

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

LEONEL DE OLIVEIRA GUARNIERI
ENGENHEIRO CIVIL

**INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA GRAUTE/ BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONJUNTO**

Porto Alegre
2017

LEONEL DE OLIVEIRA GUARNIERI
ENGENHEIRO CIVIL

**INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA GRAUTE/ BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONJUNTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Porto Alegre
2017

LEONEL DE OLIVEIRA GUARNIERI

**INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA GRAUTE/ BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONJUNTO**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Rizzatti - UFSM

Prof. Dr. Jean Marie Desir - UFRGS

Prof. Dra. Luciani Somensi Lorenzi - UFRGS

AGRADECIMENTOS

Finalmente, mais um ciclo é encerrado; e este, em especial, foi desafiador. Não foi nada fácil conciliar a rotina de minha vida durante esses dois anos. Atender às demandas do trabalho, casa, família, amigos e, sobretudo, as responsabilidades do mestrado. Creio que tudo tenha sido válido, pois o conhecimento que adquiri ao longo desse período ninguém irá me roubar. Todavia, nada disso seria possível se não fosse pelo apoio e reconhecimento dessas pessoas que venho a agradecer.

Inicialmente, agradeço ao meu orientador, professor **Carlos Pérez Bergmann**, que me aceitou como seu orientando, mesmo eu seguindo uma linha de pesquisa relativamente distinta da sua. Posteriormente, agradeço imensamente ao meu coorientador, professor **Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**, que, apesar da vida ocupadíssima, se propôs a ajudar-me a dar sequência na pesquisa.

A todos do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), em especial aos técnicos **Edgar Lucas** e **Eurípedes Fontes**, que colaboraram muito com todos os ensaios através de seus conhecimentos. Também agradeço ao professor **Lucas Reginato**, por auxiliar nos ensaios de módulo de deformação do graute. Bem como ao “quase engenheiro” **Victor Dal Bosco**, por me ajudar no rompimento das amostras. Também não posso deixar de agradecer ao professor **Campagnolo**, que sempre se mostrou preocupado e disposto a auxiliar-me.

Ao professor **Fábio Pinto da Silva**, do Laboratório de Design e Seleção de Materiais, por gentilmente realizar a digitalização à laser dos blocos cerâmicos.

Ao amigo e professor **Marcus Daniel Friederich dos Santos**, que sempre me incentivou a ingressar no mestrado, pois, segundo ele, eu deveria aproveitar para estudar enquanto não tinha filhos.

À **Pauluzzi Blocos Cerâmicos** que, através de **Juan Carlos Germano**, forneceu os blocos para a pesquisa.

À mestre, arquiteta, fotógrafa, palestrante, surfista e futura doutora, **Milene Carvalho**, pois através de suas dicas ingressei no PPGE3M.

À **Lottici Incorporação e Construção**, empresa em que trabalho há 13 anos e que, através de **Alencar Lottici** e **Maria Teresa Menote**, proporcionou liberdade e apoio para trabalhar e estudar em conjunto.

À minha família, em especial meus pais, que sempre me ensinaram os conceitos de dignidade e responsabilidade, bem como me incentivaram a estudar e a batalhar pelos meus objetivos. Mesmo não entendendo todo o meu sofrimento, stress e falta de tempo, estiveram sempre ao meu lado dando suporte.

Por fim, agradeço à minha noiva, **Sabrina Jackson**, que esteve sempre ao meu lado durante este período. Foi paciente e resignada com minhas atitudes e pensamentos e, em um certo domingo, ajudou-me a medir os blocos e a carregá-los no carro.

TRABALHOS PUBLICADOS

GUARNIERI, L.; BERGMANN, L.; SILVA FILHO, L. Influência da aderência graute/bloco cerâmico estrutural na resistência mecânica do conjunto. XIII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estrutural, CINPAR, 2017, Crato/CE.

RESUMO

Atualmente, a alvenaria estrutural é utilizada em empreendimentos habitacionais de larga escala, nos quais as exigências de racionalização, controle, rapidez e custo são mais bem contemplados pelo sistema. No Brasil, existem empreendimentos de até 16 pavimentos construídos com blocos de alta resistência e alto controle tecnológico. A construção de edificações com maiores alturas exige o aumento da capacidade de absorção de esforços de compressão e tração. Para isso, são inseridas barras de aço nos vazados dos blocos e consolidadas com graute, a fim de aumentar a capacidade portante do conjunto. Entretanto, a influência da aderência graute/ bloco cerâmico no comportamento mecânico da alvenaria estrutural ainda é uma dúvida, visto que a NBR 15812 - 1 (ABNT, 2010) não especifica um valor de resistência para aderência graute/ bloco cerâmico, somente para graute/ aço. Frente a essa constatação, a presente pesquisa tem o objetivo de avaliar a influência da aderência graute/ bloco cerâmico estrutural no comportamento mecânico do conjunto, para determinar um valor de tensão de aderência que possa contribuir com a NBR 15812-1 (ABNT, 2010). Para isso, foram utilizados quatro tipos de blocos cerâmicos, com variação da geometria interna dos vazados e resistência mecânica à compressão. O graute foi padronizado em somente uma resistência, sendo essa de 30 MPa. Para desenvolvimento da pesquisa, inicialmente foi realizada a caracterização dos materiais e, posteriormente, realizados ensaios de *push-out*, resistência à compressão de blocos preenchidos com graute e microscopia óptica. Os resultados revelaram que a aderência graute/ bloco cerâmico estrutural é superior à resistência mecânica à tração do bloco cerâmico, e que a ruptura do conjunto ocorre primeiramente no bloco. Os resultados também constataram aumento da resistência mecânica à compressão axial nos blocos preenchidos com graute.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Bloco cerâmico. Graute. *Push-out*. Aderência.

ABSTRACT

Currently, structural masonry is used in large-scale housing projects, in which the requirements of rationalization, control, speed and cost are better covered by the system. In Brazil there are projects of up to 16 floors built with high resistance and high technological control blocks. The construction of buildings with higher heights requires the increase of the capacity of absorption of compression and traction forces. For this, steel bars are inserted into hollow blocks which are then consolidated with grout in order to increase the load-bearing capacity of the assembly. However, the influence of ceramic block/grout adhesion in the mechanical behavior of structural masonry is still unknown since the NBR 15812-1 (ABNT, 2010) standard does not specify a resistance value for grout/ceramic block adhesion, only for grout/steel adhesion. In view of this finding, the present research has the objective of evaluating the influence of the structural ceramic block/grout adhesion on the mechanical behavior of the assembly in order to determine a value of adhesion tension that can contribute to the NBR 15812-1 (ABNT, 2010) standard. For this purpose four types of ceramic blocks with a variation in the internal geometry of the hollow spaces and mechanical strength to compression were used. Grout was standardized in only one strength of 30 MPa. For development of the research, initially the characterization of the materials was performed and, subsequently, the tests of push-out and compressive strength of grout-filled blocks and light microscopy. The results showed that the grout/ceramic block adhesion is superior to the mechanical tensile strength of the ceramic block and, therefore, the rupture of the assembly will occur first in the block. The results also showed a significant increase of the mechanical resistance to axial compression in blocks filled with grout.

Keywords: Structural masonry. Ceramic block. Grout. *Push-out*. Adherence.

SUMÁRIO

TRABALHOS PUBLICADOS.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE GRÁFICOS	xv
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo Geral	4
2.2 Objetivos Específicos	4
2.3 Questões de Pesquisa	4
2.4 Delimitações.....	5
3 REVISÃO LITERÁRIA.....	6
3.1 Aderência	6
3.1.1 Aderência graute/ bloco cerâmico estrutural	9
3.2 Características dos materiais cerâmicos.....	15
3.3 Processo produtivo dos blocos cerâmicos	16
3.4 Alvenaria estrutural	18
3.5 Bloco cerâmico estrutural.....	19
3.5.1 Características geométricas	21
3.5.2 Características físicas.....	23
3.5.3 Características mecânicas.....	23
3.6 Juntas de argamassa	28

3.7 Graute	29
3.7.1 Resistência à compressão.....	30
3.7.2 Módulo de elasticidade do graute.....	31
3.8 Influência do graute na alvenaria estrutural	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA	40
4.1 Materiais utilizados.....	40
4.1.1 Bloco cerâmico	40
4.1.2 Cimento	46
4.1.3 Agregado Miúdo	48
4.1.4 Agregado Graúdo	49
4.1.5 Água de Amassamento	50
4.1.6 Graute.....	50
4.2 Ensaio de push-out	52
4.2.1 Preparação e moldagem dos corpos de prova	53
4.2.2 Rompimento dos corpos de prova	54
4.3 Ensaio de push-out com área de contato reduzida	55
4.3.1 Preparação e moldagem dos corpos de prova	55
4.3.2 Rompimento dos corpos de prova	57
4.4 Resistência à compressão com bloco cheio	57
4.5 Microscopia óptica	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 Caracterização dos blocos	59
5.2 Caracterização do graute	64
5.3 Push-out.....	66
5.3.1 Formas de ruptura do push-out	69

5.4	Push-out com área de contato reduzida.....	71
5.4.1	Formas de ruptura do push-out com área de contato reduzida	75
5.5	Resistência à compressão com bloco cheio	78
5.6	Microscopia óptica	79
6	CONCLUSÕES	81
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos mecanismos de aderência adesivo-substrato. Fonte: Costa (2014).....	8
Figura 2 - Modelo de transferência de forças entre graute e bloco. Fonte: Pereira de Oliveira (1994).....	11
Figura 3 - Determinação da aderência por cilhamento. Fonte: Pereira de Oliveira (1994).....	11
Figura 4 - Resistência de aderência em função da relação a/c (a) e área específica dos agregados (b). Fonte: Adaptado de Pereira de Oliveira (1994).....	12
Figura 5 - Esquema do ensaio de <i>push-out</i> . Fonte: Adaptado de Soric e Tulin (1987).....	13
Figura 6 - Esquema do ensaio de <i>push-out</i> com bloco cerâmico. Fonte: Izquierdo (2015).....	14
Figura 7 - Resultados do ensaio de <i>push-out</i> . Fonte: Adaptado de Fisher (2016)	15
Figura 8 - Processo de produção dos blocos cerâmicos. Fonte: Elaborado pelo autor.....	18
Figura 9 – Bloco de paredes vazadas (a), bloco de paredes externas e internas maciças (b), bloco de paredes externas maciças e internas vazadas (c) e bloco perfurado (d). Fonte: NBR 15270-2 (ABNT, 2005).....	20
Figura 10 – Pontos indicados para determinação das medidas efetivas das faces; largura (a), altura (b) e comprimento (c). Fonte: NBR 15270-3 (ABNT, 2005).....	21
Figura 11 – Medição das paredes externa e septos em blocos de paredes vazadas (a) e em blocos de paredes maciças (b). Fonte: NBR 15270-2 (ABNT, 2005).....	21
Figura 12 – Desvio em relação ao esquadro (a) e planeza das faces (b) e (c). Fonte: NBR 15270-3 (ABNT, 2005).....	22
Figura 13 - Valores de \emptyset em função da quantidade de blocos. Fonte: NBR 15270 – 2 (ABNT, 2005).....	24
Figura 14 – Esquema do ensaio de tração por fendilhamento. Fonte: Rizzatti (2012).....	26
Figura 15 - Representação esquemática do módulo de deformação secante (a) e módulo de deformação tangente inicial (b). Fonte: NBR 8522 (ABNT 2008).....	32
Figura 16 - Modelo de ruptura da alvenaria. Fonte: Adaptado de Hamid e Drysdale (1979).....	34

Figura 17 - Influência do graute na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Fonte: Arantes (2004).....	36
Figura 18 - Influência do graute na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Fonte: Arantes (2004).....	36
Figura 19 – Fluxograma do programa experimental.....	40
Figura 20 – Vista superior dos blocos utilizados na pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor.....	41
Figura 21 – Caracterização mecânica – resistência à compressão. Fonte: Acervo da pesquisa.....	43
Figura 22 - Índice de absorção d`água inicial (AAI). Fonte: Acervo da pesquisa.....	44
Figura 23 - Caracterização mecânica - tração por fendilhamento. Fonte: Acervo da pesquisa.....	45
Figura 24 – Digitalização a laser dos blocos. Fonte: Acervo da pesquisa.....	46
Figura 25 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos. Fonte: Acervo da pesquisa.....	48
Figura 26 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos. Fonte: Acervo da pesquisa.....	49
Figura 27 – Determinação da resistência à compressão do graute. Fonte: Acervo da pesquisa.....	51
Figura 28 - Determinação do módulo de elasticidade estática. Fonte: Acervo da pesquisa.....	52
Figura 29 – Preparação dos corpos de prova para <i>push-out</i> . Fonte: Acervo da pesquisa.....	53
Figura 30 – Moldagem dos corpos de prova para <i>push-out</i> . Fonte: Acervo da pesquisa.....	54
Figura 31 - Ensaio de <i>push-out</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.....	54
Figura 32 – Rompimento dos corpos de prova de <i>push-out</i> . Fonte: Acervo da pesquisa.....	55
Figura 33 – Preparação dos corpos de prova para <i>push-out</i> com área de contato reduzida. Fonte: Acervo da pesquisa.....	56
Figura 34 – Moldagem dos corpos de prova para <i>push-out</i> com área de contato reduzida. Fonte: Acervo da pesquisa.....	56
Figura 35 - Ensaio <i>push-out</i> com área de contato reduzida. Fonte: Elaborado pelo autor.....	57

Figura 36 – Compressão com blocos cheios de graute. Fonte Acervo da pesquisa .	58
Figura 37 – Microscopia óptica dos corpos de prova. Fonte: Acervo da pesquisa	58
Figura 38 - Digitalização da superfície dos vazados dos blocos. Fonte:Acervo da pesquisa.....	64
Figura 39 - Ruptura <i>push-out</i> com bloco de 7 e 10 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa	70
Figura 40 – Ruptura <i>push-out</i> com blocos de 15 e 18 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa.....	71
Figura 41 – Ruptura <i>push-out</i> com área de contato reduzida com bloco de 7 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa.....	76
Figura 42 – Ruptura <i>push-out</i> com área de contato reduzida com bloco de 10 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa.....	76
Figura 43 – Ruptura <i>push-out</i> com área de contato reduzida com bloco de 15 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa.....	77
Figura 44 – Ruptura <i>push-out</i> com área de contato reduzida com bloco de 18 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa.....	78
Figura 45 – Microscopia óptica das amostras; (a) bloco de 7 MPa, (b) bloco de 10 MPa, (c) bloco de 15 MPa e (d) bloco de 18 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados de f_{bk} e f_t	62
Gráfico 2 – Resultados da tensão de aderência no <i>push-out</i>	67
Gráfico 3 – Relação da carga de ruptura no <i>push-out</i> e área de contato	68
Gráfico 4 – Relação da carga de ruptura no <i>push-out</i> com a área líquida do bloco..	69
Gráfico 5 – Relação da carga de ruptura no <i>push-out</i> e área de contato reduzida ...	72
Gráfico 6 – Relação carga de ruptura no <i>push-out</i> com área de contato reduzida e área líquida do bloco	73
Gráfico 7 – Comparativo entre os resultados de tensão de aderência dos ensaios de <i>push-out</i> e <i>push-out</i> com área de contato	74
Gráfico 8 - Resultados de <i>push-out</i> , <i>push-out</i> área de contato reduzida e tração por fendilhamento.....	75
Gráfico 9 – Comparativo entre f_{bk} e $f_{bk,cheio}$	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência à tração por fendilhamento dos blocos cerâmicos	27
Tabela 2 - Traços de graute	30
Tabela 3 – Resumo dos resultados dos prismas.....	37
Tabela 4 – Influência do graute na alvenaria de blocos de concreto.....	38
Tabela 5 – Quantitativo de materiais para caracterização dos blocos	41
Tabela 6 - Caracterização química do cimento	47
Tabela 7 - Caracterização física do cimento	47
Tabela 8 - Caracterização mecânica do cimento	47
Tabela 9 - Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos.....	48
Tabela 10 - Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos	49
Tabela 11 - Traço do graute.....	50
Tabela 12 - Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos	59
Tabela 13 - Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos	60
Tabela 14 – Resistência característica à compressão dos blocos (f_{bk})	60
Tabela 15 – Resistência à tração por fendilhamento e relação $f_t/f_{bk,est}$	61
Tabela 16 - Determinação do índice de absorção d'água e índice de absorção d'água inicial	63
Tabela 17 – Determinação do volume de poros e porosidade aparente	63
Tabela 18 – Resultados de resistência à compressão do graute	65
Tabela 19 - Resultados do módulo estático de elasticidade à compressão e Poisson do graute	65
Tabela 20 - Resultados do <i>push-out</i>	66
Tabela 21 – Resultados do <i>push-out</i> com área de contato reduzida	71
Tabela 22 – Resultados da resistência à compressão dos blocos cheios.....	78
Tabela 23 – Resumo dos resultados da pesquisa.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	Índice de absorção d`água
AAI	Índice de absorção inicial d`água
A_b	Área bruta
A_c	Área de contato
A_{liq}	Área líquida
C	Comprimento
D	Desvio em relação ao esquadro
E_{ci}	Módulo de deformação tangente inicial
E_{cs}	Módulo de deformação secante
F	Planeza das faces
f_b	Resistência à compressão individual do bloco
f_{bk}	Resistência característica à compressão do bloco
$f_{bk,est}$	Resistência à compressão estimada do bloco
f_{bm}	Resistência à compressão média dos blocos
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{pk}	Resistência característica do prisma
f_t	Resistência à tração por fendilhamento
H	Altura
L	Largura
m_a	Massa aparente
m_s	Massa seca
m_u	Massa saturada
n	Quantidade de blocos da amostra
P	Carga
γ	Massa específica da água
Δp	Variação de massa
σ_a	Tensão de aderência
σ_{acr}	Tensão de aderência com área de contato reduzida

1 INTRODUÇÃO

A história da alvenaria no Brasil inicia por meio das técnicas construtivas derivadas, em sua maioria, de Portugal. Em busca de segurança de suas colônias, destacava-se a predominância da alvenaria de pedra, em fortes e quartéis. Tais sistemas estruturais comparavam-se à técnica construtiva de taipa, que necessitava de uma grande espessura de parede (ABCI, 1990). Consecutivamente, o tijolo foi considerado material nobre em substituição à taipa até a década de 1930. Nos anos seguintes, perde suas atribuições como solução estrutural para o concreto armado, restringindo-se ao preenchimento de vãos e a estruturas de pequeno porte (SILVA, 2003).

No Brasil, a alvenaria estrutural surgiu como uma técnica de construção apenas na década de 1960, pois, anteriormente, poderia ser considerada como uma “alvenaria resistente”, ou seja, fruto apenas de conhecimento empírico, como consequência da inexistência de regulamentos que fixassem critérios de dimensionamento e segurança dos elementos estruturais, de forma a relacionar as diferentes tensões atuantes à resistência do elemento. Nesse período, as edificações possuíam em sua maioria quatro pavimentos, sendo executadas e dimensionadas a partir de critérios baseados na experiência do construtor. Normalmente, as paredes dessas edificações eram constituídas por tijolos maciços (MOHAMAD, 2015).

No ano de 1966, foi construído o conjunto habitacional Central Park Lapa, em São Paulo, através do emprego de blocos de concreto. Essa obra foi realizada com paredes com espessura de 19 cm e quatro pavimentos. Em 1972, foi construído, no mesmo conjunto habitacional, quatro prédios de 12 pavimentos, em alvenaria armada. Em 1970, em São José dos Campos/SP, foi construído o edifício Muriti, com 16 pavimentos, em alvenaria armada de blocos de concreto (LOGULLO, 2006).

O uso de blocos cerâmicos em obras de alvenaria estrutural começa somente na década de 1980, com a introdução, no mercado da construção, de unidades com dimensões modulares e furos na vertical, que proporcionaram a passagem de instalações elétricas sem a necessidade de rasgos nas paredes (SÁNCHEZ, 2013).

No final da década de 1980 e início de 1990, o sistema ganhou força no Brasil através de parcerias com universidades e empresas, que proporcionaram pesquisas e criações de materiais e equipamentos. A partir desse momento, pode-se dizer que o conceito de alvenaria estrutural, dimensionada a partir de conceitos técnicos e detalhada de forma racional, substituiu a estrutura de alvenaria, que era construída com blocos maciços e de forma empírica. Desde então, as significantes melhorias nos materiais e os avanços na produção de blocos, métodos de cálculo e técnicas construtivas, contribuíram para que a alvenaria estrutural fosse reconhecida como uma solução economicamente eficiente para a construção contemporânea de edifícios, visto que blocos de alta resistência, argamassas e grautes industrializados são, hoje, disponíveis e contribuem para o aumento do desempenho estrutural e produtividade (PARSEKIAN *et al.*, 2013).

Segundo Rizzatti *et al.* (2012), o emprego do sistema construtivo em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos ganhou papel de destaque na construção habitacional através do desenvolvimento de projetos de pesquisa que focam no desenvolvimento de produtos capazes de demonstrar eficiência quando submetidos a carregamentos externos além do peso próprio.

Atualmente, é comum observar o uso de alvenaria estrutural em empreendimentos habitacionais de larga escala, nos quais as exigências de racionalização, planejamento, controle, rapidez e custo são melhores contemplados pelo sistema. Inúmeros edifícios residenciais são, hoje, construídos em alvenaria estrutural, mas comerciais ainda não são comuns, visto que o sistema é indicado quando não há previsão de alteração na arquitetura (PARSEKIAN *et al.*, 2013).

Segundo Carvalho (2017), o Rio Grande do Sul é referência no sistema de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, sendo o estado com os prédios mais altos do Brasil. Enquanto em outros estados esse tipo de construção se limita muitas vezes a edificações de, no máximo, cinco pavimentos, aqui há empreendimentos de até 16 pavimentos construídos com blocos de alta resistência e alto controle tecnológico.

De acordo com a NBR 15812 - 1 (ABNT, 2010), o sistema de alvenaria estrutural é basicamente composto pelos elementos bloco, argamassa, graute e armadura. Sendo a armadura inserida nos vazados dos blocos e consolidada com graute, a fim de proporcionar maior rigidez e absorver os esforços de tração e compressão das paredes (PARSEKIAN *et al.*, 2013). Logo, o conhecimento das interações entre esses elementos é necessário para entender o funcionamento do sistema e, conseqüentemente, reconhecer algumas limitações, pois seu comportamento depende não somente da qualidade de cada elemento empregado, mas também das interações físico-químicas que se processam entre eles (MOHAMAD *et al.*, 2011).

Foram realizadas pesquisas para compreender a influência do graute na alvenaria estrutural, mas poucos pesquisadores estudaram a aderência graute/bloco cerâmico quanto à resistência mecânica do conjunto. Dentre os trabalhos que estudaram a influência do graute e forma de ruptura da alvenaria estrutural, pode-se destacar Hamid & Drysdale (1979), Cheema e Klingner (1986), Soric & Tulin (1987), Pereira de Oliveira (1994), Mendes (1998), Garcia (2000), Romagna (2000), Arantes (2004), Grohmann (2006), Logullo (2006), Mohamad *et al.* (2011), Rizzatti *et al.* (2012), Camacho (2015), Izquierdo (2015) e Fisher (2016). Na pesquisa realizada por Soric & Tulin (1987), estudou-se a aderência graute/bloco de concreto estrutural. Já nas pesquisas realizadas por Pereira de Oliveira (1994), Izquierdo (2015) e Fisher (2016), foi estudada a aderência graute/bloco cerâmico estrutural.

Em virtude das diferentes características dos blocos cerâmicos, podem ocorrer diferentes interações com o graute. Portanto, pesquisas a respeito do tema são fundamentais para conhecer as interações entre os elementos constituintes da alvenaria estrutural com blocos cerâmicos e, conseqüentemente, aumentar as informações técnicas. A NBR 15812 - 1 (ABNT, 2010) recomenda que a influência do graute na resistência da alvenaria seja verificada em laboratório, mediante o emprego de ensaios de compressão de prismas, grauteados e argamassados nas condições empregadas na obra. No entanto, não especifica um valor de resistência para a aderência graute/bloco, somente para graute/aço.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da aderência graute/ bloco cerâmico estrutural no desempenho estrutural, quanto ao comportamento mecânico do conjunto, com variação da resistência e geometria dos blocos, bem como determinar um valor de aderência que possa contribuir com a NBR 15812-1 (ABNT, 2010).

2.2 Objetivos Específicos

Buscando atender ao objetivo principal da pesquisa, foram definidos como objetivos específicos:

- a) Avaliar a resistência mecânica à compressão axial do conjunto graute/ bloco cerâmico estrutural, com variação da resistência e geometria dos blocos;
- b) Determinar o módulo de elasticidade do graute e avaliar sua influência na ruptura do bloco cerâmico;
- c) Avaliar se com a redução da área de contato graute/ bloco cerâmico estrutural é possível determinar a tensão última de aderência.

2.3 Questões de Pesquisa

Em síntese, busca-se, com o desenvolvimento desta pesquisa, prover respostas para as seguintes perguntas:

- a) É possível obter a tensão de aderência graute/ bloco cerâmico?
- b) A aderência graute/ bloco cerâmico estrutural vai variar com a resistência mecânica à compressão dos blocos?
- c) Existe relação entre aderência graute/ bloco cerâmico estrutural e resistência mecânica à tração dos blocos?

2.4 Delimitações

Dentre as delimitações da pesquisa, estão:

- a) A fim de manter constante uma das possíveis variáveis, foi utilizado somente uma resistência de graute, sendo esse moldado em laboratório e com resistência à compressão estimada em 30 MPa;
- b) Adotou-se a mesma resistência de graute utilizado na pesquisa de Izquierdo (2015), a fim de comparar os resultados;
- c) Definiu-se que o estudo seria realizado no conjunto formado pelos elementos graute e bloco cerâmico estrutural, a fim de isolar outra variável da pesquisa, a argamassa de assentamento;
- d) Foram utilizados blocos cerâmicos do tipo meio bloco, com dimensões de 140 x 140 x 190 mm. Essa definição foi tomada a partir da maior estabilidade e segurança dos corpos de prova durante o rompimento na prensa;
- e) Decidiu-se por realizar somente ensaios de *push-out*, pois inicialmente foram realizados ensaios de *pull-out* e os resultados foram insatisfatórios.

Para realização do ensaio, foi inserida uma barra de aço de \varnothing 12,5 mm no vazado do bloco e, posteriormente, grauteado. Após 28 dias a barra foi tracionada, com o objetivo de romper a interface graute/ bloco. No entanto, como o comprimento de ancoragem era de 190 mm, sendo esse inferior ao comprimento mínimo por norma, ocorreu a ruptura na interface graute/ aço em todos os corpos de prova. Portanto, inviabilizou a continuidade do ensaio.

3 REVISÃO LITERÁRIA

3.1 Aderência

Aderência refere-se ao estado em que dois corpos diferentes são mantidos unidos por contato interfacial íntimo, de modo que a força mecânica ou o trabalho possam ser transferidos através da interface. As forças interfaciais que mantêm a união dos corpos podem surgir de intertravamento mecânico, forças de van der Waals, ligações químicas ou atração eletrostática. A resistência mecânica do sistema não é determinada somente pelas forças interfaciais, mas também pelas propriedades da zona interfacial (EBNESAJJAD, 2014).

A interface pode ser conceituada como a superfície ao longo da qual duas substâncias diferentes, ou fases distintas de um mesmo material, se encontram. São nas interfaces que ocorrem a maioria das interações entre sólidos, líquidos e gases de naturezas distintas. Na área de engenharia, as superfícies são responsáveis pela capacidade de um sistema transferir tensões entre diferentes volumes. Nesse aspecto, o estudo de superfícies e interfaces permitiria auxiliar na compreensão de determinados mecanismos de fratura, tais como a aderência entre substratos e argamassas (PAGNUSSAT, 2013).

A adesão é um fenômeno interfacial que ocorre nas interfaces de aderentes e adesivos, mas segundo Ebnesajjad (2014), não existe uma teoria unificada para explicar o conjunto de fenômenos que ocorre na adesão, mas existem diferentes teorias aplicáveis a casos particulares. Na maioria dos casos, nenhuma teoria é capaz de explicar plenamente o fenômeno de adesão, sendo necessária a união de várias delas.

Para Romero (2010), a dificuldade em entender o fenômeno de adesão está na difícil conciliação entre o estudo em níveis microscópicos (molecular) e a nível macroscópico (formação/ quebra de uma interface) e, por isso, podemos classificar adesão em diferentes modelos:

- a) modelo da adesão mecânica;
- b) modelos da adesão específica (teoria elétrica, teoria da difusão e teoria da absorção).

De acordo com Pagnussat (2013), o fenômeno que determina a colagem de um material a uma superfície é definido pela soma de uma série de forças mecânicas e físico-químicas, que se sobrepõem e se influenciam mutuamente. Não é possível separar essas forças umas das outras, mas pode-se distingui-las da seguinte forma:

- a) parcela devida ao intertravamento mecânico, resultante da ancoragem mecânica dos poros e das irregularidades da superfície;
- b) parcela devida às forças eletrostáticas, no que diz respeito à diferença de eletronegatividades dos materiais;
- c) e, por fim, os demais mecanismos de adesão que se relacionam com as forças intermoleculares e químicas de ligação que ocorrem nas interfaces de sistemas heterogêneos.

Para Ebnesajjad (2014), o intertravamento mecânico ocorre pela penetração do adesivo nos poros, cavidades e irregularidades superficiais do substrato através do deslocamento do ar preso na interface, formando fortes ligações em substratos rugosos e porosos.

De acordo com Costa (2014), a aderência química resulta de forças de atração moleculares entre as fases: ligações primárias – iônicas, covalentes e metálicas – e secundárias – forças intermoleculares, também denominadas forças de van der Waals. Já a aderência mecânica depende da estrutura física da superfície do substrato e da capacidade de molhamento do produto aplicado sobre o substrato, que ainda no estado fresco, deve ser capaz de penetrar nas irregularidades superficiais (poros e rugosidade), exercendo a ação de ancoragem após a solidificação.

Para Romero (2010), a aderência é um fenômeno superficial gerado por forças na superfície dos corpos. A interação entre as moléculas da superfície adesiva e aderente são as responsáveis pela geração das forças e, portanto, quanto maior a superfície de contato entre os corpos, maior será a força de aderência gerada.

Segundo Costa (2014), a topografia define a morfologia de uma superfície, sendo essa dividida entre rugosidade e textura. A rugosidade é caracterizada por alterações da topografia da superfície, incluindo picos e vales com tamanhos e distribuição aleatória. Pode ser resultado da estrutura cristalina do material, do processo de fabricação ou acabamento superficial. Textura é qualquer configuração da morfologia da superfície com dimensões e distribuição definidas.

A porosidade pode ser considerada um caso especial de textura, consistindo de poros individuais ou interconectados na estrutura do material.

O modelo do intertravamento mecânico não pode ser considerado universal, pois não considera os fatores que ocorrem em nível molecular na interface adesivo/substrato. Numa superfície topográfica idealizada, perfeitamente lisa, tal como mostra a Figura 1 (a), a aderência é essencialmente química, não havendo parcela mecânica, pois não há qualquer tipo de penetração da matriz no substrato. Isso também ocorre em algumas superfícies topográficas irregulares se os esforços aplicados forem perfeitamente normais ao plano, tais como os exemplos mostrados nas Figuras 1 (b) e (c). Nestes dois casos, o aumento da aderência pode ser atribuído simplesmente ao acréscimo de área de contato interfacial, pois, se não houvessem ligações químicas, haveria apenas o encaixe entre as fases. De fato, o travamento mecânico só irá ocorrer se o substrato apresentar irregularidades que permitam a ancoragem do adesivo, tal como exibem as Figuras 1 (d) e (e).

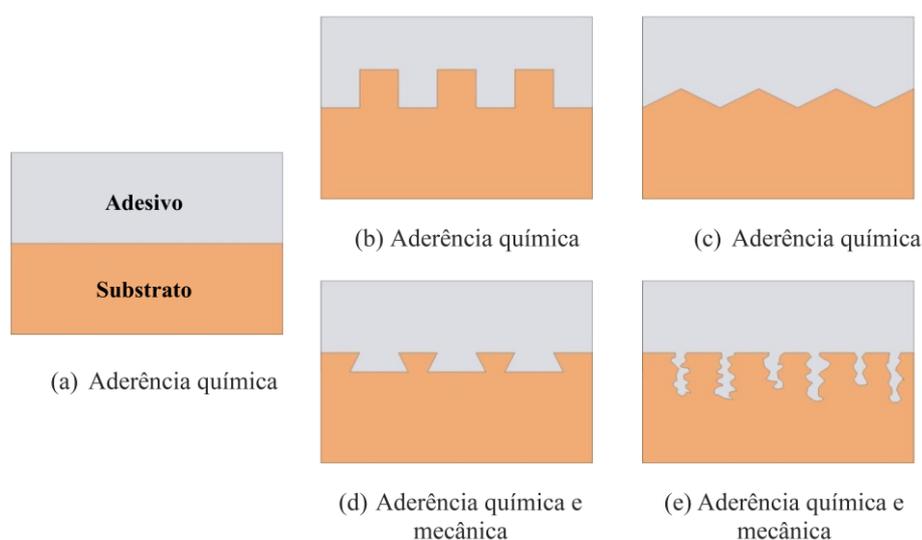


Figura 1 - Representação esquemática dos mecanismos de aderência adesivo-substrato.

Fonte: Costa (2014)

Carasek (1996) verificou que a aderência argamassa/ bloco decorre do intertravamento da etringita, que é o principal produto de hidratação do cimento, formado no interior dos poros dos substratos absorventes. O aumento de etringita nessas regiões ocorreria por serem esses os primeiros produtos de hidratação a serem formados, resultado da dissolução da gipsita adicionada ao clínquer de cimento Portland, liberando íons sulfato e cálcio que reagem com os aluminatos e o cálcio. Esses seriam os primeiros produtos a serem succionados junto com a água para o interior dos poros, e responsáveis pela microancoragem à base absorvente.

A pesquisa realizada por Polito (2010) teve como objetivo avaliar a aderência de revestimento argamassado sobre substrato de tijolos cerâmicos. Os resultados mostraram que a aderência se dá pelo intertravamento dos cristais de etringita e pela penetração dos mesmos no interior dos poros do substrato. Foram visualizados cristais de etringita formados no interior dos poros do substrato a uma profundidade de até 500µm. Essa penetração foi confirmada através da observação das variações nas concentrações de elementos químicos em função da profundidade, utilizando-se a técnica de FRX. Ainda segundo Polito (2010), a zona de transição é a região de contato entre a pasta e o substrato e, assim como no concreto, essa região apresenta-se como o elo mais frágil do sistema, visto que a sucção do substrato, que retira água da pasta, causa uma variação do grau de hidratação da argamassa, sendo que a menor hidratação se dá próxima à interface, gerando uma região de menor resistência.

3.1.1 Aderência graute/ bloco cerâmico estrutural

Para Pereira de Oliveira (1994), os efeitos de parede e de sucção do bloco podem influenciar a concentração da solução cimentícia na zona de transição. O efeito de exsudação, somado à própria pressão hidrostática da coluna do graute, facilita a migração d'água e, portanto, promove um aumento da concentração d'água na zona de transição, estabelecendo uma relação água/ cimento bem mais elevada que o da parte central do graute. Segundo o autor, graute e bloco são considerados pelos projetistas como um material homogêneo. Logo, implica na hipótese da existência de uma aderência perfeita entre os dois materiais.

Ramalho (2003) fala que o conjunto formado pelos componentes bloco, graute e armadura, trabalha monoliticamente, de maneira análoga ao que ocorre com o concreto armado. Para isso, o graute deve envolver completamente as armaduras e aderir tanto a ela quanto ao bloco, de modo a formar um conjunto único.

Segundo Gallegos (1995), unidades sinterizadas como tijolos e blocos cerâmicos tendem a apresentar uma rede de poros similar a condutos cilíndricos de textura suave; substratos de matrizes à base de cimento Portland, por sua vez, apresentariam poros comparáveis a várias esferas secantes de textura mais rugosa, possivelmente devido à presença de produtos de hidratação envolvendo os agregados do esqueleto granular do concreto. No caso de unidades cerâmicas, os mecanismos de aderência entre argamassa e base são influenciados por aspectos microestruturais, muito embora grande parte das abordagens leve em conta apenas aspectos macroestruturais.

Segundo Pereira de Oliveira (1994), a aderência graute/ bloco é influenciada pelas irregularidades microscópicas e macroscópicas da superfície, visto que o preenchimento desses poros forma pontos de ancoragem, que imobiliza mecanicamente o deslizamento e, portanto, a ruptura da aderência dá-se pela quebra desses pontos de ancoragem. Também explica que a força (F) é transmitida ao bloco por uma compressão (σ_b) no plano perpendicular à essa tensão e por uma aderência (τ_a) entre as paredes verticais em contato com o graute. Logo, a ruptura da aderência deverá ocorrer pela tensão (τ_a) e também pela resistência de cisalhamento do graute (τ_{mb}), conforme é mostrado na Figura 2.

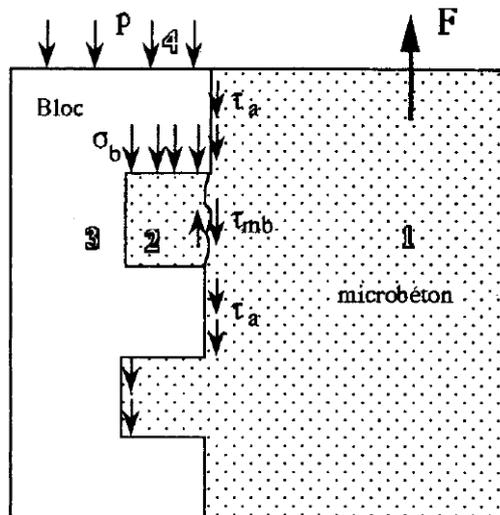


Figura 2 - Modelo de transferência de forças entre graute e bloco. Fonte: Pereira de Oliveira (1994)

O método proposto por Pereira de Oliveira (1994), para determinar a resistência de aderência, usou blocos de concretos preenchidos com diferentes tipos de graute. Após os blocos serem preenchidos e curados, foram cortados em forma paralelepípedica, conforme mostrado na Figura 3 (a). Então, os corpos de prova foram rigidamente fixados e a carga foi aplicada somente na parede do bloco, conforme é mostrado na Figura 3 (b).

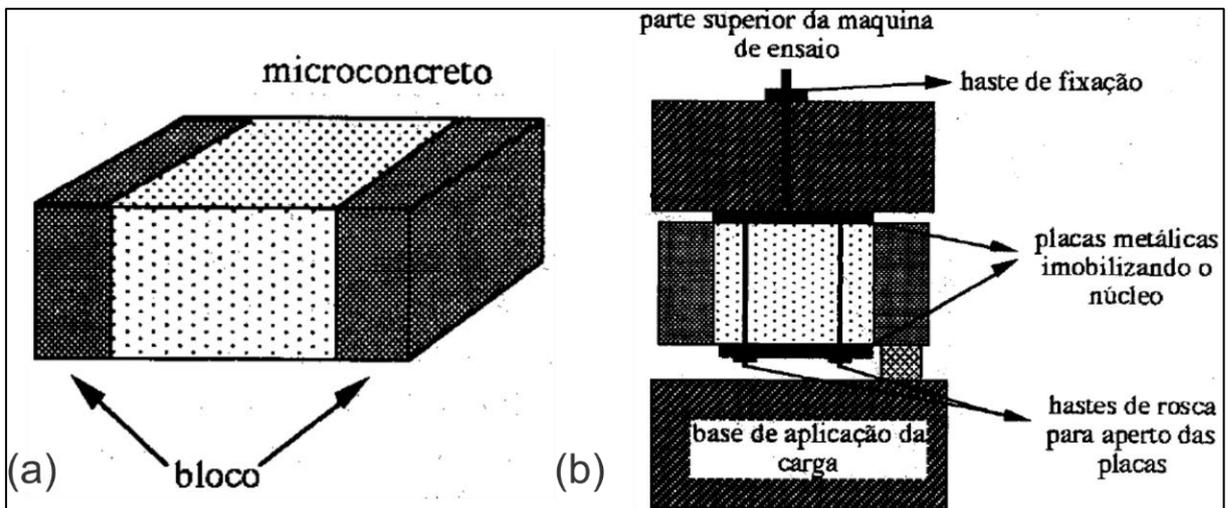


Figura 3 - Determinação da aderência por cilhamento. Fonte: Pereira de Oliveira (1994)

Os resultados indicaram que o aumento da relação água/ cimento proporciona ao graute uma sobra de água para hidratação do cimento, visto que ocorre uma perda de água para o bloco devido à absorção capilar, mas também aumenta a retração plástica. A diminuição da relação água/ cimento aumentou a resistência de aderência, conforme mostrado na Figura 4 (a). Também ocorreu variação da aderência graute/ bloco em função da área específica dos agregados, visto que a aderência cresceu com o aumento da área específica destes, chegando a um “ponto ótimo” e, posteriormente, ocorrendo a diminuição, conforme mostra a Figura 4 (b).

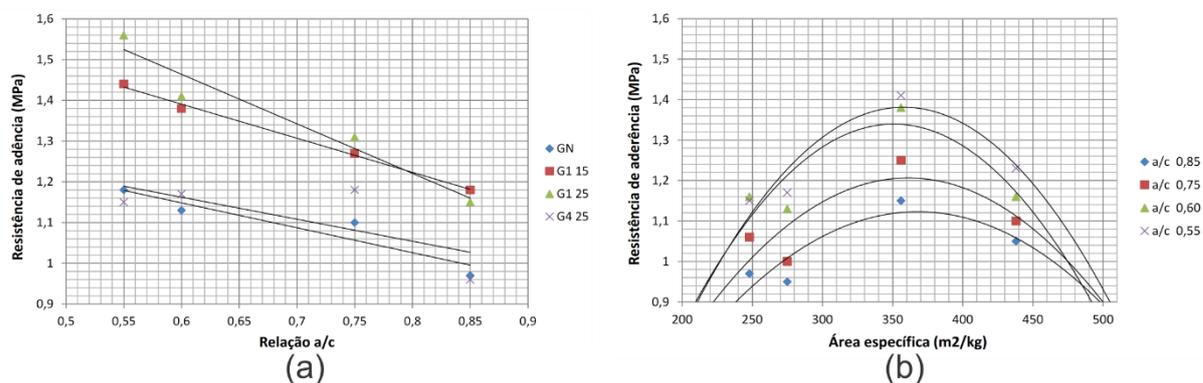


Figura 4 - Resistência de aderência em função da relação a/c (a) e área específica dos agregados (b). Fonte: Adaptado de Pereira de Oliveira (1994)

Soric e Tulin (1987) estudaram a aderência da alvenaria armada de blocos de concreto e verificaram que dois tipos de aderências podem ser considerados no desempenho da alvenaria armada: a aderência entre armadura e graute e a aderência entre bloco e graute. Segundo os pesquisadores, a aderência graute/ bloco está, preliminarmente, limitada pela adesão que pode se desenvolver na interface. Para determinar a aderência graute/ bloco de concreto, Soric e Tulin confeccionaram corpos de prova de *push-out*, que consistiram em um meio bloco completamente grauteado. Conforme mostrado na Figura 5, o graute foi carregado à compressão através de um prato de prensa na superfície superior, sendo suportado apenas pelo perímetro da alvenaria na superfície inferior. Os resultados apontaram uma média da tensão de aderência de 1,52 MPa, calculada a partir da divisão da carga máxima pela área de contato entre graute e bloco de concreto.

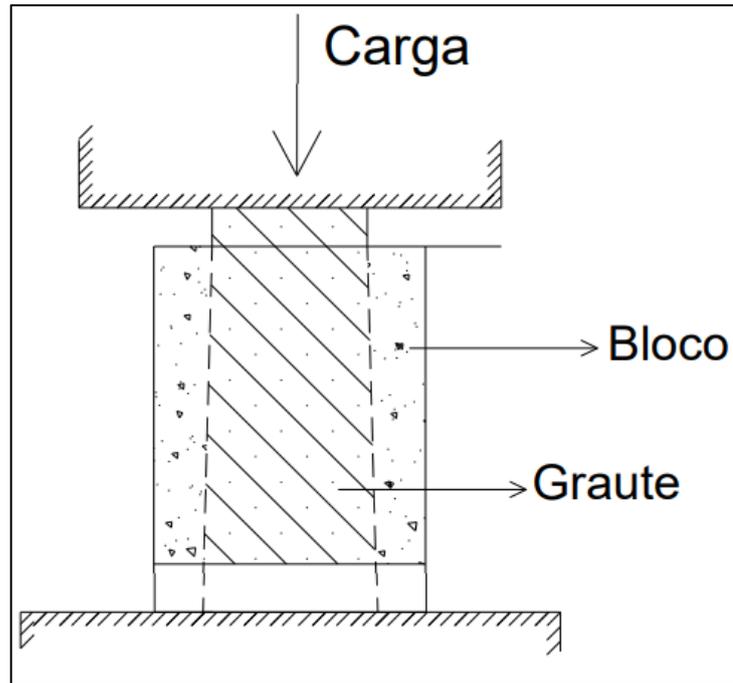


Figura 5 - Esquema do ensaio de *push-out*. Fonte: Adaptado de Soric e Tulin (1987)

Na pesquisa desenvolvida por Izquierdo (2015), foram realizados ensaios de *push-out* com blocos cerâmicos e de concreto, a fim de identificar a tensão de aderência graute/ bloco. Os corpos de prova foram constituídos de blocos cerâmicos com f_{bk} de 7,81 MPa e blocos de concreto com f_{bk} de 8,68 MPa. Para ambos os blocos, foram moldados corpos de prova usando grautes com f_{ck} de 14 e 30 MPa. Para a realização do ensaio, o graute foi carregado à compressão diretamente pelo prato da prensa, na superfície superior, sendo suportado apenas o perímetro do bloco na superfície inferior, conforme mostra o esquema da Figura 6. A tensão de aderência foi calculada dividindo-se a carga máxima obtida, pela área da superfície de contato entre o graute e bloco.

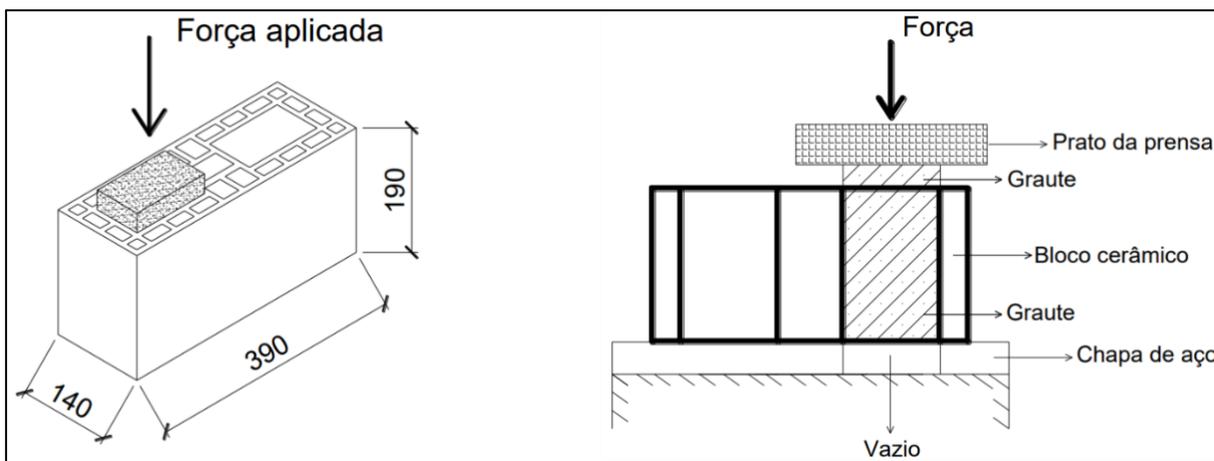


Figura 6 - Esquema do ensaio de *push-out* com bloco cerâmico. Fonte: Izquierdo (2015)

Os resultados de Izquierdo (2015) apontaram que há uma boa aderência graute/ bloco de concreto, suficiente para evitar o escorregamento do graute. Já os blocos cerâmicos, segundo a autora, não apresentaram boa aderência, visto que a tensão de aderência obtida foi de 0,16 MPa para graute com f_{ck} de 14 MPa e 0,19 MPa para graute com f_{ck} de 30 MPa.

Seguindo na linha de pesquisa de Izquierdo, Fisher (2016) realizou ensaio de *push-out* em corpos de prova constituídos de bloco cerâmico e graute. Foram moldados corpos de prova variando a resistência mecânica do bloco (f_{bk}) e do graute (f_{ck}). Os resultados apontaram variação para a tensão de aderência, conforme mostrado na Figura 7, mas valores superiores aos obtidos por Izquierdo (2015). Também mostrou que os corpos de prova constituídos de graute com maior resistência, como o de 35 MPa, apresentam piora na tensão de aderência.

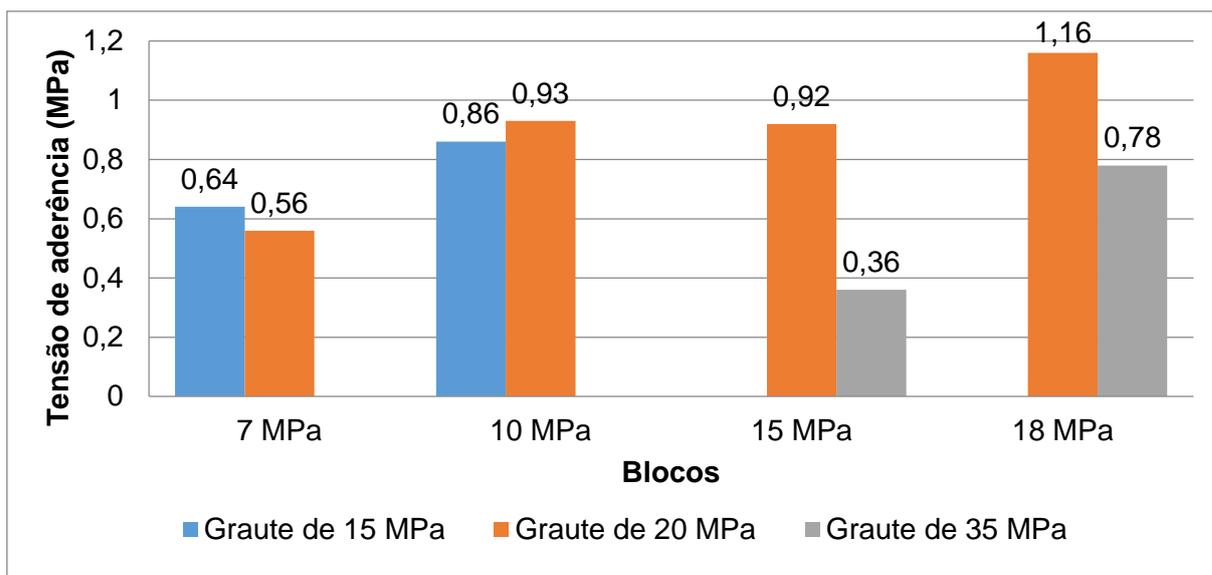


Figura 7 - Resultados do ensaio de *push-out*. Fonte: Adaptado de Fisher (2016)

3.2 Características dos materiais cerâmicos

As cerâmicas são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos. Na maioria das vezes são óxidos, nitretos e carbetos. O termo cerâmica vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria queimada”, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são obtidas através de um processo de tratamento térmico à alta temperatura (CALLISTER, 2012).

Em temperatura ambiente, as cerâmicas quase sempre fraturam antes que qualquer deformação plástica ocorra em resposta à aplicação de uma carga de tração. O processo de fratura frágil consiste na formação e propagação de trincas através da seção transversal de um material em uma direção perpendicular à da carga aplicada. O crescimento da trinca nas cerâmicas pode ser tanto transgranular (através dos grãos), quanto intragranular (através do contorno de grãos) (CALLISTER, 2012).

Os limites de resistência medidos na maioria dos materiais cerâmicos são, substancialmente, menores que aqueles estimados teoricamente a partir das forças de ligação interatômica. Isso pode ser explicado pela existência de defeitos muito pequenos e onipresentes no material, que servem como concentradores de tensão (CALLISTER, 2012).

De acordo com Callister (2012), as argilas são compostas por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), que contêm água quimicamente ligada. Elas possuem uma ampla faixa de características físicas, composições químicas e estruturas. As impurezas mais comuns incluem compostos de bário, cálcio, sódio, potássio e ferro, e ainda alguma matéria orgânica. Os minerais argilosos mais comuns apresentam uma estrutura caolinita que, quando adicionado água, as moléculas posicionam-se entre as lâminas em camadas e formam uma película fina ao redor das partículas de argila. Logo, as partículas ficam livres para se moverem umas sobre as outras, o que é responsável pela plasticidade resultante da mistura água-argila.

3.3 Processo produtivo dos blocos cerâmicos

Devido à sua plasticidade, uma das técnicas utilizadas para conformação da argila é a conformação hidrolástica por extrusão, na qual uma massa cerâmica plástica é forçada, através de uma matriz, por meio de uma rosca sem fim, acionada por um motor, e o ar é removido em uma câmara de vácuo para aumentar a densidade. Tijolos, tubos, blocos cerâmicos e azulejos são, todos, geralmente fabricados usando conformação hidrolástica (CALLISTER, 2012).

O processo produtivo dos blocos cerâmico mostrado na Figura 8 inicia-se na extração da argila nas jazidas e posterior armazenamento em camadas, a fim de realizar o sazonalamento, também chamado descanso do material. Então, os diferentes tipos de argilas, que serão empregadas na fabricação dos blocos, são espalhados em camadas, formando um sanduíche. A partir dessa etapa, a argila é enviada para a produção dos blocos cerâmicos, passando pelo homogeneizador, caixão alimentador e laminador, até chegar à extrusora.

A extrusora (ou maromba) possui a parte do misturador da argila, o vácuo onde retira-se o ar e a parte do canhão, onde a argila será empurrada por hélices, até que esta barra confinada de argila seja conformada propriamente através de um contato com uma fôrma (matriz ou boquilha). Assim que a argila recebe a forma de bloco, podem ser adicionados os marcadores para fazer a identificação do produto (lote, resistência e informações do fabricante), conforme a NBR 15270 - 2 (ABNT, 2005) e, na sequência, é realizado o corte no tamanho correto.

Após a conformação da argila através da extrusão, as peças cerâmicas passam por um processo de secagem, que tem o objetivo de remover quase que totalmente a água presente na peça. Esse processo é crítico, pois pode gerar defeitos nas peças. Por isso, é imprescindível controlar a taxa de remoção da água, visto que a secagem nas regiões internas de um corpo é realizada pela difusão das moléculas de água para a superfície, onde ocorre sua evaporação. Caso a taxa de evaporação seja maior que a taxa de difusão, a superfície secará mais rapidamente que o interior e, conseqüentemente, ocorrerá defeitos. Logo, o processo de secagem inicia-se com temperatura baixa e umidade relativa do ar alta e, gradualmente, as grandezas invertem-se até, por fim, atingir uma alta temperatura e uma umidade relativa do ar baixa. Durante a secagem existe o chamado ponto crítico, que é quando ocorre a maior contração entre as partículas devido à remoção da película de água que as separavam.

Após a secagem, as peças cerâmicas são cozidas a uma temperatura entre 900°C e 1400°C e, durante este processo, a densidade e resistência mecânica são aumentadas. Nesse processo ocorre a vitrificação, que consiste na formação gradual de um vidro líquido que flui para o interior e preenche parte do volume dos poros. O grau de vitrificação controla as propriedades da peça cerâmica à temperatura ambiente, tais como: resistência mecânica, durabilidade e massa específica. Os tijolos de construção são cozidos normalmente em torno de 900°C e são relativamente porosos (CALLISTER, 2012).

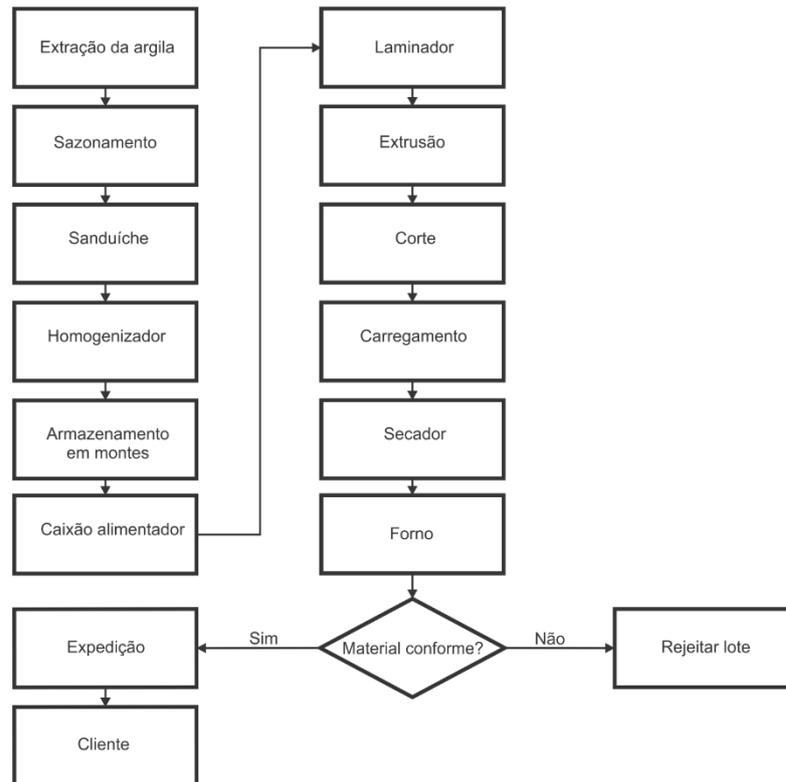


Figura 8 - Processo de produção dos blocos cerâmicos. Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural pode ser entendida como o processo construtivo no qual os elementos são os responsáveis por resistir e transmitir os esforços solicitantes, sendo os componentes e elementos de alvenaria estrutural projetados, dimensionados e executados de forma racional (CAMACHO, 2006).

De acordo com Camacho (2006), a alvenaria estrutural pode ser classificada da seguinte forma:

- Alvenaria estrutural armada: processo construtivo em que, por necessidade estrutural, os elementos resistentes possuem armadura disposta nos vazados dos blocos e, posteriormente, são preenchidos com graute para solidarizar todos os componentes;

- Alvenaria estrutural não armada: processo construtivo empregado em edificações de baixa altura; caracteriza-se por não usar nenhum tipo de armadura, exceto em regiões de cintas, vergas e contravergas;

- Alvenaria estrutural parcialmente armada: processo construtivo em que alguns elementos resistentes são projetados como armados e outros como não armados. De uma forma geral, essa definição é empregada somente no Brasil;

- Alvenaria estrutural protendida: processo construtivo em que existe uma armadura ativa de aço contida no elemento resistente.

Segundo a NBR 15512 - 1 (ABNT, 2010), a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos é composta por paredes estruturais que admitem os carregamentos da estrutura, sendo ela formada por componentes e elementos.

Os componentes são as menores partes constituintes dos elementos da estrutura. Os principais são: bloco, junta de argamassa, graute e armadura. Já os elementos são as partes da estrutura, suficientemente elaboradas, constituídas da união de dois ou mais componentes. Dentre os principais elementos, destacam-se: parede, enrijecedor, cinta, viga, contraverga, verga e coxim (ABNT, 2010).

3.5 Bloco cerâmico estrutural

De acordo com Parsekian *et al.* (2013), os tijolos cerâmicos são as unidades de alvenaria mais utilizadas ao longo do tempo em várias partes do mundo. O fato de existirem jazidas em diferentes regiões, favorece economicamente o uso do material. Fatores determinantes, como o largo histórico de durabilidade e a baixa manutenção, fizeram com que blocos e tijolos cerâmicos sejam utilizados até os dias atuais.

Segundo a NBR 15270 - 2 (ABNT, 2005), bloco cerâmico estrutural é um componente da alvenaria estrutural que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm. Conforme mostra a Figura 9, os blocos cerâmicos estruturais são classificados em: bloco estrutural de paredes vazadas (a), bloco estrutural de paredes externas e internas maciças (b), bloco estrutural de paredes externas maciças e internas vazadas (c) e bloco estrutural perfurado (d).

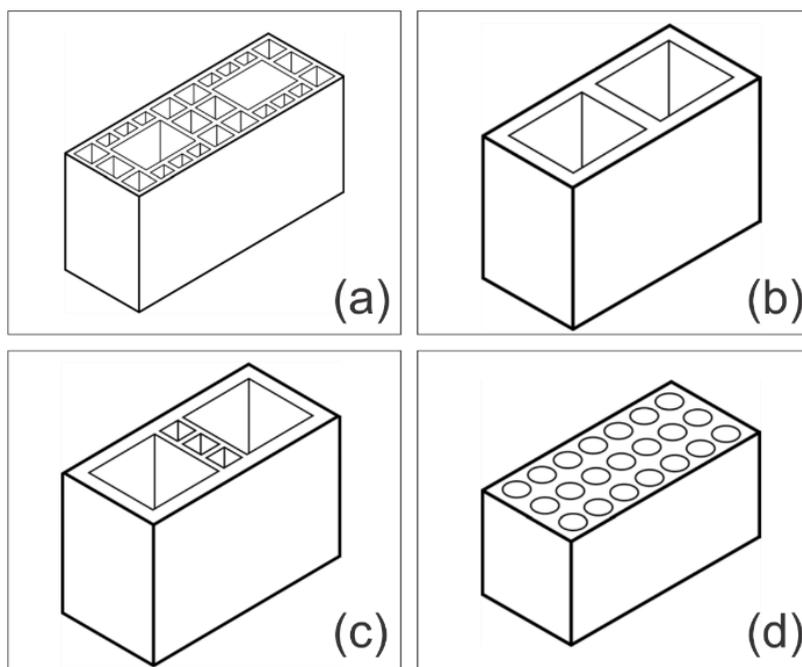


Figura 9 – Bloco de paredes vazadas (a), bloco de paredes externas e internas maciças (b), bloco de paredes externas maciças e internas vazadas (c) e bloco perfurado (d). Fonte: NBR 15270-2 (ABNT, 2005)

A NBR 15270-2 (ABNT, 2005) estabelece requisitos para a identificação dos blocos, e o não atendimento desses em qualquer corpo de prova da amostragem é suficiente para a rejeição de todo o lote. Dessa forma, os blocos são marcados contendo identificação da empresa, dimensões de fabricação em centímetros, as letras *EST*, indicando que se trata de um componente estrutural, e, por fim, indicação da rastreabilidade, que possibilita ao fabricante identificar o lote ao qual o bloco pertence. Além desse requisito de identificação, o bloco não deve apresentar defeitos como quebras, superfícies irregulares ou deformações que impeçam o seu emprego na função especificada.

Os blocos devem atender a requisitos de características visuais, geométricas, físicas e mecânicas, conforme preconizado pela NBR 15270 - 2 (ABNT, 2005). Para determinação das características geométricas (largura, altura, comprimento, espessura das paredes externas e septos, planeza das faces, desvio em relação ao esquadro e área bruta e líquida) e para ensaio de determinação da resistência característica à compressão, a amostra é constituída de treze blocos. Já para a determinação índice de absorção d'água (*AA*) e absorção d'água inicial (*AAI*), a amostra é constituída de seis blocos.

3.5.1 Características geométricas

Uma característica importante dos blocos cerâmicos é a precisão dimensional, que é preconizada pela NBR 15270 - 2 (ABNT, 2005). Os valores de largura (L), altura (H) e comprimento (C), são obtidos a partir de medições nos pontos indicados na Figura 10. As tolerâncias dimensionais individuais relacionadas à dimensão efetiva são de 5 mm. Já as tolerâncias dimensionais relacionadas à média das dimensões efetivas são de 3 mm.

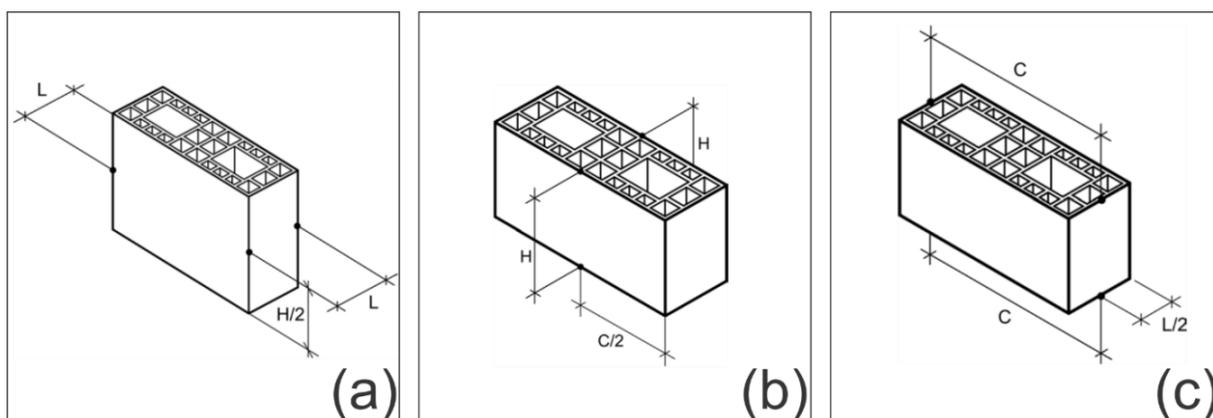


Figura 10 – Pontos indicados para determinação das medidas efetivas das faces; largura (a), altura (b) e comprimento (c). Fonte: NBR 15270-3 (ABNT, 2005)

A espessura das paredes externas e dos septos devem ser obtidas através de quatro medições, no mínimo, de acordo com os pontos indicados na Figura 11, e buscando-se sempre a parede de menor espessura. Nos blocos de paredes vazadas, a espessura mínima dos septos deve ser de 7 mm e das paredes externas deve ser de no mínimo, 8 mm, conforme mostra a Figura 11 (a). Já para os blocos com paredes maciças, a parede externa deve ter espessura mínima de 20 mm e a interna, 8 mm, conforme indicado na Figura 11 (b).

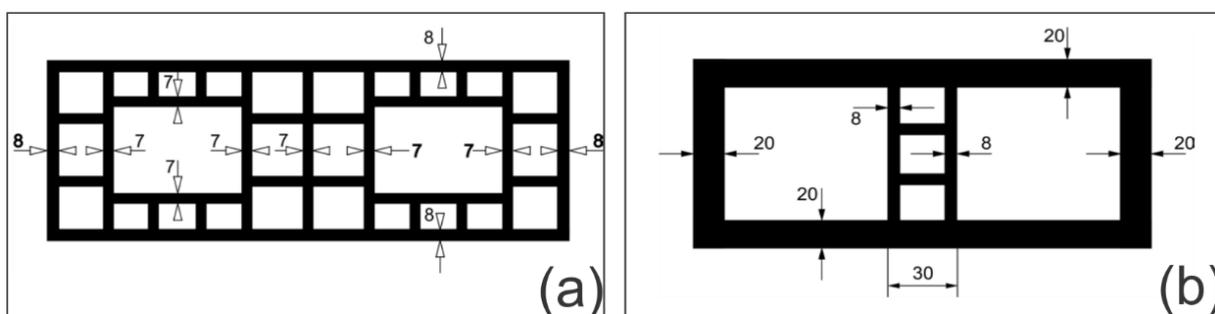


Figura 11 – Medição das paredes externa e septos em blocos de paredes vazadas (a) e em blocos de paredes maciças (b). Fonte: NBR 15270-2 (ABNT, 2005)

Conforme preconizado pela NBR 15270 – 2 (ABNT, 2005), os blocos cerâmicos devem apresentar precisão dimensional de esquadro e planeza das faces, com tolerância dimensional individual de 5 mm e tolerância dimensional média de 3 mm.

Para determinação do desvio em relação ao esquadro (D), deve-se medir o desvio entre uma das faces destinadas ao assentamento e a maior face, destinada ao revestimento do bloco, conforme mostra a Figura 12 (a). Já a verificação da planeza das faces (F) dá-se pela flecha formada na diagonal, conforme mostrado na Figura 12 (b) e (c).

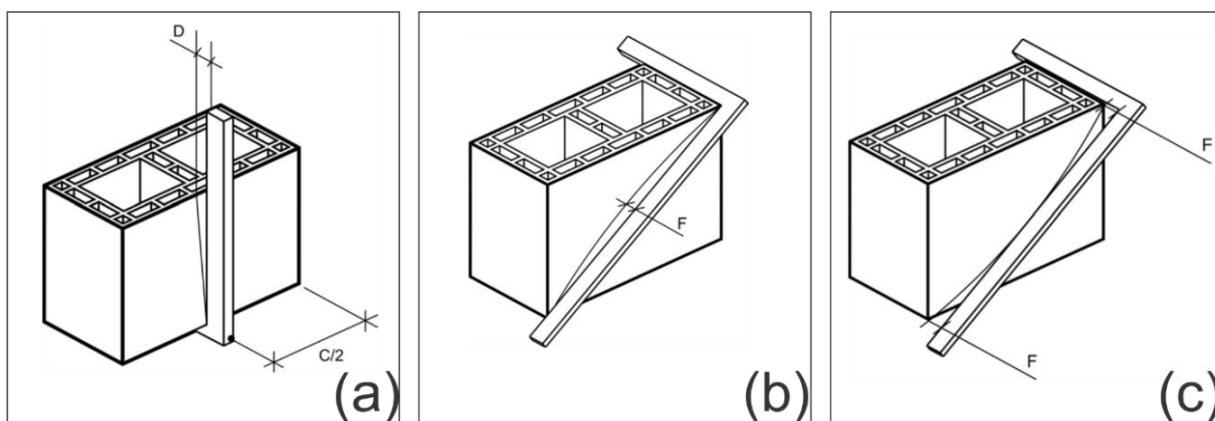


Figura 12 – Desvio em relação ao esquadro (a) e planeza das faces (b) e (c). Fonte: NBR 15270-3 (ABNT, 2005)

Segundo a NBR 15270 – 3 (ABNT, 2005), área bruta (A_b) é a dimensão externa, desprezando a existência de vazios, sendo obtida a partir da expressão L (largura) x C (comprimento) do bloco, expressa em centímetros quadrados. Já a área líquida (A_{liq}) é a área com desconto das áreas dos vazios.

A determinação da A_{liq} dá-se a partir da imersão dos blocos por 2 horas em água fervente ou por 24 horas em água à temperatura ambiente. Então, os blocos devem ser pesados imersos em água, obtendo-se a massa aparente (m_a). Em seguida, os blocos devem ser retirados da água, enxugados superficialmente e pesados, obtendo-se assim a massa saturada (m_u). Após a obtenção desses dados, a área líquida é calculada através da Equação 1 (ABNT, 2005).

$$Aliq = \frac{(m_u - m_a)}{\gamma \cdot H} \quad (1)$$

Na qual:

A_{liq} é a área líquida, em centímetros quadrados;

m_u é a massa do bloco saturado, em gramas;

m_a é a massa aparente do bloco, em gramas;

H é a altura do bloco, em centímetros;

γ é a massa específica da água, tomada igual a 1, em gramas por centímetro cúbico.

3.5.2 Características físicas

O índice de absorção d'água (AA), definido pela NBR 15270-3 (ABNT, 2005), determina o percentual de água absorvida pelo bloco após secagem em estufa e, posteriormente, a imersão em água à temperatura ambiente por 24 horas ou em água fervente por 2 horas. O resultado do AA não deve ser inferior a 8% nem superior a 22%. O índice de absorção d'água é determinado pela Equação 2.

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Em que m_u e m_s representam a massa úmida e a massa seca de cada corpo de prova, respectivamente, expressas em gramas.

3.5.3 Características mecânicas

A resistência à compressão é a principal medida de qualidade de um bloco e, conseqüentemente, indica as demais características mecânicas da alvenaria (PARSEKIAN *et al.*, 2013). A NBR 15270-2 (ABNT, 2005) prescreve que os blocos estruturais devem ter resistência característica à compressão (f_{bk}) mínima de 3 MPa, referida à área bruta. A determinação da resistência à compressão estimada ($f_{bk,est}$) dá-se conforme Equação 3.

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

Em que:

$f_{bk,est}$ é resistência característica estimada da amostra, em megapascal;

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

$i = n/2$, se n for par;

$i = (n-1)/2$, se n for ímpar;

n é a quantidade de blocos da amostra.

Após o cálculo do $f_{bk,est}$ deve-se proceder à seguinte análise:

a) se o valor do $f_{bk,est} \geq f_{bm}$ (média da resistência à compressão de todos os corpos de prova da amostra), adota-se f_{bm} como a resistência característica do lote (f_{bk});

b) se o valor do $f_{bk,est} < \emptyset \times f_{b(1)}$ (menor valor da resistência à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra), adota-se a resistência característica à compressão (f_{bk}) determinada pela expressão $\emptyset \times f_{b(1)}$, estando os valores de \emptyset indicados na Figura 13.

c) caso o valor calculado de $f_{bk,est}$ esteja entre os limites mencionados acima ($\emptyset \times f_{b(1)}$ e f_{bm}), adota-se este valor como a resistência característica à compressão (f_{bk}).

Quantidade de blocos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	≥ 18
\emptyset	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04
NOTA	Recomenda-se adotar $n \geq 13$.											

Figura 13 - Valores de \emptyset em função da quantidade de blocos. Fonte: NBR 15270 – 2 (ABNT, 2005)

Para realização do ensaio de determinação da resistência à compressão, conforme NBR 15270 – 3 (ABNT, 2005), as faces do bloco devem ser medidas e as faces de trabalho dos corpos-de-prova devem ser regularizadas com pasta de cimento e areia ou argamassa com resistências superiores à do bloco. Para execução do ensaio, os blocos devem estar saturados e a tensão deve ser aplicada, progressivamente, à razão de $0,05 \pm 0,01$ MPa/ s.

O índice de absorção d'água inicial (*AAI*) indica a quantidade d'água que o bloco retira da argamassa ou graute. Para realização do ensaio o bloco deve ser previamente seco em estufa e, posteriormente, uma das faces é imersa em uma lâmina d'água de 3 mm, durante um minuto. Segundo a NBR 15270 - 3 (ABNT, 2005), a diferença entre a massa seca e a massa após a absorção irá determinar o *AAI* do bloco, através da Equação 4.

$$AAI = 193,55 \times \frac{\Delta p}{\text{Área}} \quad (4)$$

Na qual:

AAI é o índice de absorção d'água inicial da face ensaiada dos blocos, expresso em (g/ 193,55 cm²)/ min;

Δp é a variação de massa obtida no ensaio, em gramas;

Área é a área bruta ou área líquida dos blocos ensaiados, em centímetros quadrados.

Quando *AAI* resulta em valores superiores a 30 (g/ 193,55 cm²)/ min, os blocos devem ser umedecidos antes do assentamento ou grauteamento, a fim de garantir melhor desempenho quanto à aderência, visto que o excesso de retirada de água do graute prejudica a hidratação das postes de aderência.

Outra importante característica mecânica dos blocos é a resistência à tração, visto que conhecer a resistência à tração de blocos de alvenaria permite entender os mecanismos de ruptura de uma parede. Por exemplo, a flexão de uma parede de alvenaria em um vão horizontal, pode resultar em fissuras verticais passando pelo bloco em fiadas alternadas. Nesse caso, a resistência à tração do bloco pode ser determinante na ruptura. A ruptura de uma parede, quando submetida à carga de compressão, muitas vezes está relacionada com o limite de resistência à tração do bloco (PARSEKIAN *et al.*, 2013). De acordo com a norma americana ASTM C 1006 (2013), as tensões de tração geradas nos blocos são provenientes de diferenças no módulo de elasticidade e na relação de Poisson entre bloco e argamassa.

A determinação da resistência mecânica por ensaio de tração direta é algo complicado, visto que a dificuldade de fixação e alinhamento dos corpos de prova ao equipamento leva a resultados com grande variação. Portanto, o ensaio mais usual é o de tração indireta, no qual é aplicada uma compressão transversal e se consegue medir a resistência de tração por fendilhamento, conforme ilustrado na Figura 14. A tensão calculada tende a ser semelhante à obtida na tração direta, mas com variação de resultados menor (PARSEKIAN *et al.*, 2013).

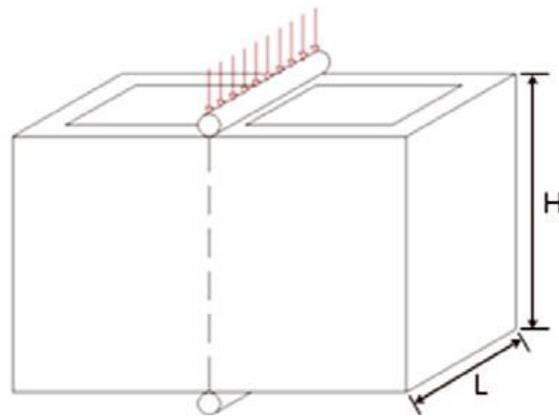


Figura 14 – Esquema do ensaio de tração por fendilhamento. Fonte: Rizzatti (2012)

O ensaio para determinação da resistência à tração por fendilhamento dos blocos, preconizado pela norma ASTM C 1006 (2013), dá-se pela aplicação de uma carga transversal sobre barras cilíndricas com diâmetro entre 1/8 e 1/12 da altura do corpo de prova e com taxa de carregamento constante de 8900 N/ min.

A obtenção da tensão de tração por fendilhamento é calculada através da Equação 5.

$$f_t = 2P/\pi LH \quad (5)$$

Em que:

f_t é a resistência a tração por fendilhamento, em MPa;

P é a carga aplicada, em kN;

L é o comprimento dividido do corpo de prova, em mm, calculado a partir do comprimento bruto menos o comprimento de quaisquer vazios ao longo do plano de falha das hastes de apoio;

H é a altura do corpo de prova, em mm.

Ensaio realizados por Mendes (1998), Rizzatti *et al.*, (2012) e Izquierdo (2015), apontaram que a resistência à tração (f_t) de blocos cerâmicos é entre 5% e 7% da resistência mecânica à compressão (f_{bk}). Conforme mostrado na Tabela 1, Mendes (1998) obteve resistência à compressão de 22,89 MPa e resistência à tração de 1,19 MPa, sendo a resistência à tração cerca de 5% da resistência mecânica à compressão. Os corpos de prova de Rizzatti *et al.*, (2012) apresentaram resistência média à compressão de 31,6 MPa e resistência média à tração de 1,8 Mpa, onde a resistência à tração representa cerca de 5,5% da resistência mecânica à compressão. Já Izquierdo (2015) encontrou uma relação f_t/f_{bk} de 7,16%.

Tabela 1 – Resistência à tração por fendilhamento dos blocos cerâmicos

Pesquisador	f_{bk} (MPa)	f_t (MPa)	Relação f_t/f_{bk}
Mendes, 1998	22,89	1,19	5,19%
Rizzatti <i>et al.</i> , 2012	29,43	1,81	6,15%
	32,95	1,57	4,76%
	30,31	1,67	5,50%
	33,57	1,80	5,30%
Izquierdo, 2015	14,14	1,08	7,16%

Fonte: Mendes (1998) e Rizzatti *et al.*(2012)

É importante ressaltar que os pesquisadores utilizaram blocos cerâmicos com características distintas, e também podem ter ocorrido variações na execução do ensaio. Frente as possíveis variáveis, as médias dos resultados da relação f_t/f_{bk} variaram entre 4,76% e 7,16%.

3.6 Juntas de argamassa

Segundo a NBR 15812 – 1 (2010), junta de argamassa é o componente utilizado na ligação dos blocos. A NBR 13281 (ABNT, 2005) define que a argamassa para assentamento estrutural possui a função de ligação dos componentes da alvenaria. Para Ramalho (2003), a argamassa tem a função de solidarizar unidades, transmitir e uniformizar tensões entre os blocos, absorver pequenas deformações, prevenir a entrada de água e de ventos, devendo reunir características de trabalhabilidade, resistência, plasticidade e durabilidade para o desempenho de suas funções. Já Parsekian *et al.* (2013) citam que a argamassa é usada para permitir um apoio uniforme e também a aderência de um bloco sobre outro, de maneira a formar elementos compostos que irão resistir às ações e às condições ambientais ao longo do tempo.

Parsekian e Soares (2010) descrevem que a argamassa é composta por cimento, cal e areia. Argamassas de maior resistência mecânica à compressão, compostas por cimento e areia, não são recomendadas, pois são muito rígidas e têm baixa capacidade de absorver deformações, em que qualquer pequena deformação resultará em tensões elevadas e o aparecimento de fissuras. Já argamassas fracas, de cal e areia, possuem resistência à compressão e aderência muito baixas, prejudicando a aderência da parede. Nota-se que a adição de cal leva à perda de resistência, mas proporciona à argamassa trabalhabilidade e melhora a retenção de água e a capacidade de absorver deformações.

Conforme a ABNT NBR 15812 - 1 (2010), para a resistência à compressão característica da argamassa deve ser atendido o valor mínimo de 1,5 MPa e máximo limitado a $0,7 f_{bk}$, referido à área bruta.

As argamassas possuem dois estados: plástico e endurecido. No primeiro, temos características de trabalhabilidade, retenção de água e tempo de endurecimento. No segundo, temos aderência, resistência à compressão, variação volumétrica e durabilidade (PARSEKIAN *et al.*, 2013).

3.7 Graute

De acordo com a NBR 15812 -1 (ABNT, 2010), graute é o componente utilizado para preenchimento de espaços vazios de blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente.

Segundo Parsekian *et al.* (2013), graute é uma mistura de cimento, agregados, aditivo e água. Devido à sua elevada fluidez, é usado para preencher os vazados verticais ou horizontais da alvenaria, aumentando a resistência e permitindo aderência da armadura. A consistência do graute deve ser ajustada levando-se em consideração a absorção do bloco e as características ambientais de temperatura e umidade. Um graute com abatimento de tronco de cone de 200 mm é adequado para blocos de absorção moderada, já um com abatimento de 250 mm, ou mais, é indicado para blocos de alta absorção ou área da seção do vazado muito pequena.

As principais diferenças entre graute e concreto são relação água/ cimento elevada, podendo chegar 0,9 e, consistência. Como os vazados dos blocos geralmente são pequenos, a alta fluidez permite boa plasticidade e preenchimento completo dos vazados, adequados à função (PARSEKIAN *et al.*, 2013). No entanto, a elevada quantidade de água leva à diminuição da resistência à compressão do graute, usualmente medida em corpos de prova cilíndricos, mas a resistência do graute inserido no interior do bloco será maior, pois a absorção dos blocos, especialmente aqueles com *AAI* elevados, irá rapidamente retirar boa parte dessa água, diminuindo a relação água/ cimento e aumentando a resistência mecânica final (PARSEKIAN e SOARES, 2010).

A influência do graute na resistência da alvenaria estrutural deve levar em consideração dois aspectos. Quando o grauteamento ocorre em blocos vazados de concreto, esse preenchimento, realizado com um material muito semelhante ao bloco, leva ao aumento da área líquida da unidade e, conseqüente, ganho de capacidade portante da parede. No entanto, para os blocos cerâmicos, essa composição torna-se mais complexa, pois trata-se de dois materiais distintos. O comportamento do conjunto, pode ser influenciado negativamente, por exemplo, pelas diferentes características de deformação de cada material (RAMALHO, 2003).

3.7.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante para projeto e controle de qualidade. Existe uma relação inversa entre porosidade e resistência à compressão. Conseqüentemente, em materiais multifásicos, como o concreto, a porosidade de cada componente da microestrutura pode tornar-se limitante de força. Os agregados naturais geralmente são densos e fortes. A porosidade da matriz de pasta de cimento, bem como a zona de transição interfacial entre a matriz e o agregado, que geralmente determinam a resistência à compressão do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Recomenda-se que a resistência do graute não seja inferior a 15 MPa, sendo esse valor o mínimo obrigatório em pontos com armadura, para garantir aderência. No caso de blocos cerâmicos vazados, considera-se que a resistência do graute seja a mesma resistência do bloco, considerando sua área líquida. É recomendado aproximar a resistência do graute para classes de 15, 20 e 25 MPa, mas nunca ultrapassando o valor máximo de resistência, superior à 150 % da resistência do bloco na área líquida (PARSEKIAN e SOARES, 2010).

Segundo a NBR 15961 – 1 (ABNT, 2011), quando especificado o graute, sua influência na resistência da alvenaria deve ser verificada em laboratório, nas condições de sua utilização, mediante ensaio de compressão de prismas, pequenas paredes ou paredes. Para elementos de alvenaria armada, a resistência à compressão característica deve ser especificada com valor mínimo de 15 MPa.

Na Tabela 2, são apresentados alguns traços de grautes, em massa, adotados por Camacho *et al.* (2015) e Fortes (2012). Os grautes G1 e G2 foram moldados por Camacho *et al.* (2015), já os grautes G3 e G4 foram moldados por Fortes (2012).

Tabela 2 - Traços de graute

Tipo	f_c	Cimento	Areia	Pedrisco	Relação a/c
G1	17 MPa	1	1,83	2,17	0,67
G2	30 MPa	1	1,20	1,8	0,55
G3	25 MPa	1	2,12	2,02	0,58
G4	15 MPa	1	3,40	2,78	0,80

Fonte: Camacho *et al.*(2015) e Fortes (2012)

3.7.2 Módulo de elasticidade do graute

De acordo com Almeida (2012), módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona a medida de rigidez de um material e está associado com as propriedades mecânicas, como tensão de escoamento e tensão de ruptura. É uma propriedade intrínseca dos materiais e depende da composição química, microestrutura e defeitos. O módulo de elasticidade pode ser considerado como a relação entre a tensão aplicada sobre um concreto e a sua capacidade de suportar as deformações. Portanto, quanto maior for o valor do módulo de elasticidade, menor será a sua deformação e melhor será a sua capacidade de suportar cargas sem deformações definitivas.

Para Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado. Segundo os mesmos, se o concreto não apresentar um comportamento linear, é necessária uma estimativa do módulo de elasticidade (relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional adotado), para que se possa, além de conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, também calcular as tensões de projeto sob carga.

Para um material submetido à uma carga axial, a razão entre as deformações transversal e longitudinal originam o coeficiente de *Poisson*. Os valores do coeficiente de Poisson geralmente variam entre 0,10 e 0,20 para o concreto. Normalmente o Poisson é menor para concretos de alta resistência e maior para concretos saturados e carregados dinamicamente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), existe uma relação direta entre a densidade do concreto e o módulo de elasticidade. Uma vez que a densidade do concreto está relacionada com a porosidade dos compósitos. Agregados densos têm alto valor de módulo de elasticidade e, conseqüentemente, quanto maior a quantidade de agregados graúdos em uma mistura de concreto, maior será o valor do módulo de elasticidade do concreto. As variações normais na porosidade do agregado não afetam a resistência de concretos de baixa ou média resistência. A dimensão, a forma, a textura superficial, a distribuição granulométrica e a composição mineralógica dos agregados influenciam a fissuração na zona de transição na interface e, assim, afeta a forma da curva tensão-deformação e, conseqüentemente, o módulo de elasticidade.

A NBR 15270 - 3 (2005) indica que a obtenção do módulo de elasticidade do graute seja realizada conforme método de ensaio preconizado pela NBR 8522 (ABNT, 2008). Já a NBR 8522 (ABNT, 2008) determina que o módulo de elasticidade do concreto seja obtido pelo módulo de deformação secante (E_{cs}) ou pelo módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).

O módulo de deformação secante (E_{cs}) é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos seus pontos A e B correspondentes, respectivamente, à tensão σ_a e à tensão considerada no ensaio, conforme Figura 15 (a). Já o módulo de deformação tangente à origem ou inicial é considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre σ_a e $30\% f_c$, para o carregamento estabelecido nesse método de ensaio, conforme mostrado na Figura 15 (b).

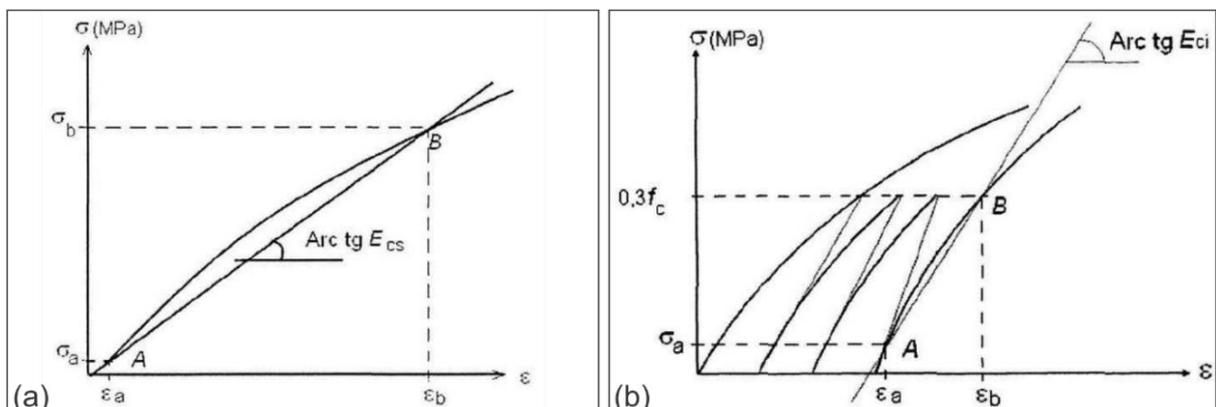


Figura 15 - Representação esquemática do módulo de deformação secante (a) e módulo de deformação tangente inicial (b). Fonte: NBR 8522 (ABNT 2008)

Para realização do ensaio, o corpo-de-prova, após instrumentado deve ser centralizado nos pratos da máquina de ensaios de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007). O corpo-de-prova deve permanecer centrado geometricamente, com seu eixo coincidindo com o eixo de aplicação de carga. Os carregamentos e descarregamentos devem obedecer à velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

3.8 Influência do graute na alvenaria estrutural

Hamid e Drysdale (1979) estudaram prismas grauteados de blocos de concreto e o comportamento de interação de seus componentes (bloco, argamassa e graute) sob estado multiaxial de tensões, e desenvolveram um modelo de ruptura para a alvenaria, conforme mostra a Figura 16.

Os autores basearam-se nas seguintes hipóteses: aderência perfeita entre bloco/ argamassa/ graute, distribuição proporcional de esforços verticais entre os componentes, distribuição uniforme de tensões ao longo da altura, teoria de ruptura de Mohr e adoção das características do graute como sendo um concreto convencional.

De acordo com os autores, a aplicação de carga à alvenaria faz com que o graute atinja sua capacidade resistente de compressão não confinada, expandindo devido suas deformações inelásticas ocasionadas pela microfissuração. O bloco tende a restringir essas deformações e a confinar o graute, gerando, assim, tensões de tração nas paredes do bloco. No caso do graute não atingir a sua capacidade resistiva antes do conjunto bloco/ argamassa, as faces do bloco são tracionadas ao restringirem as deformações da argamassa. Nesses casos, o bloco sempre romperá por tensões de tração geradas pela deformação dos demais componentes.

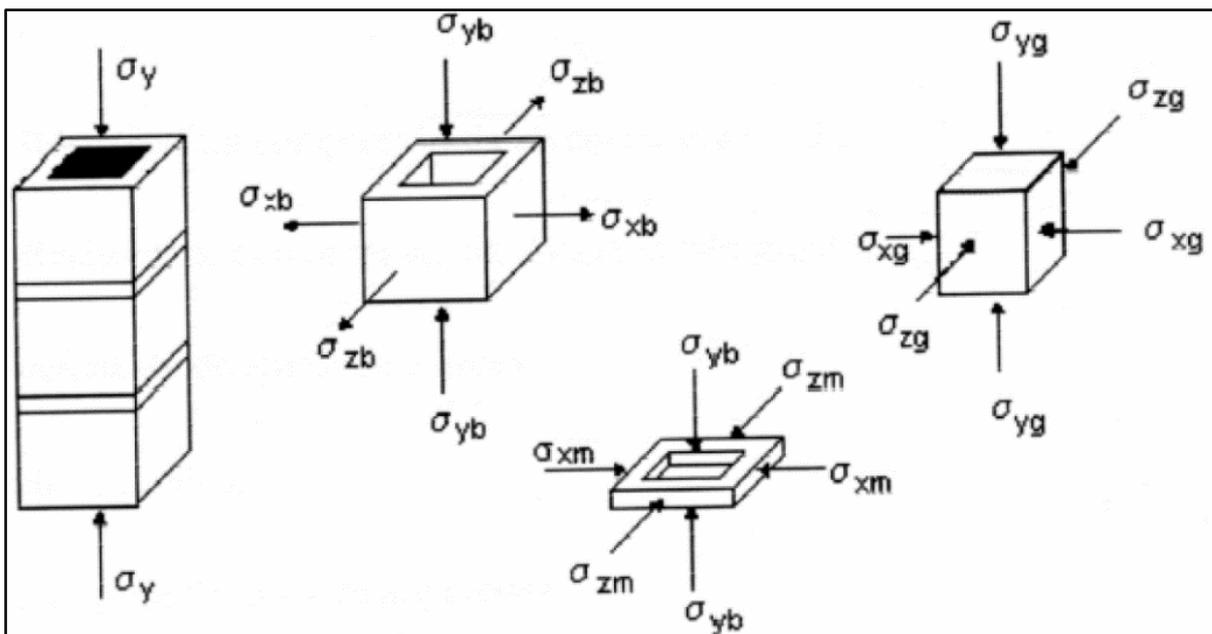


Figura 16 - Modelo de ruptura da alvenaria. Fonte: Adaptado de Hamid e Drysdale (1979)

O método utilizado pelos pesquisadores para analisar a ruptura dos prismas foi o de igualar elasticamente as deformações do graute e do conjunto bloco/argamassa. Além disso, os autores partiram do pressuposto de que a resistência à compressão da alvenaria grauteada ou não grauteada está em função de vários fatores, tais como: resistência à compressão uniaxial do bloco, resistência à compressão não confinada da argamassa e do graute, módulo de deformação do bloco e do graute, proporção entre a área líquida e área bruta do bloco, altura do bloco e espessura da junta de argamassa.

As conclusões de Hamid e Drysdale (1979) foram que a resistência do prisma, na área líquida, diminui quando grauteado; a influência do tipo de bloco e da argamassa diminui para prismas grauteados; a ruptura do prisma grauteado ocorre pela ruptura à tração do bloco induzida pela deformação lateral do graute; grandes aumentos na resistência dos grautes têm pouco efeito na resistência dos prismas; e a ruptura do graute governa a ruptura dos prismas.

Cheema e Klingner (1986) ensaiaram prismas de blocos concreto, grauteados e não grauteados, e modelagem por elementos finitos para prever a resistência e o tipo de ruptura dos prismas, baseando seu modelo na relação dos módulos de deformação da argamassa e do bloco. O objetivo principal era determinar se os prismas romperiam por tração dos blocos ou pela resistência à compressão dos demais componentes. Os resultados mostraram que ambos os prismas romperam por tensões de tração na interface bloco/ argamassa e, em menor escala, pelo esmagamento dos componentes geradas pelas tensões de compressão. Desde modo, os autores verificaram que a resistência à compressão para os prismas grauteados era menor que a para os prismas não grauteados, pois, segundo eles, o nível de tensões de tração geradas nos prismas grauteados era maior, causando ruptura prematura devido ao acréscimo de deformações laterais.

Mendes (1998) pesquisou sobre o comportamento mecânico de prismas grauteados e não grauteados submetidos à compressão axial. Os resultados apontaram que nos prismas sem graute houve o surgimento de fissuras verticais nas faces, em torno de 60 a 70% da carga última, com ruptura característica por tração na região próxima da junta de argamassa e com ruptura frágil e explosiva. Já nos prismas grauteados, primeiro apareceram fissuras verticais nas arestas e nas faces e, posteriormente, o destacamento de todas as faces. Dois tipos de prismas grauteados apresentaram aumento na resistência à compressão que, segundo o autor, possui relação direta com a resistência da argamassa de assentamento.

Arantes (2004) avaliou a influência do graute na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Para isso, foram moldados prismas com três fiadas e com 0%, 33%, 50% e 100% dos vazados dos blocos preenchidos com graute, conforme Figura 17. Os prismas foram moldados utilizando duas resistências de argamassa de assentamento, três resistências de graute e uma resistência de bloco cerâmico, sendo esse de 10,98 MPa.

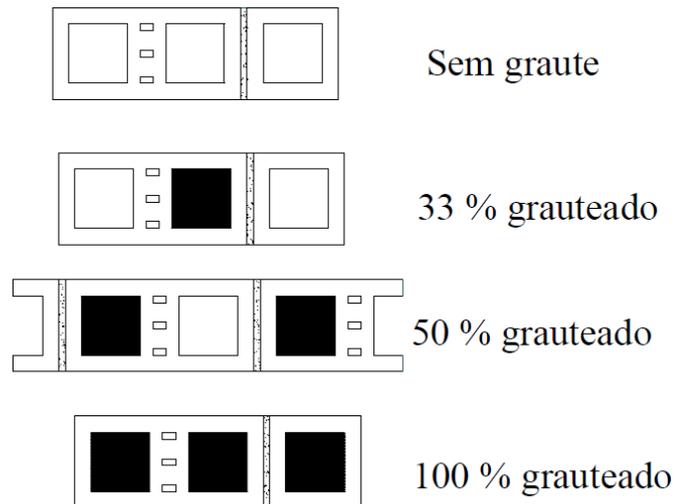


Figura 17 - Influência do graute na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Fonte: Arantes (2004)

De acordo com a Figura 18 (a) e (b), todos os prismas grauteados apresentaram, na ruptura, o descolamento de parte da parede do bloco. Tanto os prismas parcialmente grauteados, quanto os totalmente grauteados apresentaram aumento significativo de resistência à compressão quando comparados aos prismas vazios. O aumento dos prismas totalmente grauteados variou entre 58 e 99% em relação ao prisma oco. Já o aumento de resistência dos prismas parcialmente grauteados variou entre 9 e 31%. O melhor resultado encontrado para prismas 100% grauteados, 15,25 MPa, foi obtido com argamassa e graute de maiores resistências à compressão, conforme é mostrado na Tabela 3.



Figura 18 - Influência do graute na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Fonte: Arantes (2004)

Tabela 3 – Resumo dos resultados dos prismas

Amostras	% de grauteamento	Resistência à compressão do graute (MPa)	Resistência à compressão da argamassa (MPa)	Resistência à compressão do prisma (MPa)
1	0%	-	6,5	7,35
2		-	6,5	7,35
3		-	6,5	7,35
4		-	18,8	7,66
5		-	18,8	7,66
6		-	18,8	7,66
7	33%	8,93	6,5	8,07
8		15,36	6,5	8,85
9		26,66	6,5	8,67
10		8,93	18,8	8,65
11		15,36	18,8	8,48
12		26,66	18,8	8,93
13	50%	8,93	6,5	8,04
14		15,36	6,5	8,81
15		26,66	6,5	8,33
16		8,93	18,8	9,34
17		15,36	18,8	9,47
18		26,66	18,8	10,06
19	100%	8,93	6,5	11,58
20		15,36	6,5	12,61
21		26,66	6,5	13,59
22		8,93	18,8	13,30
23		15,36	18,8	13,74
24		26,66	18,8	15,25

Fonte: Adaptado de Arantes (2004)

Logullo (2006) avaliou a influência do graute na alvenaria estrutural de blocos de concreto. A metodologia adotada consistiu em moldar amostras de prismas usando duas resistências de bloco e duas resistências de graute, conforme mostrado na Tabela 4. Os resultados mostraram um aumento significativo dos prismas grauteados em relação aos prismas ociosos, visto que a amostra 3 apresentou o dobro da resistência da amostra 1, e as amostras 5 e 6 apresentaram aumento de 40% em relação às amostras 2 e 4. Entretanto, o aumento da resistência do graute não influenciou na resistência dos prismas, mostrando que grautes com resistências muito superiores ao bloco não garantem aumento de resistência ao prisma.

Tabela 4 – Influência do graute na alvenaria de blocos de concreto

Amostras	Resistência à compressão do bloco (MPa)	Resistência à compressão do graute (MPa)	Resistência à compressão do prisma (MPa)
1	8,64	oco	5,63
2	15,76	oco	10,89
3	8,64	18,80	11,29
4	8,64	27,46	10,50
5	15,76	18,80	15,33
6	15,76	27,46	15,17

Fonte: Logullo (2006)

Grohmann (2006) verificou que não houve aumento da resistência à compressão de prismas com blocos cerâmicos quando os vazados foram totalmente grauteados. Os resultados mostraram que prismas com todos os vazados preenchidos sofrem maior influência das tensões geradas pelo graute devido ao estado de confinamento. Portanto, segundo o autor, a ruptura da alvenaria grauteada ocorre devido à expansão do graute, que transmite tensões aos demais componentes do prisma. A ação do graute sobre o prisma gera tensões de tração na interface bloco/ argamassa, zona mais frágil do prisma, levando-o à ruína. Segundo Grohmann (2006), quando o graute não atinge sua capacidade resistiva antes do conjunto bloco/ argamassa, as faces do bloco são tracionadas ao restringirem as deformações da argamassa, que têm a tendência de se expandir lateralmente.

De acordo com Mohamad *et al.* (2011), a alvenaria, quando submetida à compressão, produz tensões biaxiais (compressão e tração) nos blocos e tensões triaxiais de compressão na argamassa e graute. Basicamente, as deformações laterais máximas impedidas servem para explicar o surgimento das tensões e, por consequência, dos mecanismos que levam a alvenaria à ruptura. Portanto, quanto maior a diferença entre o módulo de elasticidade da argamassa, bloco e graute, maiores são as tensões laterais de tração e de compressão geradas nos componentes.

Camacho *et al.* (2015) avaliaram a influência do graute e da taxa de armadura no comportamento à compressão da alvenaria de blocos de concreto. O método adotado se deu através de prismas com três fiadas de altura, construídos com blocos de 8,5 MPa (*B1*) e 15,0 MPa (*B2*). Os prismas foram ensaiados ociosos e preenchidos com grautes com resistência de 17 e 30 MPa. Os resultados apontaram que:

- O grauteamento aumentou em 50% a resistência para o bloco *B2*. Esse fato pode ser explicado pela maior espessura das paredes dos blocos *B2*, apresentando maior resistência à deformação do graute;

- Os prismas grauteados apresentaram diminuição na deformação de ruptura com a utilização de grautes mais rígidos, apesar da tensão de ruptura ser semelhante para ambos os grautes;

- A inserção do graute nas paredes aumentou, em média, 80% a resistência à compressão, se comparada com as paredes vazias na área bruta. O aumento da resistência da alvenaria com o grauteamento não é necessariamente proporcional à relação efetiva de áreas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA

A pesquisa desenvolveu-se no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, LEME, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Na Figura 19 são descritos os materiais e os métodos de pesquisa onde, inicialmente, foram realizadas as caracterizações dos materiais para graute e dos blocos cerâmicos e, posteriormente, os ensaios de *push-out*, *push-out* com área de contato reduzida, resistência à compressão dos blocos preenchidos com graute e microscopia óptica.

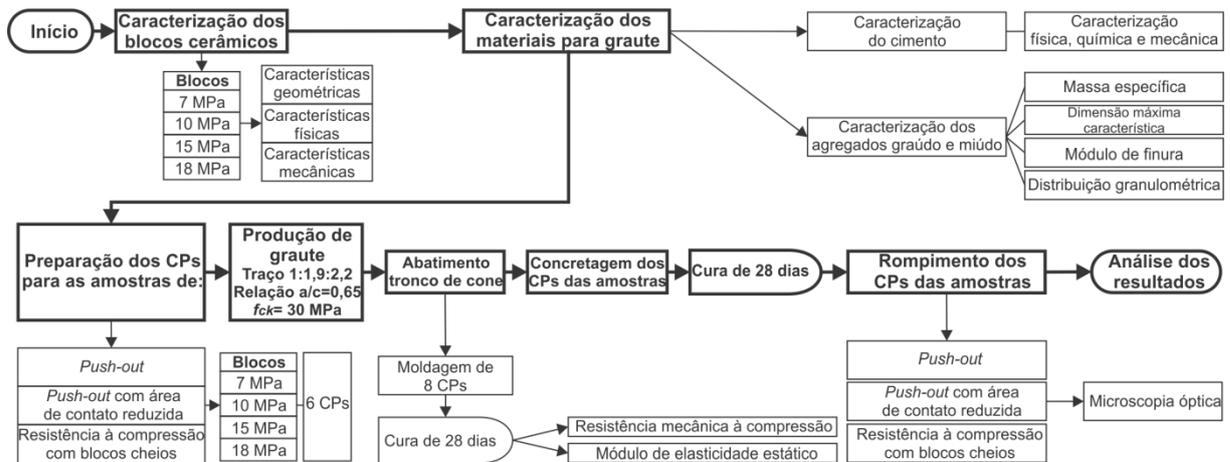


Figura 19 – Fluxograma do programa experimental

4.1 Materiais utilizados

4.1.1 Bloco cerâmico

Os blocos cerâmicos estruturais utilizados na pesquisa foram fornecidos pela empresa Pauluzzi Blocos Cerâmicos, localizada no município de Sapucaia do Sul - RS.

Para desenvolvimento da pesquisa, optou-se por utilizar blocos do tipo meio bloco, com dimensões de 140 x 140 x 190 mm e resistências à compressão de 7, 10, 15 e 18 MPa, conforme mostrado na Figura 20.

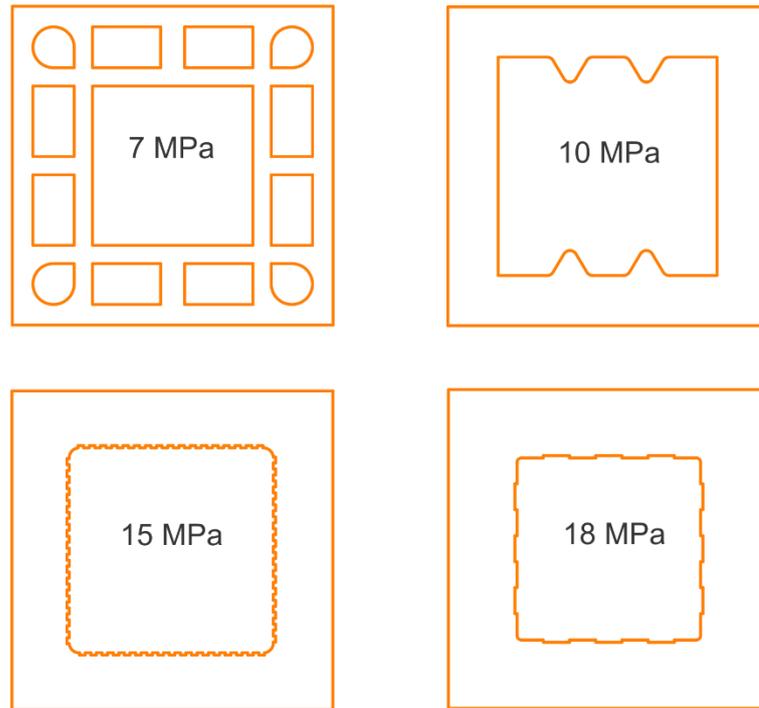


Figura 20 – Vista superior dos blocos utilizados na pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 5 são apresentadas as quantidades de corpos de prova para os ensaios de caracterização dos blocos cerâmicos.

Tabela 5 – Quantitativo de materiais para caracterização dos blocos

Ensaio	Quantidade de corpos de prova das amostras			
	Bloco 7 MPa	Bloco 10 MPa	Bloco 15 MPa	Bloco 18 MPa
Caracterização geométrica e compressão	13	13	13	13
Caracterização física, tração e <i>AAI</i>	6	6	6	6
Digitalização a laser	1	1	1	1

As características geométricas dos blocos foram obtidas conforme preconizado pela NBR 15270 – 3 (ABNT, 2005), sendo analisadas as seguintes características:

- a) Medidas das faces – dimensões efetivas;
- b) Espessura dos septos e paredes externas dos blocos;
- c) Desvio em relação ao esquadro (D);
- d) Planeza das faces (F);
- e) Área bruta (A_b) e área líquida (A_{liq}).

Para determinação da área líquida (A_{liq}), os blocos foram imersos em água à temperatura ambiente por 24 horas e, então, pesados imersos através de uma balança com cesto adaptado, obtendo-se a massa aparente (m_a). Posteriormente, os blocos foram removidos da água, enxugados superficialmente com pano úmido e pesados, obtendo-se a massa saturada (m_u).

Através dos dados obtidos nas pesagens, a área líquida de cada bloco foi calculada de acordo com a Equação 1, anteriormente citada.

$$Aliq = \frac{(m_u - m_a)}{\gamma \cdot H} \quad (1)$$

As características físicas seguiram as recomendações da NBR 15270 – 3 (ABNT, 2005), sendo avaliadas as seguintes características:

- a) Massa seca (m_s);
- b) Índice de absorção d'água (AA).

Para determinação da massa seca (m_s), os blocos foram submetidos à secagem em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até a estabilização das pesagens e, então, removidos e pesados, obtendo-se a massa seca (m_s). Em seguida, os blocos foram imersos em água à temperatura ambiente durante 24 horas e, posteriormente, removidos, enxugados superficialmente com pano úmido e pesados para determinação da massa úmida (m_u).

Através dos resultados das pesagens, expressos em gramas, foi calculado o índice de absorção d'água (AA) através da Equação 2, anteriormente mostrada.

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

As características mecânicas dos blocos foram determinadas conforme preconizado pela NBR 15270 – 3 (ABNT, 2005) e ASTM C 1006 (2013), sendo analisadas as seguintes características:

- a) Resistência à compressão dos blocos;
- b) Índice de absorção d'água inicial (AAI);
- c) Resistência à tração por fendilhamento.

Para determinação da resistência à compressão, os blocos foram identificados e medidos, e as faces foram capeadas com pasta de cimento e areia. Após a cura do capeamento, os blocos foram imersos em água à temperatura ambiente, permanecendo até o rompimento, conforme mostrado na Figura 21. O rompimento ocorreu em um equipamento para ensaios universal, marca Shimadzu, modelo UH – F, com capacidade de 2.000 kN, com progressão de carregamento de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s.



Figura 21 – Caracterização mecânica – resistência à compressão. Fonte: Acervo da pesquisa

A resistência característica à compressão (f_{bk}) foi calculada a partir dos valores de resistência individual dos corpos de prova. Os resultados foram organizados em ordem crescente e, então, calculada a resistência característica estimada da amostra, de acordo com a Equação 3, citada anteriormente.

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

Para determinação do índice de absorção d'água inicial (AAI), os blocos foram submetidos à secagem em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas, conforme Figura 22 (a). Após retirados da estufa, os blocos foram resfriados em temperatura ambiente por 2 horas e, então, pesados, obtendo-se massa inicial, Figura 22 (b). Em seguida, foram imersos em uma lâmina d'água com 3 mm, durante 60 segundos, conforme mostra a Figura 22 (c). Após, foram removidos, enxugados com pano úmido e pesados, obtendo-se a massa final, Figura 22 (d) e (e).

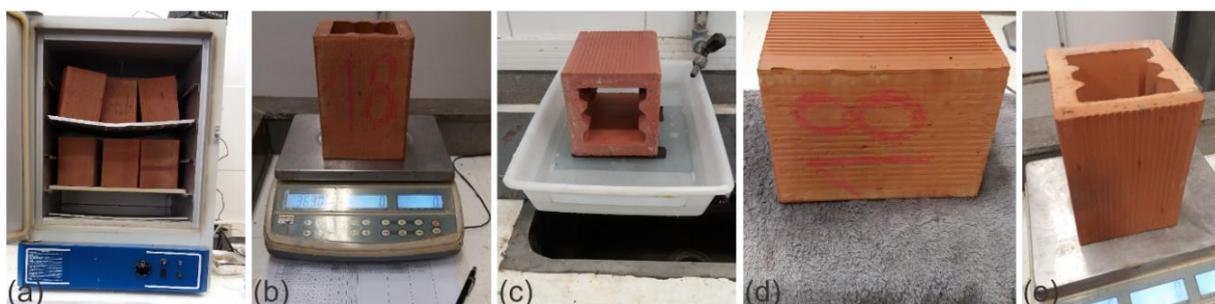


Figura 22 - Índice de absorção d'água inicial (AAI). Fonte: Acervo da pesquisa

A obtenção do índice de absorção d'água inicial (AAI) foi calculado através da Equação 4, mostrada anteriormente.

$$AAI = 193,55 \times \frac{\Delta p}{\text{Área}} \quad (4)$$

O ensaio de resistência à tração por fendilhamento, preconizado pela norma ASTM C 1006 (2013), objetivou determinar a resistência à tração dos blocos cerâmicos, a fim de relacionar com a resistência à compressão e resultados de *push-out*.

Para realização do ensaio, os blocos foram medidos e identificados. Foram utilizadas duas barras lisas de aço com bitola de 20 mm, representando 1/10 da altura dos corpos de prova, conforme mostra a Figura 23. O rompimento ocorreu no mesmo equipamento do ensaio de compressão e a velocidade de carregamento foi de 8900 N/min. A resistência à tração por fendilhamento foi calculada através da Equação 5, mostrada anteriormente.

$$f_t = 2P/\pi LH \quad (5)$$



Figura 23 - Caracterização mecânica - tração por fendilhamento. Fonte: Acervo da pesquisa

Foi realizada a digitalização a laser da superfície dos vazados dos blocos, a fim de determinar com precisão o perímetro do vazado e, conseqüentemente, definir a área de contato, entre graute e bloco, para cada tipo de bloco cerâmico. As digitalizações foram realizadas no Laboratório de Design e Seleção de Materiais, LdSM, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através do scanner a laser, modelo Digimill 3D, marca Tecnodrill, com lente de 250 mm e precisão de 0,1 mm em z, conforme mostra a Figura 24. A resolução adotada (espaçamento entre os pontos x e y) foi de 0,1 mm, e os dados foram processados no *software* Geomagic Studio.

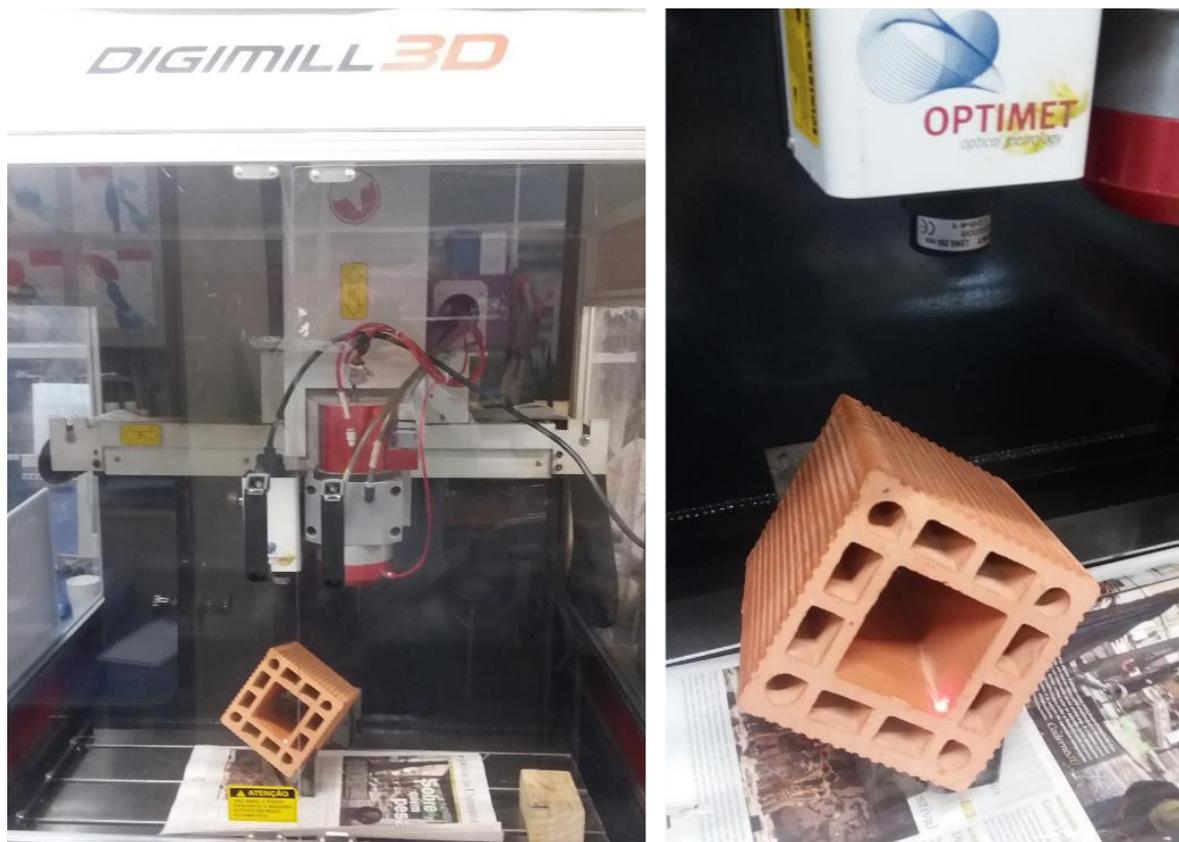


Figura 24 – Digitalização a laser dos blocos. Fonte: Acervo da pesquisa

4.1.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI-RS). Esse cimento foi escolhido por apresentar o menor teor de adições em sua composição, obtendo as características físicas desejáveis (hidratação e resistência à compressão), além de ser o cimento disponível para pesquisas no laboratório. Os ensaios químicos do cimento, de acordo com informações do fabricante em relação ao lote utilizado, podem ser visualizados na Tabela 6. A caracterização física está apresentada na Tabela 7, e a caracterização mecânica, na Tabela 8.

Tabela 6 - Caracterização química do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	1,00	não aplicável
Perda ao Fogo – PF	ABNT NM 18/12	%	3,99	≤ 4,5
Óxido de Magnésio – MgO	ABNT NM 21/12	%	1,77	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NM 16/12	%	2,64	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO ₂	ABNT NM 20/12	%	2,65	≤ 3,0

Fonte: Cimento Nacional (2017)

Tabela 7 - Caracterização física do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ² /g	4.612	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,01	não aplicável
Índice de finura - # 75 µm (nº 200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,01	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 92002/85	%	0,46	não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	30,1	não aplicável
Início de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	164	≥ 60
Fim de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	223	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,00	≤ 5,0

Fonte: Cimento Nacional (2017)

Tabela 8 - Caracterização mecânica do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	DP	Resultado	Exigência
Resistência à compressão – 1 dia	ABNT NBR 7215/96	MPa	0,59	22,8	11,0
Resistência à compressão – 3 dias			1,93	36,3	24,0
Resistência à compressão – 7 dias			2,71	45,7	34,0
Resistência à compressão – 28 dias			2,26	55,0	não aplicável

Fonte: Cimento Nacional (2017)

4.1.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média proveniente do Rio Jacuí, com origem quartzosa, que se encontra disponível no mercado local. As características físicas e granulométricas dos agregados miúdos estão expostas na Tabela 9, com o respectivo método de ensaio normatizado.

Tabela 9 - Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos

Característica		Método de ensaio	Areia natural média	
Massa específica (g/cm ³)		NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,63	
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248, (ABNT, 2003)	2,36	
Módulo de finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,40	
Abertura da peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
Distribuição granulométrica	4,75		0,2	0
	2,36		3,8	4
	1,18		10,0	14
	0,60		29,9	44
	0,30		45,3	89
	0,15		0,1	89

Fonte: Acervo da pesquisa

As composições granulométricas estão apresentadas graficamente na Figura 25, na qual os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).

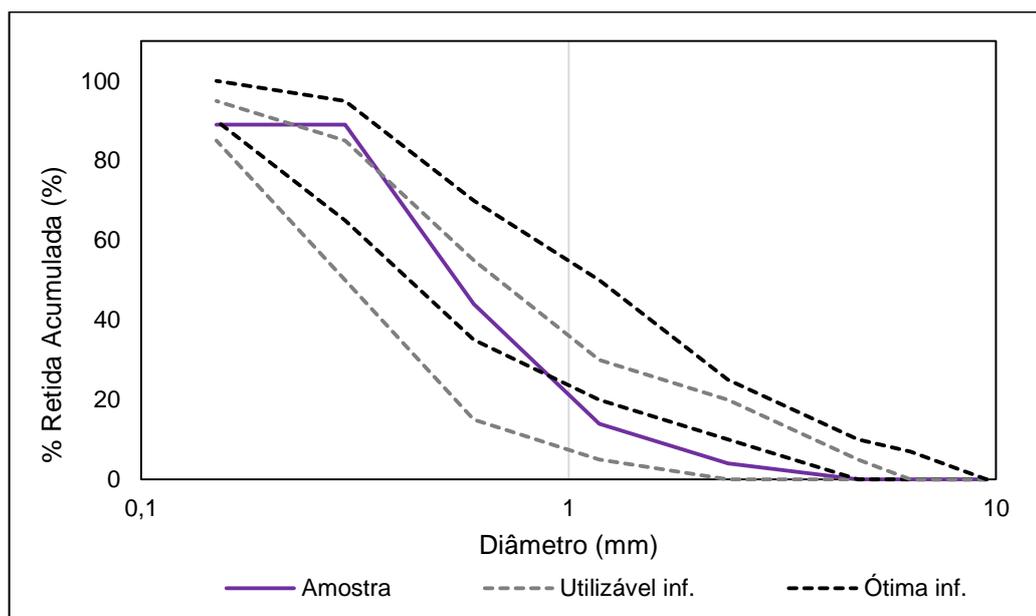


Figura 25 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos. Fonte: Acervo da pesquisa

4.1.4 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi rocha basáltica britada (pedrisco). As características físicas e granulométricas dos agregados graúdos estão expostas na Tabela 10, com o respectivo método de ensaio normatizado.

Tabela 10 - Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos

Característica		Método de ensaio	Pedrisco	
Massa específica (g/cm ³)		NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,8	
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	12,5	
Módulo de finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	5,56	
Abertura da peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
Distribuição granulométrica	19		0,0	0
	12,5		0,4	0
	9,5		10,4	11
	6,3		38,9	50
	4,75		19,5	69
	2,36		19,3	88
	1,18		5,3	94
	0,6		2,5	96
	0,3		2,0	98
	0,15		1,7	100
	0,075		0,1	100

Fonte: Acervo da pesquisa

As composições granulométricas estão apresentadas graficamente na Figura 26, na qual os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).

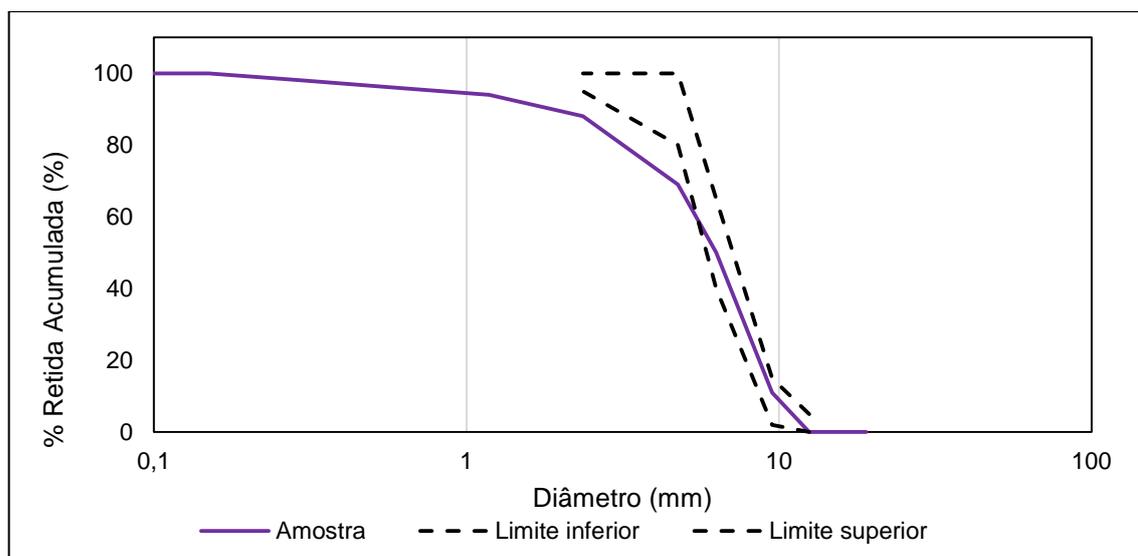


Figura 26 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos. Fonte: Acervo da pesquisa

O agregado graúdo apresentou uma quantidade de finos acima dos limites preconizados por norma. No entanto, isso não impediu sua utilização na presente pesquisa, pois, em geral os grautes são constituídos de agregados com baixa granulometria.

4.1.5 Água de Amassamento

Em toda a pesquisa, foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de distribuição de Porto Alegre.

4.1.6 Graute

Conforme mostrado na Tabela 11, o traço do graute foi o mesmo utilizado por Izquierdo (2015) em sua tese de doutorado, com resistência à compressão estimada de 30 MPa. A escolha desse traço teve como objetivo dar continuidade à linha de pesquisa e obter novos resultados.

Tabela 11 - Traço do graute.

f_c	Cimento	Areia	Pedrisco	Relação a/c
30 MPa	1	1,9	2,21	0,65

Fonte: Adaptado de Izquierdo (2015)

Para a produção do graute, os materiais foram previamente selecionados e pesados, de acordo com o traço estipulado para a pesquisa.

A determinação da consistência foi realizada através do abatimento de tronco cone, de acordo com a NM 67 (ABNT, 1998), e o resultado obtido foi de 230 mm.

Para determinar as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade, foram moldados oito corpos de prova de 100 x 200 mm e armazenados em água saturada com cal, conforme preconizado pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

A resistência à compressão (f_c) foi determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), através do rompimento de quatro corpos de prova, com idade de 28 dias, conforme mostra a Figura 27. O rompimento ocorreu em um equipamento para ensaios universal, marca Shimadzu, modelo UH – F, com capacidade de 2.000 kN, com velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. A resistência à compressão do graute (f_c) foi calculada de acordo com a Equação 6.

$$f_c = \frac{4P}{\pi x D^2} \quad (6)$$

Em que:

f_c é a resistência à compressão, em megapascals;

P é a força máxima alcançada, em newtons;

D é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.



Figura 27 – Determinação da resistência à compressão do graute. Fonte: Acervo da pesquisa

O módulo de elasticidade do graute foi determinado conforme a metodologia A, preconizada pela NBR 8522 (ABNT, 2008), através do rompimento de quatro corpos de prova, com tensão σ_a fixa, conforme mostra a Figura 28. Por meio da Equação 7, o módulo de elasticidade foi calculado em planilha *Excel*.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (7)$$

Em que:

σ_b é igual a $0,3 f_c$;

0,5 é a tensão básica, expressa em megapascals (MPa);

ε_b é a deformação específica média ($\varepsilon = \Delta L/L$) dos corpos-de-prova sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão básica (0,5 MPa).



Figura 28 - Determinação do módulo de elasticidade estática. Fonte: Acervo da pesquisa

4.2 Ensaio de *push-out*

O ensaio de *push-out* objetivou determinar a tensão de aderência graute/bloco (σ_a), através da Equação 8.

$$\sigma_a = \frac{P}{A_c} \quad (8)$$

Na qual:

σ_a é a tensão de aderência graute/ bloco, em MPa;

P é a força máxima de ruptura dos corpos de prova, em N;

A_c é a área de contato graute/ bloco, em mm².

4.2.1 Preparação e moldagem dos corpos de prova

As amostras foram formadas por seis corpos de prova, constituídos de blocos cerâmicos preenchidos com graute e com enchimento de uma placa de EVA de 8 mm de espessura no fundo, a fim de criar espaço vazio e possibilitar o possível escorregamento do graute.

Os blocos cerâmicos foram previamente limpos e secos em temperatura ambiente no laboratório. As placas de EVA, Figura 29 (a) e (b), foram recortadas obedecendo o formato dos vazados dos blocos e, então, posicionadas no fundo dos corpos de prova, conforme mostra a Figura 29 (c) e (d).

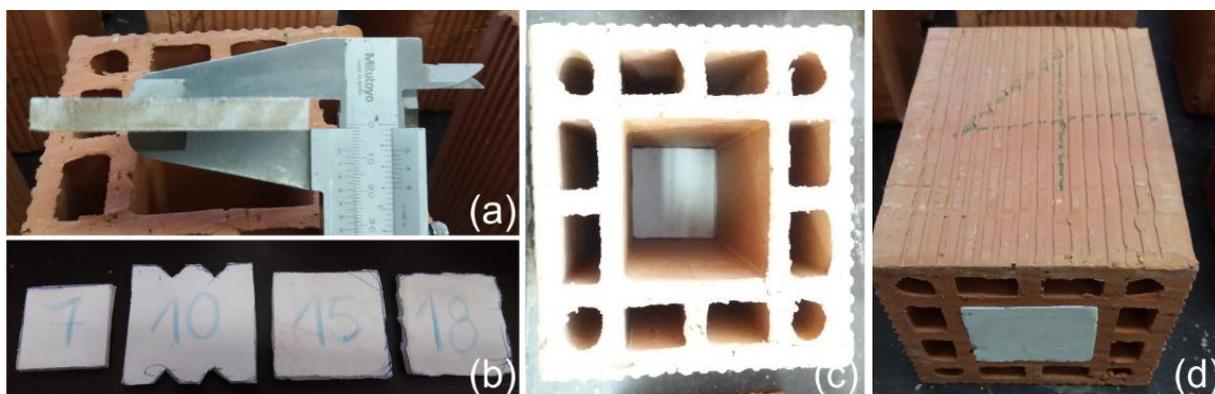


Figura 29 – Preparação dos corpos de prova para *push-out*. Fonte: Acervo da pesquisa

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com temperatura de 22°C e umidade relativa do ar de 86%, conforme Figura 30 (a). O grauteamento deu-se em duas camadas, adensadas com doze golpes cada, Figura 30 (b). Posteriormente à moldagem, os corpos de prova foram cobertos com lona, a fim de evitar a perda de água para o meio.



Figura 30 – Moldagem dos corpos de prova para *push-out*. Fonte: Acervo da pesquisa

4.2.2 Rompimento dos corpos de prova

O rompimento ocorreu em um equipamento para ensaios universal, marca Shimadzu, modelo UH – F, com capacidade de 2.000 kN. A carga foi aplicada somente nas paredes do bloco, com carregamento contínuo e velocidade de 0,02 mm/s, até ocorrer o escorregamento do graute ou ruptura do conjunto. Na parte superior do corpo de prova, foi utilizada uma chapa de aço para concentrar a força somente na região do graute, gerando um esforço cisalhante entre graute e bloco cerâmico. Na Figura 31, é possível observar um esquema que demonstra a configuração dos corpos de prova para realização do ensaio.

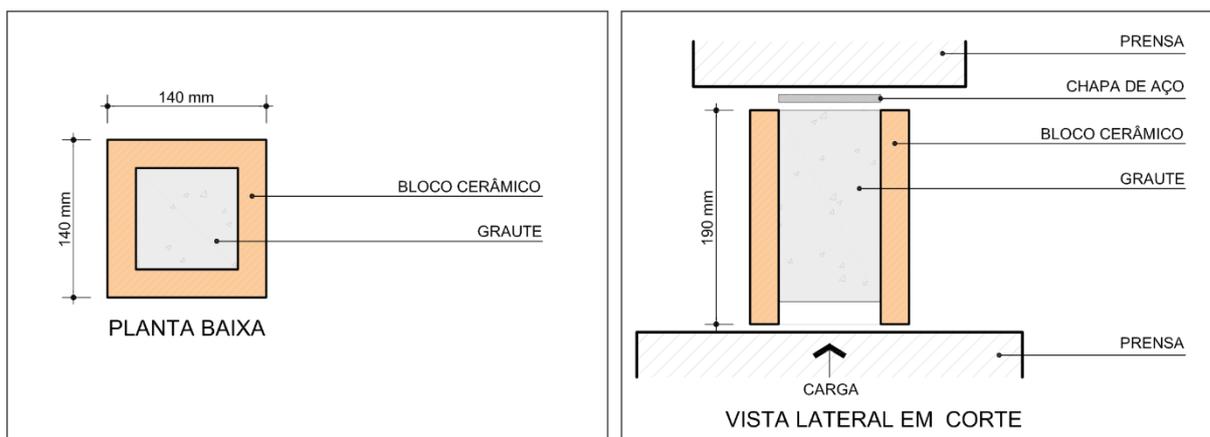


Figura 31 - Ensaio de *push-out*. Fonte: Elaborado pelo autor

Previamente, as faces inferior e superior dos corpos de prova foram retificadas, conforme Figura 32 (a). Para ruptura, utilizou-se uma camada de couro nas faces superior e inferior, a fim de melhorar a distribuição da força, conforme mostram as Figuras 32 (b) e (d). Por fim, colocou-se a chapa de aço, Figura 32 (c), e realizou-se a aplicação da carga, conforme mostrado na Figura 32 (d).

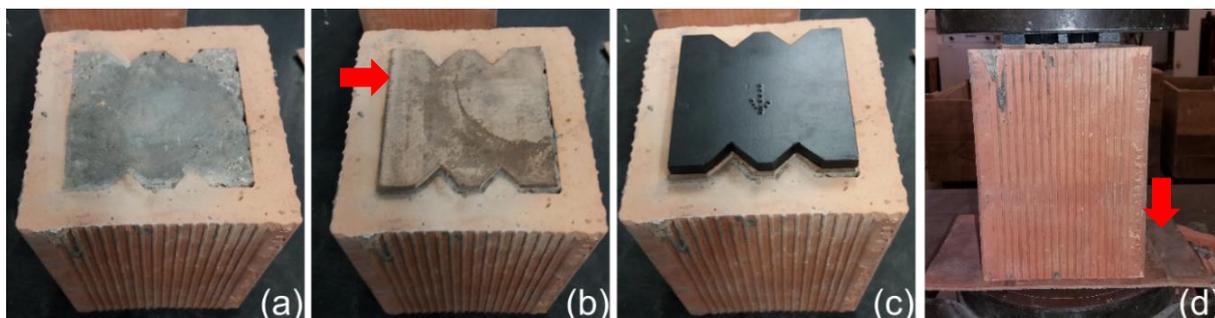


Figura 32 – Rompimento dos corpos de prova de *push-out*. Fonte: Acervo da pesquisa

4.3 Ensaio de *push-out* com área de contato reduzida

O ensaio de *push-out* com área de contato reduzida objetivou determinar a tensão de aderência graute/ bloco (σ_{acr}), partindo do princípio de reduzir ao máximo a área de contato entre os elementos e, conseqüentemente, diminuir a transferência de tensões do graute para o bloco. A determinação da σ_{acr} deu-se através da Equação 9.

$$\sigma_{acr} = \frac{P}{A_c} \quad (9)$$

Em que:

σ_{acr} é a tensão de aderência graute/ bloco com área de contato reduzida, em MPa;

P é a carga máxima de ruptura dos corpos de prova, em N;

A_c é a área de contato graute/ bloco, em mm².

4.3.1 Preparação e moldagem dos corpos de prova

As amostras foram formadas de seis corpos de prova, constituídos de blocos cerâmicos preenchidos com graute. A redução da área de contato deu-se pela diminuição da espessura de preenchimento do graute, passando para 20 mm, em média. Também foram inseridas chapas de acrílico em duas laterais, restringindo o contato graute/ bloco para somente duas laterais.

Os blocos cerâmicos foram previamente limpos e secos à temperatura ambiente no laboratório e, então, colocou-se uma base de madeira no vazado do bloco, a fim de padronizar a espessura de preenchimento do graute, conforme mostra a Figura 33 (a). Sobre a base de madeira, colocou-se a placa de *EVA* de 8 mm de espessura, Figura 33 (b) e, posteriormente, as chapas de acrílico nas laterais, conforme mostra a Figura 33 (c).

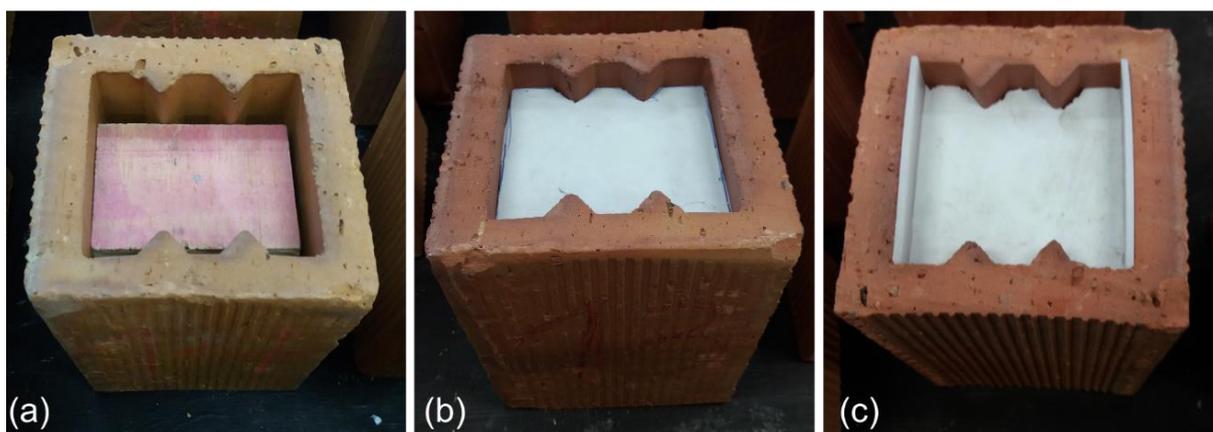


Figura 33 – Preparação dos corpos de prova para *push-out* com área de contato reduzida.

Fonte: Acervo da pesquisa

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com temperatura de 22°C e umidade relativa do ar de 86%, Figura 34 (a). O grauteamento deu-se em cama única, adensada com doze golpes, conforme Figura 34 (b). Posteriormente à moldagem, os corpos de prova foram cobertos com lona, a fim de evitar a perda de água para o meio. Após a cura, as faces superior e inferior foram retificadas, conforme Figura 34 (c).



Figura 34 – Moldagem dos corpos de prova para *push-out* com área de contato reduzida.

Fonte: Acervo da pesquisa

4.3.2 Rompimento dos corpos de prova

O rompimento dos corpos de prova ocorreu pelo mesmo procedimento adotado no *push-out*. Na Figura 35, é possível observar um esquema que demonstra a configuração dos corpos de prova para realização do ensaio.

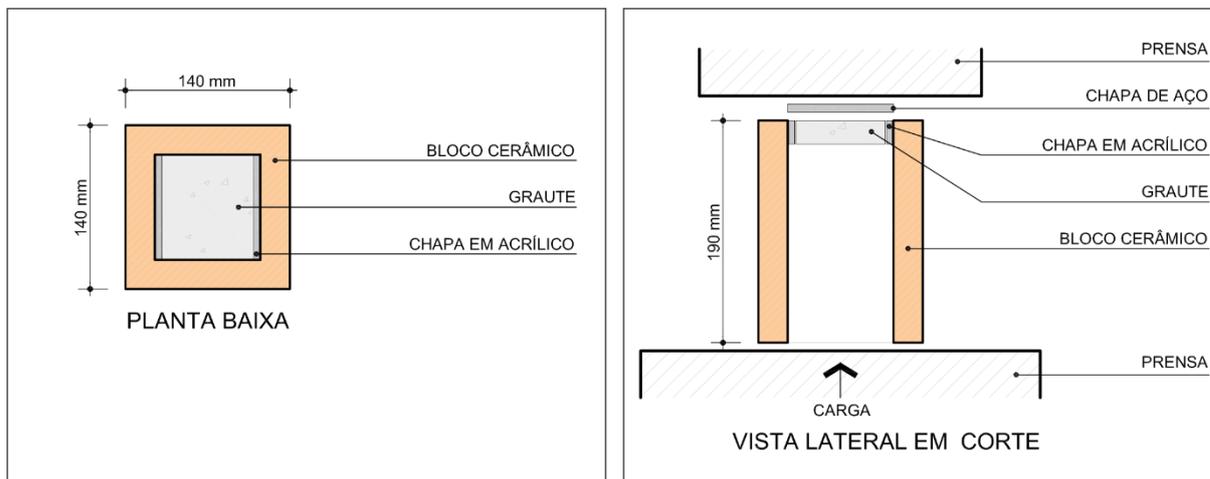


Figura 35 - Ensaio *push-out* com área de contato reduzida. Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Resistência à compressão com bloco cheio

O presente ensaio objetivou comparar os resultados de resistência à compressão entre bloco vazio e bloco cheio, a fim de avaliar o possível ganho de resistência dos blocos preenchidos com graute em relação aos blocos vazios. As amostras foram constituídas de seis corpos de prova para cada tipo de bloco, e os vazados dos blocos foram completamente preenchidos com graute e rompidos aos 28 dias. Conforme mostra a Figura 36 (a) e (b), previamente os corpos de prova foram capeados com pasta de cimento e areia, e saturados em água à temperatura ambiente por 24 horas.

O rompimento ocorreu em um equipamento para ensaios universal, marca Shimadzu, modelo UH – F, com capacidade de 2.000 kN. Conforme mostra a Figura 36 (c), a carga foi aplicada com carregamento contínuo de 0,05 MPa/s, conforme preconizado pela NBR 15270-3 (ABNT, 2005).

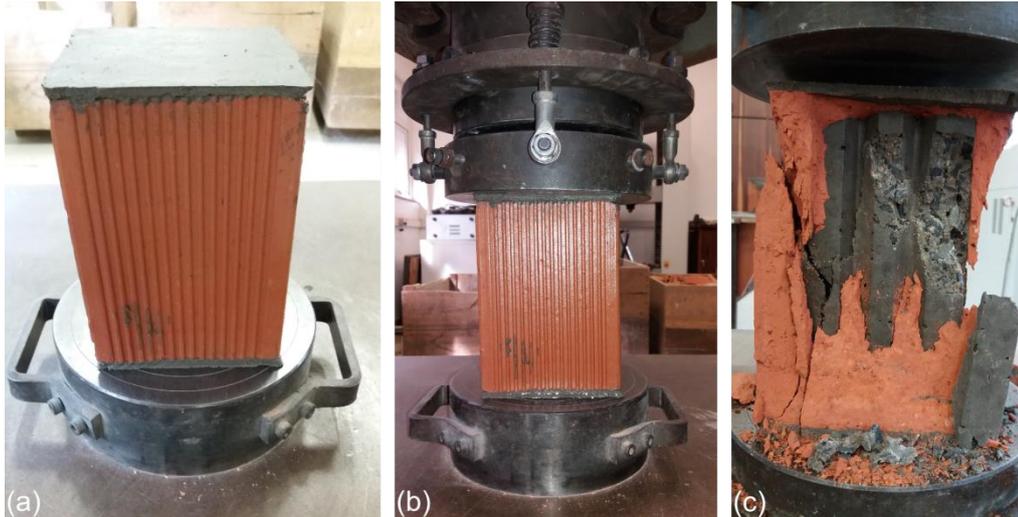


Figura 36 – Compressão com blocos cheios de graute. Fonte Acervo da pesquisa

4.5 Microscopia óptica

A fim de analisar a interface graute/ bloco cerâmico, foi utilizado um microscópio estereoscópio modelo SteREO Discovery.V12, da marca ZEISS, Figura 37 (a). O mesmo permitiu visualizar o contato do graute com as diferentes geometrias dos blocos e, assim, avaliar alguma possível falha de contato entre os elementos, como por exemplo, do bloco cerâmico de 10 MPa, conforme Figura 37 (b) e (c).

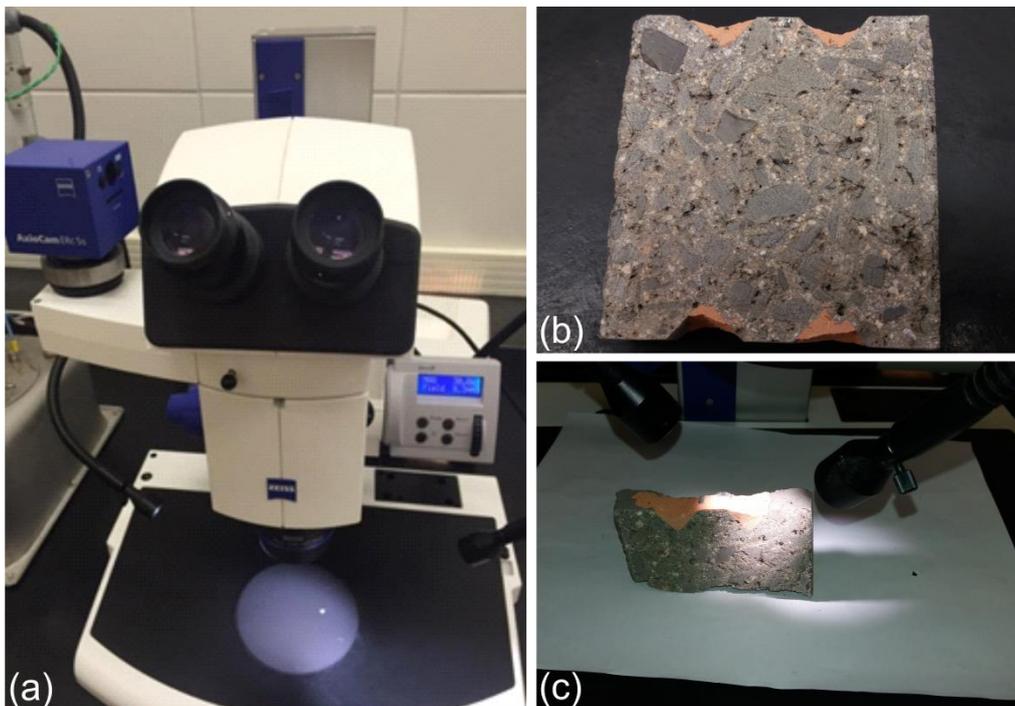


Figura 37 – Microscopia óptica dos corpos de prova. Fonte: Acervo da pesquisa

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, inicialmente, os resultados da caracterização dos blocos cerâmicos e graute, e posteriormente, os ensaios realizados, conforme mostrado na Figura 19.

5.1 Caracterização dos blocos

Os resultados da caracterização geométrica dos blocos mostraram que as amostras atendem aos requisitos da NBR 15270 – 2 (ABNT, 2005), visto que as medidas das faces, espessura das paredes e septos dos blocos apresentam resultados dentro dos limites estabelecidos por norma. Na Tabela 12, verificam-se os resultados obtidos na caracterização geométrica.

Tabela 12 - Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos

AMOSTRAS DE BLOCOS	Medidas das faces				Espessura das paredes e septos			
	L (mm)	A (mm)	C (mm)	Tolerância efetiva	Parede (mm)	Espessura mínima	Septo (mm)	Espessura mínima
7 MPa	140,0	192,0	139,0	± 3 mm	9,5	8 mm	8	7 mm
10 MPa	141,0	190,0	137,0		20	20 mm		8 mm
15 MPa	140,0	191,5	139,5		23			
18 MPa	142,0	191,0	138,5		27			

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados do desvio em relação ao esquadro (*D*) e planeza das faces (*F*) foram satisfatórios, pois se enquadram dentro do limite de 3 mm, preconizado pela NBR 15270 - 2 (ABNT, 2005). Na Tabela 13, são apresentados os resultados médios das amostras para desvio em relação ao esquadro, planeza das faces, área bruta e área líquida.

Tabela 13 - Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos

AMOSTRAS DE BLOCOS	Desvio em relação ao esquadro (D)	Planeza das faces (F)	Limites de D e F	Determinação da área bruta e área líquida	
				A_b média (cm ²)	A_{liq} média (cm ²)
7 MPa	1,5 mm	1 mm	3 mm	194,3	91,0
10 MPa	1,5 mm	1 mm		193,5	97,8
15 MPa	2 mm	1 mm		196,0	103,6
18 MPa	1 mm	1 mm		195,3	121,1

Fonte: Elaborado pelo autor

A resistência à compressão característica (f_{bk}) das amostras foi obtida após análise dos resultados, seguindo os critérios da NBR 15270 – 2 (ABNT, 2005). Os resultados ficaram acima da resistência estimada pelo fabricante. Na Tabela 14, são apresentados os resultados de resistência à compressão média (f_{bm}), resistência à compressão estimada ($f_{bk,est}$) e resistência característica à compressão (f_{bk}).

Tabela 14 – Resistência característica à compressão dos blocos (f_{bk})

AMOSTRAS DE BLOCOS	f_{bm} (MPa)	Desvio padrão f_{bm}	Coefficiente de variação f_{bm}	$f_{bk,est}$ (MPa)	$f_{b(1)} \times 0,99$ (MPa)	f_{bk} (MPa)
7 MPa	13,29	1,71	12,87%	9,84	8,27	9,84
10 MPa	13,90	2,80	20,13%	10,15	11,39	11,39
15 MPa	24,66	4,30	17,45%	17,81	12,24	17,81
18 MPa	23,29	3,21	13,76%	18,92	15,90	18,92

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da resistência à tração por fendilhamento mostraram alta variação dos resultados, mas, segundo a ASTM C 1006 (2013), o coeficiente de variação para amostras de cinco corpos de prova varia de 3 a 40%, com média de 20%. De acordo com a norma, a variação ocorre por causa da variabilidade das propriedades do material testado.

A relação entre a resistência à tração (f_t) e à compressão (f_{bk}), mostrada na Tabela 15, variou entre 8,6% (bloco 18 MPa) e 13,72% (bloco 10 MPa). Esses valores da relação f_t/f_{bk} são superiores aos obtidos por Mendes (1998), Rizzatti *et al.* (2012) e Izquierdo (2015), pois esses autores obtiveram relação f_t/f_{bk} que variou entre 5 e 7%. Essa diferença pode estar associada a diferentes características dos materiais testados, bem como à execução do ensaio e ao cálculo de f_t , pois, segundo a ASTM C 1006 (2013), o valor de L deve ser adotado a partir do comprimento líquido do corpo de prova.

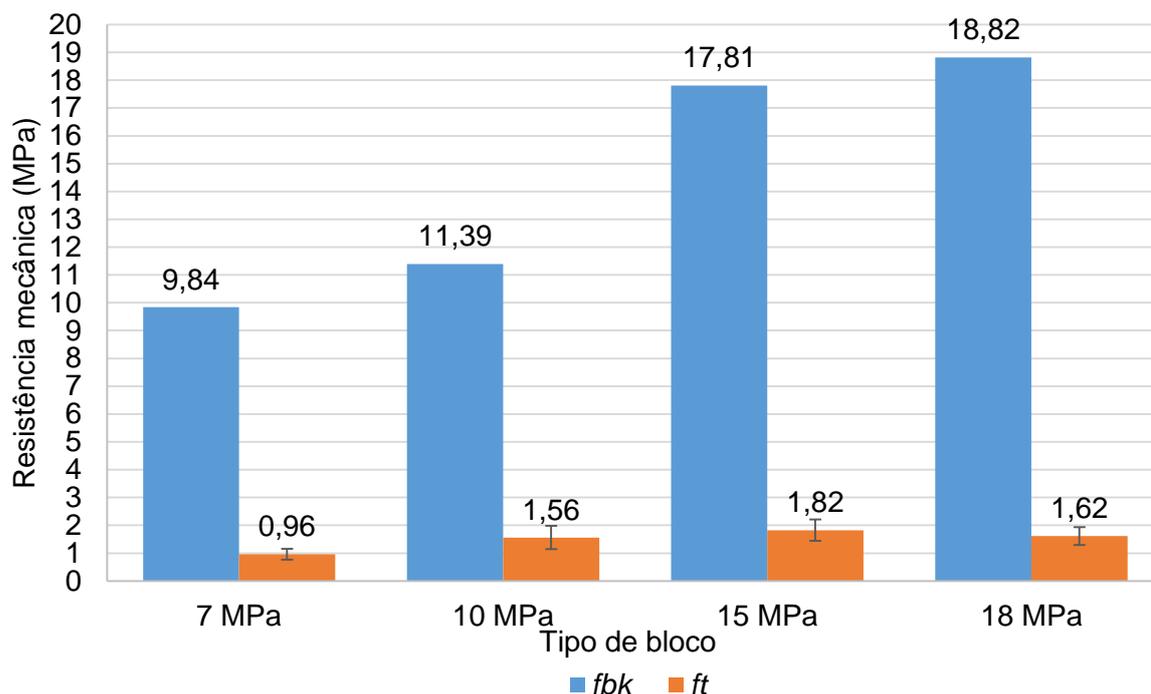
Tabela 15 – Resistência à tração por fendilhamento e relação $f_t/f_{bk,est}$

AMOSTRA DE BLOCOS	f_t (MPa)	Desvio padrão f_t	Coefficiente de variação f_t	f_{bk} (MPa)	Relação f_t/f_{bk}
7 MPa	0,96	0,19	20,22%	9,84	9,78%
10 MPa	1,56	0,42	26,61%	11,39	13,72%
15 MPa	1,82	0,39	21,18%	17,81	10,24%
18 MPa	1,62	0,32	19,87%	18,82	8,60%

Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 1, é realizado o comparativo entre f_{bk} e f_t . Apesar de o bloco de 18 MPa possuir a maior resistência mecânica à compressão, apresentou f_t próximo ao do bloco de 10 MPa, que possui f_{bk} de 11,39 MPa. O bloco de 7 MPa foi o que apresentou a menor resistência à tração. No entanto, a relação f_t/f_{bk} é próxima de 10%. O resultado obtido no bloco de 18 MPa pode estar associado à quantidade de defeitos relacionados ao maior volume de argila. Esses defeitos atuam como concentradores de tensão e promovem a ruptura à tração por fendilhamento.

Gráfico 1 – Resultados de f_{bk} e f_t



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme mostrado na Tabela 16, os resultados do índice de absorção d'água (AA) ficaram entre 10,7 e 13%, estando dentro dos limites estabelecidos por norma, a qual recomenda que AA deve ficar entre 8 e 22%. Já os resultados do índice de absorção d'água inicial (AAI) ficaram entre 18,22 e 23,21 (g/193,55 cm²)/min, indicando que os blocos possuem absorção inicial adequada, pois é inferior a 30 (g/193,55 cm²)/min.

De acordo com a NBR 15270-3 (ABNT, 2005), quando o índice de absorção d'água inicial (AAI) resultar em valores superiores a 30 (g/193,55 cm²)/min, os blocos devem ser umedecidos antes do assentamento, a fim de evitar a retirada de água da argamassa e, conseqüentemente, diminuir sua resistência mecânica. Essa recomendação também pode ser extrapolada para o graute, visto que a retirada de água em excesso irá prejudicar sua aderência ao substrato do bloco, bem como afetará a resistência mecânica do graute.

Tabela 16 - Determinação do índice de absorção d'água e índice de absorção d'água inicial

AMOSTRAS DE BLOCOS	Índice de absorção d'água (AA)	Limite para AA	Índice de absorção inicial - AA/ (g/193,55 cm ²)/ min	Limite para AA/
7 MPa	13,00%	8% <AA< 22%	18,93	AA/ < 30
10 MPa	10,90%		18,22	
15 MPa	11,40%		23,21	
18 MPa	10,70%		21,98	

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados obtidos nos ensaios de absorção, seguindo as recomendações da NBR 15270 – 3 (ABNT, 2005), foram extrapolados para a ASTM C 373 (2017) e, então, determinou-se o volume exterior, volume de poros abertos e a porosidade aparente das amostras. Os resultados mostrados na Tabela 17 indicam que a porosidade aparente do bloco de 7 MPa é de 25%. Logo, superior à 22%, conforme recomendado pela norma brasileira. Os demais blocos apresentaram porosidade dentro dos limites estabelecidos.

Tabela 17 – Determinação do volume de poros e porosidade aparente

AMOSTRAS DE BLOCOS	Volume exterior (cm ³)	Volume de poros abertos (cm ³)	Porosidade aparente
7 MPa	1745	435	25%
10 MPa	1853	388	21%
15 MPa	1976	433	22%
18 MPa	2315	473	20%

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da digitalização a laser dos blocos foi possível reproduzir com precisão a geometria e o perímetro dos quatro tipos de blocos. Os resultados apontaram que o bloco de 10 MPa apresenta o maior perímetro e, consecutivamente, promove maior área de contato com o graute. O bloco de 15 MPa também possui perímetro elevado, em função das diversas ranhuras que lhe proporcionam aumento da área de contato. Na Figura 38, são apresentados os resultados da digitalização, bem como o perímetro do vazado de cada tipo de bloco.

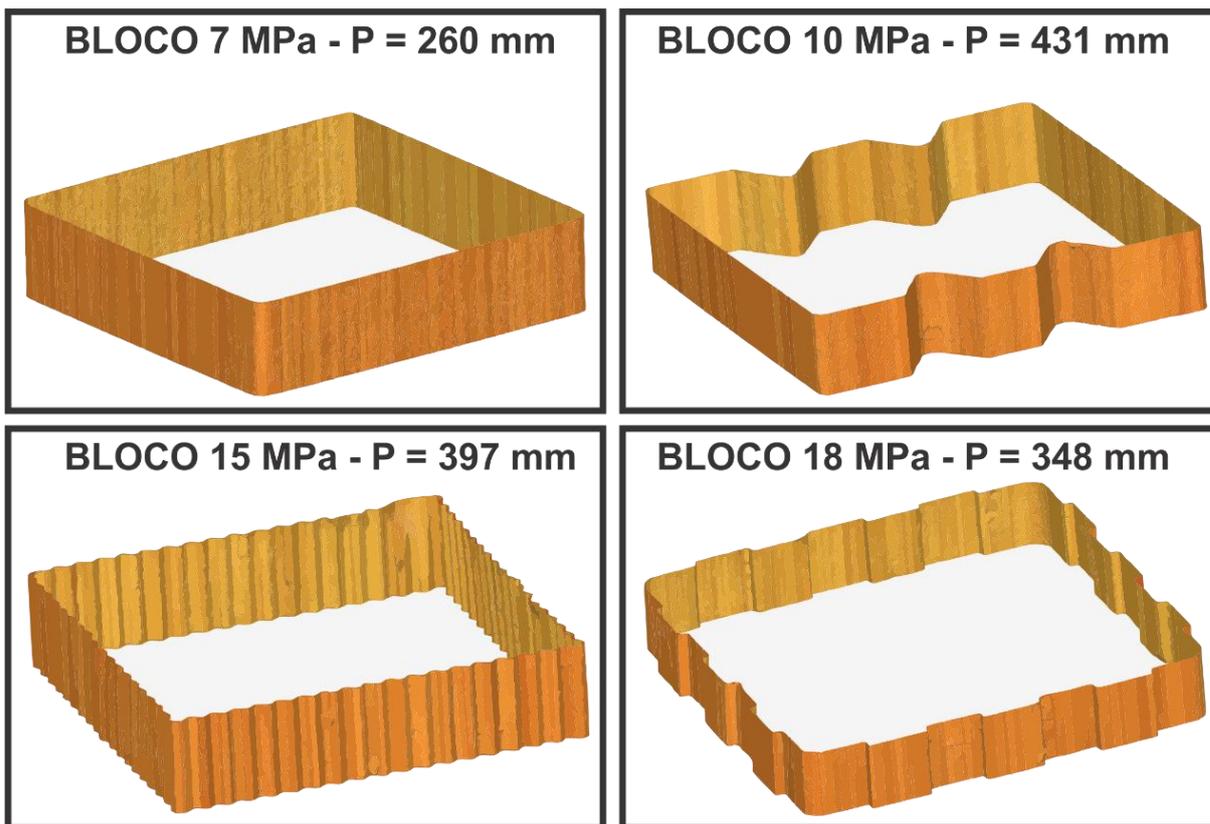


Figura 38 - Digitalização da superfície dos vazados dos blocos. Fonte:Acervo da pesquisa

5.2 Caracterização do graute

De acordo com a Tabela 18, os resultados do ensaio de resistência à compressão do graute mostraram que a resistência média foi de 33,78 MPa. Esse resultado ficou próximo do proposto na metodologia, em que se buscava resistência à compressão de 30 MPa. Também apresentou resultado próximo ao de Izquierdo (2015), visto que foi seguido o mesmo traço.

Tabela 18 – Resultados de resistência à compressão do graute

CP	Média H (mm)	Média \varnothing (mm)	Área (mm ²)	Carga de ruptura (kN)	f_c
1	190,0	100	31415,93	258,0	32,85
2	178,2	100,1	31478,79	239,6	30,45
3	187,5	100,2	31541,72	296,8	37,64
4	185,4	99,3	30977,64	264,6	34,17
Média					33,78
Desvio padrão					3,00
Coefficiente de variação					8,89%

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 19, são apresentados os resultados do módulo estático de elasticidade à compressão e coeficiente de Poisson do graute. O módulo de deformação do graute foi, em média, 30,68 GPa e o Poisson 0,19. Segundo a NBR 15812-1 (ABNT, 2010), as propriedades elásticas da alvenaria podem ser adotadas como 12 GPa para módulo de deformação longitudinal e 0,15 para coeficiente de Poisson.

Posteriormente ao ensaio de módulo, foi determinada a resistência à compressão efetiva ($f_{c,ef}$), que apresentou a mesma média da resistência à compressão (f_c).

Tabela 19 - Resultados do módulo estático de elasticidade à compressão e Poisson do graute

CP	Média H (mm)	Média \varnothing (mm)	Área (mm ²)	Carga de ruptura (kN)	$f_{c,ef}$ (MPa)	E (GPa)	Poisson
1	187,3	99,7	7806,93	280,2	35,89	31,58	0,22
2	192,2	100,2	7885,43	264,4	33,53	32,01	0,16
3	188,5	99,9	7838,28	245,6	31,33	29,94	0,18
4	187,2	99,7	7806,93	268,2	34,35	29,19	0,22
Média					33,78	30,68	0,19
Desvio padrão					1,90	1,34	0,03
Coefficiente de variação					5,63%	4,35%	16,80%

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 *Push-out*

Os resultados do ensaio de *push-out* mostraram que a aderência graute/bloco é superior à resistência mecânica à tração do bloco, pois em todos os corpos de prova ocorreu a ruptura do bloco antes de qualquer escorregamento do graute

Na Tabela 20 são apresentados os resultados médios da carga última de ruptura das amostras, na qual a carga foi dividida pela área de contato média, resultando na tensão média de aderência. Também obteve-se o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados individuais da tensão de aderência para cada tipo de bloco.

A maior carga de ruptura foi da amostra constituída com bloco de 15 MPa, em que a carga atingiu média de 210 kN, resultando em uma tensão média de aderência de 2,93 MPa. A amostra com bloco de 18 MPa também resistiu à elevadas cargas, atingindo média de 165 kN, que resultou em uma tensão de aderência de 2,64 MPa. Já o bloco de 10 MPa, apesar de possuir a maior área de contato, apresentou tensão de aderência média de 1,42 MPa, sendo a menor entre as amostras. O bloco de 7 MPa foi o que apresentou a menor carga de ruptura. Entretanto, devido à reduzida área de contato em relação aos outros blocos, obteve tensão de aderência de 1,73 MPa.

Tabela 20 - Resultados do *push-out*

Amostra de bloco	Carga média de ruptura (kN)	Perímetro dos blocos (mm)	Área de contato média (mm ²)	Tensão média de aderência (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação
7 MPa	81,4	260	47164	1,73	0,23	13,44%
10 MPa	110	431	77409	1,42	0,34	23,84%
15 MPa	210,2	397	71520	2,93	0,38	12,89%
18 MPa	165,3	348	62501	2,64	0,37	14,09%

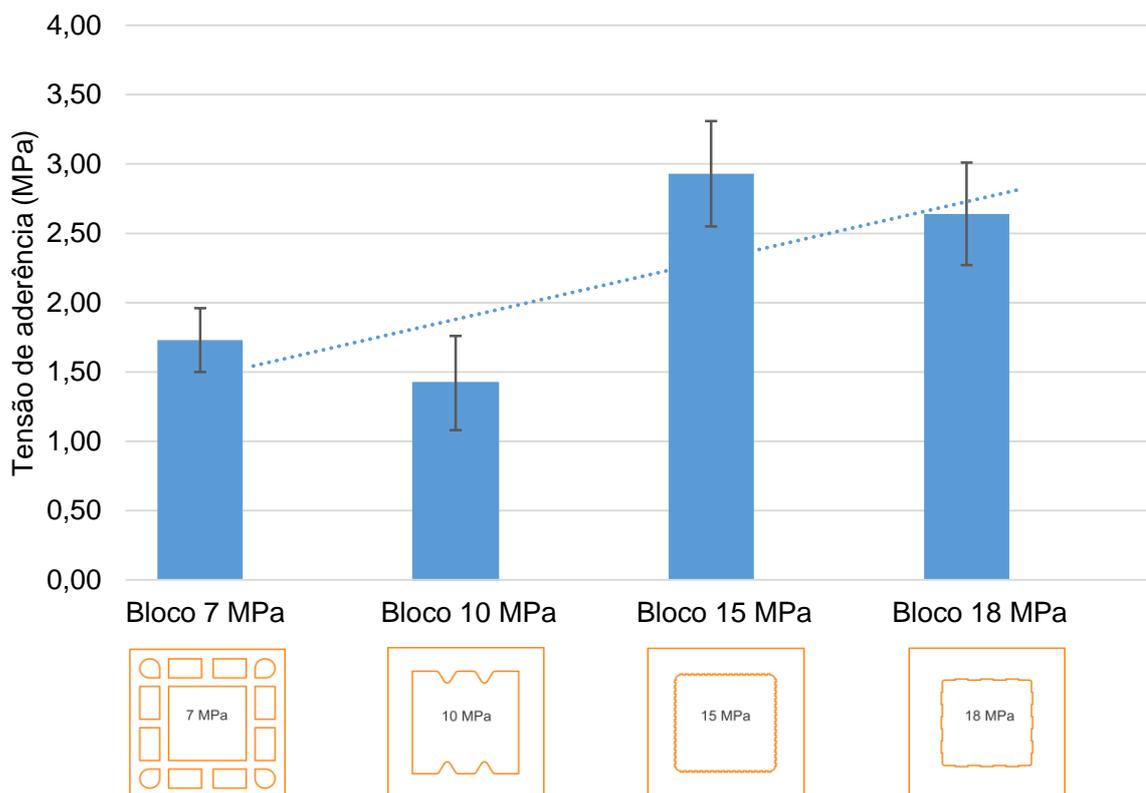
Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 2, verifica-se que há um crescimento da tensão de aderência em função da resistência mecânica à compressão do bloco. Embora a média dos resultados com bloco de 10 MPa seja inferior aos demais, houve um elevado coeficiente de variação, que faz com que ele atinja a reta de previsão linear do gráfico.

Observa-se, no Gráfico 3, que a tensão de aderência apresenta crescimento linear em função do aumento da área de contato para os blocos de 7, 15 e 18 MPa. Já o bloco de 10 MPa mostrou comportamento interessante e distinto dos demais, pois, apesar de possuir a maior área de contato, obteve a menor tensão de aderência. Acredita-se que esse comportamento de ruptura do bloco de 10 MPa esteja relacionado a dois fatores:

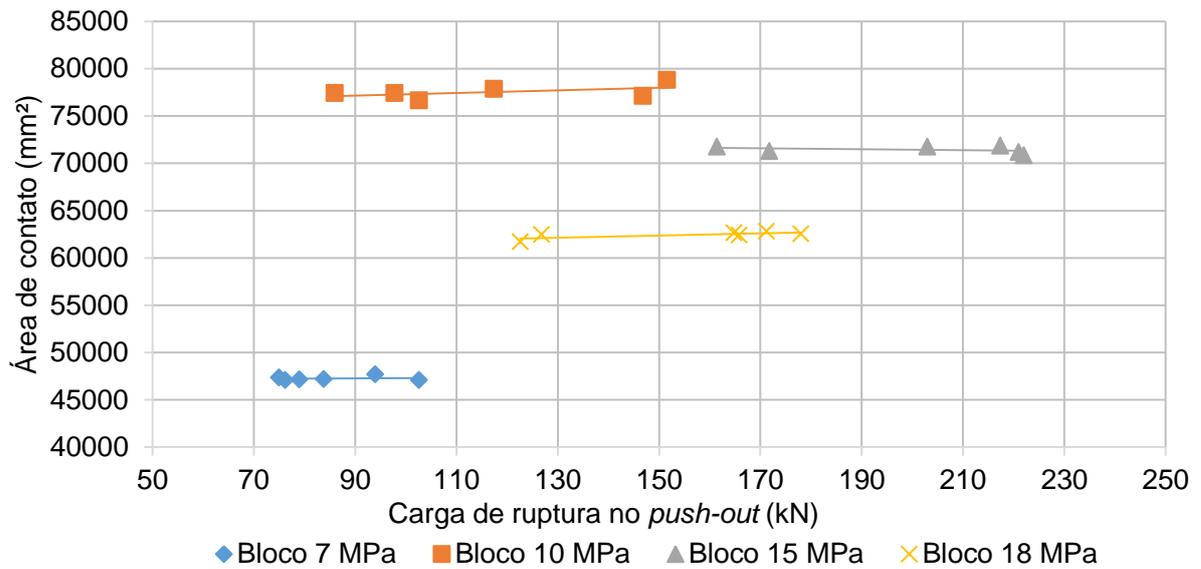
- a) Elevada área de contato, que proporciona aumento da transferência de tensões do graute para a parede do bloco e, conseqüentemente, promove a ruptura por tração;
- b) Possui relação f_{bk}/A_{liq} de 12%, sendo esse valor baixo quando comparado aos blocos de 15 e 18 MPa, que possuem relação de 17 e 16%, respectivamente.

Gráfico 2 – Resultados da tensão de aderência no *push-out*



Fonte: Elaborado pelo autor

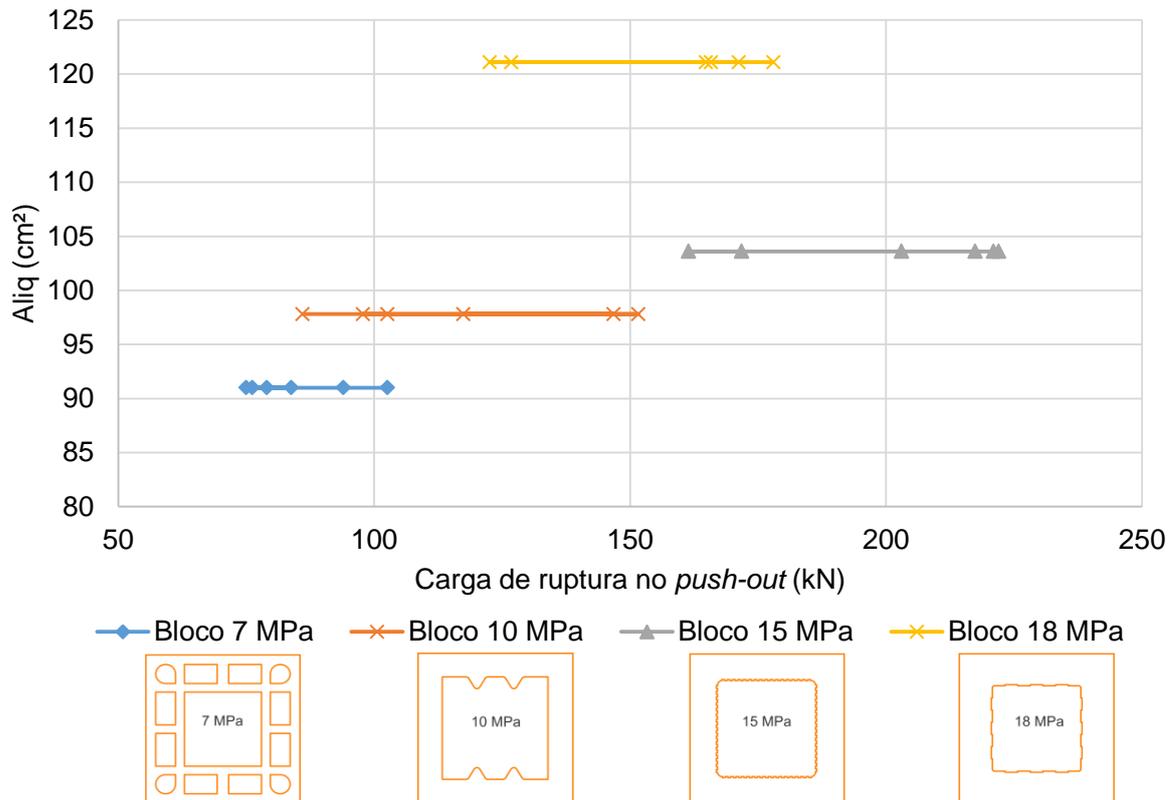
Gráfico 3 – Relação da carga de ruptura no *push-out* e área de contato



Fonte Elaborado pelo autor

Conforme mostrado no Gráfico 4, quando se relaciona a tensão de ruptura no *push-out* com a área líquida dos blocos, verifica-se que bloco de 10 MPa apresenta ruptura próxima ao do bloco de 7 MPa, com exceção de dois corpos de prova que romperam com cargas mais elevadas. O bloco de 15 MPa, mesmo não tendo A_{liq} elevada, possui grande área de contato em função das ranhuras. Logo, isso lhe assegurou ruptura com maiores cargas. O bloco de 18 MPa apesar de ter a maior A_{liq} entre as amostras, apresentou ruptura mediana, entre o bloco de 10 e 15 MPa.

Gráfico 4 – Relação da carga de ruptura no *push-out* com a área líquida do bloco



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.1 Formas de ruptura do *push-out*

Conforme já citado anteriormente, não houve escorregamento do graute em nenhum corpo de prova e, após a ruptura, em alguns corpos de prova graute e bloco permaneceram aderidos. No entanto, observou-se em outras regiões que não houve aderência, pois, a superfície do bloco apresentou-se limpa e sem nenhum resquício de graute.

A amostra com blocos de 7 MPa apresentou ruptura frágil através da fissuração dos cantos do bloco. Isso ocorreu em virtude dessas regiões apresentarem maior concentração de tensões. Conforme observa-se na Figura 39 (a) e (b), após a ruptura do conjunto, ocorreu o predomínio da aderência graute/bloco.

A amostra com blocos de 10 MPa apresentou ruptura brusca através da fissuração longitudinal da parede do bloco nos cantos. Não houve desprendimento da parede do bloco, conforme observa-se na Figura 39 (c) e (d), pois a região compreendida pelos “dentes” do bloco apresentou boa aderência, realizando o travamento mecânico.

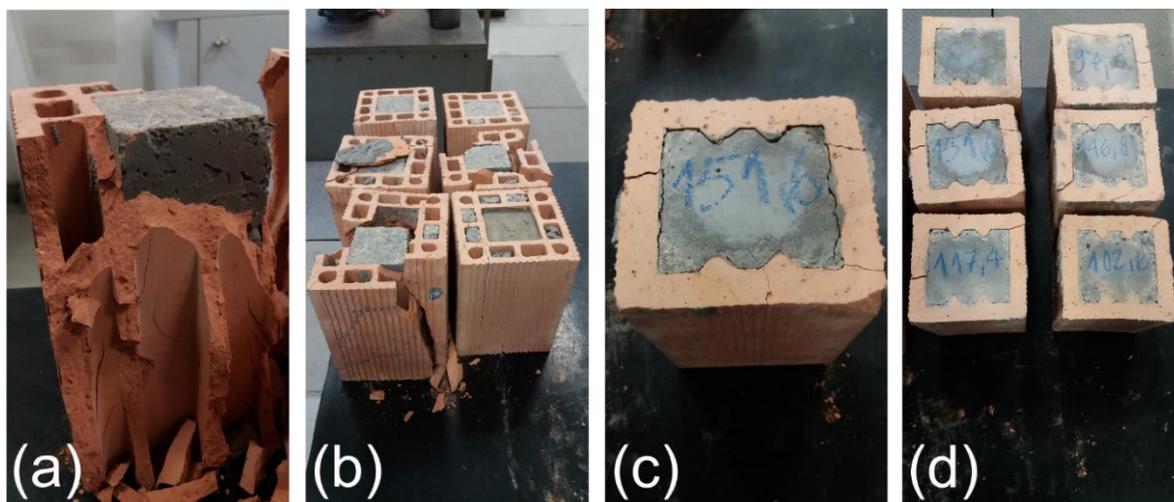


Figura 39 - Ruptura *push-out* com bloco de 7 e 10 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa

A amostra com blocos de 15 MPa apresentou ruptura brusca através da fissuração longitudinal da parede do bloco nos cantos. Em alguns corpos de prova, ocorreu o desprendimento das paredes do bloco, conforme observa-se na Figura 40 (a) e (b). No entanto, em algumas regiões, observam-se resquícios de graute aderidos ao bloco, indicando a existência de aderência.

Nas amostras com bloco de 15 MPa formou-se muitas bolhas no graute na interface com o bloco. Essas bolhas foram geradas pela migração do ar presente no graute para a superfície do bloco e, em função das ranhuras do mesmo, ocorreu o aprisionamento do ar nessas cavidades, diminuindo o contato graute/ bloco.

A amostra com bloco de 18 MPa também apresentou ruptura brusca através da fissuração longitudinal da parede do bloco nos cantos. A aderência graute/ bloco foi significativa na região compreendida pelos “dentes”, visto que em algumas regiões a ruptura ocorreu no bloco e em outras no graute.

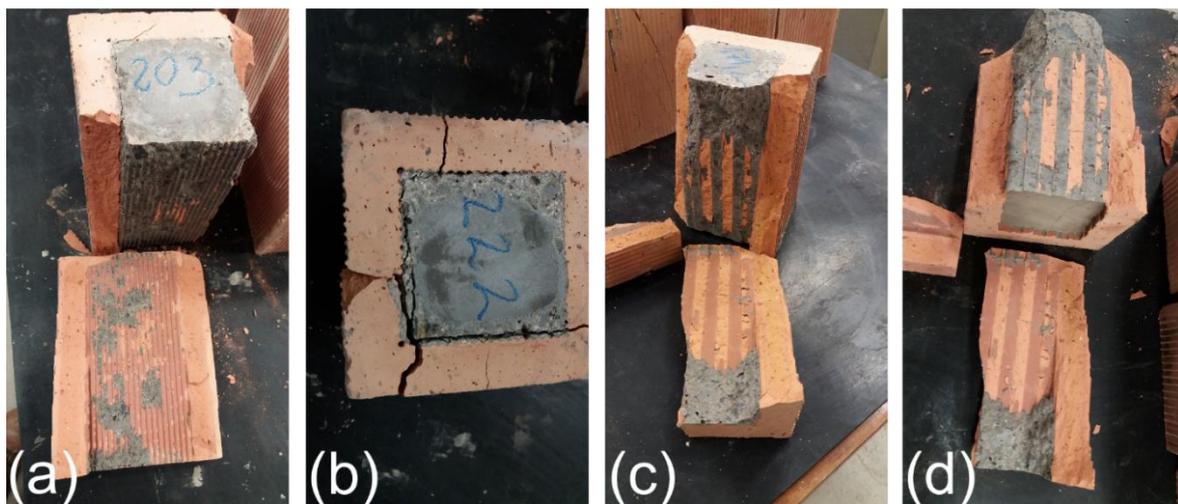


Figura 40 – Ruptura *push-out* com blocos de 15 e 18 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa

5.4 *Push-out* com área de contato reduzida

A redução do contato graute/ bloco permitiu medir a aderência sem a influência da resistência mecânica do bloco, visto que quanto maior a área de contato, maior é a transferência de tensão para o bloco. Portanto, o contato foi reduzido para uma área que corresponde, em média, a 5% da área de contato do *push-out*.

Conforme mostrado na Tabela 21, os resultados apresentaram elevada aderência, pois, com exceção da amostra com bloco de 15 MPa, as demais apresentaram tensão de aderência superiores ao *push-out*.

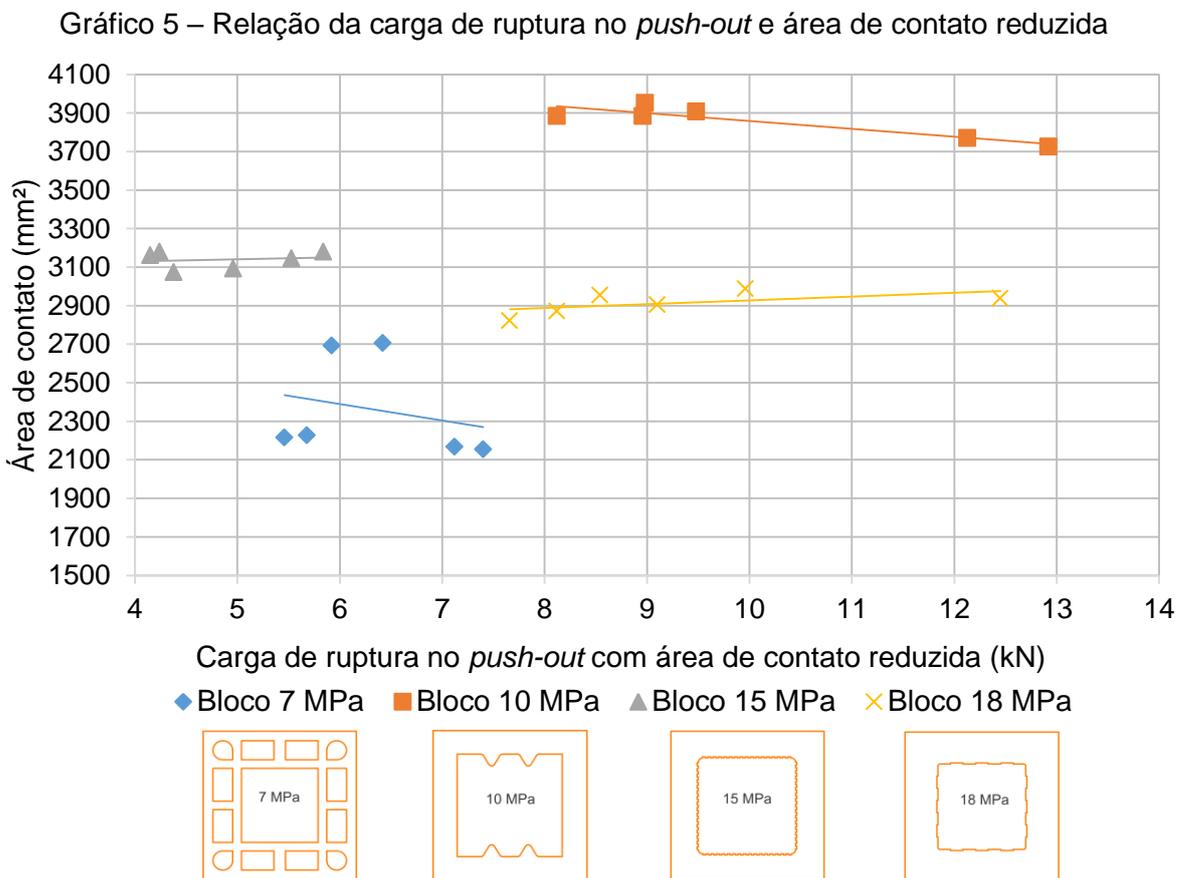
Tabela 21 – Resultados do *push-out* com área de contato reduzida

Amostra de bloco	Carga média de ruptura (kN)	Perímetro dos blocos (mm)	Área de contato média (mm ²)	Tensão média de aderência (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
7 MPa	6,17	260	2221	2,51	0,51	20,46%
10 MPa	9,23	431	3885	2,37	0,57	24,01%
15 MPa	4,67	397	3154	1,51	0,22	14,69%
18 MPa	8,82	348	2921	3,01	0,56	18,60%

Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras com blocos de 10 e 18 MPa foram as que apresentaram a maior carga de ruptura, sendo 9,23 e 8,82 kN, respectivamente. A amostra com blocos de 7 MPa, apesar de ser a única com parede do bloco lisa, apresentou excelente resultado, com carga média de ruptura de 6,17 kN. Já a ruptura da amostra com blocos de 15 MPa ocorreu com cargas mais baixas, em média, 4,67 kN. Esse resultado da amostra de 15 MPa se contrapõe ao obtido no *push-out*, onde foi apresentada a maior carga de ruptura entre as outras amostras.

No Gráfico 5, observa-se que a tensão de aderência apresenta crescimento linear em função do aumento da área de contato para os blocos de 7, 18 e 10 MPa. Já o bloco de 15 MPa mostrou comportamento distinto dos demais, pois, apesar de possuir elevada área de contato, obteve a menor tensão de aderência.

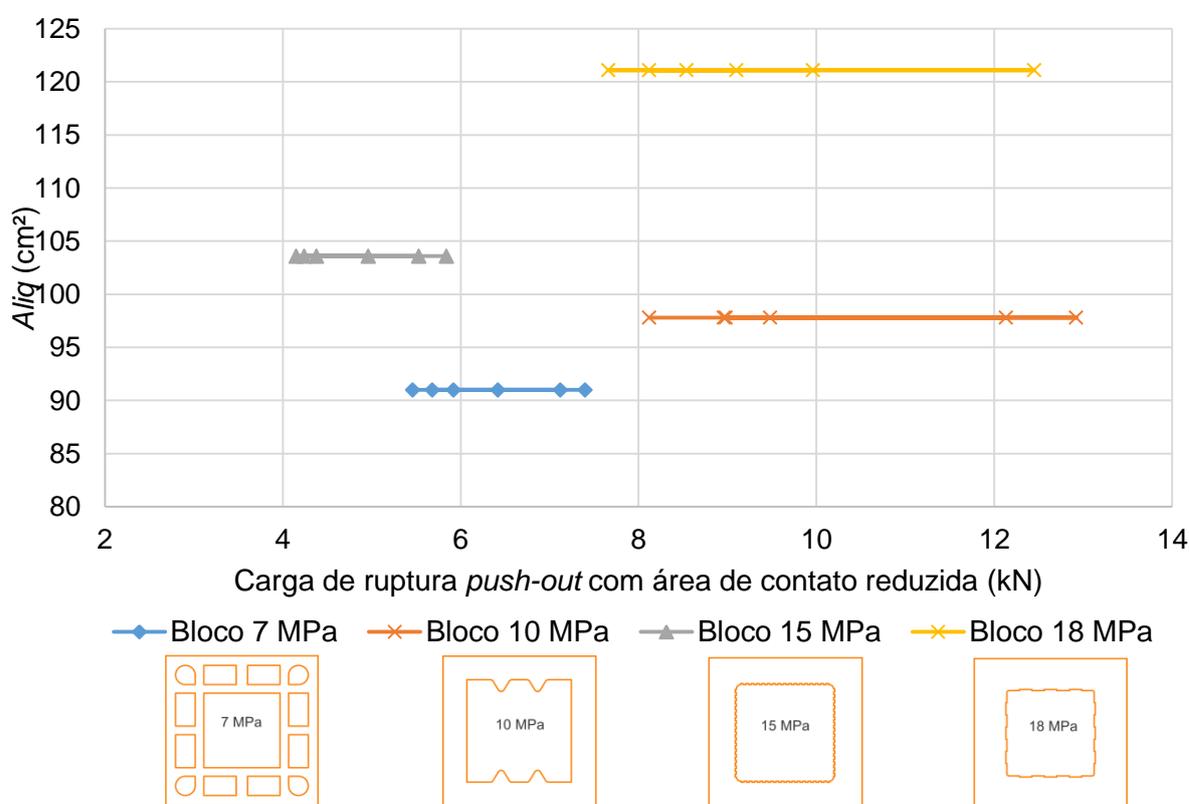


Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme mostrado no Gráfico 6, quando se relaciona a carga de ruptura e área líquida dos blocos, verifica-se que a amostra com bloco de 15 MPa apresenta carga de ruptura inferior ao do bloco de 7 MPa, portanto, neste caso a área líquida não influenciou na aderência.

As amostras com blocos de 10 MPa e 18 MPa apresentaram cargas de ruptura mais elevadas, com destaque para a amostra com bloco de 10 MPa, que apresentou resultado superior ao obtido no *push-out*.

Gráfico 6 – Relação carga de ruptura no *push-out* com área de contato reduzida e área líquida do bloco



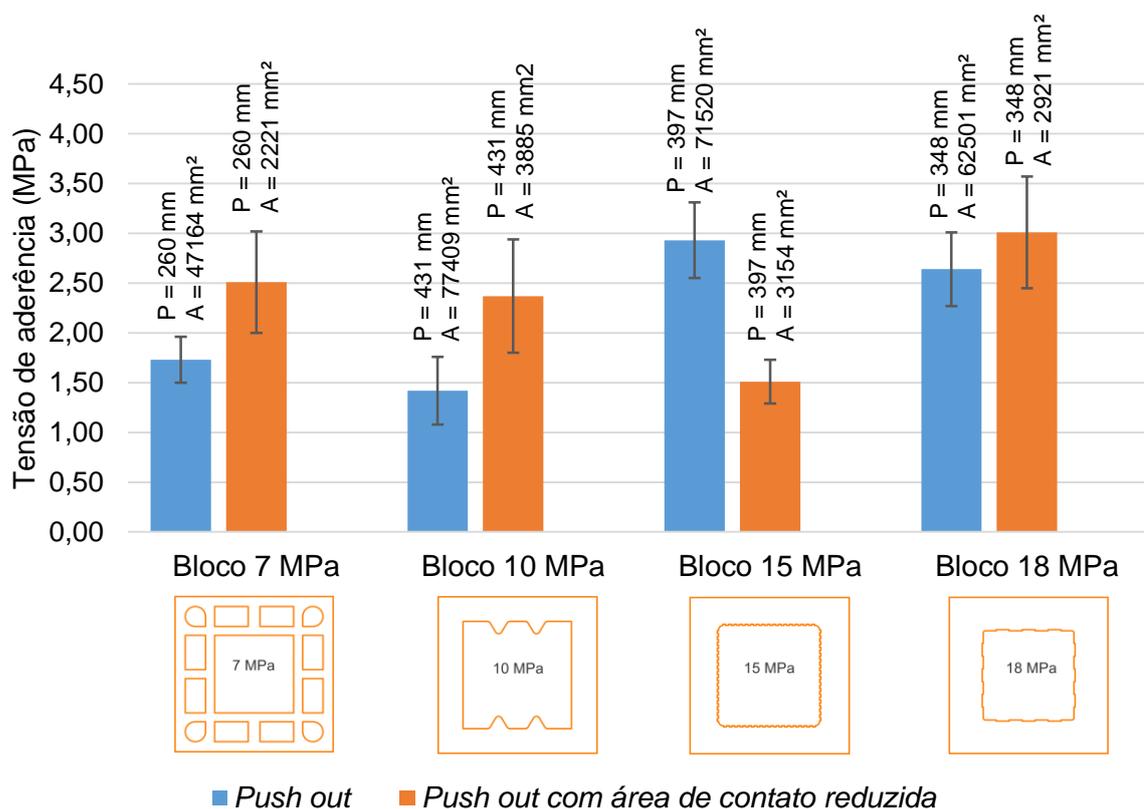
Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 7, é realizado o comparativo entre os resultados da tensão de aderência do *push-out* e *push-out* com área e contato reduzida. Observa-se que com a redução da área de contato, somente a amostra com bloco de 15 MPa apresentou resultado inferior ao do *push-out*. Isso pode ser explicado pela fragilidade das ranhuras dos blocos, que influenciaram significativamente na redução da tensão de aderência. Portanto, nesse caso prevaleceu a resistência mecânica do bloco, pois quanto maior a área de contato, maior foi a tensão de aderência.

As amostras com blocos de 7 e 10 MPa apresentaram resultados muito semelhantes, indicando que não há diferença significativa entre a parede lisa do bloco de 7 MPa e a parede com os “dentes” do bloco de 10 MPa. Nessas amostras prevaleceu a aderência graute/ bloco, pois quando reduzida a área de contato, houve aumento da tensão de aderência.

A amostra com blocos de 18 MPa apresentou tensão de aderência similar entre *push-out* e *push-out* com contato reduzido. A tensão de aderência com contato reduzido foi superior a todas as demais amostras, indicando que as características da parede do bloco influenciaram no aumento da aderência, prevalecendo a aderência graute/ bloco.

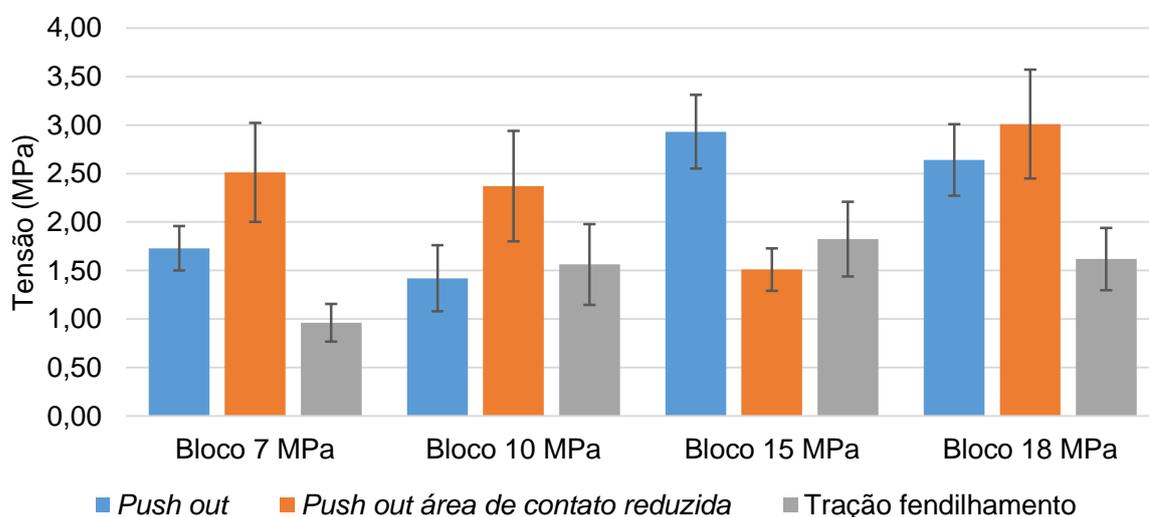
Gráfico 7 – Comparativo entre os resultados de tensão de aderência dos ensaios de *push-out* e *push-out* com área de contato



Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 8, é realizada a relação entre os resultados de *push-out*, *push-out* com área de contato reduzida e tração por fendilhamento. Observa-se que somente a amostra com bloco de 15 MPa apresentou tensão de aderência com área reduzida inferior à tração. As demais amostras apresentaram tensão de aderência superior à tração. Portanto, supõe-se que a aderência graute/ bloco seja superior aos resultados obtidos, pois a ruptura predominante nos corpos de prova foi por tração no bloco. Também é importante ressaltar que o resultado de tração por fendilhamento é uma aproximação da resistência à tração direta, então, a resistência à tração do bloco é superior à obtida.

Gráfico 8 - Resultados de *push-out*, *push-out* área de contato reduzida e tração por fendilhamento



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.1 Formas de ruptura do *push-out* com área de contato reduzida

O ensaio de *push-out* com a área de contato reduzida, mostrou que há significativa aderência graute/ bloco cerâmico de 7 MPa, conforme Figura 41 (a). A ruptura mostrou-se predominante no bloco, conforme pode ser observado na Figura 41 (b) e (c).



Figura 41 – Ruptura *push-out* com área de contato reduzida com bloco de 7 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa

Conforme Figura 42 (a) e (b), a aderência graute/ bloco cerâmico de 10 MPa foi mais significativa na região compreendida pelos “dentes”. Já as demais regiões não apresentaram boa aderência, indicando que os “dentes” proporcionam aumento da ancoragem mecânica.

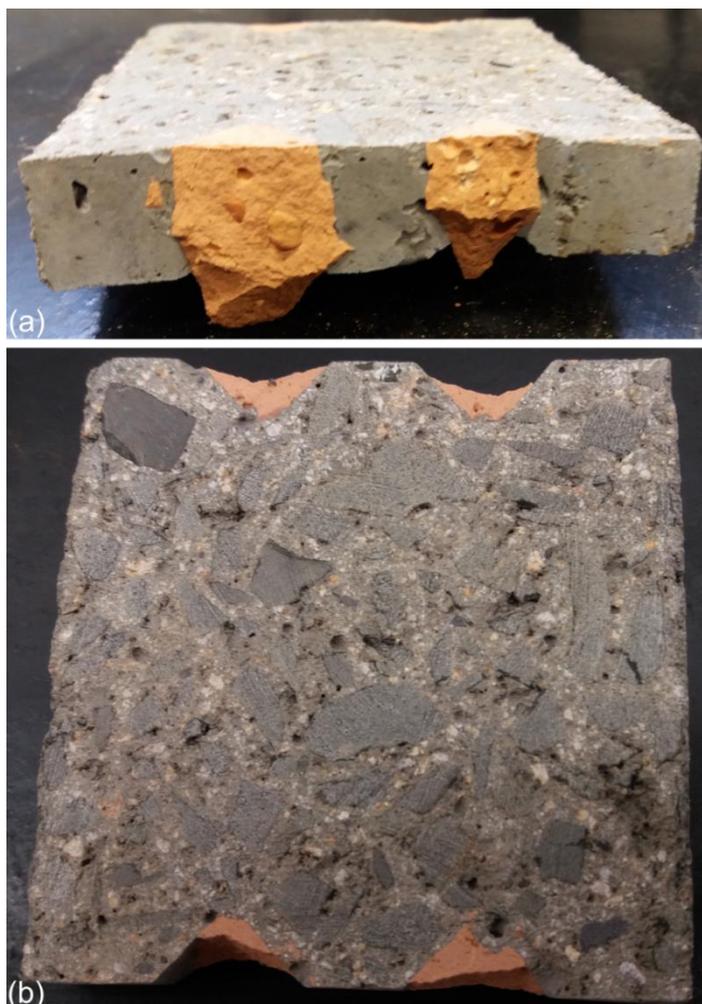


Figura 42 – Ruptura *push-out* com área de contato reduzida com bloco de 10 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa

A aderência graute/ bloco cerâmico de 15 MPa apresentou os menores resultados entre as amostras com área de contato reduzida. As ranhuras do bloco de 15 MPa proporcionam elevada área de contato, mas, mostraram-se frágeis, rompendo com facilidade durante o ensaio, conforme Figura 43 (a). Outro ponto desfavorável é que elas promovem o aprisionamento de ar e, conseqüentemente, a diminuição da área de contato, conforme é mostrado na Figura 43 (c).

De acordo com a Figura 43 (a) e (b), verifica-se que a ruptura ocorreu predominantemente no bloco, em uma camada com espessura de aproximadamente 3 mm, ou seja, na região compreendida pelas ranhuras.

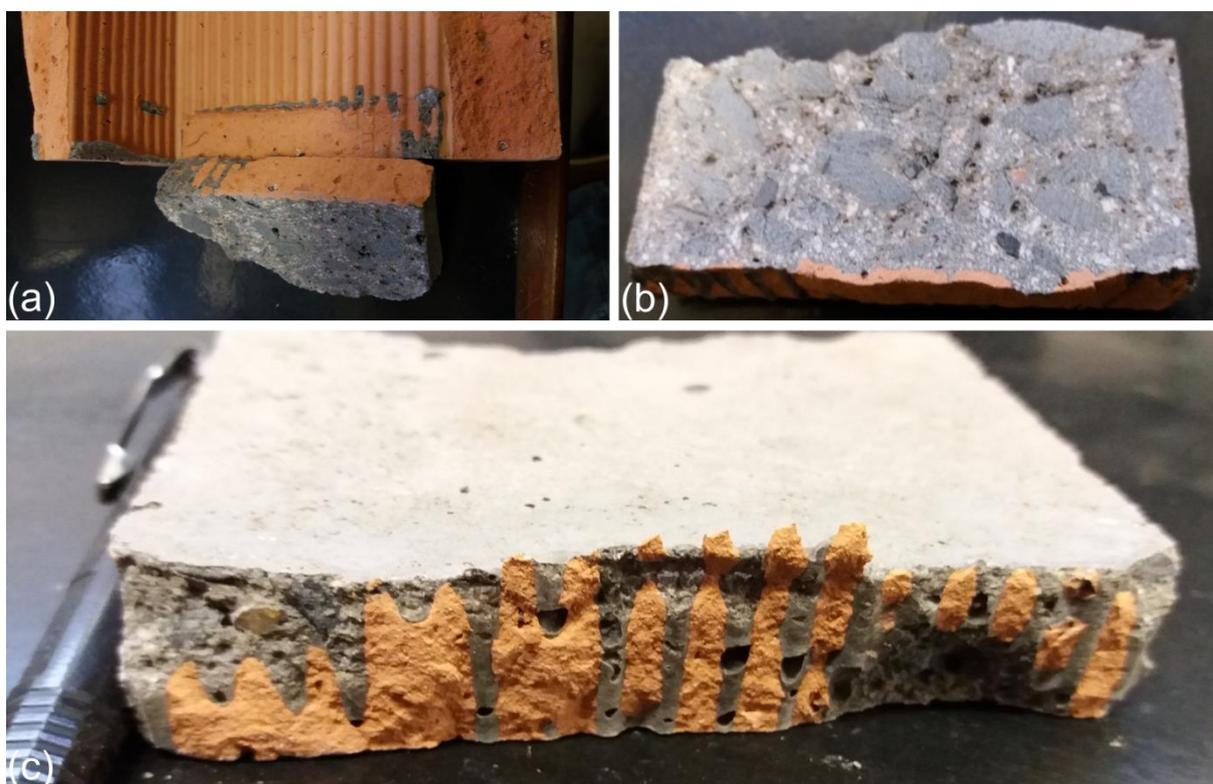


Figura 43 – Ruptura *push-out* com área de contato reduzida com bloco de 15 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa

Na Figura 44, observa-se que na amostra com blocos de 18 MPa a ruptura ocorreu nos “dentes” do bloco, indicando que naquele ponto a aderência é superior à resistência à tração do bloco.

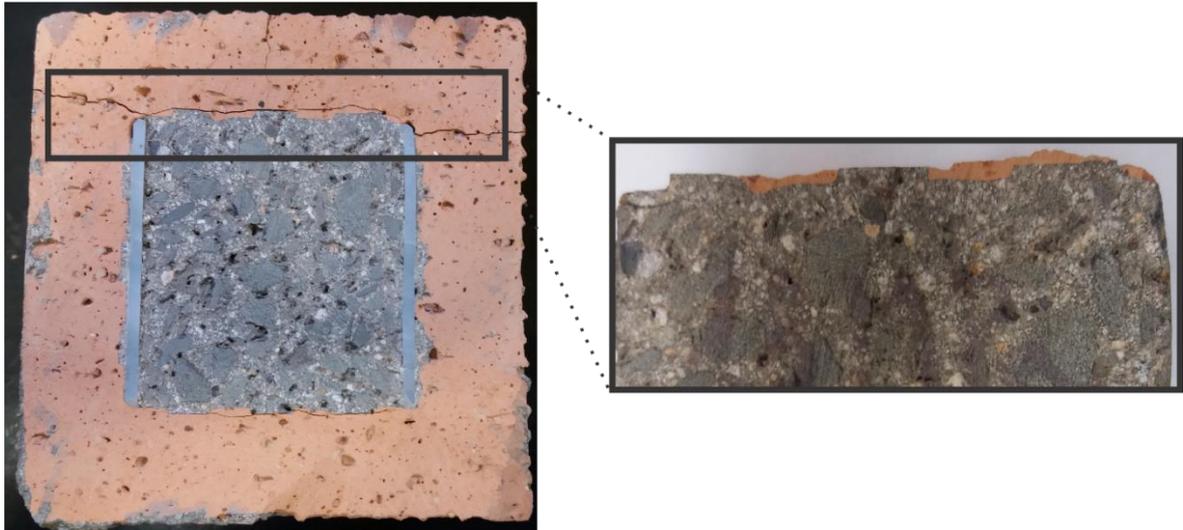


Figura 44 – Ruptura *push-out* com área de contato reduzida com bloco de 18 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa

5.5 Resistência à compressão com bloco cheio

Conforme mostrado na Tabela 22, todas as amostras preenchidas com graute apresentaram aumento de resistência à compressão. O bloco de 7 MPa apresentou aumento da resistência à compressão de 69% em relação ao f_{bk} ; o de 10 MPa, 137%; o de 15 MPa, 8%; e o de 18 MPa, 45%. Novamente, o bloco de 10 MPa mostrou comportamento distinto dos demais, e obteve significativo aumento de resistência. Atribui-se esse aumento ao maior volume de graute no vazado, comparado aos demais blocos. Como o f_{bk} é de 11,39 MPa e o graute possui f_{ck} de 33 MPa, ocorreu um aumento da resistência mecânica do conjunto, promovido pelo grauteamento do vazado.

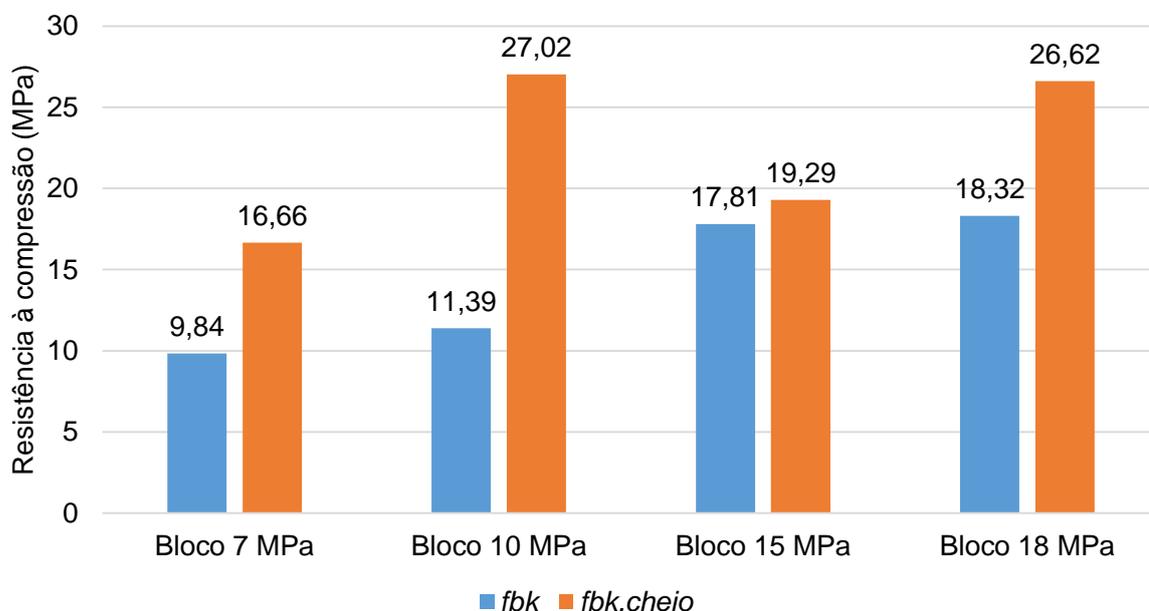
Tabela 22 – Resultados da resistência à compressão dos blocos cheios

AMOSTRAS DE BLOCO	Carga média de ruptura (kN)	$f_{bk,cheio}$ (MPa)	f_{bk} (MPa)	Relação $f_{bk,cheio}/f_{bk}$
7 MPa	391,3	16,66	9,84	69%
10 MPa	639	27,02	11,39	137%
15 MPa	506,6	19,29	17,81	8%
18 MPa	617,75	26,62	18,32	45%

Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 9, é realizado o comparativo entre f_{bk} e $f_{bk,cheio}$. Observa-se que os blocos cheios obtiveram aumento significativo de resistência à compressão axial, principalmente os blocos de 7, 10 e 18 MPa.

Gráfico 9 – Comparativo entre f_{bk} e $f_{bk,cheio}$



Fonte: Elaborado pelo autor

5.6 Microscopia óptica

As imagens de microscopia foram realizadas em corpos de prova rompidos no ensaio de *push-out* com área de contato reduzida. Foram analisadas as interfaces de ruptura, bem como regiões onde ainda havia aderência.

Como já citado anteriormente, de forma geral, as amostras apresentaram aderência graute/ bloco cerâmico estrutural, ocorrendo a ruptura predominantemente no bloco cerâmico. Na Figura 45 (a), observa-se a aderência graute/ bloco de 7 MPa, na qual o graute apresenta-se aderido ao substrato do bloco através de travamento mecânico. Observa-se a existência de pequenos vazios na interface provenientes do ar aprisionado durante o grauteamento.

Na Figura 45 (b), verifica-se a aderência graute/ bloco de 10 MPa na região compreendida pelo “dente”. Conforme mostrado anteriormente, essa região apresentou excelente aderência, que promoveu a ruptura no bloco.

A Figura 45 (c), apresenta a ruptura do graute/ bloco de 15 MPa, no qual constata-se a ruptura das ranhuras do bloco devido à fragilidade. Também foram observadas bolhas de ar entre as ranhuras, que prejudicaram o contato graute/ bloco.

Na Figura 45 (d), é mostrada a interface graute/ bloco de 18 MPa, em que se verifica a aderência graute/ bloco na região do “dente”. Já ao lado, na cavidade entre os “dentes”, observa-se que não houve aderência significativa.

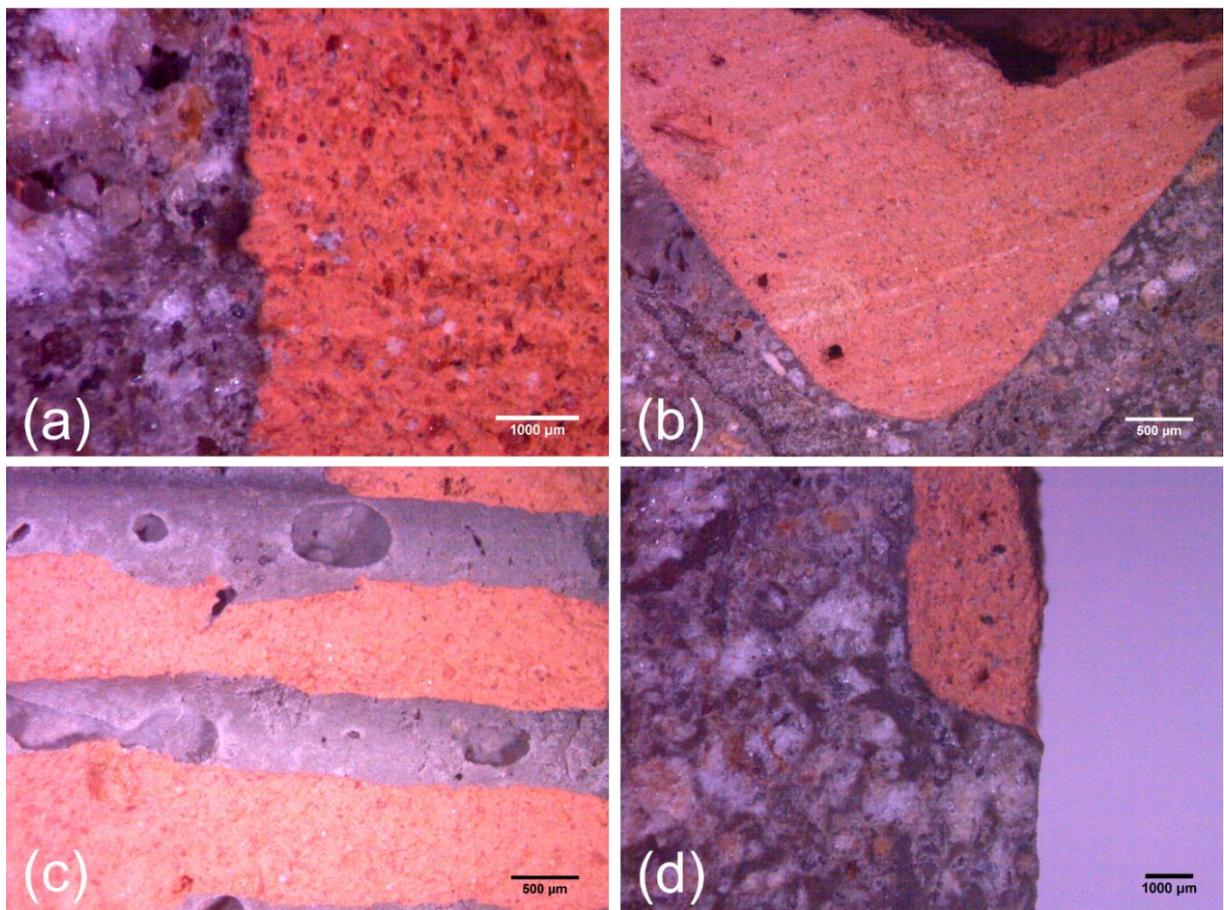


Figura 45 – Microscopia óptica das amostras; (a) bloco de 7 MPa, (b) bloco de 10 MPa, (c) bloco de 15 MPa e (d) bloco de 18 MPa. Fonte: Acervo da pesquisa

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho de pesquisa, é possível inferir as seguintes conclusões:

- A aderência graute/ bloco cerâmico estrutural não influenciou na resistência mecânica à compressão do conjunto, pois, em todos os corpos de prova a ruptura ocorreu primeiramente no bloco;
- Todas as amostras preenchidas com graute apresentaram aumento de resistência mecânica à compressão axial em relação ao bloco oco;
- O módulo de elasticidade do graute foi, em média, 30,68 GPa, e o coeficiente de Poisson 0,19. Como o Poisson do bloco cerâmico é entre 0,10 e 0,15, existe uma diferença entre os materiais;
- A redução da área de contato possibilitou determinar a tensão de aderência sem a influência das características mecânicas do bloco, ficando limitado aos fenômenos interfaciais entre graute e bloco. Obteve-se resultados de tensão de aderência superiores ao *push-out* para as amostras constituídas com blocos de 7, 10 e 18 MPa. Já a amostra com blocos de 15 MPa, com ranhuras, apresentou diminuição da tensão de aderência quando reduzida a área de contato. Isso deve-se, principalmente, as falhas de contato promovidas pelas bolhas de ar entre as ranhuras, e ao tamanho das ranhuras que impossibilitou a ancoragem do graute;
- Os resultados apontaram que a aderência graute/ bloco cerâmico sempre irá apresentar valores variados em decorrência da variabilidade das características dos blocos e grautes;

- Mesmo com a variabilidade de resultados, verifica-se que as amostras dos ensaios de *push-out* e *push-out* com área de contato reduzida apresentaram tensão de aderência entre 1,4 e 3 MPa, conforme Tabela 23. Os resultados obtidos são superiores aos obtidos por Izquierdo (2015) e Fisher (2016). Izquierdo obteve resultados entre 0,16 e 0,19 MPa. Já Fisher obteve resultados entre 0,36 e 1,16 MPa;

Frente aos resultados obtidos nesse trabalho e mostrados na Tabela 23, constatou-se na caracterização dos blocos cerâmicos que a resistência mecânica à tração é cerca de 10% da resistência característica à compressão. Conseqüentemente, a tensão de aderência é superior à resistência mecânica à tração e, portanto, a ruptura última do conjunto ocorre primeiramente no bloco.

Tabela 23 – Resumo dos resultados da pesquisa

AMOSTRA DE BLOCO	f_{bk} (MPa)	f_t (MPa)	Relação $f_t / f_{bk, est}$	Tensão média de aderência no <i>push-out</i> (MPa)	Tensão média de aderência no <i>push-out</i> com área de contato reduzida (MPa)
7 MPa	9,84	0,96	9,78%	1,73	2,51
10 MPa	11,39	1,56	13,72%	1,42	2,37
15 MPa	17,81	1,82	10,24%	2,93	1,51
18 MPa	18,82	1,62	8,60%	2,64	3,01

Fonte: Elaborado pelo autor

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa contribuiu com o avanço do estudo sobre a alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. No entanto, os resultados obtidos não podem ser extrapolados de forma generalizada, pois, a variabilidade das características de blocos cerâmicos e grautes podem influenciar nos resultados. Portanto, a seguir são sugeridos alguns assuntos que poderão ser estudados:

- Variar a resistência à compressão do graute;
- Variar a relação água/ cimento do graute;
- Variar a granulometria dos agregados do graute;
- Moldar corpos de prova com o mínimo de contato possível a fim de isolar a resistência mecânica do bloco;
- Avaliar a importância da resistência à tração dos blocos cerâmicos, como fator limitante à capacidade portante do sistema de alvenaria estrutural;
- Aumentar a escala dos corpos de prova, a fim de ensaiar paredes em tamanho real.

REFERÊNCIAS

- ABCI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. Manual técnico de alvenaria. São Paulo, 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods of splitting tensile strength of masonry units. ASTM C 1006 - 2013, Philadelphia, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Determination of Water Absorption and Associated Properties by Vacuum Method for Pressed Ceramic Tiles and Glass Tiles and Boil Method for Extruded Ceramic Tiles and Non-tile Fired Ceramic Whiteware Products. ASTM C 373 – 2017.
- ARANTES, César Augusto; CAVALHEIRO, Odilon Pancaro. Influência do graute na alvenaria estrutural de blocos vazados cerâmicos. Jornada sud-Americanas de Ingeniería Estructural. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo Mendoza. Argentina, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15270: Componentes cerâmicos. Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.
- _____ NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- _____ NBR 15812: Alvenaria estrutural – blocos cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010.
- _____ NBR 5738: Concreto – procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____ NBR 5739: Concreto – ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____ NBR 7211: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____ NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2007.

_____ NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____ NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____ NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

CALLISTER, William. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Grupo Gen-LTC, 2012.

CAMACHO, Jefferson S. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. Ilha Solteira: Unesp, 2006. Disponível em: <http://www.poteng.com.br/media/a2e1fe6a38486307ffff813ffffd524.pdf>>. Acesso em: 11 de agosto de 2017.

CAMACHO, Jefferson Sidney *et al.* Influência do graute e da taxa de armadura no comportamento à compressão da alvenaria de blocos de concreto. RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal, v. 8, n. 3, 2015.

CARASEK, Helena. Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. 1996. 1996. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- CARVALHO, Milene. Inclusão de compósitos cimentícios em blocos estruturais cerâmicos com foco em conforto térmico. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Porto Alegre, 2017.
- CHEEMA, Tariq S.; KLINGER, Richard E. Compressive strength of concrete masonry prisms. In: Journal Proceedings. 1986. p. 88-97.
- COSTA, Eliane Betânia Carvalho. Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- EBNESAJJAD, Sina; LANDROCK, Arthur H. Adhesives technology handbook. William Andrew, 2014.
- FISHER, H. Marcos. Análise e avaliação da aderência na interface entre bloco cerâmico e graute. Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC. Santa Cruz do Sul, 2016.
- GALLEGOS, Hector. Adhesión entre el mortero y las unidades de albañilería. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, v. 1, n. 1995, p. 117-33, 1995.
- GARCIA, Patricia Domingues; RAMALHO, Marcio Antonio. Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos. São Carlos, 2000.
- GROHMANN, L. Z. Análise do comportamento de prismas grauteados de alvenaria estrutural cerâmica. 2006. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós – Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- HAMID, Ahmad A.; DRYSDALE, Robert G. Suggested failure criteria for grouted concrete masonry under axial compression. In: Journal Proceedings. 1979. p. 1047-1062.

- IZQUIERDO, O.S. Estudo da interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural. 322 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- KIEFER, Thomas *et al.* The compressive strength of vertically perforated clay block masonry predicted by means of a unit-cell type numerical simulation tool taking discrete cracking into account. *Construction and Building Materials*, v. 150, p. 24-34, 2017.
- LOGULLO, Bárbara Gonçalves. Influência do graute e da taxa de armadura no comportamento da alvenaria de blocos de concreto. 2006.
- MENDES, Ricardo José Kuerten. Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais. 1998.
- MOHAMAD, Gihad. Construções em Alvenaria estrutural. São Paulo/SP: Blucher (2015).
- MOHAMAD, Gihad; RIZZATTI, Eduardo; ROMAN, Humberto Ramos. Modo de ruptura, deformabilidade e resistência de pequenas paredes estruturais. *Ambiente Construído*, 2011.
- MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Fourth Edition. McGraw-Hill Professional, 2014.
- PAGNUSSAT, Daniel Tregnago. Efeito da temperatura de queima de blocos cerâmicos sobre a resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa. 2013.
- PARSEKIAN, Guilherme Aris; HAMID, Ahmad A.; DRYSDALE, Robert G. Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural – 2ª Edição – São Carlos, 2013. 625 p.
- PARSEKIAN, Guilherme Aris; SOARES, M. M. Alvenaria estrutural em blocos cerâmicos: projeto, execução e controle. São Paulo: O Nome da Rosa, v. 1, 2010.

- PEREIRA DE OLIVEIRA, L. A. (1994). Resistência de aderência como parâmetro de compatibilidade entre o graute de enchimentos e as unidades da alvenaria estrutural. In: 5th INTERNACIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 1994, Florianópolis, Brasil. p. 214-227.
- POLITO, Giulliano; DE CARVALHO JUNIOR, Antônio Neves; BRANDÃO, Paulo Roberto Gomes. Caracterização microestrutural da interface argamassa mista/bloco cerâmico. CONSTRUINDO, v. 2, n. 01, 2010.
- RAMALHO, Márcio A.; CORRÊA, Marcio RS. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. Pini, 2003.
- RIZZATTI, Eduardo *et al.* Análise do comportamento mecânico das alvenarias estruturais de blocos cerâmicos utilizando modelos físicos reduzidos–Efeito da geometria. RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal, v. 5, n. 5, 2012.
- ROMERO, Juan Vázquez. Adherencia al hormigón de morteros de diferentes bases químicas. 2010. Tese de Doutorado. Universidad Politécnica de Madrid.
- SÁNCHEZ, E. Nova Normalização Brasileira para a Alvenaria Estrutural. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013.
- SILVA, M. M. A Diretrizes para o projeto de alvenarias de vedação. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Univesidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- SORIC, Z.; TULIN, L. G. Bond and Splices in Reinforced Masonry. US-Japan Coordinated Program for Masonry Building Research, Report, n. 6.2-2, p. 81-124, 1987.