

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ADERÊNCIA ENTRE
BLOCOS CERÂMICOS E GRAUTES**

Gustavo Sipp

São Carlos
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ADERÊNCIA ENTRE
BLOCOS CERÂMICOS E GRAUTES**

Gustavo Sipp

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Guilherme Aris Parsekian
Coorientador: Márcio R. S. Corrêa

São Carlos
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gustavo Sipp, realizada em 29/04/2019:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
UFSCar

Profa. Dra. Silvana de Nardin
UFSCar

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
UFRGS

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus Pais, Hari e Evani, e à minha irmã Gabriela que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

a Deus, por permitir que eu chegasse até aqui;

a ANICER, pelo apoio, suporte e investimento nessa pesquisa, sem os quais ela não seria desenvolvida;

a CAPES, pela Bolsa de estudos fornecida durante o último ano do mestrado;

ao meu orientador, Professor Guilherme A. Parsekian, pela confiança, paciência e conhecimentos transmitidos;

ao meu coorientador, Professor Márcio R. S. Corrêa, pela disposição em ajudar e contribuir com o trabalho;

aos amigos e técnicos dos laboratórios da UFSCar, Ricardo e José Roberto, pelo apoio e auxílio nas diversas atividades desenvolvidas;

aos amigos, Nati e Rapha, o casal que mais trabalhou com graute nesse mestrado, pela grande ajuda nos ensaios;

ao amigo, Douglas, pela imensa ajuda com os ensaios e pelos momentos de descontração na UFSCar;

ao amigo, Matusa, pelos fins de semana perdidos me ajudando com os ensaios de arrancamento, pelo compartilhamento dos conhecimentos e pela grande parceria;

ao amigo, Gustavo Batista, o Engenheiro Químico que mais trabalhou com cimento e bloco na UFSCar, quase virou pedreiro de tanto me ajudar;

a todos os colaboradores da UFSCar e demais colegas de PPGE Civ, que me auxiliaram muito nos ensaios, nas aulas e fora delas;

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

SIPP, Gustavo. **Avaliação do comportamento de aderência entre blocos cerâmicos e grautes**. 2019. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

O comportamento dos elementos de alvenaria estrutural é influenciado pelas propriedades dos materiais constituintes e, também, pelas suas interações nas regiões de contato. As propriedades de aderência entre blocos cerâmicos e grautes utilizados em alvenaria constituem uma lacuna em normas de projeto nacionais e internacionais. O conhecimento existente no meio acadêmico, atualmente, é insuficiente para descrever de forma adequada o comportamento apresentado pela interface de blocos e grautes. Ainda não está claro se o graute apresenta capacidade de transferir, de maneira adequada, as tensões da armadura inserida no seu interior até os blocos dos elementos de alvenaria. Dessa forma, fica clara a necessidade de aprofundamento nos estudos desenvolvidos para avaliar as propriedades de aderência entre blocos e grautes. Nesse sentido, insere-se o presente estudo, visando ampliar o conhecimento existente sobre o comportamento de aderência entre blocos cerâmicos e grautes. Essa pesquisa teve como objetivo avaliar e discutir as propriedades que afetam a aderência entre 5 tipos de blocos cerâmicos e dois tipos de grautes. O ensaio de empurramento (Push-out) foi utilizado para avaliar a resistência de aderência mobilizada pela combinação desses diferentes materiais. Complementarmente, o ensaio de arrancamento (Pull-out) também foi empregado para alguns tipos de bloco, buscando uma análise mais realista do comportamento de aderência em elementos de alvenaria. Os resultados obtidos no ensaio de empurramento comprovam que existe uma grande variação nos resultados, dependendo do tipo de bloco e graute empregados. Algumas das principais características que influenciaram esses resultados foram o formato dos vazados dos blocos e a retração do material de enchimento. Os blocos que apresentaram células com superfície mais ranhurada e dotadas de frisos, tenderam a apresentar aumento na área de contato entre graute e bloco, proporcionando incrementos na tensão de aderência. Já, para o caso dos grautes, a utilização do graute de maior resistência a compressão foi responsável pela redução nos resultados do ensaio de empurramento, justamente, devido à redução na área de contato provocada pela retração do material de enchimento. Um procedimento de ensaio foi desenvolvido para analisar a retração do graute no interior dos blocos cerâmicos. Com base nos resultados do ensaio de empurramento, foi desenvolvido um modelo analítico considerando dois fatores k_1 e k_2 , responsáveis por considerar o formato geométrico da célula dos blocos e a retração do material de enchimento. Esse modelo permitiu estimar, de maneira aproximada, qual carga máxima foi mobilizada no ensaio de empurramento, para cada combinação de tipo de bloco e graute. Por fim, foi desenvolvida uma modelagem numérica das propriedades de interface identificadas para dois tipos de bloco que apresentaram o escorregamento do graute durante o ensaio de empurramento. O comportamento obtido foi semelhante ao apresentado nas curvas força vs deslizamento do graute, para os corpos de prova ensaiados.

Palavras-chave: Graute; Bloco cerâmico; Aderência; Análise experimental; Ensaio de empurramento; Push-out; Ensaio de arrancamento; Pull-out.

ABSTRACT

SIPP, GUSTAVO. **Evaluation of the bonding behavior between ceramic blocks and grouts.** 2019. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

The behavior of structural masonry elements is influenced by the properties of the constituent materials and also by their interactions in the contact regions. The bonding properties between ceramic blocks and grouts used in masonry constitute a gap in national and international design standards. The existing knowledge in the academic world is currently insufficient to adequately describe the behavior presented by the interface of blocks and grouts. It is still unclear whether the grout is capable of adequately transferring the stresses of the reinforcement inserted into the masonry blocks. Thus, it is clear the need to deepen the studies developed to evaluate the adhesion properties between blocks and grouts. In this sense, the present study is inserted, aiming to expand the existing knowledge about the bonding behavior between ceramic blocks and grouts. In this sense, the present study is inserted, aiming to expand the existing knowledge about the bonding behavior between ceramic blocks and grouts. This research aimed to evaluate and discuss the properties that affect the adherence between 5 types of ceramic blocks and two types of grouts. The push-out test was used to evaluate the bond strength mobilized by the combination of these different materials. In addition, the pull-out test was also employed for some block types, seeking a more realistic analysis of the bonding behavior on masonry elements. The results obtained in the push test prove that there is a wide variation in the results, depending on the type of block and grout employed. Some of the main characteristics that influenced these results were the shape of the block cells and the shrinkage of the grout. The blocks that presented cells with more grooved surface and with friezes, tended to present increase in the contact area between grout and block, providing increases in the bonding stress. In the case of grout, the use of grout with higher compression resistance was responsible for the reduction in the results of the push test, precisely due to the reduction in the contact area caused by the shrinkage of the filler material. A test procedure was developed to analyze the shrinkage of the grout inside the ceramic blocks. Based on the results of the push test, an analytical model was developed considering two factors k_1 and k_2 , responsible for considering the geometric shape of the block cell and the shrinkage of the filler material. This model allowed to roughly estimate which maximum load was mobilized in the push test for each combination of block type and grout. Finally, a numerical modeling of the identified interface properties was developed for two block types that presented grout slip during the push test. The behavior obtained was similar to that presented in the force vs sliding curves of the grout, for the tested specimens.

Key-words: Grout; Ceramic block; Adherence; Experimental analysis; Push-out test; Pull-out test.

Figura 2.1 - Comparação de interface com boa e má extensão de aderência	17
Figura 2.2 - Aumento da área de contato provocada por alterações na geometria ou rugosidade de um substrato.....	18
Figura 2.3 - Características da interface de um material cimentício com substratos de alta e baixa absorção	20
Figura 2.4 – Mecanismos de aderência	21
Figura 2.5 – Ensaio de flexão em paredes de alvenaria armada	23
Figura 2.6 – Ensaio de arrancamento duplo (duas barras tracionadas).....	24
Figura 2.7 – Ilustração de corpo de prova empregue no ensaio de arrancamento simples (Pull-out)	24
Figura 2.8 – Resultados do ensaio de arrancamento duplo (double pull-out)	25
Figura 2.9 - Modos de ruptura encontrados no ensaio de arrancamento	26
Figura 2.10 – Deslocamento do graute devido à má aderência com bloco cerâmico.....	27
Figura 2.11 – Ensaio de arrancamento com bloco de concreto	28
Figura 2.12 - Ensaio de arrancamento com bloco cerâmico	28
Figura 2.13 – Deslizamento do graute no interior do bloco cerâmico.....	31
Figura 2.14 - Características dos blocos utilizados	31
Figura 2.15 - Foto dos blocos.....	32
Figura 2.16 - Ruptura por fissuração do bloco	33
Figura 2.17 - Resultados do ensaio Push-out por tipo de bloco	34
Figura 2.18 - Meio blocos utilizados	35
Figura 2.19 - Esquemas de ensaio de empurramento (push-out)	36
Figura 2.20 - Comparação entre ensaio de empurramento e ensaio de empurramento com área de contato reduzida.....	38
Figura 3.1 - Principais etapas da pesquisa.....	40
Figura 3.2 - Cinco tipos de blocos utilizados	43
Figura 3.3 - Tipos de bloco.....	44
Figura 3.4 - Determinação das dimensões efetivas	45
Figura 3.5 - Desvio e planeza.....	46
Figura 3.6 - Diferença entre friso e ranhura	47
Figura 3.7 - Etapas do ensaio para determinação da área líquida	50
Figura 3.8 - Ensaio Índice de absorção.....	51
Figura 3.9 - Rugosímetro	52
Figura 3.10 - Obtenção de amostras para o ensaio de rugosidade.....	53
Figura 3.11 - Leituras da rugosidade nos blocos BM16 e BV10.....	54
Figura 3.12 - Capeamento dos blocos cerâmicos	55
Figura 3.13 - Saturação dos blocos e rompimento.....	55
Figura 3.14 - Determinação do abatimento do graute	56
Figura 3.15 - Determinação do índice de consistência.....	57
Figura 3.16 - Ensaio de retenção de água	58
Figura 3.17 – Moldagem dos corpos de prova cúbicos	60
Figura 3.18 – Ensaios para determinação das características mecânicas dos grautes	61
Figura 3.19 - Ensaio de variação dimensional e de massa dos grautes	63
Figura 3.20 – Ensaio de tração e medição do alongamento após ruptura	64
Figura 3.21 - Ensaios de caracterização argamassa	66
Figura 3.22 - Ensaio Prismas	68

Figura 3.23 – Ensaio de Empurramento (<i>push-out</i>)	69
Figura 3.24 - Corte do isopor.....	70
Figura 3.25 - Isopor colado na superfície dos blocos para grauteamento	71
Figura 3.26 - Grauteamento dos blocos para ensaio de empurramento	72
Figura 3.27 - Procedimento de preparação dos corpos de prova para ensaio Push-out	73
Figura 3.28 - Formação de fissura na interface bloco/graute nos corpos de prova do empurramento.....	76
Figura 3.29 - Linhas usadas para demarcar as fissuras e calcular seu comprimento e área.....	78
Figura 3.30 - Detalhes do bloco tipo BM7	82
Figura 3.31 - Assentamento dos blocos das paredes	84
Figura 3.32 - Grauteamento e adensamento das paredes.....	85
Figura 3.33 - Ensaio de Arrancamento.....	86
Figura 4.1 – Comparação entre as médias da área bruta dos tipos de blocos	92
Figura 4.2 - Comparação entre as médias da área líquida dos tipos de blocos	93
Figura 4.3 – Comparação entre médias da AAI na área bruta	96
Figura 4.4 - Comparação entre médias da AAI na área líquida.....	96
Figura 4.5 - Comparação entre médias de resistência na área líquida	100
Figura 4.6 – Comparação entre médias de resistência na área bruta.....	101
Figura 4.7 – Curvas tensão vs deformação das barras do fabricante CSN.....	102
Figura 4.8 - Curvas tensão vs deformação das barras do fabricante ArcelorMittal .	103
Figura 4.9 - Variação média da massa dos grautes	112
Figura 4.10 – Variação dimensional média dos grautes.....	113
Figura 4.11 - Tensão de aderência média.....	120
Figura 4.12 - Teste Tukey para diferença entre as médias com graute 15 MPa.....	122
Figura 4.13 - Teste Tukey para diferença entre as médias com graute 30 MPa.....	123
Figura 4.14 - Deslizamento do graute 30 MPa no bloco tipo BM7	126
Figura 4.15 - Detalhes das rupturas com bloco tipo BM7.....	127
Figura 4.16 - Posição das fissuras com graute 15 e 30 MPa	128
Figura 4.17 - Diferenças na formação de fissuras do bloco tipo BM16, com o uso do graute 15 e 30 MPa.....	128
Figura 4.18 - Posição das fissuras e deterioração do graute para o bloco tipo BM16, com graute 15 e 30 MPa.....	130
Figura 4.19 - Fissuras formadas para blocos do tipo BM4 enchidos com graute 15 MPa.....	131
Figura 4.20 - Deslizamento de graute e fissuras para o bloco tipo BM4, enchidos com graute 30 MPa.....	131
Figura 4.21 - Comparação das fissuras e deterioração dos blocos tipo BV0, com graute 15 e 30 MPa.....	132
Figura 4.22 - Fissuras e deterioração do graute para as amostras de bloco BV10 enchidas com graute 15 e 30 MPa.....	133
Figura 4.23 - Fissuração do bloco	134
Figura 4.24 – Curvas ensaio empurramento bloco tipo BM7 e graute 30 MPa	135
Figura 4.25 - Curvas ensaio empurramento bloco tipo BM4 e graute 30 MPa.....	135
Figura 4.26 - Curvas bloco tipo BM7 graute 30 aproximada	136
Figura 4.27 - Curvas bloco tipo BM4 graute 30 aproximada	136
Figura 4.28 - Tensão máxima média do aço no arrancamento	147
Figura 4.29 - Comparação entre médias (Tukey) para mesmo tipo de graute	148

Figura 4.30 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM7 e graute 15 MPa	151
Figura 4.31 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM7 e graute 30 MPa	152
Figura 4.32 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM16 e graute 15 MPa	153
Figura 4.33 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM16 e graute 30 MPa	153
Figura 4.34 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BV10 e graute 15 MPa.....	154
Figura 4.35 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BV10 e graute 30 MPa.....	154
Figura 4.36 - Deslizamento do graute e fissuração da parede	155
Figura 4.37 - Deslizamento da armadura	156
Figura 5.1 - Comparação dos resultados teóricos e experimentais para cada tipo de bloco e graute	163
Figura 6.1 - Diferentes formas de modelagem	164
Figura 6.2 - Tangencial Behavior	167
Figura 6.3 – Reta que liga a origem ao ponto de maior tensão.....	168
Figura 6.4 - Malhas empregadas no graute e blocos	169
Figura 6.5 - Graute e bloco unidos	170
Figura 6.6 - Condições de contorno aplicadas	171
Figura 6.7 - Comparação entre modelo numérico e resultados experimentais para bloco tipo BM7	172
Figura 6.8 – Comparação entre modelo numérico e resultados experimentais do bloco tipo BM4, sem desconsiderar os valores que mais se afastaram da média da resistência de aderência	173
Figura 6.9 – Comparação entre modelo numérico e resultados experimentais para bloco tipo BM4, desconsiderando resultados que mais se afastaram da média	174
Figura 6.10 – Distribuição das tenções principais absolutas.....	175

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Propriedades dos blocos cerâmicos empregados.....	30
Quadro 2.2 – Resultados do ensaio de empurramento (Push-out)	30
Quadro 2.3 - Propriedades de cada tipo de bloco	32
Quadro 2.4 - Resultados do ensaio de empurramento (Push-out)	33
Quadro 2.5 - Propriedades dos blocos utilizados	35
Quadro 2.6 - Propriedades do graute utilizado.....	35
Quadro 2.7 - Resultados do ensaio de empurramento (Push-out)	36
Quadro 2.8 - Resultados do ensaio de empurramento com área de contato reduzida	37
Quadro 3.1 - Variáveis consideradas no ensaio e empurramento e arrancamento...41	
Quadro 3.2 – Resumo das propriedades determinadas para os materiais	42
Quadro 3.3 - Ensaio de caracterização dos blocos	44
Quadro 3.4 - Ensaio realizado no graute em estado fresco.....	57
Quadro 3.5 - Ensaio para determinação das propriedades mecânicas dos grautes59	
Quadro 3.6 - Ensaio para determinação das propriedades físicas dos grautes	62
Quadro 3.7 - Ensaio de caracterização da argamassa.....	66
Quadro 3.8 - Prismas montados.....	67
Quadro 3.9 - Corpos de prova do arrancamento.....	83
Quadro 4.1 - Medidas das faces de cada tipo de bloco	88
Quadro 4.2 - Valores médios de espessura dos septos e paredes externas	88
Quadro 4.3 - Valores médios do desvio de esquadro e planeza das faces.....	89
Quadro 4.4 - Perímetro e área transversal de cada tipo de bloco	90
Quadro 4.5 - Valores de área de contato com e sem a presença dos frisos	90
Quadro 4.6 - Relação entre área líquida e área bruta dos blocos	91
Quadro 4.7 – Relação entre área líquida e área bruta	94
Quadro 4.8 - Índice de absorção de água dos 5 tipos de bloco	94
Quadro 4.9 – AAI realizado na área líquida e bruta	95
Quadro 4.10 - AAI realizado na área líquida e bruta (segunda face do bloco)	97
Quadro 4.11 - Rugosidade média (Ra) de cada tipo de bloco	98
Quadro 4.12 - Rugosidade média (Ra) dos blocos ranhurados	99
Quadro 4.13 - Resistência à compressão de cada tipo de bloco	99
Quadro 4.14 - Massa linear e alongamento após ruptura das barras de aço.....	102
Quadro 4.15 – Tensão de escoamento e tensão máxima.....	103
Quadro 4.16 - Valores médios de tração na flexão e compressão da argamassa dos prismas.....	104
Quadro 4.17 - Valores médios de tração na flexão e compressão das argamassas empregadas nas paredes do ensaio de empurramento	104
Quadro 4.18 – Abatimento e relação água/graute empregada.....	105
Quadro 4.19 - Resultados obtidos para os grautes em estado fresco.....	106
Quadro 4.20 - Abatimento e relação água/graute empregados	107
Quadro 4.21 - Abatimento e relação água/graute empregados	107
Quadro 4.22 – Propriedades mecânicas do graute	108
Quadro 4.23 - Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e cúbicos	109
Quadro 4.24 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos grautes utilizando-se corpos de prova cilíndricos (10 X 20 cm)	110

Quadro 4.25 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos grautes utilizando-se corpos de prova cúbicos (4 cm)	111
Quadro 4.26 - Abatimento e relação água/graute empregados	112
Quadro 4.27 - Resultado prismas.....	114
Quadro 4.28 - Propriedades dos tipos de blocos utilizados	116
Quadro 4.29 – Tensão de aderência	116
Quadro 4.30 - Ordem decrescente dos tipos de bloco conforme sua carga e tensão de aderência	119
Quadro 4.31 – Tensão máxima média de compressão no graute.....	124
Quadro 4.32 - Resistência à compressão dos corpos de prova (100 X 200 mm) de graute	125
Quadro 4.33 - Comprimento e área aproximada das fissuras	138
Quadro 4.34 - Valor percentual da área de fissuras em relação à área do orifício do bloco.....	140
Quadro 4.35 - Valor percentual do comprimento das fissuras em relação ao perímetro do orifício de cada bloco	142
Quadro 4.36 - Tensão de aderência corrigida pela retração	144
Quadro 4.41 – Tensão máxima média do aço no arrancamento.....	145
Quadro 4.42 - Tensão na seção transversal de graute no arrancamento	149
Quadro 4.43 – Tensão média na área de contato entre graute e blocos das paredes no arrancamento	150
Quadro 4.37 - Fator k1	159
Quadro 4.38 - Fator k2	160
Quadro 4.39 - Força teórica obtida.....	162
Quadro 4.40 - Erro percentual da força teórica com relação ao resultado experimental.....	162
Quadro 5.1 – Resultados do ensaio de empurramento para bloco tipo BM7	166
Quadro 5.2 - <i>Resultados do ensaio de empurramento para bloco tipo BM4</i>	166
Quadro 5.3 - Propriedades dos materiais.....	170
Quadro 5.4 - <i>Propriedades na interface do bloco tipo BM7 e graute 30 MPa</i>	171
Quadro 5.5 - <i>Propriedades na interface do bloco tipo BM4 e graute 30 MPa</i>	171

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Problema da pesquisa.....	13
1.2 Justificativa	13
1.3 Questão principal da pesquisa	15
1.4 Objetivos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Considerações iniciais sobre aderência.....	16
2.1.1 Mecanismos de resistência da aderência	20
2.2 Falta de aderência entre blocos e graute em elementos de alvenaria	22
2.3 Determinação da resistência de aderência entre bloco e graute	29
2.3.1 Ensaios realizados por Izquierdo (2015).....	29
2.3.2 Ensaios realizados por Fischer (2016).....	31
2.3.3 Ensaios Realizados por Guarnieri (2017)	34
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1 Caracterização dos materiais	41
3.1.1 Blocos cerâmicos.....	42
3.1.2 Graute.....	55
3.1.3 Barras de aço.....	64
3.1.4 Argamassas.....	65
3.1.5 Prismas.....	67
3.2 Determinação da resistência de aderência com ensaio de empurramento (push-out).....	69
3.2.1 Retração do graute no interior dos blocos	75
3.3 Ensaio de arrancamento (Pull-out).....	80
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	87
4.1 Caracterização dos materiais	87
4.1.1 Blocos cerâmicos.....	87
4.1.2 Barras de aço.....	101
4.1.3 Argamassas	104
4.1.4 Grautes	105
4.1.5 Prismas.....	113
4.2 Ensaio de empurramento (Push-out)	115
4.2.1 Tensão de aderência	116
4.2.2 Retração do graute no interior dos blocos	137
4.3 Ensaio de arrancamento (Pull-out).....	145
4.3.1 Análise estatística do Ensaio de arrancamento (Pull-out).....	147
4.3.2 Tensões estimadas no graute e na interface	149
4.3.3 Forma de ruptura das paredes.....	151
5. ESTIMATIVA DE CARGA DO ENSAIO DE EMPURRAMENTO	157
6. MODELAGEM NUMÉRICA	164

6.1	Considerações iniciais sobre a modelagem.....	165
6.2	Propriedades de contato da interface	166
6.3	Modelagem aplicada	169
6.4	Considerações finais sobre a modelagem numérica.....	175
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	176
7.1	Trabalhos futuros.....	178
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	180

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria é uma das formas de construção mais antigas praticadas pela humanidade, que tem se desenvolvido cada vez mais com a adoção de novas tecnologias, possibilitando a construção de edifícios cada vez maiores, que produzem, conseqüentemente, incrementos proporcionais nas cargas e tensões a serem resistidas.

Um dos avanços fundamentais para permitir incrementos na capacidade de resistir esforços à tração em elementos de alvenaria, foi o emprego da alvenaria armada, na qual barras de aço são posicionadas no interior dos blocos, sendo ambos solidarizados por meio do graute.

Portanto, o desempenho conjunto desses 3 componentes solidarizados (bloco, aço e graute) para transferir tensões e deformações de maneira adequada é um princípio fundamental para o dimensionamento de elementos em alvenaria armada. Caso a aderência entre esses materiais seja inferior à capacidade de tração da armadura, o desempenho do conjunto pode ser comprometido, implicando na redução da máxima força a ser transferida e, conseqüentemente, trazendo implicações ao dimensionamento.

As pesquisas e normas de projeto, normalmente, abordam a questão da aderência no que se refere, principalmente, ao comprimento de ancoragem do aço em relação ao graute, baseado em estudos realizados em concreto armado. Ainda que esses estudos sejam importantes para balizar o comportamento da alvenaria estrutural, é necessário, adicionalmente, levar em conta também, a capacidade de aderência entre o graute e os blocos utilizados.

Entretanto, ainda são escassos os estudos desenvolvidos com o objetivo de avaliar a capacidade de aderência entre bloco e graute e sua influência no comportamento de elementos de alvenaria estrutural. Embora pouco estudado, existem alguns trabalhos publicados, que identificaram a falta de aderência entre estes componentes, como um dos principais responsáveis pela ruptura das peças de alvenaria avaliadas (BIGGS, 2005; AHMED E FELDMAN, 2012; KISIN, 2014).

Ciente dessa lacuna na produção científica, Izquierdo (2015) avaliou a capacidade de aderência entre blocos cerâmicos e de concreto ao graute. Como resultado, a autora identificou boa aderência entre blocos de concreto e graute, suficiente para transmitir a força máxima de tração para barras de aço CA50 de até 16 mm de diâmetro, antes da ruptura do conjunto de alvenaria. Entretanto, a mesma pesquisa indicou aderência insuficiente para

transmissão de toda a potencial força de tração para diâmetros de barra maiores que 10 mm, quando utilizados blocos cerâmicos de paredes vazadas.

Este projeto está proposto como continuidade aos estudos iniciados por Izquierdo (2015), com o intuito de avaliar a capacidade de aderência entre diferentes tipos de blocos cerâmicos com o graute. Incluem-se, nesse caso, blocos cerâmicos de paredes vazadas, como os estudados na pesquisa anterior, porém expande-se o estudo para blocos de paredes maciças e, principalmente, para blocos produzidos com ranhuras nas faces internas dos vazados, tanto para o caso de blocos de paredes vazadas quanto maciças.

Este projeto conta com apoio da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) que se dispôs a doar todos os materiais necessários aos ensaios (incluindo blocos especialmente produzidos), além de custos de mão-de-obra e necessários para adaptar acessórios e equipamentos para realizar os ensaios.

Pretende-se com este estudo, compreender o comportamento e eficiência da aderência entre os materiais estudados. A partir desses resultados espera-se contribuir para o meio técnico e científico, propondo parâmetros realísticos a serem adotados no dimensionamento de elementos em alvenaria estrutural em blocos cerâmicos.

O impacto esperado com este projeto deve ser a determinação de parâmetros a serem incluídos na normalização brasileira, que serão refletidos extensivamente no setor da construção civil face a grande quantidade de projetos em alvenaria estrutural produzidos Brasil afora.

Além disso, serão elaborados artigos técnicos relevantes internacionalmente, aumentando o reconhecimento brasileiro na área de alvenaria estrutural.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Como se comporta a aderência entre diferentes tipos de blocos cerâmicos e grautes, e qual sua influência nas estruturas de alvenaria?

1.2 JUSTIFICATIVA

Existem algumas publicações científicas, nas quais os autores identificaram a existência de perda de aderência na ligação entre graute e blocos, como uma das formas de ruptura apresentadas por elementos de alvenaria submetidos a diferentes procedimentos de ensaio (AHMED E FELDMAN, 2012; KISIN (2014); IZQUIERDO, 2015).

A apresentação dessas falhas na aderência entre graute e blocos sugere que as propriedades de ligação entre estes materiais devam ser estudadas, com o objetivo de aprimorar o conhecimento existente sobre as estruturas de alvenaria e buscar soluções para melhorar a ligação entre esses componentes, proporcionando aumento de resistência de aderência e melhor utilização dos materiais, ou compreender e definir essas limitações para poder dimensionar com segurança elementos de alvenaria armada.

Embora o comportamento da ligação entre os materiais seja uma propriedade fundamental a ser levada em conta no dimensionamento, poucas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de avaliar as propriedades de aderência da interface bloco/graute.

Em uma das poucas pesquisas realizadas sobre o assunto, desenvolvida por Izquierdo (2015), foi constatado que os blocos de concreto apresentaram boa aderência com o graute, permitindo considerar toda a força de tração quando utilizadas barras de aço CA50 de até 16 mm de diâmetro, sem necessidade de reduzir essa capacidade como hoje recomendado por normas de alvenaria estrutural brasileiras. Por outro lado, os resultados de ensaios com blocos cerâmicos de paredes vazadas apresentaram queda de desempenho, devido ao deslizamento do graute provocado pela má aderência entre os materiais, sendo a aderência insuficiente para transmitir 100% da força de tração das barras de aço CA50 com mais de 10 mm de diâmetro.

Dessa forma, se faz necessário o desenvolvimento de um maior número de estudos com o objetivo de caracterizar as propriedades de aderência entre graute e bloco cerâmico, bem como quantificar seus possíveis impactos nas estruturas de alvenaria que utilizarem estes materiais.

Além disso, outro incentivo para a realização de pesquisas sobre o assunto, apontada por Izquierdo (2015), é a inexistência de normas nacionais e internacionais que abordem as limitações impostas pela falta de aderência da interface bloco/graute na resistência da alvenaria, reforçando a importância e ineditismos da tarefa de serem criados parâmetros com base em resultados experimentais, para aumento da segurança no projeto de estruturas de alvenaria com blocos cerâmicos.

Considerando a grande quantidade de edifícios em alvenaria estrutural em blocos cerâmicos realizados no Brasil, o ineditismo de vários parâmetros incluídos no estudo, a possibilidade de sugestão de critérios para balizar a elaboração de normas técnicas brasileiras, e a possibilidade de produção de artigos técnicos de relevância internacional, entende-se que este projeto está justificado.

1.3 QUESTÃO PRINCIPAL DA PESQUISA

Qual será a influência das diferentes propriedades de blocos e grautes na aderência entre estes materiais, e quais seus impactos no desempenho das estruturas de alvenaria?

1.4 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente a eficiência da aderência entre graute e faces internas de blocos cerâmicos, considerando geometrias distintas dos blocos e também distintas rugosidades das faces dos blocos na interface com o graute. Com base nos resultados obtidos, identificar quais são os valores limite de resistência de aderência suportados por cada combinação bloco/graute, e definir parâmetros para sua aplicação em alvenaria estrutural.

Como atividades a serem realizadas e questões a serem respondidas para alcançar este objetivo incluem-se:

- Como as diferentes propriedades de blocos e graute influenciam na aderência entre estes materiais? Em que grau cada uma delas influencia?

- A existência de formatos geométricos diferentes e ranhuras internas nos orifícios dos blocos cerâmicos é capaz de proporcionar majoração significativa na aderência com o graute, quando comparados aos blocos de parede lisa?

- Considerando as diferentes combinações de tipos de bloco e graute, qual a aderência avaliada, e qual combinação dentre estas é capaz de fornecer maior aderência?

- Verificar para os 3 tipos de bloco cerâmico com diferentes valores de aderências no ensaio Push-out, qual a aderência mobilizada no ensaio Pull-out?

- Verificar se aderência mobilizada nos ensaios Pull-out é equivalente ou superior ao escoamento do aço empregado. Caso não seja, estabelecer qual o limite de tensão de tração adequado para projetos de alvenarias com estas características.

- Desenvolver um procedimento para medir a retração do graute no interior dos blocos cerâmicos e analisar qual o seu impacto no ensaio de empurramento, com cada tipo de bloco

- Identificar e validar parâmetros de aderência para modelagem numérica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A existência de estudos específicos sobre as propriedades da interface de ligação entre os blocos cerâmicos e graute é escassa, por isso, se faz necessária a adaptação de conhecimentos correlatos, para interpretar as propriedades intervenientes na aderência entre estes materiais.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE ADERÊNCIA

Como a qualidade da interação entre graute e bloco cerâmico será influenciada pelas propriedades apresentadas pela superfície destes materiais, pois estas realizarão, efetivamente, o contato que proporcionará a aderência entre os componentes, algumas considerações devem ser feitas.

Segundo Kreijger (1984), as características da superfície do concreto são influenciadas pelo efeito parede (confinamento provocado pelas formas na moldagem), pela sedimentação e segregação (efeito da gravidade), pelo adensamento do concreto e, pela troca de água com o meio externo. Essa definição, apresentada pelo autor, se aplica apropriadamente ao graute, uma vez que ele estará sujeito a condições semelhantes às apresentadas pelo concreto lançado em estruturas usuais, com exceção das formas, que no caso do graute, serão o próprio bloco.

O autor salienta que as camadas superficiais do concreto, neste caso do graute, possuem variação na relação cimento/agregado e aumento da quantidade de água e porosidade, o que implica, como um dos resultados possíveis, na redução do módulo de elasticidade desta camada, o que pode comprometer a capacidade de aderência entre graute e bloco cerâmico.

Nesse sentido, torna-se preponderante, para manter as mesmas características de aderência durante a realização de ensaios, que as mesmas medidas e procedimentos sejam adotadas para preparação das amostras, evitando interferências externas provocadas pela alteração no método de lançamento e adensamento do graute no interior da alvenaria.

Outra analogia que pode ser adaptada para compreender o funcionamento da interface graute/bloco é empregada por Carasek (2007), para explicar a aderência da argamassa aplicada em um substrato. Segundo a autora, a aderência entre estes materiais é resultado de um fenômeno essencialmente mecânico devido à rugosidade da base (nível

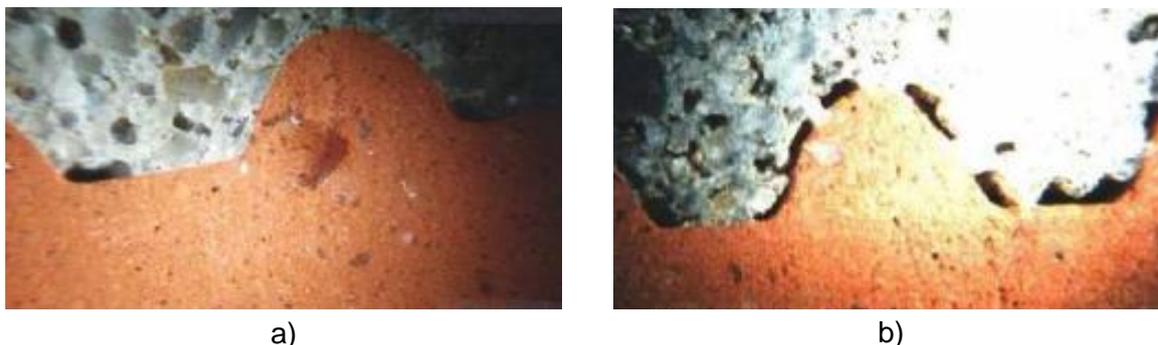
macroscópico), à penetração do aglomerante nos poros do substrato (nível microscópico), e às ligações de Van der Waal (nível de ligações atômicas).

Para que haja uma boa aderência entre um material cimentício e um substrato, é necessário que os dois materiais possuam propriedades compatíveis, possibilitando uma união adequada entre suas superfícies de contato e aumentando sua aderência.

A qualidade da união entre um material cimentício e um material rugoso pode ser avaliada, dentre outras formas, pela sua extensão de aderência. Essa propriedade é composta pela razão entre a área de contato efetiva existente entre os materiais e, a área total de um substrato, passível de ser unida com o material cimentício (CARASEK; DJANIKIAN, 1997). Dessa forma, é possível compreender a relação existente entre a região em que o material se unificou ao substrato e, a região total de superfície desse substrato.

O conceito de extensão de aderência pode ser melhor compreendido na Figura 2.1, através da observação da interface de uma interface com boa e, com má extensão de aderência, apresentadas por Carasek (1996).

Figura 2.1 - Comparação de interface com boa e má extensão de aderência

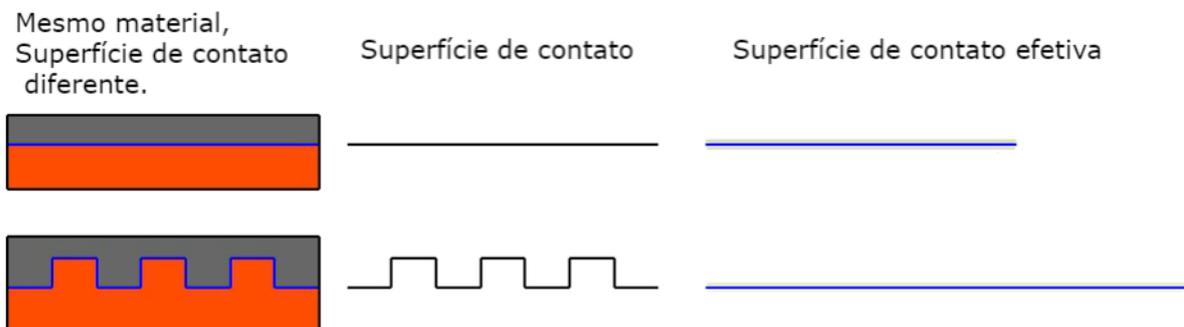


Fonte: Carasek (1996). Legenda: a) Interface com boa extensão de aderência; Interface com má extensão de aderência.

Nesse contexto, a geometria e rugosidade do substrato, assim como, as propriedades no estado fresco do material cimentício podem ter papel preponderante no estabelecimento de uma boa aderência. A retração do material de enchimento também pode influenciar nos resultados caso ocorra a formação de fissuras ou descolamentos na interface entre os materiais.

A geometria de um substrato e sua rugosidade, até mesmo em nível microscópico, influenciam no aumento ou diminuição da área de contato passível de ser unida com o material cimentício. Substratos com superfície irregular tendem a proporcionar superfície de contato maiores do que substratos com superfície lisa. Essa afirmação pode ser comprovada através da observação da Figura 2.2.

Figura 2.2 - Aumento da área de contato provocada por alterações na geometria ou rugosidade de um substrato



Fonte: Autor (2019).

Ao se observar a imagem acima, pode ser identificada a existência de dois substratos formados por um mesmo material, na cor laranja, em contato com um material cimentício. Ao se analisar a interface de contato entre os mesmos, em um primeiro momento, temos a impressão de que a superfície de contato é semelhante. Entretanto, ao alongarmos a superfície de contato do substrato inferior, para compararmos com o da superfície lisa, verificamos que a superfície de contato efetiva é maior para o substrato que possui geometria, ou rugosidade maior. Portanto, é possível que a resistência de aderência obtida para esse substrato seja superior, pois existe mais área contribuindo para resistir aos esforços atuantes.

Desta forma, a presença de frisos e reentrâncias no interior dos blocos, podem proporcionar um aumento na aderência entre os materiais, devido ao aumento da área passível de ser unida pelos mesmos.

A influência da rugosidade foi verificada por Izquierdo (2015), sendo que os blocos de concreto apresentaram aderência superior à dos blocos cerâmicos, possivelmente, devido a rugosidade dos blocos de concreto ensaiados ser mais de 10 vezes superior à dos blocos cerâmicos.

Outro fator importante para garantir uma boa extensão de aderência está relacionado às propriedades no estado fresco do material cimentício durante sua aplicação. Quanto mais irregular a geometria e rugosidade de um substrato, maior deverá ser a trabalhabilidade apresentada pelo material cimentício, para que o mesmo consiga se deformar de maneira a preencher todas as saliências e reentrâncias existentes no substrato.

Segundo Paes e Gonçalves (2005), a propriedade de aderência é influenciada pela capacidade de absorção de água do substrato, sendo que, se a absorção for elevada, pode provocar a fissuração do material devido à sua retração plástica e, caso a absorção inicial seja muito baixa, pode ser formada uma película de água na superfície do substrato, promovendo, possivelmente, maior porosidade na região e comprometendo a aderência.

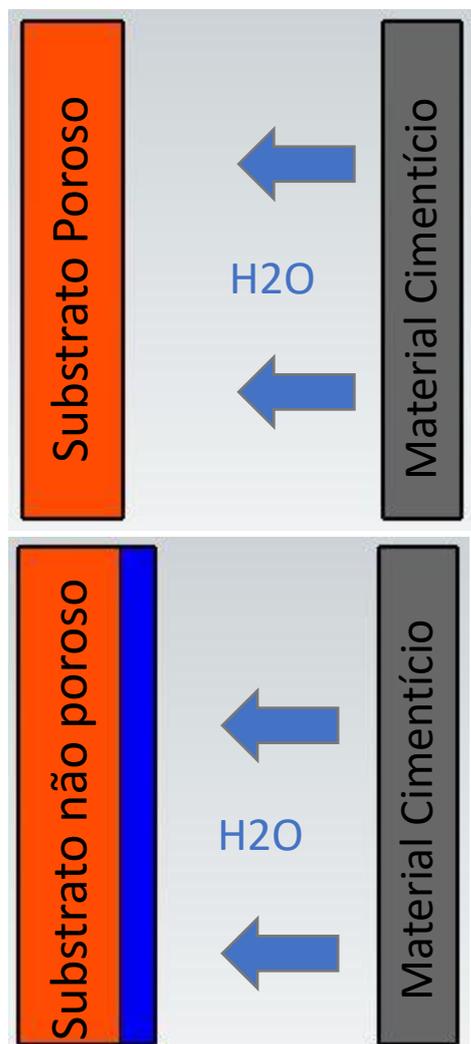
A capacidade de absorção de um substrato tem papel preponderante na aderência com materiais cimentícios, pois, ao entrarem em contato, água e material cimentício são absorvidos pelo substrato, contribuindo para o desenvolvimento de hidratação de componentes do cimento nos poros do material, formando uma ligação com o substrato e fortalecendo-a (CARASEK, 2007).

Segundo Kingsley, Tulin e Noland (1988), devido à natureza porosa dos blocos cerâmicos, eles têm a tendência de absorver água do graute, no instante em que esses entram em contato. A magnitude dessa absorção depende das propriedades do bloco e do graute, sendo que, o resultado da migração de água para o bloco será a redução do fator água/cimento do graute com uma redução significativa de seu volume (retração).

Os autores ainda mencionam, que a quantidade de água absorvida por um determinado bloco parece ser uma função mais relacionada com quantidade inicial de água do graute, do que da propriedade de absorção do bloco. Portanto, quanto maior a quantidade de água inicial empregue no graute, maior será a quantidade de água absorvida pela alvenaria, resultando, conseqüentemente, em aumento da retração do material de enchimento.

Na Figura 2.3 podem ser visualizadas as características do contato entre substratos porosos (alta absorção) e não porosos (baixa absorção), com um material cimentício. Essas informações são um resumo do que foi apresentado neste subitem, por diferentes autores.

Figura 2.3 - Características da interface de um material cimentício com substratos de alta e baixa absorção



Substrato com alta absorção:

- Saída de água em excesso;
- Redução do volume do material (retração);
- Fissuração plástica;
- Redução do fator a/c, podendo faltar água para hidratação do cimento, se for em excesso;
- Retração é mais função da quantidade de água, do que da absorção do bloco.

Substrato com baixa absorção:

- Acúmulo de água na interface compromete aderência;
- Alteração da relação agregado/aglomerante na interface;
- Aumento da porosidade na interface;
- Redução do módulo na interface.

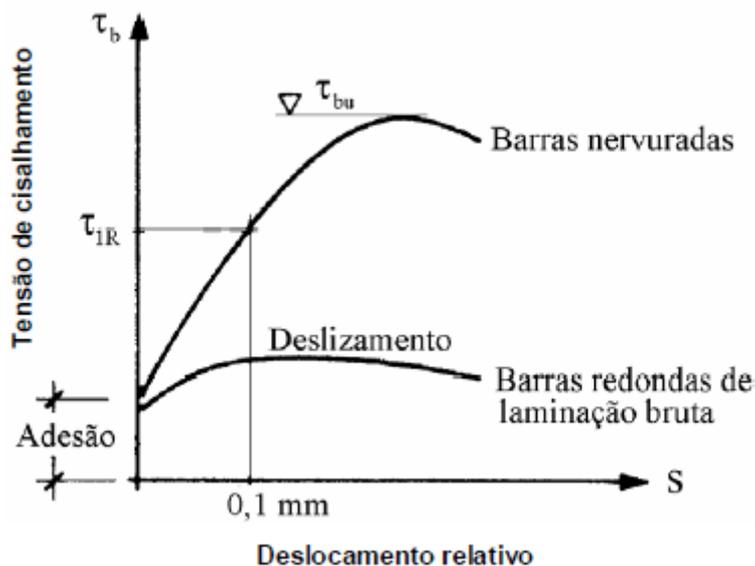
Fonte: Autor (2019).

Perante estas constatações, a capacidade de absorção de água do bloco cerâmico e a capacidade de retenção de água apresentada pelo graute, podem ter papel predominante no comportamento da região de interface, devendo esta iteração ser avaliada com maior cautela.

2.1.1 MECANISMOS DE RESISTÊNCIA DA ADERÊNCIA

Existem diferentes mecanismos que contribuem para a formação da resistência de aderência entre dois materiais: a adesão, o atrito e, a aderência mecânica. Uma das formas mais simples de compreender a atuação dos diferentes mecanismos é através da observação das curvas de tensão de cisalhamento X deslocamento relativo, conforme mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Mecanismos de aderência



Fonte: Silva (2006).

Segundo Silva (2006), o trecho inicial da curva mostrada na Figura 2.4 corresponde ao mecanismo de atrito que está ligado às ligações físico químicas estabelecidas entre os materiais; o trecho compreendido entre o valor de ruptura da adesão e a tensão máxima de cisalhamento, corresponde à parcela de aderência do mecanismo denominado aderência mecânica; já, o trecho final da curva, compreendido após a carga máxima de cisalhamento, marca o início da atuação da parcela de aderência por atrito.

Segundo o autor, a parcela de adesão depende da rugosidade e limpeza da superfície, sendo sua contribuição perdida, logo que se iniciam deslocamento relativos bem pequenos entre as superfícies. A aderência mecânica é mobilizada quando protuberâncias ou saliências na superfície formam obstáculos ao deslizamento, criando tensões de compressão perpendiculares às protuberâncias e saliências existentes. Já no caso do atrito, esse mecanismo atua quando as superfícies dos materiais tendem a apresentar deslocamento relativo, sendo esse mecanismo, influenciado pelas pressões normais atuantes de maneira normal a interface dos materiais.

No caso dos blocos cerâmicos e grautes, a parcela de adesão tende a estar atuante, devido às ligações químicas do cimento com a superfície do graute; no caso da aderência mecânica, os frisos e reentrâncias das células dos blocos podem contribuir para esse fenômeno; e, por último, o atrito deve estar atuante, pois as imperfeições geométricas existentes nas células dos blocos podem fazer com que surjam esforços normais ao deslizamento, na interface entre os blocos e os grautes.

2.2 FALTA DE ADERÊNCIA ENTRE BLOCOS E GRAUTE EM ELEMENTOS DE ALVENARIA

Embora seja escasso o número de pesquisas científicas desenvolvidas com o objetivo de analisar a capacidade de aderência da interface bloco/graute e sua interferência no desempenho das estruturas de alvenaria, existe um número significativo de pesquisadores que constataram a existência da baixa aderência entre blocos e graute durante seus experimentos, através da análise do modo de ruptura apresentado pelo material.

O processo de ruptura caracterizado como perda de aderência entre blocos e graute foi identificado nos ensaios de flexão de 4 pontos realizados em paredes de alvenaria armada, nos trabalhos de Ahmed e Feldman (2012) e Kisin (2014).

Esses pesquisadores verificaram a diferença no modo de ruptura das paredes de alvenaria armada, dependendo da técnica de emenda das barras de aço empregue nos corpos de prova avaliados. Os pesquisadores encontraram que, a ruptura da alvenaria armada ocorre pelo arrancamento da armadura quando a emenda das barras é realizada na mesma célula dos blocos de concreto (em contato). Já, quando a emenda das barras é realizada em células diferentes dos blocos (sem contato), o modo de ruptura é caracterizado pela perda de aderência entre graute e blocos.

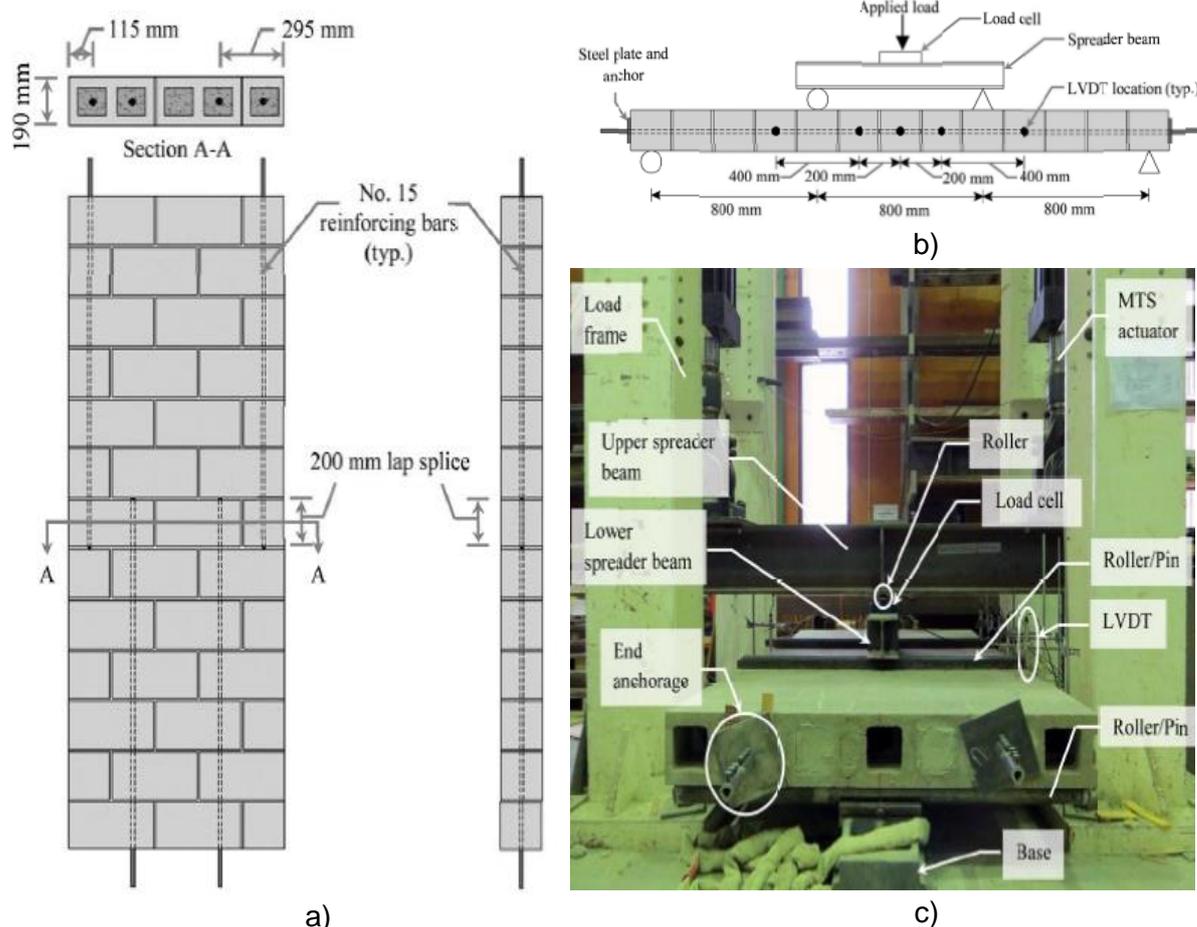
Essa perda de aderência entre os materiais, foi identificada pelo modo de ruptura característico apresentado pela alvenaria, com formação de fissuras inclinadas no graute, que se estendem das barras de aço até o bloco de concreto, onde mudam de direção, prolongando-se pela interface de ligação bloco/graute (Ahmed e Feldman, 2012; Kisin, 2014).

Esses pesquisadores constataram que, nas amostras em que foi identificado tal modo de ruptura, ocorreu queda de desempenho, quando comparadas às paredes cujo modo de ruptura foi caracterizado por arrancamento do aço inserido no graute. Portanto, estes resultados reafirmam a importância da aderência entre os componentes para o bom desempenho das estruturas de alvenaria.

Na Figura 2.5 pode ser visualizado o ensaio de flexão de 4 pontos empregue por um dos autores.

A perda de aderência na interface de ligação entre blocos e material de enchimento, também foi constatada nos ensaios de arrancamento (*pull-out*) realizados por Biggs (2005), Ahmed e Feldman (2012), e Izquierdo (2015).

Figura 2.5 – Ensaio de flexão em paredes de alvenaria armada



Fonte: Adaptado de Kisin (2014), p. 49 e 66. Legenda: a) Ilustração do corpo de prova (emenda sem contato); b) Esquema de carregamento; c) Montagem do ensaio.

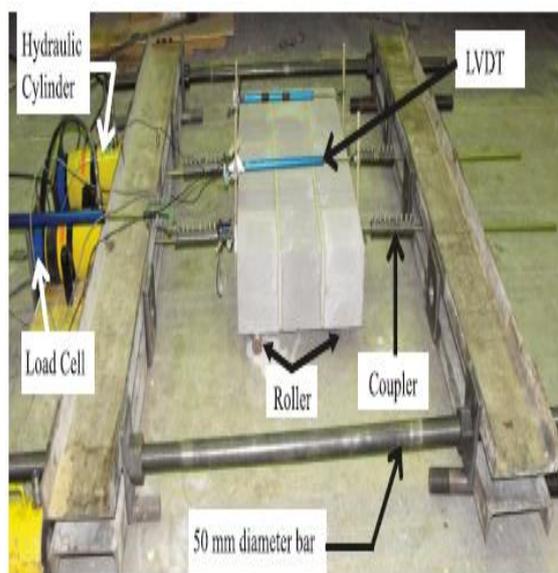
O ensaio consiste no posicionamento de uma barra de aço no interior de um conjunto de alvenaria, solidarizando-a aos blocos, através do preenchimento das cavidades com um material ligante, geralmente o graute. Após a cura do material de enchimento, é realizada a tração da barra de aço, no sentido de provocar seu arrancamento da alvenaria. Como a carga é aplicada na barra de aço, a tensão máxima resistida pelo conjunto será calculada pela divisão da carga máxima aplicada na barra pela área de sua seção transversal. Essa tensão possibilita uma comparação direta entre as tensões obtidas no ensaio de arrancamento, com as tensões de escoamento e última obtidas no ensaio de caracterização do aço, o que facilita a compreensão do comportamento estrutural do conjunto, observando se a aderência entre os materiais foi suficiente para fazer com que o aço atingisse o escoamento e a tensão última.

Normalmente, o ensaio é utilizado para verificar a aderência da armadura ao graute, entretanto, Kisin (2014) define que esse ensaio irá avaliar a aderência da barra a todo o conjunto, incluindo o graute e o bloco que atua no seu confinamento. Izquierdo (2015) corrobora com esta definição, estabelecendo que este ensaio avalia o desempenho da interface bloco/graute/armadura, pois solicita todos os materiais a carregamentos.

De acordo com Biggs (2005), o rompimento durante o ensaio de arrancamento irá correr no elo de ligação mais fraco do conjunto, podendo este, ser localizado na interface bloco/graute ou na interface graute/armadura.

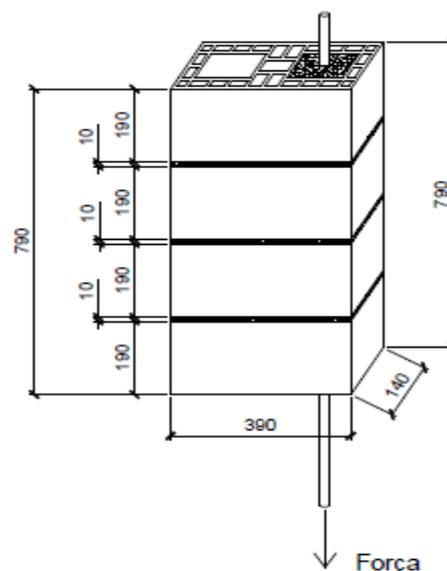
Alguns exemplares de corpos de prova empregues para avaliação do arrancamento podem ser observados na Figura 2.6 e Figura 2.7.

Figura 2.6 – Ensaio de arrancamento duplo (duas barras tracionadas)



Fonte: Ahmed e Feldman (2012), p. 517.

Figura 2.7 – Ilustração de corpo de prova empregue no ensaio de arrancamento simples (Pull-out)



Fonte: Izquierdo (2015), p. 182.

O ensaio de arrancamento (*pull-out*) tem sido empregado por muitos pesquisadores para investigar a ligação e ancoragem em alvenaria armada. A popularidade deste ensaio é devida ao seu baixo custo de construção, simplicidade de fabricação, pequeno espaço necessário para o armazenamento de corpos de prova, e uma configuração simples para sua execução. Essas vantagens favorecem a utilização de um maior número de amostras pelos pesquisadores, o que fornece a aquisição de dados suficientes para análises estatísticas (KISIN, 2014).

Nos ensaios de arrancamento realizados por Ahmed e Feldman (2012), o modo de ruptura encontrado foi idêntico ao observado nas paredes submetidas à flexão, já mencionado

anteriormente. As amostras que continham emenda de barras de aço em contato, sofreram ruptura pelo arrancamento do aço, enquanto as amostras contendo emendas sem contato, apresentaram ruptura com a formação de trincas no graute que se estendiam da barra até o bloco, onde mudavam de direção, prolongando-se pela interface bloco/graute, caracterizando a má aderência do material.

Os autores identificaram que a resistência no ensaio de arrancamento, para as amostras que sofreram rompimento pela perda de aderência entre bloco e graute, foram cerca de 50% inferiores, aos valores obtidos com as amostras que apresentaram ruptura pelo arrancamento da armadura. Esses resultados confirmam a importância da boa aderência entre bloco e graute para o desempenho da alvenaria estrutural. Os valores obtidos no ensaio podem ser constatados na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Resultados do ensaio de arrancamento duplo (double pull-out)

Contact lap splices					Noncontact lap splices				
Specimen ID	Construction phase	Splice #	Max. splice resistance (kN)	Critical splice resistance (kN)	Specimen ID	Construction phase	Splice #	Max. splice resistance (kN)	Critical splice resistance (kN)
DPC-1	1	1	91.0	91.0	DPN-1	1	1	43.7	43.6
		2	90.1				2	43.5	
DPC-2	1	1	87.8	87.8	DPN-2	1	1	41.7	43.1
		2	83.2				2	44.4	
DPC-3	1	1	90.1	90.1	DPN-3	1	1	*	*
		2	84.3				2	*	
DPC-4	2	1	93.9	93.9	DPN-4	2	1	43.3	43.5
		2	90.0				2	43.6	
DPC-5	2	1	88.8	88.8	DPN-5	2	1	39.9	39.1
		2	86.1				2	38.3	
DPC-6	2	1	95.1	87.7	DPN-6	2	1	*	*
		2	87.7				2	*	
DPC-7	2	1	94.3	87.8	DPN-7	2	1	37.6	37.8
		2	87.8				2	37.9	
DPC-8	2	1	90.1	90.1	DPN-8	2	1	36.3	36.9
		2	82.9				2	37.5	

Note: DPC, double pullout specimen with contact lap splices; DPN, double pullout specimen with noncontact lap splices.
*Specimens have been identified as outliers as described in the text.

Fonte: Ahmed e Feldman (2012), p. 519. Legenda: *Contact lap splices*: ocorreu rompimento por arrancamento da barra; *Noncontact lap splices*: ocorreu rompimento por perda de aderência bloco/graute.

Biggs (2005) utilizou o ensaio de arrancamento (*pull-out*) para verificar a possibilidade de substituição do graute por argamassas de cimento Portland e cal, no preenchimento de blocos de concreto utilizados em alvenaria armada.

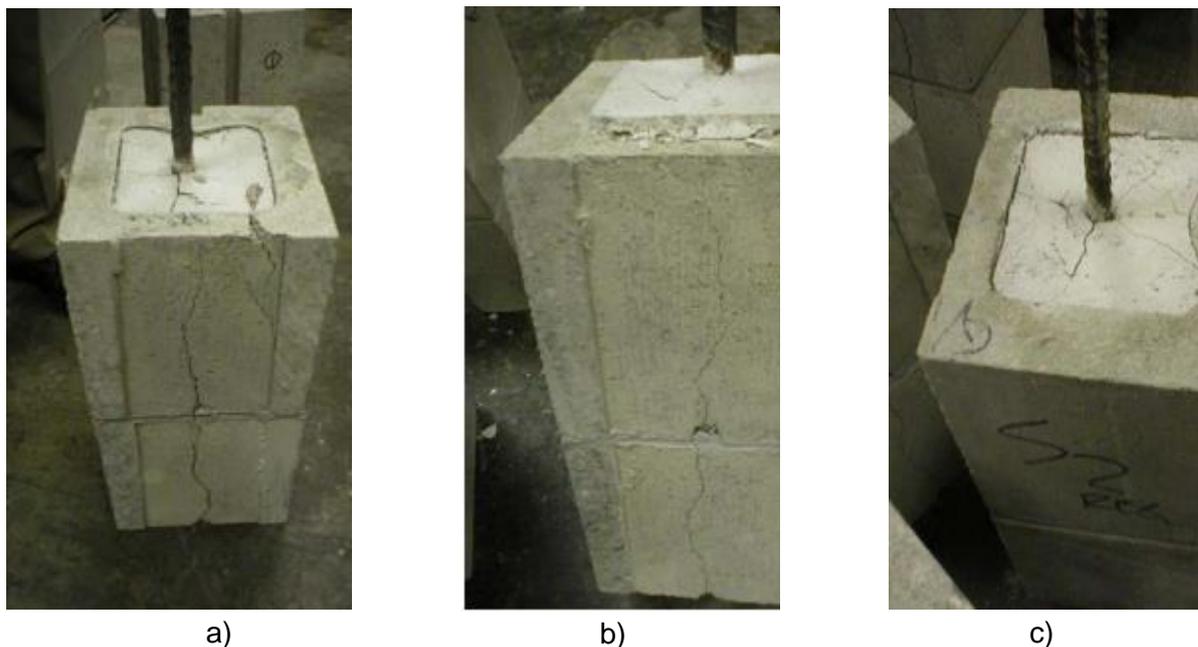
Segundo o autor, a capacidade de resistência do material neste ensaio, será definida pela menor resistência de aderência entre a armadura e o material de enchimento, ou, entre o material de enchimento e as unidades de alvenaria (blocos). Com base neste princípio, após o ensaio de arrancamento, o autor identificou a existência de 3 tipos diferentes de ruptura, classificados da seguinte forma:

1. Ocorrência de fissura do bloco de concreto e fissura do material de enchimento. Na Figura 2.9-a pode ser observada a fissura do bloco e a ruptura do enchimento ao redor da armadura.

2. Ocorrência de fissura do bloco de concreto, mas o material de enchimento não fissura e, sim, desliza. Na Figura 2.9-b pode ser vista a fissura do bloco e escorregamento do enchimento.

3. Não ocorre a fissuração do bloco de concreto, mas, sim, a ruptura do material de enchimento em torno da barra de aço, que desliza. Na Figura 2.9-c podem ser observados o baixo nível de danos do bloco e a movimentação da armadura através do material de enchimento danificado.

Figura 2.9 - Modos de ruptura encontrados no ensaio de arrancamento



Fonte: Biggs (2005), p. 10-11.

De acordo com Biggs (2005), o modo preferível de ruptura pode ser considerado o tipo 1 (Figura 2.9-a), pois a fissuração do bloco indica que as tensões estão sendo transferidas por todo o conjunto. Quando ocorre o escorregamento do enchimento significa que a ligação entre este material e os blocos é fraca, sendo este fator influenciado pela retração do enchimento.

Portanto, segundo o autor, o escorregamento do material de enchimento ou do aço, não são tipos de ruptura desejáveis.

Como as estruturas de alvenaria armada são projetadas com base no desempenho dos materiais, obtido através de ensaios de ruptura, fica claro que é desfavorável quando ocorre falha na aderência dos componentes e a ruptura acontece pelo deslizamento do aço ou do material de enchimento. Quando ocorre tal ruptura, nenhum dos limites de resistência previstos (do aço, dos blocos, ou do graute) é atingido, ou seja, o rompimento acontece a uma carga inferior à prevista, devido falta de aderência entre os componentes.

Izquierdo (2015) também realizou o ensaio de arrancamento simples para avaliar a capacidade de aderência apresentada por blocos de concreto e cerâmicos ao graute. O modo de ruptura apresentado pelos blocos de concreto foi caracterizado pela deterioração do bloco, indicando boa aderência na interface bloco/graute. Já nas amostras ensaiadas com bloco cerâmico, o rompimento característico identificado corresponde ao deslizamento do graute, indicando má aderência entre bloco cerâmico e material de enchimento. Na Figura 2.10 pode ser identificado o deslizamento sofrido pelo graute no interior do bloco cerâmico, antes e depois do ensaio de arrancamento.

Figura 2.10 – Deslocamento do graute devido à má aderência com bloco cerâmico

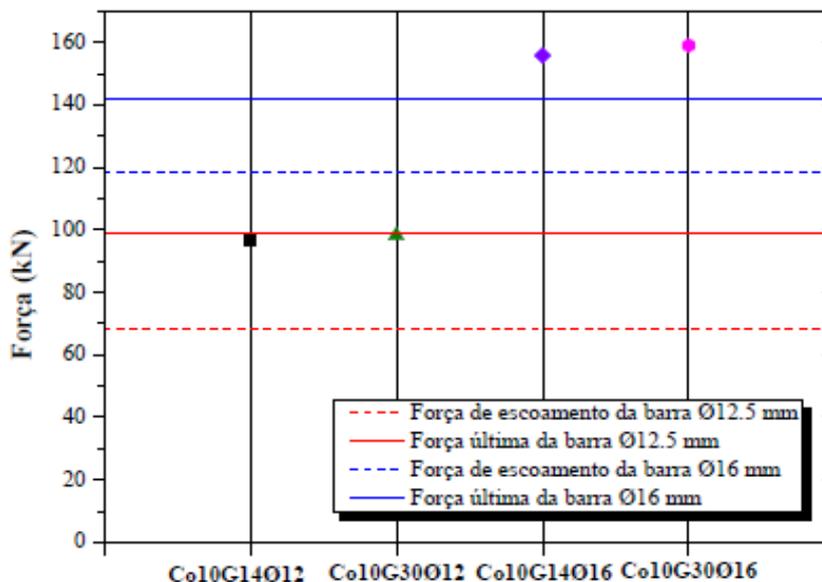


Fonte: Izquierdo (2015), p. 221. Legenda: a) Corpo de prova antes do ensaio de arrancamento; b) Corpo de prova depois do ensaio de arrancamento.

A autora constatou com este ensaio, que a boa aderência entre o bloco de concreto e graute fizeram com que a ruptura do conjunto só ocorresse após ultrapassar o limite de escoamento do aço. Por outro lado, para as amostras com bloco cerâmico, que não apresentaram boa aderência com o material de enchimento, o rompimento ocorreu com tensões inferiores ao limite de escoamento do aço, devido ao deslizamento do enchimento.

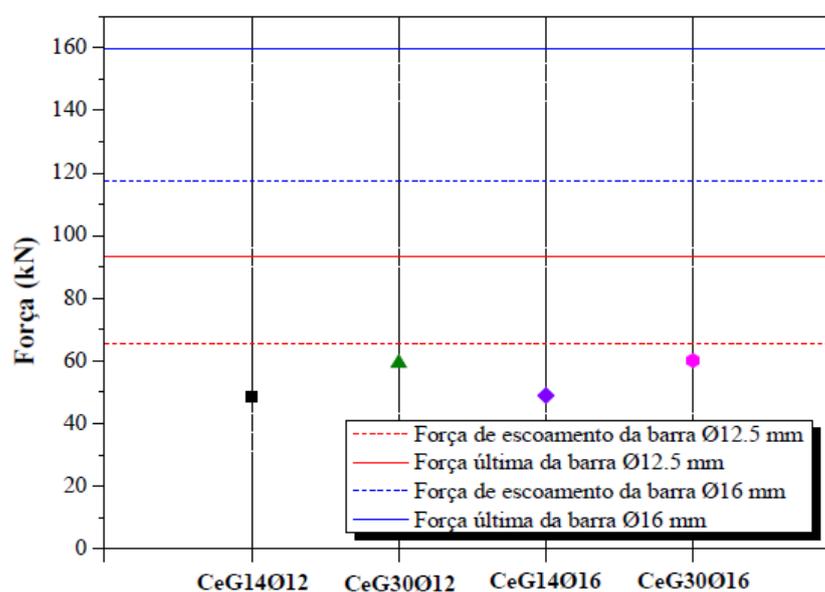
Os resultados obtidos no ensaio de arrancamento com blocos de concreto e com blocos cerâmicos podem ser visualizados na Figura 2.11 e na Figura 2.12, respectivamente.

Figura 2.11 – Ensaio de arrancamento com bloco de concreto



Fonte: Izquierdo (2015), p. 215. Legenda: Co10 significa a resistência nominal do bloco de concreto; G30 e G14 significam a resistência nominal do graute em Mpa; e $\phi 12,5$ e $\phi 16$ se referem ao diâmetro nominal do aço utilizado.

Figura 2.12 - Ensaio de arrancamento com bloco cerâmico



Fonte: Izquierdo (2015), p. 218. Legenda: Ce significa bloco cerâmico; G30 e G14 significam a resistência nominal do graute em MPa; e $\phi 12,5$ e $\phi 16$ se referem ao diâmetro nominal do aço utilizado.

Os resultados encontrados pela autora mostram o aumento da resistência de aderência no ensaio de arrancamento, conforme aumenta a resistência à compressão do material de enchimento. Esse fenômeno ocorreu tanto para o uso do bloco de concreto quanto para o do bloco cerâmico, conforme pode ser visualizado na Figura 2.11 e na Figura 2.12 . O

aumento da aderência no ensaio de arrancamento, conforme aumenta a resistência do material de enchimento também foi observado no trabalho de Biggs (2005).

Izquierdo (2015) identificou que o desempenho inferior dos blocos cerâmicos pode ser atribuído à menor aderência do material, que apresentou rugosidade, determinada com o auxílio do equipamento rugosímetro, inferior a 10 vezes à apresentada pelos blocos de concreto.

2.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA ENTRE BLOCO E GRAUTE

Como pôde ser visto no item anterior, a utilização do ensaio de arrancamento permite avaliar a aderência apresentada pelo conjunto barra de aço, graute e bloco. Entretanto, existe outro ensaio com capacidade de avaliar, especificamente, a aderência entre bloco e graute, chamado ensaio de empurramento (push-out).

Este ensaio foi utilizado em alguns trabalhos demonstrados a seguir.

2.3.1 ENSAIOS REALIZADOS POR IZQUIERDO (2015)

Izquierdo (2015) define que esta técnica consiste no preenchimento de uma das cavidades do bloco com graute, deixando-o com 3 centímetros de sobressalto em relação ao topo do bloco. Em seguida, após o período de cura do enchimento, aplica-se uma carga de compressão sobre a área do graute, com o objetivo de expulsá-lo do interior do bloco. Dessa forma, quanto maior a tensão necessária para extrair o graute do interior do bloco, maior a aderência entre os materiais.

A área utilizada para o cálculo da tensão de aderência corresponde à área de contato entre bloco e graute, que é obtida pela multiplicação do perímetro do orifício do bloco a ser grauteado, pela altura do bloco.

Esse ensaio consiste em submeter a região da interface entre bloco e graute a uma tensão de cisalhamento, através da aplicação de esforços no graute, na tentativa de fazê-lo deslizar para fora do bloco.

A autora supracitada empregou este ensaio em sua pesquisa, em que foram avaliadas as propriedades de aderência entre grautes e um tipo de bloco cerâmico e dois tipos de blocos de concreto. Como resultado, foi constatada uma boa resistência de aderência apresentada pelos blocos de concreto, que romperam devido à fissuração do bloco, enquanto que, para as amostras com blocos cerâmicos, o rompimento foi caracterizado pelo deslizamento do graute, sob a atuação de cargas significativamente inferiores às apresentadas pelos blocos de

concreto. Algumas propriedades do bloco cerâmico utilizado em seu trabalho podem ser visualizadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Propriedades dos blocos cerâmicos empregados

Bloco	Resistência característica fbk (MPa)	Índice de Absorção de Água (%)
Cerâmico	7,81	15,87

Fonte: Adaptado de Izquierdo (2015).

O bloco cerâmico utilizado na referida pesquisa possui parede vazada e superfície interna de contato com o graute lisa e de forma retangular. No ensaio de empurramento para determinação da resistência de aderência entre bloco e graute, foram empregados dois tipos de graute, com 14 e 30 MPa de resistência a compressão. Para cada combinação bloco/graute foram ensaiados 6 corpos de prova, obtendo-se os ensaios de empurramento demonstrados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Resultados do ensaio de empurramento (Push-out)

Bloco	Graute	Força máxima média (kN)	Tensão de aderência média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
Cerâmico	14 MPa	11,64	0,16	0,02	11,31
	30 MPa	14,02	0,19	0,02	8,87

Fonte: Adaptado de Izquierdo (2015).

Como pode ser visualizado no Quadro 2.2, ocorreu um aumento na resistência de aderência com o aumento da resistência à compressão do graute. Entretanto, mesmo com o aumento da tensão de aderência para o graute de maior resistência, em todos os corpos de prova, foi constatado o rompimento pelo deslizamento do graute, caracterizando o desempenho inferior da aderência entre estes materiais.

Na Figura 2.13 pode ser constatada a ocorrência do deslizamento do graute no interior do bloco cerâmico, comparando-se o estado do corpo de prova, antes e após o ensaio de empurramento.

Figura 2.13 – Deslizamento do graute no interior do bloco cerâmico



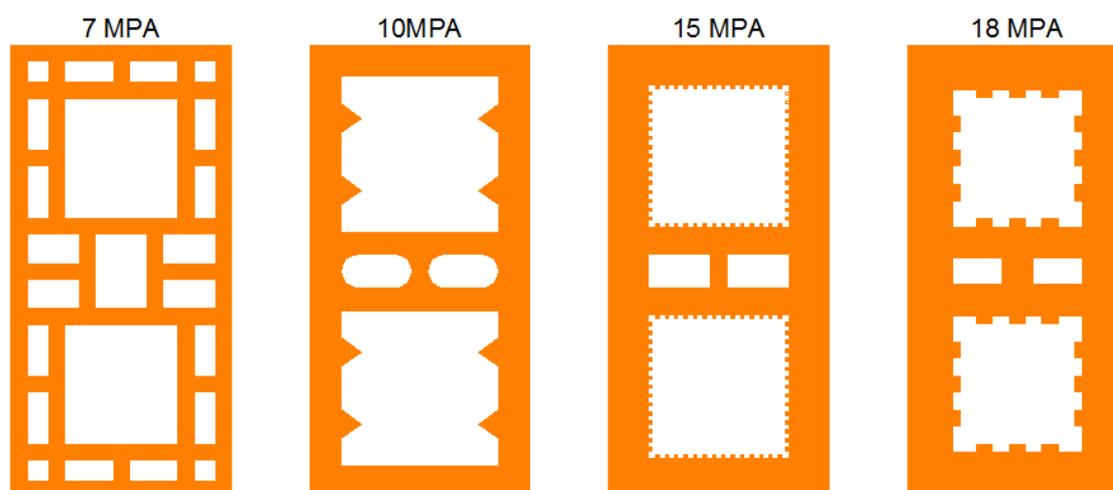
Fonte: Izquierdo (2015), p. 200. Legenda: a) Corpo de prova antes do ensaio de empurramento; b) Corpo de prova depois do ensaio de empurramento.

2.3.2 ENSAIOS REALIZADOS POR FISCHER (2016)

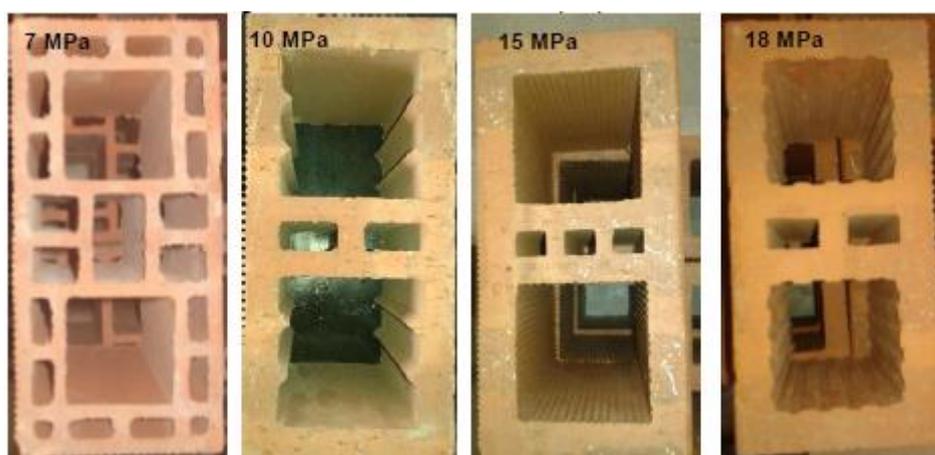
Outra pesquisa que empregou o ensaio de empurramento para avaliar a resistência de aderência entre blocos cerâmicos e grautes foi desenvolvida por Fisher (2016). Na sua pesquisa foram utilizados 4 tipos de blocos cerâmicos, com diferentes níveis de resistência à compressão (f_{bk}) 7, 10, 15 e 18 MPa. Além disso, os blocos possuíam diferentes geometrias, o que pode influenciar significativamente na aderência entre os materiais.

Os diferentes tipos de blocos cerâmicos utilizados na referida pesquisa podem ser visualizados na Figura 2.14 e Figura 2.15.

Figura 2.14 - Características dos blocos utilizados



Fonte: Fischer (2016), p. 44.

Figura 2.15 - Foto dos blocos

Fonte: Fischer (2016), p. 50.

Algumas das propriedades determinadas para os blocos cerâmicos durante os ensaios de caracterização realizados pelo autor estão demonstradas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Propriedades de cada tipo de bloco

Tipos de blocos	Resistência característica à compressão fbk (MPa)	Índice de Absorção de Água (%)
7 MPa	10,6	11,00
10 MPa	11,4	11,85
15 MPa	15,4	11,36
18 MPa	18,3	9,73

Fonte: Adaptado de Fischer (2016).

Fischer (2016) realizou o ensaio de empurramento em 6 corpos de prova para cada combinação de tipo de bloco/tipo de graute. Para cada tipo de bloco foram utilizados dois tipos de graute com diferentes valores de resistência à compressão. Os valores de resistência de aderência obtidos para cada tipo de bloco podem ser visualizados no Quadro 2.4.

O que pode ser observado no Quadro 2.4 é que, com exceção do bloco tipo 10 MPa, todos os demais blocos apresentaram resistência de aderência superior para as amostras ensaiadas com grautes de resistência mais baixa. Portanto esse resultado difere dos encontrados por Biggs (2005) e Izquierdo (2018), que obtiveram aumento na aderência com o aumento da resistência do material de enchimento.

Quadro 2.4 - Resultados do ensaio de empurramento (Push-out)

Bloco	Graute	Força máxima média (kN)	Tensão de aderência média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
7 MPa	15 MPa	34,7	0,64	0,12	18,57
	20 MPa	30,6	0,56	0,12	22,14
10 MPa	15 MPa	66,4	0,86	0,2	22,99
	20 MPa	71,1	0,93	0,2	21,23
15 MPa	20 MPa	69,1	0,92	0,19	21,01
	35 MPa	27,0	0,36	0,17	47,23
18 MPa	20 MPa	91,5	1,16	0,22	18,48
	35 MPa	60,9	0,78	0,16	20,52

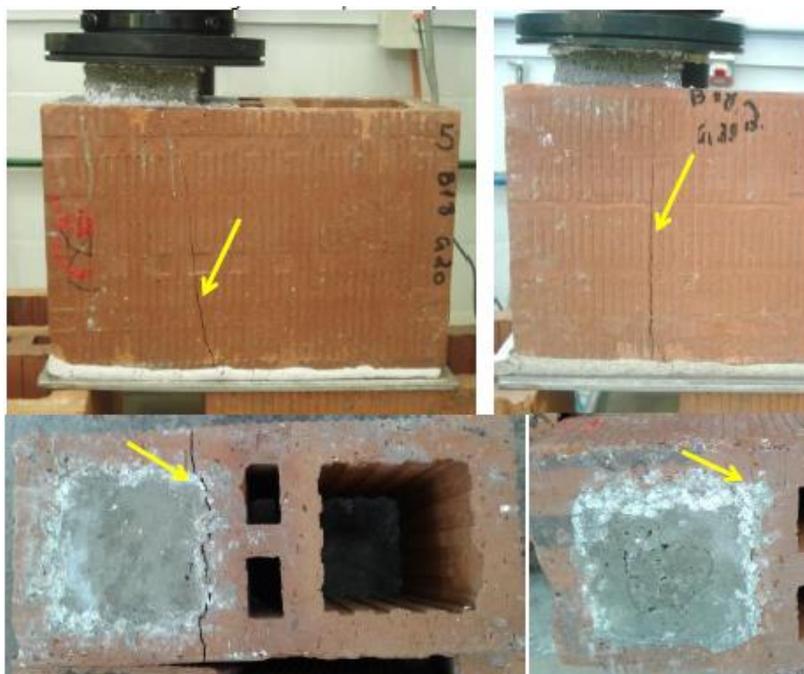
Fonte: Adaptado de Fischer (2016).

Com o ensaio, o autor constatou que apenas 3 exemplares dos 48 ensaiados apresentaram deslizamento do graute no interior do bloco cerâmico. Nos demais exemplares, ocorreu a ruptura do bloco cerâmico comprovando a boa aderência entre os blocos e grautes utilizados. Outro fato interessante é que apenas os blocos preenchidos com o graute de 35 MPa deslizaram, reforçando uma tendência de melhor desempenho para grautes de menor resistência, devendo essa constatação ser estudado com maior cautela.

Na maioria das amostras a ruptura ocorreu devido à abertura de fissura no bloco ao invés do deslizamento do graute. Um exemplo desta ruptura pode ser observado na

Figura 2.16.

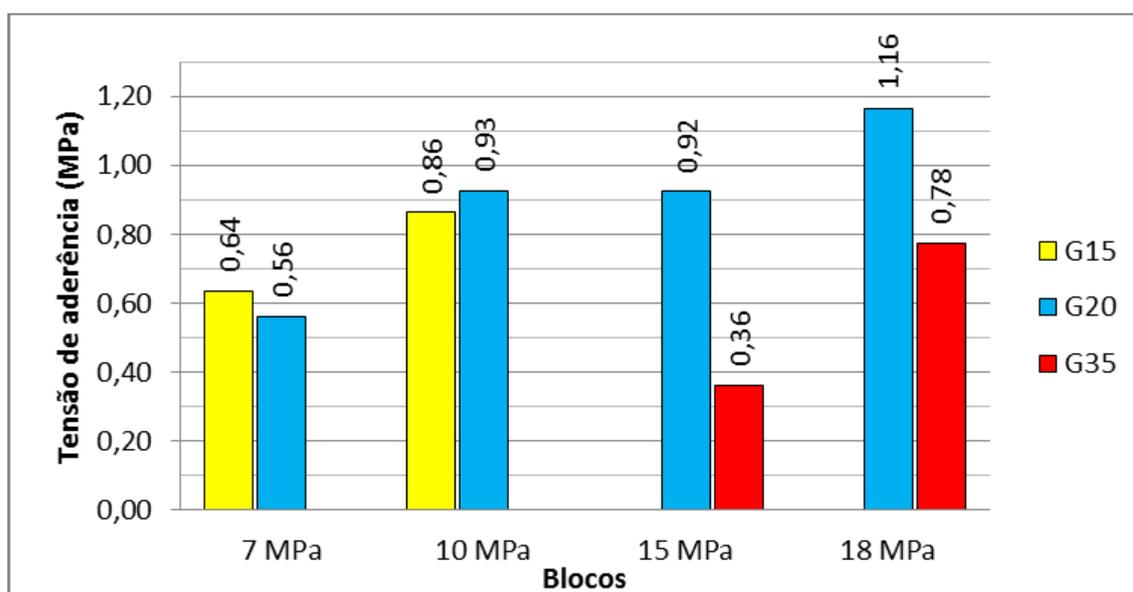
Figura 2.16 - Ruptura por fissuração do bloco



Fonte: Fischer (2016), p. 68.

Como a ruptura ocorreu no bloco cerâmico, as resistências de aderência foram maiores quando analisados um mesmo tipo de graute, para os blocos que possuem maior resistência à compressão. O que faz muito sentido, uma vez que o elo fraco do ensaio ficou caracterizado como sendo o bloco, que fissurou. Portanto, se o bloco for mais resistente, maior será a resistência de aderência no ensaio. Essa constatação pode ser feita com maior clareza na Figura 2.17, comparando-se as barras de mesma coloração.

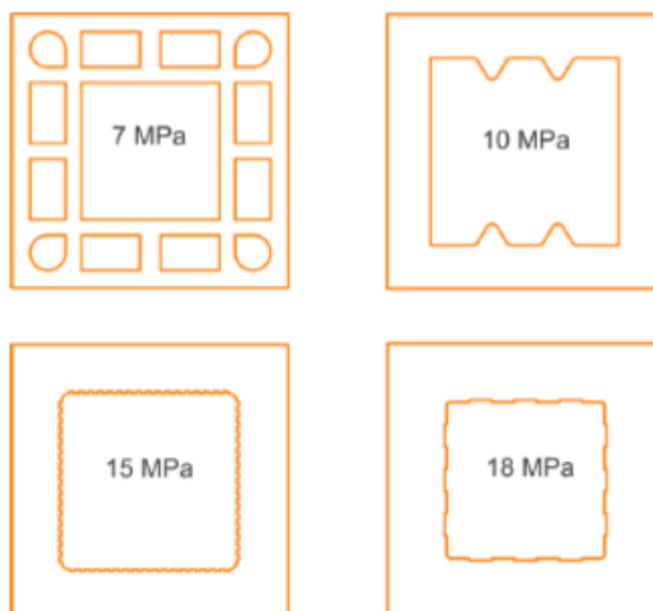
Figura 2.17 - Resultados do ensaio Push-out por tipo de bloco



Fonte: Fischer (2016), p. 72.

2.3.3 ENSAIOS REALIZADOS POR GUARNIERI (2017)

No trabalho desenvolvido por Guarnieri (2017) foram utilizados blocos cerâmicos do tipo meio bloco para avaliar a aderência entre blocos e graute. Foram utilizados 4 tipos de bloco com diferentes resistências à compressão e geometrias, visando identificar a influência destas propriedades na interação com o graute. Nessa pesquisa, foi empregado apenas um tipo de graute, com resistência à compressão de 30 MPa. Na Figura 2.18 podem ser identificados o formato e a resistência nominal dos blocos utilizados.

Figura 2.18 - Meio blocos utilizados

Fonte: Guarnieri (2017), p. 41.

Algumas características dos blocos cerâmicos utilizados na referida pesquisa foram reunidas no Quadro 2.5. O que pode ser percebido de início, ao analisar esse quadro, é a proximidade da resistência característica apresentada pelos blocos do tipo 15 e 18 MPa, assim como o valor inferior de tração do bloco tipo 18 MPa em relação ao 15 MPa.

Quadro 2.5 - Propriedades dos blocos utilizados

Tipos de blocos	Resistência média à compressão f_{bm} (MPa)	Resistência característica f_{bk} (MPa)	Resistência à tração por fendilhamento f_t (MPa)	Índice de Absorção de Água (%)
7 MPa	13,29	9,84	0,96	13
10 MPa	13,90	11,39	1,56	10,9
15 MPa	24,66	17,81	1,82	11,4
18 MPa	23,29	18,92	1,62	10,7

Fonte: Adaptado de Guarnieri (2017).

As propriedades do graute utilizado podem ser visualizadas no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 - Propriedades do graute utilizado

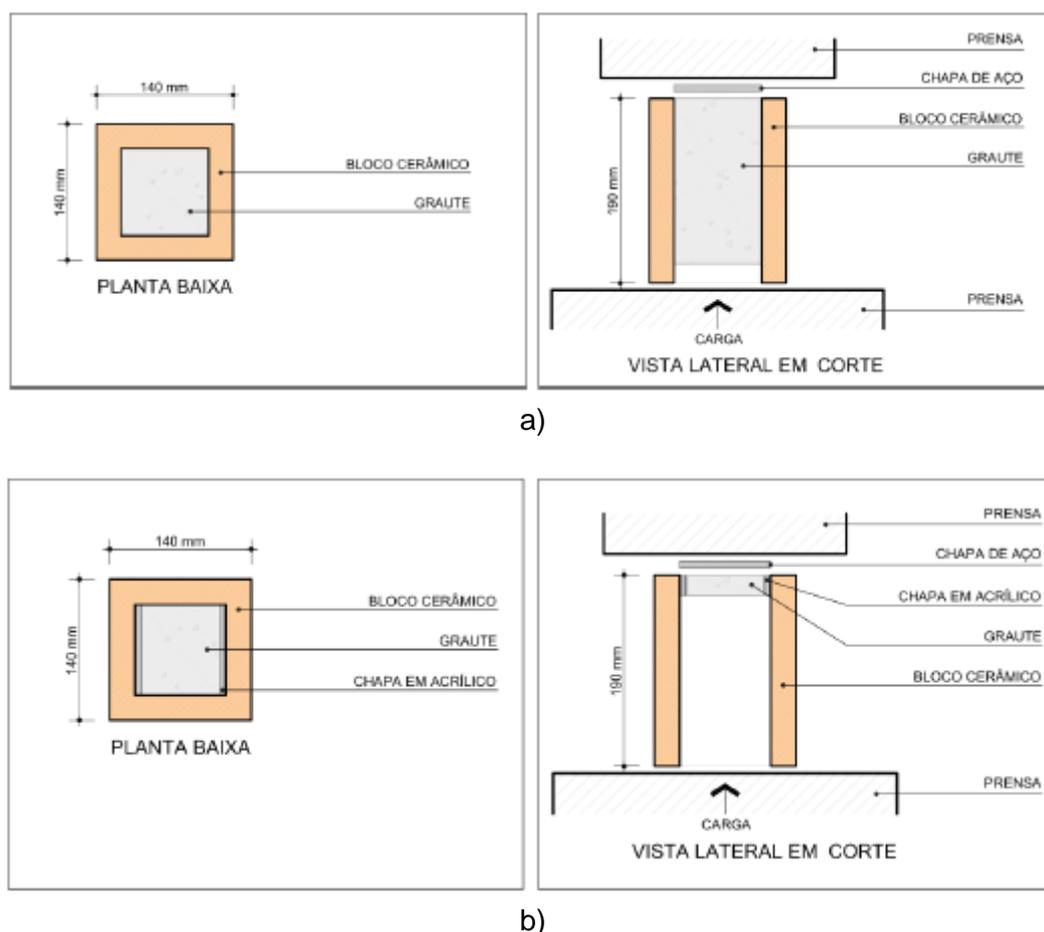
Graute	Resistência média à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Poisson
30 MPa	33,78	30,68	0,19

Fonte: Adaptado de Guarnieri (2017), p. 65.

Para avaliação da resistência de aderência entre os materiais, o autor empregou o ensaio de empurramento normal, com o preenchimento de toda a célula do bloco com o graute e, também, utilizou um ensaio de empurramento com área de contato reduzida, em que

apenas uma altura de aproximadamente 20 mm do bloco estava em contato com o graute, porém, apenas, em duas paredes. O esquema do ensaio de empurramento, para os dois tipos de ensaio, pode ser visualizado na Figura 2.19.

Figura 2.19 - Esquemas de ensaio de empurramento (push-out)



Fonte: Guarnieri (2017), p. 54 e p. 57. Legenda: a) Ensaio de empurramento; b) Ensaio de empurramento com área reduzida.

Os resultados obtidos pelo autor no ensaio de empurramento normal podem ser visualizados no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Resultados do ensaio de empurramento (Push-out)

Bloco	Graute	Força máxima média (kN)	Área de contato média (mm ²)	Tensão de aderência média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
7 MPa	30 MPa	81,4	47164	1,73	0,23	13,44
10 MPa	30 MPa	110	77409	1,42	0,34	23,84
15 MPa	30 MPa	210,2	71520	2,93	0,38	12,89
18 MPa	30 MPa	165,3	62501	2,64	0,37	14,09

Fonte: Adaptado de Guarnieri (2017), p. 66.

Segundo Guarnieri (2017), a resistência de aderência entre blocos e grautes foi superior à resistência mecânica à tração do bloco, pois ocorreu a ruptura do bloco antes de

existir qualquer indício de escorregamento do graute. Ainda segundo o autor, os resultados mostram uma tendência de aumento da resistência de aderência, conforme se aumenta a resistência à compressão do bloco cerâmico, com exceção da amostra com bloco de 10 MPa. Essa constatação também foi feita por Fischer (2016), e são devidas à forma de ruptura apresentada no ensaio de empurramento, que em ambos os casos, foram devidas à fissuração dos blocos.

Com o objetivo de medir a aderência do graute aos blocos, sem considerar a influência da resistência mecânica dos blocos, Guarnieri (2017) também realizou um ensaio de empurramento com área de contato reduzida. Para este ensaio o autor encontrou os resultados demonstrados no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Resultados do ensaio de empurramento com área de contato reduzida

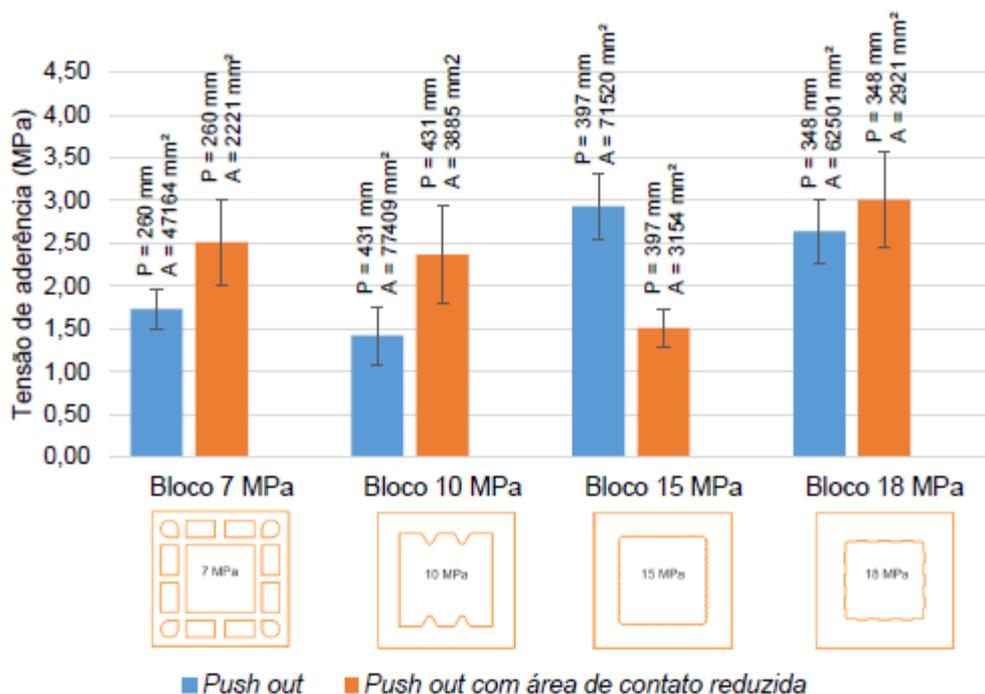
Tipo de bloco	Graute	Força máxima média (kN)	Área de contato média (mm ²)	Tensão de aderência média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
7 MPa	30 MPa	6,17	2221	2,51	0,51	20,46
10 MPa	30 MPa	9,23	3885	2,37	0,57	24,01
15 MPa	30 MPa	4,67	3154	1,51	0,22	14,69
18 MPa	30 MPa	8,82	2921	3,01	0,56	18,6

Fonte: Adaptado de Guarnieri (2017), p. 71.

Com esses resultados o autor constatou um aumento na resistência de aderência, em comparação ao resultado do ensaio de empurramento normal, com exceção da amostra com bloco de 15 MPa, que apresentou os maiores valores de aderência no ensaio anterior e para o ensaio com área reduzida, apresentou a menor resistência de aderência. O autor ainda salienta que no ensaio com área reduzida, o modo de ruptura predominante também foi por fissuração do bloco, e que a resistência de aderência do bloco de 15 MPa foi a única a ficar abaixo da resistência de fendilhamento apresentada pelo bloco, sendo suposto que a resistência de aderência seja superior aos resultados obtidos.

A comparação entre os resultados dos dois ensaios de empurramento pode ser feita com maior clareza na Figura 2.20.

Figura 2.20 - Comparação entre ensaio de empurramento e ensaio de empurramento com área de contato reduzida



Fonte: Guarnieri (2017), p. 74.

Conforme identificado por diversos pesquisadores, a aderência é um componente importante para o bom desempenho das estruturas de alvenaria, sendo capaz de provocar grandes modificações na resistência de estruturas. Ao que parece, algumas combinações de blocos cerâmico e graute apresentam capacidade de aderência baixa, especialmente com o graute de maior resistência, sendo fundamental sua compreensão para o estabelecimento de parâmetros de projeto, capazes de adequar essas propriedades às estruturas de alvenaria que utilizam este material.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Uma das alternativas utilizadas para atingir os objetivos propostos e obter uma maior compreensão do comportamento de aderência entre blocos cerâmicos e grautes, foi o desenvolvimento de um extenso programa experimental. As etapas, procedimentos e ensaios realizados no programa experimental serão explicados nesse capítulo.

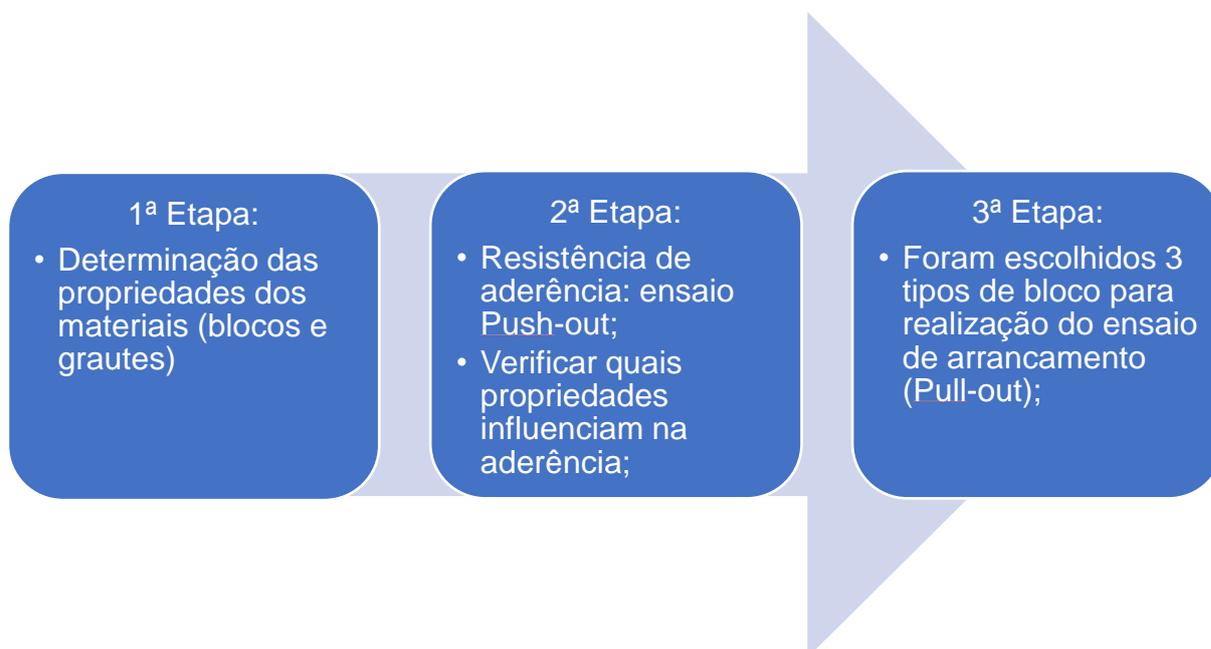
A maior parte das atividades desenvolvidas nessa pesquisa foram realizadas no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) e Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A única exceção foi o ensaio para determinação da rugosidade dos blocos, que foi realizado na Universidade de São Paulo (USP), no campus de São Carlos.

Essa pesquisa contou com apoio da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) que se dispôs a doar todos os materiais necessários aos ensaios (incluindo blocos especialmente produzidos), além de custos de mão-de-obra e necessários para adaptar acessórios e equipamentos para realização dos ensaios.

O principal ensaio empregado para avaliar a aderência entre cada combinação de tipo de bloco e graute foi o ensaio de empurramento (Push-out). Esse ensaio permite avaliar, isoladamente, a aderência de um único bloco com o graute. Em seguida, para complementar a avaliação da aderência, foi empregado o ensaio de arrancamento (Pull-out), para 3 tipos de blocos selecionados. O arrancamento permite avaliar a aderência de uma maneira mais realista, pois o ensaio é realizado em pequenas paredes, ao invés de um único bloco, permitindo considerar a influência, por exemplo, do desaprumo e desalinhamento das fiadas na aderência entre blocos e grautes.

Para avaliar a aderência entre blocos cerâmicos e grautes nessa pesquisa, foram utilizados 5 tipos de blocos cerâmicos e dois tipos de grautes. As principais variáveis introduzidas pelos diferentes tipos de blocos são o fato de 3 desses serem dotados de paredes maciças e 2 de paredes vazadas, possuírem resistências à compressão diferentes, e, os diferentes formatos geométricos de suas aberturas, sendo algumas formadas por paredes lisas e, outras, com a presença de frisos, fazendo com que a área de contato com o graute seja diferente. As principais variáveis introduzidas pelos grautes são os diferentes níveis de resistência à compressão, algumas características no estado fresco e, sua retração.

Dessa forma, para atingir os objetivos propostos, o programa experimental foi dividido em três etapas principais, conforme pode ser visualizado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Principais etapas da pesquisa

Fonte: Autor (2019).

Na primeira etapa deste programa experimental são apresentados todos os materiais utilizados (blocos cerâmicos, grautes, argamassas e barra de aço), bem como, quais procedimentos e ensaios foram empregados para sua caracterização. Posteriormente, na segunda etapa, foram realizados os ensaios de empurramento (Push-out), com o objetivo de identificar a resistência de aderência proporcionada pelas diferentes combinações de blocos e grautes. De posse desses dados tornou-se possível avaliar quais das propriedades dos materiais identificadas na primeira etapa da pesquisa, tem capacidade influenciar ou reger os resultados de aderência obtidos. Por fim, visando complementar a avaliação do comportamento de aderência obtida nos ensaios de empurramento, foram realizados ensaios de arrancamento de barras de aço em elementos de alvenaria, finalizando a terceira etapa.

No Quadro 3.1 seguir são apresentadas as principais variáveis que podem influenciar nos ensaios de empurramento e arrancamento. Essas variáveis foram consideradas nessa pesquisa, sendo as destacadas em negrito, avaliadas com maior consideração. Adicionalmente, a aderência no ensaio de arrancamento, também é influenciada pelo desalinhamento e desaprumo das fiadas, resistência das argamassas de assentamento, dentre outros fatores, não sendo essas variáveis estudadas nessa pesquisa.

Quadro 3.1 - Variáveis consideradas no ensaio e empurramento e arrancamento

Material	Variáveis
Bloco cerâmico	Resistência à compressão
	Área da célula ou vazado
	Presença de frisos
	paredes do bloco (maciça ou vazada)
	Rugosidade
	Absorção
	Absorção inicial
Graute	Resistência à compressão
	Módulo de elasticidade
	Absorção
	Retração

Fonte: Autor (2019).

A primeira etapa do programa experimental está exposta no subitem 3.1, em que podem ser observados os materiais e ensaios utilizados para sua caracterização. A segunda etapa é mostrada no subitem 3.2, descrevendo as etapas do ensaio de empurramento, bem como, mostrando o procedimento que foi desenvolvido para avaliar a retração do graute no interior dos blocos cerâmicos. No subitem 3.3 está demonstrada a terceira etapa do programa experimental, em que são descritos os procedimentos empregados no ensaio de arrancamento, bem como, são apresentados os motivos da escolha dos 3 tipos de bloco usados nesse ensaio.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados 5 tipos de blocos cerâmicos, 2 tipos de graute (G15 e G30), dois tipos de argamassa de assentamento e barras de aço CA50 com 16 mm de diâmetro.

Cada material foi caracterizado conforme os procedimentos definidos em suas respectivas normas técnicas. As propriedades determinadas para cada tipo de material na primeira etapa do programa experimental são resumidas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Resumo das propriedades determinadas para os materiais

Materiais	Propriedades / Ensaios realizados	Materiais	Propriedades / Ensaios realizados
5 tipos de blocos cerâmicos	Caracterização geométrica	2 tipos de graute: estado fresco	Índice de consistência
	Área líquida e Área bruta		Retenção de água
	Índice de absorção de água		Densidade de massa
	Índice de absorção de água inicial		Teor de ar incorporado
	Rugosidade superficial		Massa específica do graute anidro
	Resistência à compressão		Resistência à compressão
Barras de aço CA-50 (16 mm)	Massa linear	2 tipos de graute: estado endurecido	Resistência à tração
	Tensão de escoamento		Módulo de elasticidade
	Tensão máxima		Absorção de água
	Alongamento na ruptura		Massa específica
2 tipos de argamassa	Resistência à tração na flexão		Variação dimensional (retração)
	Resistência à compressão		-

Fonte: Autor (2019).

Nos itens a seguir são apresentados os materiais empregados na pesquisa e os procedimentos de ensaio utilizados, com maiores detalhes.

3.1.1 BLOCOS CERÂMICOS

Todos os blocos cerâmicos utilizados nesse estudo foram fabricados pela cerâmica Palma de Ouro e possuem dimensão nominal de 140 X 190 X 290 mm, sendo, respectivamente, largura, altura e diâmetro.

Nessa pesquisa foram empregados 5 tipos de bloco cerâmico. Três tipos possuem paredes maciças, apresentando diferentes formatos geométricos nas aberturas internas (células), contendo níveis diferentes de ranhuras e quantidade de frisos, que podem proporcionar diferentes níveis de aderência com o graute. Os outros 2 tipos de bloco cerâmico possuem paredes vazadas, sendo um dotado de parede lisa e o outro de paredes ranhuradas, com o objetivo de identificar sua interferência na aderência com os grautes.

Os diferentes tipos de blocos utilizados podem ser visualizados na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Cinco tipos de blocos utilizados

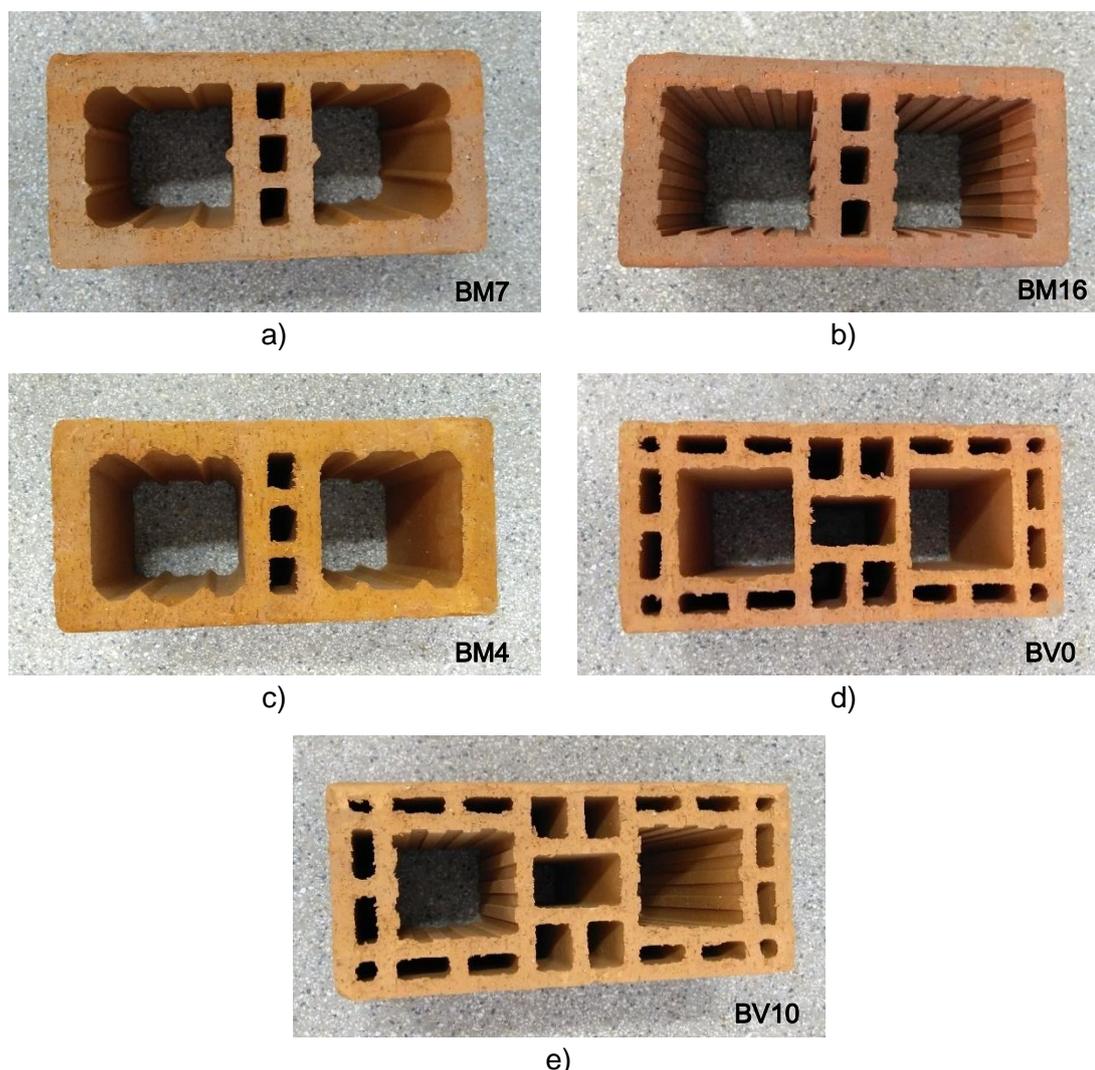
Fonte: Autor (2019).

Para facilitar a identificação de cada tipo de bloco empregados nessa pesquisa, foi criada uma nomenclatura que os diferencie. Essa nomenclatura é formada por duas letras maiúsculas seguidas de um número. A primeira letra será B, para fazer referência ao objeto em questão, o Bloco cerâmico. A segunda letra será M ou V, diferenciando-se os blocos que possuem paredes Maciças e Vazadas, respectivamente. Por fim, o número empregado na nomenclatura, será referente à quantidade aproximada de frisos, ou seja, protuberâncias presentes na parede interna de um vazado do bloco.

Nesse caso, ter-se-á a seguinte nomenclatura para os 3 tipos de bloco com parede maciça: BM7, BM16 e BM4. Já para os dois blocos que possuem parede vazada, a nomenclatura será: BV0, para o bloco que possui parede lisa, e, BV10 para o que possui parede ranhurada.

A nomenclatura empregada para cada tipo de bloco pode ser melhor compreendida na Figura 3.3, para cada caso.

Figura 3.3 - Tipos de bloco



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Bloco tipo BM7; b) Bloco tipo BM16; c) Bloco tipo BM4; d) Bloco tipo BV0; e) Bloco tipo BV10.

No próximo item serão descritos os ensaios realizados para os 5 tipos de blocos cerâmicos utilizados nesta pesquisa, estando estes resumidos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Ensaios de caracterização dos blocos

Ensaio	Norma	Nº de repetições
Caracterização geométrica	NBR 15270-2	13
Área líquida e Área bruta	NBR 15270-2	13
Índice de absorção de água	NBR 15270-2	6
Índice de absorção de água inicial	NBR 15270-2	6
Rugosidade superficial	-	6
Resistência à compressão	NBR 15270-2	6

Fonte: Autor (2019).

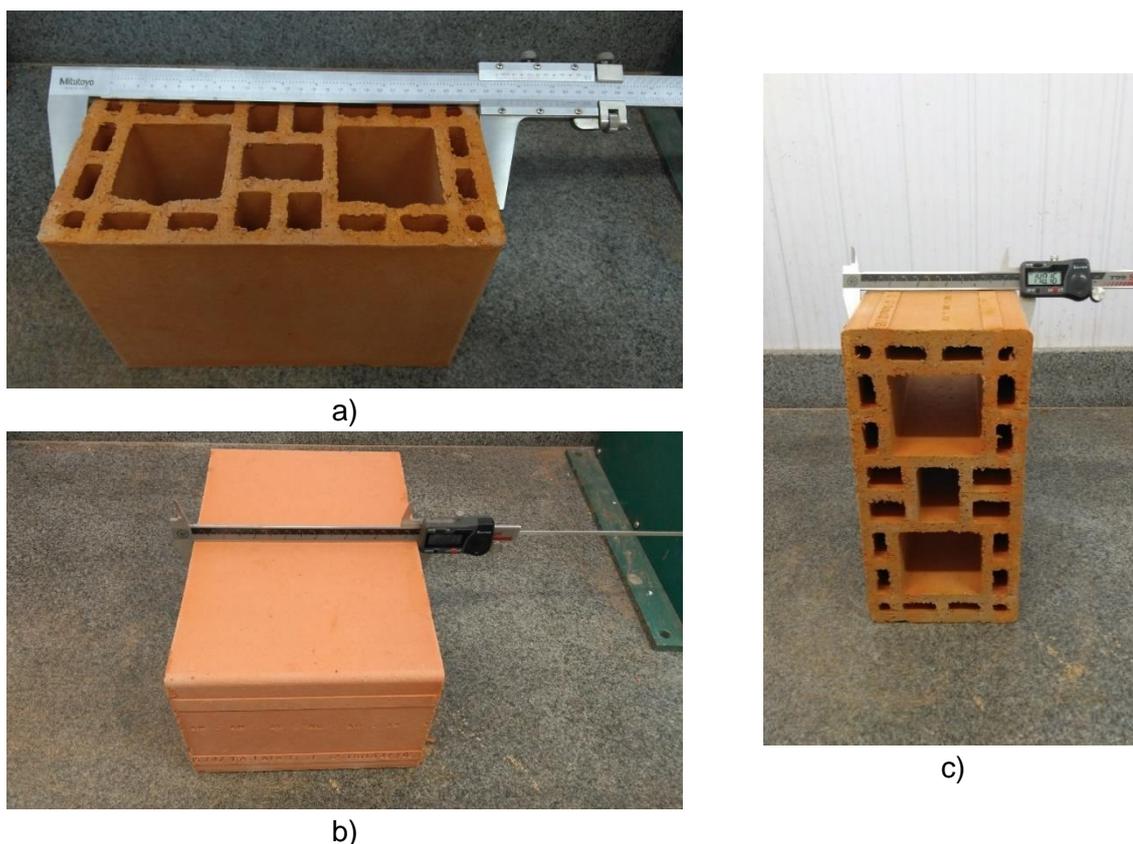
3.1.1.1 Características geométricas dos blocos

As características geométricas dos blocos foram determinadas por ensaios realizados em 13 unidades de alvenaria (blocos cerâmicos) isentas de defeitos aparentes, conforme recomendado pela NBR 15270-2 (ABNT, 2017).

Nesses ensaios foram obtidas as dimensões efetivas das faces dos blocos, as espessuras dos septos e paredes externas, a planeza das faces e o desvio em relação ao esquadro. Além disso, as áreas bruta e líquida dos blocos foram calculadas, sendo sua relação $A_{líquida}/A_{bruta}$ determinada, para cada tipo de bloco.

As medidas efetivas foram realizadas em todas as faces de cada bloco. Elas contemplam duas determinações da altura, largura e comprimento, realizadas em faces opostas das unidades de alvenaria. O procedimento para determinação das dimensões efetivas pode ser visualizado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Determinação das dimensões efetivas

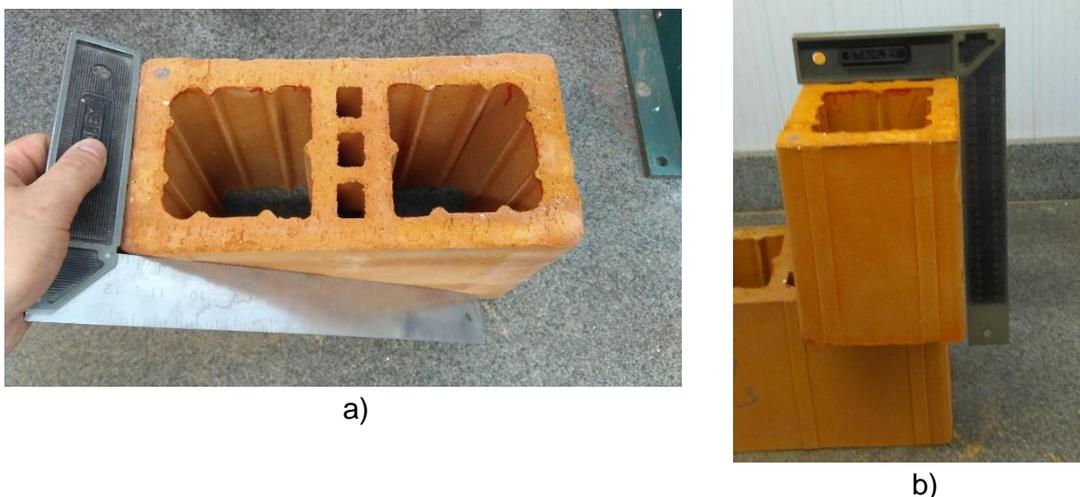


Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Comprimento; b) altura; c) largura.

As medidas da espessura dos septos e das paredes externas foram realizadas, pelo menos, em quatro locais distintos de cada bloco ensaiado. As medições do desvio em relação ao esquadro e da planeza das faces, foram realizadas com a utilização de um paquímetro

com sensibilidade de 0,01 mm e, com o auxílio de um esquadro, conforme pode ser visualizado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Desvio e planeza



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Planeza das faces (flecha); b) Desvio em relação ao esquadro.

3.1.1.1.1 Dimensões das células dos blocos

Além das características geométricas determinadas conforme a NBR 15270 (ABNT, 2017), também foram determinadas as características das células dos blocos. Uma das células de cada bloco empregados no ensaio de caracterização geométrica (13 espécimes) foi utilizada para descrever as dimensões das aberturas de cada tipo de bloco.

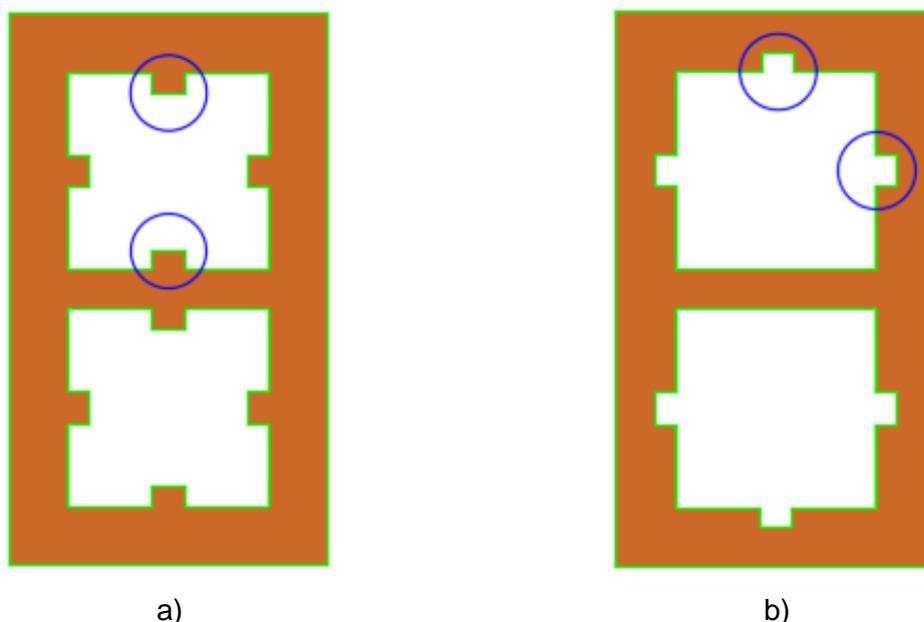
Dentre as características determinadas, as principais foram a área transversal e perímetro médio da abertura das células de cada tipo de bloco. Os dimensionamentos foram feitos com paquímetro, considerando a presença de frisos e ranhuras nas medições realizadas.

Um friso pode ser considerado uma saliência, ou protuberância, presente na parede das células dos blocos, que provoca redução da área transversal da abertura do bloco e, aumento no perímetro da abertura. Já uma ranhura, pode ser considerada um aprofundamento, ou fenda criada na parede da célula do bloco, que provoca o aumento da área transversal da abertura do bloco e o aumento do perímetro da célula do bloco.

Para facilitar, considerando um bloco de parede maciça, a ranhura tende a provocar uma redução localizada na espessura da parede do bloco, enquanto o friso tende a formar o aumento localizado na espessura da parede. A diferença pode ser melhor compreendida observando-se a Figura 3.6.

Embora possa haver diferença na definição de friso e ranhura, é comum o uso da expressão “superfície ranhurada” para descrever de forma qualitativa uma superfície que apresente maior número de irregularidades, sejam elas provocadas por frisos, e/ou, por ranhuras.

Figura 3.6 - Diferença entre friso e ranhura



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Frisos; b) Ranhuras.

Portanto, para determinar as dimensões da abertura dos blocos (área e perímetro), primeiramente, foi realizada a medição da abertura total, medindo-se o comprimento e largura de uma célula de cada bloco, em dois lados distintos. Posteriormente, as medidas de largura e espessura de 2 frisos de cada bloco foram determinadas.

De posse dessas medidas, o valor médio de espessura e largura dos frisos medidos nos 13 espécimes de um mesmo tipo de bloco foram usados para o cálculo da área e perímetro da abertura. A área transversal de cada abertura, será dada pela área total da abertura, reduzindo-se a área ocupada pela quantidade de frisos presente na abertura. A medida de área transversal foi obtida com o uso da equação 3.1.

$$A. \text{transv.} = (L \times C) - (n \times l \times e) \quad (3.1)$$

Sendo,

A.transv., a área transversal da abertura do bloco;

L, a largura da abertura total, em cm;

C, o comprimento da abertura total, em cm;

n, o número de frisos presente na abertura;

l, a largura média de todos os frisos medidos para esse tipo de bloco;

e, a espessura média de todos os frisos medidos para esse tipo de bloco.

Já, o perímetro da abertura dos blocos foi obtido pela soma do perímetro da abertura total com o perímetro introduzido pela quantidade de frisos disponível na célula. Na equação 3.2 pode ser observada a equação para cálculo do perímetro real da abertura.

$$Pr = (2 \times L + 2 \times C) + (n \times e \times 2) \quad (3.2)$$

Sendo,

Pr, o perímetro real da abertura do bloco, em cm;

L, a largura da abertura total, em cm;

C, o comprimento da abertura total, em cm;

n, o número de frisos presente na abertura;

e, a espessura média de todos os frisos medidos para esse tipo de bloco.

Conhecendo-se o perímetro real de um determinado bloco, é possível calcular a área de contato apresentada pelo mesmo, pela multiplicação do perímetro real, pela sua altura. Essa é a área que, efetivamente, contribuirá para resistir aos esforços atuantes no ensaio de empurramento, destinados a remover o graute de dentro dos blocos, proporcionando a tensão de aderência. A área de contato média de cada tipo de bloco foi obtida com a utilização dos provenientes dos 13 corpos de prova medidos.

Existem duas formas de se aumentar a área de contato em um determinado tipo de bloco, pelo aumento das dimensões de largura e comprimento de suas células, e/ou, pela inserção de frisos ou ranhuras na abertura dos blocos.

3.1.1.2 Área líquida e área bruta dos blocos

A determinação da área bruta e líquida dos blocos foi realizada com 6 corpos de prova, para cada tipo de bloco. O cálculo da área bruta dos blocos é realizado pela multiplicação da largura pelo comprimento de cada bloco. No caso, são multiplicados os resultados médios da largura e do comprimento de cada bloco.

Posteriormente, os mesmos blocos são empregados para determinação da área líquida, que é obtida com o uso da equação 3.3.

$$Aliq = \frac{(m_u - m_a)}{\gamma \times H} \quad (3.3)$$

Onde,

A_{liq} significa área líquida do bloco, em cm^2 ;

m_u significa massa do bloco saturado, em g;

m_a significa massa aparente do bloco, em g;

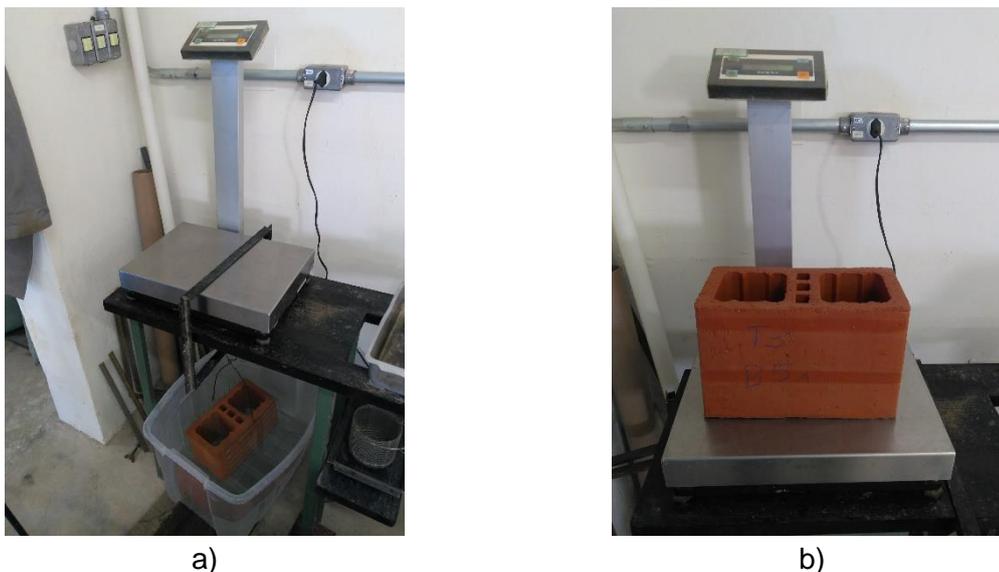
H significa altura do bloco, em cm;

γ significa massa específica da água, tomada igual 1 g/cm^3 .

Para determinação da massa aparente (m_a), os blocos são imersos em água por 24 horas, então sua massa imersa é determinada com o auxílio de uma balança hidrostática. Após esse procedimento, os blocos são removidos da água, deixados em ambiente de laboratório por 5 minutos para escoamento do excesso de água e, então, são secos superficialmente com um pano umedecido, para determinação da sua massa saturada (m_u).

Na Figura 3.7 podem ser conferidas algumas etapas do ensaio.

Figura 3.7 - Etapas do ensaio para determinação da área líquida



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Massa aparente (m_a); b) Massa saturada (m_u).

3.1.1.3 Índice de absorção de água

Para compreender as propriedades físicas de cada tipo de bloco, foram determinadas sua massa seca e índice de absorção de água, conforme especificações da NBR 15270-2 (ABNT, 2017).

Para determinação destas propriedades, seis unidades de cada tipo de bloco cerâmico foram ensaiadas. Primeiramente, as amostras foram submetidas a secagem em estufa à temperatura de 100°C, até atingirem a condição de massa constante. Essa condição é atendida, quando a diferença de massa perdida pelos blocos durante o período de 1 h na estufa, realizada através de pesagens antes e após este intervalo de tempo na estufa, for inferior a 0,25% da pesagem anterior.

Ao atingirem a condição de massa constante, é registrada a massa de cada bloco, agora denominada massa seca (m_s). Após a secagem, os blocos foram resfriados até atingirem a temperatura ambiente, para então, serem imersos na água durante 24 horas. Após esse período de tempo, os blocos foram extraídos da água e deixados secar por 10 minutos na bancada. Após esse tempo, o excesso de água remanescente foi removido com um pano úmido e os blocos nesta condição (saturada) foram pesados. A massa dos blocos nestas condições foi denominada massa úmida (m_u).

De posse desses resultados, é possível calcular o índice de absorção de água (AA), conforme a equação 3.4:

$$AA(\%) = \left(\frac{mu - ms}{ms} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Os procedimentos de ensaio empregados podem ser melhores entendidos observando-se a Figura 3.8.

Figura 3.8 - Ensaio Índice de absorção



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Blocos na estufa (100°C); b) Blocos imersos por 24 h.

3.1.1.4 Índice de absorção de água inicial - AAI

Este ensaio consiste na determinação da quantidade de água absorvida por um bloco seco, após 60 segundos em contato com a água. Os mesmos blocos utilizados no ensaio de absorção foram empregados nesse ensaio.

O procedimento foi iniciado com a secagem dos blocos por 24 horas em estufa a 100°C, sendo os mesmos retirados e resfriados até atingirem temperatura ambiente, para então serem pesados e sua massa inicial (m_i) ser obtida.

Posteriormente, cada bloco foi posto em contato com uma lâmina de água através da sua parte inferior, por um período de 60 segundos, sendo então, rapidamente retirados da água e o excesso de água removido com pano úmido, para determinação de sua massa final (m_f).

O índice de absorção de água inicial é dado pela equação 3.5.

$$AAI = 193,55 \times \frac{(m_f - m_i)}{A} \quad (3.5)$$

Onde,

AAI significa índice de absorção de água inicial, em $(g/193,55cm^2)/min$;

mi significa massa inicial, em g;

mf significa massa final, em g;

A significa área (bruta ou líquida) dos blocos ensaiados, em cm^2 .

Como a norma permite utilizar as duas faces do bloco para realização do ensaio, uma segunda determinação do índice foi realizada no verso do bloco, logo após a determinação da primeira. Nesse caso, o que muda é que a massa inicial da segunda determinação será igual à massa final da primeira determinação e, então, o lado seco do bloco é colocado por mais 60 segundos em contato com a água, para determinação do 2º índice de absorção de água inicial.

3.1.1.5 Rugosidade dos blocos

Um dos fatores que pode influenciar na capacidade de aderência entre os blocos cerâmicos e grautes é a rugosidade apresentada pelas paredes dos blocos. Quanto maior a rugosidade dos blocos, existe uma maior tendência de ocorrer aumento no travamento mecânico entre o graute e as reentrâncias da superfície destes blocos.

Esta propriedade é semelhante ao efeito de travamento, provocado pelos frisos existentes nos blocos, fazendo com que a movimentação do graute no interior destes blocos seja impedida ou dificultada. A diferença entre o travamento provocado pelos frisos e pela rugosidade da superfície está na escala de medida, que no caso dos frisos é no nível macroscópico, enquanto na rugosidade chega a ser microscópica.

Dessa forma, para medir a rugosidade das paredes dos blocos cerâmicos, na escala micrométrica, foi utilizado o equipamento rugosímetro mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Rugosímetro

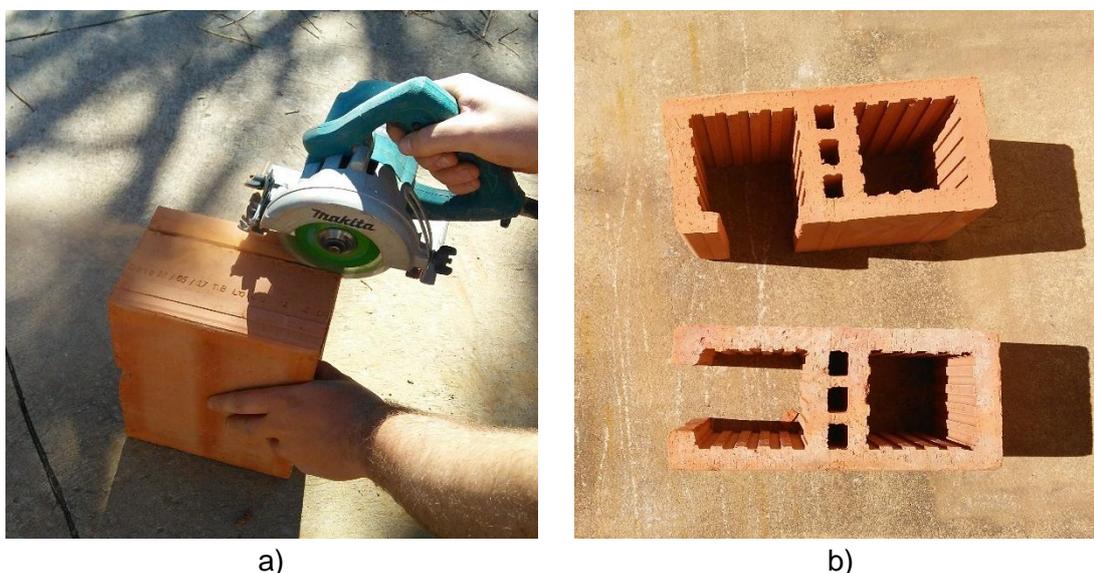


Fonte: Autor (2019).

Este ensaio baseia-se na variação de profundidade captada pela agulha da ponteira do equipamento, ao percorrer determinada distância. Com as variações de profundidade superficial captadas pela agulha, é fornecido pelo equipamento a rugosidade média (R_a), identificada na superfície do material.

Para este ensaio foram obtidas 6 amostras para cada tipo de bloco. As amostras foram extraídas com o auxílio de uma serra circular como pode ser visualizado na Figura 3.10 (a). Três destas amostras foram extraídas da parte frontal de cada bloco e as outras três foram extraídas da lateral do bloco, como pode ser visualizado na Figura 3.10 (b).

Figura 3.10 - Obtenção de amostras para o ensaio de rugosidade



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) corte das amostras; b) Locais de extração das amostras.

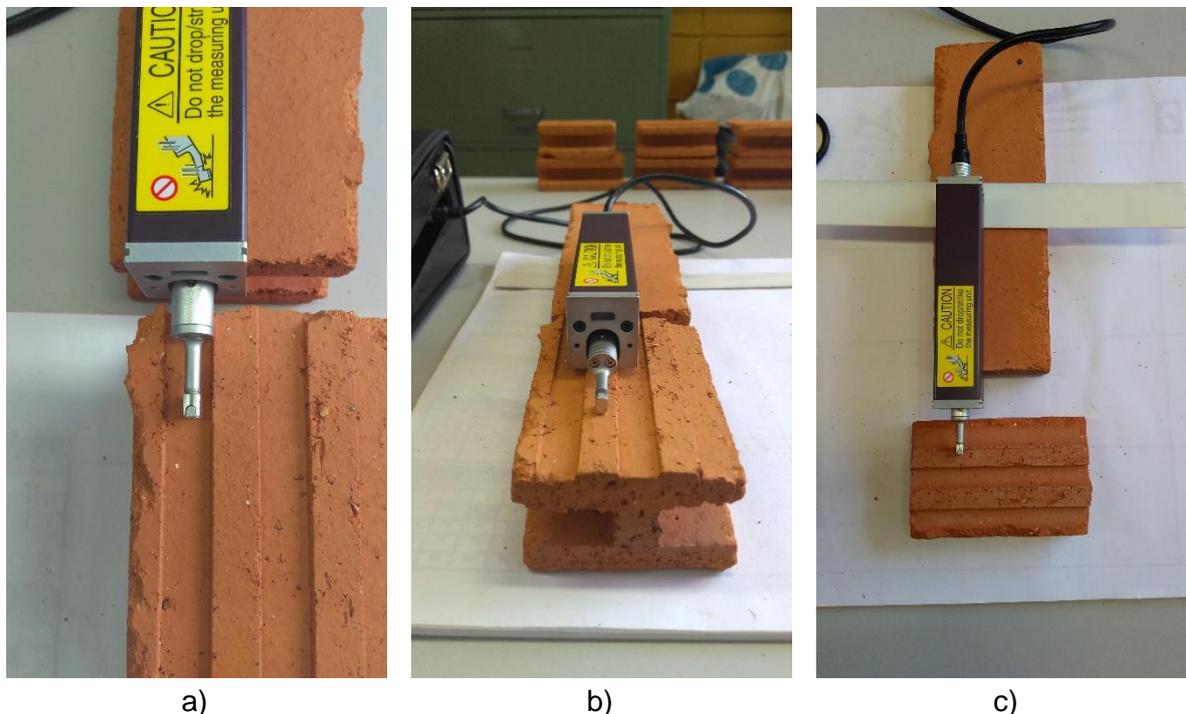
Para a maioria dos tipos de bloco que possuíam paredes com menor quantidade de ranhuras (BM7, BM4 e BV0), as rugosidades foram medidas em 4 pontos de cada amostra na direção vertical e 4 pontos na direção horizontal. As leituras foram realizadas em pontos de altura distinta das amostras, evitando-se obter leituras muito próximas às bordas dos blocos que podem apresentar danificações devido ao processo de corte dos blocos.

No caso dos blocos dotados de superfície ranhurada (BM16 e BV10), optou-se pela determinação da rugosidade vertical e horizontal nos frisos e, também, entre os frisos. Entretanto, somente a rugosidade das protuberâncias (frisos) foram avaliadas na horizontal, pois o equipamento não possuía alcance para realizar o teste no interior das ranhuras nessa direção. Porém, para as medidas realizadas na vertical, tanto as leituras nas protuberâncias quanto no interior das ranhuras puderam ser avaliadas. Na Figura 3.11 estão demonstradas as diferentes posições de leitura realizadas nos blocos tipo BM16 e BV10.

O comprimento de leitura percorrido pelo rugosímetro para determinação da rugosidade média foi de 7,5 mm, entretanto, como essa distância era muito grande para ser

percorrida sobre os frisos na direção horizontal, para esse caso, o comprimento de leitura foi reduzido para 2,5 mm.

Figura 3.11 - Leituras da rugosidade nos blocos BM16 e BV10



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Rugosidade determinada na direção vertical, entre os frisos; b) Rugosidade determinada na direção vertical, nos frisos; c) Rugosidade determinada na direção horizontal, nos frisos.

3.1.1.6 Resistência à compressão

A propriedade mecânica utilizada para caracterização dos blocos foi a resistência à compressão, realizada conforme as orientações da NBR 15270-2 (ABNT, 2017). Em seguida, foi determinado o valor característico da resistência à compressão (f_{bk}) para cada tipo de bloco.

Antes de serem rompidos, os blocos foram capeados com pasta de cimento para que a aplicação do carregamento ocorra de maneira uniforme em toda a superfície do bloco. Na Figura 3.12 pode ser observado o capeamento realizado.

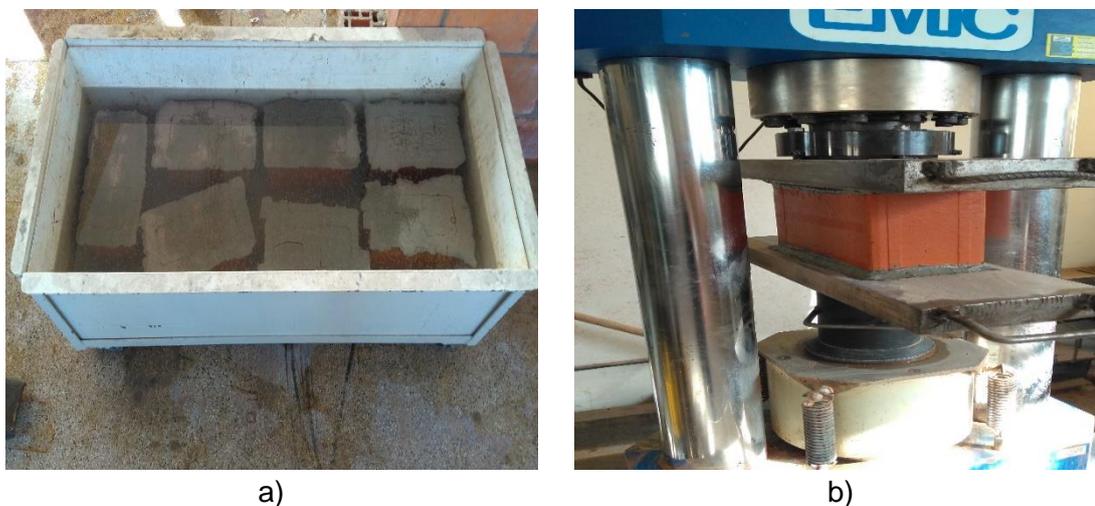
Figura 3.12 - Capeamento dos blocos cerâmicos



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Capeamento do primeiro lado; b) Capeamento do segundo lado dos blocos.

Após a cura da pasta de cimento utilizada no capeamento, os blocos foram colocados na água por 24 horas, pois a NBR 15270-2 (ABNT, 2017) determina que o rompimento seja realizado na condição saturada. Na Figura 3.13 podem ser observados os blocos sendo saturados e na prensa para o rompimento.

Figura 3.13 - Saturação dos blocos e rompimento



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) saturação dos blocos cerâmicos; b) rompimento dos blocos.

3.1.2 GRAUTE

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de graute para avaliação da aderência com os diferentes tipos de bloco. Os grautes utilizados possuem resistência à compressão nominal de 15 e 30 MPa. Ambos os grautes são industrializados, provenientes da empresa Pavmix, e foram empregados sem a presença de agregado graúdo.

A quantidade de água utilizada no preparo de cada massa de graute foi controlada experimentalmente, para proporcionar valores no ensaio de abatimento do tronco de cone,

que se enquadrem na faixa de 250 ± 20 mm. Esse ensaio foi executado conforme as prescrições da NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Essa faixa de valores de abatimento foi adotada, por se tratarem de valores comumente empregados nas obras de alvenaria estrutural e, também, por se tratarem de valores intermediários à faixa de 203 e 279 mm, recomendados pela especificação ACI 530.1/ASCE 6/TMS 602 (MSJC, 2002).

No processo de mistura, o graute seco era pesado e adicionado à betoneira, juntamente com uma quantidade de água, próxima à quantidade mínima indicada pelo fabricante. Posteriormente, efetuava-se a mistura do material e verificava-se o abatimento, com a utilização do ensaio do tronco de cone. Caso o valor de abatimento fosse abaixo da faixa pré-definida, acrescentava-se mais água à betoneira e repetia-se o processo de mistura e determinação do abatimento, até que os valores obtidos fossem adequados.

Esse procedimento de controle do abatimento apresentado por cada tipo graute foi introduzido na pesquisa para que a consistência de cada tipo de graute no estado fresco fosse semelhante. Haja visto que, as características do material no estado fresco podem influenciar na sua capacidade de preencher vazios e reentrâncias quando em contato com os blocos cerâmicos, podendo interferir na de aderência entre os materiais.

Na Figura 3.14 pode ser observada a imagem do abatimento do tronco de cone.

Figura 3.14 - Determinação do abatimento do graute



Fonte: Autor (2019).

Tendo em vista que, tanto as propriedades do graute em estado fresco, quanto em estado endurecido, podem exercer papel preponderante na aderência com os blocos cerâmicos, foram empregados alguns ensaios para caracterizar seu comportamento em cada um desses estados.

3.1.2.1 Ensaios no estado fresco

As propriedades do graute em estado fresco foram obtidas logo após a realização do ensaio de abatimento. Nessa hora, parte do graute era retornado à betoneira e misturado novamente, porém, por menos tempo, somente para garantir que as características em estado fresco não fossem perdidas, devido à paralização da betoneira durante a realização do ensaio de abatimento.

Em seguida, o graute era encaminhado para a realização dos ensaios de caracterização em estado fresco. Os ensaios realizados nessa etapa para os dois tipos de graute estão relacionados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Ensaios realizados no graute em estado fresco

Ensaio	Norma	Nº de repetições
Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2002)	1
Determinação da retenção de água	BS EN 413-2 (2005)	2
Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado	NBR 13278 (ABNT, 2005)	2
Determinação da massa específica do graute anidro	NBR NM 23 (ABNT, 2000)	2

Fonte: Autor (2019).

Muitos dos ensaios empregados para caracterização do graute em estado fresco, normalmente, são empregados para caracterização de argamassas, como no caso do ensaio do índice de consistência realizado na mesa de abatimento, mas deve ser salientado, que o graute empregado não continha agregados graúdos, o que torna possível a adoção destes procedimentos.

Na Figura 3.15 está demonstrada a realização do ensaio do índice de consistência.

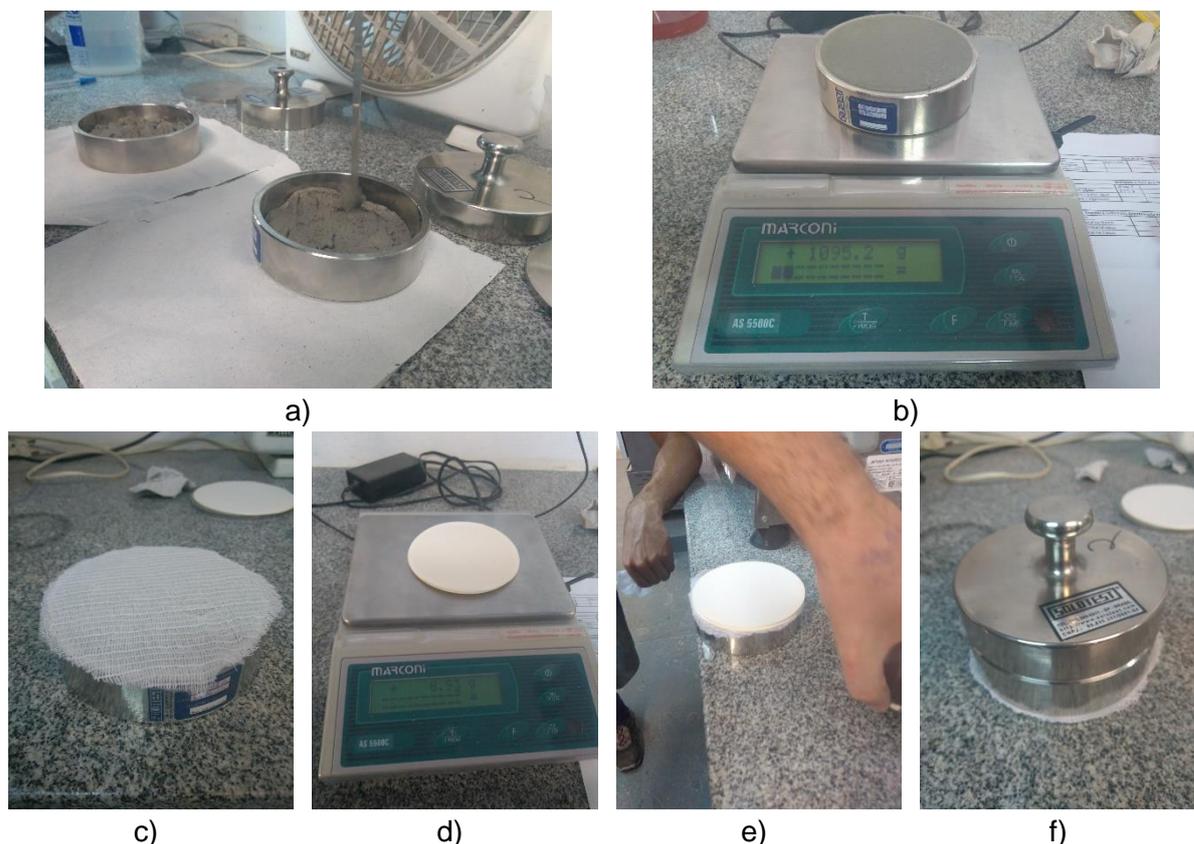
Figura 3.15 - Determinação do índice de consistência



Fonte: Autor (2019).

A determinação da retenção de água foi realizada conforme a norma BS EN 413-2 (2005), que possui procedimento bem semelhante ao adotado pela antiga NBR 13277, com a utilização de um conjunto de papéis filtro, para determinar a quantidade de água absorvida pela amostra de graute moldada em um disco, após um intervalo de 300 segundos. Na Figura 3.16 podem ser conferidas algumas etapas do ensaio.

Figura 3.16 - Ensaio de retenção de água



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Enchimento dos moldes com graute; b) pesagem do molde cheio; c) colocação de gaze; d) pesagem dos papéis filtro; e) posicionamento dos papéis sobre o disco com a gaze; f) colocação do peso sobre a amostra durante 300s.

3.1.2.2 Ensaios no estado endurecido

As propriedades determinadas para cada graute no estado endurecido, foram obtidas 28 dias após sua moldagem. A cura utilizada para as amostras de graute até a data de ensaio foi submersão em água, logo após o desmolde dos corpos de prova, realizado 24 horas depois de sua moldagem. A única exceção ao procedimento de cura foi para o ensaio de retração, realizado com cura em ambiente de laboratório.

Os corpos de prova utilizados no ensaio de caracterização possuem formato cilíndrico, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O procedimento empregado para moldagem e cura dos corpos de prova seguiu as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Para caracterização das propriedades do graute em estado endurecido foram realizados ensaios mecânicos e físicos.

3.1.2.2.1 Ensaios para determinação das propriedades mecânicas

A lista de ensaios empregados para determinação das propriedades mecânicas dos grautes do tipo 15 e 30 MPa, bem como o número de corpos de prova e normas utilizadas estão demonstradas no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Ensaios para determinação das propriedades mecânicas dos grautes

Ensaio	Norma	Nº de repetições
Determinação do módulo estático de elasticidade	NBR 8522 (2017)	6
Resistência à compressão (corpo de prova cilíndrico de 10 X 20 cm)	NBR 5739 (2018)	6
Resistência à compressão (corpo de prova cúbico de 4 cm de lado)	NBR 13279 (2005)	6
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (2010)	6

Fonte: Autor (2019).

O ensaio de resistência à compressão utilizado para caracterização dos grautes foi realizado com a utilização de corpos de prova cilíndricos, conforme prescreve a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Entretanto, alternativamente, foram moldados corpos de prova cúbicos de graute, com dimensões de 4 cm de lado, para avaliar a capacidade de utilização destes corpos de prova, que possuem dimensões menores e proporcionam redução nos gastos de material no ensaio. Para isso, foram empregados os procedimentos de compressão utilizados para argamassas, disponíveis na NBR 13279 (ABNT, 2005).

Na Figura 3.17 é possível observar os corpos de prova cúbicos sendo moldados. Eles foram utilizados para comparação com os corpos de prova cilíndricos nos ensaios de absorção e compressão. A moldagem de cada corpos de prova consistiu na aplicação de 30 golpes com o soquete da Figura 3.17, em duas camadas de mesma altura, em cada um dos cubos. Após a aplicação dos golpes, foram aplicadas 3 quedas de cada lado da foram, e sua superfície foi nivelada com a utilização de espátula. A cura aplicada foi idêntica aos corpos de prova cilíndricos, com início da imersão em água, 24 horas após sua moldagem.

Figura 3.17 – Moldagem dos corpos de prova cúbicos



Fonte: Autor (2019).

Na Figura 3.18 podem ser visualizados os ensaios realizados para avaliação das propriedades mecânicas dos grautes e o tanque utilizado para cura dos corpos de prova.

Figura 3.18 – Ensaio para determinação das características mecânicas dos grautes



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Tanque de cura dos corpos de prova; b) Ensaio de módulo; c) Compressão de CP cilíndrico; d) compressão de CP cúbico; e) e f) Tração na compressão diametral.

3.1.2.2.2 Ensaio para determinação das propriedades físicas

A lista de ensaios empregados para determinação das propriedades físicas dos grautes do tipo 15 e 30 MPa, bem como o número de corpos de prova e normas utilizadas estão demonstradas no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Ensaio para determinação das propriedades físicas dos grautes

Ensaio	Norma	Nº de repetições
Absorção de água, índice de vazios e massa específica (corpos de prova cilíndricos de 10 X 20 cm)	NBR 9778 (2009)	3
Absorção de água, índice de vazios e massa específica (corpos de prova cúbicos de 4 cm de lado)	NBR 9778 (2009)	6
Determinação da variação dimensional (retração ou expansão)	NBR 15261 (2005)	3

Fonte: Autor (2019).

Para os ensaios prescritos pela NBR 9778 (ABNT, 2009), foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, conforme prescrito pela norma. Entretanto, alternativamente, foram moldados corpos de prova cúbicos de graute, com dimensões de 4 cm de lado, para avaliar a capacidade de utilização destes corpos de prova, que possuem dimensões menores e proporcionam redução nos gastos de material no ensaio. O procedimento de ensaio realizado para os dois formatos de corpo de prova foi idêntico e a massada de graute também, a única diferença é o formato e dimensões dos corpos de prova.

Como a retração dos grautes pode fazer com que a aderência com os blocos cerâmicos seja prejudicada, foram medidas as variações dimensionais apresentadas por 3 corpos de prova prismáticos moldados de graute, no decorrer do processo de hidratação do material, até seus 28 dias contados a partir da data de desmolde. Além da variação dimensional, também foram medidas as variações de massa apresentadas pelos prismas, no mesmo intervalo de tempo. Na Figura 3.19 podem ser vistas etapas da moldagem e ensaio realizados.

Figura 3.19 - Ensaio de variação dimensional e de massa dos grautes



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Moldagem dos prismas; b) Plástico para evitar perda de água; c) Corpos de prova; d) Medição da barra padrão; e) Medição de corpo de prova; f) Pesagem de corpo de prova.

A variação dimensional dos prismas é medida através da comparação do comprimento de cada prisma com uma barra padrão, no decorrer do tempo. Essa variação é apresentada em unidades de mm/m. A variação de massa é representada em porcentagem, obtida através da comparação da massa obtida na hora da desmoldagem do material, com a massa obtida com o passar do tempo. A desmoldagem dos prismas ocorreu após 48 horas

da moldagem dos grautes. A cura dos materiais para esse ensaio foi em ambiente controlado de laboratório, conforme definido pela normativa.

3.1.3 BARRAS DE AÇO

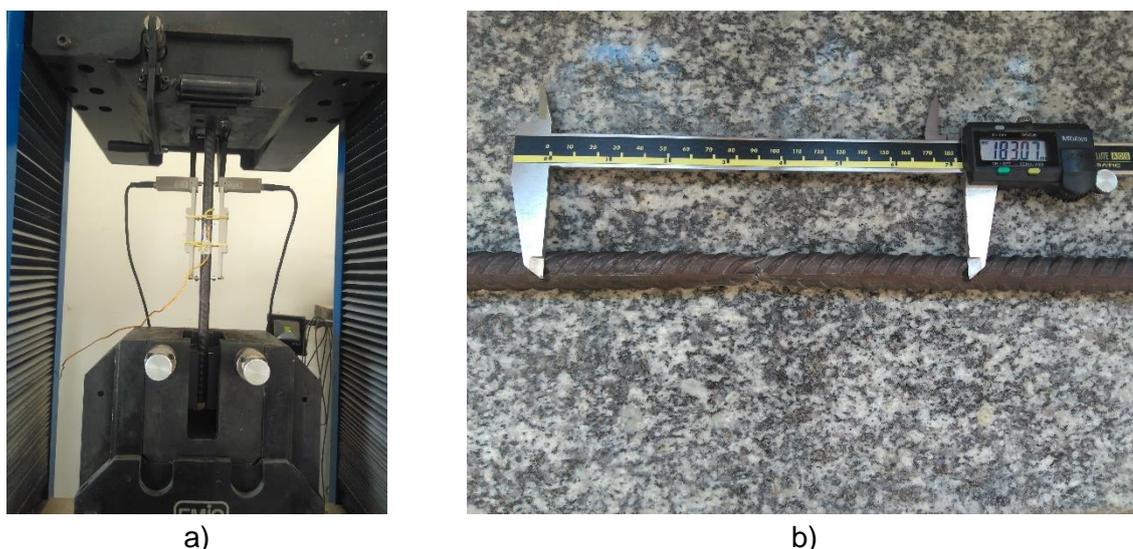
O aço utilizado nessa pesquisa será destinado aos ensaios de arrancamento, no qual o mesmo será grauteado no orifício central dos blocos das paredes.

No início, foi planejado ensaiar 3 paredes de cada amostra, sendo comprado aço do fabricante ArcelorMittal para os ensaios. Entretanto, próximo a data dos ensaios, com receio de que os resultados de arrancamento apresentassem variação excessiva, foi encomendado mais aço, para confecção de mais uma parede para cada amostra. Esse aço, entretanto, provém da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), outro fabricante.

Dessa forma, os ensaios de caracterização do aço foram realizados para as barras de aço de ambos fabricantes. A norma utilizada para o ensaio foi a NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2013).

As propriedades determinadas para os aços foram, massa linear, tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento na ruptura. Com exceção da massa linear, os demais resultados são extraídos dos ensaios de tração das barras de aço. Na Figura 3.20 podem ser vistas imagens do ensaio de tração e medição do alongamento após ruptura.

Figura 3.20 – Ensaio de tração e medição do alongamento após ruptura



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Ensaio de tração; b) Medição do alongamento após ruptura.

Como a seção das barras de aço não é regular, seria impreciso determinar o diâmetro das barras com a utilização de paquímetro. Dessa forma, foi determinado o diâmetro equivalente das seções de aço, conforme a equação 3.6.

$$\emptyset = \sqrt[2]{\frac{m}{(C \times \frac{\pi}{4}) \times 7850}} \quad (3.6)$$

Onde,

\emptyset significa diâmetro equivalente da barra de aço, em (m²);

m significa massa da barra, em kg;

C significa comprimento da barra, em m; e

7850 kg/m³ é a densidade teórica do aço.

Com base nesses resultados calculados para cada barra de aço, foi possível obter os valores da seção de aço equivalente, utilizados no cálculo das tensões no ensaio de caracterização individual de cada barras de aço.

O diâmetro médio do aço encontrado para as barras de cada fabricante, foi utilizado para o cálculo da seção de aço usada nos cálculos das tensões do ensaio de arrancamento.

3.1.4 ARGAMASSAS

Para o desenvolvimento deste estudo foram empregadas duas argamassas de assentamento. As argamassas foram utilizadas para a montagem dos prismas utilizados na investigação do desempenho conjunto de cada tipo de bloco e graute, e, das paredes utilizadas no ensaio de arrancamento.

Uma das argamassas possuía 8 MPa de resistência à compressão e foi destinada ao assentamento dos blocos tipo BV0 e tipo BV10, que possuem paredes vazadas e resistência à compressão inferior. A outra argamassa possui resistência à compressão de 14 MPa e será utilizada no assentamento dos blocos do tipo BM7, BM16 e BM4, que possuem paredes maciças e maior resistência à compressão.

A argamassa utilizada nessa pesquisa é industrializada, proveniente da empresa Pavmix. Os ensaios realizados nas argamassas foram feitos através da retirada de amostras durante a execução dos prismas e das paredes, para constatar as propriedades do material realmente empregado no assentamento dos blocos. Portanto, serão apresentados resultados das propriedades da argamassa empregue nos prismas e, nas paredes.

A quantidade de água a ser utilizada nas misturas de argamassa foi definida experimentalmente, pelos profissionais que realizaram o assentamento dos prismas e

paredes. Em cada mistura a massa de argamassa e água foi anotada, para obter maior controle sobre as características do material.

Durante a realização do assentamento dos blocos, porções de argamassa foram retiradas e empregadas na moldagem de corpos de prova prismáticos, com dimensões de 40 X 40 X 160 mm, conforme prescreve a NBR 13279 (ABNT, 2005). A moldagem da argamassa foi realizada em duas camadas com a aplicação de 30 golpes cada, na mesa de adensamento.

Os ensaios empregados na caracterização das argamassas foram realizados 28 dias após sua moldagem. Os ensaios empregues, a norma utilizada na execução e, a quantidade de corpos de prova estão disponíveis no Quadro 3.7.

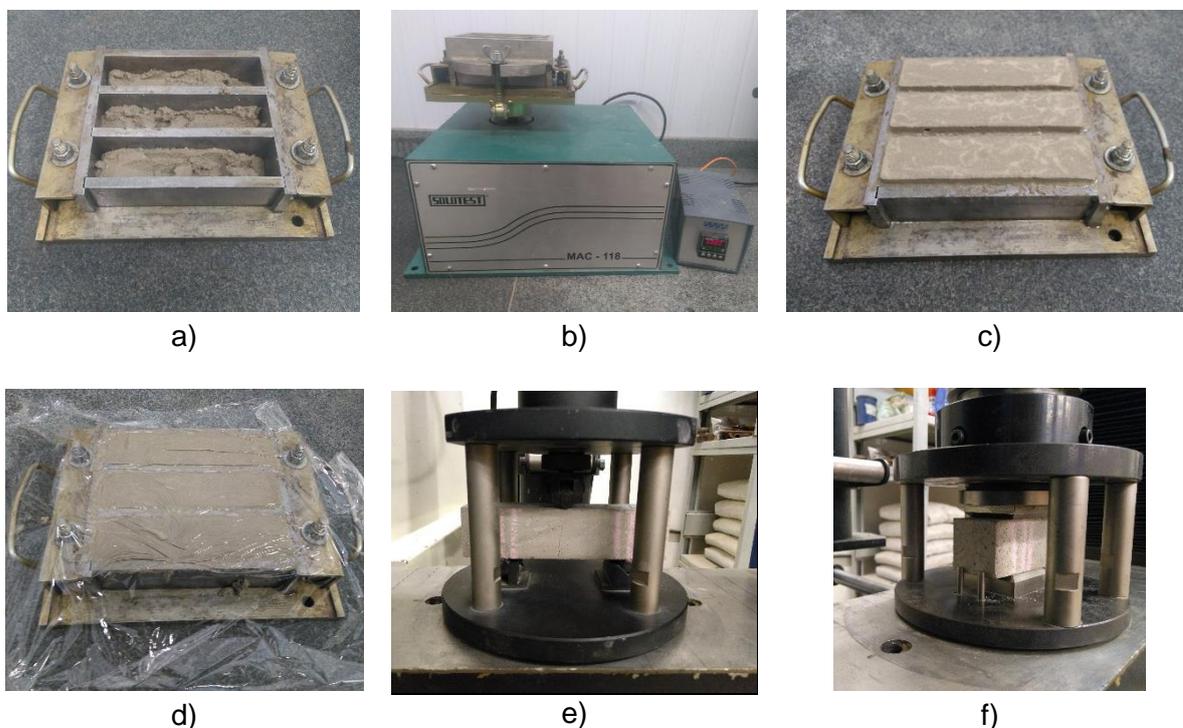
Quadro 3.7 - Ensaio de caracterização da argamassa

Ensaio	Norma	Nº de repetições
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	3
Resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	6

Fonte: Autor (2019).

Na Figura 3.21 estão demonstradas as imagens das etapas dos ensaios de caracterização das argamassas.

Figura 3.21 - Ensaio de caracterização argamassa



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Moldagem da argamassa; b) Máquina de adensamento; c) Argamassa moldada; d) Cobertura plástica para evitar perda de água; e) Tração na flexão; f) Compressão.

3.1.5 PRISMAS

Para caracterização dos materiais utilizados e verificação do desempenho potencial destes quando empregados em alvenaria estrutural, foram construídos prismas de dois blocos. Para cada um dos 5 tipos de blocos cerâmicos utilizados, foram moldados 6 prismas ocos e, também, mais 6 prismas cheios para cada tipo de graute (15 e 30 MPa). Os prismas dos blocos de parede maciça (tipos BM7, BM16 e BM4) foram assentados com argamassa de resistência à compressão nominal de 14 MPa, enquanto que, os dos blocos de parede vazada (tipos BV0 e BV10) foram assentados com argamassa de 8 MPa.

O número de prismas confeccionados para realização dos ensaios pode ser melhor compreendido observando-se o Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Prismas montados

Nº de prismas	Tipo de bloco	Resistência à compressão da argamassa de assentamento	Graute utilizado
6	BM7	14 MPa	Oco
6			15 MPa
6			30 MPa
6	BM16	14 MPa	Oco
6			15 MPa
6			30 MPa
6	BM4	14 MPa	Oco
6			15 MPa
6			30 MPa
6	BV0	8 MPa	Oco
6			15 MPa
6			30 MPa
6	BV10	8 MPa	Oco
6			15 MPa
6			30 MPa

Fonte: Autor (2019).

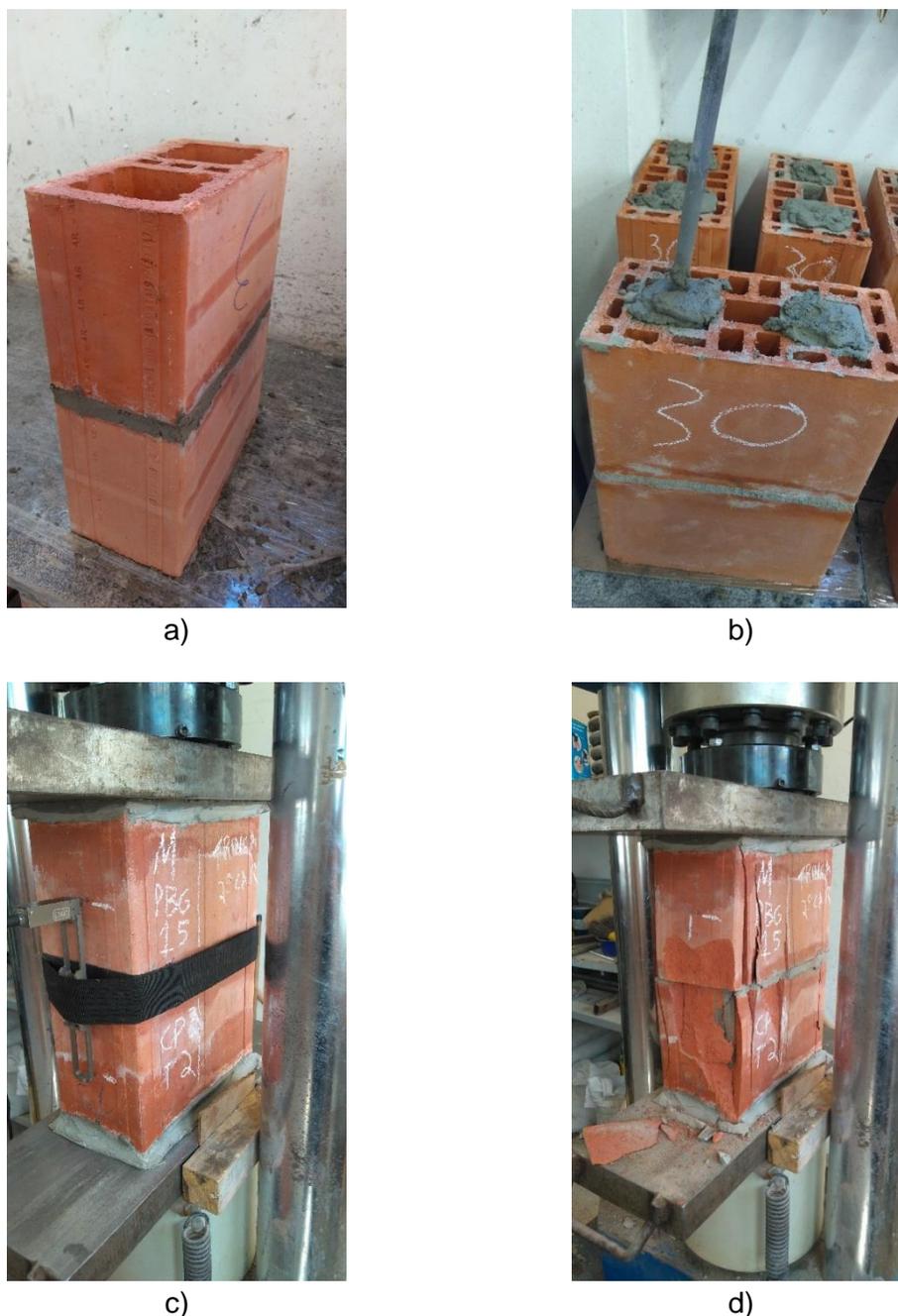
A execução do ensaio seguiu a seguinte ordem: Umedecimento da face superior do 1º bloco e aplicação da argamassa de assentamento; posicionamento do segundo bloco sobre o primeiro bloco (já argamassado); centralização e nivelamento de ambos os blocos, de modo a ficar um conjunto retilíneo, dotado de uma junta de argamassa de aproximadamente 10 mm de espessura.

O grauteamento dos prismas ocorreu após 24 horas de seu assentamento. O processo seguiu a seguinte ordem: Umedecimento interno das aberturas (células) dos blocos com broxa ou pisseta; preenchimento do graute no orifício umedecido do prisma; aplicação de 25 golpes com haste de adensamento de 16 mm de diâmetro; espera de 5 minutos; aplicação de mais graute no orifício do bloco, caso tivesse altura inferior à superfície do bloco; realização do readensamento, com aplicação de mais 25 golpes com a haste de adensamento; nivelamento

da superfície de graute com a superfície do bloco, com colher de pedreiro; aplicação de plástico para evitar perda de água do graute para o ar.

A ruptura dos prismas ocios, foi realizada após um período de 28 dias destinado à cura da argamassa de assentamento. Já para os prismas cheios, que foram grauteados após 24 horas da realização de seu assentamento, foi aguardado o período mínimo de 28 dias destinado à cura do graute, antes de iniciar a sua ruptura. A montagem, grauteamento e ruptura dos prismas podem ser visualizados na Figura 3.22.

Figura 3.22 - Ensaio Prismas

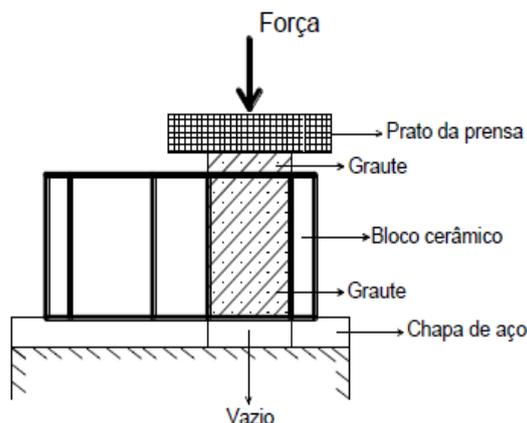


Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Assentamento dos blocos; b) Grauteamento; c) Posicionamento do bloco na prensa; d) rompimento.

3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ENSAIO DE EMPURRAMENTO (PUSH-OUT)

Na segunda etapa da pesquisa, a aderência entre os diferentes tipos de blocos e grautes foi determinada através do ensaio de empurramento (*push-out*). O esquema de ensaio será semelhante ao utilizado por Izquierdo (2015), que pode ser observado na Figura 3.23.

Figura 3.23 – Ensaio de Empurramento (*push-out*)



Fonte: Izquierdo (2015), p. 185.

No ensaio de empurramento, foi verificada qual a influência proporcionada pelas diferentes propriedades dos materiais, obtidas através dos ensaios de caracterização realizados na primeira etapa do programa experimental, na resistência de aderência entre blocos e grautes.

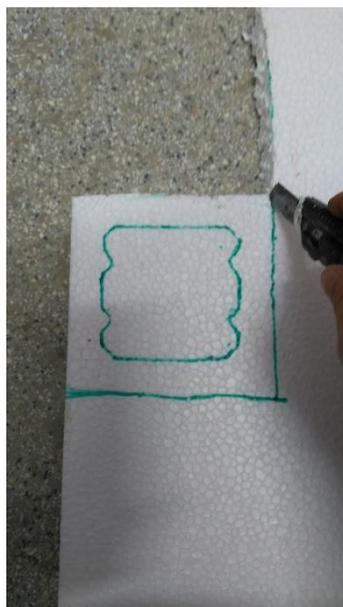
Este ensaio é responsável por fornecer qual a tensão necessária para remover o graute do interior de cada tipo de bloco cerâmico, ou seja, a resistência de aderência de cada tipo de bloco. O valor da resistência de aderência é dado pela divisão da carga necessária para remoção do graute do interior dos blocos cerâmicos, pela área de contato entre graute e bloco. Esse ensaio submete a interface entre bloco e graute à tensões de cisalhamento, em que as forças são aplicadas no graute e as reações ocorrem no bloco.

Para ser possível realizar a extração do graute do interior do bloco cerâmico, foi recortada uma placa de isopor com, aproximadamente, 30 mm de espessura e dimensões semelhantes à do furo do bloco que será grauteado. Essa placa de isopor foi colada junto ao buraco do bloco, possibilitando a moldagem do graute em sobressalto, permitindo a aplicação de carga no mesmo, para sua extração do bloco. O processo de corte do isopor pode ser verificado na Figura 3.24, e o isopor colado no bloco pode ser visualizado na Figura 3.25.

Figura 3.24 - Corte do isopor



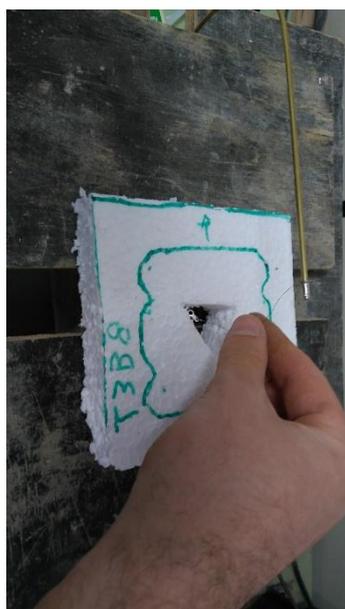
a)



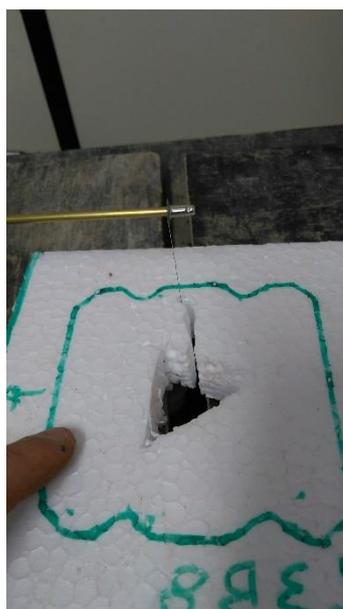
b)



c)



d)



e)



f)

Fonte: Autor (2018). Legenda: a) delimitação do local de corte do isopor; b) recorte de uma placa de isopor; c) realização de furo na parte central da placa; d) passagem de fio pelo furo feito; e) realização do corte do isopor com fio aquecido; f) remoção e descarte da parte interna do isopor.

Figura 3.25 - Isopor colado na superfície dos blocos para grauteamento

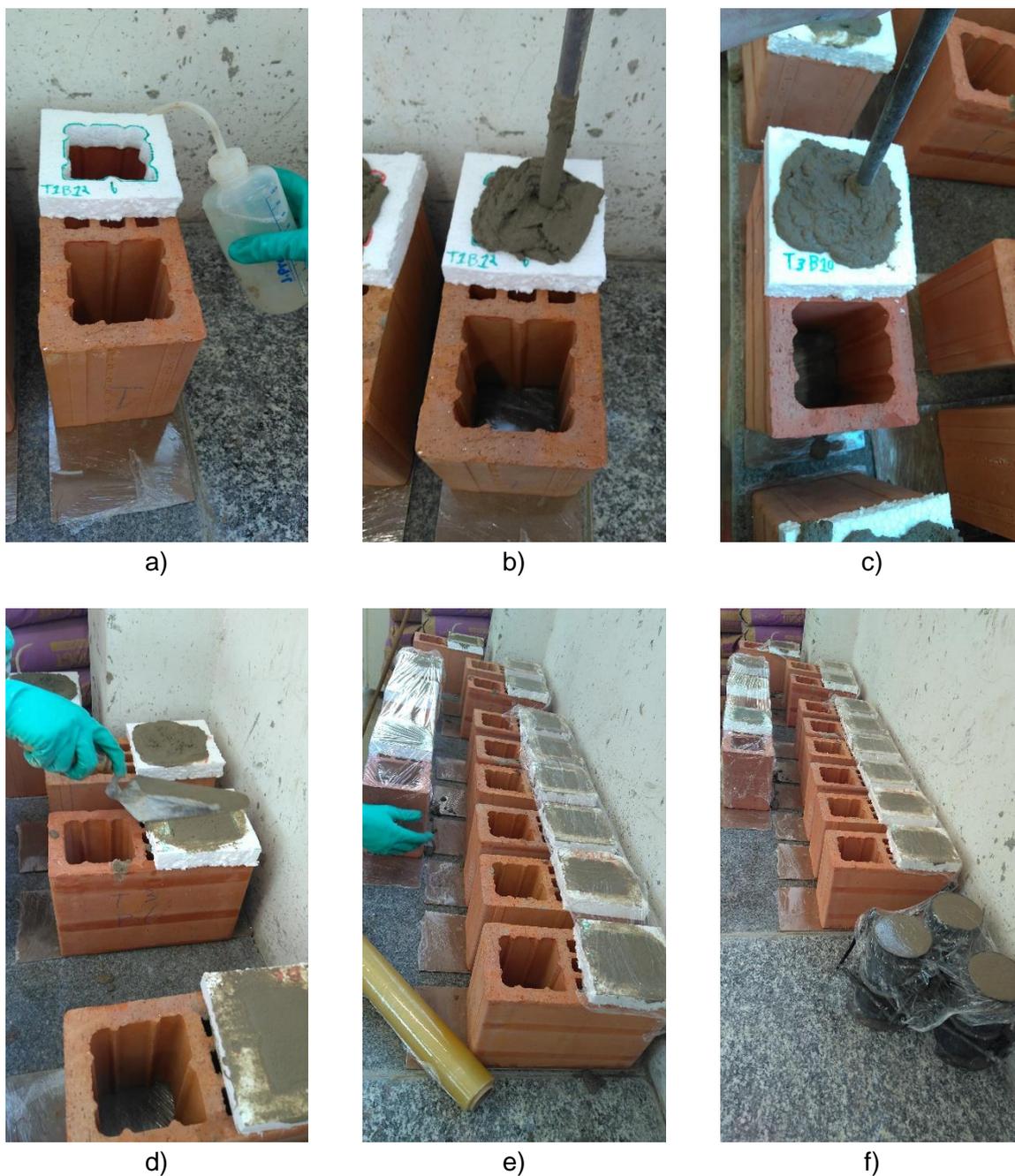


Fonte: Autor (2019).

Após serem coladas as placas de isopor nos blocos, com a utilização de silicone, os blocos foram posicionados nas bancadas para realização do grauteamento. Nessa etapa, os orifícios dos blocos foram previamente umedecidos com água antes de receber o graute. Em seguida, realizava-se o enchimento do orifício do bloco com graute, em uma única camada, e aplicava-se o adensamento do mesmo com a aplicação de 25 golpes com uma haste de metal de 16 mm de diâmetro. Após o término do adensamento, aguardava-se, aproximadamente, 5 minutos e realizava-se o readensamento do graute, com o mesmo número de golpes aplicados na etapa anterior. Essa alternativa do readensamento foi utilizada para evitar a formação de vazios e proporcionar uma melhor distribuição do graute no interior da célula do bloco, visando proporcionar melhor aderência.

Encerrada a etapa de adensamento, a superfície grauteada era regularizada com o auxílio de uma colher de pedreiro, deixando sua superfície nivelada com a parte superior do isopor. Terminada a regularização, os orifícios grauteados eram cobertos com um plástico para evitar a perda de água para o ambiente e, a formação de fissuras por retração. Essas etapas de grauteamento dos blocos para o ensaio de empurramento podem ser conferidas na Figura 3.26.

Figura 3.26 - Grauteamento dos blocos para ensaio de empurramento



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Umedecimento das paredes internas do bloco; b) adensamento do graute; c) Readensamento do graute; d) Regularização da superfície do graute; e) Plástico para evitar perda excessiva de água; f) corpos de prova utilizados para verificar resistência do graute.

Para a realização do ensaio de empurramento, o isopor é retirado, deixando-se apenas o graute em ressalto na superfície do bloco. Após, 28 dias de cura do graute no interior de cada bloco cerâmico, foi realizado o ensaio de empurramento (Push-out).

Nessa data, o material é colocado em uma prensa que aplica uma carga sobre o graute, no sentido de expulsá-lo do interior do bloco que se encontra apoiado sobre uma

chapa metálica vazada. Caso ocorra o deslizamento do graute no interior do bloco, essa chapa vazada que sustenta o bloco, possibilita a passagem do material de enchimento.

Para a realização dos ensaios de empurramento foram empregados 6 corpos de prova para cada combinação de tipo de bloco cerâmico e graute. Nesse caso, são 5 tipos de blocos cerâmicos e 2 tipos de grautes utilizados, resultando em um total de 60 corpos de prova ensaiados.

O procedimento de montagem do ensaio pode ser visualizado na Figura 3.27. O procedimento se inicia com a fixação dos suportes para LVDT presos ao bloco, e, da base de leitura fixada na parte inferior do graute (Figura 3.27-a). Na Figura 3.27-b pode ser visualizada a base de aço empregada nos ensaios de empurramento para apoiar os blocos com parede maciça. Em seguida, posiciona-se um forro pacote sobre a base de ensaio e coloca-se o corpo de prova sobre o mesmo (Figura 3.27-c e Figura 3.27-d).

Posteriormente, as bases de leitura dos LVDTs foram parafusadas no suporte colado no graute (Figura 3.27-e, Figura 3.27-f e Figura 3.27-g). Em seguida, o conjunto montado foi encaminhado para a prensa e instrumentado com a utilização de 3 LVDTs em cada lado do bloco (Figura 3.27-h e Figura 3.27-i). Um desses LVDTs foi fixado ao bloco com seu cursor apoiado na placa fixada na parte inferior do graute. Seu resultado foi utilizado para medir o deslizamento do graute em relação ao bloco. O segundo LVDT foi fixado fora da prensa, para detectar variações na medição captada na placa fixada na parte inferior do graute. O terceiro LVDT foi fixado em uma base fora da prensa e seu ponteiro ligado à parte lateral do bloco, visando detectar se ocorre deformação das paredes do bloco no decorrer do ensaio.

Figura 3.27 - Procedimento de preparação dos corpos de prova para ensaio Push-out



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)

Fonte: Autor (2019).

3.2.1 RETRAÇÃO DO GRAUTE NO INTERIOR DOS BLOCOS

Antes da realização do ensaio de empurramento, foi observado em alguns corpos de prova a formação de fissuras marcando a interface entre bloco e graute. Em alguns tipos de bloco essa formação de fissura era bem nítida, sendo facilmente identificada na parte inferior dos corpos de prova empregues no ensaio de empurramento. Em outros tipos de bloco essa fissura não aparecia, ou não era tão nítida, sendo percebida somente em pequenos trechos da interface, principalmente, na parte superior dos corpos de prova de empurramento.

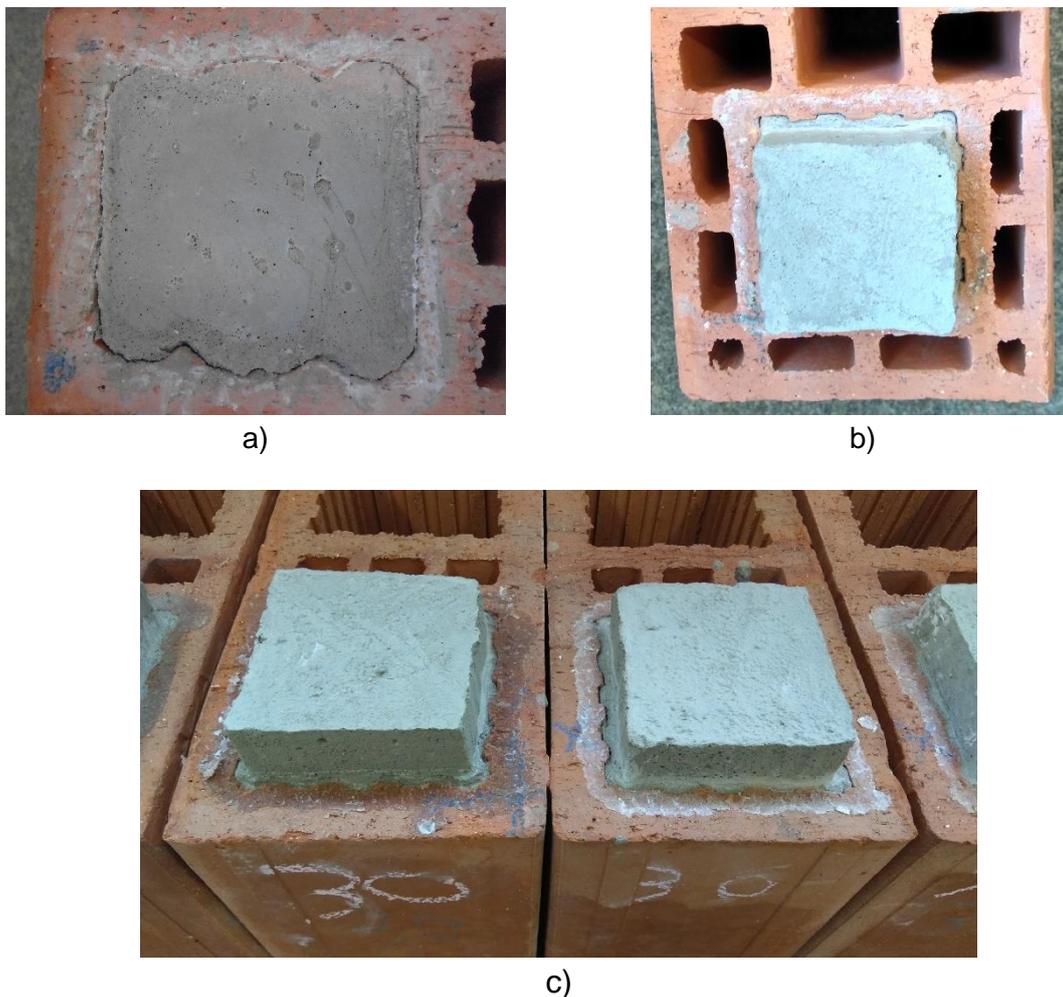
A formação dessas fissuras se mostrou com maior frequência e intensidade, geralmente, para os corpos de prova dotados de graute 30 MPa.

Na Figura 3.28 estão demonstrados alguns exemplos das fissuras identificadas nos corpos de prova antes do ensaio de empurramento.

Como pode ser observado na Figura 3.28-c, a formação das fissuras não ocorreu em todos os corpos de prova, comparando-se o bloco da direita com o da esquerda.

O aparecimento destas fissuras fez surgir dúvidas a respeito da influência destas fissuras na aderência das amostras no ensaio de empurramento e se a sua formação era somente na parte superficial da interface entre blocos e grautes, ou, se ocorria também no interior dos blocos.

Figura 3.28 - Formação de fissura na interface bloco/graute nos corpos de prova do empurramento



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) marca de descolamento do graute devido à retração no bloco tipo BM4 (parte inferior do corpo de prova); b) sinais de descolamento do graute na parte superior do bloco tipo BV10; c) comparação de corpos de prova com bloco tipo BM16.

Para sanar essas dúvidas a respeito da retração apresentada em cada tipo de bloco e para cada tipo de graute, optou-se pela realização do grauteamento de 10 blocos, para que fosse possível, após 28 dias de cura do graute no interior dos blocos, realizar o corte na meia altura destes exemplares, e verificar a formação de fissuras internas.

Nesse procedimento, 2 blocos de cada um dos 5 tipos foram utilizados. Cada bloco teve um de seus vazados preenchido com graute 15 MPa e outro com graute 30 MPa. Dessa forma, foi possível realizar a observação das fissuras internas de 2 exemplares de cada combinação de tipo de bloco e graute utilizados na pesquisa.

O procedimento de grauteamento dos blocos foi idêntico ao empregado no ensaio de empurramento, entretanto, sem a aplicação de ressalto nos blocos, sendo o graute nivelado na mesma altura dos blocos. Durante a cura, esses corpos de prova ficaram em condições de ambiente de laboratório, assim como no caso dos corpos de prova do empurramento.

O corte dos blocos foi realizado com serra diamantada na poli-corte, procurando a obtenção de uma superfície regular, para facilitar a análise da superfície.

A superfície interna cortada dos blocos foi fotografada na presença de uma régua que serve de escala, com o objetivo de identificar as fissuras, possibilitando, posteriormente, seu delineamento e medição no programa AutoCAD.

Com o uso deste programa, foram retiradas informações sobre o comprimento das fissuras e sua área aproximada. Além disso, também foram delineados e medidos o perímetro e área transversal do orifício de cada bloco (região de interface), permitindo uma comparação percentual entre o comprimento das fissuras e o comprimento do perímetro do orifício do bloco, bem como, da área aproximada das fissuras e da área transversal do orifício que estava ocupada pelo graute.

Com a determinação do perímetro do orifício dos blocos é possível conhecer a área e perímetro iniciais ou totais ocupados pelo graute antes de sofrer retração. Dessa forma, após a cura e retração do graute, é possível verificar o comprimento do perímetro em que o graute já não está mais em contato com o graute, e a área de abertura de fissuras no enchimento.

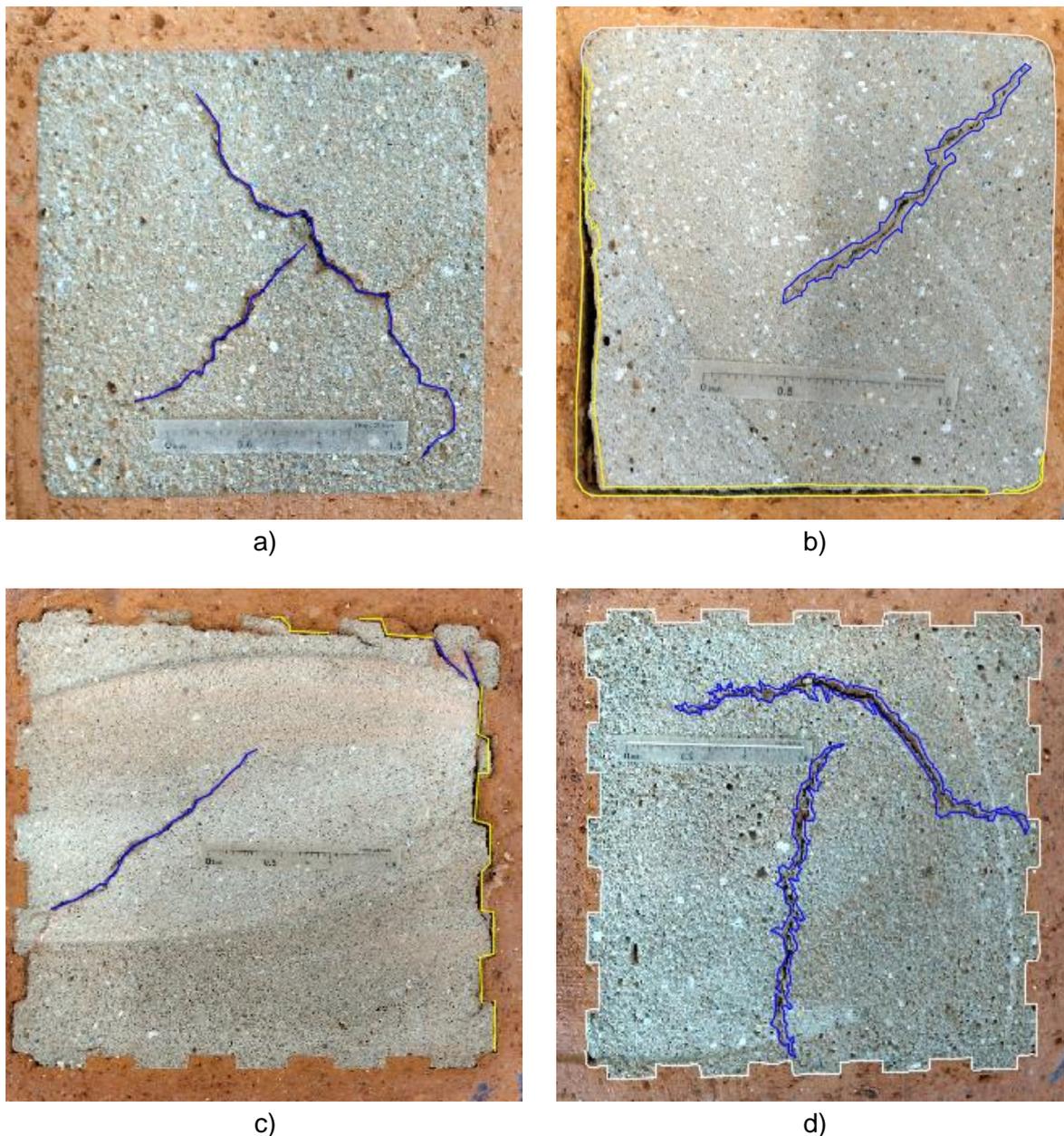
Como as fissuras podem ocorrer em duas diferentes formas no interior desses corpos de prova, no graute, ou, na interface entre bloco e graute, seus resultados foram analisados de forma separada e em conjunto, para contribuir na avaliação do processo de fissuração que ocorre no interior dessas amostras e seus possíveis efeitos na aderência entre os materiais. Além disso, torna-se possível obter maior compreensão dos efeitos da retração no interior dos blocos cerâmicos.

Na Figura 3.29, podem ser visualizadas as linhas utilizadas na demarcação das fissuras e no cálculo de sua área e comprimento.

As linhas utilizadas para medir o comprimento da fissura percorrem aproximadamente a região central da fissura em toda sua extensão. As linhas utilizadas para demarcar a área da fissura circundam a fissura e suas falhas provocadas no entorno, tais como desníveis no graute.

A medida do comprimento das fissuras existentes na interface entre bloco e graute é importante, pois proporciona conhecimento sobre o comprimento de perímetro do bloco que deixa de estar em contato com o graute (C.p.).

Figura 3.29 - Linhas usadas para demarcar as fissuras e calcular seu comprimento e área



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Linhas azuis marcando o comprimento da fissura no graute (BV0-G15); b) Linhas azuis marcando área aproximada da fissura no graute e amarelas na interface (BV0-G30); c) Linhas azuis marcando comprimento de fissuras no graute e amarelas, na interface (BM16-G30); d) Linhas azuis marcando a área da fissura no graute (BM16-G15); Linhas brancas marcam a área e perímetro do orifício do bloco.

A retração do material de enchimento pode provocar o descolamento do mesmo das paredes dos blocos, ou formar fissuras na interface de contato, reduzindo a área efetiva em que os dois materiais estarão unidos. Essa redução na área de contato pode interferir na capacidade que os materiais possuem de transmitir tensões e deformações, podendo comprometer seu desempenho conjunto.

A retração apresentada pelo material de enchimento dentro dos blocos cerâmicos será dependente das propriedades físicas e químicas do material de enchimento, mas também, do tipo de bloco que as contém. Características como a absorção dos blocos, rugosidade da superfície e geometria das células, podem ter papel preponderante na retração do enchimento.

Dessa forma, como a tensão de aderência está relacionada com a área de contato apresentada por bloco e graute, é de se supor, que a perda de contato provocada pela retração do enchimento pode afetar os resultados encontrados. Nesse sentido, ao medir o comprimento do perímetro dos blocos que deixa de estar em contato com o graute devido à retração, é possível calcular a área aproximada de perda de contato (A. P. C.), multiplicando-se o valor obtido pela altura nominal dos blocos. Essa área é calculada conforme a equação 3.7.

$$A.P.C. = C.p. \times H \quad (3.7)$$

Sendo,

A.P.C., a área de contato perdida entre bloco e graute devido à retração, em cm²;

C.p., o comprimento de perímetro da abertura do bloco que não está mais unido ao graute, em cm;

H, é a altura nominal dos blocos, em cm, que para essa pesquisa foi de 19 cm.

Descobrendo-se a área de contato perdida, torna-se possível descobrir o valor percentual da área de contato perdida para cada tipo de bloco. Basta dividir a área de contato perdida pela área total da interface. A área total da interface corresponde a área da superfície de contato da abertura do bloco, que é oriunda da multiplicação do perímetro total da abertura, medido no autoCAD para cada tipo de bloco, pela altura nominal dos blocos.

As equações 3.8 e 3.9 para o cálculo percentual da perda de área de contato (P.P.C.) estão mostradas abaixo.

$$A.T.C. = P.t. \times H \quad (3.8)$$

$$P.P.C. = \left(\frac{A.P.C.}{A.T.C.} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

Sendo,

A.T.C., a área total de contato, medida no autoCAD, em cm²;

P.t., o perímetro total do orifício de determinado tipo de bloco, medido no autoCAD, em cm;

H, a altura nominal dos blocos, em cm, que para essa pesquisa foi de 19 cm;

P.P.C., o valor percentual de perda de área de contato;

A.P.C., a área de contato perdida entre bloco e graute, em cm².

Descobrimo-se o valor percentual da perda de contato para cada combinação de tipo de bloco e graute, torna-se possível corrigir as tensões máximas médias de aderência obtidas no ensaio de empurramento, para valores mais precisos, que desconsiderem o percentual de área perdida, na realização do cálculo da tensão de aderência.

Dessa forma, empregando-se as cargas médias máximas obtidas no ensaio de empurramento e, descontando-se os valores percentuais de perda de contato, da área de contato média de cada tipo de bloco, torna-se possível, obter a tensão de aderência corrigida (T.A.C). Para o cálculo da tensão de aderência corrigida é utilizada a equação 3.10.

$$T.A.C. = \frac{Q_{max}}{\left(A.C. - \frac{A.C. \times P.P.C.}{100}\right)} \quad (3.10)$$

Sendo,

T.A.C., a tensão de aderência corrigida, em MPa;

Q_{max}, a carga máxima média obtida no ensaio de empurramento, em kN;

A.C., a área de contato média de cada tipo de bloco no ensaio de empurramento, em cm²;

P.P.C., o valor percentual de perda de área de contato.

Com a utilização da área de contato corrigida pela retração, provavelmente, serão obtidos valores de tensão mais próximos aos que, verdadeiramente, estavam presentes no ensaio de empurramento, em cada tipo de bloco utilizado.

3.3 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (PULL-OUT)

Esse ensaio tem a característica de fornecer informações complementares sobre a aderência entre bloco e grautes, uma vez que permite considerar os efeitos do desalinhamento e desaprumo das fiadas na aderência de elementos de alvenaria. Essa

característica faz com que esse ensaio seja mais próximo da realidade de aplicação dos blocos cerâmicos em paredes.

Na terceira etapa desse programa experimental foram selecionados 3 tipos de bloco para realização do ensaio de arrancamento. Dois desses tipos de bloco, um de parede maciça e o outro de parede vazada, foram escolhidos por apresentarem os maiores valores de resistência de aderência no ensaio de empurramento. Por isso, foram selecionados o bloco do tipo BM16, que apresentou os maiores valores de aderência no ensaio Push-out dentre os blocos de parede maciça, e o bloco tipo BV10, que apresentou os maiores valores de aderência, dentre os blocos de parede vazada.

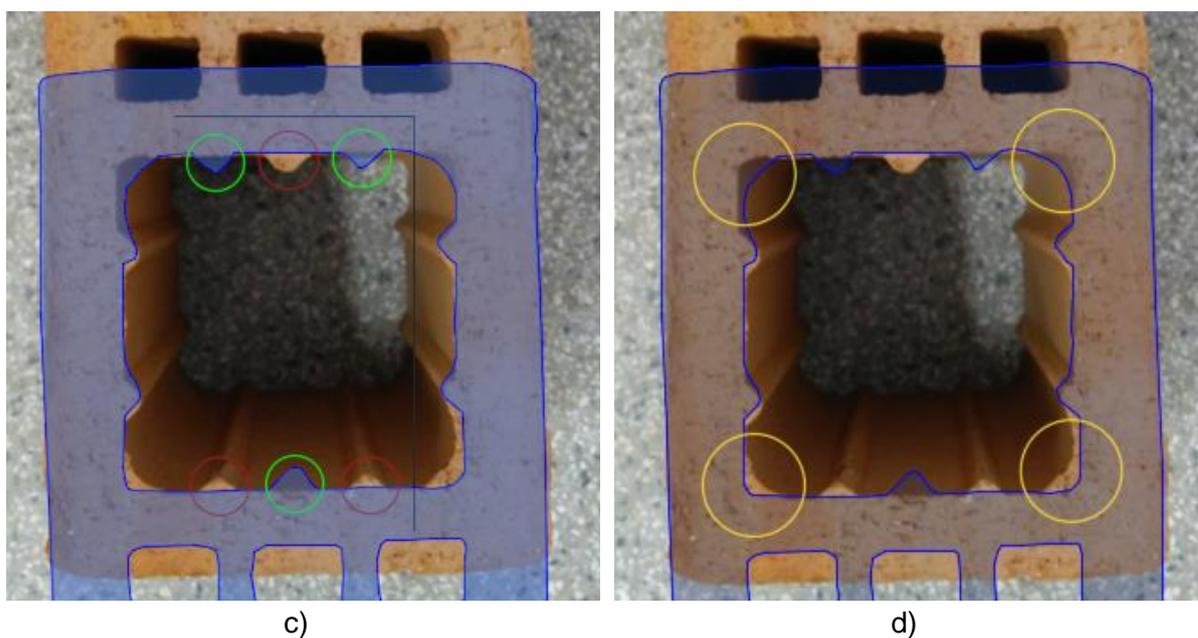
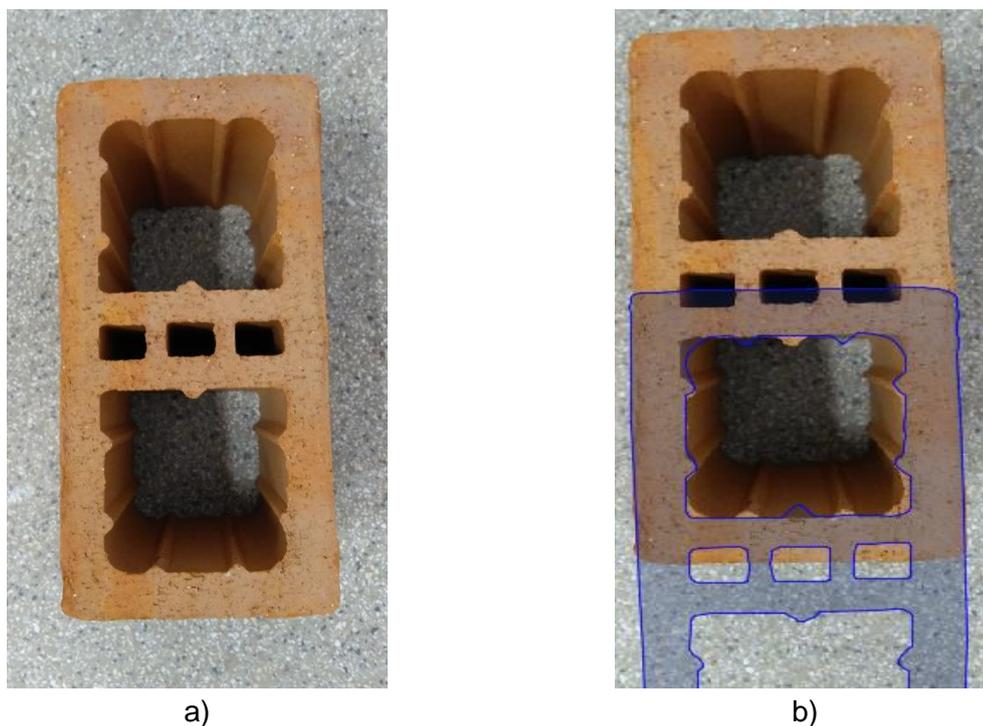
Por solicitação da ANICER, também foram ensaiados os blocos do tipo BM7, por apresentarem frisos que se alteram de posição entre as fiadas, proporcionando travamento mecânico junto ao graute. Além disso, os furos dos blocos possuem metade dos cantos arredondados e a outra metade reta, que ao se intercalarem na sobreposição de fiadas, formam dentes de graute entre as mesmas, atuando como chaves de cisalhamento, impedindo, ou restringindo a movimentação de grautes e blocos. Essas características dos blocos tipo BM7 podem ser melhor compreendidas na Figura 3.30.

Portanto, diante da possível capacidade de melhorar a aderência com o graute entre as fiadas, o bloco tipo BM7 também foi submetido aos ensaios de arrancamento. Dessa forma, nesta etapa da pesquisa foram empregados os blocos do tipo BM7, BM16 e BV10 para confecção das paredes utilizadas nos ensaios.

O ensaio de arrancamento consiste na remoção de uma barra de aço solidarizada a um conjunto de alvenaria pelo graute. Esse ensaio possui a característica de avaliar a aderência na região de interface entre a barra de aço e o graute, assim como, do graute ao bloco cerâmico.

Nesse estudo foi empregada uma barra de aço CA-50 com 16 mm de diâmetro da fabricante Arcelormital, para verificação da aderência do conjunto. As paredes utilizadas nesse procedimento foram assentadas com cinco fiadas de altura e 1 bloco e meio de largura. Dessa forma, torna-se possível posicionar a barra de aço na célula central da parede, fazendo com que os principais esforços atuantes sejam de tração direta, sem a influência de eventuais esforços de momento que surgiriam, caso a barra fosse ensaiada fora do centro da parede.

Figura 3.30 - Detalhes do bloco tipo BM7



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Bloco do tipo BM7; b) Projeção do assentamento da fiada superior sobre o bloco; c) Detalhe do travamento provocado pelo intercalamento de frisos nas fiadas; d) Detalhe da sobreposição dos cantos arredondados sobre os retos que formam os dentes no grauteamento.

Os blocos de parede maciça (tipo BM7 e BM16) foram assentados com argamassa de 14 MPa e o bloco de parede vazada (tipo BV10) foi assentado com argamassa de 8 MPa. Para garantir que não houvesse a fissuração dos blocos devido à alguma má distribuição de carga no ensaio, as duas células laterais da parede foram grauteadas com graute 30 MPa, aumentando a rigidez do conjunto.

Para cada combinação de tipo de bloco e graute foram moldadas 4 paredes. Ou seja, para cada tipo de bloco foram moldadas 8 paredes, sendo que, em 4 dessas foi utilizado graute de resistência 15 MPa para solidarizar o aço na célula central das mesmas e, nas outras 4 paredes, foi utilizado graute com resistência de 30 MPa para solidarizar o aço. O quadro abaixo pode auxiliar na compreensão dos corpos de prova utilizados.

Quadro 3.9 - Corpos de prova do arrancamento

Tipo de bloco	Parede do bloco	Tipo de graute	Argamassa de assentamento	Barra de aço	N° de CPs do Arrancamento (paredes)
BM7	Maciça	15 MPa	14 MPa	CA-50 (16 mm)	4
		30 MPa			4
BM16	Maciça	15 MPa	14 MPa	CA-50 (16 mm)	4
		30 MPa			4
BV10	Vazada	15 MPa	8 MPa	CA-50 (16 mm)	4
		30 MPa			4

Fonte: Autor (2019).

Como a barra de aço do fabricante Arcelormittal não era suficiente para a montagem das 4 paredes, umas das quatro paredes de cada amostra foi grauteada com aço do fabricante Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

Como foram feitas 8 paredes para cada tipo de bloco e existem 3 tipos de bloco, um total de 24 paredes foram empregadas nesse ensaio. Na Figura 3.31 podem ser vistas algumas imagens da montagem das paredes.

Alguns dias após as paredes terem sido construídas, iniciou-se o processo de grauteamento dos dois furos das extremidades das paredes, com graute 30 MPa. Quando este processo foi encerrado, iniciou-se o grauteamento da célula central das paredes, que contém a barra de aço. Os grautes empregados no enchimento da célula central, que contém a barra de aço, foram de 15 e 30 MPa. O processo de adensamento do enchimento foi idêntico ao utilizado no ensaio de empurramento, com a única diferença de ter sido utilizada uma barra de aço de 12,5 mm de diâmetro para a tarefa. A célula foi enchida até a parte superior com graute, então foram aplicados 25 golpes com a barra de aço mencionada. Após, aproximadamente 5 minutos, mais 25 golpes foram aplicados para readensar o graute, visando evitar a formação de vazios e aumentar a compactação do material. Terminado o adensamento, a superfície do orifício era regularizada com a colher de pedreiro e aplicava-se um plástico para evitar a perda de água.

Figura 3.31 - Assentamento dos blocos das paredes



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fonte: Autor (2019). Legenda: a) assentamento dos blocos; b) e c) posicionamento da argamassa; d) verificação do prumo; e) uso do martelo de borracha para corrigir assentamento; f) alinhamento das fiadas.

Na Figura 3.32 estão disponibilizadas imagens do processo de grauteamento das paredes.

Figura 3.32 - Grauteamento e adensamento das paredes



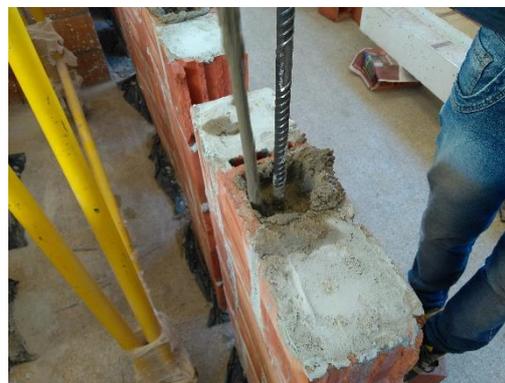
a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Cura da argamassa de assentamento; b) e c) enchimento das paredes; d) Adensamento do graute; e) regularização da superfície de graute; f) colocação de palstico para evitar perda excessiva de água no graute.

Após o período de 28 dias da cura das paredes, foi realizado o ensaio de arrancamento, com a utilização de um macaco hidráulico e uma bomba para aplicação dos esforços de tração. A carga aplicada foi medida com o auxílio de uma célula de carga, enquanto que as deformações do aço foram medidas pela fixação de um strain gage na armadura, logo acima da parede. Para verificar se ocorreu o deslizamento do aço, ou do graute, foram posicionados Lvdt's fixados externamente à parede, com o seu cursor em contato com o graute e com a armadura, tanto na parte superior, quanto inferior da parede.

Na Figura 3.33 podem ser visualizados algumas etapas do ensaio de arrancamento.

Figura 3.33 - Ensaio de Arrancamento



a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2019). Legenda: a) e b) parede montada para ensaio; c) detalhes dos lvdts inserido para medir o deslocamento do graute e do aço; d) detalhe do lvdt ligado à chapa colada sobre o graute

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas diferentes etapas dessa pesquisa. O capítulo inicia descrevendo os resultados encontrados na primeira etapa do programa experimental, relacionados à caracterização individual dos materiais empregados na pesquisa.

Posteriormente, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de empurramento, descrevendo e comparando as propriedades que podem ter influenciado na tensão de aderência obtida para cada combinação de bloco e graute avaliadas.

Por fim, são apresentados os resultados do arrancamento, descrevendo o comportamento observado nos materiais, os valores obtidos e sua comparação com os resultados obtidos com o ensaio de empurramento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesse item serão apresentadas as propriedades individuais de cada material.

4.1.1 BLOCOS CERÂMICOS

A seguir serão apresentadas as propriedades determinadas para cada tipo de bloco cerâmico.

4.1.1.1 Características geométricas dos blocos

As propriedades geométricas dos blocos foram determinadas por ensaios realizados em 13 unidades de alvenaria (blocos cerâmicos) isentos de defeitos aparentes. Nesse item estão demonstradas as seguintes características de cada tipo de bloco: Medidas das faces, espessura dos septos, espessura das paredes externas, desvio de esquadro e planeza das faces.

As medidas efetivas das faces contemplam as determinações da altura, largura e comprimento dos blocos cerâmicos. Os valores médios das medições realizadas em cada um dos 5 tipos de bloco cerâmico podem ser visualizados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Medidas das faces de cada tipo de bloco

Tipo de bloco	Característica geométrica	Média (mm)	D. Pad. (mm)	C. V. (%)
BM7	Largura	140,90	0,37	0,26
	Altura	187,98	0,92	0,49
	Comprimento	289,58	0,89	0,31
BM16	Largura	139,45	0,62	0,44
	Altura	187,73	0,92	0,49
	Comprimento	287,68	0,95	0,33
BM4	Largura	140,24	0,78	0,55
	Altura	187,40	1,09	0,58
	Comprimento	284,33	19,25	6,77
BV0	Largura	139,79	0,29	0,21
	Altura	188,00	0,64	0,34
	Comprimento	288,59	0,60	0,21
BV10	Largura	140,30	0,18	0,13
	Altura	189,73	0,67	0,35
	Comprimento	289,41	0,62	0,22

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.1, os valores obtidos apresentam baixa variação em relação à média, haja visto os valores reduzidos do coeficiente de variação.

No caso de todos os 5 tipos de blocos, a tolerância dimensional relacionada à média das dimensões efetivas não foi ultrapassada. Este valor é estabelecido em 3 mm para mais ou para menos, pela NBR 15270 (ABNT, 2017). Da mesma forma, para as medidas individuais, nenhuma das unidades de alvenaria ultrapassou a tolerância de 5 mm para mais ou para menos, definida pela mesma normativa supracitada.

Os valores obtidos com a determinação da espessura do septo e da parede externa de cada um dos 5 tipos de bloco cerâmico podem ser visualizados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Valores médios de espessura dos septos e paredes externas

Tipo de bloco	Característica geométrica	Média (mm)	D. Pad. (mm)	C. V. (%)
BM7	Espessura dos septos	13,74	2,79	20,30
	Espessura das paredes externas	22,25	0,65	2,91
BM16	Espessura dos septos	12,09	2,30	19,05
	Espessura das paredes externas	20,63	0,25	1,23
BM4	Espessura dos septos	12,08	2,21	18,28
	Espessura das paredes externas	21,07	0,32	1,53
BV0	Espessura dos septos	9,32	0,58	6,19
	Espessura das paredes externas	10,43	0,83	7,93
BV10	Espessura dos septos	9,31	0,34	3,63
	Espessura das paredes externas	10,11	0,55	5,41

Fonte: Autor (2019).

Conforme definido pela NBR 15270 (ABNT, 2017), para blocos estruturais de parede maciça, caso dos blocos tipo BM7, BM16 e BM4, a espessura mínima das paredes externas deve ser de 20 mm. Este valor é atingido pelos três tipos de bloco. Para os blocos de parede maciça, também é definido que a dimensão mínima para os septos deve ser de 8 mm, valor que é atendido pelos 3 tipos de bloco.

A mesma normativa ainda define que para os blocos estruturais de paredes vazadas, caso dos blocos tipo BV0 e BV10, a espessura das paredes externas deve ser de, pelo menos, 8 mm – valor atingido para os dois tipos de bloco. Já para a espessura mínima dos septos, é estabelecido pela norma o valor mínimo de 7 mm, que também é respeitado para ambos os tipos de bloco.

Os valores médios das medições realizadas nos 5 tipos de bloco cerâmico podem ser visualizados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Valores médios do desvio de esquadro e planeza das faces

Tipo de bloco	Característica geométrica	Média (mm)	D. Pad. (mm)	C. V. (%)
BM7	Desvio de esquadro (d)	1,47	0,78	53,17
	Planeza das faces (f)	1,86	1,20	64,71
BM16	Desvio de esquadro (d)	1,64	0,63	38,79
	Planeza das faces (f)	2,23	0,74	32,93
BM4	Desvio de esquadro (d)	1,55	0,79	51,04
	Planeza das faces (f)	1,90	0,70	37,01
BV0	Desvio de esquadro (d)	1,19	0,66	55,31
	Planeza das faces (f)	1,70	0,92	53,81
BV10	Desvio de esquadro (d)	1,50	1,03	68,91
	Planeza das faces (f)	1,73	1,01	58,50

Fonte: Autor (2019).

A NBR 15270 (ABNT, 2017) define que o valor máximo do desvio de esquadro e da planeza das faces deva ser de 3 mm. No caso dos blocos, todos os tipos de bloco atenderam a esse requisito, pois não mais que 2 blocos de casa tipo excederam esse valor, não sendo necessário desconsiderar a amostra.

4.1.1.1.1 Dimensões das células dos blocos

No Quadro 4.4 podem ser conferidos os valores médios de área transversal e perímetro determinados para cada tipo de bloco cerâmico.

Quadro 4.4 - Perímetro e área transversal de cada tipo de bloco

Tipo de bloco	Perímetro médio (cm)	D. Pad. (cm)	C. V. (%)	Área transversal média (cm ²)	D. Pad. (cm ²)	C. V. (%)
BM7	37,2	0,1	0,3	89,2	0,5	0,5
BM16	47,9	0,1	0,2	91,5	0,6	0,6
BM4	38,7	0,2	0,6	91,8	1,2	1,3
BV0	29,1	0,1	0,3	52,9	0,3	0,5
BV10	33,6	0,1	0,2	51,6	0,3	0,6

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.4, os valores de perímetro dos blocos tipo BM7 e BM4 são semelhantes entre si, mas bem inferiores aos apresentados pelo bloco tipo BM16, que possui maior quantidade de frisos. Para os blocos de parede vazada, o bloco tipo BV10 apresenta perímetro ligeiramente superior ao bloco tipo BV0, que possui parede lisa. Os valores da área transversal dos blocos de parede maciça apresentam pouca diferença de um tipo para outro. O mesmo ocorre para os blocos de parede vazada.

Quando comparados os valores apresentados pelos blocos de parede maciça em relação aos de parede vazada, verificam-se valores de 1,3 e 1,8 vezes maior, respectivamente, para área transversal e perímetro apresentados pelos blocos de parede maciça.

No Quadro 4.5, pode ser visualizada uma comparação entre os valores de área de contato apresentados por cada tipo de bloco, com e sem a presença do acréscimo de área provocado pela presença dos frisos.

Quadro 4.5 - Valores de área de contato com e sem a presença dos frisos

Tipo de bloco	Área de contato (cm ²)	D. Pad. (cm ²)	C. V. (%)	Área de contato sem frisos (cm ²)	D. Pad. (cm ²)	C. V. (%)
BM7	699	4,2	0,6	652	4,0	0,6
BM16	899	5,6	0,6	737	4,9	0,7
BM4	725	8,2	1,1	688	8,0	1,2
BV0	547	2,8	0,5	547	2,8	0,5
BV10	638	2,3	0,4	561	2,1	0,4

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser visto no Quadro 4.5, a área de contato apresentada pelo bloco tipo BM16 é visivelmente superior aos demais blocos de parede maciça. O mesmo ocorre para o bloco tipo BV10, que possui área significativamente superior ao bloco tipo BV0, para os blocos de parede maciça. Essa diferença entre os tipos de bloco com maior número de frisos, perante os demais, quando a área de contato referente aos frisos não é considerada, conforme pode ser visto nas colunas do lado direito do Quadro 4.5.

O bloco tipo BV0 não apresenta frisos, por isso, sua área de contato permanece igual em ambos os lados do quadro. Já, para os demais tipos de bloco, é possível observar uma redução na área de contato da ordem de 7, 18, 5 e 12%, respectivamente, para os blocos tipo BM7, BM16 e BM4 e BV10. Essa redução na área de contato é referente à presença dos frisos na célula dos blocos, que é considerada do lado esquerdo e, descontada do lado direito do quadro.

A diferença existente entre os valores obtidos por cada tipo de bloco, considerando a área de contato sem frisos, estão relacionados ao aumento das dimensões das células dos blocos. As células que apresentaram maior área de contato considerando a superfície lisa (sem presença de frisos), tendem a possuir maiores dimensões no orifício dos blocos, do que as que apresentam valores menores. Essa parcela avalia, isoladamente, o aumento da área de contato provocado pela variação das dimensões das células, enquanto que, a área de contato contendo frisos avalia, também, a influência dos frisos.

4.1.1.2 Área líquida e área bruta

No Quadro 4.6 podem ser visualizados os valores médios de área bruta e líquida determinados para os diferentes tipos de bloco, bem como a relação existente entre essas áreas.

Quadro 4.6 - Relação entre área líquida e área bruta dos blocos

Tipo de bloco	Área bruta (cm ²)	D. Pad. (cm ²)	C. V. (%)	Área líquida (cm ²)	D. Pad. (cm ²)	C. V. (%)
BM7	411	1,67	0,41	209	0,64	0,30
BM16	400	3,22	0,80	197	1,85	0,94
BM4	407	4,71	1,16	201	2,33	1,16
BV0	404	1,81	0,45	180	0,52	0,29
BV10	407	1,33	0,33	184	0,37	0,20

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.6, a área bruta dos blocos é semelhante, variando dos 400 cm² apresentados pelo bloco tipo BM16 até os 411 cm² apresentados pelo tipo BM7. Entretanto, com relação à área líquida, os resultados não são tão semelhantes, variando de 180 cm² apresentados pelo bloco tipo BV0, até 209 cm² apresentados pelo bloco tipo BM7.

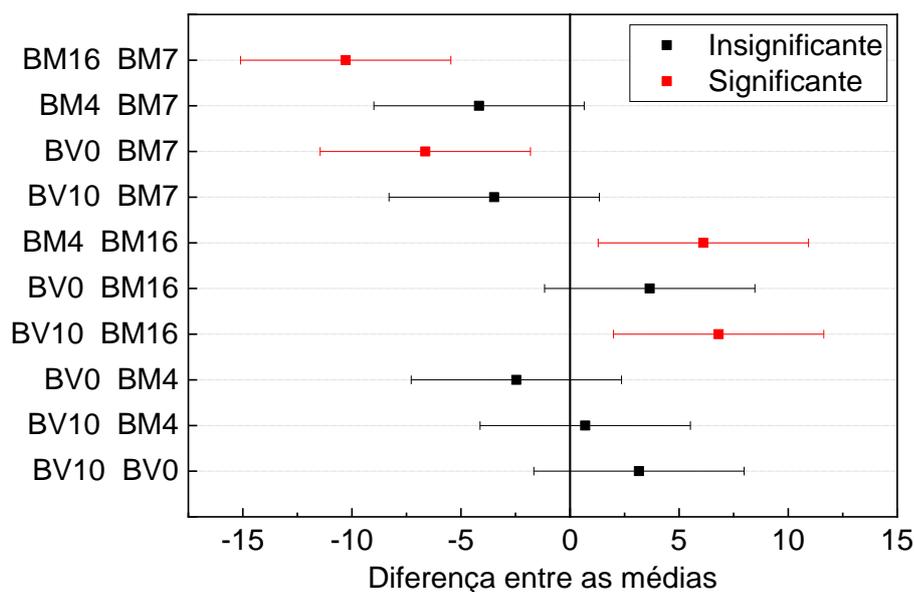
A área líquida apresentada pelos blocos de parede maciça é superior à apresentada pelos blocos de parede vazada. Isso indica a existência de uma maior quantidade de material por metro quadrado de área contribuindo para resistir aos esforços que forem solicitados. Dentre os blocos de parede maciça o maior valor de área líquida foi atingido pelo bloco tipo

BM7 e o menor pelo tipo BM16. Dentre os blocos de parede vazada, o bloco tipo BV10 apresentou área líquida superior.

Comparando-se os valores de área líquida e área bruta, verifica-se que o bloco tipo BM16 apresentava valor de área bruta inferior ao dos blocos tipo BV0 e BV10, entretanto, seu valor de área líquida ficou superior aos dois tipos de bloco. De forma semelhante, o bloco tipo BM4, que apresentou área bruta média equivalente à do bloco tipo BV10, apresentou aumento de área, quando analisando-se a área líquida. Esses resultados indicam que avaliar as propriedades dos blocos com relação à sua área líquida deva ser mais preciso.

A realização da análise de variância (ANOVA) dos valores médios de área bruta obtidos para cada tipo de bloco mostrou a existência de diferenças significativas entre os resultados. Dessa forma, foi realizado o teste Tukey para comparação das médias de cada tipo de bloco, utilizando um nível de confiança de 95%. Essa comparação de médias está exposta na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Comparação entre as médias da área bruta dos tipos de blocos



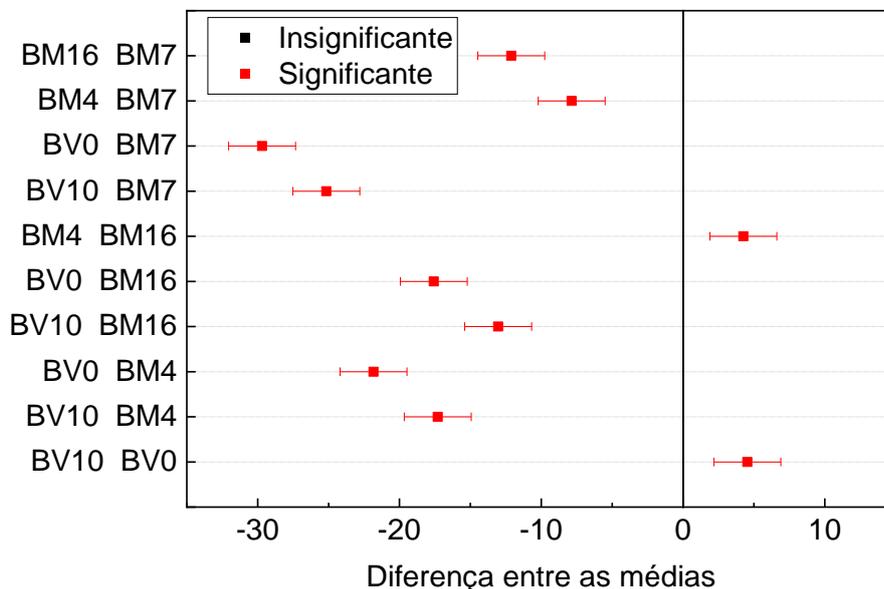
Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 4.1, em vermelho, algumas médias são consideradas diferentes, entretanto, o valor de diferença entre as médias é baixo, cerca de 3% para os casos mais discrepantes, não representando, provavelmente, grandes alterações nas dimensões dos blocos.

A realização da análise de variância (ANOVA) dos valores médios de área líquida obtidos para cada tipo de bloco constataram a existência de diferenças significativas entre os resultados. Dessa forma, foi realizado o teste Tukey para comparação das médias de cada

tipo de bloco, utilizando um nível de confiança de 95%. Essa comparação de médias está exposta na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Comparação entre as médias da área líquida dos tipos de blocos



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 4.2, nenhuma das médias foi considerada equivalente quando se considerando a área líquida dos blocos. Entretanto, ao se observar os valores no Quadro 4.6, percebe-se que as diferenças entre as médias, ao se comparar somente os blocos de parede maciça, são inferiores a 4% e, comparando-se somente os blocos de parede vazada, são inferiores a 3%.

Portanto, existem diferenças significativas ao se comparar blocos de parede maciça com parede vazada (até 14% de diferença), entretanto, entre os blocos de mesmo tipo de parede, a diferença é bem reduzida, devendo ter pouco impacto nos resultados.

Para a análise de variância executada isoladamente para os blocos tipo BM7 e BM16, assim como, BV0 e BV10, nos quais a resistência à compressão característica é semelhante, pelo menos, nas dimensões da área líquida, essas duas combinações de blocos não se mostraram semelhantes.

A média da relação existente entre a área líquida e a área bruta de cada tipo de bloco pode ser vista no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Relação entre área líquida e área bruta

Tipo de bloco	Área líquida / Área bruta (%)	D. Pad. (cm ²)	C. V. (%)
BM7	51,0	0,10	0,19
BM16	49,2	0,12	0,25
BM4	49,5	0,14	0,29
BV0	44,4	0,10	0,23
BV10	45,2	0,14	0,30

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.7, os valores da relação entre área líquida e área bruta foram, aproximadamente, 10% superiores para os blocos de parede maciça (BM7, BM16 e BM4), em relação aos de parede vazada (BV0 e BV10).

O bloco tipo BM7 é o que possui a maior relação de área, entretanto essa relação é pouco mais de um ponto percentual maior do que os demais blocos de parede maciça. Dentre os blocos de parede vazada, o que apresentou a maior relação foi o tipo BV10, porém com diferença inferior a 1 ponto percentual ao bloco tipo BV0.

4.1.1.3 Índice de absorção de água

Os Valores obtidos para o índice de absorção de água para cada tipo de bloco podem ser visualizados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Índice de absorção de água dos 5 tipos de bloco

Tipo de bloco	Massa seca média (g)	Massa saturada média (g)	Índice de absorção (%)	D. Pad. (%)	C. V. (%)
BM7	7617	8623	13,2	0,49	3,67
BM16	7285	8103	11,2	0,55	4,88
BM4	7390	8292	12,2	0,84	6,90
BV0	6594	7435	12,8	0,42	3,32
BV10	6709	7642	13,9	0,29	2,05

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.8, o índice de absorção apresentado pelos diferentes tipos de bloco é semelhante, devendo causar pouca interferência na aderência entre blocos e grautes.

A NBR 15270 (ABNT, 2017) define que o índice de absorção de água dos blocos cerâmicos deve ser igual ou superior a 8%, e não maior que 22%. Todos os tipos de bloco atenderam a estes limites, apresentando índice de absorção variando de 11 a 14%.

Com a realização da análise de variância entre os resultados de cada tipo de bloco, com um nível de confiança de 95%, é possível afirmar que existe diferença entre as amostras.

Entretanto, a diferença encontrada entre o menor e o maior valor é de apenas 3 pontos percentuais, ou seja, muito pequena.

4.1.1.4 Índice de absorção de água inicial (AAI)

No Quadro 4.9 encontram-se expostos os resultados do índice de absorção de água inicial (AAI) obtidos para cada tipo de bloco, em relação à sua área líquida e área bruta. Esse resultado pode ter influência na aderência pois determina a quantidade de água absorvida pelo bloco em 1 minuto, indicando como será sua relação quando entrar em contato com o graute. Provavelmente, caso a absorção inicial seja elevada, seja interessante utilizar grautes com uma capacidade de retenção de água maior, evitando que parte da água seja perdida, prejudicando as reações de hidratação.

Quadro 4.9 – AAI realizado na área líquida e bruta

Tipo de bloco	AAI (área bruta) ((g/193,55cm ²)/min)	D. Pad.	C. V. (%)	AAI (área líquida) ((g/193,55cm ²)/min)	D. Pad.	C. V. (%)
BM7	16,5	1,02	6,18	32,4	2,01	6,20
BM16	16,3	1,62	9,92	33,2	3,25	9,77
BM4	14,8	1,58	10,71	29,8	3,24	10,86
BV0	14,4	0,54	3,73	32,3	1,21	3,73
BV10	18,3	1,04	5,70	40,5	2,29	5,65

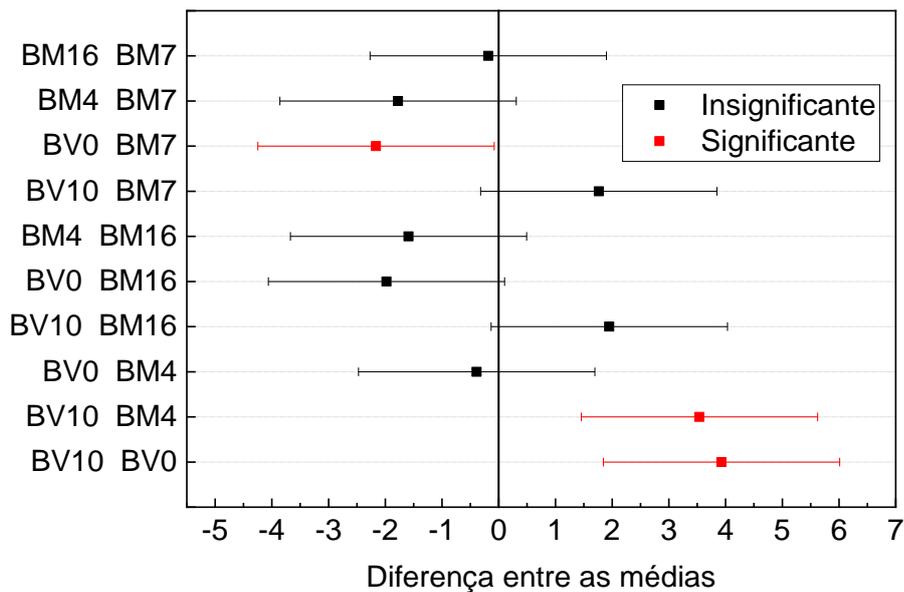
Fonte: Autor (2019).

Observando-se os resultados obtidos tanto na área líquida, quanto na área bruta dos blocos, é possível identificar a semelhança existente entre os blocos tipo BM7 e BM16, indicando que haverá pouca influência desta propriedade na avaliação da aderência com o graute, para estes tipos de bloco.

O bloco tipo BM4 apresentou a menor absorção inicial dentre os blocos de parede maciça, e o tipo BV0 apresentou a menor absorção entre os blocos de parede vazada. Existe uma diferença considerável entre os valores de absorção inicial dos tipos de bloco BV0 e BV10, de parede vazada, sendo a absorção inicial do primeiro cerca de 20% inferior à do segundo.

Após a realização da análise de variância de um fator para os resultados de AAI obtidos por cada tipo de bloco, ficou constatada a existência de diferenças significativas entre os tipos de bloco, tanto na área líquida, quanto na área bruta. Dessa forma, foi empregado o teste Tukey para comparar se as médias de cada tipo de bloco podem ser consideradas equivalentes, ou não, para um nível de confiança de 95%. A comparação das médias de AAI na área bruta e líquida pode ser visualizada na Figura 4.3 e Figura 4.4, respectivamente.

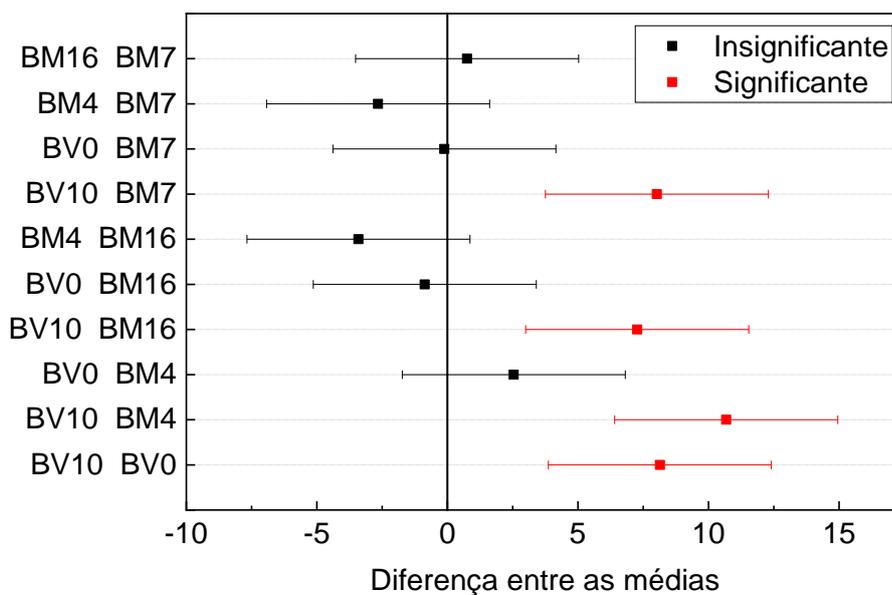
Figura 4.3 – Comparação entre médias da AAI na área bruta



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 4.3, em geral, as amostras apresentaram valores semelhantes de absorção inicial, entretanto, as comparações em vermelho demonstram a existência de diferença significativa entre os tipos de bloco. O bloco tipo BV10 apresentou diferenças com os tipos BM4 e BV0, e o bloco tipo BM7 apresentou diferença significativa com o BV0.

Figura 4.4 - Comparação entre médias da AAI na área líquida



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 4.4, em geral, as médias da AAI na área líquida tendem a ser semelhante para a maioria dos tipos de bloco. Entretanto, o bloco tipo BV10 não

apresentou média semelhante, para um nível de confiança de 95%, com nem um dos outros tipos de bloco. Outra observação importante é que, para a absorção inicial na área líquida, diferentemente da absorção inicial para a área bruta, a média dos blocos tipo BM7 e BV0 não apresentaram diferença significativa.

Como a NBR 15270 (ABNT, 2017) permite a realização do ensaio de absorção inicial nas duas faces de assentamento de um mesmo bloco, no Quadro 4.10 estão apresentados os resultados do AAI obtidos na face oposta dos blocos, que foram realizados logo após o término do ensaio da primeira face, cujos resultados foram expostos no quadro anterior.

Quadro 4.10 - AAI realizado na área líquida e bruta (segunda face do bloco)

Tipo de bloco	AAI (área bruta) ((g/193,55cm ²)/min)	D. Pad.	C. V. (%)	AAI (área líquida) ((g/193,55cm ²)/min)	D. Pad.	C. V. (%)
BM7	15,9	1,09	6,81	31,3	2,12	6,78
BM16	14,9	1,43	9,61	30,2	2,85	9,45
BM4	13,5	2,04	15,11	27,3	4,14	15,16
BV0	13,7	0,83	6,10	30,8	1,86	6,05
BV10	16,6	1,09	6,55	36,6	2,35	6,42

Fonte: Autor (2019).

De maneira geral, os resultados obtidos na segunda face do bloco ficaram um pouco inferiores aos obtidos na primeira. Entretanto, as relações entre os resultados de cada tipo de bloco permanecem semelhantes. Os blocos do tipo BM4 continuaram apresentando os valores mais baixos de absorção inicial dentre os blocos de parede maciça e, os blocos do tipo BV0, continuaram apresentando os valores AAI mais baixos dentre os blocos de parede vazada. Os blocos do tipo BV0 apresentaram AAI cerca de 16% inferior ao BV10, valor semelhante aos demonstrado no Quadro 4.9.

4.1.1.5 Rugosidade

Um dos fatores que pode influenciar na capacidade de aderência entre os blocos cerâmicos e grautes é a rugosidade apresentada pelas paredes dos blocos. Quanto maior a rugosidade dos blocos, aumenta-se a área de contato na superfície do bloco e existe a tendência de ocorrer um melhor travamento mecânico entre o graute e as reentrâncias da superfície destes blocos.

Este ensaio baseia-se na variação de profundidade captada pela agulha da ponteira do equipamento, ao percorrer determinada distância. Com as variações de profundidade superficial captadas pela agulha, é fornecido pelo equipamento a rugosidade média (Ra), identificada na superfície do material.

Os resultados encontrados para a rugosidade média geral das amostras, na direção vertical e horizontal, podem ser visualizados no Quadro 4.11. Como os blocos tipo BM16 e

BV10 possuem superfície com maior quantidade de frisos, sua rugosidade na direção vertical foi medida, tanto sobre as ranhuras, quanto entre as mesmas. Dessa forma, para facilitar a comparação da rugosidade apresentada com os demais tipos de bloco, a rugosidade dos blocos tipo BM16 e BV10 é composta da média da rugosidade captadas nos frisos e entre eles.

Quadro 4.11 - Rugosidade média (Ra) de cada tipo de bloco

Tipo de bloco	Ra na vertical (μm)	D. Pad. (μm)	C. V. (%)	Ra na horizontal (μm)	D. Pad. (μm)	C. V. (%)
BM7	6,90	1,73	25,08	7,86	2,17	27,64
BM16*	8,39	3,17	37,73	9,72	5,73	58,96
BM4	8,67	2,31	26,64	7,18	1,58	22,03
BV0	8,09	2,30	28,37	7,73	1,39	17,93
BV10*	7,46	2,81	37,64	8,29	6,25	75,34

Fonte: Autor (2019). * Ra vertical é a média dos valores obtidos nos frisos e entre eles; Ra horizontal é a média dos valores obtidos nos frisos.

Como pode ser visualizado no Quadro 4.11, para a rugosidade medida na direção vertical, nos blocos de parede maciça (BM7, BM16 e BM4), os maiores valores foram apresentados pelas amostras do tipo BM4, seguida de perto pela amostra BM16. O menor valor foi apresentado pela tipo de bloco BM7, que apresentou rugosidade vertical, aproximadamente, 20% inferior ao boco tipo BM4 e, 18% inferior ao tipo BM16. Com relação aos blocos de parede vazada, o bloco do tipo BV0 apresentou valor de rugosidade vertical ligeiramente superior ao do tipo BV10, cerca de 8% maior.

Para a rugosidade medida na direção horizontal, nos blocos de parede maciça, os maiores valores foram apresentados pelas amostras do tipo BM16. Sua rugosidade foi, aproximadamente, 19% superior ao bloco tipo BM7 e 26% superior ao tipo BM7. Com relação aos blocos de parede vazada, o bloco do tipo BV10 apresentou valor de rugosidade horizontal ligeiramente superior ao do tipo BV0, cerca de 7% maior, ao contrário do que foi encontrado na rugosidade vertical.

De forma geral, apesar de algumas amostras apresentarem maior rugosidade, sua diferença perante as demais é pequena, quando se analisa o grande desvio padrão apresentado pelas mesmas, devendo sua influência ser mais sutil e de difícil compreensão nos resultados de aderência obtidos entre os diferentes tipos de bloco e grautes.

Como os blocos do tipo BM16 e BV10 possuem superfície dotada de uma maior quantidade de frisos, as medidas das rugosidades foram realizadas em regiões diferenciadas dos demais tipos de bloco. Uma das diferenças é que as medidas de rugosidade realizadas na horizontal só puderam ser feitas em cima dos frisos, e não entre eles (ranhuras), o que provocou a necessidade de redução do comprimento de percurso do rugosímetro. Outro fator

foi a necessidade de comparar a rugosidade vertical em cima e entre os frisos, gerando uma variável a mais do que nas outras amostras. No Quadro 4.12 estão demonstrados os valores de rugosidade média (Ra) obtidas para cada um desses casos, para os dois tipos de bloco mencionados.

Quadro 4.12 - Rugosidade média (Ra) dos blocos ranhurados

Tipo de bloco	Rugosidade entre frisos - direção vertical			Rugosidade nos frisos - direção horizontal			Rugosidade nos frisos - direção vertical		
	Ra (μm)	D. Pad. (μm)	C. V. (%)	Ra (μm)	D. Pad. (μm)	C. V. (%)	Ra (μm)	D. Pad. (μm)	C. V. (%)
BM16	6,87	1,31	19,12	9,72	5,73	58,96	9,91	3,73	37,67
BV10	6,61	1,59	23,99	8,29	6,25	75,34	8,31	3,48	41,82

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.12, a rugosidade vertical medida nos frisos e, entre eles, apresentou valores distintos. A rugosidade nos frisos foi superior para os dois tipos de bloco, apresentando-se, aproximadamente, 31% e 20% maior para os blocos tipo BM16 e BV10, respectivamente. Os valores obtidos nos frisos, na direção horizontal, também superam os valores verticais obtidos entre os frisos. Portanto, existem indícios que apontam diferença entre as rugosidades medidas nos frisos e entre eles.

4.1.1.6 Resistência à compressão

A propriedade mecânica escolhida para caracterização dos blocos foi a resistência à compressão, realizada conforme as orientações da NBR 15270 (ABNT, 2017). Em seguida, foi determinado o valor característico da resistência à compressão para cada tipo de bloco (fbk).

Os valores de resistência à compressão característica e a resistência à compressão média de cada tipo de bloco, referentes à sua área bruta e líquida, podem ser visualizadas no Quadro 4.13.

Quadro 4.13 - Resistência à compressão de cada tipo de bloco

Tipo de bloco	Resistência característica - fbk (Mpa)	Resistência área bruta (Mpa)	D. Pad. (Mpa)	C. V. (%)	Resistência área líquida (Mpa)	D. Pad. (Mpa)	C. V. (%)
BM7	16,82	19,7	2,2	11,2	38,6	4,3	11,2
BM16	16,76	18,9	1,7	8,8	38,4	3,4	8,8
BM4	20,48	27,8	3,7	13,4	56,0	7,5	13,4
BV0	13,31	17,2	1,9	11,3	38,6	4,4	11,3
BV10	12,12	13,4	1,0	7,2	29,7	2,1	7,2

Fonte: Autor (2019).

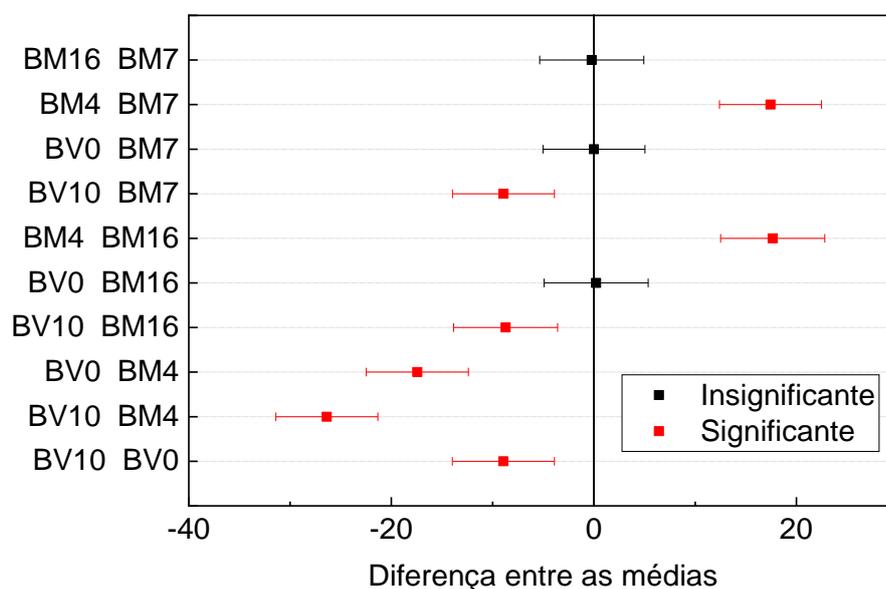
Conforme pode ser observado no Quadro 4.13, os valores da resistência característica dos blocos do tipo BM7 e BM16, assim como, do tipo BV0 e BV10, são bem semelhantes. Essa proximidade nas propriedades dos blocos pode permitir uma comparação mais precisa da influência do formato geométrico das células dos blocos na avaliação da aderência com o graute.

Entretanto, é necessário destacar que, no caso dos blocos do tipo BV0 e BV10, embora sua resistência característica seja semelhante, sua resistência média possui uma diferença considerável, principalmente, quando referente à área líquida do bloco. Dessa forma, os valores médios obtidos para área líquida, podem permitir uma melhor distinção entre as propriedades mecânicas dos diferentes tipos de blocos, pois consideram a quantidade real de material existente para resistir aos esforços, possibilitando uma melhor comparação com as demais propriedades analisadas, ao invés dos valores característicos.

Com relação à comparação entre as médias de tensão obtidas para cada tipo de bloco nas áreas líquida e bruta, foi realizada uma análise de variância de um fator, para verificar a existência de diferenças significativas de acordo com o tipo de bloco utilizado, com nível de significância de 95%. Os resultados da análise de variância, tanto da tensão na área bruta quanto da área líquida, indicam que existem diferenças significativas entre as médias.

Com a utilização do teste Tukey, é possível observar se as diferenças entre as médias de cada tipo de bloco são significativas para um nível de confiança de 95%. Nas figuras abaixo está demonstrada a comparação entre as médias da resistência à compressão feitas com o teste tukey, para a área líquida (Figura 4.5) e para área bruta (Figura 4.6).

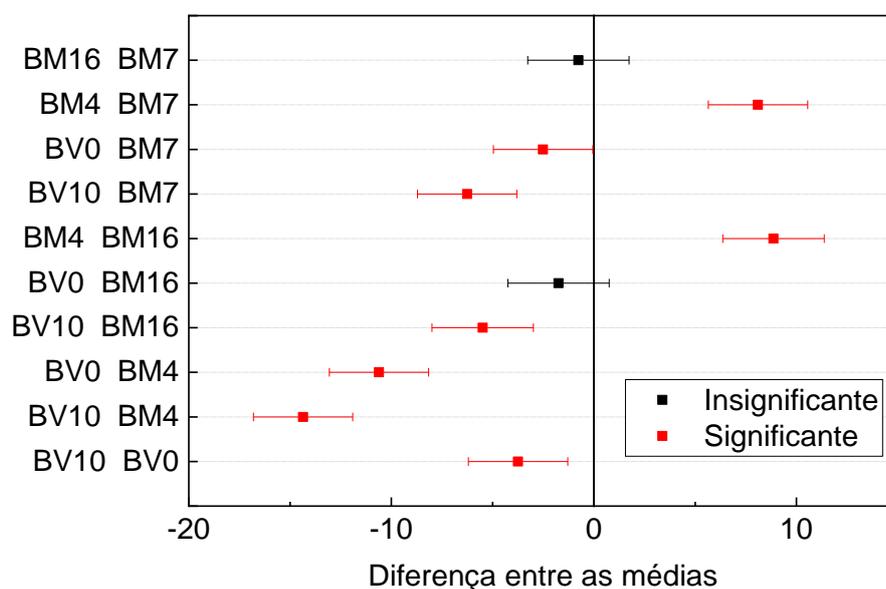
Figura 4.5 - Comparação entre médias de resistência na área líquida



Fonte: Autor (2019).

Com relação à comparação entre os valores médios de resistência à compressão na área líquida, pode ser verificado na Figura 4.5 que os blocos tipo BM16, BM7 e BV0 possuem resistência à compressão equivalentes. Essa informação pode ser útil, pois a resistência será uma variável a menos na análise e comparação da aderência apresentada por estes tipos de bloco. Por outro lado, para os blocos tipo BV10 e BV0, que apresentaram resistência característica semelhante, na análise da resistência à compressão média na área líquida, suas médias não puderam ser consideradas semelhantes, ou seja, a resistência pode ser considerada uma variável a mais na análise da aderência destes blocos de parede vazada.

Figura 4.6 – Comparação entre médias de resistência na área bruta



Fonte: Autor (2019).

Assim como ocorreu com a resistência à compressão na área líquida, as médias dos blocos tipo BM16 e BM7, assim como, BV0 e BM16, também foram consideradas equivalentes na área bruta. Entretanto, para a área bruta, a média entre BV0 e BM7 não são consideradas equivalentes, diferentemente do que ocorreu na área líquida.

A comparação entre médias na área bruta descartou a equivalência entre as amostras tipo BV0 e BV10, assim como ocorreu na área líquida, portanto, mesmo que a resistência característica dos blocos tenha sido semelhante, sua resistência média é considerada diferente, podendo influenciar na comparação entre as demais propriedades e ensaios realizados.

4.1.2 BARRAS DE AÇO

As barras de aço utilizadas nessa pesquisa foram empregadas no ensaio de arrancamento. Conforme mencionado anteriormente, no início da pesquisa planejava-se

empregar apenas três paredes para cada amostra no ensaio de arrancamento, comprando-se o aço necessário para isso, da fabricante ArcelorMittal. Entretanto, como a variação dos resultados do arrancamento poderia ser um problema, optou-se pela realização de uma quarta parede para cada amostra do arrancamento, sendo necessário, para isso, encomendar mais aço, porém, o aço comprado foi de outro fabricante, da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

Dessa forma, foram realizados ensaios de caracterização do aço dos dois fabricantes, com resultados de massa linear e alongamento na ruptura apresentados no Quadro 4.14.

A área e o diâmetro equivalente médio das barras de aço do fabricante ArcelorMittal foi de 200,00 mm² e 15,96 mm, respectivamente. A área e o diâmetro equivalente médio das barras de aço do fabricante CSN foi de 202,24 mm² e 16,05 mm, respectivamente.

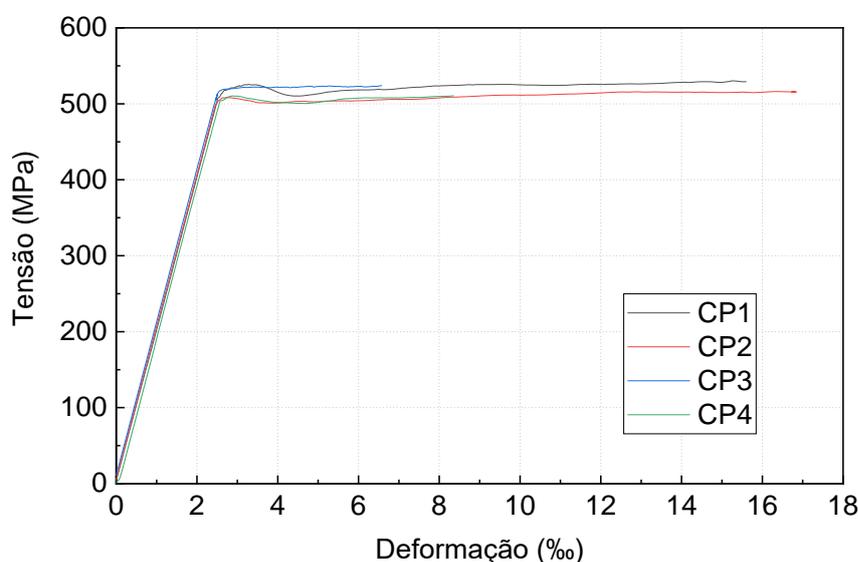
Quadro 4.14 - Massa linear e alongamento após ruptura das barras de aço

Fabricante	Massa linear média (kg/m)	D. Pad. (kg/m)	C. V. (kg/m)	Alongamento médio após ruptura (%)	D. Pad. (%)	C. V. (%)
CSN	1,588	0,00	0,24	14,0	0,3	2,0
ArcelorMittal	1,570	0,00	0,15	13,1	0,4	2,9

Fonte: Autor (2019).

A massa linear e o alongamento após ruptura de ambos fabricantes das barras atendem aos limites impostos pela NBR 7480 (ABNT, 2008). Como pode ser visto no Quadro 4.14 acima, o alongamento após ruptura das barras foi semelhante. As curvas de tensão e deformação para o aço de cada fabricante podem ser conferidas na Figura 4.7 (CSN) e Figura 4.8 (ArcelorMittal).

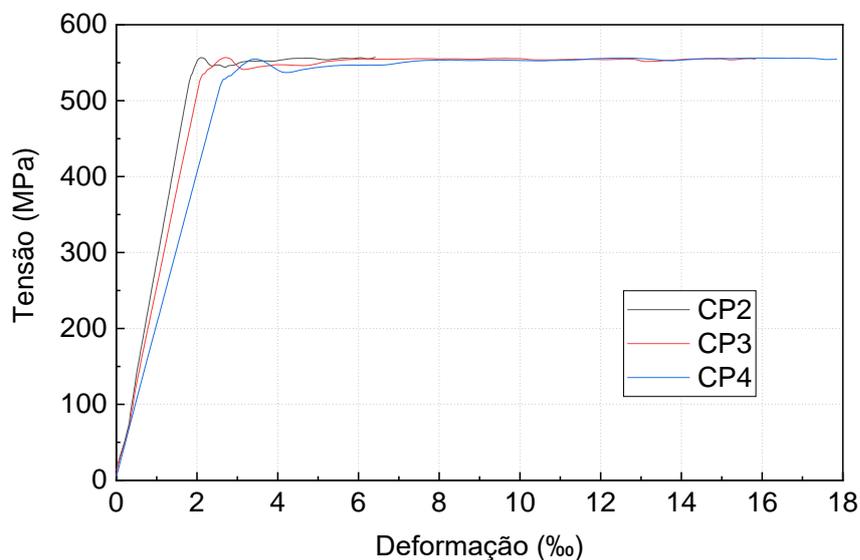
Figura 4.7 – Curvas tensão vs deformação das barras do fabricante CSN



Fonte: Autor (2019).

O CP1 do fabricante ArcelorMittal foi ensaiado sem extensômetro, para verificar o momento de retirada da instrumentação antes da ruptura do aço. Portanto, não está apresentado na curva da Figura 4.8.

Figura 4.8 - Curvas tensão vs deformação das barras do fabricante ArcelorMittal



Fonte: Autor (2019).

Os resultados médios de tensão de escoamento superior e tensão máxima obtidos nos ensaios de tração estão disponíveis no Quadro 4.15. Esses resultados foram retirados das curvas mostradas na Figura 4.7 e Figura 4.8.

Quadro 4.15 – Tensão de escoamento e tensão máxima

Fabricante	Tensão de escoamento média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)	Tensão máxima média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
CSN	516,7	8,5	1,6	621,9	6,3	1,0
ArcelorMittal	555,8	1,1	0,2	689,1	3,7	0,5

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.15, existe uma diferença considerável entre as tensões de escoamento e máxima apresentadas pelas barras dos dois fabricantes. A diferença entre as tensões de escoamento é de 7% e a da tensão de ruptura é de quase 10%. Entretanto, as barras de ambos fabricantes ultrapassaram a tensão de escoamento de 500 MPa, apresentaram alongamento superior ao mínimo (8%) da NBR 7480 (ABNT, 2008) e massa linear adequada, podendo ser classificadas como aço CA-50.

4.1.3 ARGAMASSAS

No Quadro 4.16, estão demonstrados os valores médios de resistência à compressão e à tração na flexão de argamassas, obtidos em amostras aleatórias realizadas durante o processo de assentamento dos prismas.

Quadro 4.16 - Valores médios de tração na flexão e compressão da argamassa dos prismas

Propriedade	Tipo de argamassa	Fator água/argamassa anidra	Força máxima (kN)	Tensão (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
Tração na flexão	8 MPa	0,159	140,2	3,19	0,14	4,53
Compressão axial			1889,8	11,60	0,91	7,84
Tração na flexão	14 MPa	0,169	211,2	4,86	0,36	7,43
Compressão axial			3038,4	18,62	1,10	5,93

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.16, a tração na flexão dos dois tipos de argamassa é pouco diferente. Já a resistência à compressão apresentou diferença de aproximadamente 7 MPa de uma argamassa para a outra.

No Quadro 4.17, estão demonstrados os valores médios de resistência à compressão e à tração na flexão de argamassas, empregados em amostras aleatórias realizadas durante o processo de assentamento das paredes utilizadas no ensaio de arrancamento.

Quadro 4.17 - Valores médios de tração na flexão e compressão das argamassas empregadas nas paredes do ensaio de empurramento

Propriedade	Tipo de bloco	Tipo de argamassa	Força máxima média (kN)	Tensão média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
Tração na flexão	BM7	8 MPa	67,3	1,55	0,10	6,54
Compressão axial			847,4	5,19	0,32	6,09
Tração na flexão	BM16	14 MPa	72,3	1,66	0,10	6,17
Compressão axial			996,1	6,13	0,21	3,49
Tração na flexão	BV10	14 MPa	40,3	0,93	0,14	14,65
Compressão axial			448,4	2,75	0,17	6,22

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.17, a tração na flexão dos dois tipos de argamassa é pouco diferente. Já a resistência à compressão apresentou diferença de aproximadamente 3 MPa de um tipo de argamassa para a outra.

As propriedades mecânicas mais baixas encontradas para as argamassas empregues nas paredes, se deve ao fato deste ensaio ter sido realizado, aproximadamente, 1 ano mais tarde. Dessa forma, o material cimentício deve ter perdido parte de sua reatividade, enquanto estava estocado no laboratório.

4.1.4 GRAUTES

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos grautes com resistência nominal de 15 e 30 MPa. Foram realizados ensaio de caracterização dos grautes em estado fresco e endurecido.

4.1.4.1 Ensaios no estado fresco

Os ensaios em estado fresco foram realizados logo após a mistura do graute. O primeiro ensaio realizado após cada mistura foi o abatimento do tronco de cone, com a intenção de garantir que todos os grautes ensaiados possuam consistência semelhante. Deve ser salientado, que o ensaio de abatimento foi realizado após cada mistura, para realização da dosagem experimental da água adicionada à mistura, visando obter valores de abatimento na faixa de 250 ± 20 mm. Caso esse valor não fosse atingido, adicionava-se água à massa e repetia-se o processo até a obtenção dos valores almejados. Essa estratégia foi adotada para reduzir a interferência da variável consistência do material na aderência com os blocos.

Os valores de abatimento e a relação água/graute (material anidro) empregados para cada graute na realização dos ensaios em estado fresco, estão dispostos no Quadro 4.18.

Quadro 4.18 – Abatimento e relação água/graute empregada

Tipo de graute	Abatimento (mm)	Relação água/graute (anidro)
15 MPa	250	0,127
30 MPa	240	0,152

Fonte: Autor (2019).

Após a obtenção do abatimento desejado, o graute foi encaminhado para os demais ensaios no estado fresco. Optou-se por realizar a mistura do graute sempre em betoneira, para manter o mesmo procedimento e equipamento de mistura em todos os ensaios. Os ensaios realizados em estado fresco foram índice de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado. Os resultados obtidos para cada uma dessas propriedades estão relacionados no Quadro 4.19.

Quadro 4.19 - Resultados obtidos para os grautes em estado fresco

Propriedade	Norma	Tipo de graute	Média	D. Pad.	C. V. (%)
Índice de consistência (mm)	NBR 13276 (2002)	15 MPa	289	3,06	1,06
		30 MPa	281	3,46	1,23
Retenção de água (%)	BS EN 413-2 (2005)	15 MPa	97	0,06	0,06
		30 MPa	95	0,51	0,54
Densidade de massa - estado fresco (g/cm ³)	NBR 13278 (2005)	15 MPa	2,098	0	0,09
		30 MPa	2,159	0,01	0,34
Massa específica do graute anidro (g/cm ³)	NBR NM 23 (2000)	15 MPa	2,71	0	0,04
		30 MPa	2,65	0	0,16
Teor de ar incorporado (%)	NBR 13278 (2005)	15 MPa	8	0,08	1,05
		30 MPa	1	0,34	39,17

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.19, o índice de consistência apresentado pelo graute do tipo 15 MPa foi quase 3% superior ao graute tipo 30 MPa. Esses resultados vão de encontro aos obtidos no ensaio de abatimento em que o graute de 15 MPa também apresentou maior abatimento, cerca de 4% superior ao graute 30 MPa. Portanto, o graute 15 MPa apresentou menor consistência em ambos os ensaios, pois sua capacidade de deformação em estado fresco foi maior, indicando maior trabalhabilidade.

O resultado do ensaio de retenção de água de ambos os grautes foi bem elevado, indicando alta capacidade de retenção. Entretanto, o graute de 15 MPa apresentou maior capacidade de reter água, apresentando retenção 2 pontos percentuais superior. Como a retenção do graute 15 MPa é superior, possivelmente, este conseguirá manter maior quantidade de água no momento em que o graute entrar em contato com meios absorventes, como os blocos cerâmicos. Entretanto, como a variação desta propriedade, comparando-se um tipo de graute com o outro, é pequena, será difícil determinar sua influência na aderência com os blocos cerâmicos.

Como não foi encontrada uma especificação normativa para o valor ideal de retenção de água para o graute aplicado em estruturas de alvenaria, deve-se salientar que existe uma especificação de retenção mínima de água de 75%, apresentada para argamassas empregadas em alvenaria, pela normativa C 270 (ASTM, 2017). Dessa forma, como a argamassa também é uma mistura cimentícia em contato com a alvenaria, assim como o graute, aparentemente, a alta retenção apresentada pelas duas amostras de graute parece ser um ponto positivo em sua utilização.

A mesma norma supracitada também especifica um valor máximo de teor de ar nas argamassas de 12%, sendo que ambos os grautes apresentaram valores inferiores a esse.

O valor da densidade de massa no estado fresco do graute tipo 30 MPa foi, aproximadamente, 3% superior à apresentada pelo graute 15 MPa. Esses resultados são bem próximos, dificultando a análise da influência dessa propriedade na aderência entre blocos e grautes.

Os resultados do teor de ar incorporado mostraram valores superiores para a amostra de graute 15 MPa, em relação à amostra de 30 MPa. Essa maior quantidade de ar no graute 15 MPa, ajuda a explicar o motivo de a densidade de massa desse graute ter sido inferior.

Deve ser ressaltado, que a determinação da incorporação de ar foi realizada em um recipiente cilíndrico com dimensões inferiores às requeridas pela norma NBR 13278 (ABNT, 2005), porém, ainda é possível comparar as duas amostras para verificar qual possui maior capacidade de incorporação de ar, haja visto que o procedimento de execução foi igual para ambos os grautes.

4.1.4.2 Resultados no estado endurecido

Os ensaios de caracterização dos grautes em estado endurecido foram realizados 28 dias após sua moldagem. Os resultados obtidos serão demonstrados a seguir.

4.1.4.2.1 Propriedades mecânicas dos grautes

Os valores de abatimento obtidos para cada graute na realização dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, assim como a relação água/graute (material anidro), estão dispostos no Quadro 4.20.

Quadro 4.20 - Abatimento e relação água/graute empregados

Tipo de graute	Abatimento (mm)	Relação água/graute (anidro)
15 MPa	240	0,127
30 MPa	260	0,163

Fonte: Autor (2019).

Os valores de abatimento obtidos para cada graute na realização dos ensaios de tração por compressão diametral, assim como a relação água/graute (material anidro), estão dispostos no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 - Abatimento e relação água/graute empregados

Tipo de graute	Abatimento (mm)	Relação água/graute (anidro)
15 MPa	250	0,127
30 MPa	240	0,152

Fonte: Autor (2019).

No Quadro 4.22 estão demonstrados os valores médios das propriedades mecânicas determinadas para os grautes com resistência nominal de 15 e 30 MPa.

Quadro 4.22 – Propriedades mecânicas do graute

Propriedade	Tipo de graute	Média	D. Pad.	C. V. (%)
Resistência à compressão (MPa)	15 MPa	20,3	0,7	3,2
	30 MPa	33,6	1,4	4,1
fck (MPa)	15 MPa	19,2	-	-
	30 MPa	31,3	-	-
Módulo de elasticidade (GPa)	15 MPa	21,9	0,5	2,3
	30 MPa	23,3	0,4	1,8
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	15 MPa	2,2	0,2	8,7
	30 MPa	3,7	0,3	7,3

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser conferido no Quadro 4.22, a diferença da resistência à compressão entre os grautes é de aproximadamente 13 MPa, entretanto, os valores do módulo de elasticidade são semelhantes, com uma diferença de aproximadamente, 1 GPa. Esses valores próximos no módulo de elasticidade eram esperados, uma vez que não estão sendo empregados agregados graúdos, que tem a propriedade de elevar o módulo dos compósitos. Os resultados de resistência à tração por compressão diametral estão adequados, pois apresentaram valores próximos a cerca de 11% da resistência à compressão apresentada pelos grautes, indo de encontro aos valores disponível na literatura que indicam a relação de aproximadamente 10%.

O valor da resistência característica (fck) dos grautes é próximo à resistência média, pois o desvio padrão apresentado pelas amostras é baixo. A equação empregada para calcular a resistência característica, admitindo que os resultados sigam a distribuição normal de Gauss e considerando uma probabilidade de 5% de existirem resistências inferiores à característica, é mostrada abaixo.

$$fck = fcm - 1,645 \times Sd \quad (4.1)$$

Sendo,

fck: Resistência característica à compressão;

fcm: Resistência média à compressão;

Sd: Desvio padrão da amostra.

4.1.4.2.2 Comparação entre resistência à compressão de corpos de prova com formato cúbico e cilíndricos

A resistência à compressão dos grautes foi determinada conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), em 6 corpos de prova cilíndricos com dimensões nominais 100 X 200 mm, respectivamente, diâmetro e altura. Alternativamente, considerando a ausência de agregados graúdos no graute, foram moldados 6 corpos de prova cúbicos com lados de 4 cm, para verificar a possibilidade de avaliar a resistência à compressão pelo mesmo procedimento aplicado para argamassas da NBR 13279 (ABNT, 2005). Os resultados da resistência à compressão obtidos para os dois tipos de corpos de prova (cilíndrico e cúbico) e, para os dois tipos de graute (15 e 30 MPa), podem ser conferidos no Quadro 4.23.

Quadro 4.23 - Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e cúbicos

Tipo de graute	Corpo de prova	Resistência à compressão média (Mpa)	D. Pad. (Mpa)	C. V. (%)
15	Cilíndrico (10 X 20cm)	20,3	0,7	3,2
30		33,6	1,4	4,1
15	Cúbico (4cm)	20,1	2,9	14,2
30		29,4	3,1	10,5

Fonte: Autor (2019).

Para verificar se a resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos é equivalente à obtida com os corpos de prova cilíndricos, para ambos os tipos de graute, foi realizado o test t de Student. De acordo com o teste, considerando um nível de significância de 95%, a amostra de graute 15 MPa, rompida com corpos de prova cúbicos, apresentou média equivalente à dos corpos de prova cilíndricos. Entretanto, para as médias obtidas com o tipo de graute 30 MPa, a resistência à compressão dos corpos de prova cúbico não é equivalente à apresentada pelos corpos de prova cilíndricos. Dessa forma, não é aconselhada a utilização de corpos de prova cúbicos destas dimensões para avaliação da resistência à compressão dos grautes, pois os resultados diferem dos obtidos com os corpos de prova cilíndricos que são considerados padrão para o ensaio de compressão da NBR 5739 (2018). Além disso, o coeficiente de variação apresentado pelos corpos de prova cúbicos foi significativamente maior do que os corpos de prova cilíndricos, causando maior imprecisão na sua aplicação.

Portanto, nessa pesquisa só serão utilizados os resultados de resistência à compressão obtidos com corpos de prova cilíndricos.

4.1.4.2.3 Propriedades físicas dos grautes

Além dos ensaios mecânicos, também foram executados ensaios para determinação de algumas propriedades físicas do graute. No Quadro 4.24 é possível observar os resultados médios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, executados conforme preconizado pela NBR 9778 (ABNT, 2005), para cada tipo de graute, com a utilização de 3 corpos de prova cilíndricos que formavam cada amostra.

Quadro 4.24 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos grautes utilizando-se corpos de prova cilíndricos (10 X 20 cm)

Propriedade	Tipo de graute	Média	D. Pad.	C. V. (%)
Absorção (%)	15 MPa	11,21	0,0	0,4
	30 MPa	13,21	0,1	0,7
Índice de vazios (%)	15 MPa	20,16	0,1	0,5
	30 MPa	23,84	0,2	0,7
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	15 MPa	1,799	0,0	0,1
	30 MPa	1,804	0,0	0,1
Massa específica da amostra saturada (g/cm ³)	15 MPa	2,000	0,0	0,1
	30 MPa	2,043	0,0	0,0
Massa específica real (g/cm ³)	15 MPa	2,253	0,0	0,2
	30 MPa	2,369	0,0	0,1

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.24, a absorção e índice de vazios apresentados pelo graute do tipo 30 MPa um pouco superiores ao graute 15 MPa, respectivamente. Os resultados da massa específica das amostras seca e saturada apresentaram pouca diferença entre os dois tipos de graute, entretanto, a massa específica real do graute de 30 MPa foi, aproximadamente, 5% superior ao graute 15 MPa.

A maior massa específica real apresentada pelo graute 30 MPa, deve estar relacionada aos resultados mecânicos superiores apresentados por essa amostra perante a de 15 MPa.

Alternativamente, com o objetivo de verificar a possibilidade de utilizar uma quantidade menor de graute para execução deste ensaio, 6 corpos de prova de formato cúbico, com dimensões de 4 centímetros de lado, foram moldados. Esses corpos de prova são oriundos da mesma massada das amostras apresentadas no Quadro 4.24, e foram submetidos aos mesmos procedimentos de ensaio, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005). Os resultados obtidos para estas amostras podem ser conferidos no Quadro 4.25.

Quadro 4.25 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos grautes utilizando-se corpos de prova cúbicos (4 cm)

Propriedade	Tipo de graute	Média	D. Pad.	C. V. (%)
Absorção (%)	15 MPa	11,56	0,1	1,0
	30 MPa	15,25	0,1	0,5
Índice de vazios (%)	15 MPa	21,93	0,2	0,8
	30 MPa	27,46	0,1	0,4
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	15 MPa	1,897	0,0	0,2
	30 MPa	1,801	0,0	0,2
Massa específica da amostra saturada (g/cm ³)	15 MPa	2,116	0,0	0,1
	30 MPa	2,075	0,0	0,1
Massa específica real (g/cm ³)	15 MPa	2,429	0,0	0,2
	30 MPa	2,482	0,0	0,2

Fonte: Autor (2019).

Observando-se os resultados do Quadro 4.25, verifica-se a existência clara de diferenças significativas nos resultados entre a absorção e índice de vazios dos grautes tipo 15 e 30 MPa. A absorção e índice de vazios apresentados pela amostra 30 MPa são, aproximadamente, 32% e 25% superiores, respectivamente. O valor da massa específica real também apresentou grande diferença, com o graute 30 MPa demonstrando-se, aproximadamente, 20% superior ao graute 15 MPa.

Quando comparar-se as diferenças entre os resultados da amostra 15 para 30 MPa em cada um dos quadros, fica claro que os ensaios com amostras cúbicas mostraram uma diferença bem maior do que às apresentadas pelas amostras dos corpos de prova cilíndricos demonstradas anteriormente, no Quadro 4.24.

Os resultados encontrados com os corpos de prova cúbicos apresentam grande diferença com os resultados apresentados pelos corpos de prova cilíndricos, com a utilização do graute 30 MPa. Portanto, como as amostras cilíndricas cumprem os requisitos mínimos de quantidade de material apresentados pela NBR 9778 (ABNT, 2005), e as amostras cúbicas não, fica mais adequada a utilização dos resultados dos corpos de prova cilíndricos para comparação com as demais propriedades do material.

4.1.4.2.3.1 Variação dimensional e de massa dos grautes

Outros ensaios físicos realizados para caracterização dos tipos de graute foram a determinação da variação dimensional e de massa. Como a variação dimensional apresentada pelo graute (expansão ou retração) pode influenciar na aderência com os blocos cerâmicos, importantes informações podem ser extraídas desses resultados.

No Quadro 4.26 estão demonstrados os valores de abatimento e relação água/graute (anidro) empregados nas massadas do material para execução destes procedimentos.

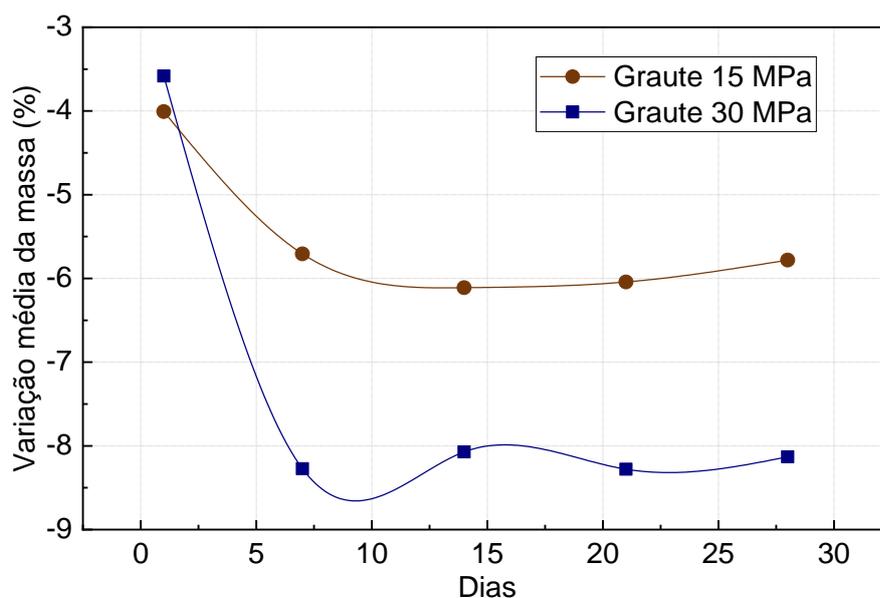
Quadro 4.26 - Abatimento e relação água/graute empregados

Tipo de graute	Abatimento (mm)	Relação água/graute (anidro)
15 MPa	255	0,141
30 MPa	260	0,191

Fonte: Autor (2019).

Na Figura 4.9 podem ser visualizadas as informações relativas à variação de massa apresentadas por corpos de prova prismáticos de graute, desde sua data de desforma com 48 horas de idade, até 28 dias posteriores a essa data. A variação de massa é apresentada percentualmente, com relação ao valor de referência obtido pela pesagem das amostras logo após a desforma dos corpos de prova.

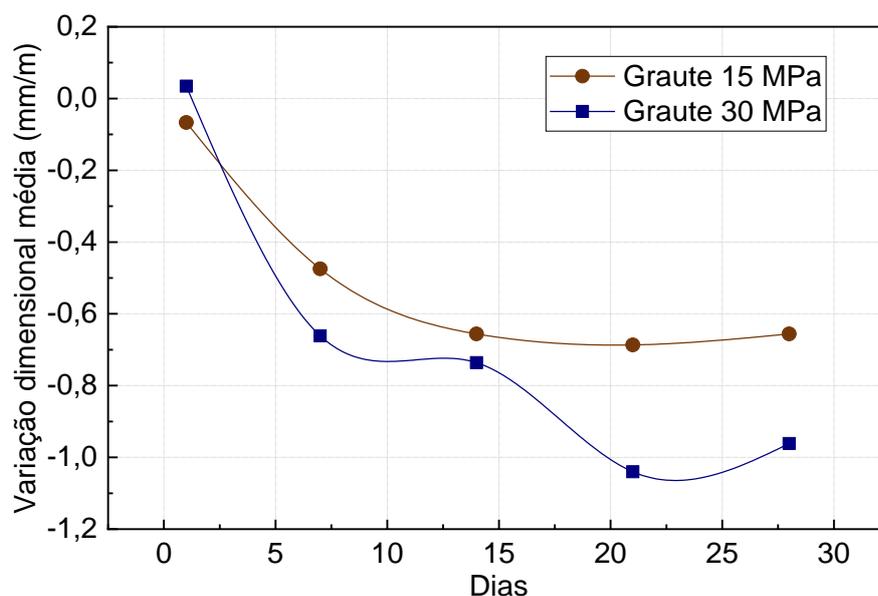
Figura 4.9 - Variação média da massa dos grautes



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 4.9, ocorreu perda de massa em ambas as amostras de graute, porém, a amostra do graute tipo 30 MPa foi a que apresentou redução mais significativa de sua massa, no decorrer do tempo. A redução percentual de massa das amostras foi de, aproximadamente, 9% para o graute de 30 MPa e 6% para o graute de 15 MPa, após 28 dias da desforma.

Na Figura 4.10 estão apresentados os gráficos da variação dimensional média dos corpos de prova para cada tipo de graute. Essa variação é medida comparando-se a dimensão apresentada pelos corpos de prova na data de desmolde, com as dimensões apresentadas em datas posteriores.

Figura 4.10 – Variação dimensional média dos grautes

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no gráfico da Figura 4.10, ambos os tipos de graute sofreram redução de suas dimensões (retração). O graute do tipo 30 MPa apresentou os resultados mais expressivos de retração, sofrendo uma redução dimensional de, aproximadamente, 1 mm/m aos 28 dias, enquanto que o graute 15 MPa apresentou 0,7 mm/m de retração. Ou seja, a variação dimensional do graute 30 MPa foi, aproximadamente, 30% superior à do graute 15 MPa, aos 28 dias.

Portanto, comparando-se os resultados da Figura 4.9 e Figura 4.10, fica claro que ambos os grautes perderam massa e retraíram com o passar do tempo, entretanto, os resultados mais expressivos foram obtidos pelo graute 30 MPa. Esse comportamento do graute 30 MPa pode ter impacto direto no seu desempenho na aderência com os blocos cerâmicos, pois, se o mesmo perder o contato com as paredes do bloco, devido à sua retração, é provável que ocorra redução da extensão de aderência entre os materiais e queda no desempenho mecânico da interface.

4.1.5 PRISMAS

Para caracterização dos materiais utilizados e verificação do desempenho potencial destes quando empregados em alvenaria estrutural, foram moldados prismas de dois blocos. Geralmente, das seis amostras moldadas para cada condição, duas foram destinadas para determinação da resistência à compressão e as outras 4 para realização do módulo de elasticidade.

Os resultados médios de resistência à compressão e módulo de elasticidade podem ser visualizados no Quadro 4.27.

Quadro 4.27 - Resultado prismas

Tipo de bloco	Graute	Compressão média (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)	Módulo médio (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
BM7	Oco	9,8	0,99	10,0	9670,6	1530,1	15,8
	15	17,6	1,77	10,1	23422,5	2543,8	10,9
	30	21,5	2,14	9,9	25701,5	2044,6	8,0
BM16	Oco	9,0	0,90	10,1	12413,3	1189,1	9,6
	15	19,2	1,46	7,6	26967,5	1021,4	3,8
	30	19,1	1,90	9,9	20938,4	2659,2	12,7
BM4	Oco	10,5	1,23	11,8	10309,8	2658,5	25,8
	45	16,7	1,54	9,2	21501,3	3168,3	14,7
	60	18,1	2,43	13,4	25972,6	7689,8	29,6
BV0	Oco	5,8	0,61	10,5	9083,1	1498,4	16,5
	45	11,5	0,89	7,7	18749,8	3326,8	17,7
	60	11,0	1,53	13,9	12807,5	3528,9	27,6
BV10	Oco	5,8	1,23	21,1	7016,2	2104,9	30,0
	75	10,4	1,21	11,6	17203,1	2968,6	17,3
	90	10,4	1,32	12,7	13533,9	3911,7	28,9

Fonte: Autor (2019).

Observando-se os resultados demonstrados no Quadro 4.27, pode ser percebido que para os blocos do tipo BM7 e BM4, que possuem parede maciça, os valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão dos prismas aumentaram, com a utilização do graute 30 MPa, em relação aos valores obtidos com o graute de 15 MPa, o que é esperado. Entretanto, para o bloco do tipo BM16, que também possui parede maciça, mas possui maior quantidade de frisos no orifício grauteado, o mesmo desempenho não se repetiu. Nesse caso, os maiores valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão dos prismas, foram obtidos com o graute de 15 MPa, ao invés do de 30 MPa. Para esse tipo de bloco, o valor da resistência à compressão dos prismas ficou muito próximo para os dois grautes utilizados, entretanto, a redução do módulo de elasticidade obtido com o graute 30 MPa em relação ao graute 15 MPa, é bem considerável, cerca de 22% menor.

Para o caso dos blocos tipo BV0 e BV10, que possuem parede vazada, a resistência à compressão obtida com os prismas foi praticamente igual com a utilização do graute 15 e 30 MPa, em seu enchimento. Já para os resultados de módulo de elasticidade, os prismas de ambos os tipos de bloco apresentaram redução significativa de desempenho com a utilização do graute de 30 MPa, em comparação com o graute de 15 MPa. Para o caso do bloco tipo BV10, a redução do módulo de elasticidade foi de cerca de 21%, enquanto que para o bloco do tipo BV0, a redução foi de aproximadamente 32%.

Quando analisados os resultados obtidos com os prismas dos blocos do tipo BM7 e do tipo BM16, que possuem praticamente a mesma resistência característica à compressão para os blocos (16 MPa), fica claro que o desempenho dos prismas na resistência à compressão também segue semelhante, tanto para os prismas ocos quanto para os cheios. Entretanto, quando analisado o desempenho do módulo de elasticidade, ocorre uma variação nos valores, principalmente com a utilização do graute de 30 MPa, que provocou uma redução no valor dos módulos dos prismas feitos com o bloco do tipo BM16 e aumento nos prismas com bloco BM7.

Ao se comparar os blocos do tipo BV0 e BV10, que possuem resistência característica à compressão semelhante, em torno de 12,5 MPa, pode ser percebido que os resultados obtidos com os prismas são semelhantes tanto na resistência à compressão, quanto no módulo de elasticidade, sejam os prismas grauteados, ou não. Os prismas de ambos os tipos de bloco feitos com graute 30 MPa apresentaram redução no módulo, quando comparado com o do graute 15 MPa.

Para o bloco do tipo BM4 que possui o maior valor de resistência característica à compressão, de aproximadamente 20 MPa, era esperado que os valores dos prismas fossem consideravelmente superiores, entretanto, os valores obtidos foram bem próximos aos apresentados pelos prismas dos blocos do tipo BM7 e BM16. Esse resultado produz um indício de que a resistência dos prismas, neste caso, não está dependendo tanto da resistência à compressão do bloco, devendo esse fenômeno ser melhor estudado, para maior compreensão, em futuras pesquisas.

4.2 ENSAIO DE EMPURRAMENTO (PUSH-OUT)

Este ensaio fornece a tensão necessária para remover o graute do interior de uma célula de um bloco cerâmico. Essa tensão é utilizada para avaliar a resistência de aderência de cada combinação de bloco e graute ensaiados nessa pesquisa.

No Quadro 4.28 são apresentadas as propriedades determinadas para os diferentes tipos de blocos empregues na pesquisa, visando facilitar a comparação desses valores com o resultado dos ensaios de empurramento.

Quadro 4.28 - Propriedades dos tipos de blocos utilizados

Tipo de bloco	Área líquida (cm ²)	Área liq. / Área bruta (%)	Índice de absorção (%)	AAI (área líquida) ((g/193,55cm ²)/min)	Resistência característica - fbk (Mpa)	Resistência área líquida (Mpa)
BM7	209	51,0	13,2	31,3	16,8	38,6
BM16	197	49,2	11,2	30,2	16,8	38,4
BM4	201	49,5	12,2	27,3	20,5	56,0
BV0	180	44,4	12,8	30,8	13,3	38,6
BV10	184	45,2	13,9	36,6	12,1	29,7

Fonte: Autor (2019).

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de empurramento. Devido ao fato que, em algumas amostras ensaiadas, a ruptura ocorreu com a abertura de fissuras nos blocos, sem apresentar falhas na aderência entre os materiais, o termo mais adequado para tratar os resultados seria referente a uma tensão de aderência aparente, haja visto que, a aderência real apresentada pelo graute com os blocos que fissuraram no ensaio, seria superior a resistência dos blocos, ou seja, não se sabe a aderência exata entre os materiais, pois as amostras rompem somente no bloco. Portanto, daqui por diante, quando utilizada a expressão tensão de aderência, estar-se-á tratando da tensão de aderência aparente.

4.2.1 TENSÃO DE ADERÊNCIA

A tensão de aderência máxima suportada pelas amostras no ensaio de empurramento para cada uma das combinações bloco/graute empregadas, pode ser vista no Quadro 4.29. A área utilizada para o cálculo da tensão de aderência, corresponde à área de contato entre bloco e graute, ou seja, a área obtida na multiplicação do perímetro da abertura do bloco pela altura do mesmo.

Quadro 4.29 – Tensão de aderência

Bloco	Graute	Carga máxima média (kN)	Área de contato média (cm ²)	Tensão de aderência média (Mpa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
BM7	15 MPa	95,8	701	1,37	0,26	19,3
	30 MPa	16,7	698	0,24	0,07	27,5
BM16	15 MPa	161,0	899	1,80	0,17	9,2
	30 MPa	128,8	899	1,43	0,19	13,3
BM4	15 MPa	72,9	725	1,01	0,27	26,5
	30 MPa	26,6	724	0,37	0,23	61,4
BV0	15 MPa	85,0	546	1,56	0,19	12,1
	30 MPa	48,3	548	0,88	0,19	21,5
BV10	15 MPa	96,6	637	1,52	0,04	2,5
	30 MPa	96,5	638	1,51	0,18	11,7

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser visualizado no Quadro 4.29, houve uma redução da aderência para todas as amostras que utilizaram o graute 30 MPa, em relação às amostras dotadas do graute 15 MPa. A porcentagem de redução da aderência proporcionada pelo graute 30 MPa, em relação ao graute de 15 MPa, foi de, aproximadamente, 82% para o bloco tipo BM7, 21% para o bloco tipo BM16, 63% para o bloco tipo BM4, 44% para o bloco tipo BV0 e, apenas, 1% para o bloco tipo BV10.

A redução da capacidade de aderência no ensaio de empurramento para os grautes de maior resistência à compressão já foi identificada no trabalho de Fischer (2016). Nos trabalhos realizados por Izquierdo (2015) e Biggs (2005), ocorreu o oposto, obtendo-se acréscimos na resistência de aderência, com o aumento da resistência do material de enchimento.

A redução da aderência com o aumento da resistência à compressão do material de enchimento deve ser melhor estudada, podendo estar relacionada com a retração do material de enchimento no interior do bloco. Como observado nos ensaios de variação dimensional, o graute de 30 MPa apresentou uma retração 30% superior à apresentada pelo graute 15 MPa, podendo ser um dos responsáveis pelo comportamento.

Talvez, para os pesquisadores que encontraram aumento na aderência, com o aumento da resistência à compressão do material de enchimento, o fenômeno de retração pode não ter atuado de maneira tão expressiva, provocando tais resultados. Esse fenômeno deve ser estudado mais profundamente, em pesquisas futuras.

Embora tenha ocorrido esta diferenciação de comportamento para os diferentes tipos de graute, pode ser constatado que, no caso dos blocos tipo BM16 e BV10, que possuem grande presença de frisos no interior do bloco, a diferença entre a aderência das amostras com graute 15 e 30 MPa cai significativamente, principalmente no caso do bloco BV10 que praticamente iguala os resultados. Isso pode ser um indicativo da melhoria no desempenho do conjunto provocada pela presença dos frisos. Dessa forma, se tornaria possível garantir melhor desempenho na aderência dos materiais com a alteração das características geométricas das aberturas a serem grauteadas. Tanto nos blocos com parede maciça, quanto nos blocos com parede vazada, a menor redução da tensão de aderência ocorreu para os blocos com maior número de frisos (superfície mais ranhurada).

Comparando-se os resultados de aderência obtidos para o bloco tipo BM7 e o BM16, que possuem paredes maciças e resistência à compressão semelhantes, porém, com geometrias das células diferentes, conclui-se que, para o graute 15 MPa, que apresentou melhores resultados de aderência em ambos os blocos, a aderência alcançada pelo bloco tipo BM16 é 24% superior ao resultado obtido com o bloco tipo BM7. Já para o graute de 30 MPa,

que apresentou desempenho de aderência inferior para ambos os tipos de bloco, a aderência obtida pelo bloco tipo BM16 foi 83% superior à obtida com o bloco tipo BM7.

Analisando-se os resultados de comparação entre os blocos tipo BM7 e BM16, fica evidente que a maior presença dos frisos na célula interna do bloco tipo BM16 favorece o aumento da aderência entre os materiais. Esse fato foi comprovado pelos ensaios de empurramento. Dessa forma, com a utilização desse formato geométrico, a área de contato entre os materiais aumentou, proporcionando maiores valores de aderência.

No caso dos blocos tipo BV0 e BV10, que possuem paredes vazadas e resistência à compressão característica semelhantes, porém, formato geométrico diferente nas células grauteadas, pode-se concluir que, para o emprego do graute 15 MPa, a aderência verificada pelo bloco tipo BV10 foi, aproximadamente, 3% inferior à verificada com o bloco tipo BV0 (resultados bem próximos). Já para o emprego do graute de 30 MPa, a resistência de aderência identificada para o bloco tipo BV10 foi, aproximadamente, 42% superior à resistência de aderência do bloco tipo BV0.

Dessa forma, a presença de maior número de frisos nas células do bloco tipo BV10, também contribuiu para o aumento da resistência de aderência no caso do graute 30 MPa, devido ao aumento da área de contato entre os materiais, provocando seu melhor desempenho em relação ao bloco tipo BV0 que possuía parede lisa nas células grauteadas.

No caso da comparação entre blocos tipo BV0 e BV10, com a utilização do graute de 15 MPa, a tensão de aderência aparente obtida foi bem semelhante, contrariando as expectativas de aumento significativo da tensão de aderência, para o bloco tipo BV10, que possui maior área de contato, devido ao maior número de frisos na célula grauteada. Portanto, pode existir algum fator ou característica apresentada pelos materiais, seja a menor resistência à compressão na área líquida apresentada pelo bloco tipo BV10, ou o formato geométrico diferente dos blocos, dentre outros, que contribuiu para esse resultado.

Ao se comparar somente a carga máxima obtida no ensaio de empurramento, é possível retirar algumas informações importantes. A primeira, é resultante da observação de que as cargas aplicadas durante o ensaio nos blocos tipo BV10 são superiores às cargas aplicadas nos blocos tipo BM7 e BM4. Dessa forma, fica claro, que a resistência à compressão do bloco não foi determinante para a obtenção das maiores cargas no ensaio de empurramento, haja visto que a resistência à compressão do bloco tipo BV10 é inferior à dos blocos tipo BM7 e BM4.

Outra informação importante, obtida da análise das cargas máximas obtidas no ensaio de empurramento, provém da comparação de cargas entre blocos tipo BV0 e BV10, quando se utilizou o graute 15 MPa. Apesar da tensão de aderência média do bloco BV0 (1,56 MPa)

ter sido, aproximadamente, 3% superior à do bloco BV10 (1,52 MPa), a carga resistida pelo bloco tipo BV10 (96,6 kN) foi 12% superior à do bloco tipo BV0 (85,0 kN). Portanto, surge o seguinte questionamento: seria correto avaliar a capacidade de aderência do bloco tipo BV0 como sendo superior ou igual à do bloco BV10, mesmo que a capacidade de carga suportada pelo bloco tipo BV10 seja superior? Dessa forma, existe a possibilidade de que dois tipos de blocos com áreas de contato bem diferentes apresentem tensões de aderência iguais e cargas substancialmente diferentes.

No Quadro 4.30 são ordenados os tipos de bloco conforme resultados, do maior para o menor, considerando-se, do lado esquerdo a tensão de aderência e, do lado direito a carga máxima no ensaio de empurramento.

Quadro 4.30 - Ordem decrescente dos tipos de bloco conforme sua carga e tensão de aderência

Ordem decrescente de tensão				Ordem decrescente de carga			
Tipo de graute	Tipo de bloco	Tensão de aderência (MPa)	Área de contato (cm ²)	Tipo de graute	Tipo de bloco	Carga máxima (kN)	Área de contato (cm ²)
15 MPa	BM16	1,80	899	15 MPa	BM16	161,0	899
	BV0	1,56	546		BV10	96,6	637
	BV10	1,52	637		BM7	95,8	701
	BM7	1,37	701		BV0	85,0	546
	BM4	1,01	725		BM4	72,9	725
30 MPa	BV10	1,51	638	30 MPa	BM16	128,8	899
	BM16	1,43	899		BV10	96,5	638
	BV0	0,88	548		BV0	48,3	548
	BM4	0,37	724		BM4	26,6	724
	BM7	0,24	698		BM7	16,7	698

Fonte: Autor (2019).

Comparando-se a ordem decrescente dos tipos de bloco baseadas na carga máxima ou na tensão de aderência, no Quadro 4.30, pode ser visto que existe uma alternância entre as posições dos tipos de blocos, indicando a necessidade de definir o ordenamento mais adequado. Outra informação que pode ser abstraída do quadro acima, é que, em ambos ordenamentos feitos, a área de contato não aparece ordenada da maior para a menor, indicando que existem outros fatores que contribuem significativamente pra os resultados.

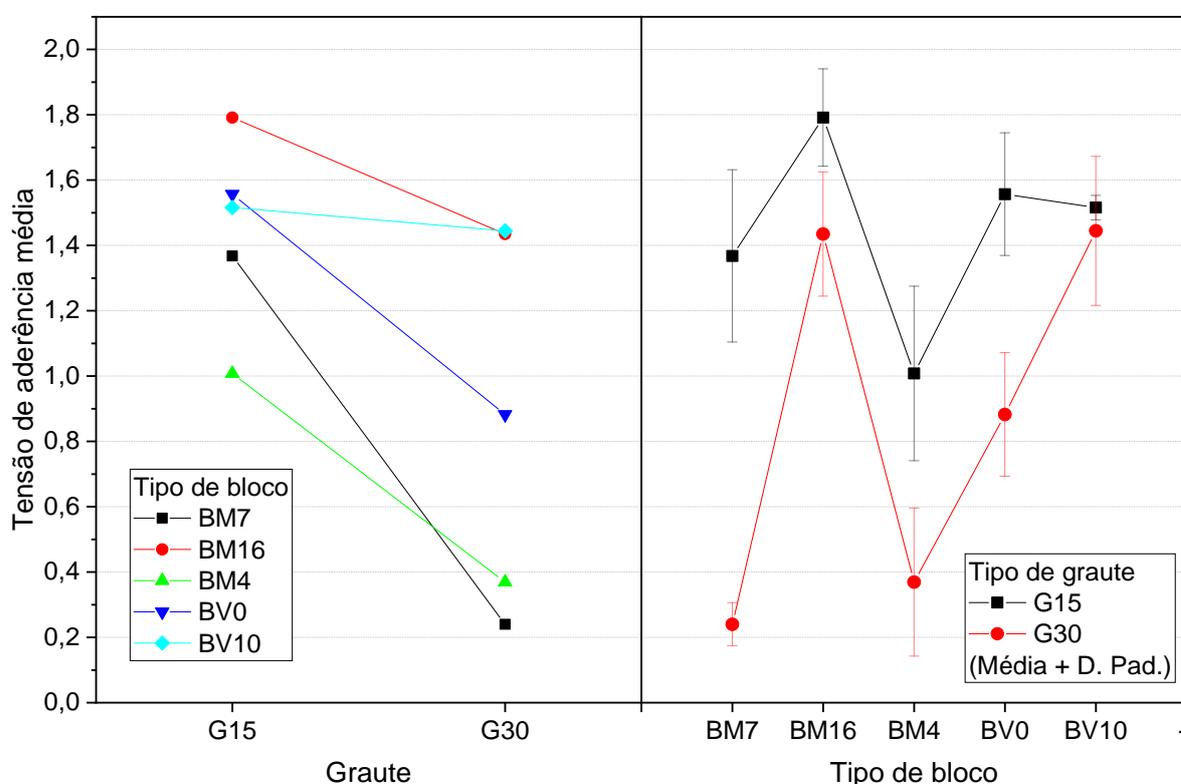
Portanto, para decidir sobre a escolha do tipo de bloco que proporciona a maior aderência, talvez seja interessante escolher o bloco em função da carga máxima obtida no ensaio de empurramento, pois é essa força máxima que será transmitida pela armadura contida no interior do graute até os blocos.

No caso da escolha entre dois tipos de blocos que proporcionem tensões de aderência semelhantes, porém, resistam à cargas máximas distintas, a escolha do tipo de bloco que resiste a maior carga, parece mais sensato.

4.2.1.1 Análise estatística da tensão de aderência

Na Figura 4.11 estão apresentados os gráficos com valores médios da tensão de aderência obtidos para cada combinação de tipo de bloco e graute. Esses resultados estão mostrados em função do tipo de graute na parte esquerda da figura e, em função do tipo de bloco, na parte direita da figura.

Figura 4.11 - Tensão de aderência média



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser visto de forma clara no lado esquerdo da Figura 4.11, todos os resultados obtidos com o graute tipo 30 MPa apresentaram redução na tensão de aderência. Essa redução ocorreu de forma mais discreta para o bloco tipo BV10 e, de forma mais acentuada para os blocos do tipo BM7. Dentre os tipos de bloco ensaiados com o graute 30 MPa, ficou claro que os maiores resultados foram alcançados pelos blocos que possuem maior quantidade de frisos na célula do bloco, ou seja, o bloco tipo BM16 dentre os blocos de parede maciça e, o bloco BV10, dentre os blocos de parede vazada.

No lado direito da figura acima, pode ser observada a tensão média de aderência e as barras que representam o desvio padrão de cada amostra. Nessa parte do gráfico, fica mais

fácil comparar a influência dos diferentes tipos de bloco nos resultados. Dentre os blocos de parede maciça, fica claro que a maior tensão de aderência foi alcançada com o bloco do tipo BM16, que apresenta maior número de frisos, para os dois tipos de graute utilizados. Para os blocos de parede vazada BV0 e BV10, os resultados obtidos com o graute 15 MPa são praticamente iguais, entretanto, para o graute 30 MPa, é expressivo o aumento da aderência proporcionado pelo bloco tipo BV10, que possui frisos, em relação ao tipo BV0 que possui parede lisa.

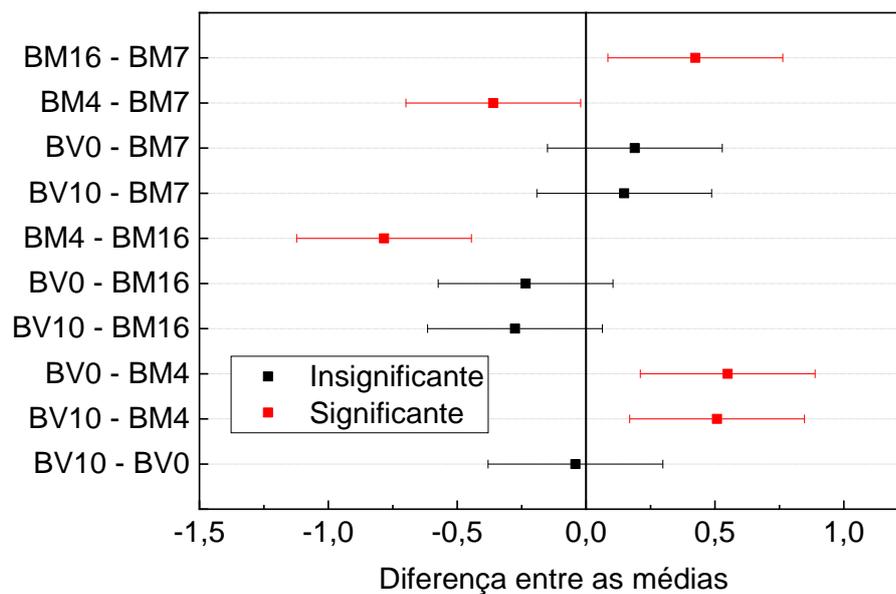
Para avaliar se o tipo de bloco e o tipo de graute apresentam influência significativa nas tensões de aderência obtidas, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com dois fatores, para um nível de confiança de 95%. Como resultado, foi encontrado que o tipo de bloco ($R^2 = 48\%$), o tipo de graute ($R^2 = 30\%$) e a interação entre tipos de bloco e graute ($R^2 = 11\%$), exercem influência significativa nos resultados de tensão de aderência.

Para avaliar com mais precisão a influência dos tipos de bloco nas médias de tensão de aderência obtidas, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com um único fator, considerando nível de confiança de 95%, para cada tipo de graute, separadamente.

Como resultado, foi demonstrado que o tipo de bloco apresenta diferença significativa na média das amostras, tanto com o graute 15 MPa, quanto com o graute 30 MPa. O R^2 apresentado pelos tipos de bloco com relação ao graute 15 MPa é de, aproximadamente, 67%, e, para o graute 30 MPa é de, aproximadamente, 90%. Ou seja, o tipo de bloco apresenta maior influência, ou capacidade de explicar os resultados de aderência, para os resultados obtidos com o graute 30 MPa, do que com o graute 15 MPa.

Para comparar diretamente e de forma individual se a diferença entre as médias de cada tipo de bloco são diferentes, para um mesmo tipo de graute, foi realizado o teste Tukey, com intervalo de confiança de 95%, apresentado na Figura 4.12 e Figura 4.13, respectivamente, para o graute 15 e 30 MPa.

Figura 4.12 - Teste Tukey para diferença entre as médias com graute 15 MPa



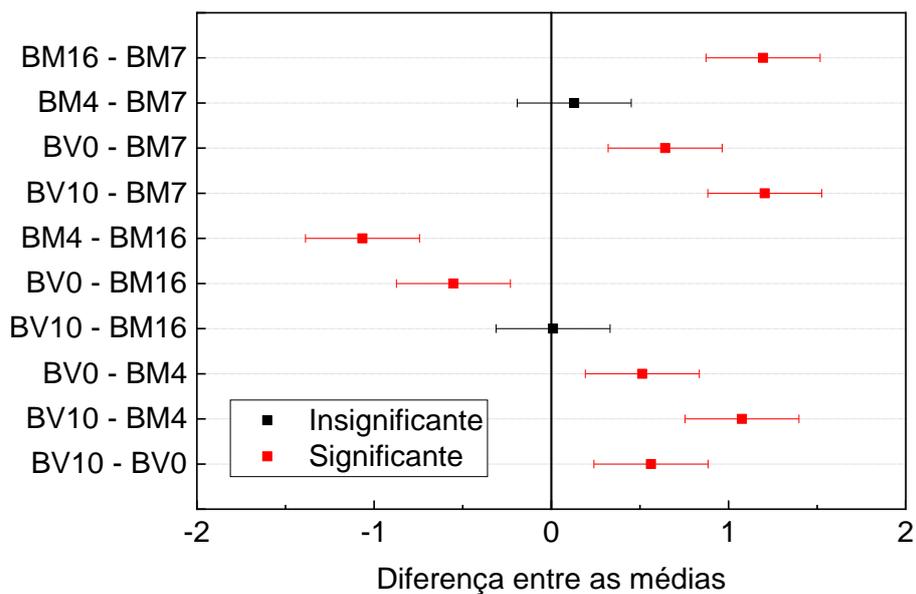
Fonte: Autor (2019).

Para as combinações de tipos de blocos representadas em vermelho na Figura 4.12, a diferença entre as médias é significativa e, para as combinações representadas em preto, a diferença entre médias é insignificante.

Como pode ser observado na Figura 4.12, as médias de tensão de aderência dos blocos de parede maciça (BM7, BM16 e BM4) são consideradas diferentes umas das outras, para o graute 15 MPa. A diferença entre a média apresentada pelo bloco BM4 para a média dos blocos tipo BV0 e BV10 é significativa, portanto, são diferentes.

As médias dos blocos tipo BM7 e BM16 são consideradas diferentes entre si, porém, equivalentes às médias apresentadas pelos blocos tipo BV0 e BV10. As médias dos blocos BV0 e BV10 são consideradas equivalentes para o uso do graute 15 MPa.

Figura 4.13 - Teste Tukey para diferença entre as médias com graute 30 MPa



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 4.13, as únicas médias de tensão de aderência que podem ser consideradas equivalentes com o uso do graute 30 MPa, para um nível de confiança de 95%, são a dos blocos tipo BM4 e BM7, assim como, dos blocos tipo BV10 e BM16. O restante das médias de tensão de aderência apresentadas com o graute 30 MPa são consideradas estatisticamente diferentes umas das outras.

Os únicos tipos de blocos que apresentaram médias equivalentes para os dois tipos de graute foram o BV10 e BM16, justamente, os que apresentam maior número de frisos nas células. Os blocos tipo BM4 e BM7 apresentaram valores equivalentes com o uso do graute 30 MPa, mas não com o do graute 15 MPa.

Para se obter uma maior compreensão da influência da geometria dos orifícios dos blocos na tensão de aderência, foi realizada uma ANOVA para cada graute, comparando-se a tensão de aderência média apresentada pelos blocos com resistência característica à compressão semelhantes, porém, geometria das células diferentes. Esse é o caso dos blocos tipo BM7 e BM16, assim como, BV0 e BV10. Dessa forma, será reduzida a influência da resistência à compressão dos blocos no resultado da aderência e, ampliada a influência da geometria dos orifícios.

A análise de variância demonstrou, tanto para o graute 15, quanto para o graute 30 MPa, que as médias das tensões de aderência obtidas com os blocos tipo BM7 e BM16, são significativamente diferentes para um nível de significância de 95%. Dessa forma, a geometria das células tem papel predominante na tensão de aderência desses tipos de blocos. Já para os blocos tipo BV0 e BV10, essa diferença significativa também é encontrada com a utilização

do graute 30 MPa, porém, não acontece com o graute 15 MPa, o que demonstra a interferência de outros fatores no resultado, além da geometria.

A influência da resistência à compressão do graute (tipo de graute) na tensão de aderência apresentada por cada tipo de bloco foi avaliada separadamente, com a utilização do teste t de Student. Comparou-se as médias de tensão de aderência apresentadas por cada tipo de graute, para um mesmo tipo de bloco.

A influência do tipo de graute se mostrou estatisticamente significativa, considerando um nível de confiança de 95% no teste t de Student, para a maioria dos tipos de bloco. A única exceção foi o bloco tipo BV10, que apresentou tensão de aderência apenas 1% superior com a utilização do graute 15 MPa em relação ao graute 30 MPa, ou seja, valor praticamente igual. O restante dos tipos de bloco apresentou médias estatisticamente diferentes perante a utilização do graute 15 e 30 MPa, comprovando a importância do tipo de graute para a tensão de aderência.

4.2.1.2 Tensão de compressão no ensaio de empurramento

Durante do ensaio de empurramento, uma força foi aplicada na parte superior do graute para expulsá-lo do interior do bloco. Enquanto houver aderência entre graute e bloco no decorrer do ensaio de empurramento, a força aplicada na seção transversal do graute vai aumentando, fazendo com que as tensões de compressão relativas à área transversal de graute fiquem maiores.

Esse aumento na tensão de compressão aplicada no graute pode ser visualizado no Quadro 4.31, bem como os valores da área transversal de graute, que são equivalentes à área da abertura (célula) de cada tipo de bloco.

Quadro 4.31 – Tensão máxima média de compressão no graute

Bloco	Graute	Carga máxima média (kN)	Área transversal média de graute (cm ²)	Compressão média no graute (Mpa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
Tipo 1	15 MPa	95,8	89	10,7	2,1	19,2
	30 MPa	16,7	89	1,9	0,5	27,4
Tipo 2	15 MPa	161,0	92	17,7	1,6	9,1
	30 MPa	128,8	92	14,1	1,8	13,1
Tipo 3	15 MPa	72,9	92	8,0	2,1	26,6
	30 MPa	26,6	92	2,9	1,8	61,5
Tipo 4	15 MPa	85,0	53	16,1	1,9	12,0
	30 MPa	48,3	53	9,1	2,0	21,6
Tipo 5	15 MPa	96,6	52	18,7	0,5	2,5
	30 MPa	96,5	52	18,6	2,2	12,0

Fonte: Autor (2019).

Ao se observar a área transversal da abertura dos blocos, que foi preenchida pelo graute no ensaio de empurramento, fica claro, que os valores são bem semelhantes para os blocos do tipo BM7, BM16 e BM4, que possuem parede maciça e, para os blocos do tipo BV0 e BV10, que possuem parede vazada. A área dos orifícios dos blocos de parede maciça é cerca de 42% superior à dos blocos de parede vazada.

As maiores tensões de compressão foram obtidas no ensaio de empurramento pelo bloco tipo BM16 (17,7 MPa), entre os blocos de parede maciça e, tipo BV10 (18,7 MPa), para os blocos de parede vazada. Entretanto, ao se comparar a tensão de compressão ocorrida no ensaio de empurramento, com a resistência à compressão obtida nos corpos de prova (100 X 200 mm) de graute, provenientes da mesma massada, verifica-se que a resistência à compressão no empurramento foi inferior à resistência dos corpos de prova. Dessa forma, a possibilidade de danificação do graute devido ao seu esmagamento dentro do bloco durante o ensaio de empurramento, fica pouco provável.

A resistência obtida com os corpos de prova, para cada massada do graute utilizada no empurramento, pode ser conferida no Quadro 4.32.

Quadro 4.32 - Resistência à compressão dos corpos de prova (100 X 200 mm) de graute

Massada do empurramento	Resistência média à compressão (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
Blocos tipo BM7 e BM4, com graute 15 MPa	24,9	0,6	2,5
Blocos tipo BM7 e BM4, com graute 30 MPa	43,0	1,4	3,3
Bloco tipo BM16, com graute 15 MPa	24,9	0,2	1,0
Bloco tipo BM16, com graute 30 MPa	41,9	0,7	1,7
Blocos tipo BV0 e BV10, com graute 15 MPa	23,4	1,7	7,3
Blocos tipo BV0 e BV10, com graute 30 MPa	41,0	2,3	5,6

Fonte: Autor (2019).

4.2.1.3 Modo de falha dos corpos de prova no ensaio de empurramento

Nesse subitem estão demonstradas as observações feitas sobre o modo de ruptura apresentado pelos corpos de prova de empurramento, comparando-se as diferenças existentes entre a utilização do graute 15 MPa, ou 30 MPa, no enchimento de cada tipo de bloco.

Comparando-se a forma de ruptura apresentada pelos blocos tipo BM7 com o graute 15 MPa e 30 MPa, no ensaio de empurramento, fica clara a diferença de comportamento apresentada, que deve ter refletido na diferença dos resultados dessas amostras. Esses blocos quando enchidos com o graute 30 MPa, praticamente, não apresentaram fissuras, só

o escorregamento do graute, sem danos ao mesmo. A imagem do bloco antes e depois do ensaio de empurramento pode ser vista na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Deslizamento do graute 30 MPa no bloco tipo BM7

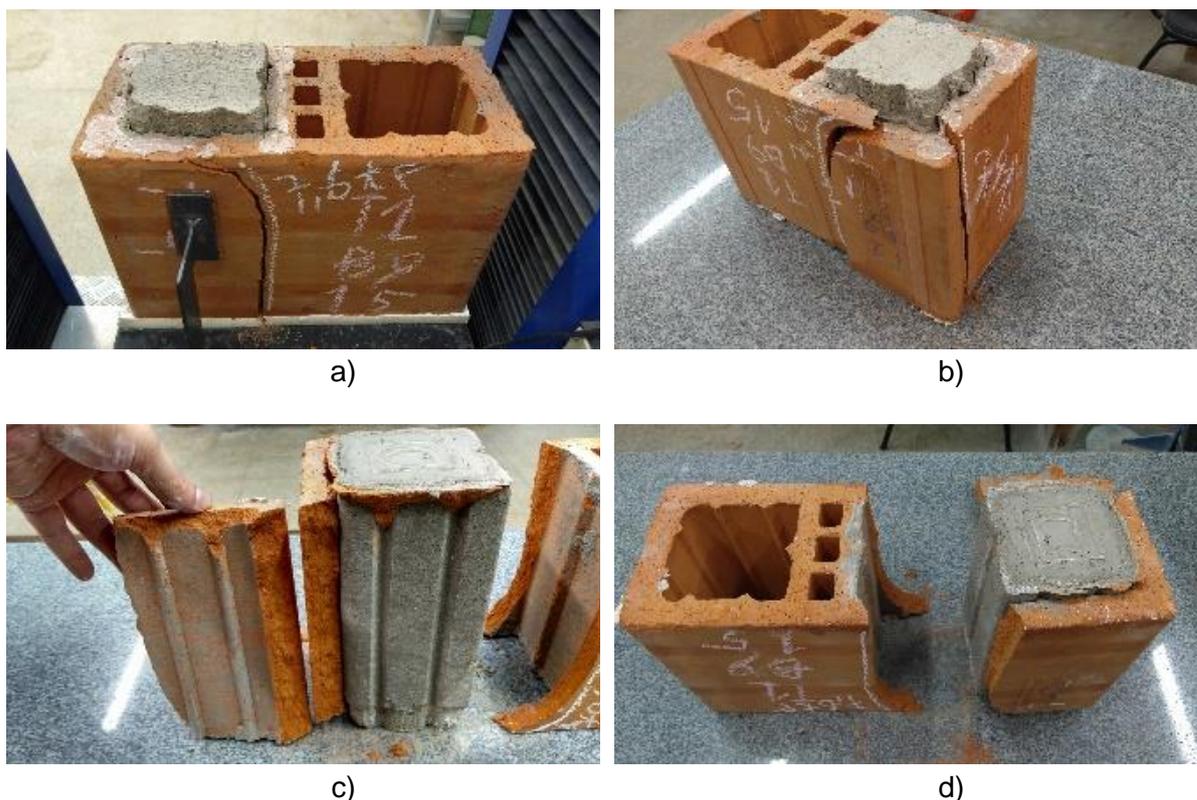


Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Corpo de prova antes do ensaio; b) Corpo de prova após ensaio.

Já para as amostras que usaram o graute de 15 MPa, os blocos apresentaram fissuras, porém, sem apresentar muitos danos ao graute. Essas fissuras podem variar na quantidade, formato e direção, mas seguiram a tendência de se formarem na parte inferior do bloco, na parede frontal e oposta do bloco, geralmente, na região de encontro do graute com a parede central do bloco, ou no meio da célula grauteada. Em seguida, a carga continuava a crescer no ensaio de empurramento, fazendo com que as fissuras iniciais formadas chegassem até a parte superior do bloco. Após a carga de pico, normalmente, se abriam mais fissuras, sendo essas mais recorrentes na parede lateral dos blocos. A origem dessas novas fissuras costumava ocorrer na parte superior da parede lateral e se dirigindo verticalmente ou inclinada para a parte de baixo do bloco.

Exemplos de fissura inicial na parede frontal e oposta podem ser observados na Figura 4.15-a. Na Figura 4.15-b pode ser identificada a fissura formada depois da carga de pico. Na Figura 4.15-c e Figura 4.15-d pode ser verificado que não houve dano ao graute e que a fissura se formou na interface entre graute e bloco.

Figura 4.15 - Detalhes das rupturas com bloco tipo BM7



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Fissura inicial formada na parede frontal e oposta; b) fissura formada depois da carga de pico; c) graute intacto no interior do bloco; d) posição da fissura coincidente com a interface da parede central do bloco com o graute.

Na comparação entre a forma de ruptura dos blocos do tipo BM16, com o graute 15 e 30 MPa, pode ser percebido que com ambos os tipos de graute, existe uma tendência de formação de fissuras iniciais verticais na parte inferior do bloco, na região da célula grauteada. Aparentemente, as fissuras dos corpos de prova utilizando o graute 30 MPa, tendem a se formar em um local mais próximo à interface entre a parede central do bloco e o graute, já as fissuras iniciais dos corpos de prova enchidos com o graute 15 MPa, tendem a se formar um pouco mais distante dessa região de interface, atravessando o graute. Exemplo disso pode ser verificado na Figura 4.16.

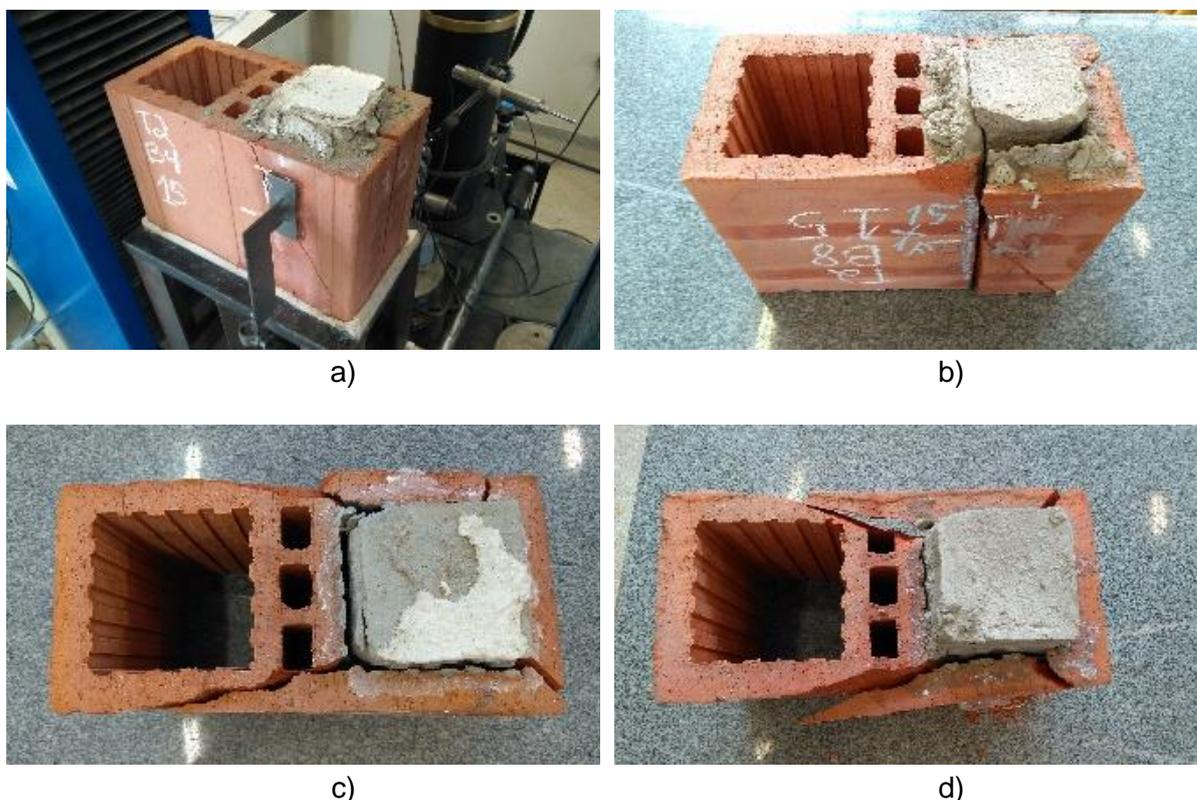
Figura 4.16 - Posição das fissuras com graute 15 e 30 MPa



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Fissura formada atravessando graute 15 MPa; b) fissura formada na interface da parede central com o graute 30 MPa.

O sentido das fissuras iniciais dos corpos de prova com ambos os tipos de graute foi normalmente, majoritariamente, vertical. Porém, os corpos de prova que continham o graute 30 MPa, apresentavam, aparentemente, uma maior tendência de inclinação e variação dessas fissuras, que invadiam, às vezes, até as células que não continham graute. As fissuras com ambos os tipos de graute se iniciavam na parte inferior do bloco e se estendiam à parte superior dos mesmos, conforme se aumentava a carga aplicada. Na Figura 4.17 podem ser constatadas as diferenças na formação das fissuras.

Figura 4.17 - Diferenças na formação de fissuras do bloco tipo BM16, com o uso do graute 15 e 30 MPa



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) e b) Fissuras formadas em blocos contendo graute 15 MPa; c) e d) fissuras formadas em blocos contendo graute 30 MPa.

Enquanto que as fissuras verticais formadas nos corpos de prova dotados do graute 30 MPa apresentavam fissuras que afetavam, praticamente, só o bloco cerâmico, as fissuras formadas nos corpos de prova enchidos com o graute 15 MPa, apresentaram a tendência de formar um plano de fissuração que ligava as paredes frontal e oposta do bloco, atravessando diretamente o graute. Esse comportamento observado com o graute 15 MPa pode ser indicativo da melhor aderência apresentada pelo material. A deterioração do graute nas amostras dotadas do graute 30 MPa, foi visivelmente inferior à deterioração das amostras dotadas do graute 15 MPa.

Na Figura 4.18 pode ser visualizada a formação de fissuras nas amostras de bloco tipo BM16 enchidas com graute 15 e com graute 30 MPa.

Após a carga de pico os corpos de prova dotados de ambos os tipos de graute apresentavam a tendência de formação de uma ou mais fissuras nas proximidades das arestas que ligam as paredes frontal e oposta do bloco à parede lateral. Essas novas fissuras tinham sentido vertical, com início, normalmente, na parte superior do bloco e se encaminhando até a parte inferior do mesmo. Esse comportamento pode ser conferido na Figura 4.18.

Outra observação que pode ser feita sobre o modo de ruptura obtido com os dois grautes é que as amostras dotadas com o graute 15 MPa, costumam deixar parte do graute aderido nas paredes do bloco cerâmicos, entretanto, com a utilização do graute 30 MPa, além de parte do graute ficar aderido ao bloco após a ruptura, parte do bloco, também fica aderido ao graute. Essa diferença na ruptura pode ser vista comparando-se a Figura 4.18-d e Figura 4.18-b. Talvez essa diferença identificada seja um dos motivos ligados à formação de fissuras diferenciadas com a utilização do graute 30 MPa, e com os resultados obtidos no ensaio de empurramento.

Ao se comparar a forma de ruptura dos corpos de prova do empurramento compostos pelo bloco tipo BM4, com os grautes 15 e 30 MPa, percebe-se que as amostras com ambos os tipos de graute apresentaram comportamento semelhante ao encontrado nos corpos de prova compostos pelo bloco tipo BM7. Ou seja, para a utilização do graute 15 MPa, ocorreu a tendência de formação de fissuras iniciais verticais nas paredes frontal e oposta dos blocos, se dirigindo para a parte superior dos mesmos, conforme se aumentava a carga do ensaio. Após atingir a carga de pico, era usual a formação de mais uma fissura na parede lateral, ou na aresta da mesma, com as paredes frontal e oposta. Entretanto, diferentemente do que ocorria com os corpos de prova compostos pelo bloco tipo BM7, para os blocos tipo BM4 dotados de graute 15 MPa, a inclinação da fissura formada na parede frontal e oposta possuía a tendência de ser diferente, apresentando origem na parte inferior do bloco, próximo à parede

lateral e se dirigindo de forma inclinada rumo à interface da parede central do bloco com o graute, no topo do bloco.

Figura 4.18 - Posição das fissuras e deterioração do graute para o bloco tipo BM16, com graute 15 e 30 MPa



a)



b)



c)



d)



e)

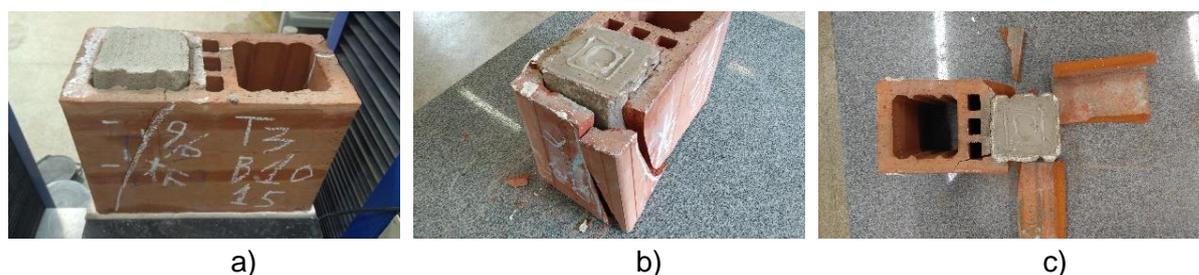


f)

Fonte: Autor (2019). Legenda: a) a d) Fissuras formadas em blocos contendo graute 15 MPa; e) e f) fissuras formadas em blocos contendo graute 30 MPa.

Um exemplo da fissura inicial pode ser verificado na Figura 4.19-a, para o bloco BM4 e graute 15 MPa. Na Figura 4.19-b pode ser verificada a formação da fissura na face lateral do bloco e na Figura 4.19-c, um exemplo da fissuração total para esse tipo de bloco, provocando pouco ou nenhum dano ao graute.

Figura 4.19 - Fissuras formadas para blocos do tipo BM4 enchidos com graute 15 MPa



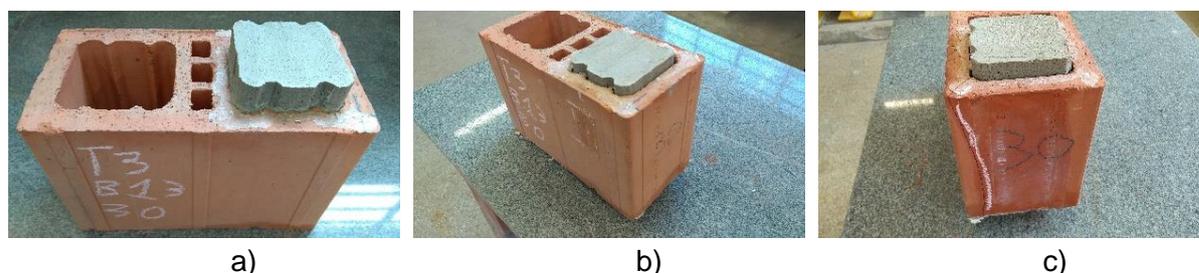
Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Fissura inicial; b) fissura na parede lateral; c) resultado das fissuras no bloco, sem danos no graute.

Para os blocos BM4 enchidos com o graute 30 MPa, ocorreu o deslizamento do graute do interior dos blocos, entretanto, em 4 corpos de prova foram encontradas fissuras verticais, normalmente, localizadas na parede frontal ou oposta, ou em uma aresta do bloco. Mas a quantidade de fissuras formadas com o uso do graute 30 MPa foi inferior ao normalmente encontrado com a utilização do graute 15 MPa.

Tanto para o emprego do graute 15, quanto do 30 MPa, o material de enchimento apresentou pouca ou nenhuma deterioração.

Na Figura 4.20 pode ser conferido o bloco antes e após o ensaio, demonstrando o escorregamento do enchimento, e uma das fissuras identificadas para essa amostra.

Figura 4.20 - Deslizamento de graute e fissuras para o bloco tipo BM4, enchidos com graute 30 MPa



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Corpo de prova antes do ensaio de empurramento; b) corpo de prova após ensaio de empurramento; c) fissura na aresta de um bloco.

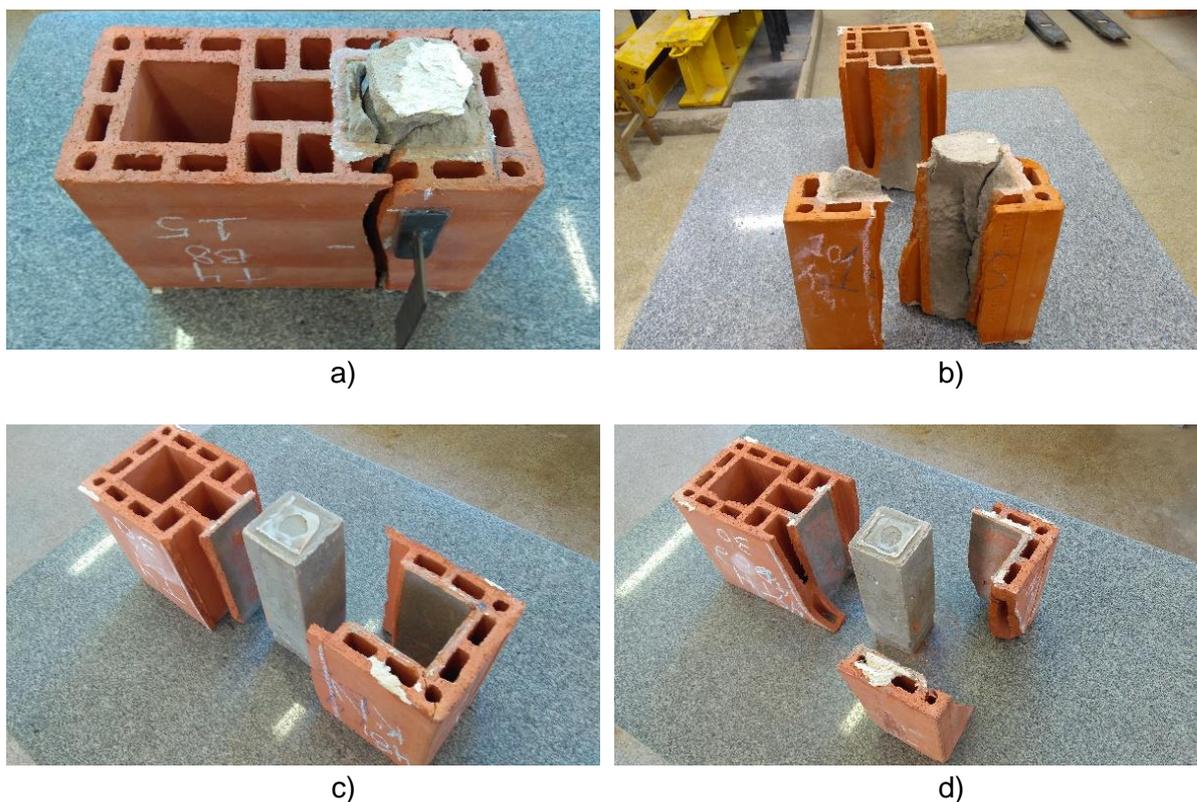
Comparando-se a ruptura dos corpos de prova feitos com o bloco tipo BV0, com o graute 15 e 30 MPa, pode-se concluir que, ambos os corpos de prova apresentam tendência semelhante de formação de fissuras iniciais verticais nas paredes frontal e oposta dos blocos, que vão se ampliando conforme o aumenta a força aplicada no ensaio. Após a carga de pico, as amostras enchidas com os dois tipos de graute também apresentaram a tendência de formação de fissuras verticais na parede lateral do bloco.

A diferença observada entre as amostras enchidas com o graute 15 e 30 MPa é que, com o uso do primeiro, as fissuras das paredes frontal e opostas tendem a se ligar através do

graute, causando deterioração do graute. Já para o caso do graute 30 MPa, o graute não apresenta fissuração significativa, pois as fissuras aparecem majoritariamente, no bloco.

Na figura Figura 4.21 pode ser observada as fissuras formadas e o estado de deterioração de cada tipo de graute empregado.

Figura 4.21 - Comparação das fissuras e deterioração dos blocos tipo BV0, com graute 15 e 30 MPa



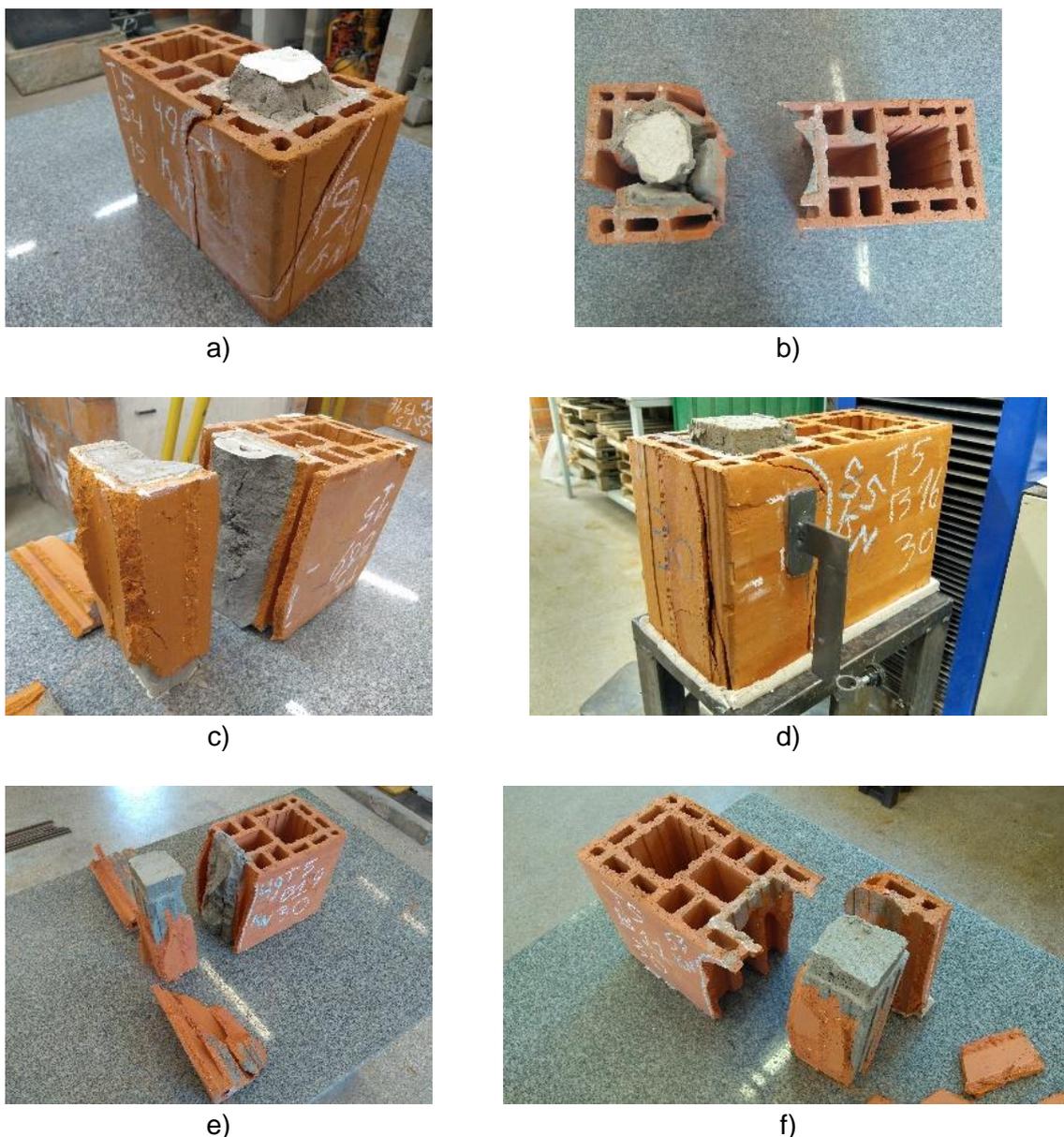
Fonte: Autor (2019). Legenda: a) e b) Blocos enchidos com graute 15 MPa; c) e d) blocos enchidos com graute 30 MPa.

A forma de ruptura apresentada pelas amostras de bloco tipo BV10 foram semelhantes, tanto para o graute 15 MPa, quanto para o graute 30 MPa. As primeiras fissuras em ambas as amostras, normalmente, se iniciavam na parte inferior das paredes frontal e oposta dos blocos. Após a carga de pico, usualmente, surgiam fissuras verticais ou inclinadas na parede lateral.

As duas amostras apresentaram deterioração do graute, devido ao processo de fissuração dos blocos, mas a intensidade da deterioração parece ser um pouco superior no graute 15 MPa, sendo que, em alguns casos, para o graute 30 MPa, pouca deterioração foi identificada.

As fissuras identificadas em alguns corpos de prova, assim como, a diferente deterioração apresentada por cada tipo de graute podem ser conferidas na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Fissuras e deterioração do graute para as amostras de bloco BV10 enchidas com graute 15 e 30 MPa



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) a c) Blocos enchidos com graute 15 MPa; d) a f) blocos enchidos com graute 30 MPa.

Observando-se a Figura 4.22-e e Figura 4.22-f, é possível identificar que a fissura apresentada na primeira atravessou o graute de 30 MPa, causando sua deterioração, entretanto, na segunda, o graute 30 MPa sofre poucos danos, pois a fissura atravessou somente o bloco.

A Figura 4.22-b e Figura 4.22-c mostram claramente que os blocos enchidos com graute 15 MPa sofreram maior deterioração do que para as amostras enchidas com o graute 30 MPa.

4.2.1.3.1 Considerações gerais sobre o modo de ruptura

O modo de ruptura da maioria dos corpos de prova utilizados no ensaio de empurramento ocorreu pela fissuração do bloco cerâmico. Esse comportamento também foi verificado nos ensaios realizados por Fischer (2016) e Guarnieri (2017).

A expectativa de resultado para as amostras que apresentassem rompimento pela fissuração do bloco seria que ocorresse um aumento da resistência de aderência conforme se aumenta a resistência do bloco empregado. Entretanto, para o caso de todos os blocos rompidos com graute 15 MPa, que apresentaram o modo de ruptura por fissuração do bloco, esse comportamento não foi identificado, devendo o processo de ruptura estar ligado à geometria do bloco e sua capacidade de interação com o enchimento, e não somente, à sua resistência.

Os valores de aderência apresentados pela carga máxima de ruptura são superiores aos valores nos quais ocorreram o início da abertura das fissuras, portanto, talvez seja importante avaliar as tensões que deram início ao processo de danificação dos blocos cerâmicos. Essa avaliação não seria necessária, entretanto, para os casos em que ocorreu o deslizamento do graute como modo de ruptura.

Um exemplo típico da fissuração mais apresentada pelos blocos cerâmicos durante o ensaio de empurramento pode ser visto na Figura 4.23.

Figura 4.23 - Fissuração do bloco

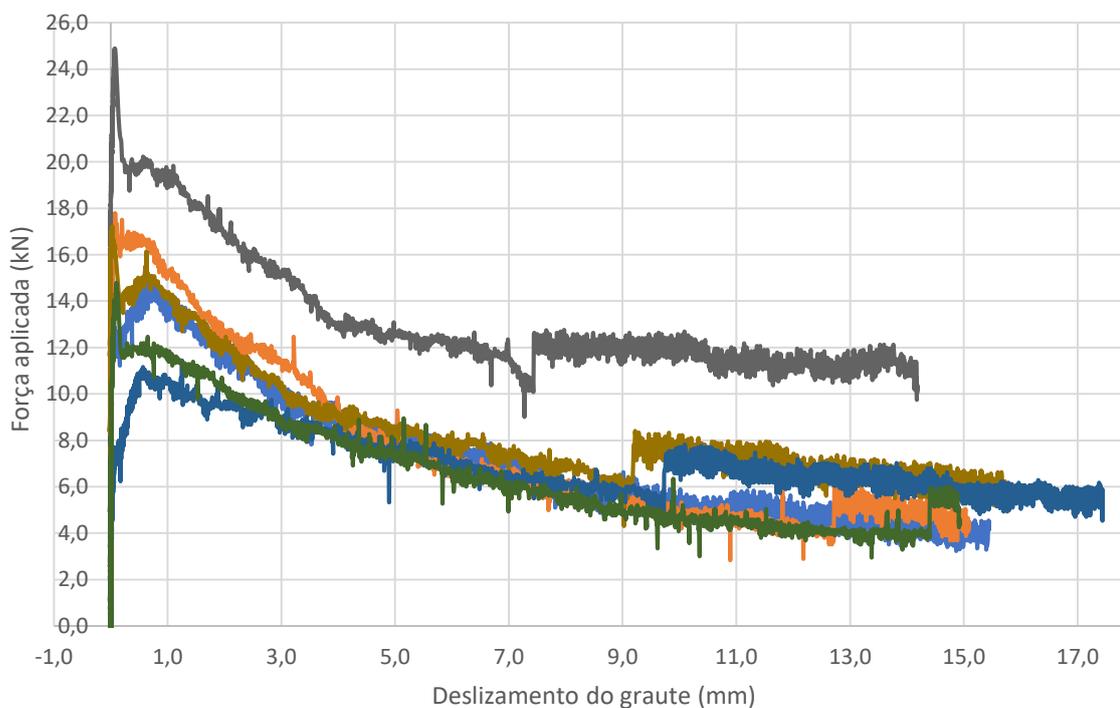


Fonte: Autor (2019).

Para o caso dos blocos do tipo BM7 e tipo BM4 enchidos com graute 30 MPa, a forma de ruptura principal identificada foi de deslizamento do graute. Com esses ensaios de empurramento, foi possível obter as curvas experimentais de força vs deslizamento demonstradas na Figura 4.24 e Figura 4.25, para cada um dos tipos de bloco.

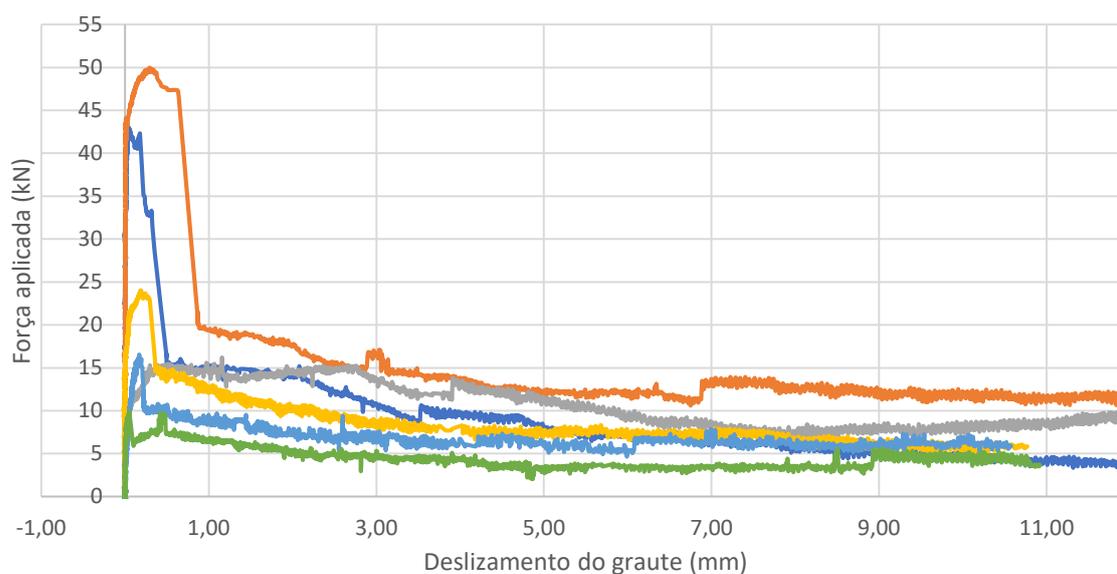
Esse modo de ruptura foi semelhante à encontrada na pesquisa de Izquierdo (2015). Entretanto, deve ser ressaltado que algumas amostras com o bloco tipo BM4 e graute 30 MPa apresentaram fissuras no bloco, enquanto outras não. Nos rompimentos evidenciados por Izquierdo (2015) só houve deslizamento do graute, sem abertura de fissuras.

Figura 4.24 – Curvas ensaio empurramento bloco tipo BM7 e graute 30 MPa



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.25 - Curvas ensaio empurramento bloco tipo BM4 e graute 30 MPa



Fonte: Autor (2019).

Com a aproximação das curvas obtidas nos ensaios de empurramento, observando-se o trecho em que os primeiros deslocamentos são identificados, fica possível perceber a

existência dos 3 mecanismos de aderência atuando. Os mecanismos de aderência podem ser observados nas figuras Figura 4.26 e Figura 4.27. Na parte inicial das curvas, no trecho que a carga sobe verticalmente, o mecanismo atuante é o de adesão. A segunda parte das curvas, que liga o eixo vertical até a carga de pico obtida por cada corpo de prova, é caracterizado pelo mecanismo de aderência mecânica. Após a carga de pico, o trecho remanescente é composto pelo mecanismo de atrito.

Figura 4.26 - Curvas bloco tipo BM7 graute 30 aproximada

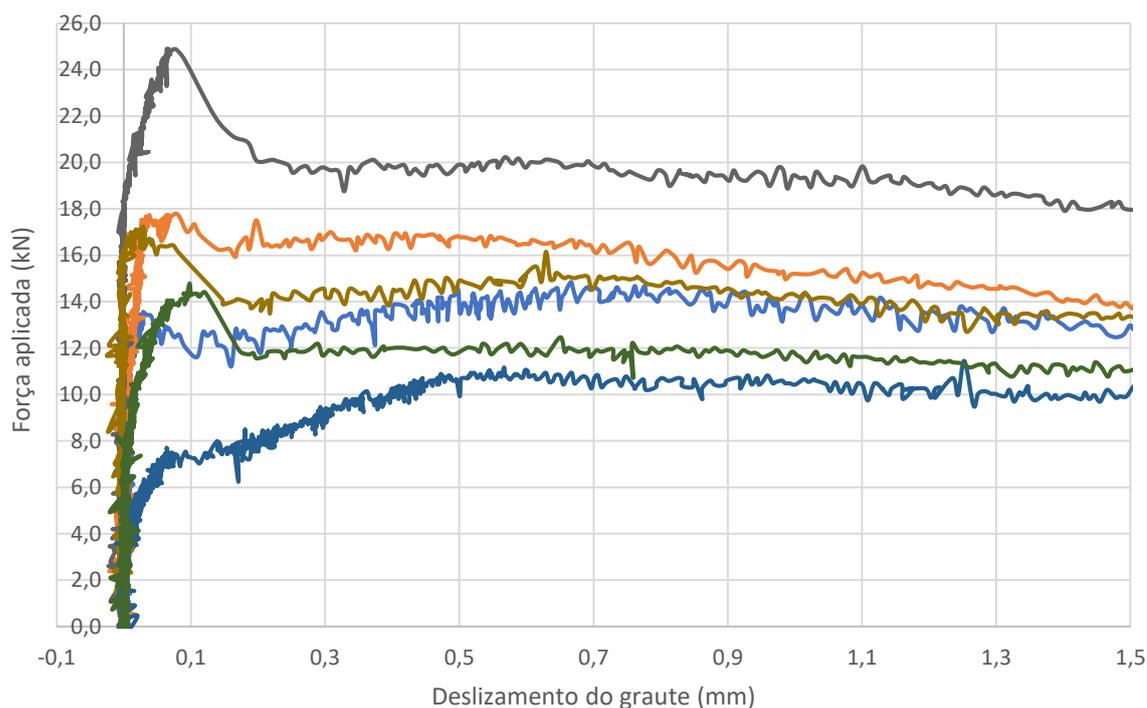
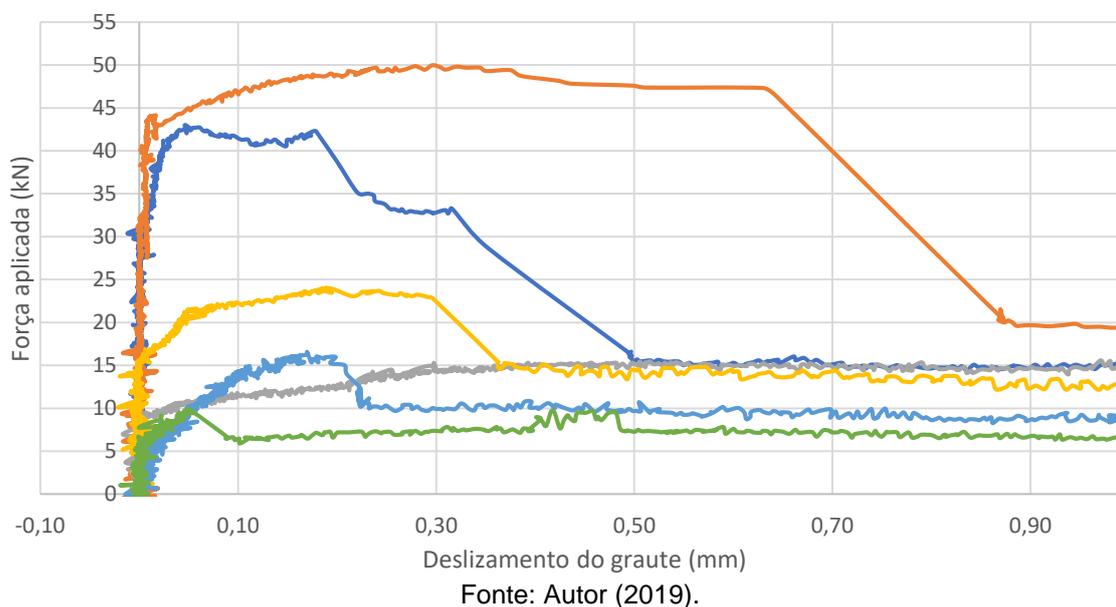


Figura 4.27 - Curvas bloco tipo BM4 graute 30 aproximada



Analisando-se as curvas acima, fica visível que o incremento de carga ocorre de maneira contínua, apresentando pouca inclinação na curva força vs deslizamento para o uso do bloco tipo BM7, até atingir um valor de pico. Já, para o bloco tipo BM4, as inclinações na parte inicial das curvas são um pouco mais acentuadas.

Para ambos os tipos de bloco, após ser atingida a carga de pico, ocorre uma redução acentuada da força aplicada, destacando o início do escorregamento acentuado do graute, indicando o início da atuação do mecanismo de atrito na aderência. Posteriormente, no trecho final das curvas, fica identificada uma resistência residual ao escorregamento, em que a força aplicada continua reduzindo, porém de forma bem mais lenta, conforme prossegue o processo de deslizamento do graute.

4.2.2 RETRAÇÃO DO GRAUTE NO INTERIOR DOS BLOCOS

Como o fenômeno de retração pode afetar a aderência entre graute e bloco pela redução da extensão de aderência, foi desenvolvido um procedimento para avaliar e mensurar o fenômeno da retração do graute no interior dos blocos cerâmicos. Esse procedimento consistiu no grauteamento dos orifícios de blocos e, após a cura no graute, o corte dessas amostras, para observação e medição da abertura de fissuras no interior desses corpos de prova.

Os valores médios de comprimento e área aproximada das fissuras que foram encontradas no graute, ou na interface entre graute e bloco, são mostrados no Quadro 4.33. Além dos valores das fissuras encontrados com cada combinação de tipos de graute e bloco, o Quadro 4.33 também apresenta a dimensão do perímetro e área de cada orifício medidas a partir das fotos retiradas. As fissuras totais mostradas no Quadro 4.33 são formadas pela soma das fissuras encontradas no graute com as formadas na interface.

Como pode ser observado no Quadro 4.33, os maiores comprimentos e áreas de fissuras obtidas no graute, dentre os blocos de parede maciça, foram obtidos com o bloco tipo BM4, para o graute de 15 MPa e BM7, para o graute 30 MPa. Dentre os blocos de parede vazada, a maior quantidade de fissuras foi encontrada com o graute 15 MPa para o bloco tipo BV0 e, para o graute 30 MPa, pelo tipo BV10. No caso dos 2 tipos de bloco de parede vazada, as maiores formações de comprimento e área de fissura no graute foram identificadas para o bloco tipo BV0, com a utilização do graute de 15 MPa e, BV10 com a utilização do graute de 30 MPa. O comprimento e área das fissuras formadas no graute apresenta uma tendência de ser maior com a utilização do graute 15 MPa, do que com o graute 30 MPa, para um mesmo tipo de bloco. A única exceção foi obtida como bloco tipo BV10. Essa tendência pode estar relacionada à maior resistência apresentada pelo graute 30 MPa. Se lembrarmos os dois

tipos de graute possuem módulo de elasticidade semelhante, entretanto a resistência à tração e compressão do graute 30 MPa é superior.

Quadro 4.33 - Comprimento e área aproximada das fissuras

Tipo de bloco	Tipo de graute	Fissuras apresentadas no graute		Fissuras apresentadas na interface bloco/graute		Fissuras totais		Perímetro do orifício do bloco (mm)	Área total do orifício do bloco (mm ²)
		Comp. (mm)	Área (mm ²)	Comp. (mm)	Área (mm ²)	Comp. (mm)	Área (mm ²)		
BM7	15 MPa	147	255	31	27	178	282	405	9199
	30 MPa	85	216	150	215	236	431	398	8904
BM16	15 MPa	149	324	0	0	149	324	475	9141
	30 MPa	61	138	102	149	163	287	491	9486
BM4	15 MPa	157	363	35	77	192	440	392	9439
	30 MPa	35	74	246	265	281	339	397	9549
BV0	15 MPa	121	319	0	0	121	319	290	5507
	30 MPa	52	115	122	188	174	303	290	5487
BV10	15 MPa	104	237	0	0	104	237	335	5247
	30 MPa	155	229	29	83	184	312	337	5235

Fonte: Autor (2019).

Dentre os blocos de parede maciça, a maior formação de comprimento e área de fissura na interface entre bloco e graute, foi obtido pelo bloco tipo BM4, para os dois tipos de graute. O bloco tipo BM4 é o que apresenta o menor perímetro e a menor quantidade de frisos no orifício grauteado. Dentre os blocos de parede vazada, não foram encontradas fissuras na interface, com a utilização do graute 15 MPa. Mas para o uso do graute 30 MPa, o bloco tipo BV0, que possui o menor perímetro do orifício e a menor quantidade de frisos, foi o que apresentou a maior formação de fissuras. Portanto, aparentemente, a formação de fissuras na interface dos blocos tende a reduzir, conforme se aumenta a quantidade de frisos presentes nos blocos, ou aumentando-se a área de contato com o graute na interface. São necessárias mais pesquisas para avaliar se a presença de maior número de frisos ou aumento da área de contato, exerce mais influência neste fenômeno de formação de fissuras na interface dos blocos devido à retração. Com certeza ambos fatores estão correlacionados uma vez que com o aumento do número de frisos, também ocorre o aumento da área de

contato, entretanto, o peso de cada um desses fatores na retração e formação de fissuras necessita maior conhecimento.

De maneira geral, o comprimento e área das fissuras formadas na interface entre bloco e graute, para um mesmo tipo de bloco, tende a ser maior com a utilização do graute 30 MPa.

As fissuras totais formadas nas amostras com blocos de parede maciça apresentam o maior comprimento para o tipo de bloco BM4, considerando ambos os tipos de graute. O menor comprimento de fissuras foi encontrado para o bloco tipo BM16, também para os dois tipos de graute. Com respeito à área de fissuras totais, para os blocos de parede maciça, a maior área foi encontrada para os blocos tipo BM4 e BM7, respectivamente, para os grautes 15 e 30 MPa. Os menores valores de área de fissura foram encontrados para os blocos tipo BM7 e BM16, respectivamente, para os grautes 15 e 30 MPa. Para os blocos de parede vazada, os resultados de comprimento e área de fissuras totais foram semelhantes com a utilização do graute 30 MPa, mas um pouco superior para o bloco tipo BV10. Entretanto, para o caso do graute 15 MPa, os resultados de comprimento e área de fissuras totais foram inferiores para o bloco tipo BV10, que possui maior perímetro e número frisos.

Aparentemente, quando comparando o comprimento das fissuras totais formadas para um mesmo tipo de bloco, verifica-se a tendência de ser maior o comprimento das fissuras formadas para o graute 30 MPa, em relação às formadas com o graute 15 MPa. Entretanto, essa tendência não se repete, quando considerado o aumento da área de fissuras totais.

De maneira geral, as fissuras formadas no graute tendem a ser maiores com a utilização do graute 15 MPa, entretanto, as fissuras da interface tendem a ser maiores com o graute 30 MPa. Dessa forma, pode haver indícios de que, tanto o graute 15 e 30 MPa tendem a apresentar o fenômeno de retração no interior dos blocos, entretanto, as características mecânicas do graute 15 MPa fazem com que as fissuras ocorram com mais facilidade no graute do que na interface, indicando melhor desempenho na interface. Já para o graute 30 MPa, ocorre o oposto, provavelmente, suas propriedades mecânicas evitem sua fissuração, mas apresentam desligamento da interface com o bloco, indicando melhor desempenho para resistir a formação de fissuras internas do que na interface.

Se for lembrado o ensaio de variação dimensional do graute, fica claro que o graute 30 MPa apresentou maior retração do que o graute 15 MPa. O que muda no interior dos blocos é que parte do movimento do graute será restringido pela aderência com os blocos, formando tensões que levam a formação de fissuras do graute, ou descolamento da interface entre blocos e grautes.

4.2.2.1 Retração percentual do graute nos blocos

Como a formação de fissuras que possuam o mesmo comprimento e área em diferentes tipos de blocos pode ter impacto diferente, dependendo do tamanho da área e perímetro do orifício dos blocos, considerou-se necessário fazer uma avaliação percentual do comprimento e área das fissuras formadas em cada tipo bloco.

Dessa forma, são apresentadas duas comparações percentuais de formação de fissuras. Uma relaciona o comprimento das fissuras com o comprimento do perímetro do orifício dos blocos (perímetro de contato) e, a outra relaciona a área das fissuras formadas com a área da seção transversal do orifício do bloco. Essa comparação percentual das fissuras permite compreender a proporção das fissuras formadas, indicando se existe uma maior formação percentual de fissuras para determinada combinação de tipo de bloco e graute, para outra.

Os valores percentuais de área de fissuras podem ser observados no Quadro 4.34.

Quadro 4.34 - Valor percentual da área de fissuras em relação à área do orifício do bloco

Tipo de bloco	Tipo de graute	Relação fissura no graute (%)	Relação fissura na interface bloco/graute (%)	Relação fissuras totais (%)
BM7	15 MPa	2,8%	0,3%	3,1%
	30 MPa	2,5%	2,4%	4,8%
BM16	15 MPa	3,5%	0,0%	3,5%
	30 MPa	1,4%	1,6%	3,0%
BM4	15 MPa	3,9%	0,8%	4,7%
	30 MPa	0,8%	2,8%	3,5%
BV0	15 MPa	5,8%	0,0%	5,8%
	30 MPa	2,1%	3,4%	5,5%
BV10	15 MPa	4,5%	0,0%	4,5%
	30 MPa	4,4%	1,6%	6,0%

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.34, para um mesmo tipo de bloco, a formação de fissuras no graute foi superior com o uso do graute 15 MPa, em relação ao graute 30 MPa, em todos os tipos de bloco. Já quanto à formação das fissuras na interface, ocorreu o contrário, houve a formação percentual maior de fissuras com a utilização do graute 30 MPa do que com o de 15 MPa.

Os maiores valores de fissuração no graute foram encontrados para os blocos tipo BV0 e BV10, que possuem paredes vazadas e, perímetro e área do orifício inferior aos demais blocos de parede maciça.

Dentre os blocos de parede maciça, os maiores valores percentuais de área de fissuras no graute foram encontrados nos blocos tipo BM4 e BM7, respectivamente, para o graute tipo 15 e 30 MPa. No caso dos blocos de parede vazada, os maiores valores percentuais de fissuração no graute foram encontrados nos blocos tipo BV0 e BV10, respectivamente, para o uso dos grautes 15 e 30 MPa.

Como pode ser observado no Quadro 4.34, todos os resultados percentuais de fissuração no graute sofreram redução, para um mesmo tipo de bloco, com a utilização do graute 30 MPa, em relação ao graute 15 MPa.

Os valores percentuais de área de fissuração na interface entre bloco e graute foram menores, para os tipos de bloco que possuem maior número de frisos no seu interior e maior perímetro do orifício, para ambos os tipos de graute.

Os resultados de fissuração na interface foram maiores, quando se compara um mesmo tipo de bloco, para o uso do graute 30 MPa, em relação ao graute 15 MPa. Isso ocorreu em todos os tipos de bloco.

A proporção de fissuras formadas na interface bloco/graute, para os blocos de parede maciça, mostra que os menores valores de formação de fissuras foram apresentados pelo bloco tipo BM16 (perímetro maior), e os maiores pelo tipo BM4 (perímetro menor), para ambos os tipos de graute. No caso dos blocos de parede vazada, não foram identificadas fissuras na interface com o uso do graute 15 MPa, entretanto, com o uso do graute 30 MPa, os valores percentuais de área atingidos pelo bloco tipo BV0 (menor perímetro) foram superiores ao bloco tipo BV10 (maior perímetro) e a todos os demais tipos de bloco.

O maior valor percentual da área de fissuras totais, dentre os blocos de parede maciça foi encontrado para os blocos tipo BM4 e BM7, respectivamente, para os grautes tipo 15 e 30 MPa. Os menores valores de fissuras totais foram encontrados para o bloco tipo BM7, no caso do graute 15 MPa e, BM16, no caso do graute 30 MPa. Dentre os blocos de parede vazada, as fissuras totais com graute 15 MPa foram maiores para o bloco tipo BV0, no entanto, para o uso do graute 30 MPa, o maior percentual de fissuras totais foi encontrado para o bloco tipo BV10.

Comparando-se todos os tipos de bloco, os que possuem os maiores valores percentuais de fissuras totais são os tipos BV0 e BV10, respectivamente, para o uso dos grautes 15 e 30 MPa. Esse valor pode estar atrelado à menor área transversal apresentada pelos blocos de parede vazada.

O comprimento das fissuras formadas foi relacionado percentualmente ao perímetro do orifício de cada bloco. Esses resultados estão demonstrados no Quadro 4.35.

Quadro 4.35 - Valor percentual do comprimento das fissuras em relação ao perímetro do orifício de cada bloco

Tipo de bloco	Tipo de graute	Relação fissura no graute	Relação fissura na interface bloco/graute	Relação fissuras total
BM7	15 MPa	36,3%	7,7%	44,0%
	30 MPa	21,6%	37,7%	59,2%
BM16	15 MPa	31,4%	0,0%	31,4%
	30 MPa	12,4%	20,8%	33,2%
BM4	15 MPa	40,0%	9,0%	49,0%
	30 MPa	8,8%	62,0%	70,8%
BV0	15 MPa	41,6%	0,0%	41,6%
	30 MPa	17,8%	42,2%	60,0%
BV10	15 MPa	31,0%	0,0%	31,0%
	30 MPa	46,1%	8,5%	54,6%

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser percebido no Quadro 4.35, dentre todos os tipos de bloco, os maiores valores percentuais de comprimento de fissura no graute, relativos ao perímetro dos furos, foram encontrados nos blocos tipo BV0 e BV10, respectivamente, para os grautes 15 e 30 MPa.

Comparando-se os blocos de parede maciça, os maiores valores percentuais de comprimento de fissura no graute foram obtidos com os blocos tipo BM4 e BM7, respectivamente, para o uso dos grautes 15 e 30 MPa.

Com exceção do bloco tipo BV10, a relação de fissuras no graute foi superior para um mesmo tipo de bloco, quando empregado o graute 15 MPa. Isso ocorreu para todos os demais tipos de bloco.

Analisando-se o comprimento percentual de fissuras na interface, o bloco tipo BM4 apresentou os maiores resultados, para ambos os tipos de graute e dentre todos os tipos de bloco. Dentre os blocos de parede vazada, não foram observadas fissuras com o uso do graute 15 MPa, mas com o graute 30 MPa, os maiores valores percentuais de fissuras foram encontrados para o bloco tipo BV0 (menor perímetro), por uma grande margem. Dentre os blocos de parede maciça, os menores valores de fissura na interface foram encontrados para o bloco tipo BM16, que possui maior número de frisos, considerando ambos os tipos de graute.

No caso das fissuras de interface, os valores percentuais de comprimento com o uso do graute 15 MPa sempre foram inferiores aos encontrados com o graute 30 MPa, considerando o mesmo tipo de bloco. Esse fato ocorreu para todos os tipos de bloco. Se analisada a diferença entre o aumento percentual do comprimento de fissuras, entre o graute 15 e 30 MPa, para cada tipo de bloco, será constatado que o valor da diferença será menor

para os blocos que possuem maior quantidade de frisos e maior perímetro. Esse é o caso do bloco tipo BM16 dentre os blocos de parede maciça e BV10, dentre os blocos de parede vazada.

Considerando-se os valores percentuais das fissuras totais, oriundas da soma das fissuras de interface e das fissuras do graute, os maiores valores percentuais de fissuras totais foram encontrados, considerando-se um mesmo tipo de bloco, como uso do graute 30 MPa, em comparação ao graute 15 MPa. Essa ordem se manteve para cada tipo de bloco.

Dentre todos os tipos de bloco e para os dois tipos de graute, o bloco tipo BM4 foi o que apresentou a maior relação de fissuras totais. Dentre os blocos de parede maciça, o bloco tipo BM16 apresentou os menores valores de fissuras totais, tanto no uso do graute 15 MPa, quanto no uso do graute 30 MPa. Dentre os blocos de parede vazada, o bloco tipo BV0 apresentou os maiores valores percentuais do comprimento de fissuras, para o uso de ambos os grautes.

4.2.2.2 Tensão de aderência desconsiderando a retração

Ao se verificar a formação de fissuras na interface entre grautes e blocos, percebe-se que parte da superfície dos materiais não está mais em contato e, portanto, não estaria mais contribuindo para a aderência dos mesmos.

Nesse sentido, se for utilizada a área de perda de contato identificada nos ensaios de retração para corrigir a tensão atuante em cada combinação de tipo de bloco e graute, seria possível obter informações mais precisas sobre a ligação dos materiais.

Para realizar essa correção na tensão de aderência, a área de contato de cada combinação de bloco e graute deve ser corrigida, descontando-se o valor percentual de área de contato perdida entre os materiais devido à retração do graute (P.P.C.). Dessa forma, a tensão de aderência corrigida será composta pela divisão da carga média máxima (Q_{max}) obtida no ensaio de empurramento, pela área de contato média de cada tipo de bloco, corrigida descontando-se o valor percentual de área perdido pela retração do enchimento.

Dessa forma, ao se dividir a carga máxima média obtida no ensaio de empurramento, para cada combinação de bloco e graute, pela área de contato corrigida, é possível obter a tensão de aderência corrigida destes materiais.

No Quadro 4.36 pode ser observada a área e tensão de aderência corrigida para cada combinação de bloco e graute.

Deve-se ressaltar, entretanto, que essa tensão é apenas uma aproximação do seu valor real, haja visto que não são todos os corpos de prova que apresentaram o mesmo nível de retração e, é bem provável, que a retração não seja constante para toda a altura dos blocos.

Além disso, a massada utilizada para verificação da retração foi diferente da empregada no empurramento, o que também introduz variações.

Quadro 4.36 - Tensão de aderência corrigida pela retração

Tipo de bloco	Graute	Carga máxima média (kN)	Área de contato original (cm ²)	Tensão de aderência original (MPa)	Percentual de área de contato perdida (%)	Área de contato corrigida (cm ²)	Tensão de aderência corrigida (MPa)
BM7	15 MPa	95,8	701	1,37	7,7	647	1,48
	30 MPa	16,7	698	0,24	37,8	434	0,38
BM16	15 MPa	161	899	1,80	0,0	899	1,79
	30 MPa	128,8	899	1,43	20,9	711	1,81
BM4	15 MPa	72,9	725	1,01	9,0	660	1,11
	30 MPa	26,6	724	0,37	62,0	275	0,97
BV0	15 MPa	85	546	1,56	0,0	546	1,56
	30 MPa	48,3	548	0,88	42,2	317	1,52
BV10	15 MPa	96,6	637	1,52	0,0	637	1,52
	30 MPa	96,5	638	1,51	8,5	584	1,65

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 4.36, mesmo com a tensão corrigida o bloco tipo BM16 continua sendo, dentre os blocos de parede maciça, o que apresentou os melhores resultados de aderência, para ambos os tipos de graute. Além disso, a tensão de aderência obtida pelo bloco tipo BM16 com cada tipo de graute apresentava uma diferença significativa, porém, com a tensão de aderência corrigida os resultados ficam bem semelhantes e, até maiores com o uso do graute 30 MPa.

No caso dos blocos de parede vazada, o bloco tipo BV0 que apresentava tensões bem distintas com cada tipo de graute, passou a apresentar tensão corrigida semelhante para os dois tipos de graute. No caso do bloco tipo BV10, a tensão de aderência corrigida foi superior com o graute 30 MPa, alterando o resultado da tensão original, que era semelhante com o uso de ambos os tipos de graute.

De maneira geral, a ordem dos tipos de bloco que apresentaram maiores valores de tensão de aderência original, para um mesmo tipo de graute, não foi muito alterada com a obtenção da tensão corrigida (vide resultados dos blocos de paredes maciças). Entretanto, para um mesmo tipo de bloco, ao se comparar os resultados obtidos com os dois tipos de graute, nota-se que os tipos de bloco que apresentavam grande diferença de tensão comparando-se o graute 15 com o 30 MPa, passaram a apresentar diferenças inferiores na tensão de aderência corrigida. Esse resultado indica que boa parte dos resultados diferentes obtidos para um mesmo tipo de bloco pode estar relacionada à retração do material de

enchimento. Entretanto, como essa a diferença ainda se manteve preponderante para alguns tipos de bloco (vide bloco tipo BM4), ainda existem fatores que afetam os resultados da tensão de aderência que, provavelmente, não são oriundos da retração do enchimento.

4.3 ENSAIO DE ARRANCAMENTO (PULL-OUT)

No Quadro 4.37 estão demonstrados os resultados de tensão máxima média no aço obtidos nos ensaios de arrancamento (Pull-out). No total, foram ensaiadas 8 paredes para cada tipo de bloco, sendo 4 executadas com o graute 15 MPa e 4 com o graute 30 MPa. Os blocos escolhidos para este ensaio foram do tipo BM7, BM16 e BV10.

Quadro 4.37 – Tensão máxima média do aço no arrancamento

Tipo de bloco	Graute	Força máxima (kN)	Tensão máx. aço (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
BM7	15 MPa*	120,1	598,6	49,5	8,3
	30 MPa*	94,7	471,8	22,0	4,7
BM16	15 MPa	121,1	613,0	29,2	4,8
	30 MPa	105,1	524,0	31,4	6,0
BV10	15 MPa	116,6	581,7	19,2	3,3
	30 MPa	108,5	541,4	18,2	3,4

Fonte: Autor (2019). (*) Uma das paredes foi desconsiderada no cálculo, devido ao escorregamento do aço em cargas bem inferiores.

Como pode ser observado no Quadro 4.37, da mesma forma que ocorreu no ensaio de empurramento, as amostras de paredes preenchidas com o graute de 15 MPa apresentaram valores superiores de tensão no aço, do que as que foram moldadas com graute 30 MPa, considerando um mesmo tipo de bloco. Esse resultado se repetiu para cada tipo de bloco.

Outro fator que pode ter contribuído para a queda de desempenho no arrancamento das paredes preenchidas com o graute 30 MPa é a formação de fissuras no enchimento. Como apresentado anteriormente, o percentual do comprimento de fissuras totais e na interface entre bloco e graute, foi superior com o uso do graute 30 MPa, em relação ao graute 15 MPa. Os valores percentuais de fissuras formadas na interface como uso do graute 30 MPa foram 8,5%, 20,8% e 37,7%, respectivamente, com o uso dos blocos tipo BV10, BM16, BM7. Como pode ser percebido pela comparação do percentual de fissuras formadas para cada tipo de bloco com o graute 30 MPa, os blocos que apresentaram os menores valores de fissuras foram os mesmos que apresentaram os maiores valores de tensão no aço do arrancamento.

O aumento da tensão obtido com a utilização do graute 15 MPa, em relação ao graute 30 MPa, foi de, aproximadamente, 21%, 15% e 7%, respectivamente, para os blocos tipo BM7, BM16 e BV10. Curiosamente, a diferença entre os valores de tensão no aço do arrancamento encontrados com o graute 15 e 30 MPa, seguem a mesma tendência apresentada no ensaio de empurramento, em que a diferença de tensão entre os dois tipos de graute foi de 82% para o bloco tipo BM7, 21% para o bloco tipo BM16 e 1% para o bloco BV10. Ou seja, os tipos de blocos que apresentaram maior diferença de tensão no ensaio de empurramento, comparando um graute com o outro, também apresentaram maior diferença no ensaio de arrancamento.

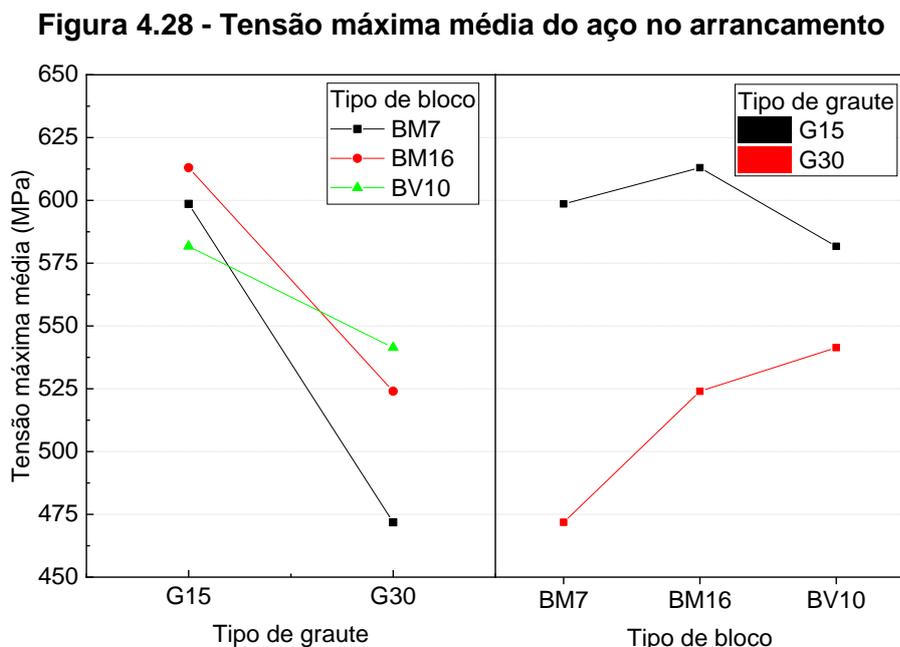
A maior tensão média no aço foi obtida pelas paredes compostas com blocos do tipo BM16 para o uso do graute 15 MPa e, BV10 para o uso do graute 30 MPa. Coincidentemente, esses também foram os tipos de bloco que apresentaram os maiores valores de tensão de aderência no ensaio de empurramento, para cada tipo de graute.

As menores tensões médias no aço foram obtidas pelas paredes construídas com blocos do tipo BV10, para o uso do graute 15 MPa e, BM7 para o uso do graute 30 MPa. Coincidentemente, a combinação de tipo de bloco BM7 e graute 30 MPa também apresentou os menores resultados no ensaio de tensão de aderência, entre todas as amostras, no ensaio de empurramento. Quanto a combinação de tipo de bloco BV10 e graute 15 MPa no ensaio de empurramento, a tensão de aderência apresentou valores intermediários, alcançando valor de tensão superior ao bloco BM7. Esse resultado indica que existem outros fatores além da tensão de aderência que podem contribuir para os resultados no arrancamento.

Se comparados os resultados de arrancamento obtidos entre os blocos tipo BM7 e BM16, que possuem resistência à compressão semelhante, porém geometria da célula do bloco diferentes, verifica-se que ocorreu em aumento na tensão no aço do arrancamento com o uso do bloco tipo BM16. Esse aumento foi de, aproximadamente, 4% com o uso do graute 15 MPa e, 10% com o uso do graute 30 MPa. No ensaio de empurramento, também foi identificado aumento da tensão de aderência com o uso do bloco tipo BM16, em relação ao bloco tipo BM7, de 24% para o graute 15 MPa e, 83% para o uso do graute 30 MPa. Portanto, novamente, os resultados do arrancamento e empurramento apresentaram tendências semelhantes, uma vez que o aumento percentual dos resultados obtidos com o bloco tipo BM16 foi maior, em ambos os ensaios, com o uso do graute 30 MPa.

4.3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO (PULL-OUT)

Para ser possível comparar com maior facilidade os resultados obtidos, a tensão máxima média no aço está exposta na Figura 4.28, separada por tipo de graute e por tipo de bloco.



Fonte: Autor (2019).

Para verificar se a alteração dos tipos de bloco ou tipo de graute exercem influência significativa sobre a tensão máxima no aço obtida no ensaio de arrancamento, foi realizada a análise de variância (ANOVA). A análise de variância foi realizada considerando dois fatores, o tipo de bloco e o tipo de graute, para um nível de significância de 95%.

Os resultados dessa ANOVA apontam que não existe diferença significativa entre as médias considerando o tipo de bloco ($R^2 \cong 7\%$), portanto o tipo de bloco não exerceu muita influência. As alterações nas médias provocadas pela alteração do tipo de graute, podem ser consideradas significantes ($R^2 \cong 65\%$), portanto, o tipo de graute exerce influência nos resultados. Além disso, a interação entre o tipo de bloco e tipo de graute também proporciona influência significativa nos resultados ($R^2 \cong 11\%$).

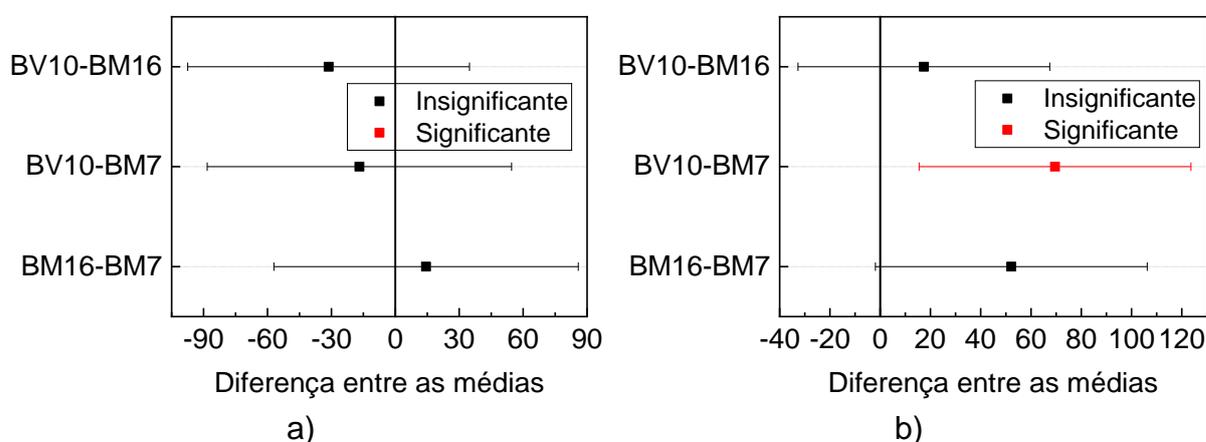
Para verificar se existe diferença significativa entre os resultados de cada tipo de bloco, para um mesmo tipo de graute, foi realizada a análise de variância, de um fator, o tipo de bloco, para cada tipo de graute. A ANOVA realizada nos resultados obtidos com o graute 15 MPa aponta que não há diferenças significativas entre as médias dos tipos de bloco, portanto tipo de bloco não exerce influência significativa. A ANOVA realizada para os resultados

obtidos com o graute 30 MPa aponta que existe diferença significativa entre as médias e, portanto, o tipo de bloco exerce influência nos resultados.

Assim como no ensaio de empurramento, no arrancamento também foi verificada maior influência do tipo de bloco quando se utiliza o graute 30 MPa.

Para verificar a diferença existente entre cada tipo de bloco, para um mesmo tipo de graute, foi empregado o teste Tukey para um nível de significância de 95%. Esses resultados podem ser verificados na Figura 4.29.

Figura 4.29 - Comparação entre médias (Tukey) para mesmo tipo de graute



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Graute 15 MPa; b) Graute 30 MPa.

Como pode ser observado na Figura 4.29., não existe diferença significativa entre os tipos de bloco para o uso do graute 15 MPa, portanto, os resultados são equivalentes. Com o uso do graute 30 MPa, só existe diferença significativa entre as médias de tensão máxima no aço do arrancamento entre os blocos tipo BV10 e BM7.

Relembrando os resultados do empurramento, para o uso do graute 15 MPa, os resultados apresentados pelo bloco tipo BV10 foram considerados equivalentes aos dos blocos tipo BM7 e BM16, assim como no ensaio de arrancamento. Entretanto, para a comparação dos resultados dos blocos BM16 e BM7, os resultados do empurramento foram considerados significativamente diferentes, diferentemente do que ocorreu no ensaio de arrancamento, em que foram considerados equivalentes. Provavelmente, esse resultado indicando que os blocos tipo BV10 e BM7 não foram considerados equivalentes no empurramento, mas foram considerados equivalentes no arrancamento, seja um indício de que o travamento mecânico proporcionado pelo formato geométrico das células e intercalação dos frisos, entre as fiadas do bloco tipo BM7, seja capaz de compensar a existência de tensão de aderência inferior apresentada por esse tipo de bloco.

Deve ser ressaltado que, no caso do ensaio de empurramento que é realizado somente em um bloco cerâmico, não se considera a existência do travamento mecânico do graute que pode existir na sobreposição das fiadas de blocos na execução das paredes. Esse travamento mecânico pode ser intencional, como no caso do formato geométrico do tipo de bloco BM7, ou ser involuntário, no caso de um desalinhamento ou desaprumo acentuado dos orifícios dos blocos de fiadas sobrepostas. Portanto, ressalta-se a importância do ensaio de arrancamento na avaliação da aderência, pois tem a capacidade de complementar os resultados do empurramento, com a avaliação do travamento existente entre as fiadas das paredes.

Para verificar a existência significativa de diferença entre as médias de tensão no aço do arrancamento obtidas para um mesmo tipo de bloco, por grautes diferentes, realizou-se a ANOVA de um fator. A análise de variância apontou que existe diferença significativa entre as médias dos resultados obtidos com o graute 15 e 30 MPa, para um mesmo tipo de bloco. Esse resultado se repetiu para todos os tipos de bloco.

4.3.2 TENSÕES ESTIMADAS NO GRAUTE E NA INTERFACE

Se a carga máxima obtida no ensaio de arrancamento for dividida pela área da seção transversal do graute, que está no interior do orifício dos blocos que continham a barra, é possível estimar a tensão atuante na seção transversal do graute, e que está sendo transmitida ao mesmo pela barra de aço.

No Quadro 4.38 pode ser visualizada a tensão máxima média obtida na área da seção transversal de graute.

Quadro 4.38 - Tensão na seção transversal de graute no arrancamento

Tipo de bloco	Graute	Força máxima (kN)	Área transversal de graute (cm ²)	Tensão Transv. graute (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
BM7	15 MPa*	120,1	89	13,5	1,1	8,0
	30 MPa*	94,7	89	10,6	0,5	4,4
BM16	15 MPa	121,1	92	13,2	0,7	5,7
	30 MPa	105,1	92	11,5	0,7	6,2
BV10	15 MPa	116,6	52	22,6	0,8	3,5
	30 MPa	108,5	52	21,0	0,8	3,9

Fonte: Autor (2019). (*) Uma das paredes foi desconsiderada no cálculo, devido ao escorregamento do aço em cargas bem inferiores.

Como pode ser observado no Quadro 4.38, as maiores tensões na seção transversal de graute foram obtidas pelo bloco tipo BV10, que é de parede vazada e possui a menor área no orifício dos blocos. No caso das paredes construídas com esse bloco e com graute 15 MPa, a tensão na seção transversal atingiu valores maiores do que a resistência à

compressão do graute, podendo ter contribuído para deterioração do mesmo durante o ensaio.

No caso dos blocos tipo BM7 e BM16, que possuem áreas semelhantes, as tensões na seção transversal de graute foram semelhantes para ambos os tipos de graute.

Se a carga máxima obtida no ensaio de arrancamento for dividida pela área de contato entre os blocos e graute no orifício que contem a barra de aço, pode-se estimar a tensão de aderência atuante na parede durante o ensaio, considerando uma distribuição uniforme da tensão em toda a altura da parede.

No Quadro 4.39 pode ser visualizado a tensão máxima média na área de contato entre blocos e grautes nas paredes.

Quadro 4.39 – Tensão média na área de contato entre graute e blocos das paredes no arrancamento

Tipo de bloco	Graute	Força máxima (kN)	Área de contato graute/parede (cm ²)	Tensão máxima contato (MPa)	D. Pad. (MPa)	C. V. (%)
BM7	15 MPa*	120,1	69897	0,017	0,0	8,0
	30 MPa*	94,7	69897	0,014	0,0	4,4
BM16	15 MPa	121,1	89912	0,014	0,0	4,5
	30 MPa	105,1	89912	0,012	0,0	6,2
BV10	15 MPa	116,6	63755	0,018	0,0	3,5
	30 MPa	108,5	63755	0,017	0,0	3,9

Fonte: Autor (2019). (*) Uma das paredes foi desconsiderada no cálculo, devido ao escorregamento do aço em cargas bem inferiores.

Os maiores valores de tensão na região de contato entre blocos e graute nas paredes durante o arrancamento foram encontradas para o bloco tipo BV10, para o uso dos dois tipos de graute, pois este possui a menor área de contato graute/parede.

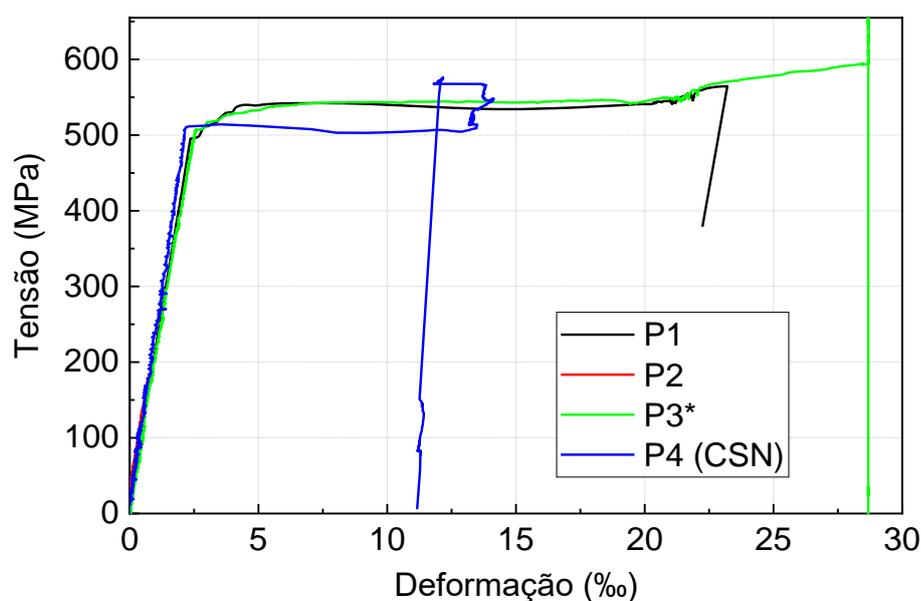
Os resultados da tensão no contato para as paredes com bloco tipo BM16 foram inferiores às apresentadas pelo bloco tipo BM7 nos dois tipos de graute, devido ao fato da área de contato geral do bloco tipo BM16 ser significativamente superior. Deve ser salientado que a tensão média máxima observada no aço para as paredes do bloco tipo BM16 foi superior à obtida com o bloco tipo BM7, para os dois tipos de graute, entretanto, a tensão na área de contato graute/parede do bloco tipo BM16 é inferior à do bloco BM7.

4.3.3 FORMA DE RUPTURA DAS PAREDES

Na maioria dos ensaios realizados, o modo de ruptura identificado foi de deslizamento da armadura tracionada. Entretanto, o deslizamento da armadura costumava ocorrer, na maioria dos casos, após que o aço iniciasse o processo de escoamento e, geralmente, abrindo algumas fissuras em blocos e argamassa de assentamento. Entretanto, existem alguns casos em que o deslizamento do aço ocorreu antes do mesmo atingir seu patamar de escoamento, conforme pode ser verificado nos gráficos tensão *versus* deformação apresentados nas figuras a seguir.

A Figura 4.30 e Figura 4.31 apresentam os resultados de tensão e deformação obtidas no aço das paredes assentadas com o bloco tipo BM7, que foram enchidas, respectivamente, com o graute 15 e 30 MPa.

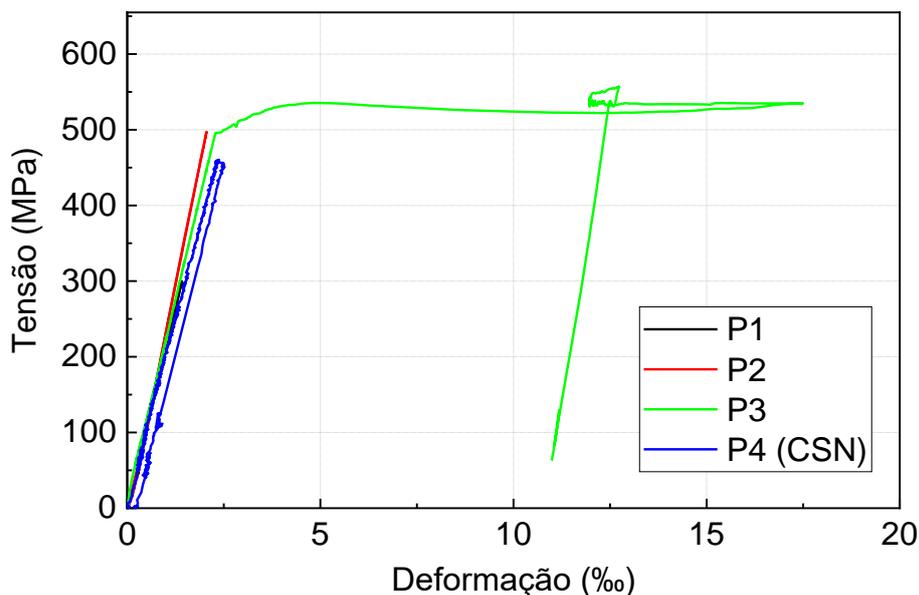
Figura 4.30 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM7 e graute 15 MPa



Fonte: Autor (2019). (*) O Strain Gage parou de fazer leituras na linha vertical. (CSN) Barra de aço do fabricante CSN.

A curva da parede P2 não está bem visível na Figura 4.30, pois ela só atinge, aproximadamente, 200 MPa de tensão, sendo sobreposta parcialmente pelas curvas das demais paredes. Na figura 4.29 a maior parte dos corpos de prova atingiu o escoamento da armadura.

Figura 4.31 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM7 e graute 30 MPa



Fonte: Autor (2019). (CSN) Barra de aço do fabricante CSN.

A curva da parede 1 não está bem visível na Figura 4.31 pois ela só atinge, aproximadamente, 300 MPa de tensão, sendo sobreposta parcialmente pelas curvas das demais paredes.

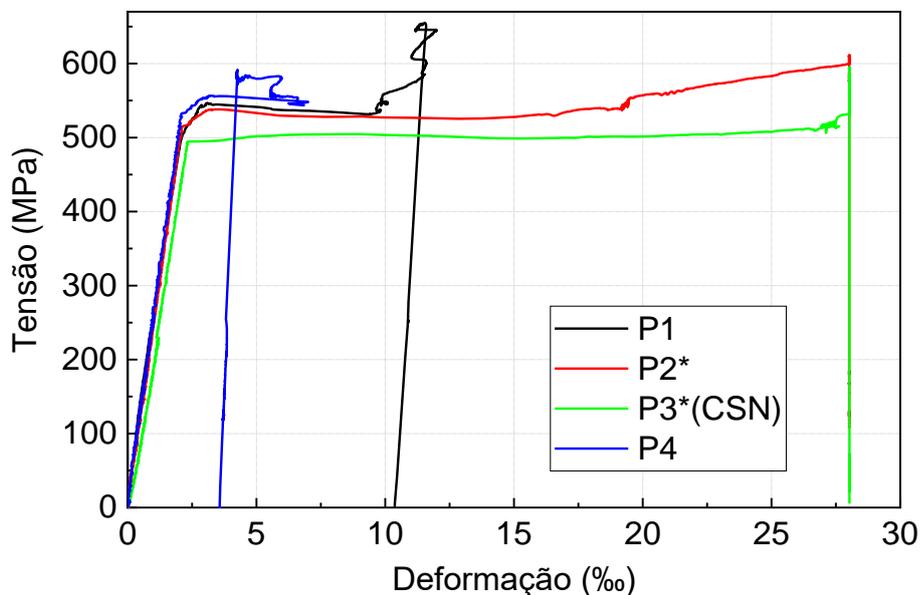
É possível perceber pela Figura 4.31 que boa parte das barras de aço apresentaram escorregamento antes de atingirem o patamar de escoamento, para esta combinação de tipo de bloco e graute.

Para essa combinação de tipo de bloco e graute, o valor percentual do comprimento de fissuras na interface entre bloco e graute (37,7%), obtida no ensaio de retração no interior dos blocos, foi o maior dentre as combinações de tipo de bloco e graute utilizadas no arrancamento. Essa combinação de bloco e graute também apresentou o maior valor percentual de comprimento de fissuras totais dentre esses tipos de blocos e grautes (59,2%). Na comparação do valor percentual de área de fissura na interface, essa combinação também apresentou os maiores valores percentuais (2,4%).

Portanto, é possível que esse comportamento de retração e formação de fissuras identificado no ensaio de retração dentro dos blocos, também possa ter contribuído para prejudicar a aderência entre o graute e o aço, resultando no deslizamento prematuro da barra, na maioria dos casos.

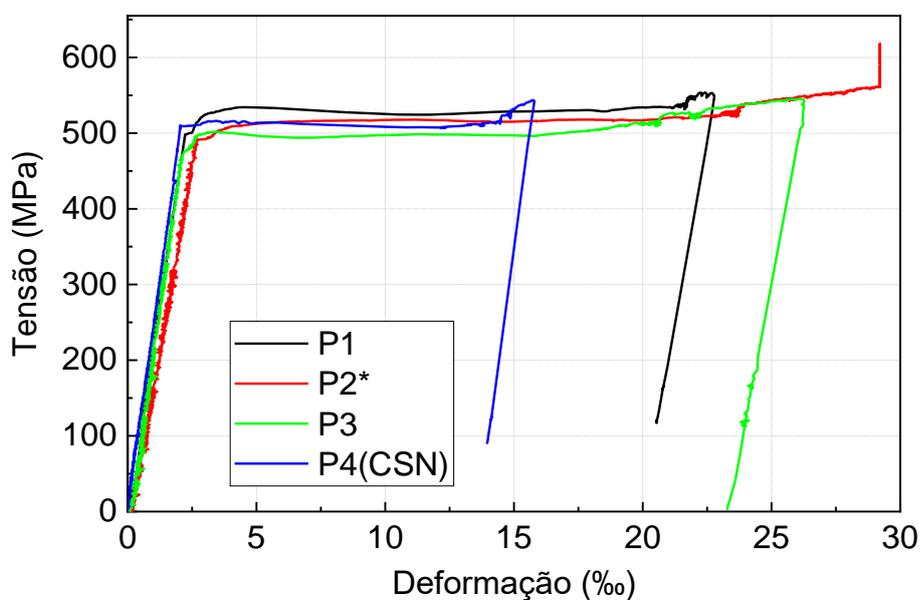
A Figura 4.32 e Figura 4.33 apresentam os resultados das paredes assentadas com o bloco tipo BM16, que foram enchidas, respectivamente, com o graute 15 e 30 MPa. Nas duas figuras as barras atingiram o patamar de escoamento do aço.

Figura 4.32 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM16 e graute 15 MPa



Fonte: Autor (2019). (*) O Strain Gage parou de fazer leituras na linha vertical. (CSN) Barra de aço do fabricante CSN.

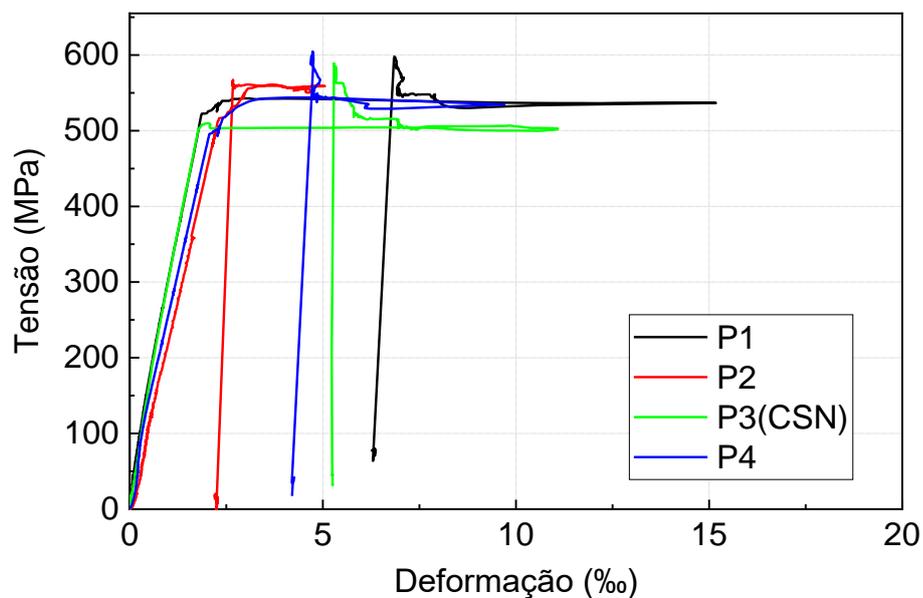
Figura 4.33 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BM16 e graute 30 MPa



Fonte: Autor (2019). (*) O Strain Gage parou de fazer leituras na linha vertical. (CSN) Barra de aço do fabricante CSN.

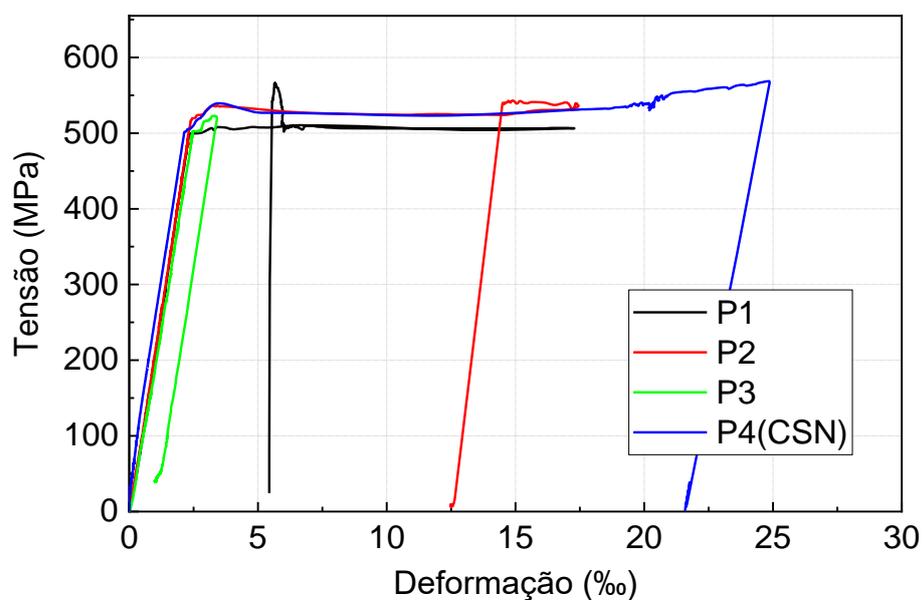
A Figura 4.34 e Figura 4.35 apresentam os resultados das paredes assentadas com o bloco tipo BV10, que foram enchidas, respectivamente, com o graute 15 e 30 MPa. Nas duas figuras as barras atingiram o patamar de escoamento do aço.

Figura 4.34 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BV10 e graute 15 MPa



Fonte: Autor (2019). (CSN) Barra de aço do fabricante CSN.

Figura 4.35 - Tensão e deformação do aço durante arrancamento para parede com bloco tipo BV10 e graute 30 MPa



Fonte: Autor (2019). (CSN) Barra de aço do fabricante CSN.

Dessa forma, diante de todas as amostras avaliadas, os dois tipos de graute proporcionaram aderência adequada com os blocos cerâmicos, porém, alguns problemas com

a aderência na interface do aço com o graute contribuíram para que, em algumas amostras, o aço não fosse levado ao escoamento durante o ensaio de arrancamento.

Em apenas uma das paredes ensaiadas, correu o deslizamento de uma parte superior do graute durante o ensaio. Entretanto, essa parede já apresentava fissuração excessiva e o aço já havia iniciado seu escoamento. Imagens dessa ruptura podem ser vistas na Figura 4.36.

Figura 4.36 - Deslizamento do graute e fissuração da parede



Fonte: Autor (2019).

Nas rupturas de todas as paredes foi comum o aparecimento de fissuras na parte superior do graute e o destacamento de alguns fragmentos do mesmo. Essa deterioração do graute na parte superior tornou pouco viável avaliar o deslizamento do graute na parte superior dos blocos. Portanto esses resultados não foram usados.

Normalmente, o processo de fissuração das paredes iniciava da mesma maneira, com o aparecimento de fissura na interface da argamassa vertical com o bloco, na fiada superior, com carga de aproximadamente 3 toneladas. Em seguida essa fissura se estendia até a argamassa horizontal da fiada superior, podendo se alastrar pela argamassa, ou partir para os blocos.

A ruptura apresentada pelas paredes dos blocos tipo BM7 e BM16, para ambos os tipos de graute, não apresentaram comportamento muito diferenciado, geralmente, se limitando a abertura de fissuras na região das duas fiadas superiores. Essa formação de fissuras somente nas fiadas superiores não foi identificada para as paredes construídas com bloco tipo BV10, que apresentava fissuras em quase toda sua extensão.

O escorregamento da armadura pode ser verificado na Figura 4.37, que demonstra a parede P2-B1-G15, que apresentou essa forma de ruptura com carga bem reduzida.

Figura 4.37 - Deslizamento da armadura



a)

b)



c)

Fonte: Autor (2019). Legenda: a) parede após ruptura; b) orifício na parte inferior da parede, indicando o deslizamento do aço; c) vista superior da parede (destacamento de um pedaço de graute).

O destacamento e fissuração do graute na parte superior das paredes fez com que as leituras do deslocamento do graute na parte superior da parede com lvdt, fossem, em muitos casos, comprometidas.

5. ESTIMATIVA DE CARGA DO ENSAIO DE EMPURRAMENTO

Conforme mencionado anteriormente, a tensão de aderência pode ser influenciada pela retração do graute e pela variação da geometria da célula de cada tipo de bloco. Ambos fatores, portanto, geram alterações na área de contato, que pode ser aumentada com a inserção de frisos na célula do bloco, ou reduzida pelo descolamento do graute da parede do bloco, devido à sua retração.

Existe a possibilidade de se estimar a carga máxima que cada combinação de bloco e graute pode resistir, a partir de uma mesma tensão de aderência previamente determinada. Essa estimativa se torna mais viável, caso sejam empregados fatores que incorporem as alterações na aderência provocadas pela retração do material de enchimento e pelas diferentes dimensões da área de contato, provocadas pelas variações nas geometrias das células dos blocos.

Para se obter a carga máxima de cada combinação de bloco e graute, para uma determinada tensão de aderência, é necessário estabelecer uma área de contato de referência e a utilização de fatores que contemplem:

- Um fator geométrico, que considere o aumento da área de contato provocado pela maior ou menor quantidade de frisos, ou ranhuras, em uma célula (k_1); e,
- Os efeitos da perda de área de contato devida à retração do material de enchimento (k_2).

Para se estimar a influência geométrica proporcionada pela maior, ou menor, quantidade de frisos presente em cada tipo de bloco, ou seja, para obtenção do fator k_1 , foi considerada a área de contato real existente para cada tipo de bloco. Essa área de contato é o valor médio apresentado no Quadro 4.29. Ao se dividir essa área de contato de determinado tipo de bloco pela altura nominal dos blocos (19 cm), obtém-se o perímetro real da célula desse tipo de bloco.

Dois tipos de bloco que apresentam o mesmo valor de perímetro na célula a ser grauteada, podem possuir uma área transversal bem diferente, podendo esta ser pequena, caso a presença de frisos seja muito grande, ou maior, caso a presença de frisos seja menor.

Dessa forma, é possível estimar a influência da presença dos frisos, comparando-se a área da seção transversal de uma célula de determinado tipo de bloco, por uma área transversal fictícia, admitida quadrada e lisa, que possua o mesmo perímetro real que o bloco sendo avaliado. Caso o bloco avaliado possua muitos frisos, a área transversal real será bem menor do que a área quadrada lisa fictícia. Por outro lado, caso o bloco possua pouca quantidade de frisos, a tendência é que sua área seja parecida com a área fictícia que possui o mesmo perímetro e tem parede lisa.

As equações 4.2 e 4.3 são utilizadas para determinação da área transversal fictícia do orifício dos blocos. Primeiro, se obtém o perímetro real de determinado tipo de bloco, para então, utiliza-lo para obtenção da área transversal de um quadrado fictício de parede lisa.

$$Pr = \frac{A.C.}{H} \quad (4.2)$$

$$A.fic. = \left(\frac{Pr}{4}\right)^2 \quad (4.3)$$

Sendo,

Pr, o perímetro real do orifício do bloco, em cm;

A.C., a área de contato média de determinado tipo de bloco, em cm²;

H, a altura nominal dos blocos, 19 cm; e,

A.fic., a área fictícia do orifício quadrado de parede lisa do bloco, em cm².

Agora, dividindo-se a área transversal fictícia encontrada para cada tipo de bloco, pela sua respectiva área transversal real, é possível estabelecer um coeficiente de forma, ou geométrico, que avalie a presença de frisos em cada tipo de bloco (ver equação 4.4).

$$k1 = \frac{A.fic.}{A.transv.} \quad (4.4)$$

Sendo,

k1, o coeficiente geométrico do orifício do bloco (adimensional);

A.fic., a área transversal fictícia do orifício;

A. transv., a área transversal real do orifício de cada tipo de bloco.

Os valores da área transversal real, medida para cada tipo de bloco, assim como, da área transversal fictícia calculada, e do fator k1, podem ser vistos no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Fator k1

Tipo de bloco	Graute	Área de contato real (cm ²)	Perímetro real - Pr (cm)	Área transversal fictícia - A.fic. (cm ²)	A. Transversal (cm ²)	k1
BM7	15 MPa	701	37	85	89	0,96
	30 MPa	698	37	84	89	0,95
BM16	15 MPa	899	47	140	92	1,52
	30 MPa	899	47	140	92	1,52
BM4	15 MPa	725	38	91	92	0,99
	30 MPa	724	38	91	92	0,99
BV0	15 MPa	546	29	52	53	0,97
	30 MPa	548	29	52	53	0,98
BV10	15 MPa	684	36	81	52	1,56
	30 MPa	684	36	81	52	1,56

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no Quadro 5.1, o fator k1 será maior para os tipos de bloco BM16 e BV10, pois esses possuem maior número de frisos.

O fator k2 será obtido pelo procedimento de medida da retração, cujos resultados foram mostrados no item anterior. Esse fator é obtido pela divisão da área de contato remanescente (A.C.R), pela área de contato média (A.C.) de cada tipo de bloco usado no ensaio de empurramento (valor disponível no Quadro 4.29).

As equações 4.5 e 4.6 utilizadas para se obter o fator k2 podem ser vistas abaixo.

$$A.C.R. = \left(A.C. - \frac{A.C. \times P.P.C.}{100} \right) \quad (4.5)$$

$$k2 = \frac{A.C.R}{A.C.} \quad (4.6)$$

Sendo,

A.C.R., a área de contato remanescente após retração, em cm²;

A.C., a área de contato média dos blocos empregados no ensaio de empurramento, em cm²;

P.P.C., o valor percentual de perda de área de contato, devido à retração;

K2, o fator de retração que afeta a área de contato entre graute e bloco.

No Quadro 5.2 estão expostos os valores de k2, assim como, a área de contato total e área de contato corrigida, obtidas no ensaio de medida da retração do graute no interior dos blocos cerâmicos, para cada combinação de tipo de bloco e graute.

Quadro 5.2 - Fator k2

Tipo de bloco	Graute	Área de contato média (cm ²)	Percentual de área de contato perdida (%)	Área de contato remanescente (cm ²)	k2
BM7	15 MPa	701	7,7	647	0,92
	30 MPa	698	37,8	434	0,62
BM16	15 MPa	899	0,0	899	1,00
	30 MPa	899	20,9	711	0,79
BM4	15 MPa	725	9,0	660	0,91
	30 MPa	724	62,0	275	0,38
BV0	15 MPa	546	0,0	546	1,00
	30 MPa	548	42,2	317	0,58
BV10	15 MPa	637	0,0	637	1,00
	30 MPa	638	8,5	584	0,91

Fonte: Autor (2019).

De posse dos dois fatores, fica possível estimar a carga máxima teórica suportada por cada combinação de tipo de bloco e graute. Essa carga será baseada na tensão de aderência escolhida e na área de referência de cada tipo de bloco.

A tensão de referência escolhida foi a apresentada pelo único tipo bloco de parede completamente lisa, o BV0, com o uso do graute 15 MPa. Portanto, a tensão de aderência de referência será de 1,56 MPa.

Como o fator k1 já incorpora o aumento de área de contato proporcionado pelos frisos, a área de referência será a área de contato lisa de cada tipo de bloco, ou seja, a área de

contato existente em cada tipo de bloco, sem considerar o aumento proporcionado pelos frisos. Essa área de contato já foi apresentada no Quadro 4.5, sobre as características geométricas das células dos blocos.

A utilização dessa área de contato lisa é importante, pois o aumento das dimensões dos orifícios dos blocos, também aumenta a área de contato entre bloco e graute. Como o fator k_1 considera apenas o aumento de área proporcionado pelos frisos, o aumento do contato provocado pelas dimensões das células será agora contemplado.

A equação 4.7 para determinação da carga estimada pode ser observada a seguir.

$$Q \text{ máx.} = \frac{\text{Tensão de aderência} \times A.L.ref. \times k_1 \times k_2}{10} \quad (4.7)$$

Sendo,

$Q \text{ máx.}$, a carga máxima estimada pra cada combinação de bloco e graute, em kN;

Tensão de aderência, a tensão de aderência escolhida para qual se deseja descobrir a carga resistida, em MPa;

A.L.ref., área de contato lisa de cada tipo de bloco, sem considerar o aumento de área provocado pelos frisos, em cm^2 ;

K_1 , coeficiente geométrico; e,

K_2 , coeficiente de retração;

Admitindo-se que se deseja descobrir a carga suportada para determinada combinação de tipo de bloco e graute, a partir da tensão de aderência proporcional pelo bloco BV0 e graute 15 MPa, obtêm-se os resultados apresentados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Força teórica obtida

Tipo de bloco	Graute	k1	k2	Área de contato lisa (cm ²)	Tensão de aderência (MPa)	Força teórica (kN)
BM7	15 MPa	0,96	0,92	652	1,56	89,7
	30 MPa	0,95	0,59	652	1,56	59,9
BM16	15 MPa	1,52	1,00	737	1,56	174,9
	30 MPa	1,52	0,72	737	1,56	138,3
BM4	15 MPa	0,99	0,90	688	1,56	96,6
	30 MPa	0,99	0,33	688	1,56	40,2
BV0	15 MPa	0,97	1,00	547	1,56	83,1
	30 MPa	0,98	0,58	547	1,56	48,4
BV10	15 MPa	1,56	1,00	561	1,56	136,3
	30 MPa	1,56	0,90	561	1,56	124,6

Fonte: Autor (2019).

Os valores teóricos obtidos foram comparados com as cargas provenientes do ensaio de empurramento para cada combinação de tipo de bloco e graute, obtendo-se os erros percentuais apresentados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Erro percentual da força teórica com relação ao resultado experimental

Tipo de bloco	Graute	Força teórica (kN)	Força máx. experimental (empurramento) (kN)	Erro (%)
BM7	15 MPa	89,7	95,8	6%
	30 MPa	59,9	16,7	-259%
BM16	15 MPa	174,9	161,0	-9%
	30 MPa	138,3	128,8	-7%
BM4	15 MPa	96,6	72,9	-33%
	30 MPa	40,2	26,6	-51%
BV0	15 MPa	83,1	85,0	2%
	30 MPa	48,4	48,3	0%
BV10	15 MPa	136,3	96,6	-41%
	30 MPa	124,6	96,5	-29%

Fonte: Autor (2019).

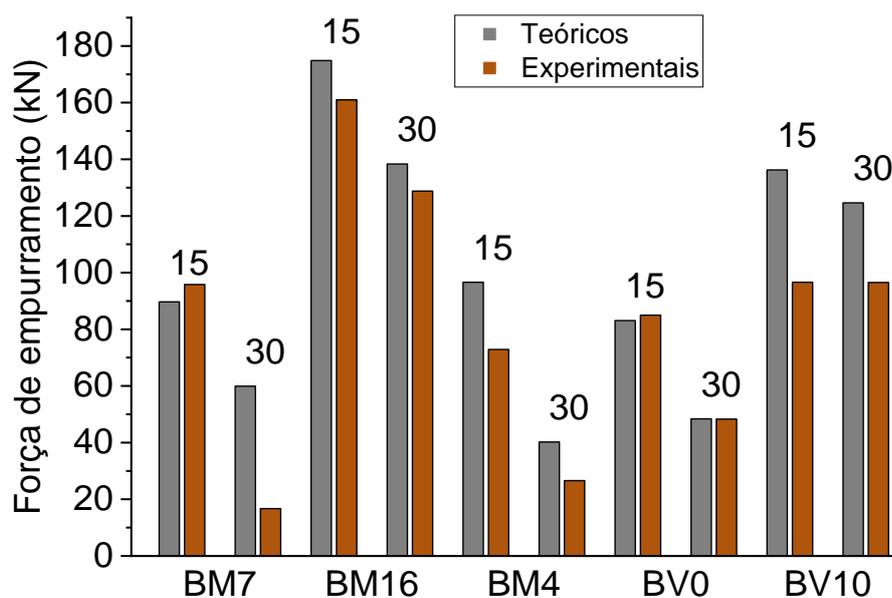
Como pode ser observado no quadro Quadro 5.4, a maioria dos valores teóricos apresentou percentual de erro baixo, com relação aos valores experimentais. Entretanto, alguns valores como para a combinação do bloco tipo BM7 e graute 30 MPa, os valores foram muito discrepantes. Porém, deve-se ressaltar que, o grande coeficiente de variação apresentado no ensaio de empurramento e, o pequeno número de amostras usada na determinação da retração do graute no interior dos blocos cerâmicos, podem ter contribuído para os valores diferenciados.

Contudo, ao se determinar o coeficiente de correlação entre os dados teóricos e experimentais, obtém-se um coeficiente de correlação (R^2) de 0,86. Ou seja, mesmo apresentando alguns valores discrepantes para alguns casos, os resultados teóricos podem

representar 86% dos resultados experimentais. Uma boa aproximação. Ao se separar os resultados para cada tipo de graute, o coeficiente de correlação fica igual a 0,77 para o graute 15 MPa e 0,87 para o graute 30 MPa.

Na Figura 5.1 pode ser visualizada a comparação direta entre os resultados experimentais e teóricos de força, para cada combinação de tipo de bloco e graute.

Figura 5.1 - Comparação dos resultados teóricos e experimentais para cada tipo de bloco e graute



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser visto na Figura 5.1, os valores representam de maneira adequada a força da maioria de combinações entre blocos e grautes, entretanto, os resultados teóricos para o bloco tipo BV10 e para o bloco tipo BM7, devem ser aprimorados.

Dessa forma, é possível utilizar os 2 fatores aqui mencionados para obtenção da carga teórica máxima de empurramento, sendo necessário, entretanto, o desenvolvimento de mais estudos para aprimorar e expandir essa estimativa.

O fator k_1 também pode ser obtido pela divisão da área de contato média de cada tipo de bloco, pela área de contato lisa, desconsiderando o aumento da área de contato causado pelos frisos. O fator k_1 nesse caso, não será igual, mas apresentaria coeficiente de correlação com os resultados experimentais de 0,82, ou seja, um valor bem próximo do coeficiente obtido com os resultados expostos acima (0,86).

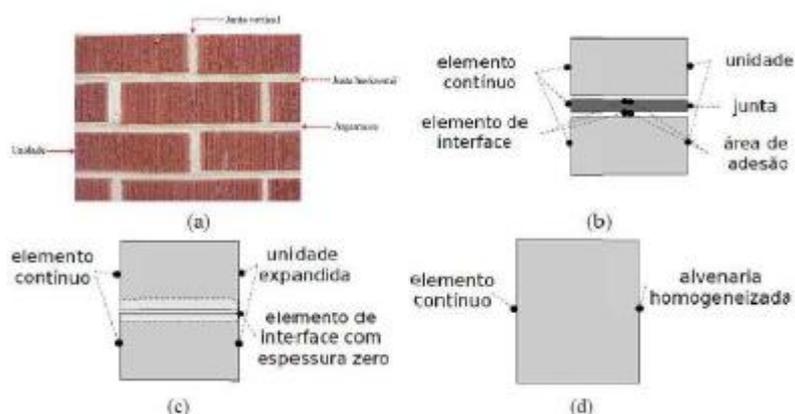
6. MODELAGEM NUMÉRICA

De acordo com Santos (2016) existem, de forma geral, duas formas de executar a análise numérica da alvenaria utilizando o Método dos Elementos Finitos: a micro e a macromodelagem. O que diferencia as duas é o fato da primeira representar todos os componentes da alvenaria individualmente, enquanto que na segunda, a alvenaria é representada como material compósito.

A autora ainda salienta que, a micromodelagem pode ser dividida em micromodelagem detalhada e micromodelagem simplificada. Na micromodelagem detalhada, todos os componentes (bloco, argamassa e grautes) são representados por elementos distintos e sua interface é modelada por elementos especiais de interface. No caso da micromodelagem simplificada, a junta de argamassa, por exemplo, é simulada por uma região de interface com espessura zero.

Na Figura 6.1, podem ser melhor compreendidas as diferenças entre os tipos de modelagem.

Figura 6.1 - Diferentes formas de modelagem



Fonte: Santos (2016) apud Lourenço (1996).

Dessa forma, como a modelagem deste trabalho será realizada para caracterizar as propriedades da interface entre bloco e grautes, a análise numérica será realizada com a micromodelagem detalhada, sendo todos os componentes representados (blocos e grautes) e sua região de contato modelada com elementos de interface.

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A MODELAGEM

Para execução dessa atividade foram escolhidas a combinação dos resultados obtidos para os blocos tipo BM7 e BM4, com o graute de 30 MPa, pois os mesmos apresentaram o deslizamento no ensaio de empurramento.

Com o objetivo de caracterizar as propriedades de aderência na análise numérica, foram criados elementos tridimensionais com características e propriedades semelhantes aos utilizados nos ensaios experimentais. Apenas uma alteração foi realizada nos blocos, em que as características geométricas como sulcos e ressaltos não foram representadas, entretanto, sua influência na aderência foi representada pela modificação nas propriedades da interface.

O Software utilizado para a modelagem da aderência foi o Abaqus (2017).

Para ser possível calibrar o modelo numérico, se faz necessária a utilização de resultados experimentais, que sirvam de parâmetro para definir se as propriedades adotadas para descrever a aderência (contato) entre os materiais, atendem de forma satisfatória ao comportamento apresentado nos experimentos.

Nesse sentido, os ensaios utilizados para caracterização das propriedades de contato entre graute e blocos cerâmicos foram obtidos no ensaio de empurramento para os blocos tipo BM7 e BM4, com o graute 30 MPa.

Além da tensão de aderência, este o ensaio também fornece a curva que relaciona a carga aplicada no graute, pelo seu deslizamento no interior do bloco cerâmico. Essa curva está representada na Figura 6.7 e Figura 6.8, para cada tipo de bloco. A partir destas curvas é possível verificar que, caso ocorra o deslizamento do graute no interior do bloco cerâmico, esse só se inicia após a tensão máxima de aderência ter sido atingida, porém, ainda apresentando certa resistência ao deslizamento.

Descrever o comportamento apresentado pela interface de ligação entre bloco e graute, antes e após a tensão máxima de aderência, antes e após o início do deslizamento, será o objetivo da realização da modelagem numérica. Suas implicações devem estar diretamente ligadas ao desempenho dos elementos de alvenaria grauteados, submetidos tanto a esforços de compressão, mas, principalmente, submetidos a esforços de tração, no caso da alvenaria armada.

Os resultados de resistência de aderência obtidos para cada amostra no ensaio de empurramento, podem ser conferidos no Quadro 6.1 e *Quadro 6.2*, respectivamente, para a combinação do graute 30 MPa com os blocos tipo BM7 e BM4.

Os valores marcados em vermelho não foram considerados para o cálculo da média da resistência de aderência empregada na avaliação numérica, devido ao desvio relativo elevado apresentado pelo material. Os valores que mais se afastaram da média foram

descartados, até que o desvio relativo dos valores remanescentes fosse igual ou inferior a 45%.

Quadro 6.1 – Resultados do ensaio de empurramento para bloco tipo BM7

Blocos ensaiados	Força máxima (N)	Área contato (mm ²)	Área transversal (mm ²)	Tensão de aderência (MPa)	Tensão transversal (MPa)	Desvio relativo (%)
B01	14,8	76981	9241	0,19	1,61	-12
B02	17,8	76557	9236	0,23	1,93	6
B03	24,9	76206	9156	0,33	2,72	49
B05	17,2	77031	9235	0,22	1,87	2
B10	11,4	77013	9184	0,15	1,25	-32
B11	14,8	77119	9292	0,19	1,59	-13
Média	16,8	76817,8	9224,1	0,22	1,83	-
D. Pad.	4,5	358,7	47,8	0,1	0,5	-

Fonte: Autor (2019).

Quadro 6.2 - Resultados do ensaio de empurramento para bloco tipo BM4

Blocos ensaiados	Força máxima (N)	Área contato (mm ²)	Área transversal (mm ²)	Tensão de aderência (MPa)	Tensão transversal (MPa)	Desvio relativo (%)
B01	43,0	76469	9474	0,56	4,54	62
B02	50,0	76158	9446	0,66	5,29	89
B05	16,2	76570	9470	0,21	1,71	-39
B08	24,0	76305	9502	0,32	2,53	-9
B12	16,5	77669	9630	0,21	1,72	-39
B13	9,9	78247	9721	0,13	1,02	-64
Média	26,6	76903	9541	0,35	2,80	-
D. Pad.	16,2	849	110	0,2	1,7	-

Fonte: Autor (2019).

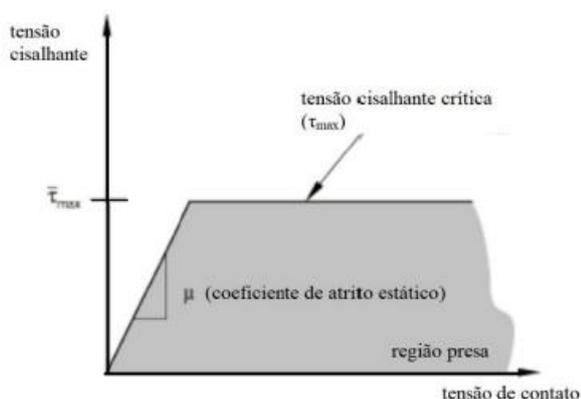
6.2 PROPRIEDADES DE CONTATO DA INTERFACE

No programa Abaqus, o menu que permite regular a relação existente entre as superfícies em contato é chamado *interactions*. Neste menu, podem ser escolhidas duas opções de contato *surface-to-surface* ou *node-to-surface*. Como a segunda opção de contato costuma oferecer resultados menos precisos para uma mesma densidade de malha e, ser mais recomendada para iterações de arestas e superfícies (Abaqus, 2017), serão abordadas apenas as propriedades de contato tipo *surface-to-surface*.

Nesse tipo de contato, existem quatro propriedades principais que governam o comportamento da interface entre os materiais: *Tangencial behavior*, *Hard*, *Coesive behavior* e *Damage*. A seguir, são descritas as características de cada uma dessas propriedades:

- **Tangencial Behavior**: Essa propriedade serve para descrever o atrito que ocorre entre os materiais. Dois parâmetros podem ser fornecidos para caracterizar essa propriedade, o coeficiente de atrito estático (μ) e a tensão cisalhante crítica (τ_{max}). Segundo Santos (2016), o coeficiente de atrito obedece à lei de Coulomb, ocorrendo aumento da resistência ao cisalhamento, com o aumento da tensão de compressão, entretanto, a parcela de atrito devida à coesão é desprezada. A utilização da tensão cisalhante crítica é optativa, e sua função é estabelecer um valor limite de resistência ao cisalhamento, a partir do qual, ocorre o deslizamento das superfícies, caso esse valor seja atingido. Essas duas características do *tangencial behavior* podem ser melhor compreendidas na Figura 6.2.

Figura 6.2 - Tangencial Behavior



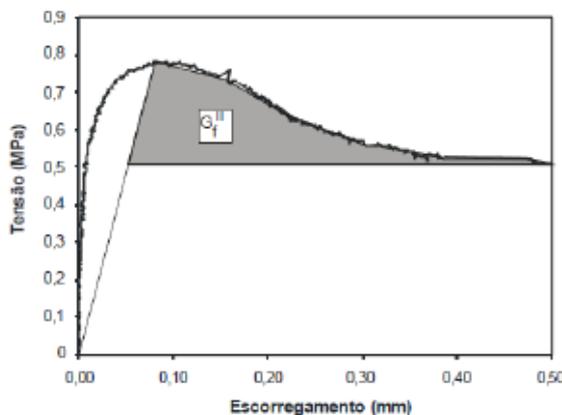
Fonte: Abaqus (2017) *apud* Medeiros (2018).

- **Hard**: Essa propriedade atua na separação das duas superfícies em contato, impedindo a penetração de uma interface na outra e, permitindo a sua separação.
- **Coesive Behavior**: Essa propriedade atua como uma camada de espessura zero localizada na interface entre os materiais, permitindo que sejam atribuídas características à essa região de ligação. Os valores que caracterizam o comportamento da interface e devem ser fornecidos ao Abaqus são a rigidez normal à interface (K_{nn}) e a rigidez tangencial, paralela à interface nas duas direções (K_{ss} e K_{tt}).

Para execução dessa modelagem foram escolhidas a combinação dos resultados obtidos para os blocos tipo BM7 e BM4, com o graute de 30 MPa, pois os mesmos apresentaram o deslizamento no ensaio de empurramento.

De acordo com Izquierdo (2015), para a rigidez normal (K_{nn}) pode ser adotado um valor baixo, quando não houver contenção lateral no ensaio de empurramento. Já para a rigidez tangencial, a autora afirma que o valor pode ser estimado como o coeficiente angular da reta que une a origem ao ponto de maior tensão no gráfico que relaciona a tensão e o escorregamento do graute no ensaio de empurramento. Um exemplo dessa reta pode ser visualizado na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Reta que liga a origem ao ponto de maior tensão



Fonte: Izquierdo (2015).

- **Damage:** Essa propriedade considera uma degradação das propriedades de rigidez da ligação, quando uma determinada condição de inicialização é satisfeita, e também apresenta um critério chamado *evolution*, que determina em que taxa ocorrerá a degradação da rigidez. Uma das condições de inicialização do dano que pode ser adotada é a *Maximum stress criterion*, que considera o início do dano quando a equação abaixo atinge o valor unitário.

$$\max\left(\frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0}\right) = 1 \quad (5.1)$$

Sendo,

t_n a tensão normal e t_s e t_t , as tensões cisalhantes nas duas direções no plano da interface;
 t_n^0 a tensão normal máxima que ocorreria se a separação ocorresse apenas devido à tensão normal (este valor deve ser fornecido); e
 t_{s0} , t_{t0} são as tensões cisalhantes nas duas direções que ocorreriam se a separação entre as faces ocorresse apenas devido à tensão cisalhante (este valor deve ser fornecido).

Quanto à evolução do dano, esta pode ser representada de diferentes formas, sendo uma das mais simples, a adoção do critério *displacement*, que considera apenas o deslizamento ocorrido após o início do escorregamento do material. Esse deslocamento pode

ser representado de forma linear ou de forma exponencial, dependendo das características de atrito apresentadas pelos materiais após o início do escorregamento.

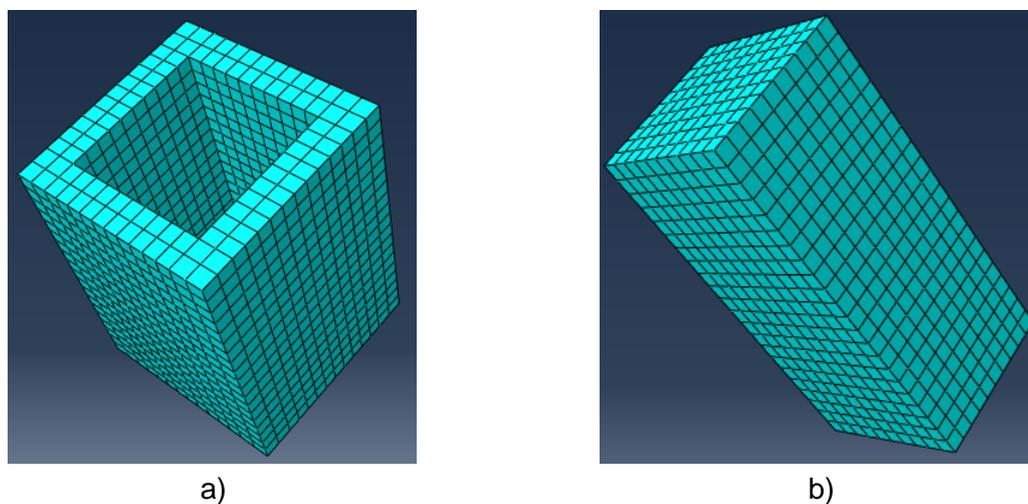
6.3 MODELAGEM APLICADA

Os dois tipos de bloco cerâmico e o graute utilizados, foram moldados como componente sólido 3D, com aplicação de malha de abertura de 10 mm e com tipo de elemento C3D8R.

As dimensões utilizadas para o graute são bem próximas à das amostras utilizadas no ensaio, entretanto, como a intenção é fazer a análise das propriedades de aderência entre bloco e graute, a geometria dos blocos foi simplificada, sendo realizada a modelagem de apenas meio bloco, ao invés do bloco inteiro utilizado no ensaio.

Na Figura 6.4 pode ser visualizada as características geométricas e da malha aplicadas no bloco e no graute. As densidades de malha de ambos os componentes foram iguais, para que os nós coincidam na posição da interface, melhorando a avaliação do comportamento de contato.

Figura 6.4 - Malhas empregadas no graute e blocos



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) bloco cerâmico; b) graute

Após a criação das partes, foram inseridas no programa as propriedades dos dois tipos de bloco e do graute de 30 MPa, utilizados na modelagem. No Quadro 6.3 estão demonstradas as propriedades obtidas nesse estudo e empregadas na análise numérica, com exceção dos valores do módulo de elasticidade dos blocos, que foram obtidos por aproximação das curvas de tensão vs deformação apresentadas no trabalho de Santos (2006).

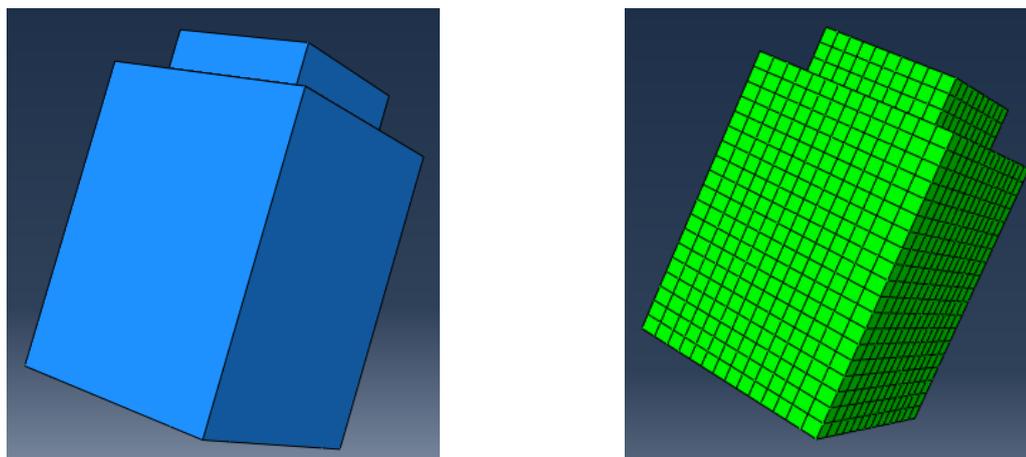
Quadro 6.3 - Propriedades dos materiais

Material	BM7	BM3	Graute 30
Resistência média à compressão (MPa)	32,2	55,0	33,0
Módulo de elasticidade (MPa)	14000	17500	23300

Fonte: Autor (2019).

Deve ser ressaltado, que foi empregado o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* (CDP) do software Abaqus, para descrever o comportamento do material fora do regime elástico, sendo necessário fornecer as curvas de tensão vs deformação de cada material ao programa. Essas curvas foram obtidas com base nas propriedades exibidas no Quadro 6.3 e utilizando o método proposto por Guo (2014), para criação das curvas que representam o comportamento completo de cada material.

Após serem definidas as propriedades de cada material, bloco e graute foram montados na função *Assembly* do programa, permitindo a união dos dois materiais. Na Figura 6.5 podem ser visualizados os materiais unidos (graute e bloco cerâmico), assim como a malha alinhada dos dois componentes.

Figura 6.5 - Graute e bloco unidos

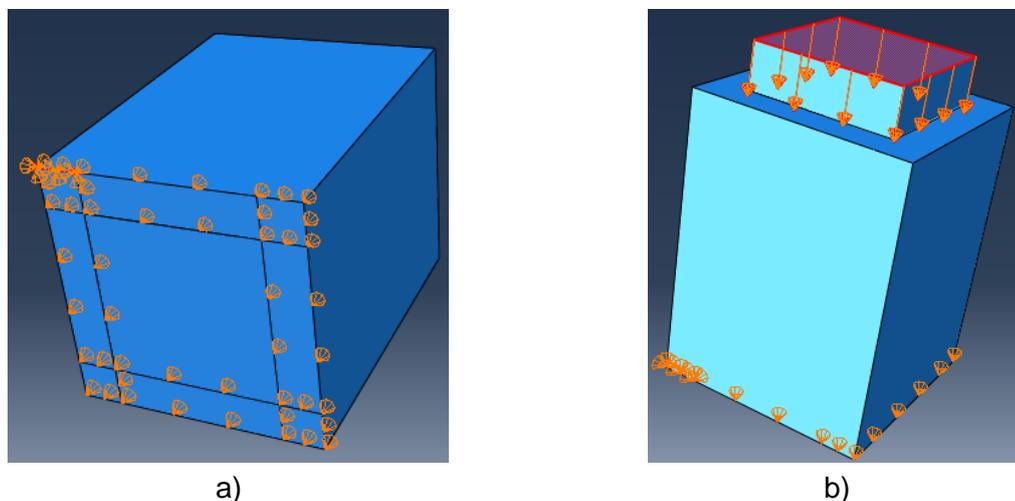
Fonte: Autor (2019).

Para simular as condições de contorno impostas às amostras nos ensaios, somente a parte inferior do bloco foi apoiada em uma única direção, permitindo o deslocamento livre do grautes em seu interior. Para promover estabilidade numérica ao modelo, 3 nós da parte inferior do bloco foram restringidos em três direções.

Assim como no ensaio, no Abaqus também foi aplicada a condição de deslocamento no topo do graute, ao invés de serem aplicados esforços de compressão. Como o deslocamento atingido nos ensaios foi de, aproximadamente, 15 mm, esse também foi o deslocamento utilizado no modelo.

Na Figura 6.6, pode ser visualizada a condição de contorno empregada, somente no bloco cerâmico e, o deslocamento aplicado, somente no graute.

Figura 6.6 - Condições de contorno aplicadas



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Apoio do bloco; b) Deslocamento aplicado no graute.

As propriedades de interface utilizadas podem ser conferidas para cada um dos dois tipos de bloco, no *Quadro 6.4* e *Quadro 6.5*, abaixo.

Quadro 6.4 - Propriedades na interface do bloco tipo BM7 e graute 30 MPa

Tangencial Behavior		Coesive Behavior (N/mm)			Damage initiation (MPa)			Damage Evolution – displacement exponencial	
φ	T max (MPa)	Knn	Kss	Ktt	tn normal only	Ts shear1 only	Tt shear2 only	Total/plastic displacement	Exponencial parameter
0.7	No Limit	1000	1100	1100	0.20	0.20	0.20	50	5

Fonte: Autor (2019).

Quadro 6.5 - Propriedades na interface do bloco tipo BM4 e graute 30 MPa

Tangencial Behavior		Coesive Behavior (N/mm)			Damage initiation (MPa)			Damage Evolution – displacement exponencial	
φ	T max (MPa)	Knn	Kss	Ktt	tn normal only	Ts shear1 only	Tt shear2 only	Total/plastic displacement	Exponencial parameter
0.7	No Limit	1000	1100	1100	0.22	0.22	0.22	50	5

Fonte: Autor (2019).

Os parâmetros adotados para o coeficiente de atrito (0.7) e rigidez normal da interface ($K_{nn}=1000$) são iguais aos utilizados no trabalho de Izquierdo (2015). A autora mencionou que o valor da rigidez normal pode ser considerado um valor bem baixo, pois não houve

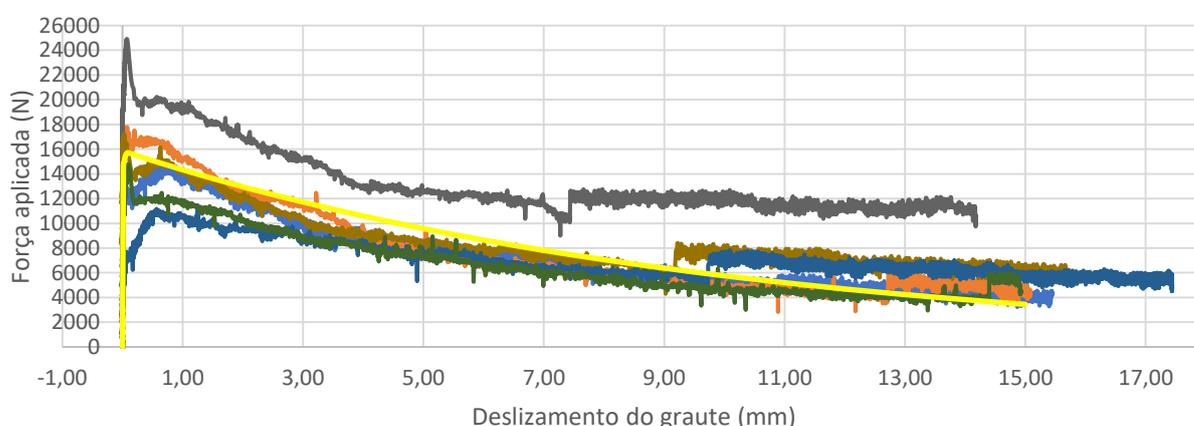
situação de restrição lateral no decorrer dos ensaios de empurramento. Já para a rigidez nas outras duas direções (K_{ss} e K_{tt}), os valores empregados pela autora foram obtidos estimando-se o coeficiente angular da reta que une a origem ao ponto de maior tensão no gráfico que relaciona a tensão e o escorregamento do graute no ensaio de empurramento. Entretanto, para o caso desta modelagem, como o carregamento dos ensaios ocorreu de forma, praticamente paralela ao eixo vertical, apresentado pouca ou nenhuma inclinação, os valores empregados foram de 1100 N/mm.

No parâmetro de dano (Damage initiation), os valores empregados são provenientes da tensão máxima média de aderência obtida nos ensaios de empurramento (Quadro 6.1 e Quadro 6.2). Como os resultados dos ensaios apresentaram grande variação em comparação com a média, os valores que mais se afastaram da média foram descartados, até que o desvio relativo apresentado pelas amostras remanescentes fosse inferior a 45%. Caso essa avaliação não fosse feita, os valores iriam ficar muito acima ou abaixo do comportamento apresentado pelas amostras, representando de maneira ineficiente os resultados. Os valores de tensão de aderência utilizados no modelo podem ser vistos no Quadro 6.4 e Quadro 6.5.

Os valores da evolução do dano foram obtidos experimentalmente, comparando o comportamento da curva apresentada pelo modelo, com o comportamento identificado nas amostras ensaiadas. Para ambos os blocos utilizados, a melhor descrição da evolução do dano foi obtida com a adoção do critério exponencial ao invés do linear.

Nas Figura 6.7 e Figura 6.9, estão disponíveis as curvas dos ensaios de empurramento e do modelo numérico (linha amarela) que melhor se ajustou às mesmas. Deve ser ressaltado, que foram excluídas as curvas com os valores de resistência de aderência que mais se afastaram da média.

Figura 6.7 - Comparação entre modelo numérico e resultados experimentais para bloco tipo BM7



Fonte: Autor (2019). Legenda: Linha amarela é o resultado numérico.

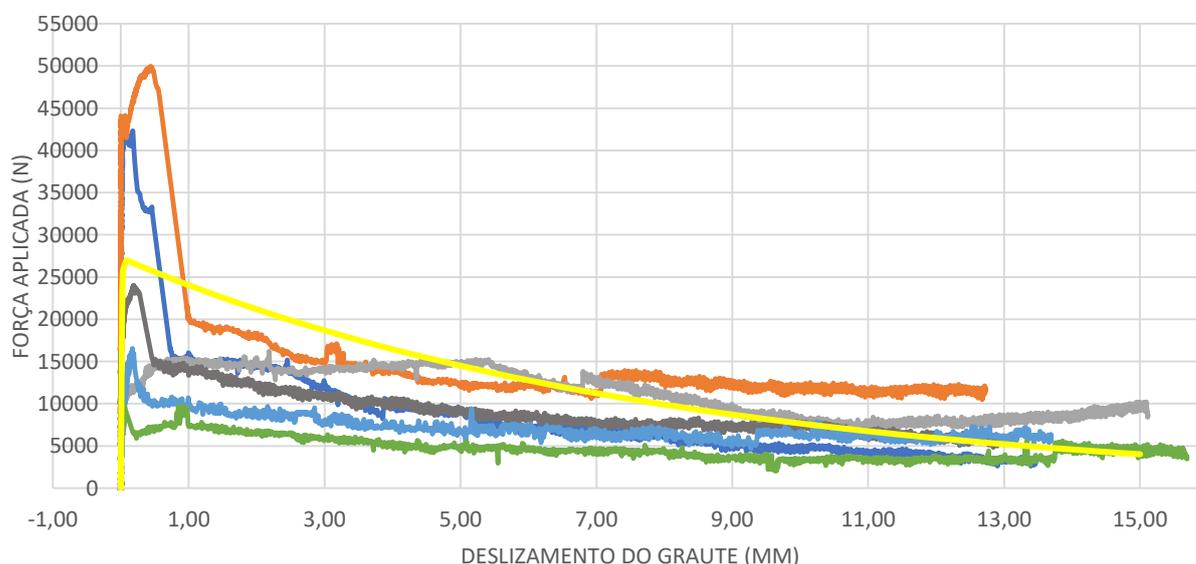
Como pode ser visto na Figura 6.7, o modelo numérico desenvolvido para o bloco tipo BM7 apresentou uma boa correspondência com os valores experimentais de tensão e deformação, do início ao fim da curva.

Na Figura 6.8 e Figura 6.9, foi feita uma comparação entre o modelo do bloco BM4. Na Figura 6.8, foi adotado o valor da resistência de aderência média ($t_s=0,347$), considerando todos os resultados dos ensaios de aderência. Já, na Figura 6.9, foram desconsiderados os resultados de aderência que mais se afastaram da média, resultando na resistência de aderência média ($t_s=0,22$).

Como pode ser visto, o modelo da Figura 6.8 apresentou valor de força máxima aplicada superior à 4 dos blocos ensaiados. Esse fato é proveniente da grande variação dos resultados, sendo que os dois valores superiores de aderência, fizeram a média subir significativamente, não representando adequadamente, a maioria dos resultados.

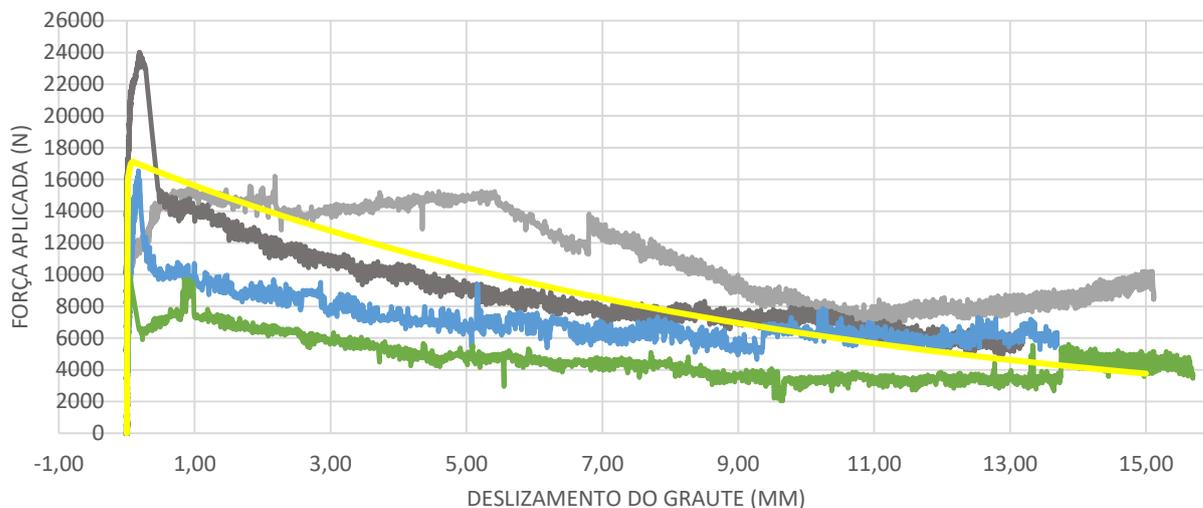
Já no caso da Figura 6.9, o modelo numérico se apresenta bem mais próximo aos resultados experimentais, como pode ser comprovado visualmente.

Figura 6.8 – Comparação entre modelo numérico e resultados experimentais do bloco tipo BM4, sem desconsiderar os valores que mais se afastaram da média da resistência de aderência



Fonte: Autor (2019). Legenda: Linha amarela é o resultado numérico.

Figura 6.9 – Comparação entre modelo numérico e resultados experimentais para bloco tipo BM4, desconsiderando resultados que mais se afastaram da média



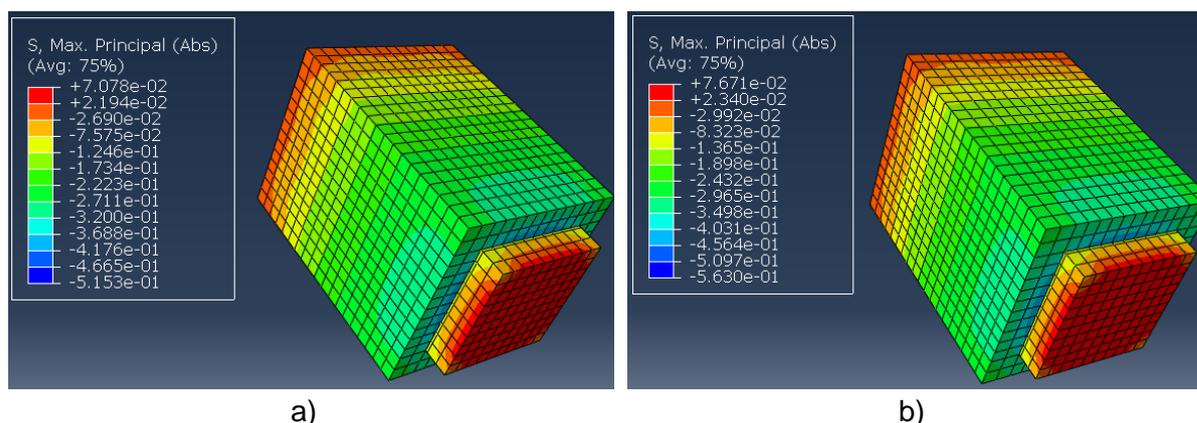
Fonte: Autor (2019). Legenda: Linha amarela é o resultado numérico.

Para o modelo desenvolvido para o bloco tipo BM4 (Figura 6.9), a correspondência da parte inicial da curva se adapta aos valores de força aplicada, porém não representa o comportamento de queda de tensão encontrado nos ensaios experimentais logo após o pico máximo, podendo ser a modelagem melhorada com a alteração do procedimento considerado para a evolução do dano da rigidez da interface (Damage Evolution).

Na Figura 6.10, estão demonstrados os valores de tensão máxima principal, obtidos na modelagem numérica da interface do bloco tipo BM7 com o graute 30MPa (Figura 6.10-a) e do bloco tipo BM4 com o graute 30MPa (Figura 6.10-b).

Como pode ser observado na figura, as tensões são ligeiramente superiores para o bloco tipo BM4, que apresentou maior resistência de aderência. Entretanto, a distribuição das tensões ocorre de forma semelhante em ambos os casos, apresentando esforços de tração na parte inferior do graute e na parte superior dos blocos cerâmicos (região em vermelho).

Figura 6.10 – Distribuição das tensões principais absolutas



Fonte: Autor (2019). Legenda: a) Bloco tipo BM7; b) Bloco tipo BM4.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A MODELAGEM NUMÉRICA

Grande parte da complexidade encontrada para realização de modelagens dos elementos de alvenaria, se deve às diversas regiões de interface entre os materiais, sendo possível, entretanto, desenvolver modelos capazes de prever com boa precisão essas iterações. Dessa forma, torna-se importante estudos paramétricos destinados à descrição dessas regiões mais críticas.

O modelo numérico desenvolvido para caracterizar a interface de ligação entre os dois tipos de bloco com o graute de 30 MPa, ficou adequado, pois apresenta boa representatividade do comportamento identificado nos ensaios de empurramento, como pode ser visto nas figuras 84 e 86.

Pode-se dizer que o modelo numérico se comportou de maneira semelhante aos dados experimentais obtidos nos pontos de carga máxima aplicada e na parte final da curva força vs deslizamento. Entretanto, é possível aprimorar ainda mais essa análise, fazendo com que os valores de força vs deslocamento nos pontos após o pico de carga fiquem mais fiéis aos resultados experimentais.

Provavelmente, será possível obter valores numéricos ainda mais representativos do material, com a alteração do parâmetro utilizado para definir a evolução do dano de rigidez da interface (*Damage Evolution*), uma vez que, o modelo não pôde representar de maneira adequada, a queda acentuada do carregamento ocorrida logo após o pico de carga máxima no ensaio de empurramento. Talvez com a alteração destas propriedades de evolução do dano, essas regiões mais críticas das curvas também possam ser contempladas no modelo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento existente sobre as propriedades da interface de ligação entre blocos e grautes é escasso. Ainda não existe consenso entre os pesquisadores, sobre a capacidade do graute transferir esforços das armaduras para os blocos em elementos de alvenaria estrutural. Dessa forma, essa pesquisa teve como finalidade estudar o comportamento de aderência entre blocos cerâmicos e grautes. Para esse estudo foram empregados 5 tipos de blocos cerâmicos e 2 tipos de grautes. Os ensaios de empurramento (Push-out) e arrancamento (Pull-out) foram utilizados para determinar a capacidade de aderência de cada combinação de bloco e graute, visando compreender quais propriedades dos materiais influenciam nas características apresentadas por sua interface de ligação.

Os ensaios de empurramento realizados apontam que a resistência de aderência entre blocos e grautes tende a ser maior para blocos dotados de uma maior área de contato. Esse aumento na área de contato pode ser proporcionado pela alteração da geometria de suas células, ou pela presença de frisos no interior das mesmas. Esse aumento da tensão de aderência foi confirmado, tanto para os ensaios realizados em blocos de parede maciça, quanto para blocos de paredes vazadas. Os maiores valores de tensão de aderência foram obtidos no ensaio de empurramento, pelos tipos de blocos dotados de uma maior quantidade de frisos e, conseqüentemente, maior área de contato (BM16 e BV10).

Além dos efeitos provocados pelos diferentes tipos de bloco, a tensão de aderência também se mostrou ser uma propriedade suscetível às variações de acordo com as características apresentadas pelo material de enchimento. Esse fenômeno já foi observado por outros pesquisadores. Enquanto alguns observaram valores de tensão de aderência maiores para grautes com maior resistência à compressão (Izquierdo, 2015), outros observaram comportamento oposto (Fischer, 2016). Nos ensaios de empurramento realizados nessa pesquisa, a tensão de aderência foi maior, considerando um mesmo tipo de bloco, quando o material de enchimento apresentava menor resistência à compressão (15 MPa). Uma possível explicação para esse comportamento, pode estar ligada ao fato do material de enchimento de maior resistência à compressão (30 MPa) ter apresentado retração 30% superior ao graute de menor resistência (15 MPa). Dessa forma, com a retração do enchimento, a área de contato entre bloco e graute pode ter reduzido, implicando nos resultados mais baixos no ensaio de empurramento.

Esses resultados da retração, também ajudam a explicar os resultados de tensão de aderência divergentes encontrados pelos outros pesquisadores. Provavelmente, para os casos em que o aumento da tensão de aderência foi obtido para grautes de maior resistência à compressão, é possível que o material de enchimento não tenha apresentado retração. Já para os casos em que o material de maior resistência apresentou comportamento inferior, é possível que a retração tenha atuado.

A retração do material de enchimento também é afetada pelas características geométricas e pela presença de frisos nos orifícios dos blocos cerâmicos. Essa característica foi comprovada pelo procedimento desenvolvido para medir a retração do graute no interior dos blocos cerâmicos. Os blocos dotados de maior quantidade de frisos no interior das células, apresentaram uma redução no número de fissuras ou descolamentos observados na região da interface entre graute e bloco. Além disso, com esse procedimento adotado para verificar a retração do material de enchimento, ainda foi possível concluir que, o graute de 15 MPa apresentou menor tendência de formar fissuras na interface entre bloco e graute do que o graute de 30 MPa.

Com base nos efeitos de aumento da área de contato provocado pela maior presença de frisos no interior dos blocos cerâmicos e, da redução da área de contato provocada pela retração do enchimento, foi possível desenvolver um modelo analítico para estimar a carga máxima solicitada no ensaio de empurramento. Esse modelo, utilizando os fatores k_1 e k_2 , permitiu estimar com certa precisão, a carga máxima de empurramento para cada combinação de bloco e graute, a partir de uma tensão de referência adotada de 1,56 MPa.

Os maiores valores de tensão de aderência foram apresentados pelos tipos de bloco com geometrias das células que proporcionam maior área de contato (BM16 e BV10). Entretanto, na comparação de dois tipos de bloco, nem sempre o que possui maior área de contato vai apresentar os maiores valores de tensão de aderência. Isso significa que existem outros fatores que contribuem para a obtenção dos resultados, não somente a área de contato. Dois tipos de bloco com áreas de contato bem diferentes podem apresentar a mesma tensão de aderência, mesmo resistindo a cargas significativamente diferentes durante o ensaio de empurramento. Dessa forma, avaliar a carga máxima resistida por cada combinação de tipo de bloco e graute parece ser interessante.

Os únicos casos de deslizamento do graute no ensaio de empurramento foram obtidos com os blocos tipo BM7 e BM4, com o uso do graute 30 MPa. No restante dos casos, a forma de ruptura foi fissuração do bloco cerâmico e, por vezes, do enchimento.

No ensaio de arrancamento, as maiores cargas resistidas foram obtidas para o graute de 15 MPa, para todos os tipos de bloco, assim como no ensaio de empurramento. Os maiores valores de tensão no aço do arrancamento foram obtidos para o tipo de bloco BM16 e BV10,

respectivamente, com o uso do graute 15 e 30 MPa. Coincidentemente, estas também foram as combinações que proporcionaram as maiores tensões de aderência no ensaio de empurramento.

O ensaio de arrancamento é complementar ao ensaio de empurramento, pois, somente o primeiro tem a capacidade de avaliar o travamento mecânico formado pela intercalação dos frisos das células dos blocos e do desalinhamento ou desaprumo dos furos dos blocos na sobreposição das fiadas. Dessa forma, o travamento mecânico provocado pelo bloco tipo BM7 entre as fiadas sobrepostas, parece ter sido suficiente para compensar a tensão de aderência inferior obtida no ensaio de empurramento.

A modelagem numérica realizada permitiu representar, adequadamente, as propriedades da interface entre blocos do tipo BM7 e BM4, com o graute de 30 MPa. Os valores numéricos apresentaram boa adequação às curvas experimentais obtidas no ensaio de empurramento, podendo ser aprimoradas no trecho após a carga de pico.

Para finalizar, deve ser ressaltado que os resultados obtidos nessa pesquisa, não necessariamente, refletem o comportamento de elementos em obras, haja visto que o controle para umedecer os blocos antes do grauteamento, aplicação da técnica de readensamento, dentre outros fatores, nem sempre serão semelhantes.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como ainda são recentes as maiorias dos estudos desenvolvidos na área de avaliação da aderência entre blocos cerâmicos e grautes, existem inúmeros trabalhos que podem ser desenvolvidos, apenas alterando algumas variáveis utilizadas na pesquisa. Seguem, alguns questionamentos, que podem ser respondidos pelo desenvolvimento de pesquisas futuras:

- Qual a influência do formato, tamanho e quantidade de frisos na aderência com o graute?
- O comportamento dos prismas de blocos cerâmicos grauteados será diferente para os tipos de blocos que apresentarem maior número de frisos em seu interior?
- A espessura da parede dos blocos, ou dimensão total dos blocos pode afetar o comportamento da aderência com o graute?
- O umedecimento dos furos antes do grauteamento dos blocos faz muita diferença?
- Nessa pesquisa os blocos apresentaram rugosidade semelhante, pois a matéria prima usada na fabricação dos blocos foi semelhante. Será que a aderência será igual para blocos com rugosidades diferentes?

- Existe uma relação ideal entre as dimensões dos furos dos blocos e do diâmetro das barras de aço a serem empregadas no ensaio de arrancamento?

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. V 2017. Johnston: Dassault Systèmes, 2016.

AHMED, Kawsar; FELDMAN, Lisa R.. Evaluation of contact and noncontact lap splices in concrete block masonry construction. **Canadian Journal Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 39, n. 5, p.515-525, maio 2012. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/l2012-026>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C270-14a**: Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. s/ ed. West Conshohocken-PA, 2014. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

_____**NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007. 13 p.

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

_____**NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_____**NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

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

_____**NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

_____**NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005. 6 p.

_____**15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 26 p.

_____**15270-2**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 29 p.

_____**NBR 15812**: Alvenaria estrutural – blocos cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.** 2 ed. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2000. 11 p.

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

BIGGS, D.T. (2005). Grouting Masonry using Portland Cement-Lime Mortars. In: **International Building Lime Symposium**, 2005, Orlando, Florida, p. 2-15.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 413-2: Masonry cement — Part 2: Test methods.** London, 2006. 20 p.

CARASEK, Helena. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos - Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação.** 1996. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo C.. **Materiais de construção civil: Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2007. Cap. 26. p. 863-904.

CARASEK, Helena; DJANIKIAN, João Gaspar. Aderência de Argamassas a Base de Cimento Portland a Unidades de Alvenaria. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da Usp**, São Paulo, v. 179, n. 4, p.1-26, 1997.

FISHER, Marcos H.. **Análise e avaliação da aderência na interface entre bloco cerâmico e graute.** 2016. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Santa Cruz do Sul, 2016.

GUARNIERI, Leonel de Oliveira. **Influência da aderência graute/ bloco cerâmico estrutural no comportamento mecânico do conjunto.** 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

GUO, Zhenhai. **Principles of Reinforced Concrete.** 1 edition. Elsevier: Oxford, 2014.

IZQUIERDO, Orieta Soto. **Estudo da interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural.** 2015. 322 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

KINGLEY, G. R.; TULIN, L. G.; NOLAND, J. L. (1985). The influence of water content and unit absorption properties on grout compressive strength and bond strength in hollow clay unit masonry. In: **3rd North American Masonry Conference**, THE MASONRY SOCIETY, 1985, Boulder, Colorado. p. 7:1-12.

KISIN, Aleksandar. **Evaluation of Mitigative Techniques for Non-Contact Lap Splices in Concrete Block Construction.** 2014. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Civil Engineering, Department of Civil Andand Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, 2014.

KREIJGER, P. C.. The skin of concrete composition and properties. **Matériaux Et Constructions**, [s.l.], v. 17, n. 4, p.275-283, jul. 1984. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02479083>.

MASONRY STANDARDS JOINT COMMITTEE (MSJC). **ACI 530.1-02/ASCE 6-02/TMS 602-02**: Specification for Masonry Structures., 2002. 24 p.

MEDEIROS, Wallison Angelin. **Pórticos em concreto pré-moldado preenchidos com alvenaria participante**. 2018. 163f. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

PAES, I. N. L.; GONÇALVES, S. R. C.. Dos momentos iniciais pós-aplicação ao desenvolvimento da aderência. In: BAUER, E.. **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: Sinduscon-df/lem-unb, 2005. Cap. 6. p. 42-50.

SANTOS, C. F. R. **Avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2016.

SILVA, Romulo Dinalli da. **Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.