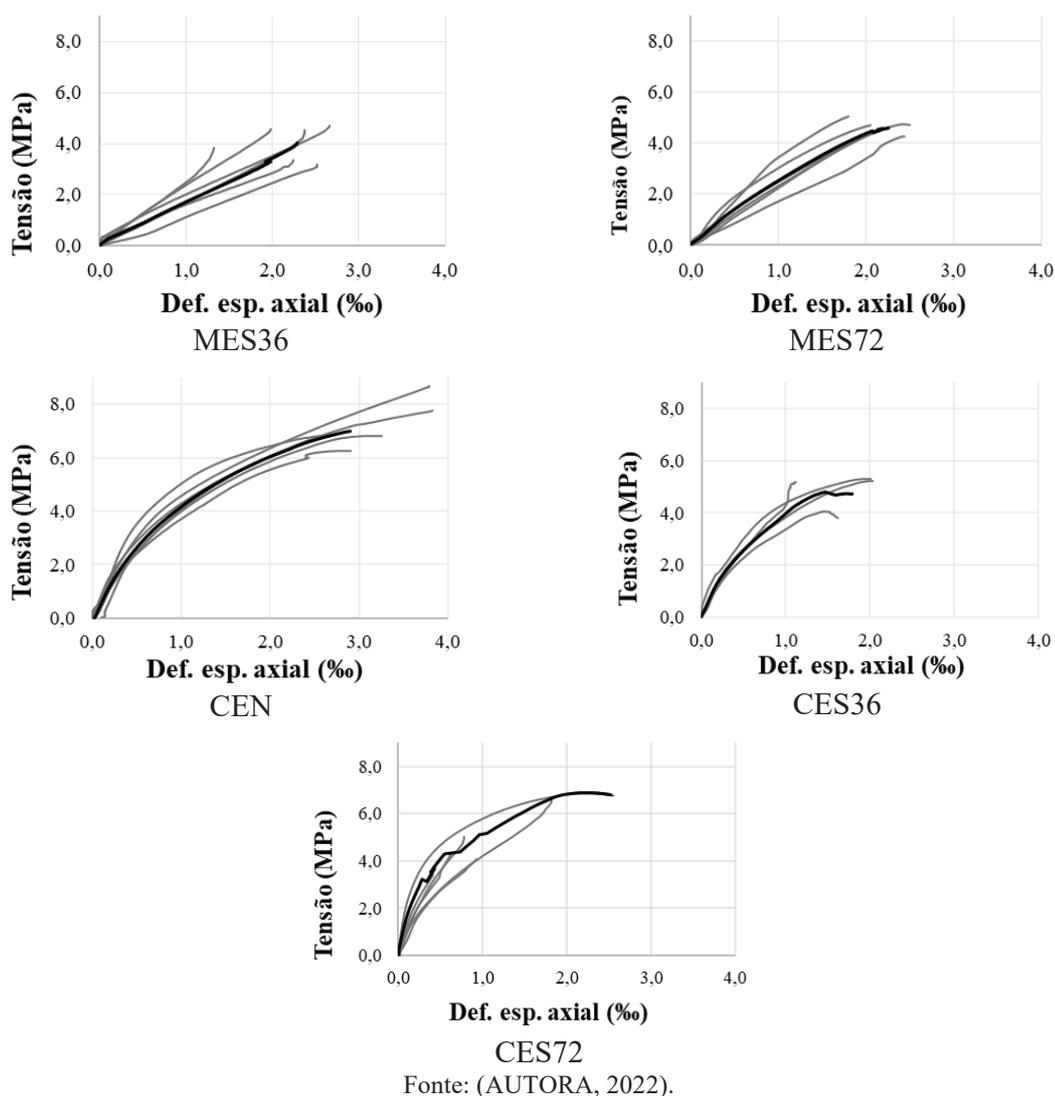
Os estudos de Khoo (1972), Atkinson et al. (1985), Mohamad (1998), Hayen, Van Balen e Van Gemert (2003), Schnkoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015), Lübeck (2016), Machado (2019), apontam que argamassas de menor resistência falham por esmagamento das juntas ou poro colapso, uma vez que o material vai reduzindo seu volume até que ocorra fechamento dos seus poros internos.

Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015) estudaram a resistência à compressão, aderência e mecanismos de ruptura de prismas com argamassas industrializadas e mistas em conjunto e blocos de concreto com resistência à compressão de 16 MPa e concluíram que o elevado teor de ar incorporado das argamassas de assentamento aumentaram a dispersão dos resultados e influi de forma negativa na resistência do prisma, uma vez que quanto maior o teor de ar incorporado menor a resistência do prisma.

Na Figura 39 são mostradas as curvas tensão-deformação específicas para cada um dos conjuntos de prismas testados. Em cada um dos gráficos, as linhas em cinza representam o comportamento médio de cada prisma enquanto a linha em preto representa a média dos espécimes testados. As curvas foram plotadas até o início do processo de ruptura, pois quando há fissuração dos elementos ou esmagamento da junta, pode acontecer movimentação dos LVDT's e as curvas acabam captando deslocamentos que não são do ensaio em si. Então, para alguns dos prismas a curva não alcança a máxima tensão medida, porque o ensaio teve que se interrompido.

Figura 39 – Curvas tensão-deformação específica para os espécimes analisados.





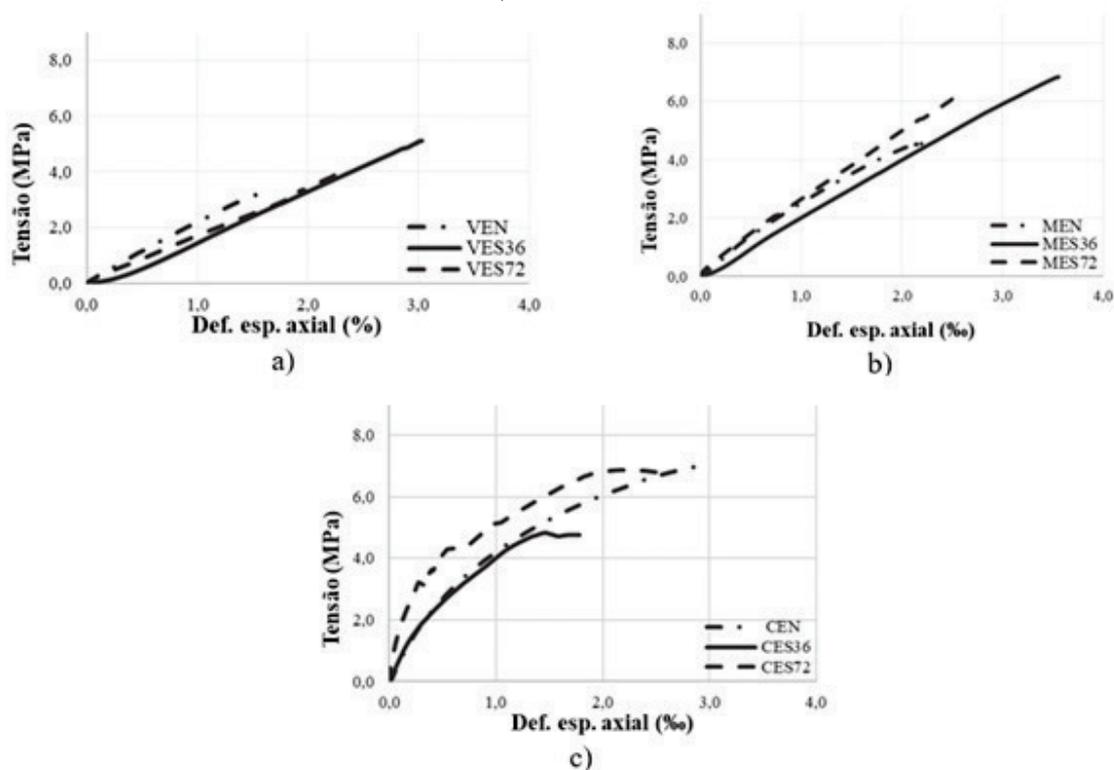
Observa-se que todos os prismas com argamassa estabilizada apresentaram resistências máximas superiores aos prismas com argamassa ensacada, exceto a combinação CES36, que apresentou uma baixa de 22,99% em sua resistência quando comparado com os prismas de bloco de concreto e argamassa ensacada (CEN).

Prismas com blocos cerâmicos e argamassa estabilizada de 72 horas apresentaram deformação na ruptura maiores que prismas do mesmo bloco com argamassas ensacadas. Nos blocos cerâmicos de parede vazada foram observadas deformações maiores com argamassas estabilizadas do que com argamassas ensacadas, indicando que a deformação não depende apenas da resistência da argamassa, mas também de sua porosidade. Em blocos cerâmicos de parede

maciça, ocorreu no conjunto com argamassa estabilizada de 36 horas deformações menores do que em conjunto do material com argamassa ensacada e estabilizada de 72 horas. Já nos blocos de concreto, as deformações na ruptura em arranjos com argamassas estabilizadas foram menores do que em arranjos com argamassa ensacada.

Na Figura 40 são mostradas as curvas tensão-deformação específicas médias para cada tipo de bloco quando usadas as três diferentes argamassas de assentamento.

Figura 40 - Curva tensão-deformação para a) bloco cerâmico de parede vazada, b) bloco cerâmico de parede maciça e c) bloco de concreto.

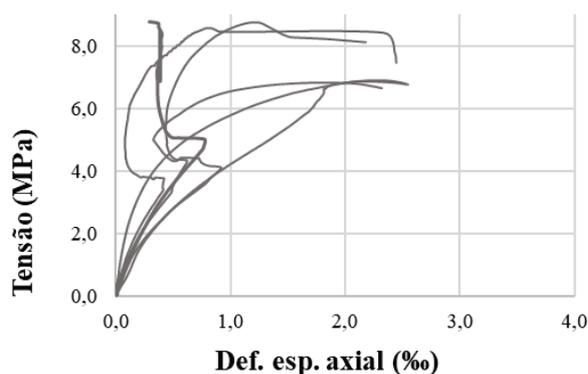


Fonte: (AUTORA, 2022).

Percebe-se que o comportamento tensão-deformação específico foi diferente para os blocos cerâmicos e de concreto. Para os prismas de blocos cerâmicos o comportamento foi essencialmente linear enquanto para os blocos de concreto foi não-linear. Em especial, os prismas de concreto com argamassa estabilizada de 72 horas onde as curvas passaram a apresentar um comportamento errático para níveis de tensão menores que os observados nos demais conjuntos (Figura 41). Para uma tensão de, aproximadamente, 4 MPa, as medidas de deformação passaram a apresentar

variações bruscas, devido ao esmagamento localizado da junta de argamassa, com consequente fissuração dos blocos.

Figura 41 - Curva tensão - deformação específica de prismas de concreto com argamassa estabilizada de 72 horas.



Fonte: (AUTORA, 2022).

Na Figura 42 são mostrados os prismas após a ruptura indicando-se as fissuras geradas pelo esmagamento pontual da junta de argamassa.

Mohamad, Lourenço e Roman (2006), Mohamad (2007), Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015), Lübeck (2016), Machado (2019) também observaram esse fenômeno em seus estudos. Segundo os autores, em prismas de blocos de concreto e argamassa de baixa resistência pode ocorrer o esmagamento da argamassa associado ao poro colapso fazendo com que ocorra a quebra da aderência entre a argamassa e os blocos. Depois de desencadeado o esmagamento da junta, o conjunto ainda tem a capacidade de absorver carregamentos de compressão devido o atrito entre a junta e os blocos, contudo, o comportamento não é mais o de alvenaria visto que não existe mais adesão entre os componentes e o conjunto não seria capaz de absorver esforços de flexão ou cisalhamento.

Figura 42 - Esmagamento da junta de argamassa conjunto CES72



Fonte: (AUTORA, 2022).

4.4.2 Resistências médias e módulo de elasticidade dos prismas

A Tabela 23 apresenta resultados das resistências médias e características dos prismas além do módulo de deformação, obtido a um nível de 30% da tensão máxima. Na mesma tabela apresenta-se o valor previsto pelas equações da norma NBR 16868 (2020), apenas a título de comparação, e o valor da relação obtida entre o módulo de deformação e a resistência dos prismas desta pesquisa.

Tabela 23 - Módulo de deformação, resistência média e característica dos prismas.

Conjunto	f_{pm} (MPa)	f_{pk} (MPa)	E_p (MPa)	E (Norma) (MPa)	E_p/f_{pm}
VEN	3,45	2,7	2421	1620	702
VES36	5,20	4,28	1514	2568	291
VES72	4,16	2,95	2037	1770	490
MEN	4,66	4,13	2662	2478	571
MES36	6,30	5,24	2082	3144	330
MES72	6,78	5,8	2882	3480	425
CEN	6,83	5,56	5644	4448	826
CES36	5,20	4,05	6440	3240	1238
CES72	7,73	6,79	7309	5432	946

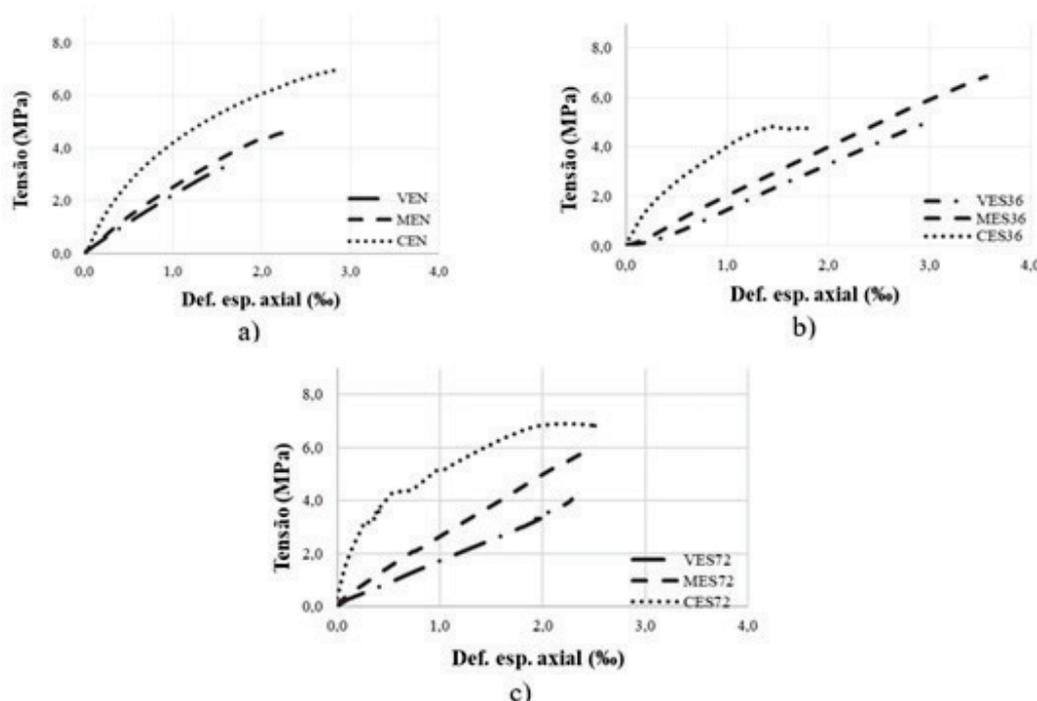
Fonte: (AUTORA, 2022).

A NBR 16868 (2020) admite que para alvenaria de blocos cerâmicos o módulo de deformação longitudinal pode ser adotado como $600 f_{pk}$, e para blocos de concreto, $800 f_{pk}$, quando f_{bk} for menor ou igual a 20 MPa. Dessa forma, os conjuntos VES36, MES36 e MES72 ficaram 41,04%, 33,78% e 17,18% abaixo dos limites estabelecidos pela norma.

4.4.3 Comparação do tipo de argamassa e tipo de bloco

As curvas tensão-deformação específicas apresentadas na Figura 43 resumem o comportamento dos prismas para um mesmo tipo de argamassa e variando o tipo de bloco. Dessas curvas percebe-se que o comportamento das argamassas mudou em função do tipo de bloco, especialmente quando avaliado o comportamento dos blocos de concreto que resultou em comportamentos não lineares para todas as argamassas.

Figura 43 - Curva tensão-deformação em função dos tipos de blocos para a) argamassa ensacada, b) argamassa estabilizada de 36 horas e c) argamassa estabilizada de 72 horas.



Fonte: (AUTORA, 2022).

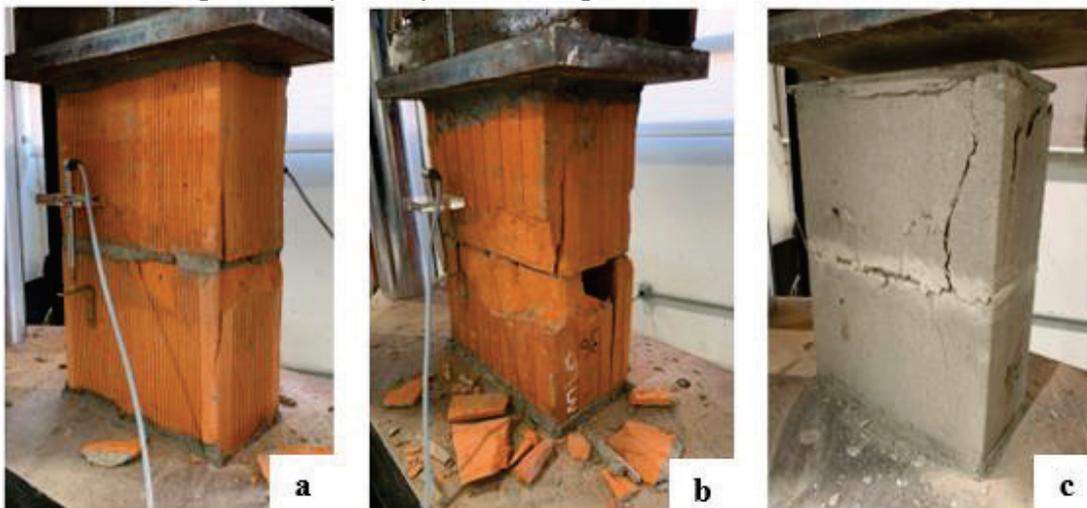
4.5 MODO DE RUPTURA DOS PRISMAS

4.5.1 Prismas com argamassa estabilizada de 36 horas

A Figura 44 mostra um dos espécimes pós-ruptura de cada prisma com argamassa estabilizada de 36 horas. Na Figura 45a exibe-se a ruptura do bloco cerâmico de parede vazada, na Figura 45b a do bloco cerâmico de parede maciça e na Figura 45c a do bloco de concreto.

Observou-se que conjuntos com esse tipo de argamassa romperam-se por esmagamento da junta com conseqüente lascamento dos blocos. Nas imagens percebe-se que se desprenderam lamelas dos blocos no entorno das juntas de argamassa.

Figura 44 - Ruptura de prismas com argamassa estabilizada de 36 horas.



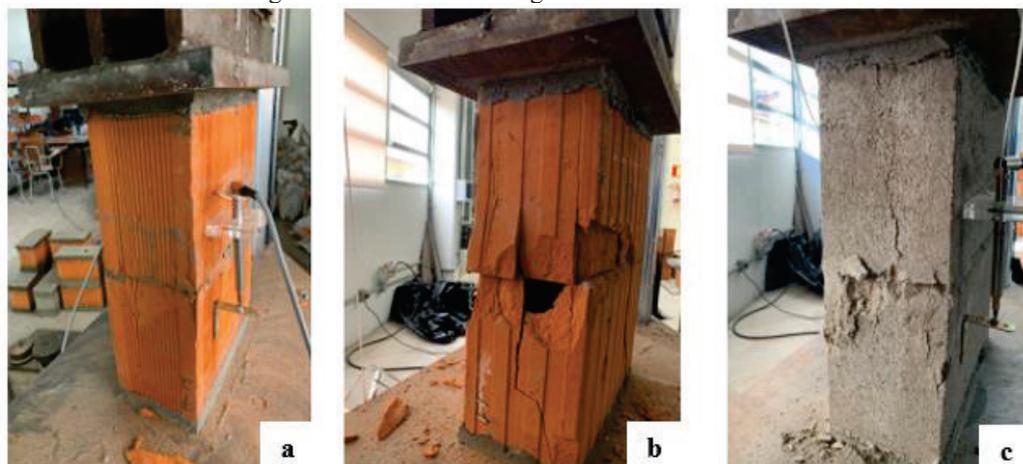
Fonte: (AUTORA, 2022).

4.5.2 Prismas com argamassa estabilizada de 72 horas

Na Figura 45 são apresentados alguns prismas executados com argamassa de 72 horas depois da ruptura. Nestes prismas também se observa que houve o esmagamento pontual da junta de argamassa e o conseqüente desprendimento de lamelas dos blocos.

Especialmente para os blocos de concreto, depois da ruptura percebeu-se que o bloco superior se desprende completamente da junta de argamassa, indicando a quebra da aderência.

Figura 45 - Prismas com argamassa estabilizada de 72 horas.



Fonte: (AUTORA, 2022).

4.5.3 Prismas com argamassa industrializada encasada

Na Figura 46, apresentam-se exemplos do panorama pós-ruptura de prismas executados com argamassa encasada. Apesar da resistência à compressão dessas argamassas ter sido menor que as demais, o esmagamento das juntas foi menos evidente. Os blocos apresentaram fissuras verticais e com desprendimento de lamelas pontualmente.

Figura 46 - Prismas com argamassa encasada.



Fonte: (AUTORA, 2022).

De modo geral, prismas com argamassa de baixa resistência apresentam rompimento por esmagamento da junta, com aparecimento de fissuras laterais e concentração de cargas, tanto para blocos cerâmicos quanto para blocos de concreto.

Machado (2019) avaliou o comportamento de prismas com blocos cerâmicos e blocos de concreto e constatou que para blocos cerâmicos o aumento da resistência da argamassa aumenta a resistência do prisma, mas altera o seu comportamento na ruptura. Especialmente em prismas com blocos de concreto, a resistência da argamassa não interfere na resistência última dos prismas, mas afeta o desencadeamento do modo de ruptura. A autora apontou que aconteceu a quebra da aderência para níveis de tensão menores que a máxima medida. Na avaliação pós-ruptura, identificou-se o completo descolamento dos blocos e junta de argamassa.

Schossler (2019) constatou que em blocos de concreto com argamassas de menor resistência, as deformações acumulam-se nas juntas de argamassa, se desenvolvendo até o rompimento do prisma por esmagamento da junta.

Alvarenga *et. al.* (2017) avaliaram o comportamento mecânicos de prismas cerâmicos, ao usar argamassa de menor resistência, os prismas não sofreram uma ruptura frágil, de forma que foi possível verificar o aparecimento de fissuras verticais nas paredes dos blocos antes da ruptura.

Otoni (2020) avaliou prisma com bloco de cerâmico de parede vazada e verificou que a partir de 70% da tensão máxima desencadeia-se a ruptura do prisma com a expulsão de lamelas da junta de argamassa e que pós-ruptura ocorre a destruição dos poros da argamassa e desvinculação parcial entre blocos e junta.

Em blocos cerâmicos de parede vazada a resistência da argamassa comandou o comportamento do prisma e conseqüente a possibilidade de esmagamento da junta. Já nos prismas com blocos cerâmicos de parede maciça e blocos de concreto, o teor de ar incorporado da mistura comandou o comportamento do prisma, com modo de ruptura abrupta, frágil, poro colapso e perda significativa de aderência.

Observa-se que o modo de ruptura de prismas é afetado por dois fatores: a aderência e o confinamento da argamassa. Essa perda de aderência entre bloco/argamassa, pode ser explicada pela grande quantidade de ar incorporado na argamassa, o que pode aumentar a quantidade de poros

e diminuir a eficiência na aderência, exsudação e diminuição da área de contato. O confinamento da argamassa se dá justamente pela existência da aderência entre os componentes do conjunto.

Nos prismas de blocos de concreto executados com argamassa estabilizada, a perda de aderência foi significativa, afetando o modo de ruptura dos prismas, com desvinculação do bloco por completo e desprendimento de lamelas, confirmando a ocorrência do esmagamento da junta.

4.6 CONCLUSÕES

De modo geral, prismas com argamassa estabilizadas apresentaram tensões abaixo da resistência dos blocos, comportando-se linearmente até um valor próximo de 4 MPa a partir do qual se comportam de forma não linear.

Todos os prismas com argamassa estabilizada apresentaram resistências máximas superiores aos prismas com argamassa ensacada exceto prismas de blocos de concreto e argamassa estabilizada de 36 horas.

Prismas de argamassa estabilizada de 72 horas e blocos de concreto apresentaram comportamento linear próximo a tensões de 4 MPa, ao qual a partir desse nível comportavam-se com relaxamento de tensão e deformações proporcionais até que atinjam a ruptura. Entretanto observa-se que nesse conjunto ocorreu o poro colapso, onde a partir de 4 MPa, houve a destruição dos poros da argamassa ao ponto em que houve sobreposição de blocos com ganhos de tensões e deformações com comportamentos não lineares, até que se ocorre ruptura do bloco por completo.

Quanto ao modo de ruptura, prismas com argamassa estabilizada romperam-se por concentrações de tensões, trincas nas faces laterais, estilhados das paredes dos blocos próximos as juntas, observou-se também que em blocos de concreto a ruptura é mais evidente na junta. Prismas com argamassa estabilizada estão sujeitos ao poro colapso com perda significativa de aderência.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou avaliar a deformabilidade de prismas com argamassas de baixa resistência e alto teor de ar incorporado quando combinada com três tipos diferentes de blocos, aos quais foram produzidos prismas e instrumentados com LVDT para obter a curva tensão-deformação dos conjuntos. Também foram observados o modo de ruptura os espécimes em estudo.

A partir das análises realizadas, foi possível concluir que:

- a) Prismas com argamassa estabilizadas apresentaram tensões abaixo da resistência dos blocos, comportando-se elasticamente até um valor próximo de 4 MPa a partir do qual se comportam de forma não linear.
- b) Prismas com argamassa estabilizada apresentaram resistências máximas superiores aos prismas com argamassa ensacada exceto prismas de blocos de concreto e argamassa estabilizada de 36 horas.
- c) Prismas de argamassa estabilizada de 72 horas e blocos de concreto apresentaram comportamento linear próximo a tensões de 4 MPa, ao qual a partir desse nível comportavam-se com relaxamento de tensão e deformações proporcionais até que atinjam a ruptura. Entretanto observa-se que nesse conjunto ocorreu o poro colapso, onde a partir de 4 MPa, houve a destruição dos poros da argamassa ao ponto em que houve sobreposição de blocos com ganhos de tensões e deformações com comportamentos não lineares, até que se ocorre ruptura do bloco por completo.
- d) Avaliou-se nos prismas com blocos cerâmicos de parede vazada que conforme aumentasse a resistência da argamassa aumentou-se também a relação entre o prisma e o bloco, entretanto, esse comportamento não é observado nos prismas com blocos cerâmicos maciço e blocos de concreto, ao quais ocorreram um aumento do fator eficiência conforme aumento do teor de ar incorporado da argamassa.
- e) Quanto ao modo de ruptura, prismas com argamassa estabilizada romperam-se por concentrações de tensões, trincas nas faces laterais, estilhados das paredes dos blocos próximos as juntas, observou-se também que em blocos de concreto a ruptura é mais evidente na junta. Prismas com argamassa estabilizada estão sujeitos ao poro colapso com perda significativa de aderência.

- f) O comportamento tensão-deformação específico foi diferente para os blocos cerâmicos e de concreto, para prismas de blocos cerâmicos o comportamento foi essencialmente linear enquanto para blocos de concreto foi não-linear.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são listadas algumas recomendações de estudos futuros que objetivam complementar as análises iniciadas nesse trabalho, afim de melhor compreender o efeito de argamassas de baixas resistência e com alto teor de ar incorporado quando empregadas no assentamento de alvenaria:

- a) Ensaiar prismas com argamassas de outras faixas de resistências e outros teores de ar incorporado, para verificar o comportamento de prismas com outras combinações de materiais;
- b) Avaliar o modo de ruptura dos prismas complementando com softwares de simulação de comportamento;
- c) Averiguar a influência do teor de ar incorporado da argamassa no que tange a aderência do prisma;
- d) Ensaiar a curva tensão-deformação com outros métodos de instrumentação, (strain gauge);

REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de revestimentos de argamassa.** [s. l.], p. 104, 2013. Disponível em: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270-2:** Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15270-3:** Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15961-1:** Alvenaria Estrutural – Blocos de Concreto. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16868-1:** Alvenaria Estrutural – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 12118:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014. 14 p.

_____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

_____. **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

_____. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 13 p.

_____. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.

_____. **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

ACCETINI, K. M. **Contribuições ao projeto estrutural de edifícios em alvenaria**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar argamassas de revestimento**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

ALVARENGA, R. C. S. S.; NALON, G. H.; FIORESI, L, A. F.; PINTO, M. C.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. Experimental Evaluation of the Influence of Mortar's Mechanical Properties on the Behavior of Clay Masonry. **The Minerals, Metals & Materials Series**, [S.L.], p. 671-679, 2017. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-51382-9_74.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)**. Detroit, 1995.

ANTONIAZZI, J. P. **O Efeito dos Aditivos Incorporador de Ar e Estabilizador de Hidratação nas Propriedades das Argamassas Estabilizadas**. Santa Maria, 2019. Tese de Douradora (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

ARNEZ, D. G.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. **Argamassa estabilizada: influência da lâmina de água disposta na estocagem e da pré-saturação do substrato cerâmico**. Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana, v. 2, p. 27–34. Macaé, Rio de Janeiro. 2017.

ATKINSON, R. H.; NOLAND, J. L.; ABRAMS, D. P. A deformation failure theory for stackbond brick masonry prisms in compression, in: **7th International Brick and Block Masonry Conference**, Melbourne, Australia, 1985.

BAUER, E.; REGUFFE, M.; NASCIMENTO, M. L. M.; CALDAS, L.R. **Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas – SBTA. Porto Alegre/RS 2015.

BAUER, E.; OLIVEIRA, V.C. **Comportamentos e propriedades das argamassas estabilizadas de revestimentos**. In: XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, São Paulo, 2017.

BELLEI, P.; CATEN, A.T. **Avaliação do desempenho da argamassa estabilizada de 36 e 72 horas para revestimento externo em diferentes tempos de utilização e modo de armazenamento**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, GO, 2019.

BENNETT, R. M.; BOYD, K. A.; FLANAGAN, R. D. Compressive Properties of Structural Clay Tile Prisms. *Journal Of Structural Engineering*, [S.L.], v. 123, n. 7, p. 920-926, jul. 1997. **American Society of Civil Engineers (ASCE)**. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1997\)123:7\(920\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:7(920)).

BRUGALI, D. R.; CASAGRANDE, E.; STOLZ, C. M. **Caracterização de argamassas industrializadas e estabilizadas disponíveis em Caxias do Sul/RS**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13., Goiânia, 2019. Anais [...] Goiânia, 2019.

BSI – BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 5628-1**: Code of practice for use of masonry: part 1: Structural use of unreinforced masonry. London, 2005.

BS EN 1996-1-1:2005+A1:2012, **Eurocode 6**. Design of masonry structures. General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2012.

CALDEIRA, F. E.; NALON, G. H.; OLIVEIRA, D. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; FERREIRA, F. A.; CARVALHO, J. M. F. Influence of joint thickness and strength of mortars on the compressive behavior of prisms made of normal and high-strength concrete blocks. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 234, p. 117419, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117419>.

CAMACHO, J. S.; LOGULLO, B. G.; PARSEKIAN, G. A.; SOUDAIS, P. R. N. The influence of grouting and reinforcement ratio in the concrete block masonry compressive behavior. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 341-364, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952015000300006>.

CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIA, G. C. (Ed.) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais*. Ispis Gráfica e Editora, São Paulo, 2007. Cap. 26. p. 863 - 904.

CARVALHO, J. M. De. **Desempenho Estrutural de Prismas Moldados com Diferentes Blocos Cerâmicos e Traços de Argamassas**. Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), p. 172, 2003. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84609>>

CASALI, J. M.; NETO, A. M.; ANDRADE, D. C.; ARRIAGADA, N. T. **Avaliação das propriedades do estado fresco e endurecido da argamassa estabilizada para revestimento**. IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Belo Horizonte, 2011.

CUNHA, E. H. **Análise experimental do comportamento de prismas grauteados em alvenaria estrutural**. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2001

DE MARCO, C. E. G. **Resistência à compressão de prismas preenchidos com argamassa/graute**. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

DIAMANTINO, L. S.; OLIVEIRA, E. A. Análise experimental e numérica do comportamento de prismas de blocos de concreto preenchidos com graute produzido com resíduo da construção civil / Experimental and numerical analysis of the behavior of prisms of concrete blocks filled with grade produced with residue from civil construction. **Brazilian Journal of Development**, [S.L.], v. 7, n. 9, p. 87700-87726, 8 set. 2021. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n9-096>.

DROUGKAS, A.; VERSTRYNGE, E.; HAYEN, R.; BALEN, K. V. The confinement of mortar in masonry under compression: Experimental data and micro-mechanical analysis. **International**

Journal Of Solids And Structures, [S.L.], v. 162, p. 105-120, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.12.006>.

DRYSDALE, R.G.; HAMID, A.A.; BAKER, L.R. **Masonry structures: behavior and design**. Enhhlewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall. 1994.

DRYSDALE, R. G.; WONG, H. E. Interpretation of the compressive strength of masonry prisms, **7th International Brick and Block Masonry Conference**, Melbourne, Australia, 1985.

FIORAVANTE, E. V. **Influência dos aditivos nas Propriedades de Argamassas Estabilizadas**. Ponta Grossa, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2014.

FORTES, E. S. **Influência do capeamento e caracterização da resistência a compressão de alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; FONSECA, F. S. CAMACHO, J. S. High-Strength Concrete Masonry Walls under Concentric and Eccentric Loadings. **Journal of Structural Engineering** 144 (6) (2018) 04018055, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001978](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001978).

FRANCO, L. S. **Desempenho da alvenaria à compressão**. BT – PCC 20/88. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1988. 14 p.

FRANZONI, E.; GENTILINI, C.; GRAZIANI, G.; BANDINI, S. Compressive behavior of brick masonry triplets in wet and dry conditions. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 82, p. 45-52, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.052>.

FRANZONI, E.; GENTILINI, C.; GRAZIANI, G.; BANDINI, S. Towards the assessment of the shear behavior of masonry in on-site conditions: a study on dry and salt/water conditioned brick masonry triplets. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 65, p. 405-416, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.002>.

FREITAS, A. A. De. **Análise numérica e experimental do comportamento de prismas e miniparedes submetidos à compressão**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

GALLEGOS, H. **Albañilería Estructural**. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 3ª ed., Lima, Peru, 1991.

GARCIA, P. D. **Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

GOMES, I. R. **Simulação Numérica Do Ensaio De Compressão De Prismas De Alvenaria Pelo Método Dos Elementos Finitos Com Comportamento De Interface**. Programa de Pós-

Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GOMES, N. dos S. **A Resistência das paredes de alvenaria**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1983.

GUINDANI, E. N. **Argamassa estabilizada para revestimento: avaliação da influência da adição de finos nas propriedades do estado fresco endurecido**. Florianópolis, 2018. 146 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

GUMASTE, K. S.; RAO, K. S. N.; REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 40, n. 2, p. 241-253, 13 jul. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-006-9141-9>.

HENDRY, A.W. **Structural Masonry**. 2.ed. Hong Kong: Macmillan Press Ltd. 1998.

HILSDORF, H. K. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression, in **1st International Brick and Block Masonry Conference**, Austin, Texas, 1967.

JANK, D. M. **Correlação De Imagens Digitais Em Ensaios De Prismas De Alvenaria Estrutural Com Blocos Cerâmicos De Paredes Maciças**. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2021.

JOYKLAD, P.; ALI, N.; YOOPRASERTCHAI, E.; JAFFAR, S. T. A.; MAGBOOL, H. M.; HUSSAIN, Q.; CHAIYASARN, K. An investigative study for the prediction of compressive strength of cement-clay interlocking (CCI) hollow brick masonry walls. **Case Studies in Construction Materials**, [S.L.], v. 16, p. 01001, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01001>.

KAUSHIK, H. B.; RAI, D. C.; JAIN, S. K. Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 9, p. 728-739, set. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:9\(728\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:9(728)).

LIMA, A. N. **Análise experimental da influência da resistência e espessura da argamassa de assentamento no desempenho mecânico de prismas de blocos cerâmicos**. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2010.

LUBECK, A. **Comportamento mecânico e influência da argamassa no modo de ruptura da alvenaria estrutural**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2016.

LUMANTARNA, R.; BIGGS, D. T.; INGHAM, J. M. Uniaxial Compressive Strength and Stiffness of Field-Extracted and Laboratory-Constructed Masonry Prisms. **Journal Of Materials**

In Civil Engineering, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 567-575, abr. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000731](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000731).

MACHADO, J. F. **Análise do modo de ruptura e previsão de resistência à compressão de prismas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2019.

MARTINS, R. O. G.; NALON, G. H.; ALVARENGA, R. C. S. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 182, p. 233-241, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091>.

MATOS, P. R. De. **Estudo da utilização de argamassa estabilizada em alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Monografia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

MILANI, A. S.; LÜBECK, A.; MOHAMAD, G.; NETO, A. B. S. S.; BUDNY, J.; KOSTESKI, L. E. Case study of prototype and small-scale model behavior of clay blocks masonry under compression. **Case Studies in Construction Materials**, [S.L.], v. 15, dez. 2021a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00684>.

MILANI, A. S.; LÜBECK, A.; MOHAMAD, G.; NETO, A. B. S. S.; BUDNY, J. Experimental investigation of small-scale clay blocks masonry walls with chases under compression. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 273, p. 121539, mar. 2021b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121539>.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto não-grauteado**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G. **Mechanism failure of concrete block masonry under compression**. Tese de doutorado. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2007.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; LÜBECK, A. Stiffness plasticity degradation of masonry mortar under compression: preliminary results. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. 11 (2018) 279–295, <https://doi.org/10.1590/S1983-4195201800020004>.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D. R. W.; LOURENÇO, P. B. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 134, p. 489-496, mar. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.112>.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. Propriedades mecânicas das argamassas sob compressão triaxial – análise e previsão. **XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**. Trabalho JOR0001 – p. 2954-2963. Maio, 2006.

MONTE, R.; UEMOTO, K. L.; SELMO, S. M. S. **Efeitos de aditivos incorporadores de ar nas propriedades de argamassas e revestimentos**. V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, p. 303–315. São Paulo, 2003.

MOTA, J. A. V. **Influência da junta vertical na resistência à compressão de prismas em alvenaria estrutural de blocos de concreto e blocos de concreto celular autoclavado.** Dissertação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

NALON, G. H.; MARTINS, R. O. G.; ALVARENGA, R. C. S. S.; LIMA, G. E. S.; PEDROTI, L. G.; SANTOS, W. J. Effect of Specimens' Shape and Size on the Determination of Compressive Strength and Deformability of Cement-lime Mortars. **Materials Research**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 819-825, 22 jan. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-1006>.

OLIVEIRA, J. P. M. **Influência do Módulo de Finura nas Propriedades de Argamassas com aditivo Incorporador de Ar.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

OTTONI, T. P. **Deformações e modo de ruptura em prismas de alvenaria de blocos cerâmicos: análise experimental com extensometria e correlação de imagem.** Dissertação em Materiais de Construção Civil e Preservação Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2020.

PARSEKIAN, G. A.; SOARES, M. M. **Alvenaria Estrutural em blocos cerâmicos: projeto, execução e controle.** 1 ed. São Paulo, 2010.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A.; DRYSDALE, G. **Structural masonry behavior and design.** 1 ed. EdUFSCar, São Carlos, 2012.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN C. A. **Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto.** Florianópolis, 2002.

PORTELLA, R. P. **Fator de eficiência da resistência prisma/bloco cerâmico de paredes vazadas.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal De Santa Maria. Santa Maria, 2015.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural.** Pini, São Paulo, 2003.

RIZZATTI, E. **Influência da geometria do bloco cerâmico no desempenho mecânico da alvenaria estrutural sob compressão.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

RIZZATTI, E.; ROMAN, H. R.; MOHAMAD, G. NAKANISHI, E. Y. **Tipologia de blocos cerâmicos estruturais: Influência da geometria dos blocos no comportamento mecânico da alvenaria.** Revista Matéria, v. 16, n. 2, p. 730–746, 2011.

ROMAGNA, R. H. **Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

ROMANO, R. C. de O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento.** Ambiente Construído, v. 18, n. 2, p. 289–308, 2018.

SABBATINI, F.H. **Processo construtivo de edifícios de alvenaria sílico-calcaria.** São Paulo. 298 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1984.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas.** Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

SANTOS, M. J. F. Dos. **Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

SEGURA, J.; PELÀ, L.; ROCA, P. Monotonic and cyclic testing of clay brick and lime mortar masonry in compression. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 193, p. 453-466, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.198>.

SCHACKOW, A. *et al.* Stabilized mortar with air incorporator agent and plasticizer set retarder: performance measurement. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, São Paulo, v. 12, n. 6, p. 1248-1259, dez. 2019.

SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO Jr., L. R.; PILAR, R. Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto para edifícios altos. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 1008-1023, 2015.

SCHOSSLER, R. T. **Deformações e modo de ruptura em prismas de alvenaria de blocos concreto: análise experimental com extensometria e correlação de imagem.** Dissertação em Materiais de Construção Civil e Preservação Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2019.

SCHOSSLER, R. T.; OTTONI, T.; MOHAMAD, G.; NETO, A. B. S. S.; LÜBECK, A. Análise da curva tensão x deformação de prismas de concreto com argamassa. **VI Seminário Regional de Engenharia Estrutural.** Universidade de Passo Fundo. 2019.

SELMO, S. M. S.; NAKAKURA, E. H.; MIRANDA, L. F. R.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, C. O. **Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso.** Boletim Técnico 310. São Paulo, PCC.USP, 2002.

SHMID, A. G. **Argamassa Estabilizada, uma importante ferramenta pra melhorar a sustentabilidade na construção.** In: 53o Congresso Brasileiro de Concreto. Florianópolis. p. 1–12.

SILVA, A. F. **Avaliação da resistência à compressão da alvenaria estrutural**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2007.

SILVA, WILSON J. **Estudo experimental de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos sujeitas a ações verticais**. Ilha Solteira, 144p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2003.

THAICKAVIL, N.N.; THOMAS, J. Behaviour and strength assessment of masonry prisms. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 8, p. 23-38, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2017.12.007>.

THAMBOO, J. A.; DHANASEKAR, M. Correlation between the performance of solid masonry prisms and wallettes under compression. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 22, p. 429-438, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.007>.

THAMBOO, J. A. Material characterization of thin layer mortared clay masonry. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 230, p. 116932, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116932>.

VILLAR, C. E. de F. **Caracterização e comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

YANG, K. H.; LEE, Y.; HWANG, Y. H. A Stress-Strain Model for Brick Prism under Uniaxial Compression. **Advances In Civil Engineering**, [S.L.], v. 2019, p. 1-10, 14 abr. 2019. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/7682575>.

ZAHRA, T.; THAMBOO, J.; ASAD, M. Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar bedding types. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 38, p. 102213, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102213>.

ZHENG, W. Y.; LIU, F.; LI, Q. M. **Lateral Confinement Effects on the Axial Compressive Strength of Mortar Specimen**. Procedia Engineering, [s. l.], v. 199, p. 2470–2475, 2017.