

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

Julia Favretto Machado

**ANÁLISE DO MODO DE RUPTURA E PREVISÃO DE RESISTÊNCIA
À COMPRESSÃO DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE
BLOCOS CERÂMICOS E DE CONCRETO**

**Santa Maria, RS, Brasil
2019**

Julia Favretto Machado

**ANÁLISE DO MODO DE RUPTURA E PREVISÃO DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS
CERÂMICOS E DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Gihad Mohamad
Coorientador: Prof. Dr. André Lübeck

Santa Maria, RS, Brasil

2019

Machado, Julia Favretto

Análise do modo de ruptura e previsão de resistência à compressão de prismas de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto / Julia Favretto Machado. - 2019.

125 p. ; 30 cm

Orientador: Gihad Mohamad

Coorientador: Andre Lúbeck

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2019

1. Modo de ruptura 2. Alvenaria estrutural 3. Resistência à compressão I. Mohamad, Gihad II. Lúbeck, Andre III. 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.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Julia Favretto Machado. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: juliafm.engcivil@gmail.com

Julia Favretto Machado

**ANÁLISE DO MODO DE RUPTURA E PREVISÃO DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS
CERÂMICOS E DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 27 de Fevereiro de 2019

Gihad Mohamad, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

André Lübeck, Dr. (UFSM)
(Orientador)

Emil de Souza Sánchez Filho, Dr. (UFF)

Eduardo Rizzatti, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que, apesar de todas as dificuldades ao longo da vida, nunca mediram esforços para me dar educação de qualidade, apoio para lutar pelos meus sonhos, compreensão nos momentos difíceis e amor em cada segundo de minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só aconteceu graças às inúmeras pessoas que me ajudaram ao longo desses dois anos. Gostaria de agradecer à todos os envolvidos, em especial:

Ao meu orientador Gihad Mohamad, professor que sempre admirei pela competência e conhecimento desde a graduação, pela oportunidade única do mestrado e pela confiança em mim depositada.

Ao meu corientador André Lübeck, que além de idealizar o tema desta dissertação, me ajudou incansavelmente em cada etapa e é o principal responsável pela concretização deste trabalho.

Aos Professores Eduardo Rizzatti e Emil de Souza Sánchez Filho pela disponibilidade de compor a banca examinadora.

Aos profissionais do LMCC, Diego, José Pedro e William, e ao professor Alisson S. Milani, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA-Alegrete/RS), que me auxiliaram na realização dos ensaios desta pesquisa.

À Universidade Federal de Santa Maria, que me acolheu desde 2010 e tornou-se a minha segunda casa, por todo o crescimento profissional e pessoal que me proporcionou, seja como aluna ou como professora.

Aos colegas e demais professores do PPGECC e do DECC, pelo conhecimento compartilhado, companheirismo, conselhos e solidariedade.

Por último, gostaria de agradecer à minha família e ao meu noivo, Fabio, que foram o meu suporte emocional ao longo desta trajetória, pela paciência, pelo amor, pelo apoio e pela compreensão quando eu tive que abrir mão de estar presente em momentos especiais em detrimento do mestrado.

RESUMO

ANÁLISE DO MODO DE RUPTURA E PREVISÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PRISMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS E DE CONCRETO

AUTORA: Julia Favretto Machado

ORIENTADOR: Gihad Mohamad

COORIENTADOR: André Lübeck

O grande desafio da alvenaria estrutural é correlacionar o conjunto argamassa-bloco e transformá-lo em um sistema dúctil, com um comportamento previsível, uma vez que esses materiais possuem propriedades e composições diferentes quando analisados separadamente. As normas brasileiras vigentes de alvenaria não consideram, de maneira direta, que a argamassa pode influenciar na resistência final e no modo de ruptura da parede. Tendo em vista que tanto as propriedades da argamassa como do bloco podem influenciar o desempenho da alvenaria, o presente trabalho busca avaliar o modo de ruptura de prismas comprimidos, variando o tipo de bloco estrutural e a resistência da argamassa de assentamento. Este estudo analisou três diferentes tipos de blocos: cerâmicos de paredes maciças, cerâmicos de paredes vazadas e de concreto. Cada tipo de bloco foi combinado com três resistências de argamassa industrializada de assentamento, sendo moldados prismas de dois blocos de altura. Para isso, foram realizados ensaios de laboratório e filmagens dos ensaios de compressão axial dos prismas. Também foram realizados ensaios de compressão em corpos de prova instrumentados das argamassas utilizadas para a moldagem dos prismas, com a finalidade de traçar a curva tensão-deformação específica do material e verificar o início do comportamento não linear, ou seja, verificar a partir de que tensão começa a perder a sua capacidade resistente, com a propagação das fissuras internas desde a zona de transição pasta-agregado para a matriz cimentícia. A partir da análise dos resultados verificou-se a influência da proporção entre a resistência à compressão da argamassa e do bloco sobre a resistência e o modo de ruptura dos prismas comprimidos; propor equações de previsão resistência para cada tipo de prisma e averiguar que a relação área líquida/área bruta do bloco interfere no modo de ruptura. Observou-se que para os prismas de blocos cerâmicos o aumento da resistência da argamassa provoca um incremento de resistência no prisma e altera o comportamento do modo de ruptura. Para os prismas de blocos de concreto verificou-se que a resistência da argamassa não interferiu na resistência última do prisma, mas sim no desencadeamento do processo do modo de ruptura.

Palavras-chave: Modo de ruptura, alvenaria estrutural, resistência à compressão.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE FAILURE MODE AND RESISTENCE FORECAST DO STRUCTURAL MASONRY COMPRESSIVE PRISMS OF CERAMIC AND CONCRETE BLOCKS

AUTHOR: Julia Favretto Machado

ADVISOR: Gihad Mohamad

Co-ADVISOR: André Lübeck

The biggest challenge of structural masonry is to correlate the set bedding mortar-block and transform it into a ductile system, with a predictive behaviour, as these materials own properties and different compositions when analysed separately. Besides that, the brazilian current regulations of masonry does not consider, in a direct manner, that the masonry can influence in the final resistance and in the failure mode of the wall. Bearing in mind that the properties of the bedding mortar as well as the block can influence the performance of the masonry, the present work sought to evaluate the failure mode of compressive prisms, varying the type of structural block and the resistance of the laying mortar. The study was held with three different types of blocks: ceramics of massive walls, ceramics of bare walls and concrete. Each type of block was combined with three resistances of industrialized bedding mortar, being casted prisms of two blocks of height. In this regard, has been made technological laboratory tests and shootings of the prisms axial compressive tests. Also has been made compressive tests in instrumented proof bodies of the bedding mortar used for a prism molding, with the purpose of plot a material stress-strain curve and verify the beginning of the nonlinear behaviour, in other words, verify as of what tension starts to loose its bearing capacity, with the propagation of the internal cracks from the zone of paste-aggregate transition to the cement matrix. From the analysis of the results was possible to verify the influence of the proportion between the resistance to the bedding mortar compression and the block over the resistance and the way of failure of the compressive prisms, propose equations of resistance forecasts for each type of prism and ascertain that the relation liquid area/ gross area of the block interferes in the failure mode. It was observed that for the prisms of ceramic blocks the increase of the bedding mortar resistance causes a resistance increment on the prism, as well as alternates the behaviour of the failure mode. For the prisms of concrete blocks it was found that the resistance of the bedding mortar did not interfere in the ultimate resistance of the prism, but triggering the failure mode process.

Key-words: Failure mode, structural masonry, compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alguns tipos de unidades comercializadas: a) bloco estrutural convencional; b) bloco e meio; c) meio bloco; d) canaleta “u”; e) canaleta “j”; f) bloco especial para saída de tubulações.	34
Figura 2 – Área líquida e área bruta de um bloco estrutural.	35
Figura 3 – Corpo submetido à uma carga uniaxial e suas variações de comprimento.	40
Figura 4 – Definição dos diferentes tipos de avaliação do módulo de elasticidade.	42
Figura 5 – Curva tensão-deformação específica proposto na norma europeia para alvenaria à compressão.	43
Figura 6 – Junta de argamassa comprimida triaxialmente (a); bloco comprimido e tracionado biaxialmente (b).	47
Figura 7 – Desenho esquemático dos tipos de ruptura (a) prisma submetido a compressão axial; (b) ruptura por tração no bloco; (c) ruptura por esmagamento do bloco e (d) ruptura por esmagamento da junta de argamassa.	48
Figura 8 – Mecanismo de ruptura dos prismas ensaiados: (a) junta de argamassa forte; (b) junta de argamassa fraca.	49
Figura 9 – Modo de ruptura dos prismas P-50.	50
Figura 10 – Modo de ruptura dos prismas P-100.	50
Figura 11 – Geometria dos blocos e dos prismas em escala reduzida ensaiados por Rizzatti (2003).	52
Figura 12 – Prismas e tipos de blocos utilizados por Thamboo <i>et al.</i> (2013).	53
Figura 13 – Efeito da aderência na junta de argamassa (a) e tensões laterais que se desenvolvem em função da aderência argamassa-bloco (b).	54
Figura 14 – Envoltória de ruptura das argamassas confinadas ensaiadas por Khoo (1972). ...	55
Figura 15 – Diagramas tensão-deformação axial e lateral das argamassas confinadas de traço 1:0,5:4,5 (a) e 1:1:6 (b) encontrados por Atkinson <i>et al.</i> (1985).	57
Figura 16 – Envoltória de ruptura das argamassas ensaiadas à compressão triaxial por Mohamad (1998).	58
Figura 17 – Ensaio de compressão das placas de 40x40x12mm.	59
Figura 18 – Idealização do fenômeno de esmagamento da junta de argamassa.	60
Figura 19 – Ruptura por esmagamento da junta de um prisma ensaiado por De Lima (2010)	61
Figura 20 – Resistência média dos prismas em função da espessura da argamassa de assentamento.	62
Figura 21 – Gráfico comparativo do desempenho dos prismas associados à juntas com diferentes espessuras de Cavalcanti <i>et al.</i> (2018)	63
Figura 22 - Geometria dos prismas ensaiados por De Marco (2016).	65
Figura 23 – Organograma dos procedimentos do desenvolvimento da metodologia da pesquisa.	70
Figura 24 – Ensaio dimensionais. (a) comprimento; (b) largura; (c) altura.	72
Figura 25 – Preparação da argamassa. (a) ensaio do índice de consistência na mesa de abatimento; (b) moldagem dos corpos de prova 4 cm x 4 cm x 16 cm.	75

Figura 26 – Ensaio de determinação de resistência da argamassa: (a) compressão e (b) tração na flexão.	76
Figura 27 – Geometria dos prismas moldados. (a) bloco cerâmico de parede maciça – P_M ; (b) bloco cerâmico de parede vazada – P_V ; (c) bloco de concreto - P_C	77
Figura 28 – Fluxograma das combinações dos prismas.	78
Figura 29 – Prismas submetido à compressão na prensa hidráulica: cerâmico (a) e de concreto (b).	79
Figura 30 – Procedimento de filmagem dos ensaios, em ambas as faces dos prismas.	80
Figura 31 – Ensaio de compressão de corpo de prova de argamassa cilíndrico de dimensões ϕ 5 cm x 10 cm, instrumentado.	81
Figura 32 – Resistência à compressão dos prismas de bloco cerâmico de paredes maciças – P_M	84
Figura 33 – Resistências características dos prismas P_M	84
Figura 34 – Envoltória de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede maciça P_M	86
Figura 35 – Resistência à compressão dos prismas de bloco cerâmico de paredes vazadas – P_V	87
Figura 36 – Resistências características dos prismas P_V	88
Figura 37 – Comparação das resistências características dos prismas de blocos cerâmicos. ...	89
Figura 38 – Envoltória de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede vazada P_V	90
Figura 39 – Resistência à compressão dos prismas de bloco de concreto P_C	91
Figura 40 – Envoltória de ruptura dos prismas de bloco de concreto P_C	93
Figura 41 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{M2}(2)$	95
Figura 42 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{M4}(5)$	95
Figura 43 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{M5}(3)$	95
Figura 44 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{V2}(5)$	97
Figura 45 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{V4}(4)$	97
Figura 46 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{V5}(2)$	97
Figura 47 – Quebra da ligação entre os blocos, após a ruptura pelo esmagamento da junta.	100
Figura 48 – Sequência de propagação de ruptura típica do conjunto de prismas P_{C1} – imagens da câmera 1 (frente) do Prisma $P_{C1}(2)$	101
Figura 49 – Sequência de propagação de ruptura típica do conjunto de prismas P_{C2} – imagens da câmera 2 (trás) do Prisma $P_{C2}(2)$	102
Figura 50 – Sequência de propagação de ruptura típica do conjunto de prismas P_{C2} – imagens da câmera 1 (frente) do Prisma $P_{C3}(3)$	103
Figura 51 – Envoltória da tensão de ruptura característica dos prismas de blocos de concreto (σ_{pk}).	105
Figura 52 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 1.	106
Figura 53 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 2.	106
Figura 54 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 3.	107
Figura 55 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 4.	107
Figura 56 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 5.	107
Figura 57 – Curva média do comportamento tensão-deformação específica da Argamassa 1.	109

Figura 58 – Curva média do comportamento tensão-deformação da Argamassa 2.....	109
Figura 59 – Curva média do comportamento tensão-deformação da Argamassa 3.....	109
Figura 60 – Curva média do comportamento tensão-deformação específica da Argamassa 4.	110
Figura 61 – Curva média do comportamento tensão-deformação específica da Argamassa 5.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tolerâncias dimensionais para blocos estruturais.....	35
Tabela 2 – Fator de eficiência de ensaios aos 28 dias obtidos por Portella (2015).	46
Tabela 3 – Argamassas utilizadas no experimento de Mohamad <i>et al.</i> (2017).	48
Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos prismas moldados por Alvarenga <i>et al.</i> (2017).	50
Tabela 5 – Resultados médios dos blocos e prismas encontrados por Rizzatti (2003).	52
Tabela 6 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Khoo (1972).	56
Tabela 7 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Atkinson <i>et al.</i> (1985).	56
Tabela 8 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Mohamad (1998).	58
Tabela 9 – Resistências e modo de ruptura dos prismas ensaiados por Schankoski, Prudêncio Jr e Pilar (2015).	64
Tabela 10 - Resultados dos prismas comprimidos por Lübeck (2016).	68
Tabela 11 – Dimensões médias dos blocos estruturais utilizados.	72
Tabela 12 – Área líquida média e área bruta média dos blocos ensaiados.	73
Tabela 13 – Resistências à compressão característica dos blocos na área bruta e na área líquida.	74
Tabela 14 – Definição das resistências nominais das argamassas a partir das resistências dos blocos na área líquida.	74
Tabela 15 – Resistências de tração na flexão e compressão das argamassas ensaiadas aos 28 dias.	76
Tabela 16 – Valores reais da razão entre as resistências à compressão das argamassas e dos blocos na área líquida.	76
Tabela 17 – Resistência à compressão dos prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças $ P_M $, na área bruta.	83
Tabela 18 – Valores das constantes da equação de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede maciça.	86
Tabela 19 – Resistência à compressão dos prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas P_V , na área bruta.	87
Tabela 20 – Valores das constantes da equação de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede vazada.	90
Tabela 21 – Resultados de resistência à compressão dos prismas de blocos de concreto P_C . ..	92
Tabela 22 – Valores das constantes da equação de ruptura dos prismas de bloco de concreto.	93
Tabela 23 – Magnitude de tensão/resistência do início da análise visual da propagação de ruptura dos prismas.	99
Tabela 24 – Tensão de ruptura característica dos prismas de blocos de concreto (σ_{pk}).	104
Tabela 25 – Novos valores das constantes da equação de tensão de ruptura dos prismas de bloco de concreto.	105
Tabela 26 – Resistências dos CP de argamassa ensaiados à compressão aos 28 dias.	108

Tabela 27 – Níveis de tensão de linearidade das curvas das argamassas.	111
---	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Módulo de elasticidade secante e tangente da argamassa encontrados por Cheema e Klingner (1986) e Khalaf e Fairbairn (1992).....	44
Quadro 2 – Comparativo de propriedades dos blocos em relação ao material que o compõem segundo De Marco (2016) e Lübeck (2016).....	51
Quadro 3 – Variáveis adotadas por De Lima (2010) para moldagem dos prismas.	61
Quadro 4 – Identificação e descrição das argamassas empregadas.	63
Quadro 5 – Materiais utilizados na composição dos prismas moldados por Lübeck (2016). ..	66
Quadro 6 – Tipologia e dimensões nominais dos blocos ensaiados.....	71
Quadro 7 – Especificações da nomenclatura dos prismas.	82

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
a	Ponto de interseção da reta com o eixo das ordenadas
$A_{,brut}$	Área bruta da seção transversal
$A_{,Liq}$	Área líquida da seção transversal
b	Coefficiente angular da reta ou largura do bloco
d	Diâmetro
E ou E_{tg}	Módulo de elasticidade tangente
E_b ou E_u	Módulo de elasticidade do bloco ou unidade
E_m	Módulo de elasticidade da alvenaria
E_m	Módulo de elasticidade da argamassa
E_M	Módulo de elasticidade da alvenaria
E_o	Módulo de elasticidade inicial
E_s ou E_{sec}	Módulo de elasticidade secante
f_a	Resistência à compressão média da argamassa
f_{at}	Resistência à tração da argamassa
$f_{at,d}$	Resistência à tração indireta da argamassa medida por compressão diametral
f_b ou f_j	Resistência à compressão do bloco
$f_{b,bru}$	Resistência à compressão do bloco na área bruta
$f_{bk,brut}$	Resistência à compressão característica do bloco na área bruta
$f_{b,liq}$	Resistência à compressão do bloco na área líquida
$f_{bk,liq}$	Resistência à compressão característica do bloco na área líquida
f_{bk}	Resistência característica do bloco
f_{bt}	Resistência à tração do bloco ou tensão lateral atuante no bloco
f_c ou f_c'	Resistência à compressão do concreto
f_{hb1}	Tensão axial de compressão aplicada ao prisma
f_k	Resistência característica
f_m	Resistência média, resistência da argamassa ou resistência em um ponto m qualquer
f_m^*	Resistência da argamassa confinada
f_{mk}	Resistência característica da argamassa
f_{pi}	Resistência do prisma
f_{pk}	Resistência característica do prisma
f_{pmk}	Resistência característica do prisma de bloco cerâmico de parede maciça
f_{pvk}	Resistência característica do prisma de bloco cerâmico de parede vazada
f_{pck}	Resistência característica do prisma de bloco de concreto
f_{ppk}	Resistência característica da pequena parede
G	Módulo cisalhante
h	Altura do bloco ou do corpo-de-prova
h_b ou t_b	Altura do bloco
h_m ou t_m	Espessura da junta de argamassa
k	Constante definida em função do tipo de argamassa e tipo de bloco
k_n e k_s	Coefficientes de rigidez normal e tangencial
k_r	Coefficiente de Ritter
L	Comprimento
\emptyset	Ângulo de atrito interno ou diâmetro de um cilindro
V	Volume
Δ	Variação
ΔV	Variação volumétrica
α	Coefficiente de potência da argamassa na equação de previsão de ruptura
β	Coefficiente de potência do bloco estrutural na equação de previsão de ruptura
δ	Coefficiente de não uniformidade ou deslocamento
ε	Deformação específica
ε_l^*	Deformação específica axial de transição entre contração e expansão volumétrica
ε_A	Deformação específica seccional ou de área
ε_L	Deformação específica longitudinal ou axial
ε_{lim}	Deformação específica de transição entre os comportamentos linear e não linear
ε_o	Deformação específica máxima ou de ruptura
ε_T	Deformação específica transversal ou lateral

ε_{up}	Deformação específica axial última
ε_v	Variação volumétrica específica
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Deformações específicas nas direções x, y e z
γ	Coefficiente de correção da resistência
η	Fator de eficiência prisma/bloco
ν	Coefficiente de Poisson
ν_b	Coefficiente de Poisson do bloco
ν_f	Coefficiente de Poisson final
ν_i	Coefficiente de Poisson inicial
ν_m	Coefficiente de Poisson da argamassa
σ	Tensão ou tensão axial
σ_3 ou f_{lm}	Tensão lateral confinante
σ_{cb}	Tensão de compressão no bloco
σ_{cm}	Resistência à compressão da argamassa
σ_{cr}	Tensão crítica
σ_i	Tensão inicial
σ_{inf}	Tensão inferior ou inicial
σ_n	Tensão correspondente a um ponto qualquer do gráfico tensão-deformação
σ_{pi}	Tensão no prisma no início da ruptura
σ_{sup}	Tensão superior ou final
σ_{tb}	Tensão de tração no bloco
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Tensões normais nas direções x, y e z
σ_y ou f_{hm}	Tensão na direção vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	30
1.2	OBJETIVOS	31
1.2.1	Objetivo geral.....	31
1.2.2	Objetivos específicos.....	31
1.3	QUESTÕES DE PESQUISA	32
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	33
2.1	CONCEITUAÇÕES PRELIMINARES DOS COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL	33
2.1.1	Bloco estrutural.....	33
2.1.2	Argamassa de assentamento	36
2.2	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS QUE INFLUEM NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL E SUAS DEFINIÇÕES	37
2.2.1	Resistência à compressão	37
2.2.1.1	<i>Determinação da resistência à compressão da alvenaria por ensaios de prismas ou pequenas paredes</i>	<i>37</i>
2.2.1.2	<i>Determinação da resistência à compressão da alvenaria por correlações dos materiais constituintes.....</i>	<i>39</i>
2.2.2	Deformação específica e coeficiente de Poisson	40
2.2.3	Curva tensão-deformação e módulo de elasticidade	41
2.2.4	Comportamento não linear da alvenaria estrutural.....	44
2.2.5	Fator de eficiência.....	45
2.2.6	Tipos de ruptura na alvenaria estrutural.....	46
2.3	INFLUÊNCIA DA TIPOLOGIA DO BLOCO E DA ARGAMASSA NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL	51
2.3.1	Influência do bloco estrutural no modo de ruptura	51
2.3.1.1	<i>Influência do tipo do material do bloco estrutural.....</i>	<i>51</i>
2.3.1.2	<i>Influência da geometria do bloco estrutural</i>	<i>52</i>
2.3.2	Influência da junta de argamassa de assentamento no modo de ruptura	54
2.3.2.1	<i>O fenômeno de confinamento da junta de argamassa.....</i>	<i>54</i>
2.3.2.2	<i>O fenômeno de esmagamento da junta de argamassa.....</i>	<i>60</i>
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	69
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	69

3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	70
3.2.1	Bloco estrutural	70
3.2.1.1	<i>Determinação das características dimensionais</i>	71
3.2.1.2	<i>Determinação da absorção de água inicial e área líquida.....</i>	72
3.2.1.3	<i>Determinação das resistências à compressão na área bruta</i>	73
3.2.2	Argamassa de assentamento industrializada.....	74
3.2.3	Prismas.....	77
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	78
3.3.1	Caracterização mecânica e análise visual dos prismas comprimidos.....	79
3.3.2	Ensaio de verificação do comportamento tensão-deformação de corpos de prova de argamassa comprimidos	80
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	82
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS.....	82
4.1.1	Prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças – P_M	83
4.1.1.1	<i>Equação de previsão de resistência dos prismas P_M.....</i>	85
4.1.2	Prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas – P_V	86
4.1.2.1	<i>Equação de previsão de resistência dos prismas P_V.....</i>	90
4.1.3	Prismas de blocos de concreto - P_C	91
4.1.3.1	<i>Equação de previsão de resistência dos prismas P_C</i>	93
4.2	MODO DE RUPTURA DOS PRISMAS	94
4.2.1	Modo de ruptura dos prismas de blocos cerâmicos (P_M e P_V)	94
4.2.2	Modo de ruptura dos prismas de blocos de concreto (P_C).....	98
4.3	CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS ARGAMASSAS	106
5	CONCLUSÕES	112
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS.....	116
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DIMENSIONAIS, FÍSICOS E MECÂNICOS DOS BLOCOS ESTRUTURAIIS	122

1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural surgiu como um sistema construtivo no Brasil, no final de 1960, com a construção do conjunto habitacional Central Park Lapa, em São Paulo. Esse tipo de construção conquistou o mercado brasileiro por possuir diversas vantagens, principalmente econômicas (SÁNCHEZ, 2013).

Essas vantagens econômicas estão relacionadas à racionalização do processo construtivo, onde é possível aperfeiçoar tarefas na obra devido às técnicas executivas simplificadas que o sistema proporciona. Essas técnicas estão diretamente relacionadas com um projeto compatibilizado, acarretando na eliminação de interferências e, posteriormente, reduzindo desperdícios de material e mão de obra. Sendo assim, a alvenaria estrutural surgiu como um sistema construtivo competitivo no país, quando comparado com o sistema construtivo convencional, o concreto armado (ROMAN *et al.*, 1998).

Com a crescente adoção desse sistema, simultaneamente, surgiram estudos sobre o cálculo estrutural e as práticas de projeto em alvenaria. Uma edificação construída em alvenaria estrutural só apresenta as vantagens econômicas citadas anteriormente, quando houver um projeto estrutural e arquitetônico bem concebido, contemplando as técnicas de racionalização, compatibilidade e modulação.

Segundo Santana e Araújo (2017), deve-se considerar que os conhecimentos sobre o comportamento da alvenaria ainda precisam ser mais aprofundados para que se alcancem patamares de desenvolvimento tecnológico similares aos que podem ser vistos sobre outras estruturas convencionais mais utilizadas. Lübeck (2016) afirma que as pesquisas que permitiram o avanço da alvenaria estrutural revelaram também a falta de conhecimento quanto ao comportamento do material, principalmente quando próximo à ruptura.

Essa falta de conhecimento faz com que haja impacto no dimensionamento e nas práticas das atividades do projeto estrutural. Isso ocorre pois o comportamento do material compósito é dependente do conhecimento das propriedades dos materiais - bloco e argamassa - analisados separadamente, bem como da interação entre eles.

As normas brasileiras que regem o dimensionamento da alvenaria estrutural são a NBR 15812 (ABNT, 2010) e a NBR 15961 (ABNT, 2011). Elas se dividem de acordo com o material componente do bloco estrutural: cerâmico e de concreto, respectivamente. As normas, em relação ao projeto estrutural, limitam o cálculo apenas em relação aos estados limites últimos, majorando as ações solicitantes e minorando as tensões máximas de resistência.

O resultado da complexidade e variabilidade de comportamento da alvenaria, aliada a ainda falta de conhecimento completo desse fenômeno, se dá em normas nacionais que visam limitar o comportamento da estrutura apenas com relação aos estados limites de ruptura. Assim, praticamente desconsideram-se as deformações específicas atuantes e o tipo de material que compõe a parede.

Algumas normas internacionais estão relativamente mais avançadas quando comparadas com as brasileiras. É o exemplo da norma europeia, EN 1996-1-1 (2002), que relaciona as resistências dos materiais constituintes e as características físicas dos blocos, por meio de uma equação. Além disso, essa norma também propõe valores para módulo de elasticidade e idealiza um comportamento tensão-deformação para a alvenaria comprimida, desde que as deformações máximas e de ruptura da alvenaria sejam medidas em ensaios de pequenas paredes.

Limitar a resistência da alvenaria estrutural apenas no estado limite último pode fazer com que a estrutura apresente um grau incerto de segurança. A verificação das deformações específicas limites de ruptura também são importantes, pois são elas que emitem o “aviso” de que há algo errado com a estrutura e que ela pode estar tendendo ao colapso. Além disso, as deformações também são essenciais para estabelecer a compatibilidade de comportamento dos materiais do sistema como um todo.

No passado, os pesquisadores consideravam que a principal função da argamassa era apenas unir as unidades e acomodar as deformações. Os pioneiros a avaliar o comportamento triaxial da argamassa para explicar o mecanismo de falha das alvenarias foram Hendry e Khoo (1973). Os autores relacionaram o modo de ruptura com um critério de deformação lateral máxima para os componentes da alvenaria.

Juntamente a isso, a alvenaria tem basicamente três diferentes tipos de ruptura, quando submetida à compressão: (i) tração no bloco, quando a tensão solicitante ultrapassa a resistência à tração do bloco; (ii) esmagamento do bloco, quando a tensão ultrapassa a resistência à compressão do bloco; e (iii) esmagamento da junta de argamassa, quando a resistência à compressão da argamassa é muito mais fraca que a do bloco (CHEEMA e KLINGNER, 1986).

O fenômeno de esmagamento da junta de assentamento, que será tratado detalhadamente e é o enfoque deste trabalho, ocorre devido à destruição da estrutura porosa da argamassa. Em blocos estruturais de concreto, quando o modo de ruptura se dá pelo esmagamento da junta, há uma dessolidarização entre os blocos, uma vez que a argamassa tem a função de uni-los, e a alvenaria deixa de funcionar como um sistema monolítico antes de

atingir a carga última de ruptura. Em blocos estruturais cerâmicos o esmagamento da junta é o que desencadeia a ruptura do prisma.

Mohamad (2007) e Mohamad *et al.* (2017) concluíram que é a junta de argamassa que comanda o modo de ruptura da alvenaria. Ao moldar prismas de blocos de concreto com diferentes traços de argamassa, verificaram que quanto menor a resistência da mesma, maior a tendência do prisma a falhar por esmagamento. O mesmo foi observado por Alvarenga *et al.* (2017), mas com blocos cerâmicos.

De Lima (2010) e Mota *et al.* (2012) também confirmaram a influência da resistência da argamassa no modo de ruptura. Somando-se a isso, esses autores comprovaram que quanto maior a espessura da junta, maior a tendência de ocorrer o esmagamento da mesma.

Além da resistência à compressão e a espessura da junta da argamassa, Lübeck (2016) observou que há relação entre o modo de ruptura dos prismas com a influência da relação área líquida/área bruta dos blocos. Em sua pesquisa experimental, quanto menor o contato de superfície do bloco com a junta de argamassa, mais explosiva foi a ruptura, ou seja, sem aviso prévio com o aparecimento de fissuras.

Ainda em relação aos blocos, tem-se uma infinidade de geometrias e composições dispostas no mercado. De Marco (2016) e Lübeck (2016) concluíram que o tipo de material do bloco interfere na ruptura, uma vez que blocos cerâmicos possuem uma ruptura mais explosiva, quando comparado com os blocos de concreto. Além disso, Rizzatti (2003), Steil (2003), Nascimento *et al.* (2010) e Thamboo *et al.* (2013) estudaram diferentes geometrias de blocos, constatando que essa propriedade interfere diretamente na resistência da alvenaria.

Há uma carência nas normas brasileiras que limitem numericamente as propriedades da argamassa de assentamento, principalmente em relação à resistência à compressão (MOHAMAH *et al.*, 2018). É necessário delimitar uma resistência para argamassa que não seja tão alta a ponto de comprometer a ductilidade e nem tão baixa para não ter esmagamento e induzir a ruptura da parede por meio de concentração de tensões e dessolidarização dos blocos.

Os questionamentos que ficam em relação a isso seriam: qual limite da razão área líquida/área bruta dos blocos para que o prisma apresente um comportamento dúctil, com avisos prévios de fissuração antes da ruptura? E quando essa razão passa a assumir um comportamento frágil, com rupturas explosivas?

Somando-se a isso, assim como observado por Mohamad (2007), pelas análises visuais dos prismas ensaiados, Lübeck (2016) concluiu que há um limite de proporção entre as resistências da argamassa e resistência do bloco que afeta na mudança do modo de ruptura da alvenaria comprimida. Para resistências de argamassas inferiores a esse limite, a ruptura

ocorreria por esmagamento da junta. Para resistências superiores a tal limite, a ruptura ocorreria por tração no bloco.

Sendo assim, surge outro conjunto de questionamentos em relação à falta de conhecimento das deformações específicas próximas à ruptura da alvenaria relacionado à resistência da argamassa: qual seria o limite de proporção entre as resistências dos componentes para que ocorra o esmagamento da junta de assentamento? E para que ocorra ruptura por tração no bloco?

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O grande desafio da alvenaria estrutural é correlacionar o conjunto argamassa-bloco e transformá-lo em um sistema dúctil, com um comportamento previsível, uma vez que esses materiais, quando analisados separadamente, têm propriedades e composições diferentes. Mohamad (2007) afirma que os materiais que formam o conjunto da alvenaria estão sob um estado de tensões diferentes quando são analisados separadamente, fazendo com que a idealização da correlação desses parâmetros não seja real.

Somando-se a isso, sabe-se que as normas brasileiras vigentes de alvenaria apenas tratam a argamassa como um elemento ligante dos blocos estruturais, sem levar em consideração de maneira direta que ela pode influenciar na resistência final e no modo de ruptura da parede. Diferentemente das normas americanas e europeias, como o caso da Eurocode 6 EN 1996-1-1 (2002), que relaciona as resistências dos materiais constituintes e as características físicas do bloco, propõe valores de módulo de elasticidade e idealiza um comportamento tensão-deformação para a alvenaria comprimida.

A NBR 15812-1 (2010) cita que a resistência da argamassa não pode ser inferior à 1,5 MPa. Além disso, as duas normas brasileiras de alvenaria relacionam a resistência da argamassa apenas com a resistência característica do bloco na área líquida ($f_{bk,l}$), onde sua resistência não pode ultrapassar o valor de 70% do bloco.

Mohamad *et al.* (2018) afirmam que existem diferenças significativas nos resultados experimentais dos ensaios de compressão na argamassa, dependendo do tipo de argamassa e/ou das dimensões dos corpos de prova. Com ensaios preliminares esses autores verificaram a dificuldade de avaliar as deformações específicas e variações mecânicas experimentadas pela argamassa quando aderidas aos blocos e confinadas em juntas de alvenaria.

Tendo em vista que a argamassa é um dos elementos que influencia a resistência da alvenaria estrutural, Lübeck (2016) sugere que as normas de alvenaria poderiam definir a resistência do sistema como uma função da razão resistência do bloco/resistência da argamassa. Além disso, devido a infinidade de geometrias de blocos estruturais disponíveis no mercado, também deveria ser levado em conta essa variável, relacionando a área bruta com a área líquida do componente.

Sendo assim, faz-se necessário identificar qual a razão área líquida/área bruta dos blocos estruturais para que a alvenaria apresente um comportamento dúctil ou frágil, quando comprimida. Somando-se a isso, é importante também avaliar a proporção entre a resistência à compressão da argamassa de assentamento e do bloco que influencia sobre o modo de ruptura da alvenaria comprimida, ocasionando esmagamento da junta.

Para melhorar os requisitos atuais das normas brasileiras, é necessário compreender melhor o sistema argamassa-bloco, visando o desempenho da parede (FONSECA *et al.*, 2015). Justifica-se a necessidade desse estudo para correlacionar e entender como as propriedades da argamassa e do bloco podem influenciar na forma de ruptura da alvenaria, bem como na resistência à compressão, com enfoque principal no fenômeno de esmagamento da junta de assentamento. O conhecimento mais consistente das propriedades dos materiais constituintes da alvenaria permite a elaboração de melhores especificações e a um projeto de qualidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o modo de ruptura de prismas comprimidos, variando o tipo de bloco e resistência da argamassa de assentamento.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Verificar a influência da proporção entre a resistência à compressão da argamassa e do bloco sobre a resistência e o modo de ruptura de prismas comprimidos.

2. Propor as equações de resistência à compressão dos prismas analisados.
3. Averiguar se a resistência e o modo de ruptura de prismas comprimidos é influenciado pela razão área líquida/área bruta do bloco.
4. Avaliar a relação tensão-deformação específica das argamassas comprimidas utilizadas para verificar o início da ruptura e o comportamento não linear.

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

As questões de pesquisa a serem respondidas juntamente com os objetivos listados são:

1. Ao variar a resistência à compressão da argamassa, é possível prever o modo de ruptura do prisma comprimido? Em qual proporção de resistência de argamassa/resistência do bloco o prisma rompe por esmagamento da junta de assentamento?
2. É possível estabelecer um limite de relação área líquida/área bruta dos blocos para que não haja esmagamento da junta de assentamento através dos ensaios propostos?
3. O comportamento não linear da curva tensão-deformação específica das argamassas comprimidas relaciona o início de ruptura das juntas de argamassas comprimidas?

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para o desenvolvimento e compreensão do presente estudo, este capítulo tem por finalidade abordar, a partir de referenciais teóricos, os principais tópicos que irão direcionar a metodologia e análise dos resultados da pesquisa. Serão abordados os assuntos pertinentes ao trabalho, desde as conceituações básicas dos componentes da alvenaria estrutural até as propriedades mecânicas do conjunto que influem no modo de ruptura.

2.1 CONCEITUAÇÕES PRELIMINARES DOS COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL

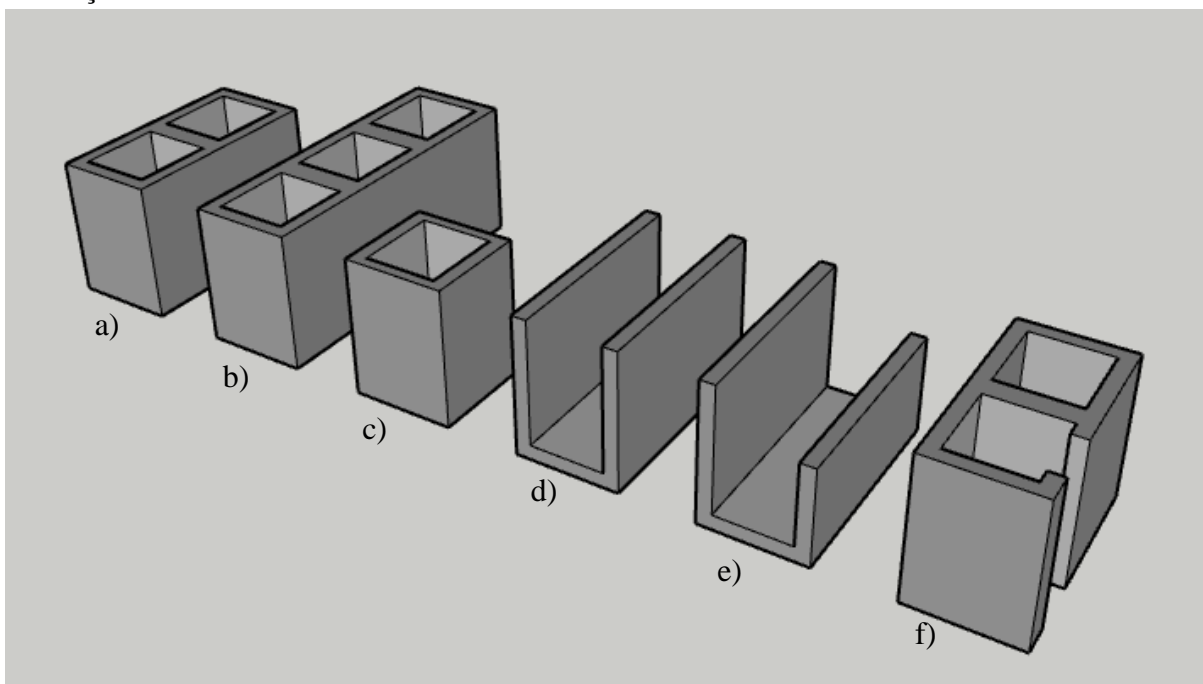
2.1.1 Bloco estrutural

No Brasil, a principal diferenciação dos blocos estruturais se dá pelo tipo do material, uma vez que as normas brasileiras que regem a alvenaria estão subdivididas em duas, de acordo com os principais materiais: cerâmico e de concreto. A NBR 15812 (ABNT, 2010) trata sobre o projeto, execução e controle de obras com os blocos do tipo cerâmicos e a NBR 15961 (ABNT, 2011) aborda os blocos de concreto.

O mercado dispõe de inúmeras variedades de blocos estruturais. Os blocos, além de se classificarem de acordo com o tipo de material, também se diferenciam pela modulação, geometria e resistência à compressão.

Além do bloco convencional paralelepípedo-retângulo, ainda são fabricados componentes complementares, como o bloco canaleta, utilizados para construção de vergas e contravergas, vigas de cintamento e outros elementos construtivos (SÁNCHEZ, 2013; MOHAMAD, 2015). Na Figura 1 ilustra-se algumas unidades complementares disponíveis no mercado.

Figura 1 – Alguns tipos de unidades comercializadas: a) bloco estrutural convencional; b) bloco e meio; c) meio bloco; d) canaleta “u”; e) canaleta “j”; f) bloco especial para saída de tubulações.



Fonte: elaboração própria.

As normas NBR 15270 (ABNT, 2017), NBR 12118 (ABNT, 2013) e NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelecem os métodos de ensaios e requisitos que os blocos devem atender para serem aceitos. Entre os requisitos, destaca-se a propriedade de absorção de água, que além de ajudar na produção de aderência entre argamassa e bloco, também incrementa no aumento da resistência à compressão da argamassa, diminuindo o fator água/cimento. Entretanto, se a absorção for em excesso, é prejudicial ao sistema, pois o bloco absorverá a água necessária para que ocorra a hidratação da argamassa (JUSTE e CORRÊA, 2005).

Em relação à modulação, os blocos são nomeados por “família”, que definem as medidas de projeto arquitetônico. As principais famílias comercializadas são a “29” e a “39”, sendo que esse número corresponde ao comprimento nominal longitudinal do bloco, em centímetros. Na Tabela 1 apresentam-se os valores de largura (L), altura (H) e comprimento (C) dos blocos cerâmicos e de concreto usuais, juntamente com seus respectivos desvios dimensionais aceitáveis, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2016) e a NBR 15270-1 (ABNT, 2017).

Tabela 1 – Tolerâncias dimensionais para blocos estruturais.

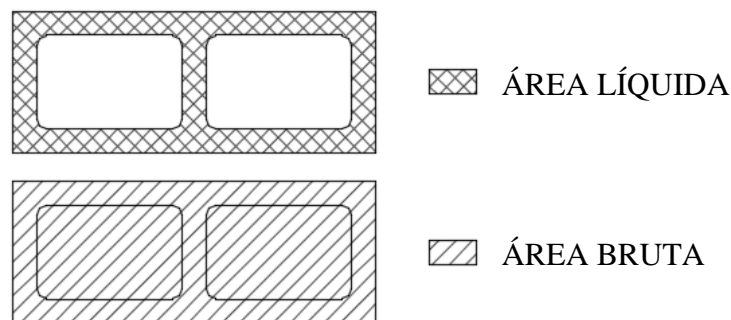
Propriedade	Dimensões nominais dos blocos padrões fabricados (mm)	Tolerância (mm) p/ blocos cerâmicos (NBR 15270-1, 2017)	Tolerância (mm) p/ blocos de concreto (NBR 6136, 2016)
Largura (L)	190 ; 140	± 2	± 3
Altura (H)	190	± 3	± 3
Comprimento (C)	290 ; 390	± 3	± 3

Fonte: NBR 6136 (2016); NBR 15270-1 (2017).

Tratando-se da geometria do bloco estrutural, existem inúmeras configurações de paredes e são basicamente classificados em blocos de paredes maciças ou blocos de paredes vazadas. Essa propriedade influi diretamente na resistência da alvenaria devido à concentração de tensões (RIZZATTI, 2003). As tolerâncias dimensionais permitidas em espessuras dos septos e paredes externas para blocos estruturais cerâmicos é de $\pm 0,3$ mm (NBR 15270-1, 2017) e para blocos de concreto é de 1,0 mm (NBR 6136, 2016).

A geometria do bloco é o que determina a área líquida da seção transversal do mesmo. Conforme o ilustrado na Figura 2, a área líquida corresponde a área da face do bloco, descontando as áreas dos vazios; e a área bruta é a própria área da seção transversal (NBR 15812, 2010; NBR 15961, 2011).

Figura 2 – Área líquida e área bruta de um bloco estrutural.



Fonte: elaboração própria.

Mohamad (1998) afirma que, no estudo dos blocos, as características mecânicas que mais influem no comportamento de ruptura são: resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Essas propriedades serão abordadas detalhadamente nessa revisão de literatura.

2.1.2 Argamassa de assentamento

De acordo com a NBR 15812 (ABNT, 2010) e a NBR 15961 (ABNT, 2011), a junta de argamassa está definida como o “componente utilizado na ligação dos blocos”. A junta da argamassa de assentamento é o elemento que garante o monolitismo e a solidez à parede de alvenaria estrutural, ou seja, ela possui a responsabilidade de transmitir as tensões verticais e horizontais atuantes, solidarizando as unidades e criando uma estrutura única (MOHAMAD *et al.*, 2015).

A argamassa de assentamento no estado fresco deve garantir as propriedades de consistência, retenção de água, coesão e exsudação. No estado endurecido deve conferir resistência à compressão, aderência superficial, durabilidade e capacidade de acomodar deformações (KHOO e HENDRY, 1973, *apud* MOHAMAD *et al.*, 2015).

As normas brasileiras básicas que regem os ensaios da argamassa são a NBR 13276 (2016) e NBR 13279 (2005). A primeira determina o preparo da mistura e determinação do índice de consistência. A segunda trata dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão.

Por muito tempo os pesquisadores consideraram que a principal função da argamassa era apenas unir as unidades e acomodar as deformações, sem levar em consideração a resistência da mesma. Só a partir da década de 1970 esse quadro inverteu, onde Khoo e Hendry (1973) desenvolveram uma pesquisa para avaliar o comportamento triaxial da argamassa para explicar os mecanismos de ruptura das alvenarias (MOHAMAD, 2007).

Segundo Lübeck (2016) há uma carência nas normas brasileiras que limitem numericamente as propriedades da argamassa de assentamento, principalmente em relação à resistência à compressão. De acordo com esse autor, é necessário delimitar uma resistência que não seja tão alta, a ponto de comprometer a ductilidade, e nem tão baixa, para não ocorrer esmagamento e induzir a ruptura da parede por meio de concentração de tensões.

2.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS QUE INFLUEM NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL E SUAS DEFINIÇÕES

2.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão da alvenaria estrutural está correlacionada com as propriedades dos materiais constituintes e é o fator predominante na concepção do projeto. Dessa forma, a resistência à compressão da alvenaria depende das propriedades mecânicas e físicas do bloco estrutural, da argamassa e do graute. O bloco estrutural é o fator de maior contribuição para a resistência da alvenaria, e a argamassa interfere em menor escala (PARSEKIAN *et al*, 2012).

Além dos elementos que a compõe, a resistência da alvenaria também depende: da razão entre a altura da unidade e a menor dimensão horizontal da unidade; da orientação do bloco em relação a direção de aplicação de carga; da espessura da junta da argamassa (FORTES *et al.*, 2017).

Usualmente as normas de alvenaria estrutural definem dois métodos para determinar a resistência à compressão da alvenaria. O primeiro é a realização de ensaios em prismas de dois a cinco blocos de altura, permitindo a correlação das resistências à compressão medidas dos prismas com a resistência da estrutura de alvenaria. Já o segundo determina a resistência à compressão da alvenaria a partir de valores tabulados baseados na resistência do bloco e no tipo de argamassa.

2.2.1.1 *Determinação da resistência à compressão da alvenaria por ensaios de prismas ou pequenas paredes*

Os códigos normativos de alvenaria estrutural permitem correlacionar a resistência à compressão da estrutura de alvenaria com a resistência de prismas comprimidos com os mesmos componentes. É o caso das normas brasileiras de projeto de alvenaria estrutural, que consideram apenas o método dos estados limites. Os estados limites incluem apenas a carga de ruptura, onde adota-se coeficientes de minoração da resistência e coeficientes de majoração das ações solicitantes.

Tanto a norma de alvenaria para blocos cerâmicos quanto a norma de alvenaria para blocos de concreto estipulam que a resistência à compressão simples característica da alvenaria (f_k) deve ser determinada com base no ensaio de paredes, conforme a NBR 8949 (1985). O f_k também pode ser estimado como 70% da resistência característica a compressão simples de prisma (f_{pk}) ou 85% da de pequena parede (f_{ppk}) (NBR 15812-1, 2010; NBR 15961-1, 2011).

Essas estimativas de 70% de f_{pk} ou 85% de f_{ppk} são convenientes, uma vez que ensaios em paredes de alvenaria em escala real são onerosos e difíceis de executar. Sendo assim, grande parte dos autores concordam sobre a possibilidade de estabelecer uma relação entre a carga e o modo de ruptura das paredes com o estudo do comportamento dos prismas (SANTOS *et al.*, 2017). Os anexos “A” das NBR 15812-2 (2010) e 15961-2 (2011) estabelecem o ensaio para a determinação da resistência à compressão para prismas de dois blocos de altura e espessura da junta de argamassa de aproximadamente 10 mm.

Com o objetivo de avaliar essa influência da resistência dos componentes no conjunto da alvenaria e idealizar a combinação dos materiais, foram desenvolvidos estudos como o de Kuerten (1998) e Romagna (2000). Esses autores ensaiaram prismas à compressão, variando as resistências de bloco, argamassa e graute.

Kuerten (1998) realizou ensaios à compressão com prismas de três blocos cerâmicos de parede maciça de altura. Para a confecção dos prismas foi utilizado um tipo de bloco, duas resistências de argamassa (traços 1:1:6 e 1:0,25:3) e três resistências de grautes (14, 30 e 50 MPa).

Ao final do estudo, esse autor concluiu a existência de uma razão ótima entre a resistência da argamassa e a do graute de 0,5 para a otimização da resistência à compressão dos prismas. Para razões maiores de 0,5 não houve ganho significativo de resistência dos prismas grauteados e para razões inferiores desse valor a resistência do prisma diminuía.

Posteriormente, Romagna (2000) ensaiou prismas com blocos de concreto de três diferentes resistências à compressão. Os blocos foram combinados com dois tipos de argamassas (traços 1:1:6 e 1:0,5:4,5) e quatro resistências de grautes.

Através do procedimento experimental, o autor concluiu que a influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas é mais significativa para prismas não grauteados. Além disso, para prismas não grauteados, o aumento na resistência do bloco aumentava a resistência à compressão do prisma, mas não de forma proporcional.

2.2.1.2 Determinação da resistência à compressão da alvenaria por correlações dos materiais constituintes

Algumas normas estrangeiras estimam a resistência da alvenaria por ábacos, tabelas ou equações que correlacionam as propriedades do bloco e da argamassa. É o caso da norma europeia Eurocode 6, EN 1996-1-1 (2002), que estipula a resistência da alvenaria conforme a Equação 2.1, a partir das propriedades dos componentes.

$$f_k = K \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3} \quad (2.1)$$

onde: f_k – resistência característica da alvenaria à compressão axial;

K – constante definida em função do tipo de bloco e argamassa, variando de 0,35 a 0,55 para argamassa de uso comum;

f_b – resistência à compressão normalizada do bloco;

f_m – resistência à compressão média da argamassa.

Diversos pesquisadores propuseram modelos para prever a resistência à compressão de alvenaria, por meio de ensaios de compressão de prismas, paredes e pequenas paredes. Sarhat e Sherwood (2014) procuraram desenvolver uma fórmula empírica simples para prever a resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto oco e não grauteados, por meio de uma revisão de banco de dados. Esses autores concluíram que os principais fatores que influem a resistência desse tipo de alvenaria são: a resistência do bloco, o tipo e a resistência da argamassa e a altura da junta de assentamento.

Thaickavil e Thomas (2018) também desenvolveram uma equação de previsão de resistência à compressão de prisma, baseada em dados de experimentos de outros pesquisadores. Nesse estudo, foram considerados os mais diferentes tipos de materiais de bloco. No modelo proposto, esses autores consideraram que, para obter resultados mais precisos, deve-se levar em conta as variáveis da fração volumétrica da unidade de alvenaria e a razão de volume da junta de assentamento da argamassa.

2.2.2 Deformação específica e coeficiente de Poisson

Quando um prisma é submetido à compressão axial, ocorre uma deformação específica, ou seja, há uma variação no seu comprimento. Essa variação ocorre tanto no sentido do carregamento, quanto no sentido transversal ao carregamento. A deformação específica é uma grandeza adimensional, definida como a mudança do comprimento por unidade de comprimento.

A deformação específica medida no sentido longitudinal é denominada deformação específica axial ou longitudinal (ε_L). No sentido transversal, tem-se a deformação específica lateral ou transversal (ε_T). As Equações 2.2 e 2.3 determinam o cálculo os dois tipos de deformações específicas e na Figura 3 – Corpo submetido à uma carga uniaxial e suas variações de comprimento. ilustra-se como ocorre as variações de comprimento quando um corpo é submetido à uma carga axial:

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta l}{L} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta t}{T} \quad (2.3)$$

Onde: ε_L – deformação específica longitudinal;

ε_T – deformação específica transversal;

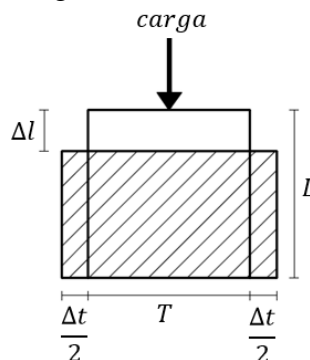
Δl – variação do comprimento do corpo de prova no sentido longitudinal;

Δt – variação do comprimento do corpo de prova no sentido transversal;

L – dimensão original do corpo de prova no sentido longitudinal;

T – dimensão original do corpo de prova no sentido transversal.

Figura 3 – Corpo submetido à uma carga uniaxial e suas variações de comprimento.



A razão entre a deformação específica longitudinal e a deformação específica transversal é o coeficiente de Poisson (ν), representado na Equação 2.4. Essa razão é constante na faixa de comportamento elástico do material, pois nessa fase as deformações são proporcionais. O coeficiente de Poisson também é uma grandeza adimensional.

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (2.4)$$

2.2.3 Curva tensão-deformação específica e módulo de elasticidade

A curva tensão-deformação específica é uma representação gráfica do comportamento de deformação de um material quando submetido a um determinado carregamento. É a curva tensão-deformação específica que ilustra se o material apresenta um comportamento dúctil ou frágil. Num material frágil ocorre pouca ou nenhuma deformação até o instante da ruptura, já num material dúctil se tem maiores deformações antes de romper.

Quando o material for carregado uniaxialmente, a inclinação da curva tensão-deformação específica representa o módulo de elasticidade. Essa propriedade é importante na previsão da capacidade de deformação à compressão das alvenarias, pois define como se dá a transferência de tensões entre os materiais bloco e argamassa.

Muitos pesquisadores procuram relacionar o módulo de elasticidade dos prismas com o modo de ruptura da alvenaria. Fortes *et al.* (2017), por exemplo, ensaiaram à compressão diferentes configurações de paredes e prismas de blocos de concreto de alta resistência, variando as resistências dos blocos e da argamassa. Por meio dos gráficos de tensão-deformação específica, os autores concluíram que havia ruptura frágil de todas as paredes com deformação específica de ruptura entre 0,10 e 0,15% à compressão simples.

Outro estudo recente que relacionou o módulo de elasticidade com o mecanismo de falha de prismas comprimidos foi o de Mohamad *et al.* (2017). Os autores elaboraram um procedimento experimental combinando bloco estrutural de elevada resistência e três traços de argamassa. O estudo comprovou que para os prismas constituídos por argamassas de resistência mais fraca, o comportamento não-linear da curva tensão-deformação específica começa em um limite bem menor quando comparado com os prismas de argamassa de resistência maior.

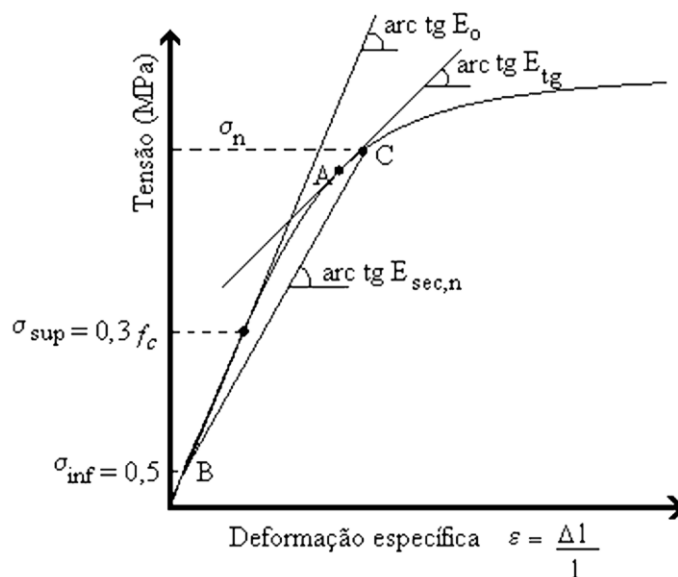
Zhow *et al.* (2017) desenvolveram um modelo de tensão-deformação específica para alvenaria de blocos de concreto sob compressão uniaxial. Segundo esses autores, a avaliação

precisa da relação tensão-deformação específica da alvenaria é essencial para análise e elaboração de um projeto estrutural. Sendo assim, realizaram um procedimento experimental com quatro combinações de paredes de alvenaria de bloco de concreto para verificar o mecanismo de falha e as características das curvas de tensão-deformação específica. Com base na análise de resultados experimentais obtidos na pesquisa, juntamente com outros estudos, os autores concluíram que o pico de tensão aumenta à medida que a resistência à compressão da argamassa diminui. Isso indica que a argamassa tem um efeito significativo na deformação da alvenaria.

A NBR 8522 (2017), que rege o procedimento experimental da determinação do módulo de elasticidade do concreto, estabelece os diferentes tipos de avaliação dessa propriedade que podem ser obtidos em função dos pontos selecionados no diagrama, gráfico da Figura 4. De acordo com a norma, os módulos de elasticidade estão classificados em:

- módulo de elasticidade inicial E_0 – é a inclinação da reta que passa pelo ponto com tensão igual a 0,5 MPa σ_{inf} e uma tensão de 0,3 da tensão de ruptura (σ_{sup}).
- módulo de elasticidade secante E_{sec} – é a declividade de uma reta traçada de um nível de tensão de 0,5 MPa e uma tensão qualquer entre 0,4 e 0,8 da tensão de ruptura.
- módulo de elasticidade tangente E_{tg} – é a declividade de uma reta tangente à curva em relação a qualquer ponto da mesma.

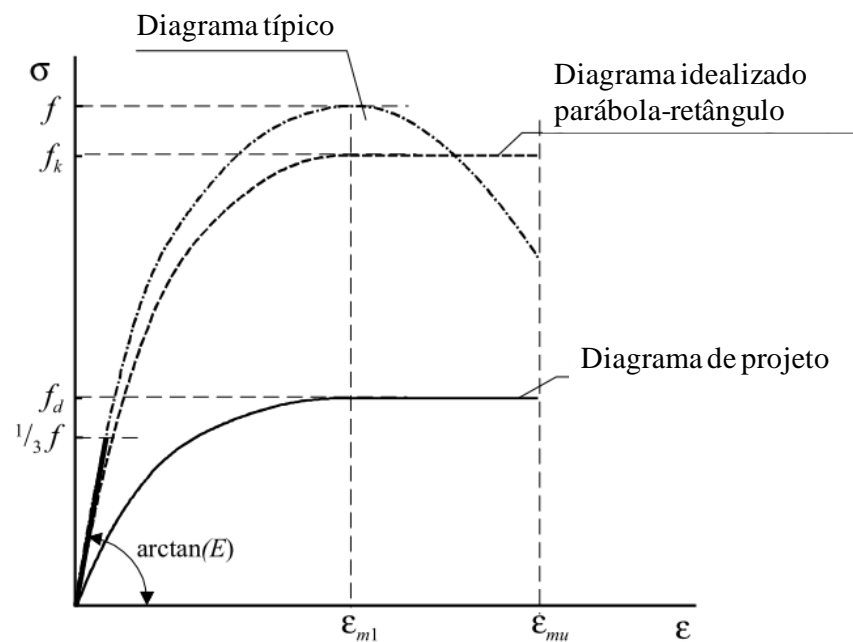
Figura 4 – Definição dos diferentes tipos de avaliação do módulo de elasticidade.



Para determinar o módulo de elasticidade dos componentes da alvenaria é usual o gráfico tensão-deformação específica para uma carga de 40% a 60% da carga última para o módulo secante, e de 30% para o tangente inicial. É nesse intervalo que ocorre um comportamento linear do sistema (MOHAMAD, 2007).

A EN 1996-1-1 (2002), que rege as características básicas para os componentes da alvenaria, ilustra um comportamento idealizado tensão-deformação específica, conforme o gráfico da Figura 5. Apesar de considerar que o comportamento da curva da alvenaria seja não linear, a norma admite que pode ser adotado para fins projeto um comportamento idealizado de parábola-retângulo, onde a não linearidade corresponde à tensão igual a 1/3 da tensão de ruptura.

Figura 5 – Curva tensão-deformação específica proposto na norma europeia para alvenaria à compressão.



Fonte: EN 1996-1-1 (2002).

Cheema e Klingner (1986) e Khalaf e Fairbairn (1992) foram os primeiros estudos que associaram o módulo de elasticidade da argamassa com a resistência da mesma. Entretanto, pode-se verificar, conforme apresenta-se no Quadro 1, que essas relações não mostraram uma aproximação.

Quadro 1 – Módulo de elasticidade secante e tangente da argamassa encontrados por Cheema e Klingner (1986) e Khalaf e Fairbairn (1992).

Pesquisa	Módulo de elast. secante da argamassa ($E_{a,s}$)	Módulo de elast. tangente da argamassa ($E_{a,tg}$)
Cheema e Klingner (1986)	$E_{a,s} = 500 \times f_{arg}$	$E_{a,tg} = 1000 \times f_{arg}$
Khalaf e Fairbairn (1992)	$E_{a,s} = 340 \times f_{arg}$	$E_{a,tg} = 600 \times f_{arg}$
* f_{arg} – resistência à compressão da argamassa		

Fonte: elaboração própria.

Shankoski *et al.* (2015) ensaiaram prismas de blocos de concreto de elevada resistência à compressão, com diferentes traços de argamassa. Os autores concluíram que os módulos de elasticidade dos prismas apresentam uma relação diretamente proporcional com a resistência à compressão dos mesmos.

Juste e Corrêa (2005) ressaltam a necessidade de uma norma brasileira específica para determinar o módulo de elasticidade da alvenaria, pois não há nenhum método de ensaio padronizado que possa ser utilizado. Sendo assim, os valores obtidos podem variar por diversos fatores, como a velocidade e a intensidade de carregamento e dimensões dos corpos de prova.

2.2.4 Comportamento não linear da alvenaria estrutural

O item 8.2.10 da NBR 6118 (2014), a qual rege as normativas do concreto armado, estabelece que o concreto possui um comportamento linear em relação à tensão de compressão até 50% da resistência. Assim como no concreto, o sistema da alvenaria estrutural também tem um comportamento linear até determinado limite de tensão, quando submetido à análise de tensão-deformação específica.

Fonseca *et al.* (2015) buscaram a compreensão das propriedades mecânicas do conjunto argamassa-bloco, com o objetivo de avaliar o modo de ruptura e a capacidade de deformação das paredes. Em um primeiro momento, foram ensaiados à compressão prismas de 3 blocos de altura, contrafiados e não contrafiados. Posteriormente, pequenas paredes de 5 blocos de altura, contrafiados, também foram submetidos à compressão axial e lateral.

Por meio de um extenso programa experimental, os autores concluíram que o início da não-linearidade de alvenaria corresponde a um aumento das tensões laterais e do coeficiente de Poisson. Esse fenômeno ocorreu devido às fissuras da argamassa e de fissuras verticais que

ocorreram na interface bloco-argamassa, quando as paredes atingem aproximadamente 60% da resistência máxima de compressão.

Mohamad *et al.* (2017) concluíram que o mecanismo de falha da alvenaria estrutural começa no início do comportamento não-linear da curva tensão-deformação específica dos prismas comprimidos. Isso está diretamente relacionado com o modo de ruptura, uma vez que para prismas moldados com argamassas mais fracas a não-linearidade da curva foi bem inferior quando comparado com os prismas de argamassa forte. Enquanto os prismas de argamassa fraca romperam por esmagamento, o modo de ruptura dos prismas de argamassa forte deu-se por tração no bloco.

2.2.5 Fator de eficiência

A razão entre a resistência do bloco e a resistência do prisma ou da parede é definido como fator de eficiência (η). O fator de eficiência é obtido através da razão entre a resistência à compressão do prisma ou da parede pela resistência à compressão do bloco, representado pela Equação 2.5.

$$\eta = \frac{f_{pk}}{f_{bk}} \quad (2.5)$$

onde: η – fator de eficiência.

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

f_{bk} – resistência à compressão do bloco estrutural.

Ainda não há um valor de fator de eficiência prisma/bloco normalizado, fazendo com que esse valor seja adotado por responsabilidade do projetista. Dessa forma, Portella (2015) realizou um estudo com prismas de blocos estruturais cerâmicos de paredes vazadas de diferentes resistências à compressão com o objetivo de encontrar um valor usual de fator de eficiência prisma/bloco. Na Tabela 2 mostram-se os valores de fator de eficiência média e característica dos prismas ensaiados aos 28 dias e os valores sugeridos por esse autor.

Tabela 2 – Fator de eficiência de ensaios aos 28 dias obtidos por Portella (2015).

Faixa de resistência dos prismas (MPa)	Fator de Eficiência		
	Médio	Característico	Sugerido pelo autor
6,0 - 8,5	54,7%	47,7%	50,0%
8,5 – 10,0	44,0%	36,7%	40,0%
10,0 – 12,0	45,8%	37,9%	40,0%
12,0 – 15,0	41,0%	33,2%	35,0%
Acima de 15,0	39,3%	31,1%	35,0%

Fonte: Portella, 2015.

Esse autor concluiu que com o aumento da resistência à compressão dos blocos os prismas também têm aumento de resistência. Todavia, o fator de eficiência da resistência prisma/bloco diminui, uma vez que o acréscimo de resistência dos prismas não é tão representativo quanto o aumento da resistência dos blocos.

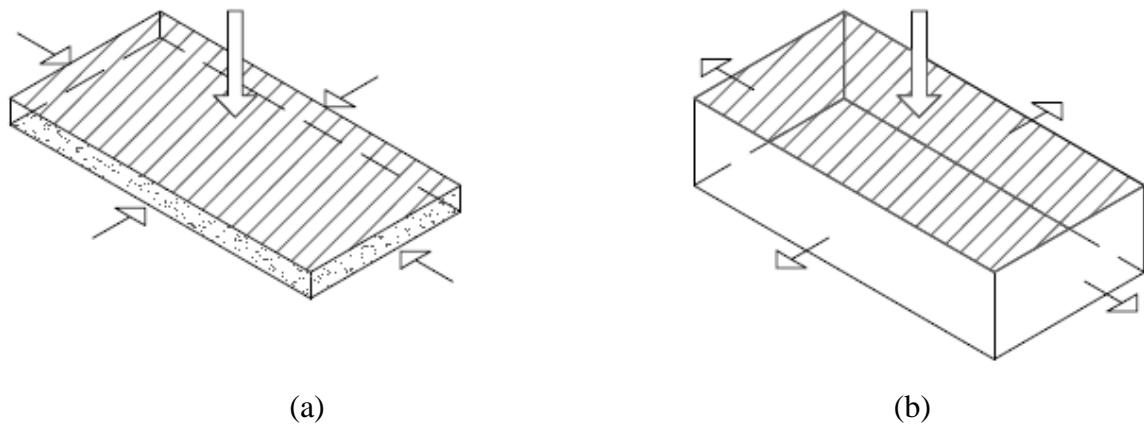
2.2.6 Tipos de ruptura na alvenaria estrutural

Quando uma parede de alvenaria for carregada verticalmente, surgem tensões horizontais na argamassa de assentamento e o bloco, devido à aderência existente entre eles. Essa aderência garante o confinamento da argamassa e resulta na compatibilização na interface entre os componentes da alvenaria.

O comportamento de confinamento acontece porque a argamassa é um material mais deformável que o bloco e a aderência entre os componentes impede a expansão da junta. Sendo assim, a argamassa apresenta um comportamento diferente do obtido em ensaios de tração na flexão e compressão, recomendados pela NBR 13279 (2005), que além de não considerar a aderência, também não estima a perda de água da argamassa para o bloco.

Dessa forma, para analisar o comportamento mecânico da alvenaria é necessário avaliar as propriedades de resistência, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos materiais em um estado de tensão multiaxial. O mecanismo de ruptura das alvenarias comprimidas considera o bloco em um estado de tensão biaxial de tração e a argamassa sob um estado de tensão triaxial de compressão (MOHAMAD *et al.*, 2006). Na Figura 6 ilustra-se esse comportamento.

Figura 6 – Junta de argamassa comprimida triaxialmente (a); bloco comprimido e tracionado biaxialmente (b).



Fonte: Lübeck, 2016.

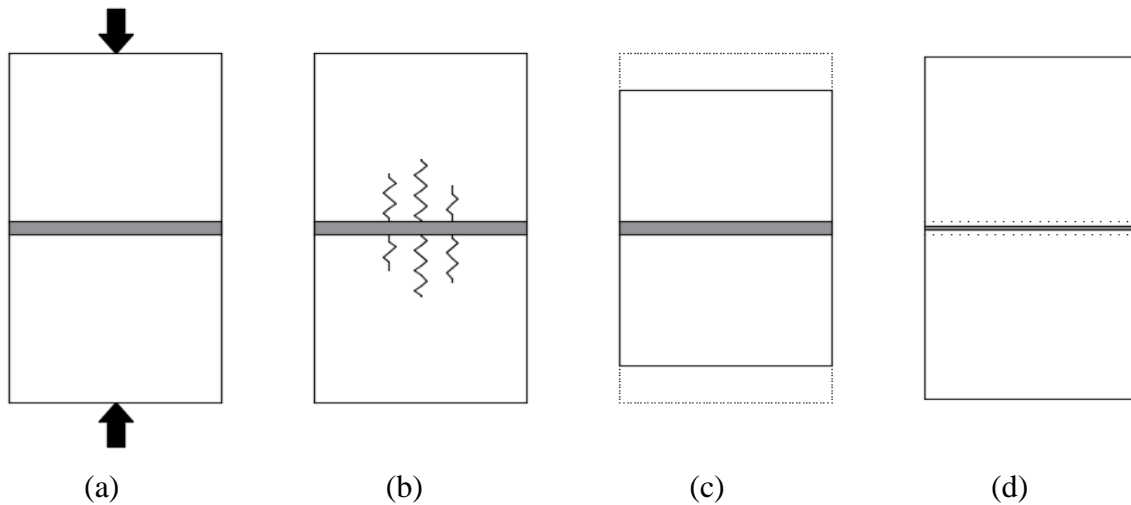
A proporção de rigidez entre os módulos de elasticidade dos componentes da alvenaria é um fator importante na determinação do tipo de ruptura, assim como na resistência máxima do conjunto. Mohamad (2007) afirma que a resistência da alvenaria depende da capacidade de deformação da junta da argamassa, além da aderência entre o bloco e a argamassa de assentamento.

O modo de ruptura da alvenaria depende de quatro variáveis: resistência da aderência do conjunto argamassa-bloco, resistência à compressão da argamassa, resistência à compressão do bloco e resistência à tração do bloco (DE LIMA, 2010). O estudo do modo de ruptura da alvenaria é relevante pois auxilia a estabelecer uma compatibilidade entre os componentes, melhorando o desempenho à compressão da parede (MOHAMAD *et al.*, 2006).

Cheema e Klingner (1986) classificaram as rupturas que podem ocorrer na alvenaria estrutural em três tipos: (i) tração no bloco; (ii) esmagamento do bloco; e (iii) esmagamento da junta da argamassa. Na Figura 7 ilustram-se esses tipos de ruptura e a classificação é aceita e utilizada por diversos pesquisadores.

Para o primeiro caso, a ruptura por tração no bloco ocorre quando a tensão de tração principal no bloco é maior que a resistência à tração no bloco. O segundo tipo de ruptura é quando a tensão principal de compressão no bloco ultrapassa a resistência à compressão do mesmo e ocorre esmagamento. Por fim, o esmagamento da junta de assentamento ocorre quando a tensão de compressão axial na argamassa supera a resistência da argamassa confinada.

Figura 7 – Desenho esquemático dos tipos de ruptura (a) prisma submetido a compressão axial; (b) ruptura por tração no bloco; (c) ruptura por esmagamento do bloco e (d) ruptura por esmagamento da junta de argamassa.



Fonte: elaboração própria.

Para determinar se a ruptura se dá por tração no bloco ou por esmagamento da junta de argamassa, Cheema e Klingner (1986) realizaram ensaios com prismas não grauteados. Esses autores estabeleceram uma relação aproximada entre o módulo de elasticidade da argamassa (E_{arg}) e do bloco (E_b) com o tipo de ruptura.

Sendo assim, os autores definiram que para razões $E_{arg}/E_b \geq 0,66$, a ruptura se daria por esmagamento da argamassa. Para razões $E_{arg}/E_b \leq 0,66$, a ruptura ocorreria por tração no bloco.

Mohamad *et al.* (2017) ensaiaram prismas de blocos de concreto de três blocos de altura com o objetivo de verificar o modo de ruptura, variando apenas as resistências das argamassas. Para desenvolver os experimentos, foram utilizados blocos de concreto de elevada resistência, de aproximadamente 23 MPa, e três traços de argamassa. Na Tabela 3 mostram-se os traços na relação de cimento-cal-areia e suas respectivas resistências e módulos de elasticidade, encontradas por meio de ensaios padrão.

Tabela 3 – Argamassas utilizadas no experimento de Mohamad *et al.* (2017).

Argamassa	Traço (cimento-cal-areia)	$f_{c,médio}$ (MPa)	$E_{c,médio}$ (GPa)
I	1:0,25:3	20,3	12,8
II	1:0,5:4,5	7,4	4,8
III	1:1:6	4,5	3,2

Fonte: Mohamad *et al.* (2017).

Por meio de ensaios de compressão dos prismas, juntamente com a análise do modo de elasticidade dos mesmos, verificou-se que a variação de resistência das argamassas não interferiu na resistência à compressão. Isso evidencia que os resultados de resistência por si só não podem ser utilizados para indicar o modo de ruptura da alvenaria.

Além disso, foi possível verificar que a razão entre os módulos de elasticidade do prisma e do bloco, que pode ser usada como medida de perda de rigidez, indica que a alvenaria construída com uma argamassa forte se comporta quase como um material único.

Esses prismas com a argamassa forte (traço I) apresentaram um nível de tensão-deformação específica de aproximadamente 0,8 e a partir daí perderam a rigidez até a falha. Isso indica que a alvenaria estaria se comportando como se fosse um material só em toda a sequência de carregamento, ou seja, o bloco e a argamassa estão atuando de forma semelhante. O modo de ruptura observado nesse caso foi devido a tensões de tração desenvolvidas no bloco e posterior fissuração na junta de assentamento (Figura 8 (a)).

Para os prismas constituídos por argamassa de resistência inferior (traço II e III), o prisma nem chegou a atingir a rigidez do bloco. Os componentes argamassa e bloco atuam como materiais separados. A argamassa foi o que comandou o modo de ruptura dos prismas, por meio do esmagamento da junta, ocasionando tensão de tração no bloco e posterior ruptura do mesmo (Figura 8 (b)).

Figura 8 – Mecanismo de ruptura dos prismas ensaiados: (a) junta de argamassa forte; (b) junta de argamassa fraca.



Fonte: Mohamad *et al.* (2017).

Seguindo a mesma linha de Mohamad *et al.* (2017), Alvarenga *et al.* (2017) também avaliaram experimentalmente a influência das propriedades mecânicas da argamassa sobre o comportamento de prismas, mas utilizando blocos cerâmicos.

Para a moldagem dos prismas, foram utilizados blocos cerâmicos de resistência à compressão de 4,9 MPa. Foram moldados dois tipos de prismas (P-100 e P-50), combinando-os com duas resistências de argamassa, com resistência à compressão equivalente à 94,7 e 50,4% da resistência à compressão dos blocos na área líquida. A Tabela 4 mostra os valores encontrados de resistência característicos e módulo de elasticidade dos prismas.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos prismas moldados por Alvarenga *et al.* (2017).

Prisma	Nº de espécimes	$\frac{f_{argamassa}}{f_{bloco,liq}}$ (%)	$f_{p,k}$ (MPa)	E_p (MPa)	Fator de eficiência
P-100	6	94,7%	2,9	1167	0,59
P-50	6	50,4%	2,7	1064	0,55

Fonte: Alvarenga *et al.* (2017).

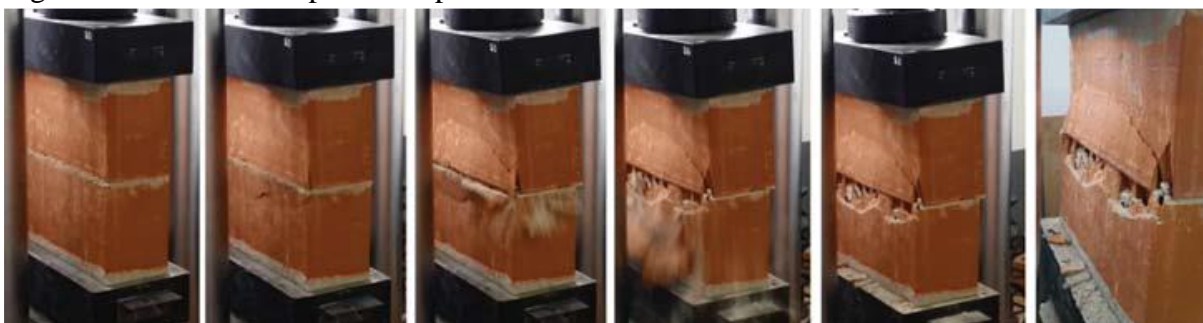
Os autores observaram que a variação de resistência e rigidez da argamassa não afeta significativamente na resistência à compressão dos prismas. Entretanto, foi possível verificar que para prismas moldados com argamassa mais flexível, ou seja, de resistência mais baixa, apresentavam um modo de ruptura dúctil (Figura 9 – Modo de ruptura dos prismas P-50.), com avisos prévios antes da ruptura. Para os prismas com argamassa mais rígida apresentavam um mecanismo de falha foi frágil e explosivo, com esmagamento dos blocos (Figura 10).

Figura 9 – Modo de ruptura dos prismas P-50.



Fonte: Alvarenga *et al.* (2017).

Figura 10 – Modo de ruptura dos prismas P-100.



Fonte: Alvarenga *et al.* (2017).

2.3 INFLUÊNCIA DA TIPOLOGIA DO BLOCO E DA ARGAMASSA NO MODO DE RUPTURA DA ALVENARIA ESTRUTURAL

2.3.1 Influência do bloco estrutural no modo de ruptura

As formas, dimensões e material do bloco empregado em alvenaria estrutural podem gerar diferentes comportamentos na estrutura quando sujeita às cargas de compressão (SANTOS, 2008).

2.3.1.1 Influência do tipo do material do bloco estrutural

Em relação ao material, De Marco (2016) afirma que a resistência à compressão e o modo de ruptura de blocos cerâmicos se diferem com os blocos de concreto. Quando comparado com as unidades de concreto, as unidades cerâmicas têm uma faixa de resistência à compressão maior e um modo de ruptura mais frágil. Além disso, blocos cerâmicos apresentam fissuras localizadas nos encontros entre as paredes longitudinais e transversais e um fator de eficiência prisma/bloco menor.

Em contrapartida, os blocos de concreto apresentam uma faixa de resistência menor, uma ruptura mais dúctil, fissuração distribuída e fator de eficiência maior. Dessa forma, em termos visuais, o modo de ruptura se dá por indução de tensões de tração no bloco, por esmagamento da junta de assentamento ou pela combinação dos dois modos de ruptura (Lübeck, 2016). No Quadro 2 resume-se o comparativo das características para os dois tipos de bloco (cerâmico e de concreto).

Quadro 2 – Comparativo de propriedades dos blocos em relação ao material que o compõem segundo De Marco (2016) e Lübeck (2016).

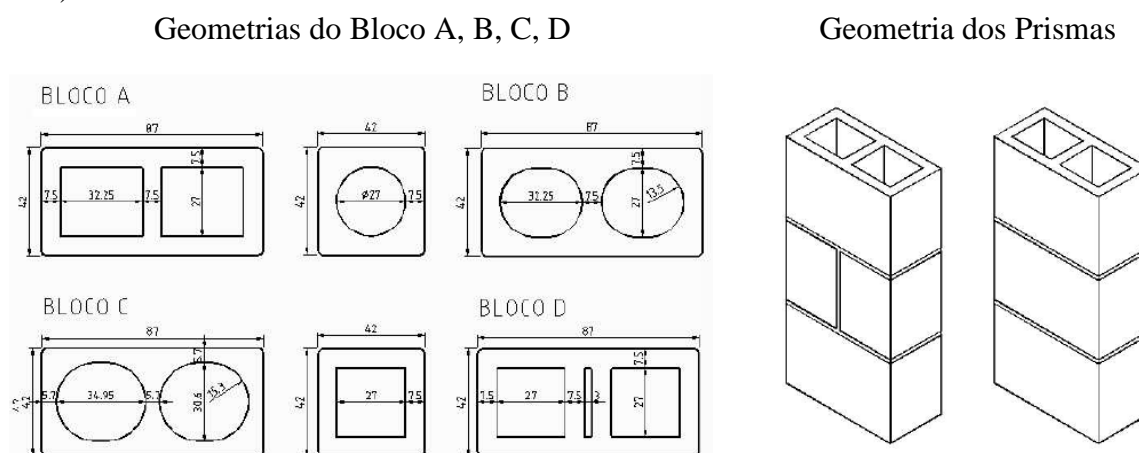
Propriedade	Bloco cerâmico	Bloco de concreto
Faixa de resistência	Maior	Menor
Modo de ruptura	Mais frágil	Mais dúctil
Modo de fissuração	Fissuras localizadas	Fissuras distribuídas
Fator de eficiência prisma/bloco	Menor	Maior

Fonte: elaboração própria.

2.3.1.2 Influência da geometria do bloco estrutural

Com o objetivo de estudar diferentes geometrias de blocos, Rizzatti (2003) realizou experimentos de prismas e paredes de blocos cerâmicos, em escala reduzida na proporção 1:3 das dimensões nominais. Na Figura 11 ilustra-se as geometrias A, B, C e D dos blocos e dos prismas. Na Tabela 5 mostram-se os resultados de resistência obtidos de cada composição:

Figura 11 – Geometria dos blocos e dos prismas em escala reduzida ensaiados por Rizzatti (2003).



Fonte: Rizzatti (2003).

Tabela 5 – Resultados médios dos blocos e prismas encontrados por Rizzatti (2003).

Tipos de blocos	A	B	C	D
Área líquida (cm ²)	18,70	20,92	17,50	20,87
Resistência à compressão (MPa)	29,43	32,95	30,31	33,57
Resistência à tração (MPa)	1,81	1,57	1,67	1,80
Resistência dos prismas (MPa)	10,56	13,61	11,18	11,67
Fator de eficiência	0,36	0,41	0,37	0,35

Fonte: Rizzatti (2003).

O autor concluiu que o bloco de geometria tipo D é o mais eficiente, pois as paredes apresentaram melhor capacidade de resistir solicitações verticais, uma vez que essa geometria garante a coincidência dos septos entre as fiadas subsequentes, devido ao duplo septo central. Dessa forma, o tipos e disposição dos furos podem acarretar concentrações de tensões, reduzindo a resistência e podendo até mesmo levar à uma ruptura frágil do sistema.

Steil (2003) também estudou o comportamento mecânico de prismas de blocos de concreto, com o objetivo de verificar a influência da geometria do bloco juntamente com diferentes composições de argamassa. Foram comparadas as propriedades de fator de eficiência, deformabilidade e distribuição de tensões.

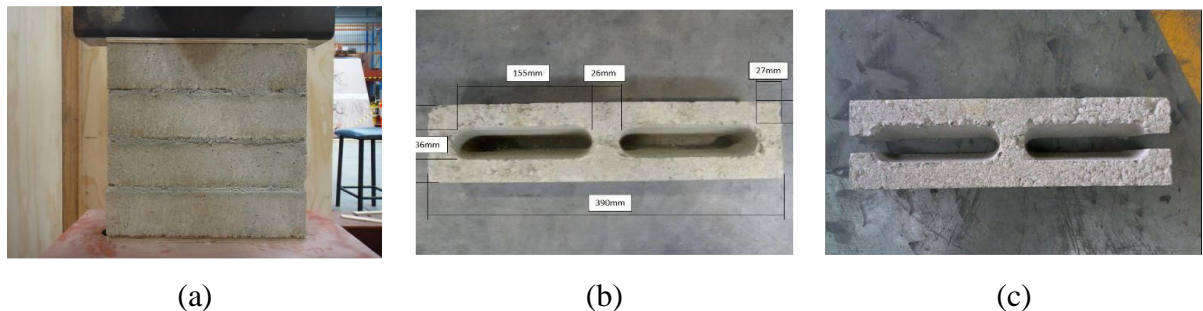
Foram combinadas cinco diferentes geometrias de bloco de mesma resistência nominal com três diferentes argamassas de assentamento, sendo duas mistas de cimento, cal e areia e uma industrializada. Com ensaios e análises por elementos finitos, esse autor concluiu que blocos que continham em sua geometria furos mais cônicos apresentavam fatores de eficiência mais baixos. Além disso, verificou-se que a geometria do bloco foi responsável pelo surgimento de tensões de tração diferenciais nos blocos.

Além de Rizzatti (2003) e Steil (2003), existem outros pesquisadores que confirmam que a geometria do bloco está relacionada com o modo de ruptura da alvenaria. Entre eles, citam-se Nascimento *et al.* (2010) e Thamboo *et al.* (2013).

Nascimento *et al.* (2010) estudaram a influência da geometria de blocos cerâmicos na resistência mecânica de prismas. Foram moldados prismas de diferentes geometrias de blocos cerâmicos de resistências nominais de 12 MPa e 15 MPa. Os resultados apontaram que a geometria influencia no comportamento mecânico da alvenaria, em termos de resistência à compressão.

Thamboo *et al.* (2013) ensaiaram prismas de quatro blocos de altura (Figura 12(a)), combinando duas geometrias de bloco de concreto com dois traços diferentes de argamassa, variando a espessura da junta. Os blocos foram denominados de bloco “S” (Figura 12(b)) e bloco “H” (Figura 12(c)).

Figura 12 – Prismas e tipos de blocos utilizados por Thamboo *et al.* (2013).



Fonte: Thamboo *et al.* (2013).

Por meio de ensaios de compressão axial, os autores concluíram que há necessidade de incorporar as influências do tipo de geometria do bloco de alvenaria nos padrões de projeto,

uma vez que os prismas de bloco “S” retrataram resistência à compressão maior (até 25%) do que os prismas de bloco “H”. Além disso, ao verificar as curvas de tensão-deformação específica, foi possível constatar que a mudança do bloco “S” para o bloco “H” reduziu o módulo de elasticidade e aumentou o coeficiente de Poisson.

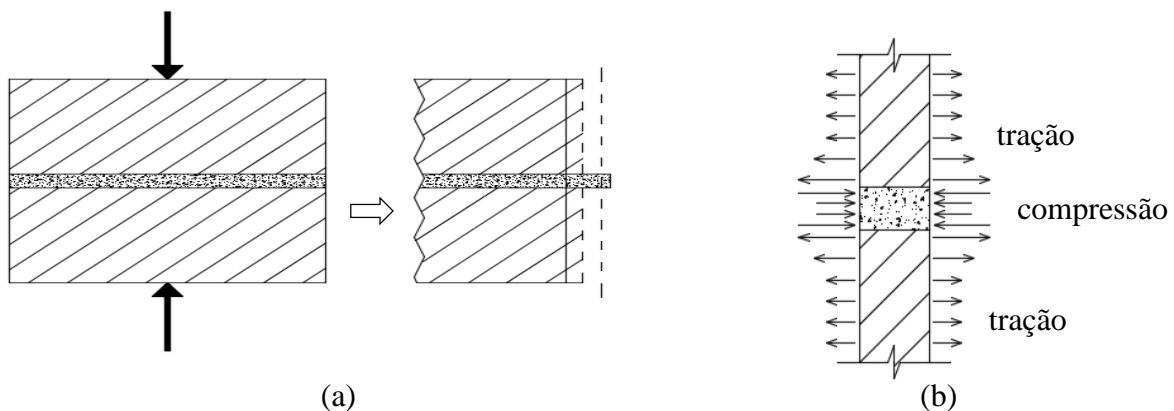
2.3.2 Influência da junta de argamassa de assentamento no modo de ruptura

Esta seção descreve detalhadamente os dois principais fenômenos que ocorrem com a junta de assentamento, quando a alvenaria está submetida à compressão: confinamento e esmagamento. Também serão abordados os principais estudos que priorizam a influência da junta de argamassa no modo de ruptura da alvenaria estrutural.

2.3.2.1 O fenômeno de confinamento da junta de argamassa

O confinamento da argamassa como junta assentamento é o resultado do carregamento vertical de uma parede de alvenaria. Isso ocorre devido a aderência entre os elementos e devido a argamassa ser mais deformável que o bloco. Sendo assim, acaba não havendo possibilidade de haver deformações laterais na junta, uma vez que o bloco impede esse movimento. Daí surge a tensão de confinamento que faz com que a capacidade resistente da argamassa aumente consideravelmente. Na Figura 13 ilustra-se de forma esquemática esse comportamento.

Figura 13 – Efeito da aderência na junta de argamassa (a) e tensões laterais que se desenvolvem em função da aderência argamassa-bloco (b).



Fonte: adaptado de Lübeck (2016); Afshari e Kaldjan (1989).

A discussão sobre o confinamento da argamassa começou em um estudo desenvolvido por Khoo (1972). Esse pesquisador foi o primeiro a verificar o comportamento triaxial de argamassas. Depois desse, o confinamento foi confirmado por outros autores como Atkinson *et al.* (1985), McNary e Abrams (1985), Afshari e Kaldjian (1989), Stöckl, Bierwirth e Kupfer (1994), Mohamad (1998), Hayen *et al.* (2001), Mohamad (2007) e Mohamad *et al.* (2015).

Esses autores que estudaram esse fenômeno descrevem que a resistência à compressão da argamassa ensaiada cresce em função do confinamento lateral. Dessa forma, desenvolve-se uma função linear entre a tensão de compressão da argamassa confinada e a resistência à compressão uniaxial da argamassa, conforme a Equação 2.4:

$$f_m^* = f_a + k\sigma_3 \quad (2.4)$$

onde: f_m^* – tensão de compressão da argamassa confinada.

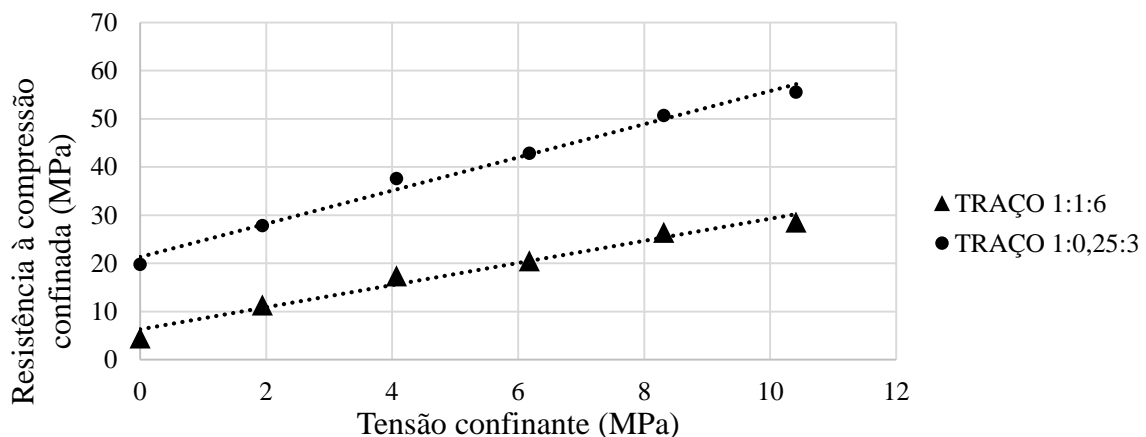
f_a – resistência à compressão uniaxial da argamassa.

k – coeficiente angular da reta.

σ_3 – tensão de confinamento lateral.

Khoo (1972) ensaiou corpos de prova cilíndricos de argamassa de diâmetro $\phi 3,8$ cm e altura de 10 cm. Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados dois diferentes traços de argamassa com as seguintes proporções em volume de cimento:cal:areia: 1:0,25:3 e 1:1:6. Os fatores a/c eram de 0,64 para o primeiro traço e 1,29 para o segundo. O pesquisador realizou ensaios de compressão triaxial das argamassas e verificou o aumento da tensão confinante com o aumento da resistência à compressão triaxial, conforme o gráfico da Figura 14.

Figura 14 – Envoltória de ruptura das argamassas confinadas ensaiadas por Khoo (1972).



Fonte: adaptado de Khoo (1972).

O coeficiente angular da reta (k) depende das propriedades da argamassa. Para o traço 1:0,25:3, o coeficiente angular da reta de envoltória (k) ficou estabelecido no valor de 3,30. Para o traço 1:1:6, o coeficiente assumiu o valor de 2,17.

Esse autor também avaliou o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson e verificou que ambas propriedades diminuem com o aumento da tensão confinante e, somente para o traço 1:0,25:3 o módulo de elasticidade não se altera com a presença do confinamento.

Na Tabela 6 mostra-se a equação que descreve a envoltória de ruptura dos traços de argamassa estudados por Khoo (1972).

Tabela 6 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Khoo (1972).

Traço 1:0,25:3	$f_{arg}^* = f_{arg} + 3,3f_{tm}$
Traço 1:1:6	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,17f_{tm}$

f_{arg}^* : resistência à compressão da argamassa confinada; f_{arg} : resistência à compressão uniaxial da argamassa; f_{tm} : tensões de confinamento transversal.

Fonte: adaptado de Khoo (1972).

Atkinson *et al.* (1985) foram os segundos a pesquisar sobre o fenômeno de confinamento, dessa vez com quatro traços diferentes de argamassa. As argamassas foram confinadas triaxialmente e também constatou-se uma relação linear entre a resistência da argamassa e as tensões de confinamento. Na Tabela 7 mostram-se as envoltórias de ruptura e os valores do coeficiente angular da reta de envoltória $|k|$, respectivamente, para cada traço.

Tabela 7 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Atkinson *et al.* (1985).

Traço 1:0,25:3	$f_{arg}^* = f_{arg} + 5,1f_{tm}$
Traço 1:0,5:4,5	$f_{arg}^* = f_{arg} + 3,3f_{tm}$
Traço 1:1:6	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,3f_{tm}$
Traço 1:2:9	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,2f_{tm}$

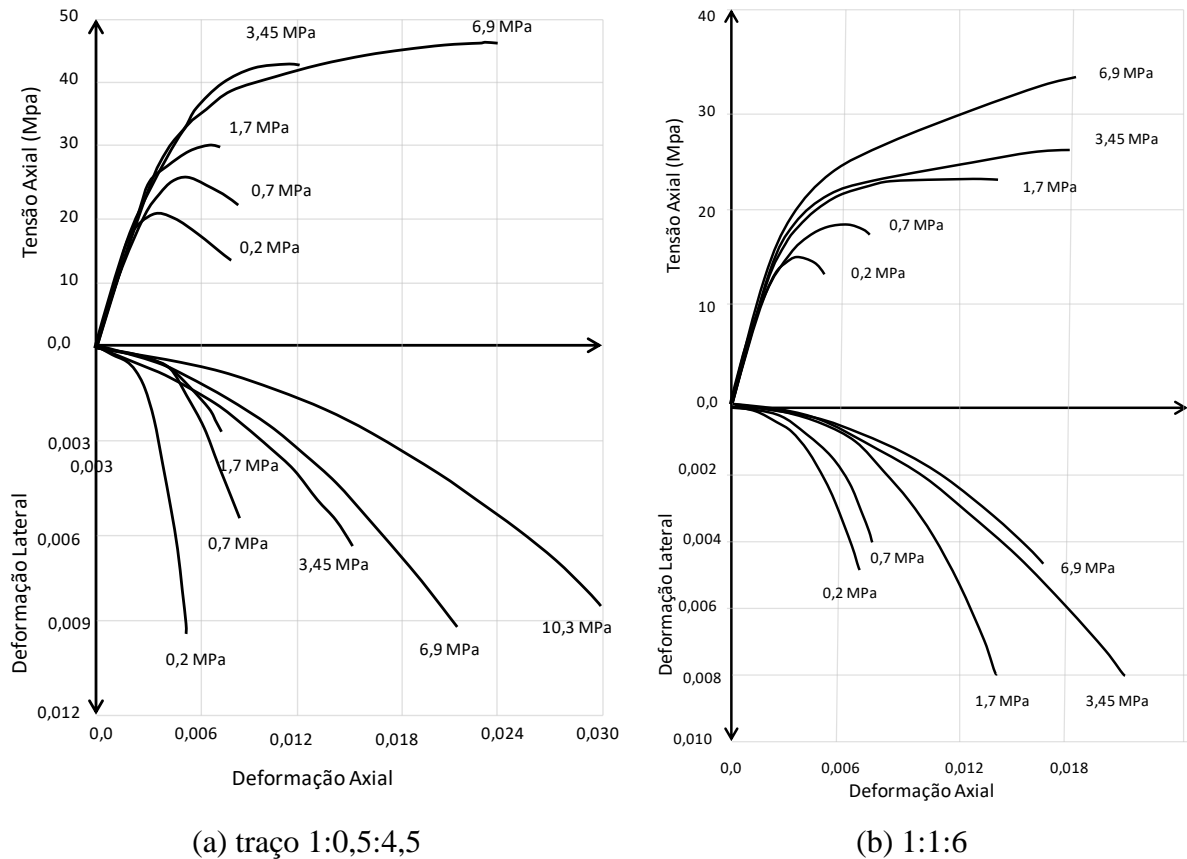
f_{arg}^* : resistência à compressão da argamassa confinada; f_{arg} : resistência à compressão uniaxial da argamassa; f_{tm} : tensões de confinamento transversal.

Fonte: adaptado de Atkinson *et al.* (1985).

Também foi analisada a curva tensão-deformação específica das argamassas confinadas. Nos gráficos da Figura 15 ilustra-se esse comportamento da curva tensão-deformação dos traços 1:0,5:4,5 e 1:1:6. Verificou-se que, para níveis de carregamento superiores a 50% da carga de ruptura, conferiram um comportamento não-linear. Somando-se

a isso, observou-se que com o aumento da pressão confinante, as argamassas apresentavam uma transição de comportamento frágil para dúctil.

Figura 15 – Diagramas tensão-deformação axial e lateral das argamassas confinadas de traço 1:0,5:4,5 (a) e 1:1:6 (b) encontrados por Atkinson *et al.* (1985).



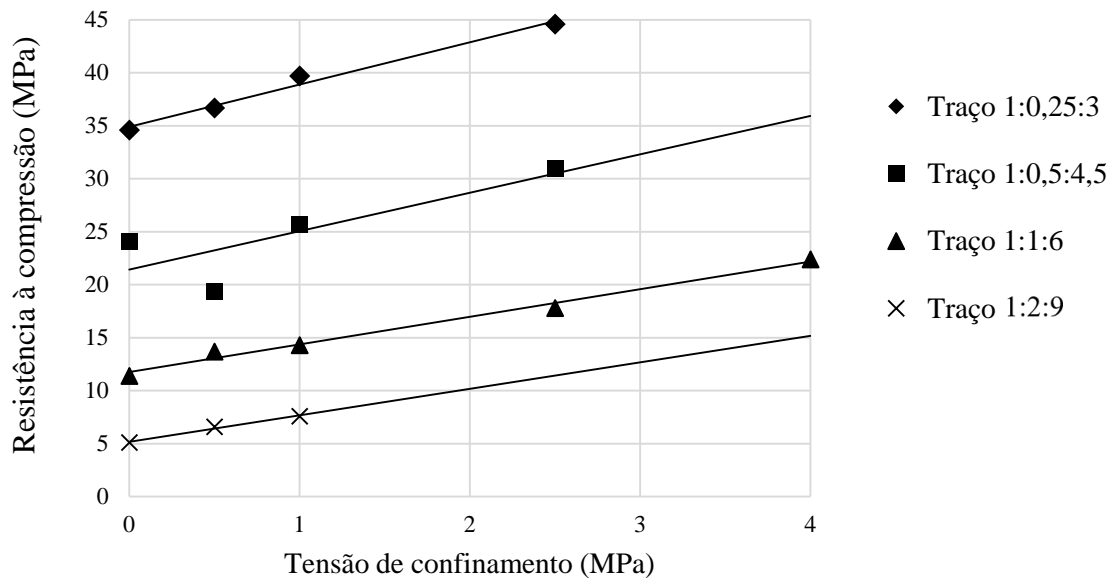
Fonte: Atkinson *et al.* (1985).

Os coeficientes de Poisson das argamassas ensaiadas decresceram com o acréscimo da pressão confinante. Já em relação ao módulo de elasticidade, ocorreram variações em relação aos traços estudados.

Os resultados revelaram que para os traços 1:0,25:3 e 1:0,5:4,5 houve um acréscimo do módulo de elasticidade com o aumento da tensão confinante. Para os traços de 1:1:6 houve um decréscimo do módulo de elasticidade.

Mohamad (1998) também ensaiou os mesmos traços de argamassa estudados por Atkinson *et al.* (1985). Para cada traço foram aplicadas diferentes tensões laterais constantes e determinou-se as envoltórias de ruptura da argamassa confinada triaxialmente, segundo o gráfico da Figura 16. Na Tabela 8 mostram-se os coeficientes angulares (k) da reta encontrados pelo autor.

Figura 16 – Envoltória de ruptura das argamassas ensaiadas à compressão triaxial por Mohamad (1998).



Fonte: Mohamad (1998).

Tabela 8 – Equações da envoltória de ruptura das argamassas confinadas encontradas por Mohamad (1998).

Traço 1:0,25:3	$f_{arg}^* = f_{arg} + 4,0f_{tm}$
Traço 1:0,5:4,5	$f_{arg}^* = f_{arg} + 3,6f_{tm}$
Traço 1:1:6	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,6f_{tm}$
Traço 1:2:9	$f_{arg}^* = f_{arg} + 2,5f_{tm}$

f_{arg}^* : resistência à compressão da argamassa confinada; f_{arg} : resistência à compressão uniaxial da argamassa; f_{tm} : tensões de confinamento transversal.

Fonte: Mohamad (1998).

Esse autor também realizou testes para determinar o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson das argamassas para diferentes níveis de tensões laterais. Com esses ensaios foi possível concluir que a medida que se aumentou as tensões de confinamento, houve uma diminuição significativa do coeficiente de Poisson e foi menos linear a curva tensão-deformação das argamassas.

Os traços mais fortes de argamassa ensaiados (1:0,25:3 e 1:0,5:4,5) apresentaram aumento no módulo de elasticidade a medida que se aumentou as tensões de confinamento. Além disso, os traços mais fortes apresentaram um comportamento frágil na ruptura. Em contrapartida, verificou-se que para o traço mais fraco, houve uma diminuição no módulo de elasticidade com o aumento das tensões de confinamento e apresentou um comportamento

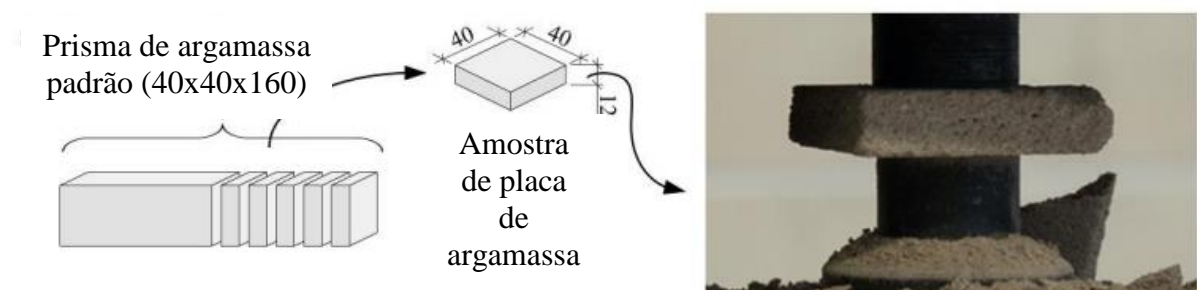
dúctil. Para esses traços, as curvas tensão-deformação específica apresentaram menor linearidade.

Lübeck (2016) realizou ensaios de compressão de prismas, variando o tipo de bloco com duas resistências de argamassa. Com o objetivo de estimar os valores de resistência das argamassas confinadas (f_a^*), o pesquisador utilizou a Equação 2.4. Os valores do coeficiente angular da reta (k) adotados foram 2,35 para o traço de argamassa fraca e 3,3 para o traço de argamassa forte, que corresponde à média dos valores encontrados por Khoo (1972), Atkinson *et al.* (1985) e Mohamad (1998). O autor concluiu que os valores encontrados da resistência da argamassa confinada foram subestimados para argamassa de traço fraco e superestimados para argamassa de traço forte.

Segundo Lübeck (2016), uma alternativa encontrada por pesquisadores para estudar os efeitos do confinamento da argamassa é de ensaiar à compressão corpos de prova de pequena altura. O que acaba permitindo o estado confinado no corpo de prova ensaiado é o atrito das prensas conforme aplicado a carga.

Com o objetivo de relacionar a resistência à compressão da argamassa encontrada em testes normalizados com a resistência à compressão da argamassa de assentamento real, Slivinskas *et al.* (2017) realizaram um teste experimental com uma argamassa de resistência nominal de 10 MPa. Para o procedimento, foram moldadas amostras padrão de prismas de argamassa de 40 mm x 40 mm x 160 mm. A partir dos corpos de prova, foram cortadas placas de 12mm de espessura, resultando em “bolachas” de 40 mm x 40mm x 12 mm. As bolachas foram ensaiadas à compressão com duas placas cilíndricas de diâmetro igual a uma polegada, uma inferior e outra superior, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Ensaio de compressão das placas de 40x40x12mm.



Fonte: adaptado de Slivinskas *et al.* (2017).

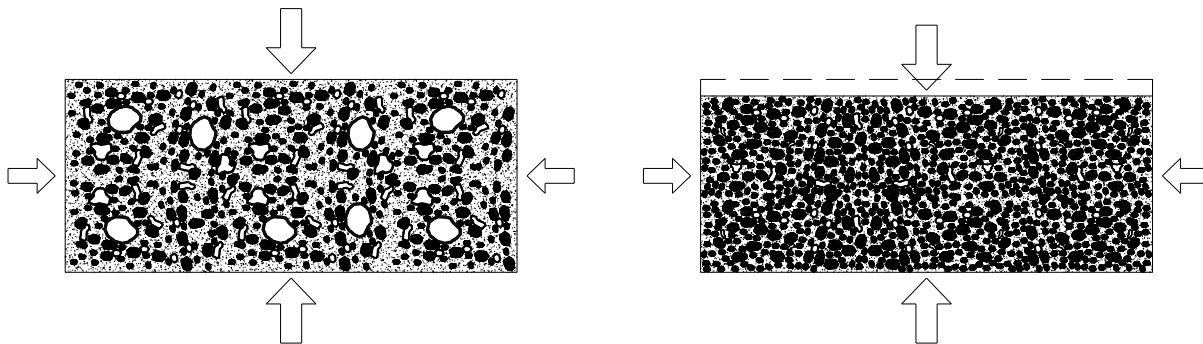
Para uma razão entre a resistência média de compressão da argamassa ensaiada de acordo com a norma (f_a) e a resistência média de compressão da placa de argamassa

40x40x15mm ($f_{a,placa}$), os autores encontraram um valor aproximado de 0,85. Dessa forma, esse coeficiente de redução estabeleceria essa relação entre a resistência de compressão da argamassa com a resistência da junta de assentamento, ou seja, a resistência da bolacha seria 1,17 vezes da resistência do corpo de prova padrão.

2.3.2.2 O fenômeno de esmagamento da junta de argamassa

O fenômeno de esmagamento da junta de argamassa se caracteriza quando a tensão de compressão atuante na junta de argamassa atinge o limite de resistência de compressão da argamassa confinada, conforme a representação da Figura 18. O esmagamento acontece devido ao fato da argamassa ser um material poroso. Quando comprimida, ocorre o fechamento dos macro poros do material. Isso faz com que haja o encolhimento da junta, destruição do esqueleto resistente da argamassa e a posterior quebra de aderência entre a argamassa e o bloco (LÜBECK, 2016).

Figura 18 – Idealização do fenômeno de esmagamento da junta de argamassa.



Fonte: Lübeck (2016).

Ensaando prismas e pequenas paredes de concreto à compressão com diferentes resistências de argamassa, Mohamad (2007) concluiu que a junta da argamassa comanda a forma de ruptura do conjunto, uma vez que induz no bloco tensões laterais.

O autor observou que em prismas constituídos de argamassas fracas a ruptura iniciou pelo esmagamento da junta, prosseguido pela propagação de fissuras nos blocos. Já nas paredes, observou que o esmagamento da junta produziu rotações em certos pontos.

A espessura da junta de argamassa de assentamento tem influência direta com o modo de ruptura por esmagamento e resistência à compressão da alvenaria. Diversos autores

procuraram correlacionar essas propriedades, como De Lima (2010), Mota *et al.* (2012) e Cavalcanti *et al.* (2018).

De Lima (2010) pesquisou, através de uma análise experimental em prismas de blocos cerâmicos de parede vazada, sobre a influência da resistência à compressão da argamassa juntamente com a espessura da junta. Nesse estudo foram adotados blocos de mesma resistência à compressão, sendo que as resistências da argamassa equivalessem a 50%, 100% e 150% da resistência do bloco na área bruta. As espessuras de juntas adotadas foram de 10 mm, 15 mm e 20 mm. No Quadro 3 apresenta-se essas variações adotadas.

Quadro 3 – Variáveis adotadas por De Lima (2010) para moldagem dos prismas.

Resistência média do bloco	Resistência da argamassa	Espessura da junta (mm)
10,2 MPa	$0,5 \times f_{bloco,bruta}$	10
	$1,0 \times f_{bloco,bruta}$	15
	$1,5 \times f_{bloco,bruta}$	20

Fonte: De Lima (2010).

Através dos ensaios realizados, o pesquisador observou que as argamassas de resistências mais baixas possuem a tendência de sofrer maior potencial de esmagamento. Além disso, o mesmo ocorre conforme se aumenta a espessura da junta de assentamento. Na Figura 19 ilustra-se um dos prismas ensaiados que apresenta esse comportamento.

Figura 19 – Ruptura por esmagamento da junta de um prisma ensaiado por De Lima (2010)



Fonte: De Lima (2010).

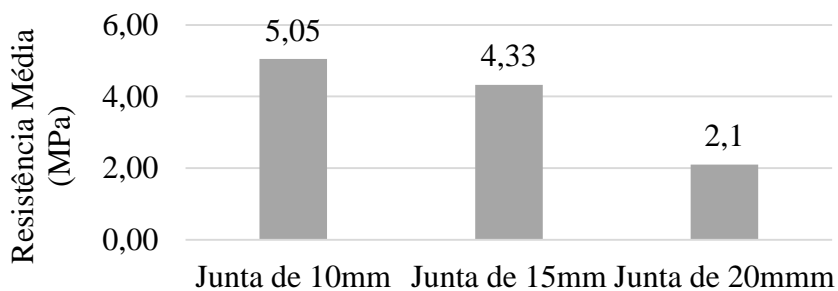
Resultados apontaram que para todas as combinações com a resistência de 50% e com juntas de 20mm o modo de ruptura foi por meio do esmagamento da argamassa. Além disso, nesse estudo identificou-se que conforme aumenta a resistência da argamassa de assentamento e diminui a espessura da junta, a resistência dos prismas aumenta.

Mota *et al.* (2012) também analisaram a influência da espessura da junta de argamassa de assentamento. Por meio de ensaios de compressão axial em prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas, os pesquisadores variaram a espessura da junta em 10mm, 15mm e 20mm. Os prismas eram compostos por dois blocos de altura.

Os resultados do experimento indicaram que, assim como o observado por De Lima (2010), o aumento da espessura das juntas horizontais de assentamento provoca uma diminuição significativa na resistência à compressão dos prismas. Além disso, ocorreu também a diminuição no fator de eficiência da alvenaria, conforme o aumento da junta.

Pelo gráfico da Figura 20 pode-se verificar que quando comparado a junta de 10 mm de espessura com as demais, verificou o decréscimo de resistência de 15% com a de 15 mm. Em comparação com a de 20 mm, ocorreu uma diminuição de 58% quando comparado com a junta de menor espessura.

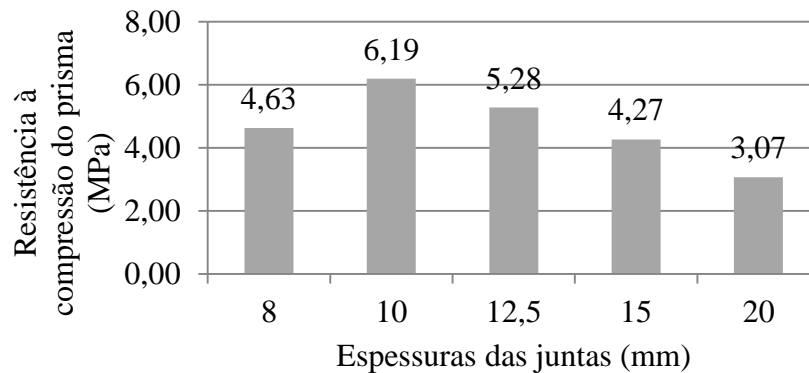
Figura 20 – Resistência média dos prismas em função da espessura da argamassa de assentamento.



Fonte: adaptado de Mota *et al.* (2012).

Cavalcanti *et al.* (2018), pretendendo também contribuir com esse enfoque de pesquisa em blocos de concreto, investigaram a influência da espessura da junta de argamassa de assentamento na resistência da alvenaria. Foram realizados ensaios de compressão axial em prismas de três blocos de altura, variando um total de cinco espessuras de juntas: 8 mm, 12,5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm. No gráfico da Figura 21 mostra-se as variações de resistências dos prismas de acordo com a espessura da junta, sendo que as resistências dos blocos na área líquida ($f_{bk,liq}$) eram igual 10,91 MPa e a resistência da argamassa ensaiada (f_a) igual 2,0 MPa.

Figura 21 – Gráfico comparativo do desempenho dos prismas associados à juntas com diferentes espessuras de Cavalcanti *et al.* (2018)



Fonte: adaptado de Cavalcanti *et al.* (2018).

Esses pesquisadores verificaram a mesma tendência que outras literaturas consultadas, onde se verifica que quanto maior a espessura, menor é a resistência alcançada pelo conjunto. A espessura de 10 mm foi a que apresentou o melhor comportamento mecânico, sendo a espessura mais vantajosa do ponto de vista estrutural, econômico e executivo.

Outro estudo que comprova a influência da argamassa diretamente no modo de ruptura da alvenaria foi o de Schankoski *et al.* (2015). Os pesquisadores realizaram o estudo do desempenho de argamassas de assentamento em alvenaria estrutural de blocos de concreto de elevada resistência à compressão.

Foram analisadas as propriedades de trabalhabilidade, teor de ar incorporado, retenção de água e resistência à compressão de argamassas industrializadas e dos traços de argamassas mistas (adição de retentor de água e desincorporador de ar) utilizadas no Brasil. No Quadro 4 identifica-se e descreve-se os tipos de argamassas utilizadas.

Quadro 4 – Identificação e descrição das argamassas empregadas.

Identificação	Descrição
I.AE 10	Industrializada: Argamassa Estrutural de 10 MPa
I.AE 5	Industrializada: Argamassa Estrutural de 5 MPa
I.M.U.	Industrializada: Argamassa Múltiplo Uso
I.AE10+20%AC	Industrializada: Mistura de 80% de AE10 com 20% de Argamassa Colante
M.T.P.	Mista com traço pobre (1:1:4)
M.T.R.	Mista com traço rico (1:1:3,3)
M.E.D.	Mista com traço rico (1:1:3,3) com 0,2% de éter de celulose e 0,08% de desincorporador de ar

Fonte: Shankoski *et al.* (2015).

Por meio da moldagem de prismas de três e quatro fiadas de blocos de concreto, foram verificadas as propriedades de resistência à compressão, aderência e mecanismos de ruptura e controle de deformação da alvenaria. Na Tabela 9 a seguir mostram-se as resistências das argamassas, a resistência dos prismas e o modo de ruptura dos prismas ensaiados.

Tabela 9 – Resistências e modo de ruptura dos prismas ensaiados por Schankoski, Prudêncio Jr e Pilar (2015).

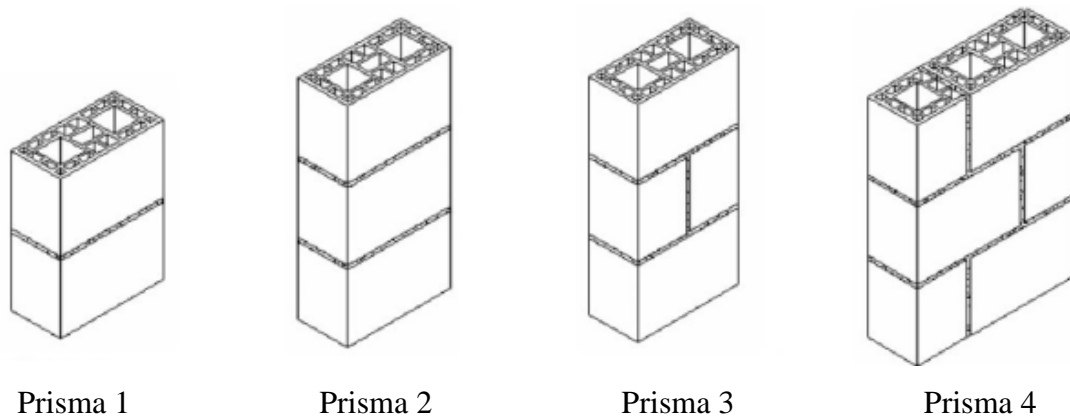
Argamassa	Resistência à compressão média das argamassas (MPa)	Resistência à compressão média dos prismas (MPa)	Modo de ruptura
I.AE 10	11,95	9,29	Esmagamento da junta
I.AE 5	6,07	7,77	Esmagamento da junta
I.M.U.	7,48	8,59	Esmagamento da junta
I.AE10+20%AC	10,19	11,83	Esmagamento da junta
M.T.P.	11,98	11,58	Ruptura do conjunto
M.T.R.	16,24	15,08	Tração no bloco
M.E.D.	16,42	13,60	Tração no bloco

Fonte: Shankoski *et al.* (2015).

Os autores concluíram que as argamassas industrializadas ensaiadas não conferiram resistência à compressão desejada e que todos os prismas moldados com essas argamassas romperam com esmagamento da junta. Enquanto isso, os prismas moldados com argamassas mistas de traços mais ricos apresentaram resultados de resistências à compressão superiores ao restante.

De Marco (2016) observou que, ao analisar diferentes configurações de prismas de blocos cerâmicos comprimidos, os processos de ruptura dos mesmos foram dependentes do tipo de prisma e do tipo de bloco utilizado. O pesquisador ensaiou à compressão quatro geometrias de prismas, conforme a Figura 22, variando cinco tipos de blocos cerâmicos, com dois tipos de resistências de argamassas. As argamassas tinham resistência nominal de 4 e 12 MPa, sendo denominadas argamassa fraca e forte, respectivamente.

Figura 22 - Geometria dos prismas ensaiados por De Marco (2016).



Fonte: De Marco (2016).

A metodologia aplicada para verificar a forma de ruptura dos prismas foi a filmagem dos ensaios de compressão, transformadas em imagens quadro-a-quadro, podendo-se analisar o desencadeamento e o avanço do processo de fissuração do bloco ou esmagamento da junta.

Pelo procedimento experimental do ensaio de compressão axial dos prismas realizado por De Marco (2016), foi possível analisar que houve o esmagamento da junta de argamassa nos prismas de blocos cerâmicos de parede vazada combinados com argamassa fraca. Em prismas de blocos de paredes maciças com a argamassa forte apresentaram fissuras verticais nos blocos, ou seja, o modo de ruptura deu-se pela tração no bloco.

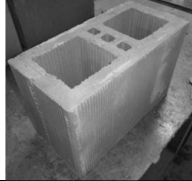


Além disso, foi possível verificar que o modo de ruptura também foi influenciado pela geometria dos prismas. Os prismas de configurações 3 e 4 ensaiados, que apresentam a junta vertical de argamassa de assentamento, mostram que essa foi uma indutora de falha, onde no encontro entre a junta horizontal e vertical houve uma concentração de tensões, acarretando o esmagamento da junta nos prismas de argamassa fraca.

O pesquisador realizou ensaios somente com as combinações de prismas de bloco cerâmico de parede vazada com argamassa fraca e prismas de bloco cerâmico de parede maciça com argamassa forte. Sendo assim, não foi possível determinar se a influência da argamassa e da área de contato na junta oferecida pela geometria das paredes do bloco interfere no modo de ruptura dos prismas ou não.

Dessa forma, Lübeck (2016) complementou a fase desenvolvida por De Marco (2016). Foi realizada uma análise visual, utilizando-se o mesmo procedimento de filmagens dos ensaios de compressão, em prismas constituídos por dois blocos, variando-se a resistência da argamassa e a tipologia do bloco.

Foram utilizadas três diferentes unidades, sendo duas cerâmicas (uma de paredes maciças e outra de paredes vazadas) e uma de concreto. No Quadro 5 detalha-se os materiais utilizados:

Quadro 5 – Materiais utilizados na composição dos prismas moldados por Lübeck (2016).

Blocos estruturais	Bloco cerâmico de parede maciça	
	Bloco cerâmico de parede vazada	
	Bloco de concreto	
Argamassa	Argamassa “fraca”	$f_{ck} = 4 \text{ MPa}$
	Argamassa “forte”	$f_{ck} = 15 \text{ MPa}$

Fonte: Lübeck (2016).

Foram determinadas as resistências à compressão dos prismas (f_p) e as tensões do início de ruptura do prisma na área líquida ($\sigma_{pi,liq}$), que é a tensão na qual começa a aparecer fissuras pelo esmagamento da junta ou pela tração no bloco. Como medida de ductilidade, foi adotada a relação entre a tensão do início da ruptura e a resistência à compressão do prisma (σ_{pi}/f_p). Quanto menor essa relação, mais dúctil é a ruptura.

Com o intuito de relacionar matematicamente as situações em que o esmagamento da junta seria a causa de ruptura do prisma, o autor estabeleceu que se a relação entre a tensão de início de ruptura e a resistência da argamassa confinada (σ_{pi}/f_a^*) fosse igual a 1, o esmagamento da junta de assentamento seria a causa da ruptura. Quando a relação assumisse valores menores que 1, a ruptura seria por tração no bloco.

Entretanto, ao determinar as relações em prismas de blocos cerâmicos com argamassa fraca, a razão σ_{pi}/f_a^* foi maior que 1, valores que seriam impossíveis teoricamente. Dessa forma, a resistência da argamassa confinada foi subestimada.

Para o pesquisador, a resistência das juntas de argamassa foi influenciada significativamente pela perda de água para os blocos, aumentando sua resistência à compressão.

Segundo Barbosa e Hanai (2009), a forma de ruína dos prismas depende diretamente da capacidade de retenção de água da argamassa e o nível de confinamento na qual estará sujeita.

Para os prismas de blocos de concreto e argamassa fraca, a razão σ_{pi}/f_a^* foi bem abaixo de 1, inclusive quando houve ruptura por esmagamento. Nesse caso, a resistência da argamassa foi superestimada.

A análise dos dados, evidencia-se que a argamassa teve grande influência sobre o modo de ruptura dos prismas. A argamassa fraca tendeu ao esmagamento, induzindo a ruptura prematura dos prismas. Além disso, o fator de eficiência foi visivelmente menor nos prismas onde acontecia o esmagamento da junta de argamassa.

Lübeck (2016) também observou que os prismas assentados em blocos de concreto apresentaram um comportamento distinto. Os ensaios revelaram que, aparentemente, a argamassa menos resistente não influenciou na resistência do prisma, quando comparado com os prismas de argamassa mais resistente.

Todavia, em relação ao modo de ruptura dos prismas de bloco de concreto, o comportamento dos prismas de argamassa fraca foi o esmagamento da junta, seguido da quebra de aderência argamassa-bloco, passando a ser dois blocos sobrepostos. Os prismas com argamassa forte apresentaram um panorama de fissuração aproximado ao tronco-cônico.

Outro fato observado pelo pesquisador foi a relação do modo de ruptura dos prismas com a influência da razão área líquida/área bruta dos blocos. Os prismas com blocos cerâmicos de paredes maciças, quando comparados com os de paredes vazadas, apresentaram um comportamento de maior ductilidade, com formação de fissuras antes da ruptura dos prismas. Já os prismas com paredes vazadas apresentaram rupturas explosivas, sem aviso prévio.

Somando-se a isso, pelas análises visuais dos prismas ensaiados, o autor concluiu que há um limite de proporção entre as resistências da argamassa e resistência do bloco. Isso afeta na mudança do modo de ruptura da alvenaria comprimida. Esse limite de proporção depende da área de contato entre a parede do bloco e a junta, implicando o confinamento.

Dessa forma, para resistências de argamassas inferiores a esse limite, a ruptura ocorre por esmagamento da junta. Já para resistências superiores a tal limite, a ruptura ocorre por tração no bloco.

Na Tabela 10 mostram-se os valores de resistência dos blocos na área líquida, bem como o modo de ruptura dos espécimes executados com argamassa forte e fraca.

Tabela 10 - Resultados dos prismas comprimidos por Lübeck (2016).

Propriedades		Bloco Cerâmico Parede Maciça	Bloco Cerâmico Parede Vazada	Bloco de Concreto
Resistência do bloco na área líquida ($f_{b,líq}$)		33,45 MPa	21,95 MPa	21,00 MPa
Argamassa Forte	Resistencia da Argamassa (f_a)	20,63 MPa	20,63 MPa	20,63 MPa
	Razão f_a/f_b	0,62	0,94	0,98
	Resistência do Prisma (f_p)	24,70 MPa	21,69 MPa	15,19 MPa
	Fator de Eficiência (f_p/f_b)	0,74	0,73	0,72
	Modo de Ruptura	Tração no bloco (rupturas explosivas)	Tração no bloco (rupturas explosivas)	Tração no bloco (rupturas explosivas e panorama tronco-cônico)
Argamassa Fraca	Resistencia da Argamassa (f_a)	2,94 e 2,70 MPa	2,94 e 2,70 MPa	2,94 e 2,70 MPa
	Razão f_a/f_b	0,09 e 0,08	0,13 e 0,12	0,14
	Resistência do Prisma (f_p)	9,15 MPa	10,5 MPa	14,08 MPa
	Fator de Eficiência (f_p/f_b)	0,27	0,35	0,67
	Modo de Ruptura	Esmagamento da junta (rupturas dúcteis)	Esmagamento da junta (rupturas frágeis e dúcteis)*	Formação de fissuras verticais nos blocos e rotação
* Rupturas frágeis com juntas de espessura de 10mm e dúcteis em juntas de espessura 15mm.				

Fonte: Lübeck (2016).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A influência das propriedades da argamassa e do bloco estrutural no modo de ruptura da alvenaria foi investigada por meio de um extenso programa experimental detalhado neste capítulo. Os materiais utilizados consistiam em três tipos de blocos estruturais e cinco argamassas industrializadas do mesmo fabricante, mas de resistência à compressão diferente.

A escolha das resistências das argamassas teve relação direta com a resistência à compressão dos blocos medida na área líquida. Sendo assim, primeiramente foi realizado o ensaio de caracterização da resistência à compressão dos blocos estruturais estudados.

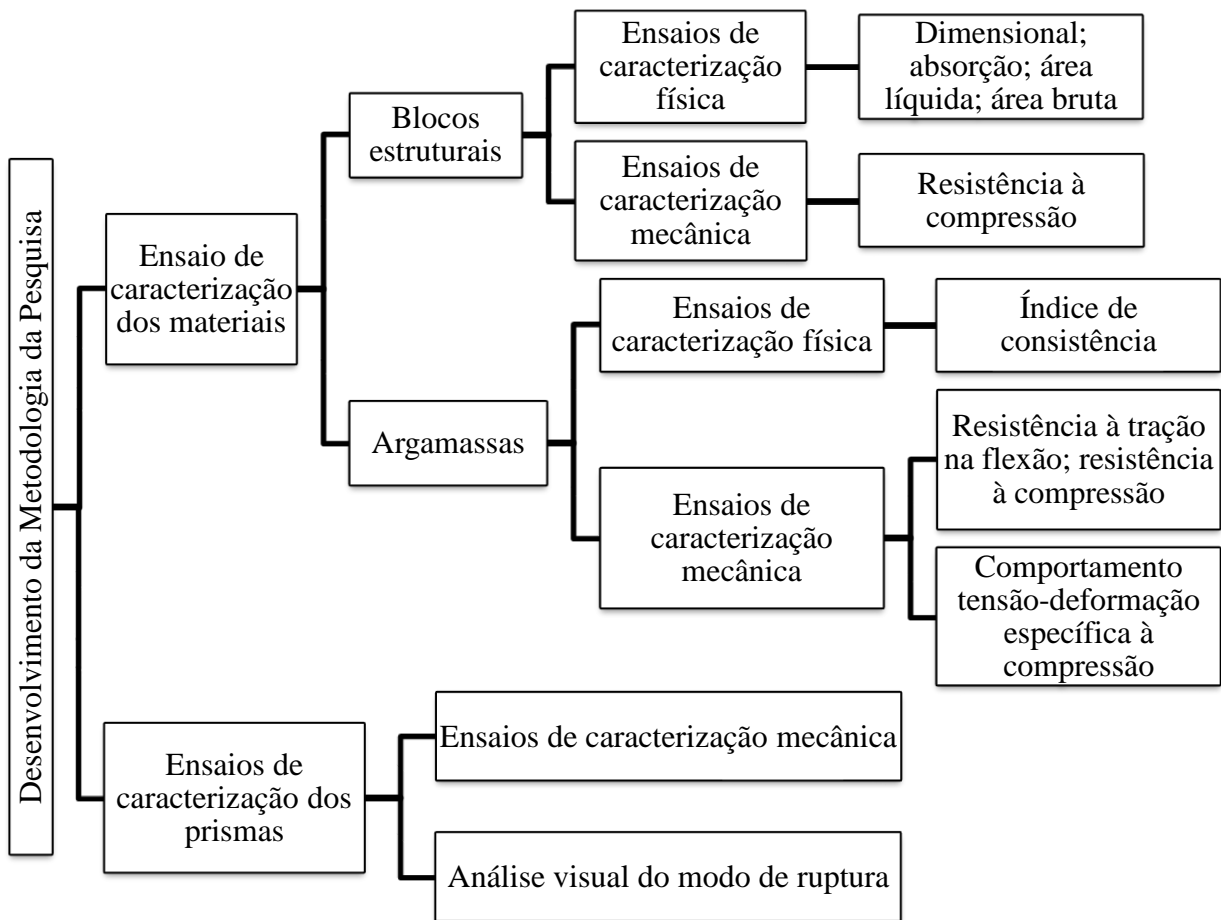
Os materiais foram todos caracterizados, conforme ensaios padronizados descritos na sequência, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Todos os corpos de prova de argamassa e prismas foram moldados no mesmo laboratório. Os ensaios de compressão dos prismas de alvenaria e dos corpos de prova de argamassa, com dimensões de 4cm x 4cm x 16 cm foram realizados no LMCC (UFSM) e, simultaneamente, o ensaio de compressão instrumentada dos corpos de prova cilíndricos de argamassa foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), em Alegrete/RS.

Além dos procedimentos padrões de caracterização dos materiais (blocos estruturais e argamassas), foram realizados dois outros procedimentos experimentais considerados essenciais à pesquisa: (i) filmagem e ensaio dos prismas submetidos à compressão uniaxial; (ii) ensaio de compressão de corpos de prova de argamassa cilíndricos de Ø5 cm x 10 cm, instrumentados, para definir a curva tensão-deformação específica das argamassas utilizadas e verificar o início do comportamento não linear.

Cabe ressaltar aqui que todos os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade, tanto para argamassas quanto para os prismas.

No organograma da Figura 23 tem-se, de forma esquemática, a divisão dos procedimentos do desenvolvimento experimental.

Figura 23 – Organograma dos procedimentos do desenvolvimento da metodologia da pesquisa.



3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS


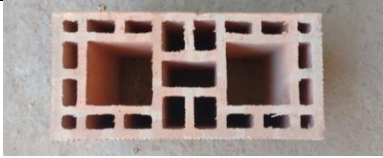

3.2.1 Bloco estrutural

Foram selecionadas três tipologias de bloco estrutural, variando o material e a geometria, com as seguintes características: bloco cerâmico de parede maciça, bloco cerâmico de parede vazada e bloco de concreto, de resistências nominais iguais a 10,0 MPa, 7,0 MPa e 4,0 MPa, respectivamente.

Neste estudo, foram adotadas siglas relacionadas aos blocos para facilitar o entendimento das combinações. Aderiu-se “M” para blocos cerâmicos de parede maciça, “V” para blocos cerâmicos de paredes vazadas e “C” para blocos de concreto.

No Quadro 6 relaciona-se cada de tipo bloco com suas dimensões nominais e vista superior.

Quadro 6 – Tipologia e dimensões nominais dos blocos ensaiados.

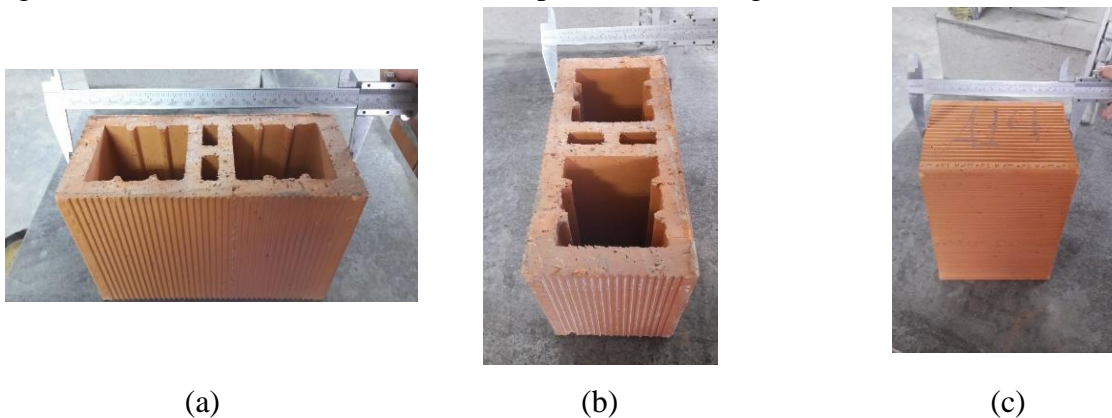
Tipologia	Dimensões nominais base x largura x altura	Geometria do bloco
Bloco cerâmico parede maciça (M)	29 cm x 14 cm x 19 cm	
Bloco cerâmico parede vazada (V)	29 cm x 14 cm x 19 cm	
Bloco de concreto (C)	39 cm x 14 cm x 19 cm	

Para a determinação das características dimensionais dos blocos cerâmicos, seguiram-se as recomendações da NBR 15270 (2017). Para os blocos de concreto a norma utilizada foi a NBR 12118 (2013). A seguir serão apresentados todos os métodos de ensaios utilizados para caracterização dos blocos.

3.2.1.1 Determinação das características dimensionais

Os ensaios dimensionais dos blocos cerâmicos (M e V) foram realizados conforme o Anexo A da NBR 15270-2 (2017). As inspeções visuais e os ensaios quanto às dimensões efetivas, espessuras mínimas de paredes e septos e desvios máximos são apresentados na Tabela A-1 do Apêndice A para os blocos de paredes maciças e para os blocos de paredes vazadas, respectivamente. Foram utilizados paquímetro e esquadro para realizar os procedimentos (Figura 24).

Figura 24 – Ensaio dimensionais. (a) comprimento; (b) largura; (c) altura.



A análise dimensional dos blocos de concreto seguiu as recomendações da NBR 12118 (2013), que recomenda pelo menos três determinações de largura, comprimento e altura em pontos distintos na face de maior espessura das paredes do bloco. Em relação às espessuras mínimas das paredes e dimensões dos furos, devem ser realizadas duas determinações. Os valores medidos das amostras encontram-se na Tabela A-2 do Apêndice A.

A seguir, na Tabela 11 apresentam-se os valores médios das dimensões encontrados para os três tipos de blocos utilizados no procedimento experimental.

Tabela 11 – Dimensões médias dos blocos estruturais utilizados.

Dimensões médias	BM	BV	BC
Largura média (L)	137,4 mm	137,2 mm	141,1 mm
Altura média (H)	189,5 mm	190,8 mm	192,43 mm
Comprimento médio (C)	289,6 mm	287,3 mm	395,2 mm
Desvios máximos - esquadro	1,2 mm	1,0 mm	0,0 mm
Desvios máximos – flecha	0,7 mm	0,6 mm	0,0 mm

3.2.1.2 Determinação da absorção de água inicial e área líquida

Para determinar a absorção de água dos blocos, seguiram-se as recomendações das normas NBR 15270 (ABNT, 2017) e NBR 12118 (ABNT, 2013). Para a determinação do índice de absorção, em porcentagem, utilizou-se a Equação 3.1:

$$AA = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.1)$$

onde: AA – índice de absorção de água, em %;

m_u – massa do bloco úmido, em gramas;

m_s – massa do bloco seco, em gramas.

Para determinar a área líquida dos blocos, foi utilizada a Equação 3.2. Na Tabela 12 mostram-se os valores de área líquida e área bruta dos blocos estudados.

$$A_{líq} = \frac{m_u - m_a}{H \times \gamma} \quad (3.2)$$

onde: $A_{líq}$ – Área líquida do bloco estrutural, em cm^2 ;

m_u – Massa do bloco úmido, em gramas;

m_a – Massa do bloco imerso, em gramas;

H – Altura média do bloco, em cm;

γ – Massa específica da água, tomada como sendo igual a 1,0.

Tabela 12 – Área líquida média e área bruta média dos blocos ensaiados.

Tipo de Bloco	Área Líquida (cm^2)	Área Bruta (cm^2)	$\frac{A_{líq}}{A_{bru}}$
M	199,09	398,06	0,50
V	164,16	403,80	0,41
C	319,00	559,06	0,57

3.2.1.3 Determinação das resistências à compressão na área bruta

Para determinar a resistência à compressão dos blocos, as unidades foram capeadas com argamassa de cimento e areia, com resistência superior à do bloco, com espessura máxima de 3mm. Após o capeamento, os blocos foram submetidos à compressão em uma prensa hidráulica da marca WPM, com capacidade de 1500 kN e controle manual de velocidade de aplicação de carga, mantida constante em uma taxa de aproximadamente 4 kN/s, conforme especificações

das NBR 12118 (2013) e NBR 15270 (2017). Na Tabela 13 mostram-se os valores de resistência à compressão características na área bruta e na área líquida para os três tipos de bloco.

Tabela 13 – Resistências à compressão característica dos blocos na área bruta e na área líquida.

Tipo de Bloco	$f_{bk,bruta}$ (MPa)	$f_{bk,líquida}$ (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	$\frac{A_{líq}}{A_{bru}}$
M	10,90	21,79	0,8	6,4	0,50
V	9,20	22,63	1,2	10,6	0,41
C	6,80	11,93	0,8	9,6	0,57

3.2.2 Argamassa de assentamento industrializada

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas argamassas para assentamento industrializadas e a escolha das resistências das mesmas deu-se a partir da resistência dos blocos estruturais. As resistências nominais das argamassas à compressão adotadas equivalem a um valor aproximado de 30%, 50% e 70% da resistência à compressão dos blocos na área líquida.

Na Tabela 14 mostram-se os valores idealizados e adotados das argamassas industrializadas utilizadas no experimento, de acordo com o tipo de bloco.

Tabela 14 – Definição das resistências nominais das argamassas a partir das resistências dos blocos na área líquida.

Bloco Estrutural	30%		50%		70%	
	Resistência Idealizada (MPa)	Resistência Nominal Adotada (MPa)	Resistência Idealizada (MPa)	Resistência Nominal Adotada (MPa)	Resistência Idealizada (MPa)	Resistência Nominal Adotada (MPa)
M	6,54	6,0	10,90	10,0	15,26	15,0
V	6,79	6,0	11,32	10,0	15,84	15,0
C	3,58	4,0	5,96	6,0	8,35	8,0

Pode-se verificar na Tabela 14 que foram empregadas cinco resistências nominais de argamassa: 4 MPa, 6 MPa, 8 MPa, 10 MPa e 15 MPa. Além disso, ressalta-se que as resistências nominais adotadas são iguais para os dois tipos de blocos cerâmicos.

Para facilitar o entendimento das combinações, como foram utilizadas cinco resistências de argamassas, optou-se por adotar um padrão de numerologia. Dessa forma, as argamassas industrializadas de resistências nominais de acordo com o fabricante de 4, 6, 8, 10 e 15 MPa estão identificadas pelos números “1”, “2”, “3”, “4” e “5”, respectivamente.

Para a caracterização mecânica das argamassas, foram moldados corpos de prova prismático de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm. Seguiram-se as recomendações da NBR 13276 (2016), que rege o preparo da mistura e a determinação da consistência da argamassa, fixada em 230 ± 10 mm. A quantidade de água adicionada na mistura seguiu as recomendações do fabricante. Na Figura 25 exemplifica-se o procedimento de preparação dos corpos de prova de argamassa.

Figura 25 – Preparação da argamassa. (a) ensaio do índice de consistência na mesa de abatimento; (b) moldagem dos corpos de prova 4 cm x 4 cm x 16 cm.



(a)

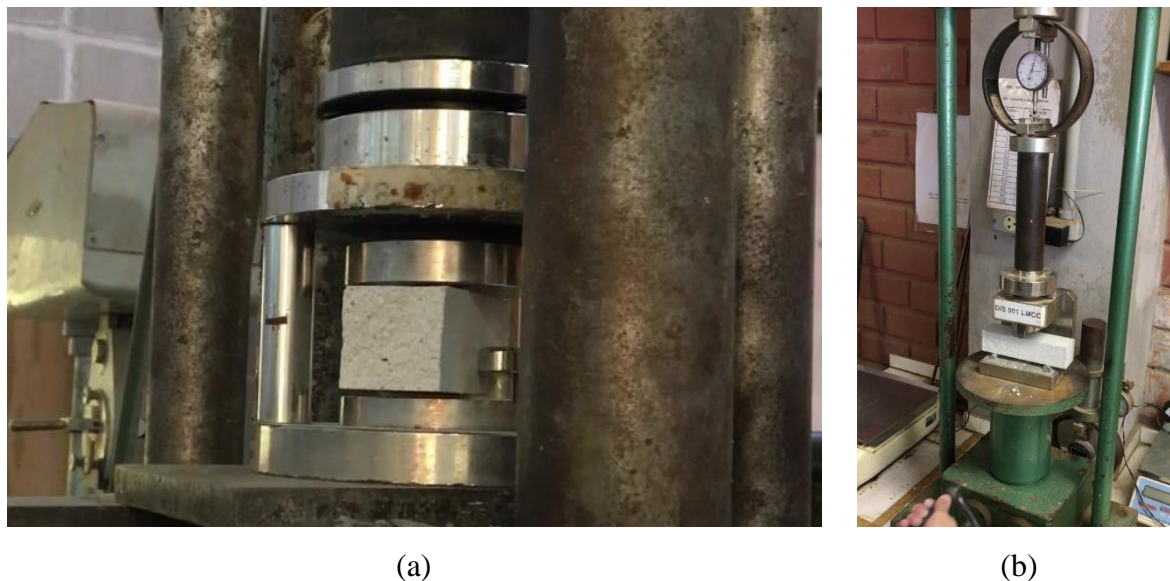


(b)

Salienta-se que as moldagens dos corpos de prova de argamassa foram realizadas simultaneamente à moldagem dos prismas, com o objetivo de manter as mesmas propriedades físicas e mecânicas do material nos corpos de prova de controle e nos prismas. Além da moldagem dos corpos de prova de argamassa padrão (4 cm x 4 cm x 16 cm), também foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura ($\varnothing 5$ cm x 10 cm), que foram utilizados para a realização do ensaio de determinação da curva tensão-deformação específica das argamassas comprimidas.

Para determinar as resistências à tração na flexão e à compressão das argamassas, seguiu-se o preconizado na NBR 13279 (2005). Na Figura 26 mostram-se os ensaios padrões de compressão e tração na flexão das argamassas.

Figura 26 – Ensaio de determinação de resistência da argamassa: (a) compressão e (b) tração na flexão.



Na Tabela 15 encontram-se os valores de resistência à compressão média, bem como a resistência à tração na flexão média dos corpos de prova de argamassa ensaiados aos 28 dias. Já na Tabela 16 encontram-se os valores idealizados e reais da razão da resistência à compressão média da argamassa (f_a) e a resistência à compressão característica do bloco na área líquida ($f_{bk,líq}$).

Tabela 15 – Resistências de tração na flexão e compressão das argamassas ensaiadas aos 28 dias.

Resistência de acordo com o fabricante (MPa)	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
Identificação da argamassa	1	2	3	4	5
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,5	2,4	2,7	3,6	3,3
Resistência à compressão (MPa)	4,0	5,8	10,0	10,7	13,3

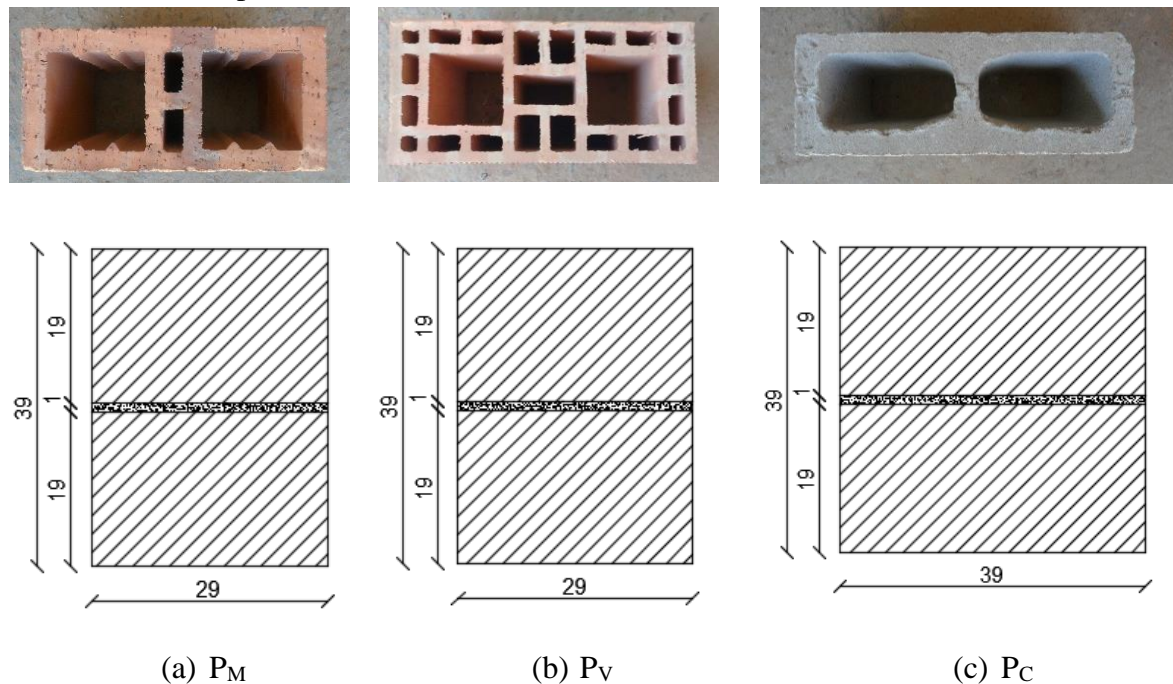
Tabela 16 – Valores reais da razão entre as resistências à compressão das argamassas e dos blocos na área líquida.

Tipo de bloco	$\frac{f_a}{f_{bk,líq}} = 0,30$	$\frac{f_a}{f_{bk,líq}} = 0,50$	$\frac{f_a}{f_{bk,líq}} = 0,70$
M	0,27	0,49	0,61
V	0,26	0,47	0,59
C	0,34	0,49	0,84

3.2.3 Prismas

Nesta pesquisa, os prismas eram constituídos por dois blocos de altura e uma espessura da junta de argamassa de, aproximadamente, 10 mm. O assentamento das unidades foi realizado por um profissional experiente, com o objetivo de uniformizar as propriedades dos materiais. As extremidades dos prismas foram capeadas com argamassa, com o objetivo de manter os componentes nivelados para o ensaio de compressão na prensa. Na Figura 27 mostram-se as geometrias dos prismas de dois blocos de altura moldados.

Figura 27 – Geometria dos prismas moldados. (a) bloco cerâmico de parede maciça – P_M ; (b) bloco cerâmico de parede vazada – P_V ; (c) bloco de concreto - P_C .

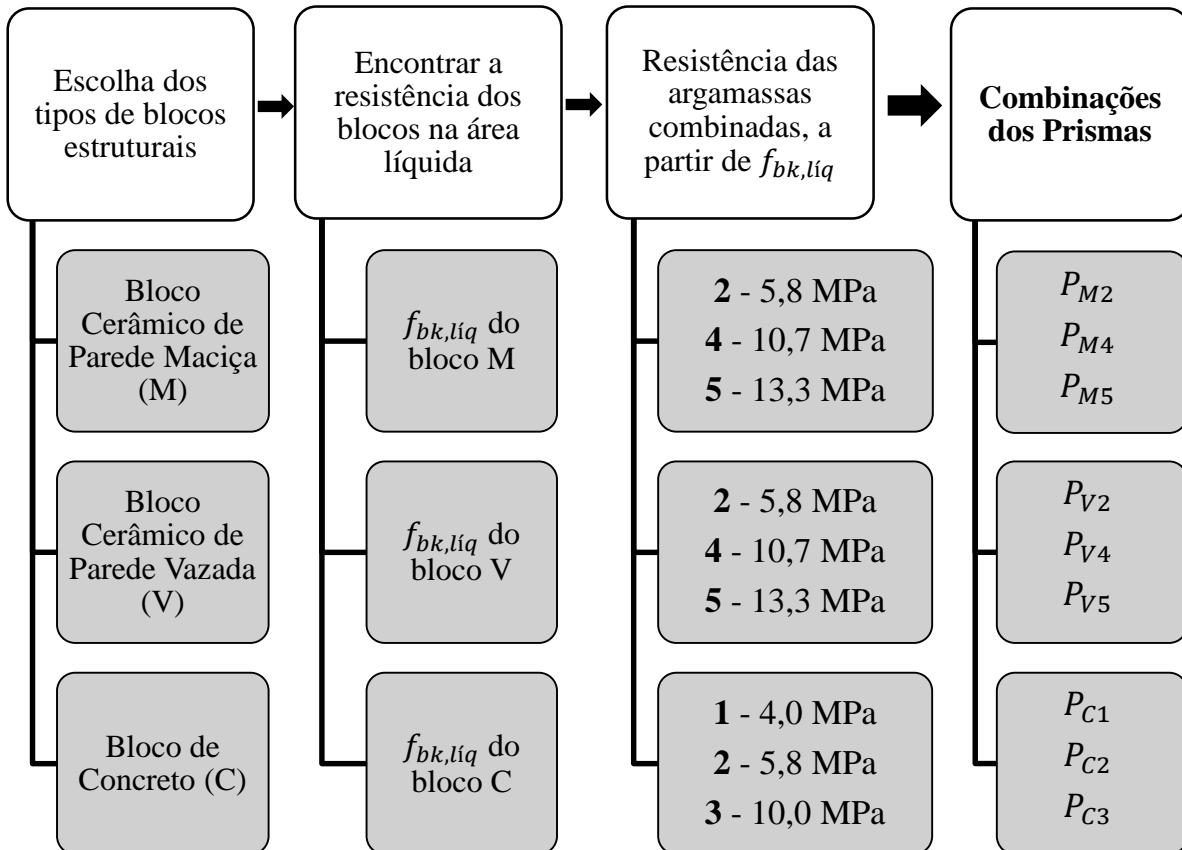


Foram confeccionados seis espécimes para cada combinação de bloco e argamassa. No fluxograma da Figura 28 apresenta-se, em um modelo esquemático, como foram feitas essas combinações. Para um melhor entendimento, utilizou-se uma nomenclatura P_{xy} para os prismas, onde “x” está relacionado com o tipo de bloco e “y” com a resistência da argamassa.

Foram adotadas as letras maiúsculas “M”, “V” e “C”, para representar o bloco cerâmico de parede maciça, bloco cerâmico de parede vazada e bloco de concreto, respectivamente. Os números de 1 a 5 correspondem às argamassas que foram combinadas com os blocos, conforme a identificação mostrada na Tabela 15.

Sendo assim, por exemplo, um prisma “P_{V4}” significa que o prisma é a combinação de um bloco “V” (bloco cerâmico de parede vazada) e uma argamassa de resistência correspondente argamassa “4” (10,7 MPa). Já um prisma “P_{C1}” significa que ele está combinando bloco “C” (bloco de concreto) com a argamassa “1” (4,0 MPa).

Figura 28 – Fluxograma das combinações dos prismas.



3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como mencionado no início deste capítulo, o procedimento experimental desta pesquisa está subdividido em duas principais partes. Da mesma forma que os ensaios de caracterização da argamassa, todos os ensaios foram realizados aos 28 dias a partir da moldagem dos corpos de prova de argamassa e dos prismas.

3.3.1 Caracterização mecânica e análise visual dos prismas comprimidos

Para realizar a caracterização visual do modo de ruptura, utilizou-se o mesmo procedimento adotado por Lübeck (2016). Os prismas foram ensaiados conforme a norma NBR 12118 (2013), submetidos à compressão axial em uma prensa hidráulica, marca WPM®, com controle manual de velocidade de aplicação de carga e com 1500 kN de capacidade. Na Figura 29 mostra-se o procedimento de ensaio dos prismas submetidos à compressão na prensa.

Figura 29 – Prismas submetido à compressão na prensa hidráulica: cerâmico (a) e de concreto (b).



(a)

(b)

Durante a execução do ensaio de compressão dos prismas, foram realizadas filmagens com equipamentos convencionais – câmera digital e celular – com o objetivo de verificar em qual intervalo de tensão começa e propaga-se o processo de ruptura dos prismas. Após, essas filmagens foram convertidas em imagens, quadro a quadro, utilizando o software Free Video to JPG Converter®, versão 5.0.72, desenvolvido e disponibilizado pela empresa Freestudio®.

Ressalta-se aqui que todos os prismas foram filmados dos dois lados, simultaneamente, com o objetivo de verificar o comportamento da ruptura de forma mais detalhada. Na Figura 30 ilustra-se o procedimento de filmagem dos ensaios, em ambas as faces dos prismas.

Figura 30 – Procedimento de filmagem dos ensaios, em ambas as faces dos prismas.



(a) Câmera 1

(b) Câmera 2

3.3.2 Ensaio de verificação do comportamento tensão-deformação específica de corpos de prova de argamassa comprimidos

Para verificar o início da ruptura e o comportamento não linear da junta de argamassa, foram realizados ensaios em corpos de prova de argamassa cilíndricos 5 cm x 10 cm, instrumentados. Foram moldados cinco cilindros para cada resistência de argamassa utilizada no experimento, totalizando em 25 corpos de prova.

Dois *strain gauges* foram colados em lados opostos dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 31. Os dispositivos foram colados com um componente a base de 90% de cianocrilato de etila, com no mínimo 24 horas de antecedência aos ensaios. Além da colagem dos *strain gauges*, também foi realizado o capeamento dos corpos de prova com enxofre, para nivelar as faces e uniformizar o carregamento.

Figura 31 – Ensaio de compressão de corpo de prova de argamassa cilíndrico de dimensões ϕ 5 cm x 10 cm, instrumentado.



A prensa utilizada para a realização desses ensaios foi hidráulica, marca EMIC[®], com aplicação de carregamento com uma velocidade de 0,5 MPa/s, realizando-se cinco ciclos de carga e descarga até 30% da tensão da ruptura, e após foi realizado o carregamento até a ruptura.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo está subdividido em três grandes partes. Na primeira, são analisados os resultados de resistência à compressão dos prismas de acordo com a tipologia do bloco. Para tal análise, também foram propostos modelos de previsão de resistência baseado na Equação 2.1, proposta na EN 1996-1-1 (2002).

Em um segundo momento, são abordados os modos de ruptura dos prismas. Nesta parte foram analisadas as filmagens dos ensaios de compressão a fim de verificar, visualmente, a partir de qual nível de tensão começa o esmagamento, caso aconteça, da junta de assentamento dos prismas.

Por fim, discutem-se os gráficos de comportamento tensão-deformação específica dos corpos de prova de argamassa instrumentados. A partir dos resultados, buscou-se encontrar o início da não linearidade das argamassas estudadas.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS

Conforme mencionado anteriormente, adotou-se uma nomenclatura para os prismas de acordo com a tipologia do bloco e a resistência da argamassa. As letras “M”, “V” e “C” designam o tipo do bloco que compõe o prisma. Os números 1, 2, 3, 4 e 5 se referem à resistência da argamassa combinada com o bloco. No Quadro 7 a seguir resume-se essa nomenclatura adotada, sabendo-se que cada tipo de bloco foi combinado com três diferentes resistências de argamassa.

Quadro 7 – Especificações da nomenclatura dos prismas.

Tipo do bloco	Argamassa de menor resistência		Argamassa de resistência intermediária		Argamassa de maior resistência	
	Prisma	Resistência média da argamassa (MPa)	Prisma	Resistência média da argamassa (MPa)	Prisma	Resistência média da argamassa (MPa)
M	PM2	5,8	PM4	10,7	PM5	13,3
V	PV2	5,8	PV4	10,7	PV5	13,3
C	PC1	4,0	PC2	5,8	PC3	10,0

4.1.1 Prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças – P_M

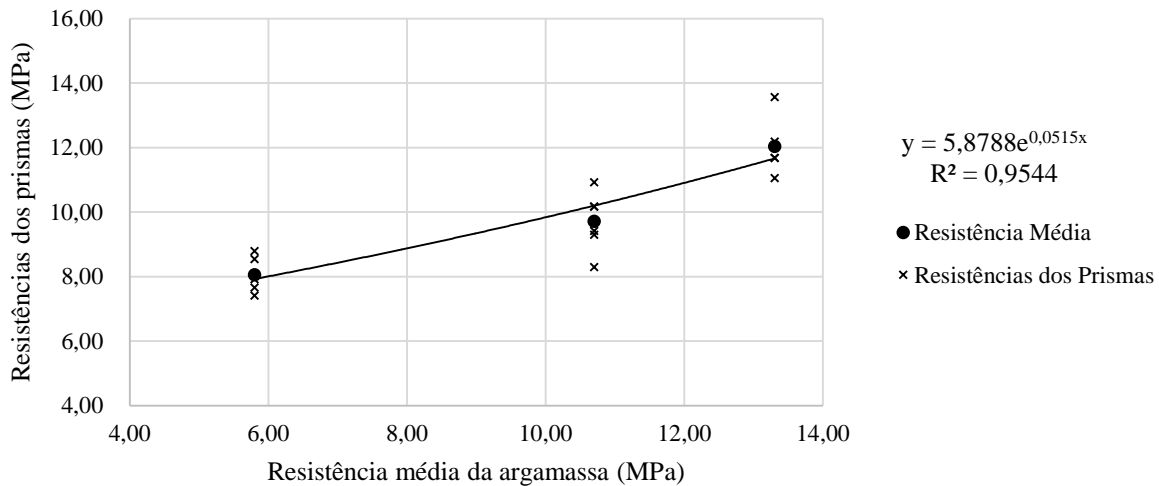
Na Tabela 17 apresenta os valores resistência à compressão na área bruta ($f_{pi,bru}$) de todos os prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças P_M ensaiados aos 28 dias, bem como as resistências à compressão na área bruta média ($f_{pm,bru}$) e característica ($f_{pk,bru}$) dos três conjuntos (P_{M2}, P_{M4} e P_{M5}). No gráfico da Figura 32 ilustra-se o acréscimo de resistência dos prismas com o acréscimo de resistência das argamassas.

Ressalta-se que para os blocos cerâmicos de paredes maciças, a área bruta (A_{bru}) equivale à 398,06 cm² e a resistência característica na área bruta ($f_{bk,bru}$) é de 10,90 MPa. Além disso, as resistências à compressão das argamassas utilizadas são: 5,8 MPa (argamassa 2), 10,7 MPa (argamassa 4) e 13,3 MPa (argamassa 5).

Tabela 17 – Resistência à compressão dos prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças |P_M|, na área bruta.

Tipo do Prisma	Prisma	Carga (kgf)	$f_{pi,bru}$ (MPa)	$f_{pm,bru}$ (MPa)	$f_{pk,bru}$ (MPa)	D.P. (MPa)	C.V (%)
P _{M2}	1	30500	7,66	8,06	7,16	0,52	6,49
	2	34000	8,54				
	3	29500	7,41				
	4	32000	8,04				
	5	31500	7,91				
	6	35000	8,79				
P _{M4}	1	37500	9,42	9,71	8,42	0,92	9,42
	2	33000	8,29				
	3	40500	10,17				
	4	37000	9,30				
	5	43500	10,93				
	6	40500	10,17				
P _{M5}	1	44000	11,05	12,04	11,05	0,85	7,03
	2	46500	11,68				
	3	54000	13,57				
	4	48500	12,18				
	5	46500	11,68				
	6	48000	12,06				

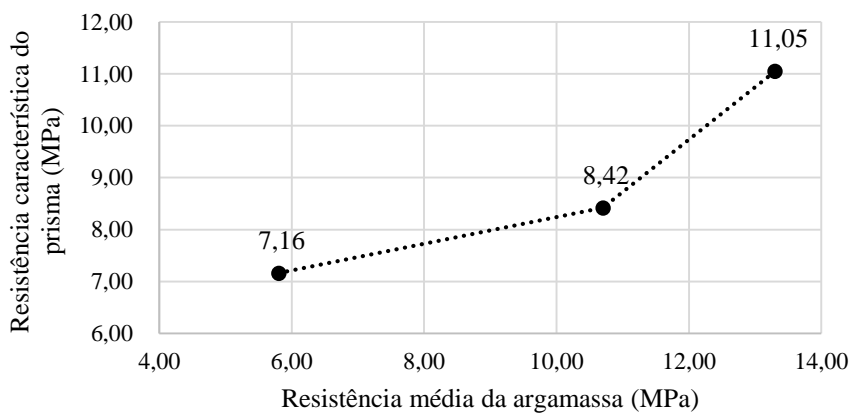
Figura 32 – Resistência à compressão dos prismas de bloco cerâmico de paredes maciças – PM.



De acordo com os resultados de resistência dos prismas P_M , observa-se que o acréscimo de resistência da argamassa provoca um incremento de resistência no prisma. Entretanto, também é possível verificar que a relação entre o aumento de resistência das argamassas e dos prismas não é linear. Enquanto houve um aumento de 2,3 vezes na resistência à compressão axial da argamassa, a resistência média do prisma aumentou cerca de 50%.

Outro fator observado foi em relação ao comportamento do aumento de resistência entre prismas P_{M4} e P_{M5} , comparado com P_{M2} e P_{M4} . No gráfico da Figura 33 ilustra-se o comportamento de resistência característica dos prismas, de acordo com a resistência da argamassa combinada.

Figura 33 – Resistências características dos prismas P_M .



Conforme os resultados, a diferença das resistências médias das argamassas dos prismas P_{M2} e P_{M4} é de 4,90 MPa e a diferença entre as resistências características destes prismas é de apenas 1,26 MPa. Entre os prismas P_{M4} e P_{M5} , houve um incremento de 2,63 MPa de resistência característica, com apenas 2,60 MPa de aumento de resistência média entre as argamassas. Sendo assim, percebe-se que existe uma faixa de resistência de argamassa, entre 10,7 MPa e 13,3 MPa, que, combinado com o bloco B_M (cerâmico de paredes maciças), acarreta em uma resistência de prisma otimizada.

4.1.1.1 Equação de previsão de resistência dos prismas P_M

Para todos os prismas foram determinadas equações de previsão de resistência à compressão. As equações relacionam as propriedades de resistência característica do bloco na área bruta ($f_{bk,bru}$) com a resistência média dos corpos de prova de argamassa (4,0 cm x 4,0 cm x 16 cm) ensaiadas à compressão aos 28 dias (f_a).

Para a determinação das potências, foram relacionados os fatores de eficiência dos prismas na área bruta ($f_{pk}/f_{bk,bru}$) com as resistências médias da argamassa/resistência do bloco ($f_a/f_{bk,bru}$). Sendo assim, o seguinte modelo de equação foi proposto (Equação 4.1), para os três tipos de bloco:

$$f_{pk} = k \times f_a^\alpha \times f_{bk,bru}^\beta \quad (4.1)$$

onde: f_{pk} – resistência característica do prisma à compressão axial, na área bruta;

k, α, β – constantes definidas em função dos resultados dos prismas para cada tipo de bloco;

$f_{bk,bru}$ – resistência à compressão característica do bloco na área bruta;

f_a – resistência à compressão média da argamassa, ensaiada aos 28 dias.

Na Figura 34 ilustra-se a envoltória de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede maciça P_M . Na Tabela 18 mostram-se os valores das constantes “ k ”, “ α ” e “ β ” da equação de previsão de resistência à compressão características dos prismas P_M , obtidas pela equação potencial da envoltória de ruptura.

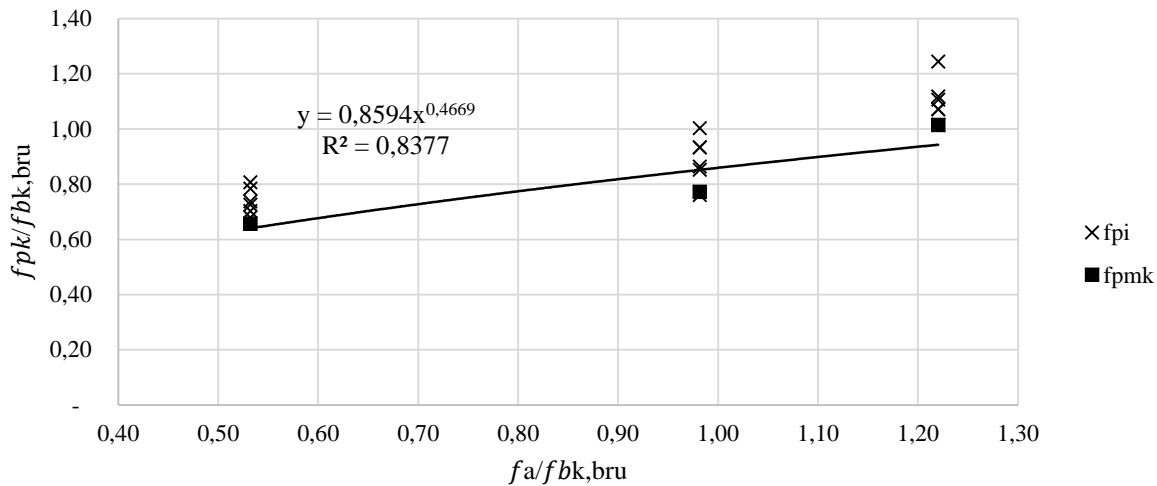
Figura 34 – Envoltória de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede maciça P_M.

Tabela 18 – Valores das constantes da equação de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede maciça.

k	α	β	Equação
0,86	0,47	0,53	$f_{pk} = 0,86 \times f_a^{0,47} \times f_{bk,bru}^{0,53}$

Por meio da equação de ruptura dos prismas P_M, verifica-se que os coeficientes “ α ” e “ β ” assumem valores muito próximos. Sendo assim, conclui-se que tanto a resistência média da argamassa quanto a resistência do bloco na área bruta influem praticamente da mesma forma na resistência à compressão do prisma.

4.1.2 Prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas – P_V

Na Tabela 19 apresentam-se os valores de resistência à compressão na área bruta de todos os prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas ensaiados aos 28 dias. No gráfico da Figura 35 ilustra-se o ganho de resistência dos prismas com o acréscimo de resistência das argamassas.

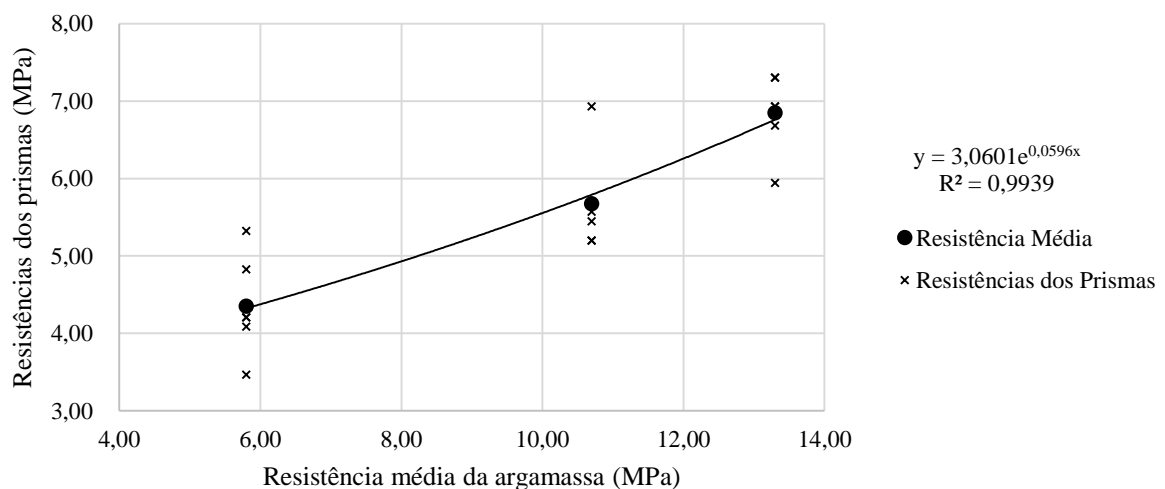
A área bruta (A_{bru}) dos blocos cerâmicos de paredes vazadas é de 403,80 cm². As resistências à compressão das argamassas utilizadas são as mesmas usadas para os prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças (argamassas 2, 4 e 5). Optou-se pela mesma combinação, uma vez que os blocos cerâmicos tinham praticamente a mesma resistência na área líquida,

onde o bloco de parede maciça (B_M) apresentou 10,90 MPa e o bloco de parede vazada (B_V) 9,20 MPa de resistência característica na área bruta.

Tabela 19 – Resistência à compressão dos prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas P_V , na área bruta.

Tipo do Prisma	Prisma	Carga (kgf)	$f_{pi,bru}$ (MPa)	$f_{pm,bru}$ (MPa)	$f_{pk,bru}$ (MPa)	D.P. (MPa)	C.V (%)
P_{V2}	1	21500	5,32	4,35	3,34	0,64	14,77
	2	17000	4,21				
	3	16500	4,09				
	4	14000	3,47				
	5	17000	4,21				
	6	19500	4,83				
P_{V4}	1	28000	6,93	5,68	4,95	0,65	11,41
	2	23000	5,70				
	3	22500	5,57				
	4	22000	5,45				
	5	21000	5,20				
	6	21000	5,20				
P_{V5}	1	29500	7,31	6,85	5,70	0,51	7,38
	2	29500	7,31				
	3	28000	6,93				
	4	27000	6,69				
	5	28000	6,93				
	6	24000	5,94				

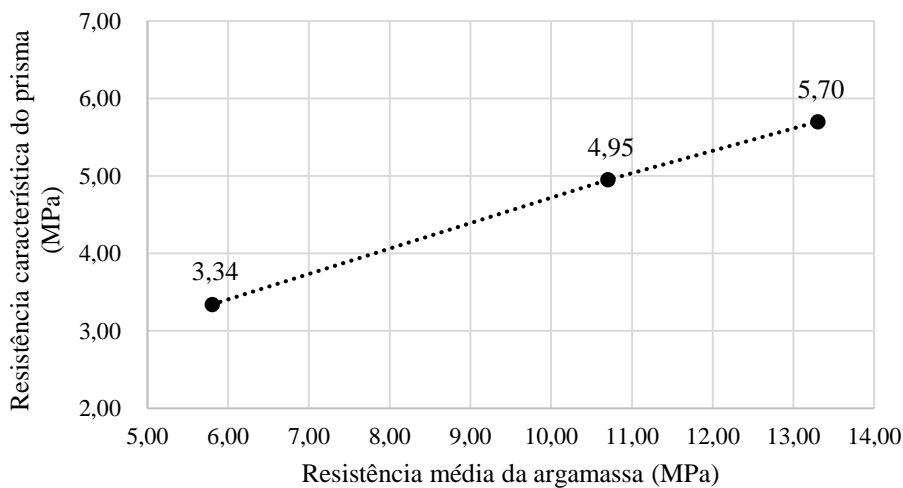
Figura 35 – Resistência à compressão dos prismas de bloco cerâmico de paredes vazadas – P_V .



Assim como o observado nos prismas com blocos cerâmicos de paredes maciças P_M , os prismas de paredes vazadas P_V , além de apresentarem um aumento de resistência com o incremento da resistência da argamassa, também apresentam uma relação não linear entre o aumento dessas resistências. Quando comparadas as resistências médias do conjunto dos prismas mais fracos (4,35 MPa) e o conjunto dos mais resistentes (6,85 MPa), verificou-se um aumento de 2,3 vezes na resistência da argamassa, enquanto a resistência média aumentou apenas 1,57 vezes (57%).

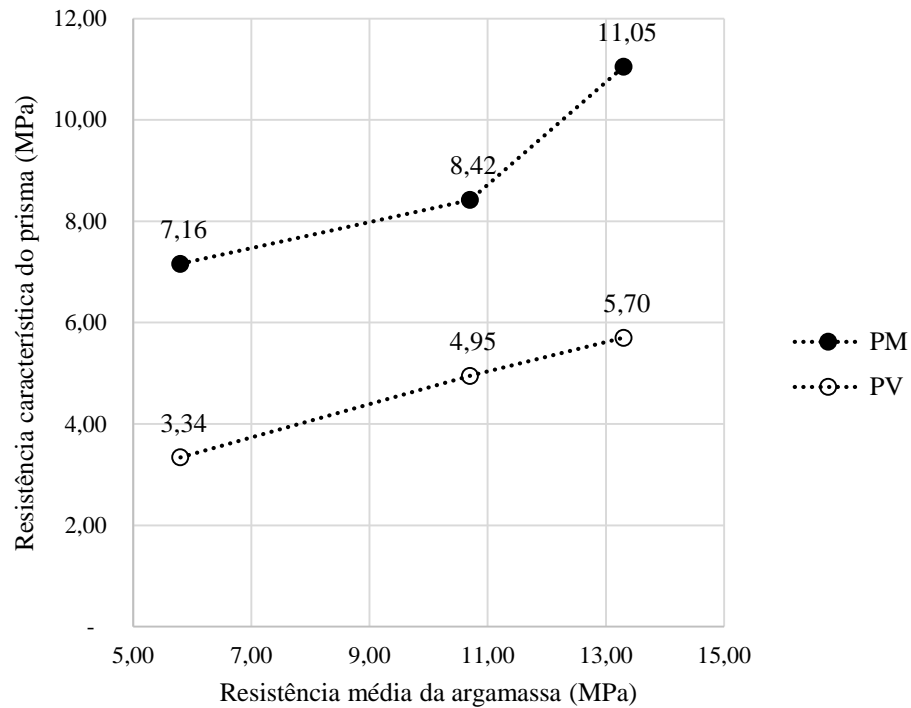
Em relação às resistências características dos prismas P_V , observa-se um crescimento praticamente linear da resistência, conforme aumenta a resistência média da argamassa. O gráfico da Figura 36 ilustra esse comportamento das resistências características das três combinações do prisma P_V .

Figura 36 – Resistências características dos prismas P_V .



O gráfico da Figura 37 apresenta a comparação entre as resistências características dos prismas de blocos cerâmicos estudados, a fim de compreender melhor como a razão área líquida/área bruta interfere na ruptura dos prismas. Como informado na Tabela 13, os blocos cerâmicos de paredes maciças têm a relação $A_{líq}/A_{bru}$ de 0,50. Nos de paredes vazadas há uma redução nessa razão para um valor de 0,41.

Figura 37 – Comparação das resistências características dos prismas de blocos cerâmicos.



No gráfico da Figura 37 observa-se que mesmo que os blocos tenham resistências à compressão muito próximas (10,90 MPa para o BM e 9,20 MPa para o BV), os prismas apresentam uma significativa diferença de resistência, mesmo sendo combinados com as mesmas argamassas e moldados ao mesmo tempo. Dessa forma, conclui-se que para os blocos cerâmicos, quanto menor a relação $A_{líq}/A_{bru}$, menor é a resistência à compressão característica da alvenaria.

Relaciona-se esse comportamento com o fenômeno de confinamento da argamassa, provocado pela aderência entre a argamassa e o bloco. Como mencionado na revisão de literatura, o confinamento da argamassa foi estudado e confirmado por pesquisadores como Khoo (1972), Atkinson *et al.* (1985), McNary e Abrams (1985), Cheema e Klingner (1986), Mohamad (1998), Hayen *et al.* (2001), Mohamad (2007) e Mohamad *et al.* (2015).

Os blocos cerâmicos de paredes maciças $|B_M|$ apresentam uma maior área de contato com a junta de argamassa, resultando em uma área de contato maior para mobilizar o fenômeno de confinamento, fazendo com que haja o incremento de resistência no prisma. Da mesma forma, os blocos de parede vazada resultaram em uma menor capacidade de mobilizar o confinamento, resultando em resistências menores nos prismas.

4.1.2.1 Equação de previsão de resistência dos prismas P_V

Na Figura 38 ilustra-se a envoltória de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede vazada P_V . Na Tabela 20 mostram-se os valores das constantes “ k ”, “ α ” e “ β ” da equação de previsão de resistência à compressão características dos prismas P_V , obtidas pela equação potencial da envoltória de ruptura.

Figura 38 – Envoltória de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede vazada P_V .

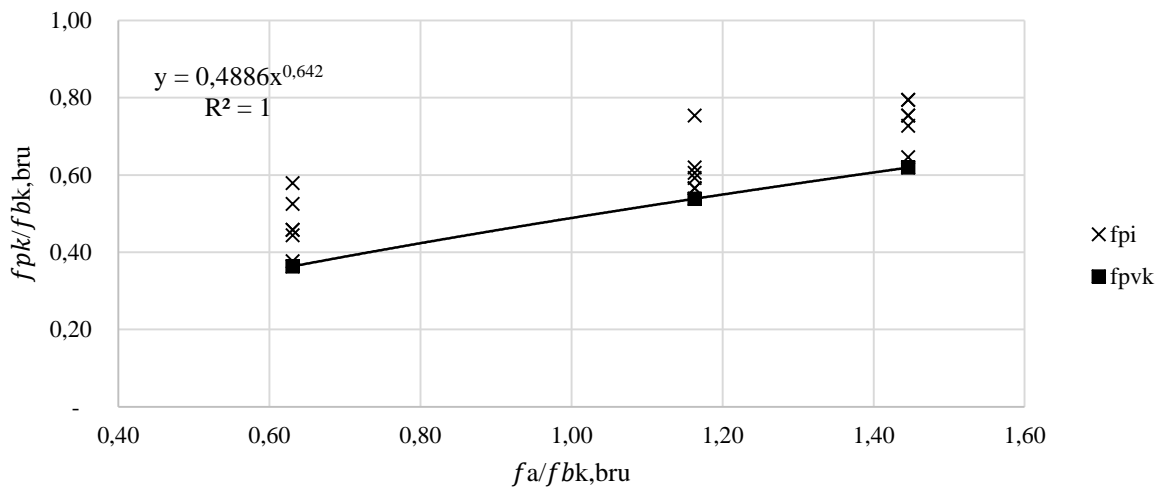


Tabela 20 – Valores das constantes da equação de ruptura dos prismas de bloco cerâmico de parede vazada.

k	α	β	Equação
0,48	0,64	0,36	$f_{pk} = 0,49 \times f_a^{0,64} \times f_{bk,bru}^{0,36}$

Ao contrário dos prismas P_M , onde os coeficientes “ α ” e “ β ” assumiram valores muito próximos, observa-se que para os prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas P_V , a resistência média da argamassa tem uma maior influência na resistência característica do prisma. Isso está ligado com o fato de que a junta de argamassa tem menos área de contato com esse tipo de bloco, e o incremento de resistência provocado pelo confinamento é menor.

Outro fator que deve ser considerado ao perceber as diferenças de resistências dos dois tipos de prismas, se dá pela tendência de aumento de resistência da argamassa ao perder água

para os blocos. Apesar dos blocos cerâmicos terem sido devidamente umedecidos durante a moldagem dos prismas, os blocos de paredes maciças, por terem maior área de contato com a junta, têm uma capacidade maior de retirar a água da argamassa, quando comparado com os blocos de paredes vazadas. Barbosa *et al.* (2011) concluíram que ao perder água para o bloco, a argamassa aumenta a sua resistência à compressão.

Além disso, o coeficiente “*k*” dos prismas P_V apresentou um valor ainda menor quando comparado com os prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças P_M . De acordo com a Eurocode 6 (2002), esse coeficiente está relacionado com o tipo e as dimensões do bloco. Sendo assim, com esses resultados conclui-se que quanto menor a razão A_{Liq}/A_{bru} de blocos cerâmicos, menor é o valor do coeficiente “*k*” e por sua vez, menor a resistência característica da alvenaria.

4.1.3 Prismas de blocos de concreto - P_C

No gráfico da Figura 39 ilustra-se o ganho de resistência dos prismas com o acréscimo de resistência das argamassas. Na Tabela 21 apresentam-se os valores resistência à compressão de todos os prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças ensaiados aos 28 dias.

As resistências médias das argamassas combinadas com os blocos de concreto, ensaiadas aos 28 dias, são 4,0 MPa (P_{C1}), 5,8 MPa (P_{C2}) e 10,0 MPa (P_{C3}). A área bruta do bloco de concreto é 559,91 cm².

Figura 39 – Resistência à compressão dos prismas de bloco de concreto P_C .

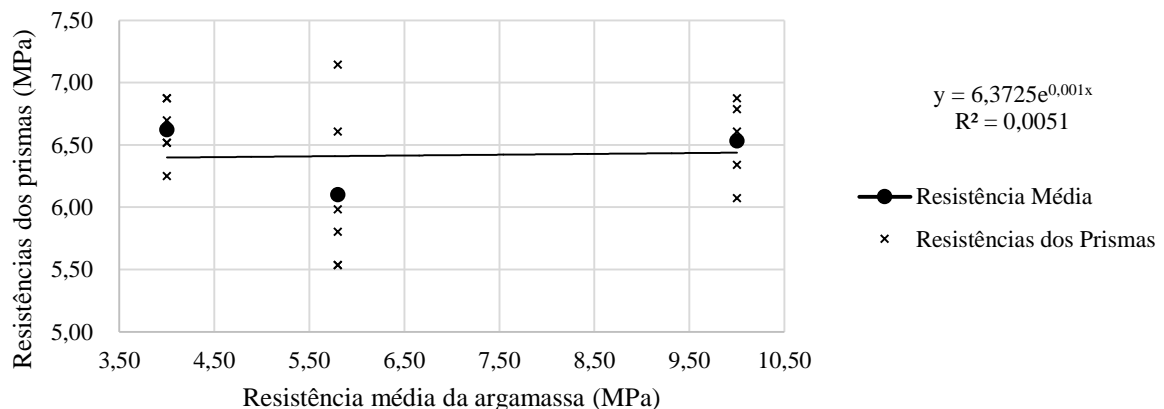


Tabela 21 – Resultados de resistência à compressão dos prismas de blocos de concreto P_C.

Tipo do Prisma	Prisma	Carga (kgf)	$f_{pi,bru}$ (MPa)	$f_{pm,bru}$ (MPa)	$f_{pk,bru}$ (MPa)	D.P. (MPa)	C.V (%)
P _{C1}	1	37500	6,70	6,62	6,25	0,24	3,66
	2	36500	6,52				
	3	38500	6,88				
	4	36500	6,52				
	5	35000	6,25				
	6	38500	6,88				
P _{C2}	1	31000	5,54	6,10	5,27	0,65	10,58
	2	32500	5,80				
	3	37000	6,61				
	4	31000	5,54				
	5	40000	7,14				
	6	33500	5,98				
P _{C3}	1	37500	6,88	6,53	5,89	0,30	4,53
	2	37000	6,61				
	3	38500	6,07				
	4	32500	6,52				
	5	37000	6,34				
	6	34500	6,79				

Pelos resultados dos ensaios de compressão dos prismas, verifica-se que, aparentemente, o aumento da resistência da argamassa não contribuiu para o aumento da resistência dos prismas. Ao contrário do esperado, os prismas os 18 prismas apresentaram-se com as tensões de ruptura muito parecidas.

O fato da argamassa não influenciar significativamente na resistência última de prismas de blocos de concreto já havia sido confirmado por outros pesquisadores (KHALAF *et al.*, 1994; KHALAF, 1996; HAACH *et al.*, 2014; LÜBECK, 2016). Diante disso, percebe-se que a análise visual do modo de ruptura dos prismas desse tipo de bloco tem um papel preponderante para identificar em que o aumento da resistência da argamassa contribui em cada combinação de prisma. Sendo assim, isso será discutido na seção 4.2 desta pesquisa.

4.1.3.1 Equação de previsão de resistência dos prismas P_C

Assim como para os prismas de blocos cerâmicos, também foi traçada a envoltória de ruptura dos prismas de bloco de concreto P_C , conforme o gráfico da Figura 40. Na Tabela 22 mostram-se os valores das constantes da equação de previsão de resistência à compressão característica destes prismas, obtidas pelos valores da equação potencial do gráfico.

Figura 40 – Envoltória de ruptura dos prismas de bloco de concreto P_C .

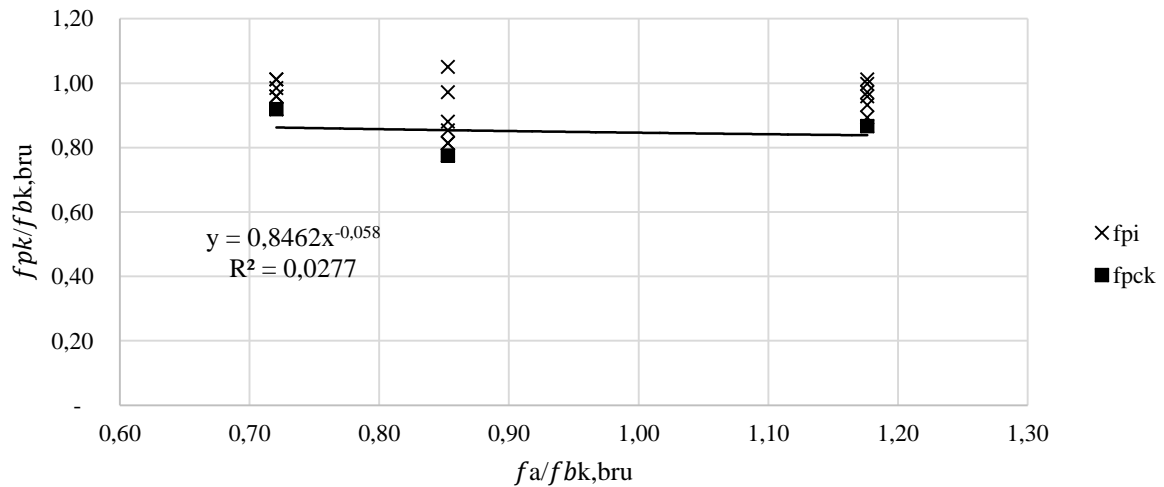


Tabela 22 – Valores das constantes da equação de ruptura dos prismas de bloco de concreto.

k	α	β	Equação
0,85	0,0	1,0	$f_{pk} = 0,85 \times f_a^{0,0} \times f_{bk,bru}^{1,0}$

Como relatado anteriormente em relação aos resultados de compressão dos prismas, o gráfico da Figura 40 também indica que o aumento da resistência da argamassa não contribui para a determinação da resistência característica do prisma. É por esse motivo que os dados da Tabela 22 mostram o valor de “ α ” igual a zero e assim, na equação de previsão de resistência, a resistência característica seria apenas em função do bloco ($\beta=1$).

Ao concluir preliminarmente que a resistência característica da alvenaria de blocos de concreto depende apenas da resistência do bloco e independe da argamassa, seria o mesmo que contrariar a equação da norma europeia, que correlaciona o conjunto dos materiais que

compõem a alvenaria. Sendo assim, reforça-se a ideia de que é necessário analisar o processo de ruptura do prisma comprimido e não apenas a sua resistência última.

Dessa forma, os vídeos dos ensaios de compressão dos prismas de concreto foram analisados, visualmente, com o objetivo de verificar a partir de qual tensão o prisma já começa a desencadear o processo de ruptura. Identificando-se essas tensões, é possível correlacionar a influência da argamassa com a resistência do prisma. Isso será tratado na seção 4.2.

4.2 MODO DE RUPTURA DOS PRISMAS

Nesta seção buscou-se analisar, de uma forma visual, as filmagens dos ensaios de compressão dos prismas. Como mostrado anteriormente na metodologia, todos os ensaios dos prismas submetidos à compressão foram filmados por duas câmeras, com a finalidade de verificar o processo de ruptura.

4.2.1 Modo de ruptura dos prismas de blocos cerâmicos (P_M e P_V)

O objetivo inicial das filmagens dos ensaios dos prismas submetidos à compressão era verificar a partir de que nível de tensão começava a propagação do processo de ruptura. Para os prismas de blocos cerâmicos, tanto de parede maciça quanto de parede vazada, só foi possível observar visualmente o processo de propagação de falha com um nível de tensão muito próximo ao da ruptura (superior a 90% da tensão última).

Na Figura 41 mostra-se a sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{M2}(2)$, de 8,54 MPa de resistência, moldado com a argamassa mais fraca de 5,8 MPa. No gráfico da Figura 42 exemplifica-se a sequência da ruptura do prisma $P_{M4}(5)$, de 10,93 MPa e argamassa de resistência intermediária de 10,7 MPa. Por último, na Figura 43 mostra-se a ruptura do prisma $P_{M5}(3)$, que obteve a maior resistência de todos, de 13,57 MPa, combinado com a argamassa mais resistente de 13,3 MPa. Esses prismas são representativos quanto ao comportamento dos demais prismas do conjunto.

Figura 41 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{M2}(2)$.

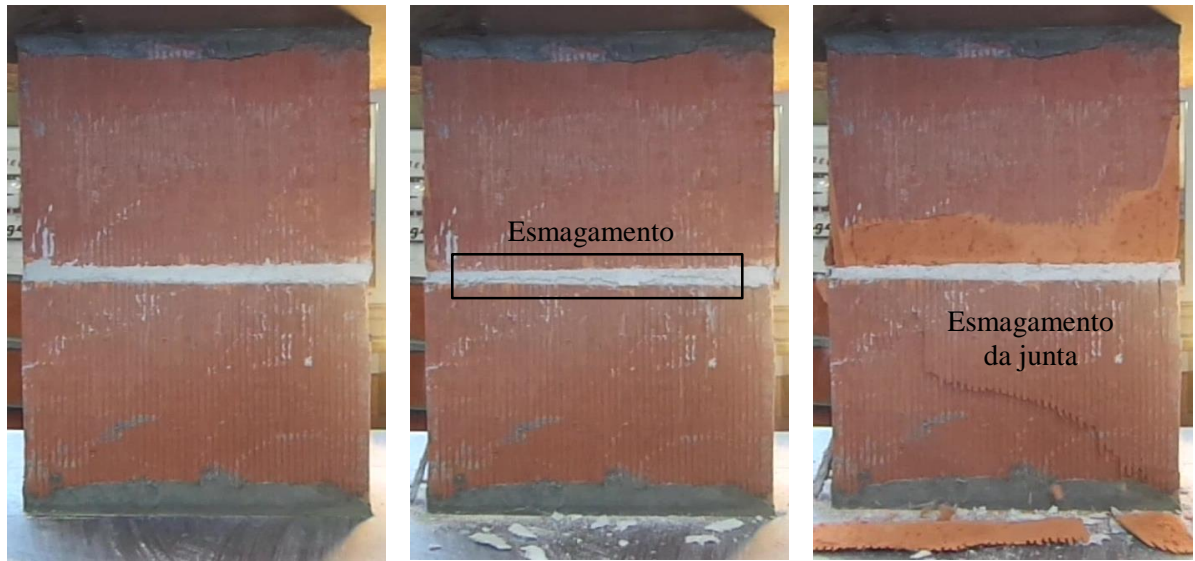


Figura 42 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{M4}(5)$.

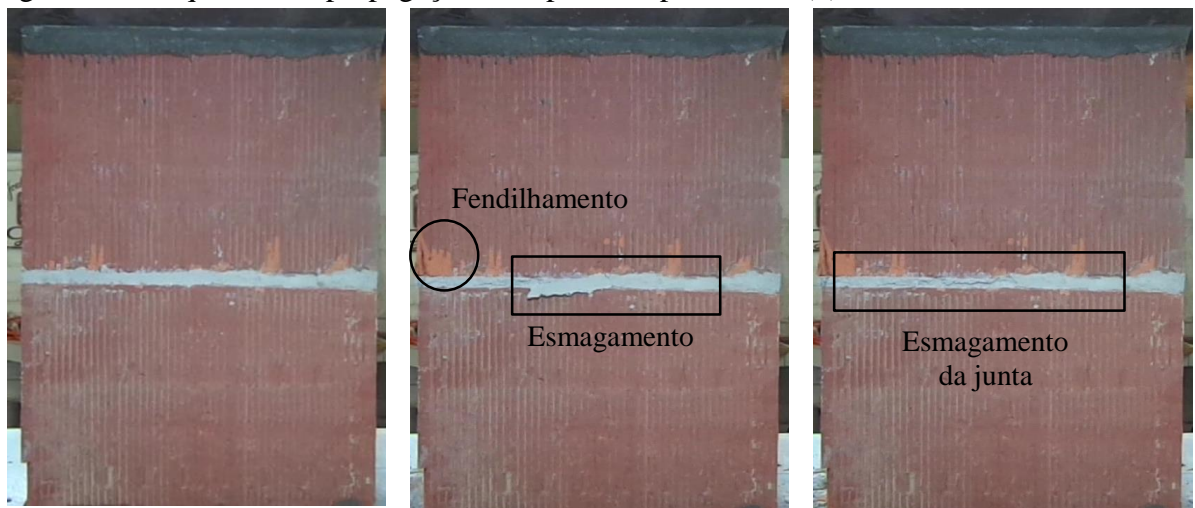
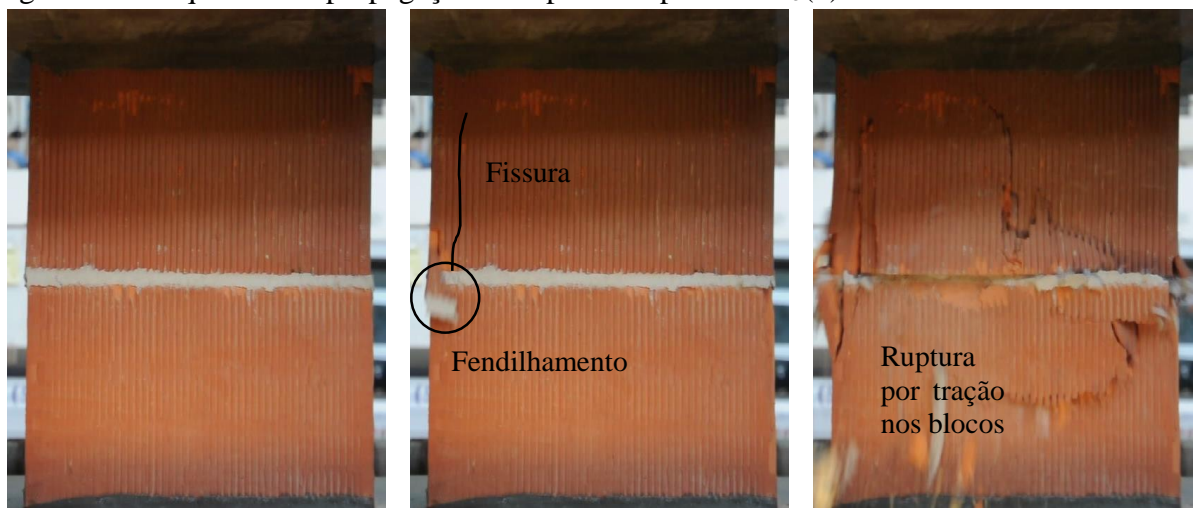


Figura 43 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{M5}(3)$.



Na sequência de propagação dos dois primeiros conjuntos, onde os prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças estão combinados com as argamassas 2 e 4 (menos resistentes), ilustrados nas Figuras 41 e 42, observou-se a presença visível do fenômeno de esmagamento da junta antes da carga última de ruptura, juntamente com o fendilhamento do bloco perto da junta. Os prismas P_{M5} , combinados com a argamassa 5 (mais resistente), não mostraram o fenômeno de esmagamento anterior à ruptura do conjunto e a falha se deu por tração nos blocos, como mostra na Figura 43.

Como os prismas de bloco cerâmico de parede maciças combinados com as argamassas 2 e 4, de resistências médias à compressão de 5,8 e 10,7 MPa, apresentaram o modo de ruptura desencadeado pelo esmagamento da junta, conclui-se que para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ de 49% para este tipo de bloco se dá pelo esmagamento. Para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ acima de 61%, representado pelos prismas do tipo P_{M5} , o processo de falha é desencadeado pela fissuração das unidades, ou seja, por tração no bloco.

Diante disso, verifica-se que a resistência da argamassa não influi apenas na resistência final dos prismas, mas também no modo de ruptura dos mesmos. Observa-se que, para os blocos cerâmicos de paredes maciças, conforme aumentou-se a resistência da junta de assentamento, além de aumentar a resistência do prisma, mais brusca foi a sua ruptura.

O mesmo comportamento foi observado nos prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas P_v . Todavia, quando comparado com os prismas P_M , observou-se uma ruptura ainda mais brusca. Assim como observado nos prismas P_M , para os prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas combinados com as argamassas 2 e 4 foi possível observar o esmagamento da junta como o fator desencadeante do processo de falha. Sendo assim, para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ de até 47%, a ruptura deu-se pelo esmagamento da junta de assentamento. Para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ acima de 59%, a ruptura deu-se por tração no bloco estrutural.

Na Figura 44 mostra-se a propagação da ruptura do prisma $P_{V2}(5)$, de 4,21 MPa de resistência à compressão, com a argamassa de resistência mais fraca de 5,8 MPa. Na Figura 45 exemplifica-se a sequência da ruptura do prisma $P_{V4}(4)$, de 5,45 MPa e argamassa de resistência intermediária de 10,7 MPa. Por último, na Figura 46 mostra-se a ruptura do prisma $P_{V5}(2)$, de resistência de 7,31 MPa e argamassa de 13,3 MPa.

Figura 44 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{V2}(5)$.

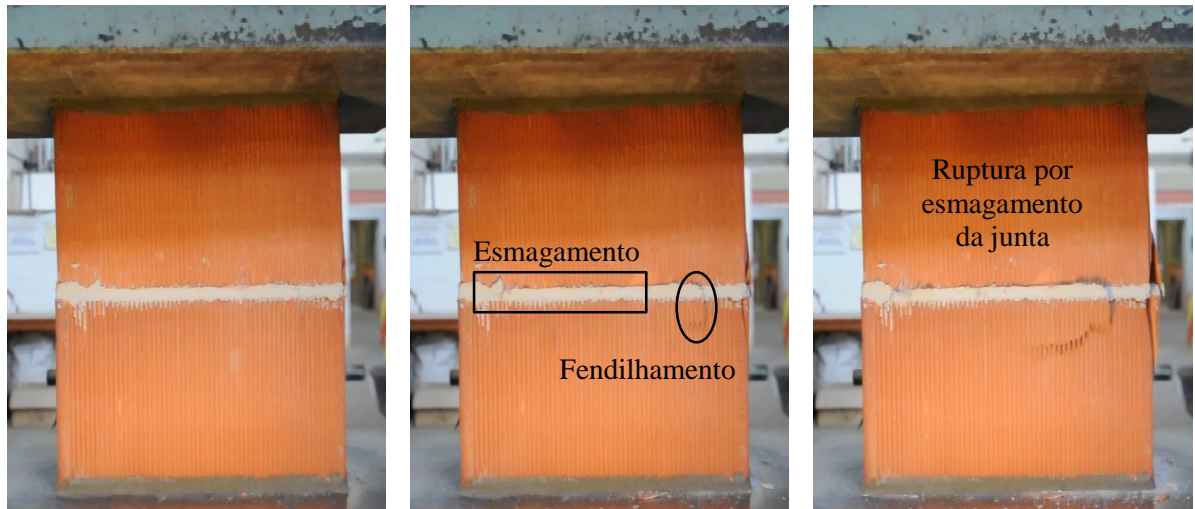


Figura 45 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{V4}(4)$.

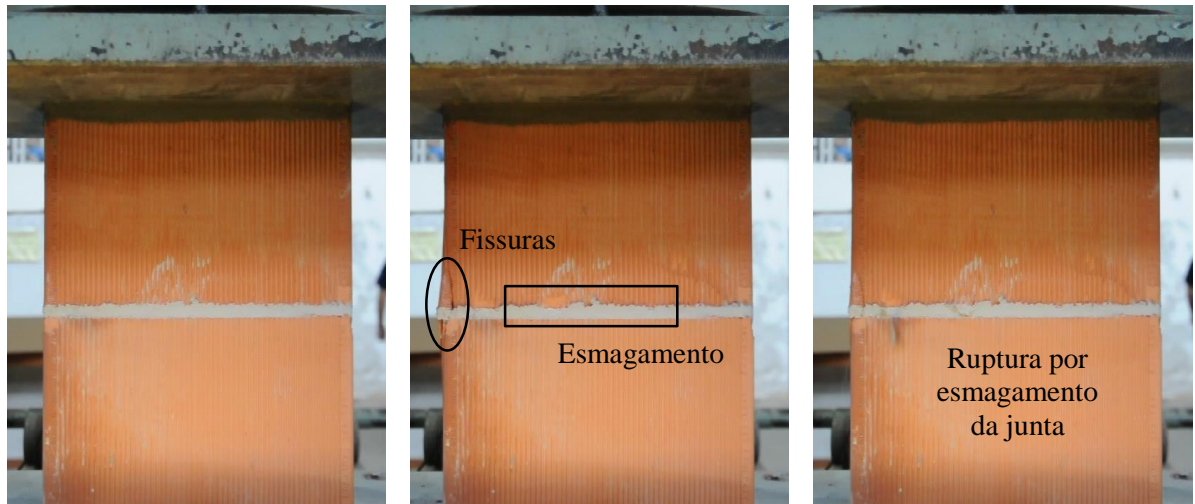
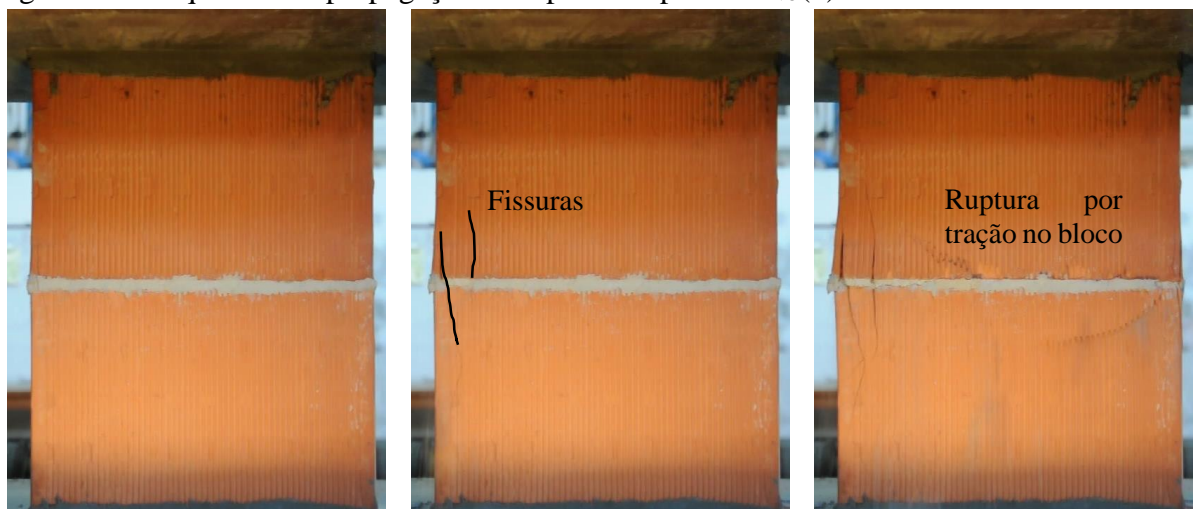


Figura 46 – Sequência da propagação da ruptura do prisma $P_{V5}(2)$.



Observou-se nos ensaios de compressão dos dois tipos de prismas de blocos cerâmicos (P_M e P_V) que a ruptura se dá a partir da junta de assentamento. Os prismas com argamassa mais fraca (2 e 4) rompiam por esmagamento da junta. Nos prismas com argamassa mais resistente (5) a fissuração do bloco se dava a partir da transição entre o bloco e a argamassa.

A característica de quanto maior a resistência da argamassa, mais brusca é a ruptura dos prismas de blocos cerâmicos, já foi observada em diferentes pesquisas (De Marco, 2016; Lübeck, 2016; Alvarenga *et al.*, 2017).

Lübeck (2016), ao ensaiar prismas com os mesmos tipos de blocos com duas resistências de argamassas, observou que os prismas executados com a argamassa forte apresentaram rupturas com grande acúmulo de energia interna, explosivas, resultando na completa fragmentação do prisma após a ruptura.

4.2.2 Modo de ruptura dos prismas de blocos de concreto (P_C)

Ao contrário dos prismas de blocos cerâmicos, que só foi possível identificar visualmente a propagação das falhas muito próximo à resistência última do conjunto, os prismas de blocos de concreto possibilitaram a análise visual do avanço do processo de ruptura. Para tal análise, as filmagens foram convertidas em imagens, quadro a quadro, e as imagens foram relacionadas com as magnitudes de tensão ao qual os prismas, naquele instante, estavam submetidos.

Os dois conjuntos de imagens, frente (câmera 1) e trás (câmera 2), de todos os prismas foram analisados. Na Tabela 23 mostra-se a partir de que magnitude de tensão é possível verificar o início da propagação de falha do prisma, seja pelo esmagamento da junta de assentamento ou por fissuração nos blocos.

Sendo assim, por exemplo, para o prisma $P_{C1}(1)$, de 6,70 MPa de resistência, observou-se início de falha, por esmagamento da junta, a partir de 70% da resistência final (4,69 MPa), tanto na imagem da câmera 1 (frente), quanto na imagem da câmera 2 (trás).

Tabela 23 – Magnitude de tensão/resistência do início da análise visual da propagação de ruptura dos prismas.

Prisma	$f_{pi,bru}$ (MPa)	Magnitude de tensão/resistência (σ/f)		Início do processo de ruptura
		Frente (Câmera 1)	Trás (Câmera 2)	
PC1	1	6,70	70%	Esmagamento da junta
	2	6,52	60%	
	3	6,88	70%	
	4	6,52	70%	
	5	6,25	70%	
	6	6,88	60%	
PC2	1	5,54	70%	Esmagamento da junta
	2	5,80	70%	
	3	6,61	60%	
	4	5,54	70%	
	5	7,14	80%	
	6	5,98	70%	
PC3	1	6,88	90%	Esmagamento da junta
	2	6,61	90%	
	3	6,07	95%	
	4	6,52	90%	
	5	6,34	95%	
	6	6,79	90%	

Por meio dessas análises, verifica-se que conforme aumentou a resistência da argamassa, o prisma demorou mais para apresentar indícios de propagação da ruptura. Enquanto que para os prismas PC₁, de argamassa mais fraca, o início da ruptura foi observado a partir de 60% da razão tensão/resistência, os prismas PC₃, de argamassa mais resistente, elevaram esse valor até de 95% da resistência. Schankoski *et al.* (2015), ao ensaiar prismas de blocos concreto de alta resistência moldados com argamassa industrializada, concluíram que estes começaram a apresentar grandes deformações específicas com menos de 70% da tensão de ruptura e exibiram esmagamento visível em seguida.

Outro fator observado ao analisar o processo de ruptura, é que todos os prismas romperam pelo esmagamento da junta. Sendo assim, conclui-se que para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ de até 84% a ruptura se dá por esmagamento da junta de assentamento e neste procedimento experimental não foi possível observar a partir de qual razão o processo de falha se dá por tração no bloco.

O fenômeno de esmagamento da junta de argamassa foi o indutor da ruptura dos prismas. Entretanto, mesmo que o esmagamento tenha sido verificado a partir de níveis de tensão de 60%, como no caso dos prismas P_{C1} , o carregamento no ensaio continuou crescendo apesar da quebra da aderência entre o bloco e a argamassa provocado pelo esmagamento. No final da ruptura, foi possível observar o desprendimento da superfície externa da argamassa e todos os prismas apresentavam o descolamento dos blocos após a ruptura, como mostra a Figura 47, referente ao prisma $P_{C1(2)}$ rompido.

Figura 47 – Quebra da ligação entre os blocos, após a ruptura pelo esmagamento da junta.



Como citado na revisão da literatura deste trabalho, quando há a quebra de aderência entre os componentes da alvenaria antes mesmo da carga última de ruptura, ela deixa de formar um conjunto monolítico. Na prática, quando isso ocorre, a alvenaria passa a apresentar deficiências em relação à resistir solicitações cisalhantes e laterais, como o vento por exemplo. Além disso, quando a argamassa tem uma resistência muito baixa, ela pode perder completamente o esqueleto resistente, passando a haver a sobreposição dos blocos.

Visando complementar os dados da Tabela 23, na Figura 48 mostra-se o desencadeamento e a sequência de propagação de ruptura de um prisma do conjunto P_{C1} (prisma $P_{C1(2)}$). Na Figura 49 apresenta-se a sequência de propagação típica do conjunto P_{C2} (prisma $P_{C2(2)}$) e a Figura 50 do conjunto P_{C3} (prisma $P_{C3(6)}$). Optou-se por mostrar imagens das razões de tensão/resistência a partir de 60% ou 70%, uma vez que para tensões menores que esse valor não foi possível verificar alterações nos prismas. Esses prismas são representativos quanto ao comportamento dos demais prismas dos conjuntos.

Figura 48 – Sequência de propagação de ruptura típica do conjunto de prismas P_{C1} – imagens da câmera 1 (frente) do Prisma $P_{C1(2)}$.

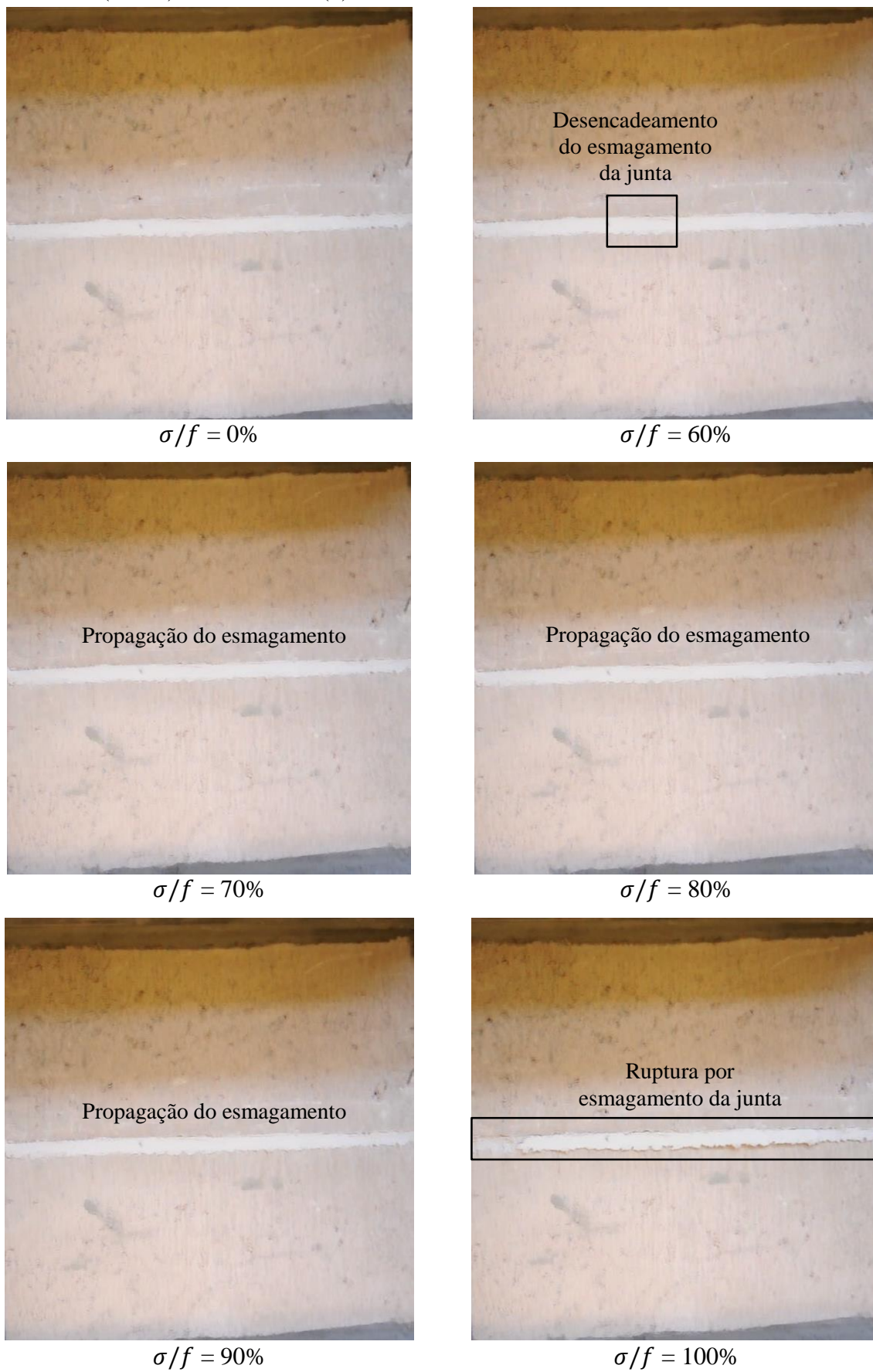


Figura 49 – Sequência de propagação de ruptura típica do conjunto de prismas P_{C2} – imagens da câmera 2 (trás) do Prisma $P_{C2}(2)$.

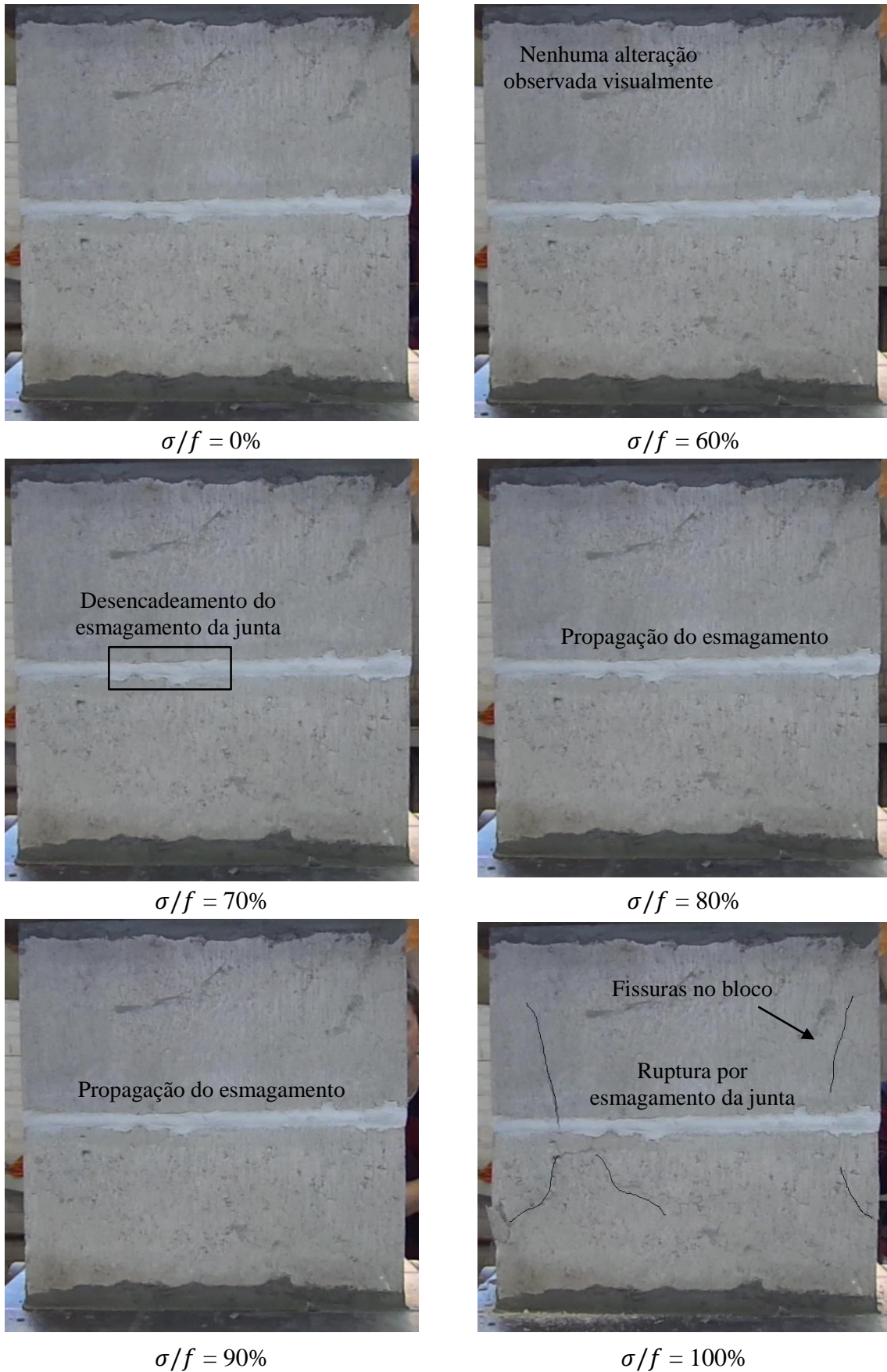
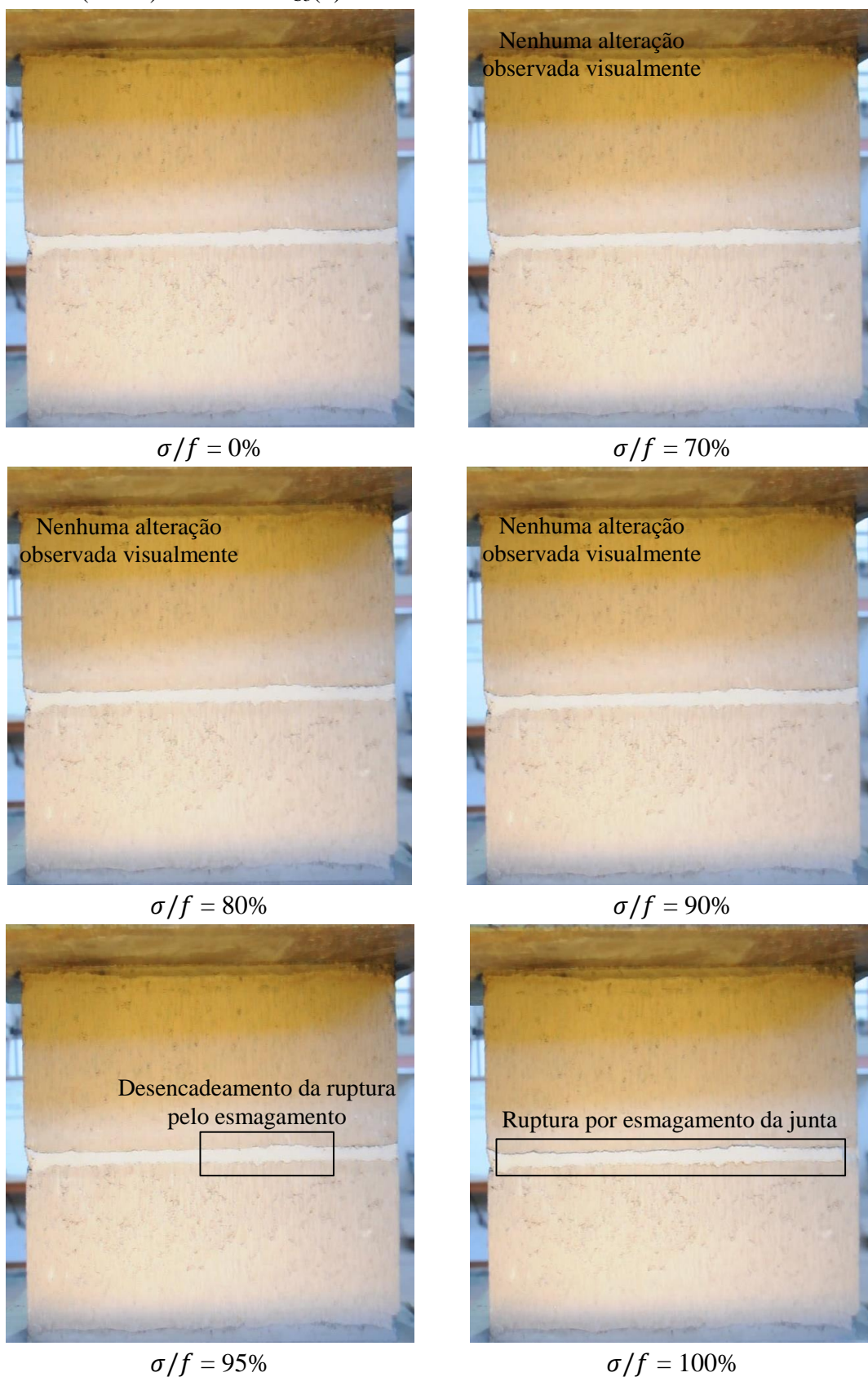


Figura 50 – Sequência de propagação de ruptura típica do conjunto de prismas P_{C2} – imagens da câmera 1 (frente) do Prisma $P_{C3(3)}$.



Como dito anteriormente na seção 4.1.3, o gráfico da Figura 40 que representava a envoltória de ruptura dos prismas de concreto trazia resultados inconclusivos, uma vez que, aparentemente, a resistência média da argamassa não influenciou a resistência final dos prismas. Sendo assim, com a análise dos vídeos e identificando a partir de que nível de tensão desencadeia-se a ruptura, foi proposta uma nova envoltória potencial. Para isso, uma nova resistência característica na área bruta para cada conjunto de prisma P_C foi recalculada, considerando-se não mais a resistência característica final dos conjuntos de prismas (f_{pk}) e sim o nível de tensão característica (σ_{pk}) no qual desencadeou a ruptura. Na Tabela 24 mostram-se esses valores recalculados e no gráfico da Figura 51 mostra-se a nova envoltória, a partir das relações de a tensão de ruptura característico/resistência do bloco na área bruta (σ_{pk}/f_{bk}) e resistência média da argamassa/resistência característica do bloco na área bruta (f_a/f_{bk}). Na Tabela 25 mostra-se a nova equação encontrada, a partir desses valores, com os respectivos valores de k , α e β .

Tabela 24 – Tensão de ruptura característica dos prismas de blocos de concreto (σ_{pk}).

Prisma		$f_{pi,bru}$ (MPa)	Magnitude de tensão/resistência (σ/f)		Menor nível de tensão/ resistência (σ/f)	$\sigma = \frac{\sigma}{f} \times f_{pi}$ (MPa)	σ_{pk} (MPa)
			Frente (Câmera 1)	Trás (Câmera 2)			
PC1	1	6,70	70%	70%	70%	4,69	3,75
	2	6,52	60%	70%	60%	3,91	
	3	6,88	70%	70%	70%	4,82	
	4	6,52	70%	60%	60%	3,91	
	5	6,25	70%	60%	60%	3,75	
	6	6,88	60%	70%	60%	4,13	
PC2	1	5,54	70%	70%	70%	3,88	3,79
	2	5,80	70%	70%	70%	4,06	
	3	6,61	60%	70%	60%	3,97	
	4	5,54	70%	70%	70%	3,88	
	5	7,14	80%	90%	80%	5,71	
	6	5,98	70%	70%	70%	4,19	
PC3	1	6,88	90%	90%	90%	6,19	5,30
	2	6,61	90%	90%	90%	5,95	
	3	6,07	95%	90%	90%	5,46	
	4	6,52	90%	90%	90%	5,87	
	5	6,34	95%	90%	90%	5,71	
	6	6,79	90%	95%	90%	6,11	

Figura 51 – Envoltória da tensão de ruptura característica dos prismas de blocos de concreto (σ_{pk}).

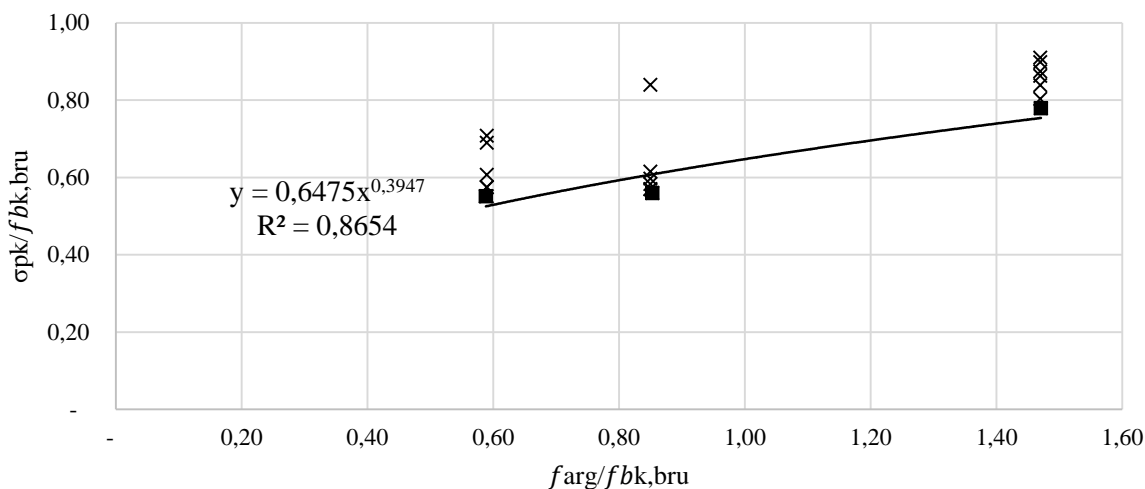


Tabela 25 – Novos valores das constantes da equação de tensão de ruptura dos prismas de bloco de concreto.

k	α	β	Equação
0,65	0,39	0,61	$f_{pk} = ,65 \times f_a^{0,39} \times f_{bk,bru}^{0,61}$

De acordo com a nova equação potencial do gráfico da Figura 51 mostrada na Tabela 25, que considera não mais a carga última de ruptura dos prismas e sim a carga de tensão onde começa a propagação da ruptura, analisado visualmente, verifica-se que a resistência da argamassa passa a ser um fator relevante na resistência característica do prisma. Com a comparação da nova equação com a equação da Eurocode 6 (Equação 2.1), verifica-se uma aproximação das potências das resistências dos blocos (0,7) e da argamassa (0,3). Em relação ao coeficiente k , a norma europeia recomenda que deve-se adotar valores entre 0,35 a 0,55, dependendo dos componentes. Ressalta-se que a equação da Eurocode 6 utiliza o valor de resistência à compressão simples normalizada do bloco e as equações de ruptura calculadas neste trabalho utilizaram o valor de resistência característica a compressão do bloco na área bruta.

Conclui-se que apesar da resistência da argamassa aparentemente não influenciar na resistência última do prisma, deve ser analisado também o desencadeamento do modo de ruptura. Quando esse fator é considerado, leva-se em conta não mais a resistência última, e sim a resistência máxima no qual o conjunto ainda apresenta o comportamento monolítico, sem a quebra de aderência dos materiais.

4.3 CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DAS ARGAMASSAS

Nesta última seção da análise dos resultados aborda-se o comportamento tensão-deformação-específica das argamassas comprimidas. Nos gráficos das Figuras Figura 52 à Figura 56 mostra-se os diagramas tensão-deformação dos corpos de prova cilíndricos das argamassas. Cada curva do gráfico é referente à um corpo de prova (CP1 ao CP5) daquele conjunto e, na legenda, tem-se a resistência à compressão atingida por cada CP. Devido à sensibilidade do ensaio, alguns corpos de prova ensaiados apresentaram problemas nas leituras e por isso foram excluídos dos resultados.

Figura 52 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 1.

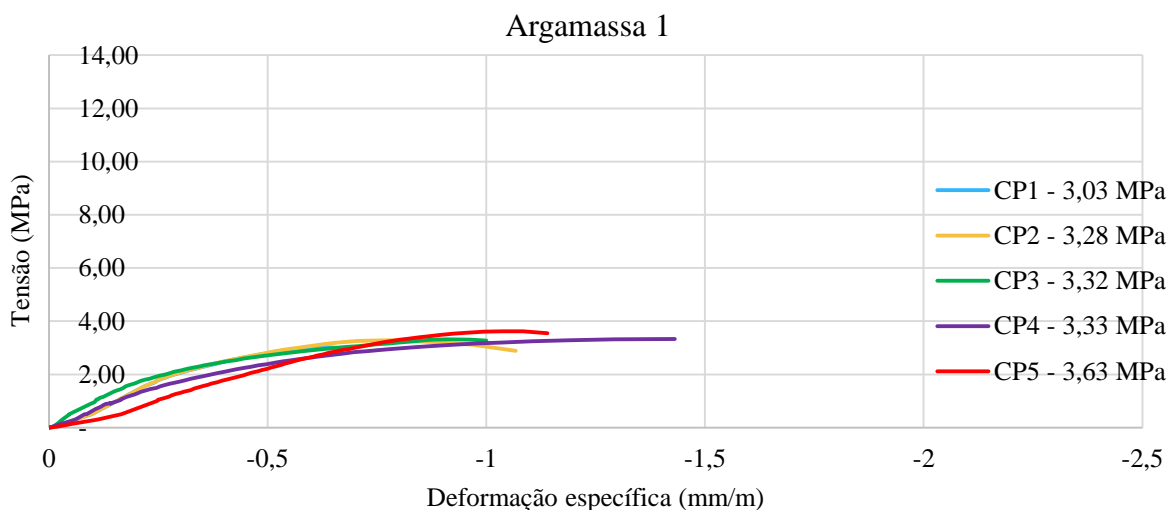


Figura 53 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 2.

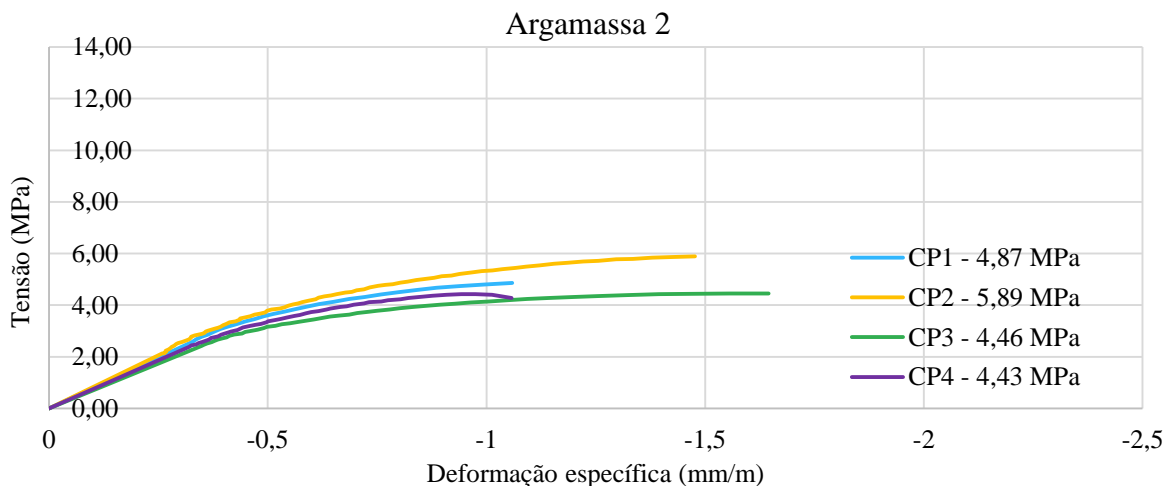


Figura 54 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 3.

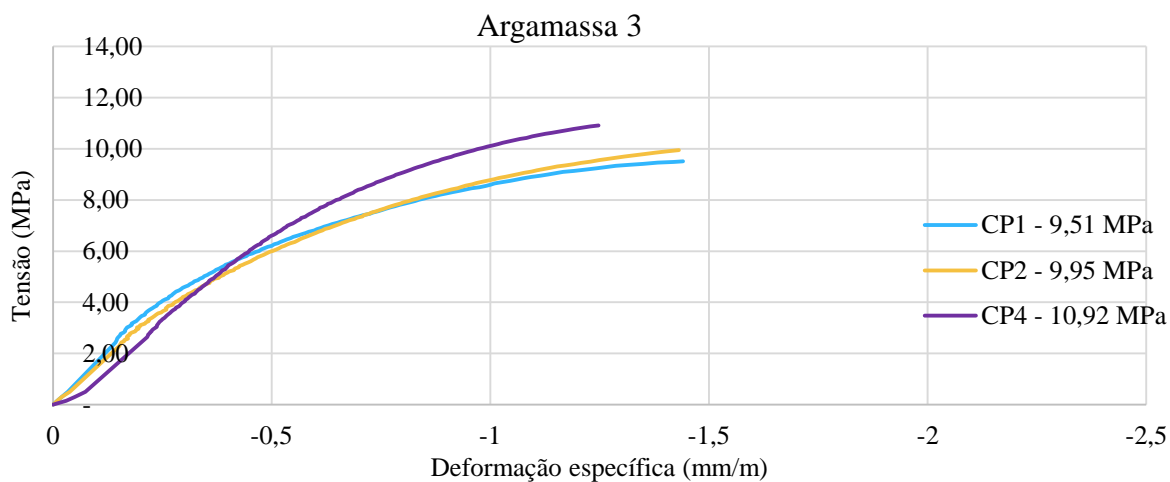


Figura 55 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 4.

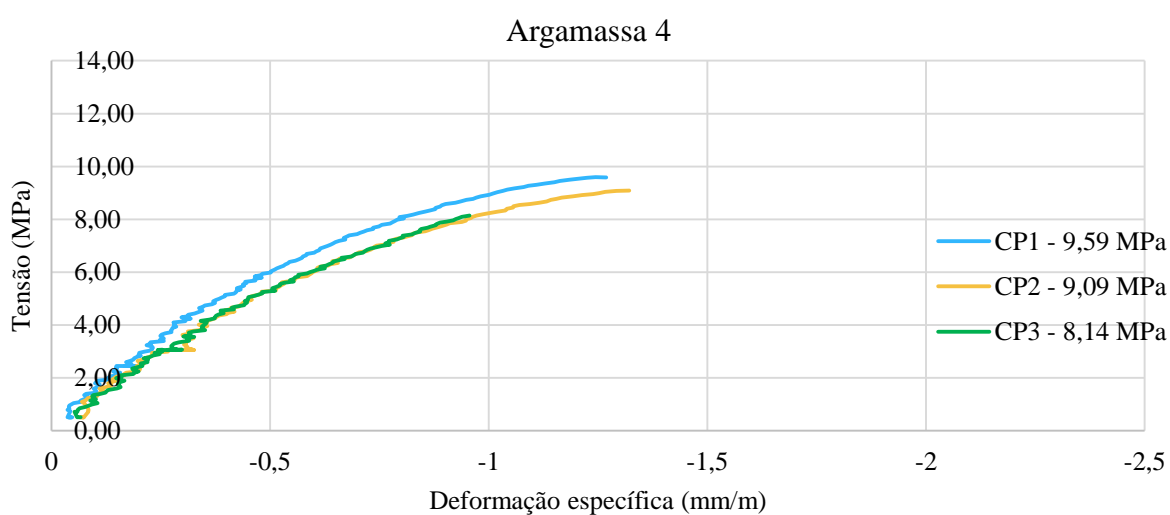
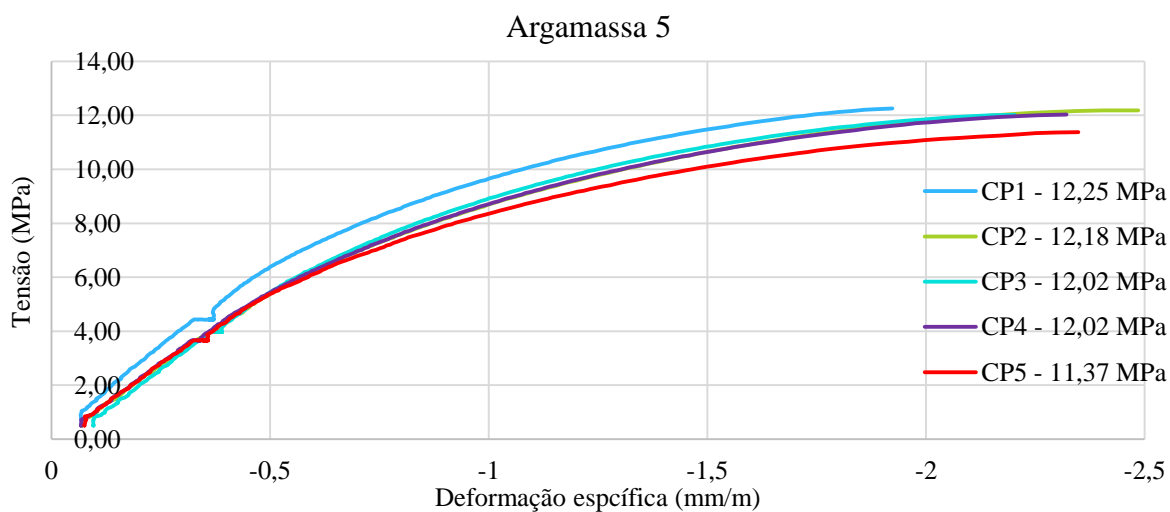


Figura 56 – Comportamento tensão-deformação dos CP cilíndricos da argamassa 5.



Para complementar o que foi informado nos gráficos, na Tabela 26 mostram-se as resistências dos corpos de prova cilíndricos de cada tipo de argamassa (5cm x 10 cm), comparando com as resistências médias dos ensaios de corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm).

Tabela 26 – Resistências dos CP de argamassa ensaiados à compressão aos 28 dias.

Argamassa	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)								
	Cilíndricos – 5 cm x 10 cm							Prismáticos – 4 cm x 4 cm x 16cm	
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	D.P.	Média	D.P
1	3,03	3,28	3,32	3,33	3,63	3,32	0,21	4,0	0,12
2	4,87	5,89	4,46	4,43	-	4,91	0,68	5,8	0,21
3	9,51	9,95	-	10,92	-	10,12	0,72	10,0	0,47
4	9,59	9,09	8,14	-	-	8,94	0,74	10,7	0,90
5	12,25	12,18	12,02	12,02	11,37	11,97	0,35	13,3	0,21

Observa-se que, com exceção da argamassa 3, a resistência média dos corpos de prova cilíndricos foram menores quando comparado com os prismáticos, mesmo os ensaios de ambos terem sido realizados na mesma idade (28 dias). Isso se deve ao fato de que quanto menor a altura do corpo de prova submetido à compressão, maior é o confinamento da argamassa e, por sua vez, maior é o acréscimo de resistência.

Outro fator a ser considerado é a questão da resistência real da argamassa industrializada com a resistência nominal fornecida pelo fabricante. As resistências nominais eram: 4,0 MPa (argamassa 1), 6,0 MPa (argamassa 2), 8,0 MPa (argamassa 3), 10 MPa (argamassa 4) e 15 MPa (argamassa 5). Verificou-se que as argamassas 2 e 5 ficaram abaixo da resistência informada pelo fabricante, enquanto as argamassas 3 e 4 apresentaram uma resistência superior.

A partir dos gráficos das Figuras Figura 52 à Figura 56, foram delimitados os comportamentos de cada argamassa por meio de regiões sombreadas. O objetivo de realizar essa delimitação foi uma forma de analisar, por meio de uma curva média, a partir de que magnitude de tensão e deformação a argamassa deixa de ser proporcional e acaba atingindo o comportamento da não linearidade. Nos gráficos das Figuras 57 à 61 é apresentada essa análise, onde o comportamento médio foi demarcado com linhas tracejadas.

Figura 57 – Curva média do comportamento tensão-deformação específica da Argamassa 1.

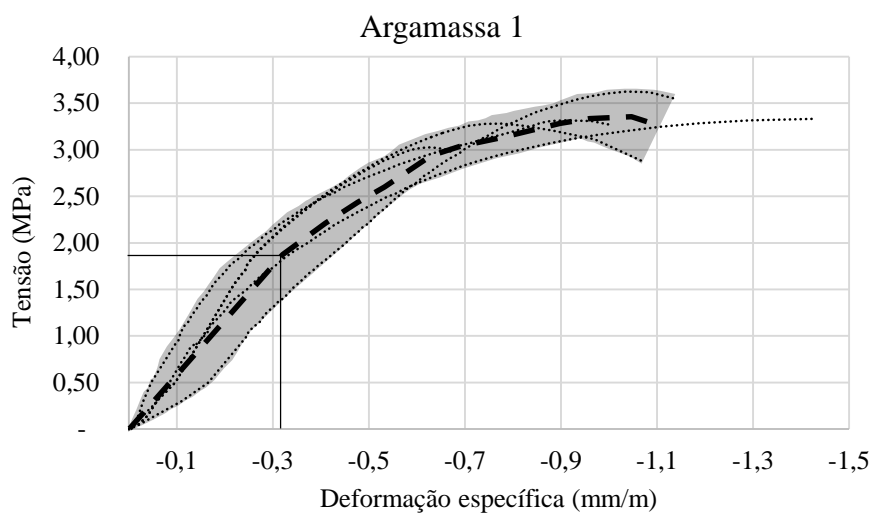


Figura 58 – Curva média do comportamento tensão-deformação da Argamassa 2.

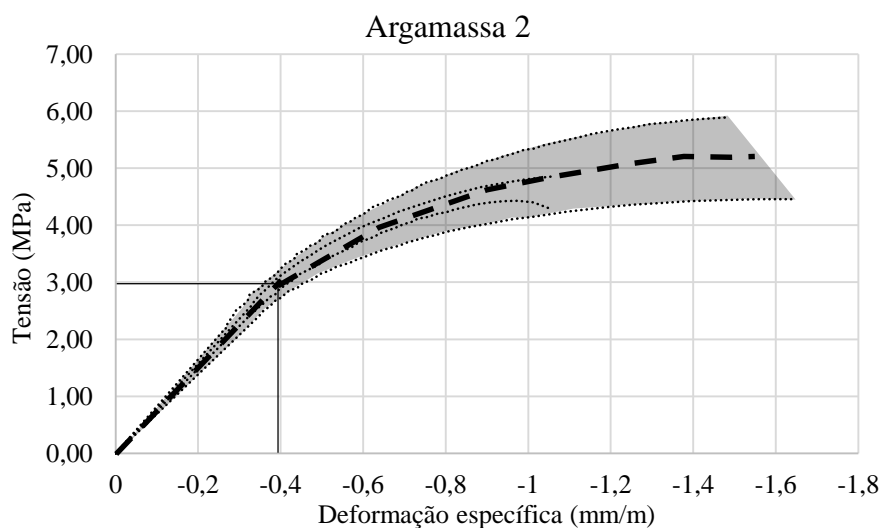


Figura 59 – Curva média do comportamento tensão-deformação da Argamassa 3.

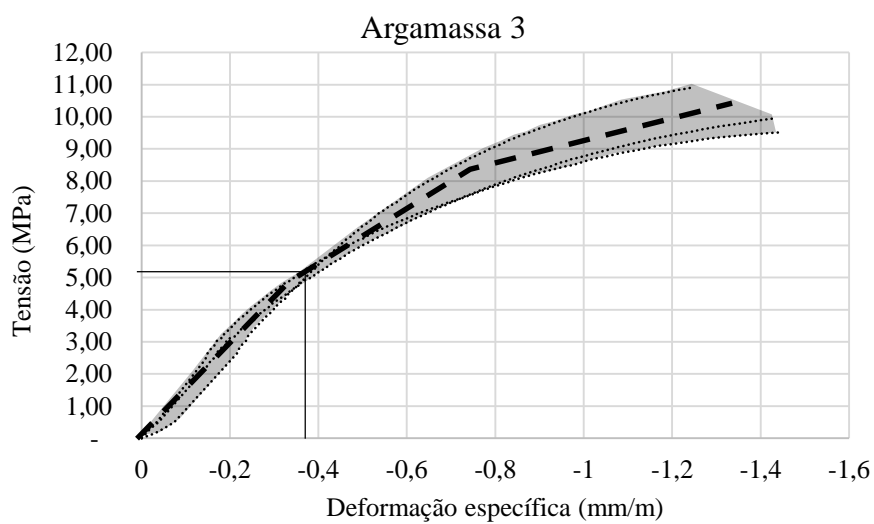


Figura 60 – Curva média do comportamento tensão-deformação específica da Argamassa 4.

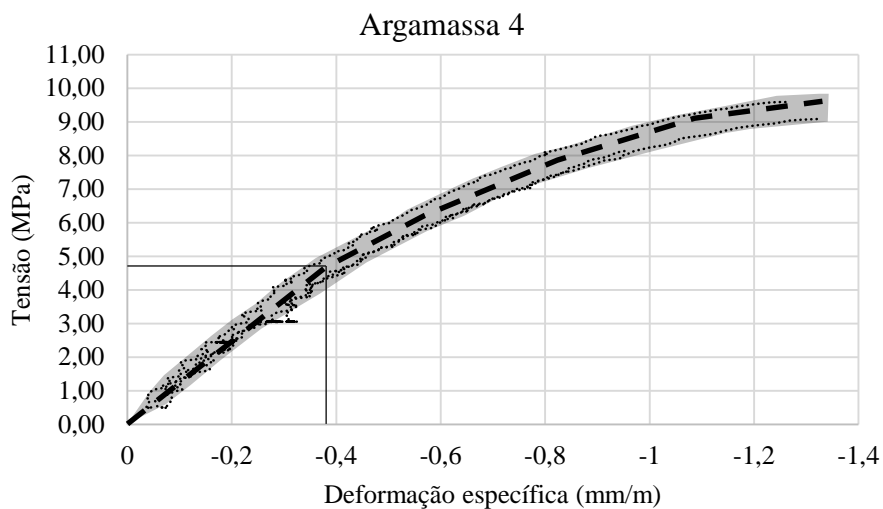
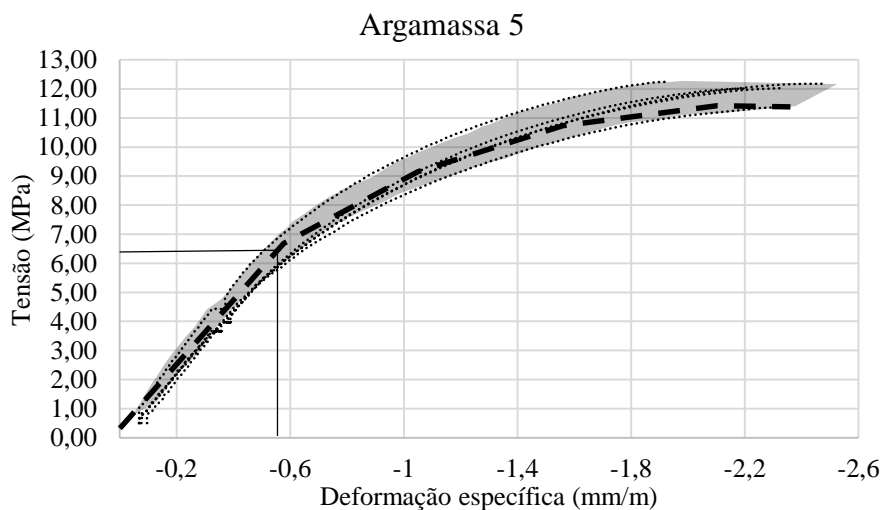


Figura 61 – Curva média do comportamento tensão-deformação específica da Argamassa 5.



Ao determinar as medidas das deformações específicas da argamassa em corpos de prova cilíndricos comprimidos, é possível estabelecer uma medida de degradação do material, devido a propagação das trincas internas. Na Tabela 27 mostra-se os valores aproximados dos níveis de tensão limite para a manutenção da linearidade das curvas de tensão-deformação específica das argamassas submetidas à compressão, que foram encontradas a partir da reta da curva média. Na Tabela 27 também mostram-se os valores de resistência média dos dois tipos de corpos de prova ensaiados aos 28 dias.

Tabela 27 – Níveis de tensão de linearidade das curvas das argamassas.

Argamassa	Tensão (aproximada) do início da não linearidade da curva – σ_i	Resistência média dos CP's 5x10cm aos 28 dias - f_a	$\frac{\sigma_i}{f_a}$
1	1,85 MPa	3,32 MPa	56%
2	3,00 MPa	4,91 MPa	61%
3	5,20 MPa	10,12 MPa	51%
4	4,80 MPa	8,94 MPa	54%
5	6,40 MPa	11,97 MPa	53%

Diante dos resultados, verificou-se que a não linearidade da curva tensão-deformação de todas as argamassas esteve na faixa de 51% a 61% da resistência à compressão média. O comportamento não linear remete-se à propagação das fissuras internas desde a zona de transição pasta-agregado para a matriz cimentícia, ou seja, quando a argamassa começa a perder sua capacidade resistente com a destruição do esqueleto resistente.

Não foi possível estabelecer uma correlação numérica entre o início do comportamento não linear das argamassas com o início da propagação do esmagamento das juntas de assentamento dos prismas de concreto. Entretanto, constatou-se que quanto maior a resistência média da argamassa, maior é a tensão (aproximada) do início da não linearidade da curva tensão-deformação específica e maior é a tensão de início do esmagamento da junta do prisma.

A presença do confinamento e a perda de água da argamassa fresca para o bloco são os dois fatores fazem com que a argamassa tenha um incremento de resistência. Devido a isso, há uma complexidade ao tentar correlacionar a não linearidade da curva tensão-deformação específica da argamassa ensaiada em corpos de prova padrão com a argamassa como junta de assentamento.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar o modo de ruptura de prismas comprimidos, variando o tipo de bloco estrutural, combinados com diferentes faixas de resistências de argamassa de assentamento. Este estudo foi realizado com três diferentes tipos de blocos: cerâmicos de paredes maciças, cerâmicos de paredes vazadas e de concreto. Cada tipo de bloco foi combinado com três resistências de argamassa industrializada de assentamento, sendo moldados prismas de dois blocos de altura com junta aproximada de 10 mm.

Para isso, foram realizados ensaios tecnológicos laboratoriais e filmagens dos ensaios de compressão axial dos prismas. Essas filmagens foram convertidas em imagens, quadro-a-quadro, permitindo uma análise visual do modo de ruptura dos prismas de forma mais detalhada. A partir dos resultados e análises, foi possível concluir para esses ensaios que:

a) para os prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças (P_M) e de paredes vazadas (P_V), o aumento da resistência da argamassa provoca um incremento de resistência no prisma. Todavia, a relação entre o aumento destas resistências não é linear. Ao aumentar 2,3 vezes a resistência à compressão axial da argamassa, a resistência média do prisma P_M aumentou cerca de 50% e do prisma P_V aumentou 57%;

b) ao contrário dos prismas de blocos cerâmicos, verificou-se que para os prismas de blocos de concreto o aumento da resistência da argamassa não contribuiu para o aumento da resistência dos prismas. Sendo assim, a análise visual do modo de ruptura dos prismas desse tipo de bloco foi de suma importância para identificar em que o aumento da resistência da argamassa contribui em cada combinação de prisma.

Em relação ao modo de ruptura e a proporção entre a resistência média da argamassa e a resistência característica do bloco na área líquida ($f_a/f_{bk,líq}$), observou-se os seguintes comportamentos, para cada tipo de bloco:

- bloco cerâmico de paredes maciças – para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ de até 49%, o modo de ruptura dos prismas se dá pelo esmagamento da junta de argamassa; para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ acima de 61%, a ruptura se dá por tração no bloco.
- bloco cerâmico de paredes vazadas – para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ de até 47%, o modo de ruptura dos prismas se dá pelo esmagamento da junta de argamassa; para uma razão $f_a/f_{bk,líq}$ acima de 59%, a ruptura se dá por tração no bloco.

- bloco de concreto – para uma razão $f_a/f_{bk,liq}$ de até 84% a ruptura se dá pelo esmagamento da junta de argamassa. Não foi possível observar a partir de qual razão o processo de falha se dá por tração no bloco.

Foram propostos modelos de previsão de resistência à compressão para os prismas analisados, baseado na equação proposta na EN 1996-1-1 (2002). As equações relacionam as propriedades de resistência característica do bloco na área bruta ($f_{bk,bru}$) com a resistência média dos corpos de prova de argamassas ensaiadas à compressão aos 28 dias (f_a).

Como o aumento da resistência da argamassa aparentemente não contribuiu para o aumento da resistência dos prismas de bloco de concreto, a equação de previsão de ruptura indica que a resistência característica dos prismas dependeria apenas da resistência do bloco, contrariando as normas de alvenaria que correlacionam o conjunto dos materiais. Sendo assim, foi proposta uma equação de previsão de resistência considerando a magnitude de tensão que desencadeou o modo de ruptura, ao invés da resistência última de compressão dos prismas. A nova equação assumiu valores muito próximos da Eurocode 6 para blocos de concreto.

Os dois tipos de blocos cerâmicos empregados no estudo possuíam resistências à compressão muito próximas, entretanto os prismas moldados com esses blocos apresentam uma significativa diferença de resistência à compressão, mesmo sendo combinados com as mesmas argamassas e moldados ao mesmo tempo. Os prismas de blocos cerâmicos de paredes maciças apresentam valores maiores de resistência quando comparado com os prismas de blocos de paredes vazadas.

É possível correlacionar esse comportamento com o fenômeno de confinamento da argamassa, provocado pela aderência entre a argamassa e o bloco. Os blocos de paredes maciças, por terem uma maior área de contato com a junta, têm uma maior capacidade de confinar a argamassa, elevando a resistência do prisma. Dessa forma, é possível concluir que para os blocos cerâmicos, quanto maior a razão A_{liq}/A_{bru} , maior é a resistência à compressão característica da alvenaria.

Ao analisar as imagens dos ensaios de compressão dos prismas de blocos cerâmicos, só foi possível observar visualmente o processo de propagação de falha com um nível de tensão muito próximo ao da ruptura. Verificou-se que conforme aumentou a resistência da argamassa, além de aumentar a resistência do prisma, mais brusca foi a sua ruptura. Somando-se a isso, também foi observado que para os blocos de paredes vazadas, que tem uma razão A_{liq}/A_{bru} menor que dos blocos de paredes maciças, apresentavam um modo de ruptura ainda mais abrupto, com grande acúmulo de energia interna.

No presente estudo foram utilizadas cinco resistências diferentes de argamassa industrializada e, para facilitar o entendimento das combinações dos prismas, elas foram enumeradas de 1 à 5, na ordem da resistência mais baixa até a mais alta. Os prismas de blocos cerâmicos foram combinados com as argamassas 2, 4 e 5, e os prismas de blocos de concreto foram combinados com as argamassas 1, 2 e 3.

Foram realizados ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos dessas argamassas, instrumentados, com o objetivo de traçar a curva tensão-deformação específica para verificar o comportamento não linear. A não linearidade remete-se à propagação das fissuras internas desde a zona de transição pasta-agregado para a matriz cimentícia, quando a argamassa começa a perder sua capacidade portante.

A partir dos gráficos foram delimitados os comportamentos de cada argamassa por meio de regiões sombreadas com o objetivo de traçar uma curva média e, a partir da curva, verificar a partir de qual nível de tensão a argamassa deixa de ser proporcional. Verificou-se que a não linearidade da curva tensão-deformação de todas as argamassas esteve na faixa de 51% a 61% da resistência à compressão média, mas não foi possível estabelecer uma correlação numérica entre o início do comportamento não linear das argamassas com o início da propagação do esmagamento das juntas de assentamento dos prismas de concreto.

Observou-se que quanto maior a resistência média da argamassa, maior é a carga de compressão do início da não linearidade da curva tensão-deformação específica e maior é a tensão de início do esmagamento da junta do prisma. A presença do confinamento e a perda de água da argamassa fresca para o bloco são os dois fatores que fazem com que a argamassa tenha um incremento de resistência. Diante disso, há uma complexidade ao tentar correlacionar a não linearidade da curva tensão-deformação específica da argamassa ensaiada em corpos de prova padrão com a argamassa como junta de assentamento.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração deste trabalho, foram verificadas algumas possibilidades de continuidade da pesquisa, a seguir listadas:

- a) Avaliar o modo de ruptura de prismas comprimidos com o auxílio de softwares de imagens e instrumentação dos prismas.
- b) Dar continuidade a esta pesquisa utilizando-se outras faixas de resistências de argamassa industrializada, prismas de três blocos de altura e pequenas paredes.

- c) Ensaiai prismas de blocos de concreto à compressão com argamassas industrializadas de resistências maiores, para verificar a partir de qual razão $f_a/f_{bk,liq}$ a ruptura do prisma se dá por tração no bloco.
- d) Avaliar o comportamento da curva tensão-deformação específica dos materiais componentes da alvenaria associando com o modo de ruptura dos prismas.
- e) Ensaiai prismas à compressão, com foco na questão da perda de aderência entre os componentes bloco-argamassa.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

_**NBR 6136**: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.

_**NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

_**NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

_**NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 247 p.

_**NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 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. 3 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. 9 p.

_**NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010. 93 p.

_**NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017. 26 p.

_**NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017. 29 p.

_ **NBR 15812-1:** Alvenaria Estrutural – Blocos Cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010. 41 p.

_ **NBR 15812-2:** Alvenaria Estrutural – Blocos Cerâmicos. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010. 28 p.

_ **NBR 15961-1:** Alvenaria Estrutural – Blocos de Concreto. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011. 42 p.

_ **NBR 15961-2:** Alvenaria Estrutural – Blocos de Concreto. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011. 35 p.

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. **Characterization of Minerals, Metals, and Materials**, 671-679. 2017.

ATKINSON, R. H.; NOLAND, J. L.; ABRAMS, D. P. **A deformation failure theory for stack-bond brick masonry prism in compression.** In: International Brick Masonry Conference, 7, 1985, Melbourne, Proceedings. v. 1, Melbourne: IBMAC, 1985. p. 577-592.

BARBOSA, C. S.; HANAI, J. B. **Comportamento de prismas de blocos vazados de concreto sob compressão axial e análise das propriedades mecânicas de seus materiais constituintes.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 11, n. 50, p. 75-90, 2009.

CAVALCANTI, M. V. S.; FRANCISCO A. M. X.; RODRIGUES, D. M.; SILVA, D. G. Otimização das juntas de assentamento de alvenaria estrutural em blocos de concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, V. 11, N. 7, P. 115 – 134, 2018.

CHEEMA, T. S.; KLINGNER, R. E. Compressive strength of concrete masonry prisms. American Concrete Institute, ACI Journal. v. 83, n. 1, p. 88-97, jan-fev, 1986.

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

EUROCODE 6. **EN 1996-1-1:** Design of masonry structures - Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Bruxelas, 2005. 131 p.

FONSECA, F. S.; MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R.; VERMELTFOORT, A. T. Deformation And Failure Mode Of Masonry. **In.: Proceedings of 12th North American Masonry Conference.** Denver, Colorado. 2015.

FORTES, E.S., PARSEKIAN, G. A., CAMACHO, J. S., FONSECA, F. S. Resistência à compressão da alvenaria estrutural com blocos de concreto de alta resistência. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.** V. 10, n. 6, p.1273-1319, dez. 2017.

JUSTE, A. E.; CORRÊA, M. R. S. Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetidas a esforços de compressão. **Cadernos de Engenharia de Estruturas,** São Carlos, v. 7, n. 29, p. 1-30, 2005.

KHOO, C. L. **A Failure criterion for brickwork in axial compression.** Tese de doutorado. University of Edinburgh, Edinburgo, Escócia. 1972.

KHOO, C.L.; HENDRY, A.W. (1973). A failure criterion for brickwork in axial compression. **Proceedings of third International Brick Masonry Conference.** Essen. pp. 139-45, 1973.

KUERTEN, R. J. **Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais.** 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

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

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, 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. (Coordenador). **Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho**. Ed. Blücher, São Paulo. 2015.

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.

MOHAMAD, G., FONSECA, F. S., VERMELTFOORT, A. T., MARTENS, D. R. W., & LOURENÇO, P. B. (2017). Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction and Building Materials**, 134, 489–496. 2017

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D. R. W.; LUBECK, A. Perda de rigidez da argamassa de assentamento da alvenaria comprimida: resultados preliminares. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, V. 11, N. 7, p. 279-295, 2018.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. J. C.; BARBOSA, F. R.; CARVALHO, J. R. de. Influência da espessura da argamassa de assentamento na resistência à compressão axial de prismas de blocos cerâmicos. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**, Maceió, v. 1, n. 1, p.1-10, out. 2012.

NASCIMENTO, M. R.; RAUPP-PEREIRA, F.; ROMAN, H. R. Estudo da influência da geometria de blocos cerâmicos na resistência mecânica de alvenaria estrutural. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Canela, RS. 2010.

PARSEKIAN. G. A. HAMID. A. A.; DRYSDALE. R. G. **Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural**. EdUFSCar. São Carlos. S.P. Brazil. 2012.

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

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

ROMAN, H. R.; SIGNOR, R.; RAMOS, A. S.; MOHAMAD, G. **Análise de Alvenaria Estrutural**. Universidade Corporativa Caixa. GDA. NPC. UFSC, 1998.

SÁNCHEZ, E. (Organizador). **Nova normalização brasileira para a alvenaria estrutural**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2013.

SANTANA, J. F. de A.; DE ARAÚJO, T. D. P. Avaliação numérica de prismas de blocos maciços de concreto para a alvenaria estrutural. **XXXVIII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**, Florianópolis, 2017.

SARHAT, S. R.; SHERWOOD, E. G. The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry. **Construction and Building Materials**, 58, 111–121, 2014.

SLIVINSKAS, T.; JONAITIS, B.; ZAVALIS, R. Mortar compressive strength estimation by applying various experimental test methods. **In: Procedia Engineering**, 2017.

STEIL, R. O. **Efeito da geometria do bloco de concreto e do tipo de argamassa no desempenho à compressão de prismas de alvenaria não grauteados**. 2003. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

THAICKAVIL, N. N.; THOMAS, J. Behaviour and strength assessment of masonry prisms. **Case Studies in Construction Materials**, 8, 23-38, 2018.

THAMBOO, J. A.; DHANASEKAR, M.; YAN, C. Effects of joint thickness, adhesion and web shells to the face shell bedded concrete masonry loaded in compression. **Australian Journal of Structural Engineering**, 2013.

ZHOW, Q.; WANG, F.; ZHU, F.; YANG, X. Stress-strain model for hollow concrete block masonry under uniaxial compression. **Materials and Structures**, Vol. 50:106, 2017.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DIMENSIONAIS, FÍSICOS E MECÂNICOS DOS BLOCOS ESTRUTURAIS

Tabela A. 1 – Ensaios dimensionais dos blocos cerâmicos BM e BV.

Exemplar	Dimensões efetivas médias dos blocos (mm)			Espessuras mínimas (mm)				Desvios máximos (mm)	
	L	H	C	Parede externa	Septos	Parede vazada	Vazados	Esquadro	Flecha
Blocos Cerâmicos de Paredes Maciças (BM)									
BM 01	137	189	289	21	14	51	94	1	0
BM 02	138	191	290	20	14	51	94	2	1
BM 03	137	189	290	21	14	51	94	2	1
BM 04	138	190	290	21	14	51	94	1	0
BM 05	138	190	290	21	14	50	94	1	0
BM 06	137	189	290	21	15	51	94	1	1
BM 07	137	189	290	21	15	51	93	2	1
BM 08	137	190	288	20	14	50	94	0	0
BM 09	137	190	289	20	14	49	94	1	1
BM 10	138	189	290	21	15	51	93	2	1
BM 11	137	188	290	21	14	51	93	1	1
BM 12	137	190	289	20	15	52	94	0	1
BM 13	138	189	290	21	14	49	94	1	1
Média	137	190	290	20,7	14,3	50,6	93,8	1,2	0,7
Blocos Cerâmicos de Paredes Vazadas (BV)									
BV 01	137	191	288	8	7	31	72	1	1
BV 02	137	191	287	8	7	32	71	2	1
BV 03	137	191	287	8	7	32	70	0	0
BV 04	137	189	288	8	7	32	70	1	0
BV 05	137	191	288	8	7	32	71	1	1
BV 06	137	190	287	8	7	32	72	1	1
BV 07	137	191	287	8	7	31	72	1	0
BV 08	137	191	287	8	7	31	72	0	0
BV 09	137	191	287	8	7	31	71	0	0
BV 10	137	191	287	9	7	31	71	2	1
BV 11	137	191	287	8	7	31	71	1	1
BV 12	138	191	287	8	7	31	71	2	1
BV 13	138	191	288	9	7	32	71	1	1
Média	137	191	287	8,2	7	31,5	71,2	1	0,6

Tabela A. 2 - Ensaio dimensionais dos blocos de concreto BC.

Bloco	Longitudinal (mm)		Paredes Transversais (mm)			Equivalente (mm/m)	Vazados Medidos (mm)				Raio da Mísula (mm)			
	Média	Mínimo	P1	P2	P3		1		2		1	2	3	4
BC 14	27	25	28	31	28	300	81	156	88	155	42	42	42	42
BC 15	28	28	27	29	29	293	85	157	86	156	47	46	47	46
BC 16	28	26	30	28	29	300	85	157	88	156	41	45	41	45
BC 17	27	25	28	30	27	293	89	157	88	157	46	46	46	46
BC 18	26	24	29	26	27	283	88	159	89	152	42	42	42	42
BC 19	28	27	29	27	29	293	86	156	85	157	43	45	43	45
Mínimo	24		26			-	81				-			

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS BLOCOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO

Tabela B. 1 – Resistência à compressão dos blocos cerâmicos de paredes maciças (B_M)

Exemplar	Carga de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)				
		Individual	Média	D.P.	C.V. (%)	Estatística
2678	455000	11,49	12,2	0,8	6,4	10,9
2679	540000	13,49				
2680	525000	13,21				
2681	500000	12,49				
2682	500000	12,49				
2683	510000	12,84				
2684	470000	11,83				
2685	475000	12,04				
2686	475000	12,00				
2687	425000	10,62				
2688	505000	12,71				
2689	490000	12,38				
2690	460000	11,49				

Tabela B. 2 – Resistência à compressão dos blocos cerâmicos de paredes vazadas (B_V)

Exemplar	Carga de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)				
		Individual	Média	D.P.	C.V. (%)	Estatística
7	435000	10,71	10,9	1,2	10,6	9,2
8	500000	12,40				
9	465000	11,50				
10	515000	12,78				
11	405000	10,05				
12	470000	11,58				
13	395000	9,80				
14	415000	10,26				
15	495000	12,28				
16	450000	11,08				
17	380000	9,36				
18	370000	9,25				
19	430000	10,59				

Tabela B. 3 – Resistência à compressão dos blocos de concreto (B_C).

Exemplar	Carga de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)				
		Individual	Média	D.P.	C.V. (%)	Estatística
14	500000	8,91	8,53	0,82	9,64	6,8
15	530000	9,48				
16	520000	9,34				
17	420000	7,54				
18	430000	7,78				
19	455000	8,15				