

Marcio Rogério do Nascimento

**O USO DE ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO COMO
PREENCHIMENTO DE ALVENARIA ESTRUTURAL
CERÂMICA**

Tese submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Ph.D. Humberto
Ramos Roman.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Nascimento, Marcio Rogério do

O uso de argamassa de assentamento como preenchimento de alvenaria estrutural cerâmica / Marcio Rogério do Nascimento; orientador, Humberto Ramos Roman - Florianópolis, SC, 2015.

265 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Alvenaria Estrutural. 3. Bloco cerâmico. 4. Argamassa. 5. Graute. I. Roman, Humberto Ramos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Marcio Rogério do Nascimento

**O USO DE ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO COMO
PREENCHIMENTO DE ALVENARIA ESTRUTURAL
CERÂMICA**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de março de 2015.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.
Coordenador do PPGEC/UFSC

Banca Examinadora:

Prof. Humberto Ramos Roman, Ph.D. - ECV/UFSC - Orientador

Prof.^a Márcio Roberto Silva Côrrea, Dr. - USP

Prof. Guilherme Aris Parsekian, Dr. - UFSCar

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr. - ECV/UFSC

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr. - ECV/UFSC

Prof.^a. Fernanda Fernandes Marchiori, Dr.^a. - ECV/UFSC

Eu dedico este trabalho a minha esposa Roberta, minha filha Antônia e minha mãe Silvia, pela vida, exemplo e amor.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Humberto Ramos Roman, pela orientação e apoio durante todo o período de pesquisa e redação desta tese.

Ao professor Itamar Ribeiro Gomes, pela coorientação, paciência e apoio durante parte da pesquisa e redação desta tese.

Ao professor e amigo, João Batista Rodrigues Neto, pelo incentivo e amizade.

Ao professor Luís Gómez, pelo auxílio na instrumentação dos ensaios.

Ao PPGEC e a todos os Professores do Curso, os quais, direta e indiretamente tornaram este trabalho possível.

Aos funcionários do laboratório de materiais de construção, Luiz, Renato e Roque, pelo companheirismo e disposição.

Aos colegas da pós-graduação, Fabiano, Glêdes, Giovana, Fabíola, Roberta, Viviany, Ronaldo, Rudiele, César, Lidiane, Julio, José Marcos, Carlos Quintero, Mariana, Flávia, Lourenço, Elisabeth e, principalmente, Francisco Morato Leite pela ajuda e discussões que foram vitais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos bolsistas, Roberto, Gabriel, Marcelo, Darvil e Edilberto, pelo auxílio durante a execução do programa experimental.

À minha esposa Roberta e minha filha Antônia, pela paciência, amor e incentivo.

À minha mãe, Sílvia e meus irmãos, Marcos, Marcel e Elaine, pelo apoio e carinho.

À Cerâmica Constrular, pelo fornecimento dos blocos utilizados nos trabalhos experimentais.

À empresa Votorantim Cimentos, pelo fornecimento do cimento e da argamassa industrializada.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo financiamento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento estrutural à compressão da alvenaria de blocos estruturais cerâmicos considerando o preenchimento dos furos com a argamassa de assentamento, como componente integrante do sistema construtivo em alvenaria estrutural. Para atingir o objetivo do trabalho, realizou-se a análise das propriedades mecânicas dos prismas, correlacionando-as com as propriedades obtidas com a caracterização dos blocos, argamassas e grautes. Para tanto, a análise foi dividida em três Etapas: Referência, Argamassa Mista e Argamassa Industrializada. Para a moldagem dos prismas, utilizaram-se três blocos de geometrias distintas; três traços de argamassas mistas; três traços de argamassas industrializadas e três traços de grautes, com resistências distintas. Como conclusões gerais do trabalho, podem destacar as seguintes: para os prismas preenchidos, em ambas as etapas, o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas foi o bloco; para os prismas preenchidos e moldados com os blocos de 6 MPa, da Etapa Argamassa Mista, o aumento na resistência da argamassa não gera aumento significativo na resistência dos prismas, constatando-se que a utilização dos blocos de 6 MPa e a argamassa C (traço 1:1:6), como assentamento e preenchimento, demonstra-se como a melhor combinação de bloco-argamassa, pois além deste traço apresentar o menor consumo de cimento, esta série de prismas quando preenchida com argamassa apresenta aumento efetivo da carga de ruptura, no valor de 60%, viabilizando a utilização da técnica prescrita na norma ABNT NBR 15812-2 (2010); para os prismas preenchidos da Etapa com Argamassa Industrializada, somente os prismas moldados com os blocos de 6 MPa apresentam aumento significativo na resistência à compressão com o aumento da resistência das argamassas, onde a melhor combinação de bloco-argamassa ocorre para o prisma moldado com a argamassa industrializada de 10 MPa, que apresenta aumento efetivo da carga de ruptura, no valor 40,5%. Diante do exposto, observa-se que o aumento na resistência à compressão dos prismas com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural evidencia a viabilidade de utilização desta técnica, desde que a escolha entre os componentes dos prismas seja adequada.

Palavras chave: Alvenaria estrutural, graute, argamassa, bloco cerâmico.

ABSTRACT

This study aims to investigate the behavior of structural masonry clay blocks in structural compression considering the filling of their holes with bedding mortar, as part of a constructive system in structural masonry. In order to achieve this aim, the mechanical properties of the prisms were analyzed in relation to the properties obtained with the characterization of the blocks, mortars and grouts. The analysis was separated in three stages: References, Mixed Mortar and Industrial Mortar. Three blocks with different geometries were used for molding the prisms, as well as three mixes of mixed mortar, three mixes of industrial mortar and three mixes of grout, with different strength. The following stand out as general conclusions: for the filled prisms, in both stages the factor with highest influence on the prisms' strength was the block; for the filled prisms molded with 6 MPa blocks, on the Mixed Mortar stage, increasing the mortar strength does not increase the strength of the prisms significantly, having that the use of 6 MPa blocks and C mortar (mix 1:1:6) as bedding and filling, is the best block-mortar combination, because aside from presenting the lowest consume of cement, this series of prisms presents a significant increase in failure strength when filled with mortar, with a value of 60%, which makes the use of the technique prescribed by the ABNT NBR 15812-2 (2010) standard viable. For the filled prisms in the Industrial mortar stage, only the prisms molded with 6 MPa blocks present significant increase in compressive strength when the strength of the mortars is increased, where the best block-mortar combination occurs for the prism molded with the 10 MPa industrial mortar, which presents significant increase in failure strength, with a value of 40,5%. Having these results, it is noticed that the increase in compressive strength of prisms using mortar as structural bedding evidences the viability of such technique as long as the choice regarding the components is adequate.

Keywords: Structural masonry, grout, mortar, clay block.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Valores de espessuras mínimas para as paredes externas e septos dos blocos cerâmicos estruturais (a) de paredes vazadas e (b) com paredes maciças, em milímetros.	37
Figura 2.2 - Esquema de ensaio de resistência à tração indireta do bloco.	39
Figura 2.3 - Modelos de prismas utilizados experimentalmente.	52
Figura 2.4 - Geometrias e dimensões dos blocos estudados.....	60
Figura 2.5 - Geometrias e dimensões dos blocos estudados.....	61
Figura 2.6 - Resistência à compressão simples de blocos, argamassas e prismas.	63
Figura 2.7 - Resultados médios de resistência à compressão.	65
Figura 2.8 - Resultados de resistência à compressão dos prismas.....	67
Figura 2.9 – Resultados de resistências dos grautes versus prismas.	70
Figura 2.10 – Secções transversais dos prismas adotados com os diferentes percentuais de grauteamento.	71
Figura 2.11 - Tipos de assentamento utilizados na construção dos prismas: (a) assentamento total e (b) assentamento nas faces laterais dos blocos.....	77
Figura 2.12 - Tensões nas unidades e na argamassa submetidas a compressão simples.	80
Figura 2.13 - Representação gráfica de tensões e critérios de ruptura para tijolos e alvenaria.	80
Figura 2.14 - Estado multiaxial de tensões da alvenaria sob compressão.	81
Figura 2.15 - Deformação lateral dos blocos e da argamassa submetidos à compressão simples.....	83
Figura 2.16 - Distribuição de tensões, segundo modelo de Atkinson e Nolan.	83
Figura 2.17 – Curvas de ruptura para prismas de blocos não grauteados.	87
Figura 3.1 - Programa de caracterização dos materiais, argamassas, blocos e prismas.....	95
Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia utilizada e zonas de utilização conforme ABNT NBR 7211 (2005).	97
Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia utilizada e limites de utilização conforme BS 1200 (1976) e ASTM C-144 (1987).....	97
Figura 3.4 - Curva granulométrica da brita utilizada e limites de utilização conforme ABNT NBR 7211 (2005).	99

Figura 3.5 - Geometria e respectivas resistências nominais dos blocos utilizados.	102
Figura 3.6 - Corte dos corpos-de-prova do material dos blocos.	103
Figura 3.7 – Corpo-de-prova após a fixação dos strain gauges.....	104
Figura 3.8 – Configuração do ensaio com amostra, célula de carga e prensa.....	106
Figura 3.9 –Corpo-de-prova após a fixação dos strain gauges.....	111
Figura 3.10 – Disposição da fixação dos transdutores de deslocamento nos corpos-de-prova.	115
Figura 3.11 – Configuração do ensaio com o corpo-de-prova com strain gauges, célula de carga e prensa.	117
Figura 3.12 - Prismas de 3 fiadas com junta a prumo.	118
Figura 3.13 - Capeamento superior dos blocos para a moldagem dos prismas.....	121
Figura 3.14 - Blocos sendo umedecidos antes da moldagem do prisma.	122
Figura 3.15 - Armazenamento e cuidados com os prismas após moldagem.	123
Figura 3.16 – Detalhe de fixação dos transdutores de deslocamento no prisma.	124
Figura 3.17 – Configuração do ensaio com o prisma, célula de carga e prensa.....	125
Figura 4.1 – Gráfico Tensão x Deformação do material dos blocos....	138
Figura 4.2 – Gráfico Tensão x Deformação das argamassas.	140
Figura 4.3 – Gráfico Tensão x Deformação dos grautes.....	141
Figura 4.4 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida ($f_{p_{liq}}$) versus resistência média à compressão dos grautes (f_g).....	144
Figura 4.5 - Carga de ruptura média (F_p) versus resistência média à compressão dos grautes (f_g).....	148
Figura 4.6 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida ($f_{p_{liq}}$) versus relação entre os valores de resistência média à compressão do graute/resistência do bloco na área líquida ($f_g/f_{b_{liq}}$).....	151
Figura 4.7 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida ($f_{p_{liq}}$) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade do graute/módulo de elasticidade do bloco (E_g/E_b).	151
Figura 4.8 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida ($f_{p_{liq}}$) versus relação entre os valores de	

	resistência média à compressão do graute/resistência da argamassa (f_g/f_{arg}).....	152
Figura 4.9	– Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida (fp_{liq}) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade do graute/módulo de elasticidade da argamassa (E_g/E_{arg}).....	152
Figura 4.10	– Módulos e áreas utilizados na análise de prismas grauteados.....	155
Figura 4.11	– Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida (fp_{liq}) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de preenchimento ($f_{arg} = f_g$) – Etapa com Arg. Mista.....	161
Figura 4.12	– Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida (fp_{liq}) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de preenchimento ($f_{arg} = f_g$) – Etapa com Arg. Industrializada.....	165
Figura 4.13	– Gráfico da relação entre fp_{liq}/f_{arg} e fb_{liq}/f_{arg} , para os prismas vazios – Etapa Arg. Mista.....	178
Figura 4.14	– Gráfico da relação entre fp_{liq}/f_{arg} e fb_{liq}/f_{arg} , para os prismas grauteados – Etapa Arg. Mista.....	179
Figura 4.15	– Gráfico da relação entre fp_{liq}/f_{arg} e fb_{liq}/f_{arg} , para os prismas vazios – Etapa Arg. Industrializada.....	181
Figura 4.16	– Gráfico da relação entre fp_{liq}/f_{arg} e fb_{liq}/f_{arg} , para os prismas grauteados – Etapa Arg. Industrializada.....	181
Figura 4.17	– Carga de ruptura média (F_p) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de preenchimento ($f_{arg} = f_g$) – Etapa Argamassa Mista. ...	183
Figura 4.18	– Comparação entre os diagramas tensão-deformação obtidos para as argamassas e prismas vazios.....	185
Figura 4.19	– Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do bloco (E_{arg}/E_b) – Etapa Arg. Mista.....	188
Figura 4.20	– Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do prisma vazio na área líquida [E_{arg}/E_p vazio _(área líquida)] – Etapa Argamassa Mista.....	189
Figura 4.21	– Carga de ruptura média (F_p) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de	

	preenchimento ($f_{arg} = f_g$) – Etapa Argamassa Industrializada.	191
Figura 4.22	– Comparação entre os diagramas tensão-deformação obtidos para as argamassas e prismas vazios.	193
Figura 4.23	– Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do bloco (E_{arg}/E_b) – Etapa Arg. Industrializada.	196
Figura 4.24	– Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do prisma vazio na área líquida [E_{arg}/E_p vazio _(área líquida)] – Etapa Argamassa Industrializada.	196
Figura 4.25	– Ruptura característica dos prismas vazios com os blocos B6 - Etapa Arg. Mista.	198
Figura 4.26	– Ruptura característica dos prismas vazios com os blocos B12 – Etapa Arg. Mista.	198
Figura 4.27	– Ruptura característica dos prismas vazios com os blocos B15 – Etapa Arg. Mista.	198
Figura 4.28	– Ruptura característica dos prismas vazios moldados com os blocos B6 – Etapa Arg. Industrial.	199
Figura 4.29	– Ruptura característica dos prismas vazios moldados com os blocos B12 – Etapa Arg. Industrial.	199
Figura 4.30	– Ruptura característica dos prismas vazios moldados com os blocos B15 – Etapa Arg. Industrial.	200
Figura 4.31	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B6 e argamassa C – Etapa Referência.	201
Figura 4.32	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B12 e argamassa B – Etapa Referência.	201
Figura 4.33	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B15 e argamassa C – Etapa Referência.	202
Figura 4.34	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B15 e argamassa A – Etapa Referência.	203
Figura 4.35	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B6 – Etapa Arg. Mista.	204
Figura 4.36	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B12 – Etapa Arg. Mista.	204
Figura 4.37	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B15 – Etapa Arg. Mista.	205
Figura 4.38	– Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B6 – Etapa Arg. Industrial.	205

Figura 4.39 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B12 – Etapa Arg. Industrial.	206
Figura 4.40 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B15 – Etapa Arg. Industrial.	206
Figura 5.1 - Estratégias de modelagem para estruturas de alvenaria: (a) alvenaria; (b) micromodelagem detalhada; (c) micromodelagem simplificada; (d) macromodelagem...	209
Figura 5.2 – Critério de Mohr-Coulomb no plano.	214
Figura 5.3 - Representação gráfica da superfície de ruptura do critério de Mohr-Coulomb no espaço das tensões principais.....	215
Figura 5.4 - Representação gráfica da superfície de ruptura no plano desviador.....	215
Figura 5.5 – Características geométricas dos prismas.....	220
Figura 5.6 – Critério limite de plasticidade Mohr-Coulomb Parabólico.	221
Figura 5.7 – Diagramas tensão-deformação obtidos para o prisma MG6-C.....	224
Figura 5.8 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-C e o graute para carga de 4,3 MPa, extraída do programa Marc Mentat.	225
Figura 5.9 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-C e o graute para carga de 8,7 MPa, extraída do programa Marc Mentat.	226
Figura 5.10 – Diagramas tensão-deformação obtidos para o prisma MG6-B.....	227
Figura 5.11 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-B e o graute para carga de 4,3 MPa, extraída do programa Marc Mentat.	228
Figura 5.12 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-B e o graute para carga de 8,7 MPa, extraída do programa Marc Mentat.	229
Figura 5.13 – Diagramas tensão-deformação obtidos para o prisma MG6-A.....	230
Figura 5.14 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-A e o graute para carga de 4,3 MPa, extraída do programa Marc Mentat.	231
Figura 5.15 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-A e o graute para carga de 8,7 MPa, extraída do programa Marc Mentat.	232

Figura 5.16 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-A e o graute para carga de 10,1 MPa, extraída do programa Marc Mentat.....	233
Figura 5.17 – Pontos da seção transversal para a análise da distribuição de tensão ao longo da altura.	236
Figura 5.18 – Distribuição de tensão ao longo da altura para o Prisma MG6-C.....	238
Figura 5.19 – Distribuição de tensão ao longo da altura para o Prisma MG6-B.....	239
Figura 5.20 – Distribuição de tensão ao longo da altura para o Prisma MG6-A.	240
Figura 5.21 – Distribuição de tensões principais máximas para o graute do prisma MG6-C, extraída do programa Marc Mentat.	241
Figura 5.22 – Distribuição de tensões principais máximas para o graute do prisma MG6-B, extraída do programa Marc Mentat.	241
Figura 5.23 – Distribuição de tensões principais máximas para o graute do prisma MG6-A, extraída do programa Marc Mentat.	242

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tolerâncias dimensionais para blocos cerâmicos.	36
Tabela 2.2 – Características mecânicas e físicas para blocos cerâmicos estruturais.	37
Tabela 2.3 - Valores de \emptyset em função da quantidade de blocos.	38
Tabela 2.4 – Traços dos grautes em volume conforme BS 5628: Part 2.	42
Tabela 2.5 – Traços dos grautes em volume conforme ASTM C 476-83.	43
Tabela 2.6 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas.	47
Tabela 2.7 - Especificações dos traços e propriedades das argamassas.	47
Tabela 2.8 - Especificações dos traços e propriedades das argamassas.	48
Tabela 2.9 - Limites da composição granulométrica do agregado miúdo para argamassas de assentamento.	49
Tabela 2.10- Propriedades mecânicas das argamassas obtidas no estudo de Khalaf <i>et al.</i>	51
Tabela 2.11 – Valores de \emptyset em função da quantidade de elementos da alvenaria.	54
Tabela 2.12 – Valores de k para diferentes grupos de unidades cerâmicas e argamassas.	55
Tabela 2.13 – Modelos matemáticos para a determinação da resistência à compressão da alvenaria para blocos de concreto.	56
Tabela 2.14 – Resultados de resistência à compressão.	57
Tabela 2.15 – Valores de eficiência para prisma-bloco e parede-bloco.	58
Tabela 2.16 - Valores de resistência para blocos e paredes.	60
Tabela 2.17 – Resultados de resistência dos prismas.	69
Tabela 2.18 – Normas e autores internacionais pesquisados, referentes a blocos cerâmicos.	75
Tabela 2.19 - Propriedades elásticas da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.	76
Tabela 2.20 – Resistência das pequenas paredes em função do assentamento.	78
Tabela 3.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado.	96
Tabela 3.2 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado.	98
Tabela 3.3 - Características físicas dos materiais utilizados nas argamassas de assentamento e grautes.	100
Tabela 3.4 - Caracterização química do Cimento Portland CP II Z-32.	100
Tabela 3.5 - Composição da Cal CH III.	101
Tabela 3.6 - Características físicas dos materiais utilizados nas argamassas de assentamento e grautes.	101
Tabela 3.7 - Denominação das argamassas.	107
Tabela 3.8 - Denominação e características das argamassas mistas.	108

Tabela 3.9 - Denominação e características das argamassas industrializadas.....	109
Tabela 3.10 - Denominação e resistências esperadas dos grautes.	113
Tabela 3.11 - Denominação dos prismas da Etapa de Referência.	120
Tabela 3.12 - Denominação dos prismas da Etapa com Argamassa Mista.	120
Tabela 3.13 - Denominação dos prismas da Etapa com Argamassa Industrializada.....	120
Tabela 4.1 – Características físicas dos blocos dos Lotes 1 e 2.....	127
Tabela 4.2 – Resistência à compressão dos blocos dos Lotes 1 e 2.....	128
Tabela 4.3 – Resistência à tração indireta dos blocos dos Lotes 1 e 2....	128
Tabela 4.4 - Análise de variância para a resistência à compressão dos blocos dos Lotes 1 e 2	129
Tabela 4.5 – Característica mecânicas dos blocos para corpos-de-prova prismáticos (20x40) mm.	130
Tabela 4.6 – Característica mecânicas dos blocos cerâmicos utilizados por Cesar (2007) e Santos (2208).....	131
Tabela 4.7 – Característica mecânicas das argamassas para corpos-de-prova prismático (4x4x16) cm.	133
Tabela 4.8 – Característica mecânicas das argamassas para corpos-de-prova (φ5X10) cm.	133
Tabela 4.9 - Análise de variância para a resistência à compressão para as duas geometrias de corpos-de-prova	133
Tabela 4.10 – Características mecânicas dos grautes para corpos-de-prova (φ10X20) cm, utilizando transdutores de deslocamento. ..	135
Tabela 4.11 – Características mecânicas dos grautes para corpos-de-prova (φ10X20) cm, utilizando strain gauge.....	135
Tabela 4.12 - Análise de variância para a resistência à compressão para as duas geometrias de corpos-de-prova	136
Tabela 4.13 – Valores de resistência à compressão dos blocos.	137
Tabela 4.14 – Valores de resistência à tração dos blocos.	137
Tabela 4.15 – Valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos blocos.....	138
Tabela 4.16 – Resumo das propriedades mecânicas das argamassas.	139
Tabela 4.17 – Resumo das propriedades mecânicas dos grautes.....	141
Tabela 4.18 – Característica mecânicas dos prismas da Etapa Referência.	143
Tabela 4.19 – Análise de variância para o grautes e blocos na resistência à compressão dos prismas moldados com a argamassa da classe C.	146

Tabela 4.20 – Análise de variância para o grautes e argamassas na resistência à compressão dos prismas moldados com os blocos da classe B15.....	147
Tabela 4.21 – Aumento efetivo da capacidade de carga dos prismas preenchidos.....	150
Tabela 4.22 – Porcentagem estimada dos carregamentos absorvidos pelos grautes.	158
Tabela 4.23 – Características mecânicas dos prismas da Etapa com Argamassa Mista.	160
Tabela 4.24 – Característica mecânicas dos prismas da Etapa com Argamassa Industrializada.....	164
Tabela 4.25 – Análise de variância para a argamassa e bloco na resistência à compressão dos prismas.	167
Tabela 4.26 – Análise de variância para a argamassa e preenchimento na resistência à compressão dos prismas.....	170
Tabela 4.27 – Análise de múltiplas médias entre a resistência à compressão dos prismas – Etapa com Argamassa Mista..	172
Tabela 4.28 – Análise de múltiplas médias entre a resistência à compressão dos prismas – Etapa com Argamassa Industrial.	175
Tabela 4.29 – Valores experimentais e calculados de resistência média à compressão, na área líquida.....	180
Tabela 4.30 – Valores experimentais e calculados de resistência média à compressão, na área líquida.....	182
Tabela 4.31 – Efeito relativo da capacidade de carga dos prismas preenchidos.....	184
Tabela 4.32 – Porcentagem estimada dos carregamentos absorvidos pelos grautes.	187
Tabela 4.33 – Efeito relativo da capacidade de carga dos prismas preenchidos.....	192
Tabela 4.34 – Porcentagem estimada dos carregamentos absorvidos pelos grautes.	194
Tabela 5.1 – Vantagens e desvantagens dos modelos discretos e homogeneizados.	211
Tabela 5.2 – Efeito relativo da capacidade de carga dos prismas preenchidos	218
Tabela 5.3 – Características mecânicas lineares dos materiais.	222
Tabela 5.4 – Características mecânicas não lineares dos materiais.	222

LISTA DE SÍMBOLOS

- f_b – resistência média à compressão do bloco;
 f_{bk} – resistência característica do bloco;
 f_{bT} – resistência a tração do bloco;
 f_{arg} – resistência média à compressão da argamassa;
 f_{argk} – resistência característica à compressão da argamassa;
 f_{argT} – resistência à tração na flexão da argamassa;
 f_g – resistência média à compressão do graute;
 f_{gk} – resistência característica à compressão do graute;
 f_p – resistência média à compressão do prisma na área bruta (área da seção de assentamento sem desconto das áreas dos furos);
 $f_{b\ liq}$ – resistência média à compressão do prisma na área líquida (área da seção de assentamento com desconto das áreas dos furos);
 F_p – carga de ruptura do prisma ou força última de ruptura;
 E_b – módulo de elasticidade secante do bloco;
 E_{arg} – módulo de elasticidade secante da argamassa;
 E_g – módulo de elasticidade secante do graute;
 E_p – módulo de elasticidade secante do prisma na área bruta;
 $E_{p\ liq}$ – módulo de elasticidade secante do prisma na área líquida;
 ν_b – coeficiente de Poisson do bloco;
 ν_{arg} – coeficiente de Poisson da argamassa;
 ν_g – coeficiente de Poisson do graute;
 η – fator de eficiência prisma/bloco;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	29
1.1.	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	30
1.2.	OBJETIVOS	32
1.2.1.	Objetivo Geral	32
1.2.2.	Objetivos Específicos	32
1.3.	METODOLOGIA DO TRABALHO	32
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO	33
2.	CARACTERÍSTICAS, ESPECIFICAÇÕES E COMPORTAMENTO SOB COMPRESSÃO DA ALVENARIA ESTRUTURAL	35
2.1.	CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DA ALVENARIA ESTRUTURAL	35
2.1.1.	Bloco cerâmico	35
2.1.2.	Graute	40
2.1.3.	Argamassa de assentamento	43
2.1.4.	Prismas	51
2.1.5.	Resistência à compressão na alvenaria	53
2.2.	FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA ESTRUTURAL	56
2.2.1.	Resistência à compressão dos blocos	57
2.2.2.	Resistência à tração dos blocos	59
2.2.3.	Geometria do bloco	59
2.2.4.	Argamassa de assentamento	62
2.2.5.	Graute	64
2.2.6.	Módulo de elasticidade	72
2.2.7.	Espessura da junta de assentamento	76
2.2.8.	Tipo de assentamento	77
2.2.9.	Absorção de água inicial dos blocos	79
2.3.	COMPORTAMENTO DA ALVENARIA SUBMETIDA À COMPRESSÃO	79
2.4.	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	88
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	93
3.1.	MATERIAIS UTILIZADOS	96
3.1.1.	Agregados	96
3.1.2.	Aglomerantes	100
3.1.3.	Água	101
3.2.	BLOCOS CERÂMICOS.....	102
3.3.	ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO	106
3.4.	GRAUTES	112

3.5.	PRISMAS	117
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	127
4.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E FÍSICA DOS BLOCOS	127
4.2.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ARGAMASSAS	132
4.3.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS GRAUTES	135
4.4.	RESUMO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPONENTES	137
4.5.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PRISMAS	142
4.5.1.	Resultados dos ensaios da Etapa Referência	142
4.5.1.1	Análise da influência dos componentes na resistência à compressão dos prismas.....	145
4.5.1.2	Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados	147
4.5.2.	Resultados dos ensaios das Etapas com Argamassa Mista e Argamassa Industrializada	159
4.5.2.1	Análise da influência dos componentes na resistência à compressão dos prismas.....	166
4.5.2.2	Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados da Etapa com Argamassa Mista.....	182
4.5.2.3	Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados das Etapas com Argamassa Industrializada	190
4.5.3.	Análise do modo de ruptura dos prismas	197
5.	ANÁLISE NUMÉRICA	207
5.1.	NÃO LINEARIDADE DOS MATERIAIS	212
5.2.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	217
5.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	223
5.3.1.	Resultados para o prisma MG6-C.....	223
5.3.2.	Resultados para o prisma MG6-B.....	227
5.3.3.	Resultados para o prisma MG6-A.....	230
5.3.4.	Discussão dos resultados	234
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	243
6.1	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PRISMAS	243
6.1.1	Etapa Referência	243
6.1.1.1	Influência dos componentes na resistência dos prismas	243
6.1.1.2	Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados	244
6.1.2	Etapas com Argamassa Mista e Industrializada	245
6.1.2.1	Influência dos componentes na resistência dos prismas	245

6.1.2.2	Aumento efetivo da capacidade de carga dos prismas das Etapas com argamassa mista e industrializada	247
6.2	MODO DE RUPTURA DOS PRISMAS.....	248
6.3	SIMULAÇÃO DOS PRISMAS	250
6.4	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..	252
	REFERÊNCIAS	253

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural pode ser definida como um sistema construtivo em que paredes atuam simultaneamente como elemento de vedação e estrutural, podendo ser armada ou não, executada com tijolos ou blocos cerâmicos, blocos de concreto ou blocos silico-cálcareos. Este sistema construtivo é o mais antigo em utilização, e vem se modificando ao longo dos anos de acordo com a evolução tecnológica e industrial, mediante as necessidades de mercado.

No passado, as obras possuíam estética simplificada e os projetos não eram arrojados, em consequência das limitações de conhecimentos técnicos. Não existia estudos ou normalização que estabelecessem parâmetros para a elaboração de projetos ou na execução dessas obras, resultando em edificações de custo oneroso e que não exploravam a potencialidade de seus materiais. A era industrial trouxe mudanças nos padrões das construções que, aliadas a competitividade de mercado, exigiu construções mais rápidas e de menor custo.

No Brasil, o início da alvenaria estrutural ocorreu no estado de São Paulo, no fim da década de 60, na construção de habitações populares em edifícios com quatro ou cinco pavimentos empregando blocos de concreto. Mas a má qualidade dos materiais empregados, o uso de técnicas construtivas inapropriadas e a falta de controle durante a obra geraram, em alguns empreendimentos, muitas patologias, comportamento térmico inadequado, etc. Além disso, a ideia de que esse tipo de sistema construtivo se destinava apenas a construções populares provocou uma retração no mercado e dificultou as pesquisas no desenvolvimento e melhorias deste sistema. Neste período aparecem às primeiras normas técnicas de controle e execução de alvenaria, resultado do esforço da IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) em agrupar os conhecimentos sobre materiais e métodos utilizados na execução de alvenaria de blocos vazados de concreto (SÁNCHEZ, 1994).

A partir da década de 1980 começaram a ser desenvolvidas pesquisas em universidades brasileiras, aprofundando os estudos sobre o comportamento estrutural, influência da mão-de-obra e técnicas utilizadas para aumentar a produtividade neste tipo de construção. Também nesse período, os blocos cerâmicos começaram a ser produzidos.

Segundo Roman (1991), este sistema construtivo apresenta grandes vantagens, como a economia que resulta quando comparadas com as estruturas de aço ou concreto, maior rapidez, facilidade de execução e propriedade para usos com grandes variedades funcionais; o que torna

essa técnica viável e de grande potencial econômico a ser explorado pelas empresas da construção.

Dessa forma a alvenaria estrutural passou a ter maior aceitação nacional, principalmente quando grandes empresas da construção que visando obter maior produtividade e redução de custos a adotaram em suas obras, em virtude da flexibilidade e racionalização de seus sistemas. Esta preocupação com a redução de custo, produtividade e qualidade do produto final, tem sido uma constante em todas as empresas atuantes no setor da construção civil, para se manterem competitivas e atuantes neste ramo industrial.

A partir deste contexto observa-se o crescente desenvolvimento de pesquisas na área, evidenciado pelo aumento no número de publicações científicas. Porém, em virtude à grande variabilidade e condições específicas do Brasil, a realização de uma quantidade maior de pesquisas para a caracterização dos materiais e comportamento mecânico da alvenaria estrutural ainda se faz necessária. Essas contribuições estabeleceriam parâmetros mais confiáveis para a elaboração e atualização das normas específicas para alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, ampliando, ainda mais, o seu emprego.

1.1. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Nos sistemas construtivos em alvenaria estrutural, as paredes atuam simultaneamente como vedação e como elementos resistentes às cargas verticais (peso próprio e ocupação) e cargas horizontais (vento). Quanto à resistência, as paredes devem atuar predominantemente sob compressão e quando ocorrer o aparecimento de tensões como consequência de esforços de tração, estas devem ser restringidas a pontos específicos da estrutura e não apresentar valores elevados (CORRÊA e RAMALHO, 2003).

Em algumas situações de projeto, em função dos carregamentos e tensões atuantes, torna-se necessário o aumento da capacidade resistente das paredes construídas. Tal exigência estrutural pode ser atingida com o grauteamento destas paredes, que consiste no preenchimento dos seus vazios por um componente denominado graute. O graute é um concreto com agregados de pequena dimensão e relativa fluidez que, lançado nos vazios dos blocos da alvenaria, proporciona o aumento de área da seção transversal resistente e solidariza estes blocos com eventuais armaduras posicionadas no seu interior. Desta forma aumenta-se a capacidade resistente da alvenaria à compressão ou permite-se que as armaduras

colocadas combatam tensões de tração que a alvenaria por si só não resistiria.

Quando necessário, o grauteamento das paredes é realizado logo após 24 h do assentamento das unidades, conforme prescrito na norma ABNT NBR 15812-2 (2010). Entretanto, a mesma norma técnica especifica que o grauteamento pode ser realizado com a própria argamassa de assentamento, logo após o assentamento das unidades, desde que a alvenaria não seja armada. Sendo a racionalização característica de um sistema construtivo em alvenaria estrutural (PARSEKIAN e FURLAN JUNIOR, 2003), a utilização da argamassa de assentamento como preenchimento das unidades logo após o assentamento elimina o uso e controle dos materiais utilizados na fabricação do graute, aumentando com isso a agilidade e flexibilidade na execução da obra.

Contudo, nota-se uma carência em pesquisas a cerca do comportamento das paredes em alvenaria estrutural utilizando-se da técnica de preenchimento destas paredes com a própria argamassa de assentamento. Praticamente não há trabalhos sobre o tema, embora o Grupo de Desenvolvimento de Sistema em Alvenaria da Universidade Federal de Santa Catarina (GDA), no trabalho realizado por Mendes (1998), tenha apontado para a potencialidade na utilização desta técnica.

Desta forma, a utilização mais segura desta técnica para aumento do desempenho estrutural, já permitida por norma, requer pesquisas acerca da sua influência no comportamento e na qualidade do produto final construído. Sendo o bom desempenho da alvenaria estrutural dependente dos materiais empregados neste tipo de sistema construtivo, melhorar este desempenho está intimamente ligado à busca de materiais e técnicas que permitam um melhor comportamento em uso do conjunto. Neste aspecto, a compatibilização e o conhecimento das características de todos os componentes constituintes da alvenaria estrutural (bloco, argamassa, graute e armadura) são indispensáveis para maximizar e aperfeiçoar todo o potencial deste sistema construtivo.

Além dos aspectos técnicos favoráveis, pesquisas visando o desenvolvimento deste sistema construtivo têm relevância econômica bastante clara no contexto brasileiro, pois a abundância e a qualidade das jazidas existentes no país, especialmente na região sul, tornam os produtos cerâmicos bastante competitivos dentro do setor construtivo.

Assim, o desenvolvimento de pesquisas que aperfeiçoem o uso de produtos cerâmicos para a alvenaria estrutural potencializa o desenvolvimento deste setor industrial em constante crescimento.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é o de investigar o comportamento estrutural à compressão da alvenaria de blocos cerâmicos considerando o preenchimento dos furos com a argamassa de assentamento, substituindo o graute tradicionalmente utilizado, como componente integrante do sistema construtivo em alvenaria cerâmica estrutural.

1.2.2. Objetivos Específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos os seguintes pontos:

- Comparar o comportamento sob compressão uniaxial de prismas de blocos cerâmicos, quando preenchidos com graute e argamassa de assentamento.
- Analisar o modo de ruptura dos prismas de blocos cerâmicos submetidos à compressão uniaxial, quando preenchidos com graute e argamassa de assentamento.
- Comparar o comportamento sob compressão uniaxial entre os prismas de blocos cerâmicos, obtido na análise numérica e obtido no programa experimental.

1.3. METODOLOGIA DO TRABALHO

A fim de atingir os objetivos gerais e específicos, este trabalho consistiu-se nas seguintes etapas:

a) Apresentação dos conceitos básicos de alvenaria estrutural e revisão bibliográfica. Na revisão bibliográfica apresentam-se as principais características (mecânica, física e geométrica) e especificações nacionais e internacionais dos componentes e elementos da alvenaria estrutural, o comportamento da alvenaria não grauteada e grauteada sob compressão, fatores que interferem na sua resistência e o modo e tipo de ruptura que ocorrem na alvenaria;

b) Na sequência determinou-se a metodologia utilizada no programa experimental do trabalho. Nesta etapa são apresentados a caracterização dos materiais e componentes utilizados, os traços em volume e massa das argamassas de assentamento e grautes, os procedimentos de moldagem e métodos de ensaios utilizados para os

blocos, argamassas, grautes e prismas, bem como os equipamentos utilizados para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

c) Com o desenvolvimento do programa experimental, realizou-se a análise dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos prismas e demais componentes utilizados, com o objetivo de investigar o comportamento estrutural à compressão da alvenaria de blocos cerâmicos considerando o preenchimento dos furos com a argamassa de assentamento.

d) Após a análise dos resultados obtidos com o programa experimental realizou-se a análise numérica. Nesta etapa apresentam-se os conceitos, metodologia empregada e os resultados obtidos com a análise numérica através do método dos elementos finitos. Esta parte do trabalho tem a finalidade de avaliar o comportamento dos prismas sob compressão considerando a não linearidade dos materiais, com a utilização do programa computacional Marc Mentat 2012, completando a análise realizada com o programa experimental.

e) Por último, são elaboradas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 descreve-se a introdução à alvenaria estrutural, os aspectos históricos, os objetivos deste trabalho e a metodologia empregada.

No Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica acerca do comportamento da alvenaria estrutural não grauteada e grauteada submetida à compressão, fatores que interferem na sua resistência, o modo e o tipo de ruptura que ocorre na alvenaria, assim como especificações e propriedades físico-mecânicas de seus componentes e elementos.

O Capítulo 3 apresenta o programa experimental, onde se estabelece a metodologia de caracterização dos componentes da alvenaria estrutural, prismas, blocos, argamassa e grautes.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental.

O Capítulo 5 apresenta a análise numérica realizada através do método dos elementos finitos.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2. CARACTERÍSTICAS, ESPECIFICAÇÕES E COMPORTAMENTO SOB COMPRESSÃO DA ALVENARIA ESTRUTURAL

2.1. CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DA ALVENARIA ESTRUTURAL

Neste item da revisão bibliográfica apresentam-se as principais características (mecânica, física e geométrica) e especificações nacionais e internacionais dos componentes e elementos da alvenaria estrutural, de interesse neste estudo, quais sejam: bloco cerâmico, graute, argamassa de assentamento e prismas.

2.1.1. Bloco cerâmico

A matéria prima utilizada na confecção dos blocos cerâmicos é a argila. Todas as propriedades físicas e mecânicas do bloco são afetadas pela sua composição e pelo processo de fabricação. Segundo Rizzatti (2003), a argila para a fabricação de blocos deve ter plasticidade quando misturada com água, de maneira que possa ser moldada, deve ter suficiente resistência à tração para manter o formato depois de moldada e, ainda, deve ser capaz de fundir as partículas quando queimada a altas temperaturas. Ainda segundo o autor, a plasticidade, a água de moldagem e o comportamento na secagem e na queima dependem da granulometria e dos diversos minerais presentes. Para Gomes (1983), a produção de blocos cerâmicos deve reunir a experiência estrutural e a tecnologia das argilas, de forma que estes componentes apresentem resistência e durabilidade necessária e proporcionem o conforto ambiental desejado.

As normas ABNT NBR 15270 - Partes 1 e 2 (2005), classificam os blocos cerâmicos basicamente em dois grupos:

- a) Bloco de vedação: componente da alvenaria de vedação que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm. O bloco cerâmico para vedação é produzido para ser assentado especificamente com furos na horizontal, mas também pode ser produzido para utilização com furos na vertical;
- b) Bloco estrutural: componente da alvenaria estrutural que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm, produzidos para serem assentados com furos na

vertical. Estes ainda podem ser classificados em bloco estrutural de paredes vazadas, de paredes maciças e perfurados.

Para a norma EN 1996-1-1 (2005), as unidades de alvenaria são classificadas conforme os tipos e os grupos correspondentes, de acordo com a porcentagem de vazios. As unidades com porcentagens de vazios menores que 25% são considerados do Grupo 1 (tijolos cerâmicos, tijolos vazados e pedras de origem natural e artificial). Para os Grupos 2 e 3 a porcentagem de vazio na vertical fica entre os 25% e os 70%. No Grupo 4 a unidade de alvenaria do possui furo na horizontal, com porcentagem de vazio menor que 70%. Essa classificação ainda estabelece limites geométricos para a disposição de furos e espessuras mínimas de parede, sendo uma referência para a produção de unidades para fins estruturais.

A norma ABNT NBR 15270-2 (2005), para blocos estruturais, também estabelece requisitos dimensionais para a utilização destes componentes, conforme se observa na Tabela 2.1.

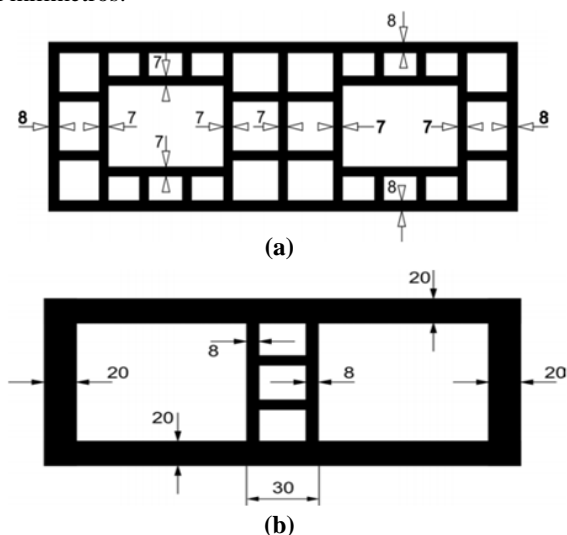
Tabela 2.1 - Tolerâncias dimensionais para blocos cerâmicos.

Grandezas Controladas	Tolerância (mm)
Largura (L)	± 3*
Altura (H)	
Comprimento (C)	
Planeza das faces (F)	< 3
Desvio em relação ao esquadro (D)	< 3
Nota: *Tolerâncias dimensionais em relação à média das dimensões efetivas.	

Fonte: ABNT NBR 1527-2 (2005).

Para a espessura das paredes externas e septos, a norma traz as seguintes exigências de valores mínimos para blocos cerâmicos estruturais de paredes vazadas e com paredes maciças, conforme a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Valores de espessuras mínimas para as paredes externas e septos dos blocos cerâmicos estruturais (a) de paredes vazadas e (b) com paredes maciças, em milímetros.



Fonte: ABNT NBR 1527-2 (2005).

Quanto às características físicas e mecânicas, a mesma norma determina alguns valores para índice de absorção de água (AA) e resistência característica à compressão (f_{bk}), indicados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características mecânicas e físicas para blocos cerâmicos estruturais.

Resistência característica à compressão, na área bruta – f_{bk} (MPa)	Índice de absorção de água - AA (%)
> 3,0	8 < AA < 22

Fonte: ABNT NBR 1527-2 (2005).

A mesma norma também estabelece que o bloco cerâmico estrutural não deve apresentar defeitos sistemáticos, tais como quebras, superfícies irregulares ou deformações que impeçam seu emprego na função especificada.

Para o cálculo da resistência característica à compressão dos blocos, na área bruta, a ABNT NBR 15270-2 (2005) especifica o seguinte procedimento:

1) Inicialmente, a resistência característica é estimada através da Equação 2.1.

$$f_{bk,est} = 2 \left[\frac{f_b(1) + f_b(2) + \dots + f_b(i-1)}{i-1} \right] - f_{bi} \quad (2.1)$$

$f_{bk,est}$ = resistência característica estimada da amostra, em MPa;
 $f_b(1), f_b(2), \dots, f_{bi}$ = valores de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova da amostra, ordenados crescentemente;
 $i = n/2$, se n for par;
 $i = (n - 1)/2$, se n for ímpar;
 n = quantidade de blocos da amostra.

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

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

b) se o valor do $f_{bk,est} < \emptyset \times f_b(1)$ (menor valor da resistência à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra), adota-se a resistência característica à compressão (f_{bk}) determinada pela expressão $\emptyset \times f_b(1)$, estando os valores de \emptyset indicados na Tabela 2.3.

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

Tabela 2.3 - Valores de \emptyset em função da quantidade de blocos.

Nº de Blocos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	≥ 18
\emptyset	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04
Nota: Recomenda-se adotar $n \geq 13$.												

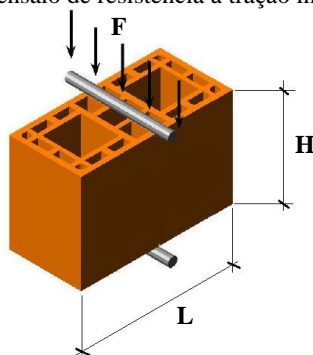
Fonte: ABNT NBR 1527-2 (2005).

Ainda em relação ao ensaio para a determinação da resistência à compressão dos blocos cerâmicos estruturais, a velocidade de carregamento aplicada, segundo a ABNT NBR 15270-2, deve ser de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s.

Outra característica mecânica importante do bloco é sua resistência à tração. Embora a alvenaria atue predominantemente sob esforços de compressão, dependendo da rigidez dos seus materiais

constituintes, podem surgir tensões de tração nos blocos, tornando importante a determinação da sua resistência à tração. Conforme a norma ASTM C 1006 (1984), a determinação desta propriedade pode ser realizada de forma indireta por meio de ensaio de compressão, similar ao ensaio de compressão diametral realizado em corpos-de-prova de concreto. No ensaio, para a aplicação da carga de compressão, são posicionadas barras de aço de seção transversal cilíndrica com diâmetro entre 1/12 a 1/8 da altura da amostra e com comprimento maior que a largura do bloco, conforme apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Esquema de ensaio de resistência à tração indireta do bloco.



Fonte: adaptado de Leão (2008).

Conforme a norma, para o cálculo da resistência à tração dos blocos por compressão diametral utiliza-se a Equação 2.2.

$$T = \frac{2.F}{\pi.L.H} \quad (2.2)$$

Onde:

T = resistência à tração indireta por compressão, em MPa;

F = carga máxima aplicada, em Newton;

L = largura do bloco, para área bruta, ou soma das espessuras das paredes do bloco, quando considerada a área líquida, em milímetros;

H = altura do bloco, em milímetros.

Ainda segundo a norma, a velocidade de carregamento aplicada para o ensaio não deve exceder 0,15 kN/s.

Entretanto de acordo com Chema e Klingner (1986), a resistência à tração dos blocos pode ser determinada mediante a seguinte equação:

$$T = 0,41 \times (f_b)^{1/2} \quad (2.3)$$

Onde:

T = resistência à tração do bloco, em MPa;

f_b = resistência à compressão do bloco na área bruta, em MPa;

Entretanto, o ensaio preconizado pela ASTM C 1006 (1984) tem sido o método mais utilizado por pesquisadores para a determinação da resistência à tração dos blocos.

Quanto à determinação do módulo de elasticidade para blocos cerâmicos não existem ensaios normalizados com esta finalidade. Para blocos de concreto, tanto o CEB-FIP Mode Code (1990) como o ACI – Buildin Code 318 (1999) especificam métodos e equações para o cálculo do módulo de elasticidade dos blocos. Entretanto para blocos cerâmicos, a ABNT NBR 15270-3 (2005) recomenda a utilização da ABNT NBR 8522 (2008) para a determinação do módulo de deformação longitudinal desse componente.

2.1.2. Graute

A norma ABNT NBR 15812-1 (2010) define graute como o componente utilizado no preenchimento dos espaços vazios dos blocos cerâmicos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente. Ainda segundo a norma, o graute deve ter características no estado fresco que garantam o completo preenchimento dos espaços vazios dos blocos e não deve apresentar retração que provoque o descolamento do graute das paredes dos blocos.

Segundo Gomes (1983), o graute desempenha várias funções, entre as quais se destacam:

- para alvenaria armada, permitir o posicionamento correto das armaduras nos furos e transmissão de esforço entre o graute e o bloco;
- absorver parcela dos esforços verticais;
- aumentar a rigidez global do conjunto, especialmente em relação às cargas horizontais.

Basicamente, o graute é utilizado como reforço estrutural em paredes de alvenaria, aumentando sua capacidade resistente, absorvendo uma parcela dos esforços verticais as quais são submetidas, proporcionando maior estabilidade e rigidez ao conjunto, além de solidarizar a armadura à estrutura, permitindo seu posicionamento.

Tradicionalmente, o graute utilizado tem as mesmas características que o concreto e, de acordo com a norma ABNT NBR 15812-2 (2010), deve ser utilizado no mínimo 24 h após a execução da alvenaria. Entretanto, conforme a ABNT NBR 15812-2 (2010), quando não usado em alvenaria armada, o graute pode ser substituído pela argamassa de assentamento das unidades logo após a execução da alvenaria, desde que os ensaios de prisma apresentem os resultados especificados pelo projetista.

Segundo Cunha (2001), o graute consiste em um microconcreto, formado de cimento, água, agregado miúdo e agregados graúdos de pequenas dimensões (até 9,5 mm) com alta fluidez. Essa fluidez é fundamental para que o graute possa preencher os furos dos blocos sem sofrer segregação. Além de sua alta fluidez, o graute deve apresentar boa trabalhabilidade e boa capacidade de reter água, evitando perdas excessivas de água para o bloco.

A trabalhabilidade consiste em uma das propriedades relevantes para a utilização do graute, que está ligada a outras propriedades como a consistência e plasticidade. Com isto, um dos parâmetros usados para se medir a trabalhabilidade do graute é a sua consistência, que é determinada através do ensaio de abatimento do tronco de cone. Entretanto, a norma para alvenaria de blocos cerâmicos, ABNT NBR 15812-2 (2010), não indica valores de abatimento para aplicação do graute. A norma somente recomenda que a trabalhabilidade deve ser compatível com o método de adensamento utilizado e adequada para preencher todos os vazios dos blocos sem que haja segregação. Em alvenaria de blocos de concreto, de acordo com a antiga ABNT NBR 8798 (1985), o abatimento indicado deveria ser de 200 ± 30 mm.

A norma britânica BS 5628: Part 2 (1985) especifica valores de abatimento compreendidos entre 75 a 175 mm para a utilização do graute. Mas para Oliveira (1986), o graute deve apresentar abatimento de 200 mm para blocos com baixa absorção e 250 mm para blocos com alta absorção. Para blocos cerâmicos, valores abaixo de 8% consideram-se baixa sucção e valores acima de 22%, considera-se alta sucção (ABNT NBR 1570-2, 2005).

Outro fator de grande importância é a resistência à compressão do graute para a resistência final da alvenaria. Segundo a ABNT NBR 15812-2 (2010), o graute deve apresentar resistência à compressão de modo que a resistência do prisma grauteado atinja a especificada pelo projetista. Entretanto, não especifica valores mínimos ou máximos de resistência à compressão de utilização para o graute. Na antiga ABNT NBR 8798 (1985), para alvenaria de blocos de concreto, o graute

deveria apresentar valores de resistência à compressão superiores a 14 MPa. Para a antiga norma ABNT NBR 10837 (1989), a resistência característica à compressão do graute (f_{gk}) deveria ser igual ou maior que duas vezes a resistência característica à compressão do bloco (f_{bk}). Ramalho e Corrêa (2003) comentam que essa recomendação é fácil de entender quando se recorda que a resistência característica do bloco é referida à área bruta e que o índice de vazios para os blocos é usualmente 50%. Para os autores, seria mais claro se a norma mencionasse que a resistência característica do graute fosse no mínimo o mesmo valor da resistência característica do bloco em relação à área líquida.

A determinação da resistência à compressão do graute, quando o graute apresenta as mesmas características que o concreto, segue a ABNT NBR 5739 (2007) – Concreto: Ensaio de corpos-de-prova cilíndricos.

Para a determinação do módulo de elasticidade do graute, conforme recomendação da ABNT NBR 15270-3 (2005) utiliza-se a mesma norma para concreto, a ABNT NBR 8522 (2008) – Concreto: Determinação do Módulo Estático de Elasticidade à Compressão. A determinação do módulo de deformação do graute é realizada, portanto, através dos dados extraídos do diagrama tensão x deformação traçado para os corpos-de-prova ensaiados.

Para satisfazer as exigências de propriedades mecânicas e trabalhabilidade estabelecidas pelo projetista, de acordo com a obra a ser executada, a dosagem do traço do graute pode ser realizada experimentalmente por qualquer método desenvolvido para dosagem de concreto convencional. A norma ABNT NBR 15912-2 (2010) somente determina que a dosagem deve levar em consideração a absorção dos blocos e das juntas de argamassa, que pode proporcionar uma redução na relação água/cimento.

Entretanto, a norma britânica BS 5628: Part 2 (1985), recomenda o traço em volume para a dosagem do graute, nas seguintes proporções apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Traços dos grautes em volume conforme BS 5628: Part 2.

Partes em volume			
Cimento	Cal	Areia	Agregado Graúdo
1	0 a 0,25	3	2

Fonte: BS 5628: Part 2 (1985).

A norma britânica também recomenda para o diâmetro máximo do agregado graúdo o valor de 10 mm.

A norma americana ASTM C 476-83 (1987) também faz algumas recomendações para os traços em volume dos grautes, conforme apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Traços dos grautes em volume conforme ASTM C 476-83.

Tipo de Graute	Partes em volume			
	Cimento Portland	Cal hidratada ou pasta de cal	Agregados secos	
			Finos	Graúdos
Graute Fino	1	0 a 1/10	2 ¼ a 3	-
Graute Grosso	1	0 a 1/10	2 ¼ a 3	1 a 2

Fonte: ASTM C 476-83 (1987).

Quanto às exigências granulométricas dos agregados utilizados na composição dos traços dos grautes, a ABNT NBR 15812-2 (2010) especifica somente que os agregados devem ter dimensão inferior a 1/3 da menor dimensão dos espaços vazios a serem preenchidos pelo graute. Entretanto, quando o graute tem as mesmas características que um concreto, as exigências granulométricas dos agregados baseiam-se nas especificações estabelecidas pela norma ABNT NBR 7211 (2009).

2.1.3. Argamassa de assentamento

A argamassa de assentamento é o componente utilizado na ligação entre os blocos, garantindo distribuição uniforme de esforços (ABNT NBR 15812-1, 2010).

É composta por um ou mais aglomerantes (cimento Portland e cal), agregados inertes (areia), água ou outra adição cuja finalidade é aumentar a retenção da água durante a hidratação e, conseqüentemente, melhorar a trabalhabilidade da mistura; podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

Para Sabbatini (1984) e Gallegos (1989), o grande interesse na argamassa de assentamento de alvenaria estrutural está relacionado à trabalhabilidade, consistência, aderência e deformabilidade. A resistência à compressão da argamassa assume aspecto secundário,

exigindo-se que a argamassa resista aos esforços a que for submetida sem comprometer seu desempenho quando parte do conjunto.

Ainda segundo Roman et al. (1999), uma grande resistência para a argamassa não é necessariamente sinônimo de uma melhor solução estrutural. A argamassa deve ser resistente o suficiente para suportar os esforços que a parede está submetida. Os autores afirmam que a resistência da argamassa não deve exceder a resistência dos blocos da parede, de maneira que as fissuras que venham a ocorrer em razão de expansões térmicas ou outros movimentos da parede ocorram na junta.

Na norma britânica BS 5628-3 (1985), as principais funções da argamassa de assentamento em uma parede de alvenaria são:

- unir as unidades e ajudá-las a resistir aos esforços normais e laterais;
- distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente das unidades, evitando assim concentrações de tensões por causa de imperfeições geométricas;
- absorver as deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita;
- selar as juntas contra a penetração de água da chuva.

Para assegurar o desempenho das argamassas, algumas propriedades no estado fresco devem ser levadas em consideração além da sua resistência à compressão simples. Conforme Camarini e Ishikawa (2004), de acordo com características e solicitações exigidas em obra, às seguintes propriedades das argamassas no estado fresco devem ser consideradas: trabalhabilidade, plasticidade, coesão, retenção de água e teor de ar incorporado. Neste estudo, no intuito de explicar estas propriedades, os autores fazem um resumo das principais observações relatadas por alguns pesquisadores, conforme pode ser observado na sequência:

a) **Trabalhabilidade:** consiste na síntese de diversas propriedades reológicas da argamassa como a consistência, plasticidade, retenção e exsudação de água, coesão interna, adesão inicial, massa específica e retenção da consistência (RILEM, 1982; CAVANI, ANTUNES e JOHN, 1997). A consistência pode ser associada à medida de trabalhabilidade. A trabalhabilidade é entendida, subjetivamente, como facilidade de manuseio e aplicação. Em termos de elementos que compõem uma argamassa, pode-se dizer que a trabalhabilidade melhora quando o módulo de finura do agregado diminui, mantendo-se a continuidade da granulometria, e piora quando se tem agregado de grãos angulosos. Em relação aos aglomerantes, a adição de cal melhora a trabalhabilidade, sendo necessário verificar a sua influência em outras

propriedades. Quanto aos cimentos, as diferentes classes não influem, significativamente, na trabalhabilidade. Entretanto, cimentos mais finos podem produzir argamassas mais trabalháveis e com maior retenção de água. A plasticidade e a trabalhabilidade são termos subjetivos, que só podem ser avaliados por quem manuseia e aplica a argamassa, sendo a consistência uma medida de avaliar essas duas propriedades em conjunto (CINCOTTO; SILVA e CASCUDO 1995).

b) Plasticidade: esta propriedade consiste em que a argamassa tende a manter a sua deformação sem ruptura, após a redução do esforço que a originou (RILEM, 1982). A plasticidade é influenciada pelo teor de ar incorporado, natureza e teor de aglomerante e da intensidade da energia de mistura. A plasticidade está ligada à coesão interna da mistura, ou seja, às forças de tensão superficial dos materiais e da água de amassamento. No estado plástico, a argamassa deve apresentar-se trabalhável, isto é, no manuseio da argamassa com a colher de pedreiro ela deve se manter coesa, e quando da aplicação sobre a unidade da alvenaria, a argamassa deve fluir sem aderir na colher de pedreiro, sendo de fácil espalhamento sobre a unidade (SABBATINI, 1986).

c) Coesão: a coesão da argamassa é caracterizada pelas forças de atração física existentes entre as partículas sólidas inertes e a pasta de aglomerante. A cal atua positivamente na coesão interna da argamassa, influenciando na melhoria das propriedades de consistência e trabalhabilidade (CINCOTTO; SILVA e CASCUDO 1995). A coesão é influenciada pelo teor de finos, tanto do aglomerante como do agregado miúdo (RAGO e CINCOTTO, 1997).

d) Retenção de água: a retenção de água é a propriedade da argamassa em fixar a água no meio da mistura, quando colocada em contato com bloco de alta sucção (SABBATINI, 1986). Uma das características da cal é a capacidade de retenção de água, e esta característica também é adquirida pela argamassa (CARASEK, CASCUDO e SCARTEZINI, 2001). As argamassas devem apresentar a propriedade de retenção de água na mistura para que mantenha a trabalhabilidade requerida durante a sua aplicação, minimizando, desta forma, a exsudação. Uma argamassa deve possuir capacidade de reter água em seu meio, molhando a superfície dos grãos do agregado e do aglomerante. Portanto, a capacidade de retenção de água da argamassa está ligada à área específica de seus constituintes. A cal, além de ser um aglomerante, possui capacidade de adsorção e área específica elevada, e assim cumpre também a função de reter água na mistura (GUIMARÃES, 2002). A cal, pelas suas características físicas, apresenta boas condições de retenção de água, em virtude da grande

capacidade de adsorção de seus cristais, adsorvendo até 100% do seu volume (SABBATINI, 1986). É prática usual, em obra, a mistura da pasta de cal com areia, em proporção definida, para maturação da cal, isto é, para a hidratação dos óxidos não hidratados possivelmente existentes na cal hidratada. Esse procedimento melhora a capacidade de retenção da água na argamassa, em relação à adição da cal em pó na mistura, para aplicação de imediato. A cal dolomítica apresenta resultados melhores de retenção de água em relação à cal cálcica, para mesmo traço e trabalhabilidade. O teor de cal na mistura também influi na capacidade de retenção de água na argamassa. Para tal, o teor de cal na mistura deve ser, no mínimo, na mesma proporção do cimento. Com relação ao traço, aumentando-se a relação agregado/aglomerante e mantendo a relação cal/cimento fixa, a retenção de água decresce (CINCOTTO; SILVA e CASCUDO, 1995).

e) Teor de ar incorporado: o teor de ar incorporado influi na trabalhabilidade das argamassas e concretos. Segundo Yoshida e Barros (1995), o ar incorporado serve de lubrificante entre os grãos sólidos da argamassa, melhorando a sua trabalhabilidade e capacidade de retenção de água. Entretanto, quanto maior o teor de ar incorporado, maior o volume de vazios, o que implica uma maior porosidade e, por conseguinte, uma diminuição da resistência à compressão da argamassa.

A ABNT NBR 13281 (2005) especifica alguns valores quanto ao desempenho mecânico e reológico das argamassas, classificando-as em função destes valores (Tabela 2.6). Entretanto, a mesma norma não especifica aplicações ou restrições para cada uma das classes de argamassas em função das propriedades que apresentam. A norma ABNT NBR 15812-1 (2010) especifica que argamassas de assentamento, quando utilizadas em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, devem apresentar resistência à compressão com valor mínimo de 1,5 MPa e máximo limitado a 70% da resistência característica à compressão do bloco (fbk), referida na área líquida. Quanto à trabalhabilidade, a norma ABNT NBR 8798 (1985) indica o valor de 230 ± 10 mm para a consistência das argamassas de assentamento, quando utilizadas em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto.

Tabela 2.6 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas.

Características		Identificação ¹⁾	Limites	Método
Estado Fresco	Capacidade de retenção de água (%)	Normal Alta	≥ 80 e ≤ 90 > 90	NBR 13277
	Teor de ar incorporado (%)	a b c	< 8 ≥ 8 e ≤ 18 > 18	NBR 13278
Estado Endurecido	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I II III	$\geq 0,1$ e $< 4,0$ $\geq 4,0$ e $\leq 8,0$ > 8,0	NBR 13279

¹⁾ Exemplo de identificação de argamassa: I-Normal-a.

Fonte: ABNT NBR 13281 (2005).

A norma americana ASTM C-270-86b (1987), entretanto, especifica o uso das argamassas de assentamento para alvenaria quanto ao traço e propriedades mecânicas e reológicas, conforme Tabela 2.7. Enquanto que a norma britânica BS 5628-1 (1992) determina a produção e o uso das argamassas de assentamento para a alvenaria estrutural tendo por referência os requisitos estruturais e as características dos componentes escolhidos para a execução das alvenarias, conforme apresentado na Tabela 2.8.

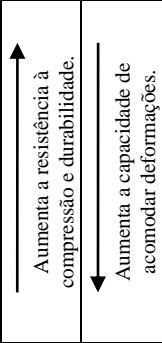
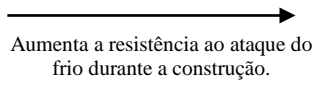
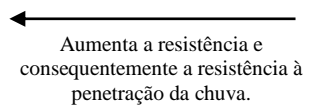
Tabela 2.7 - Especificações dos traços e propriedades das argamassas.

Tipo de Argamassa	Traço em Volume			Resistência média à compressão 28 dias (MPa)	Retenção de água (%)	Ar incorporado (%)
	Cim.	Cal	Areia			
M	1	0,25	De 2,25 a 3 vezes a soma dos volumes de aglomerantes	17,2	75	12
S	1	0,25 a 0,50		12,4	75	12
N	1	0,50 a 1,25		5,2	75	14*
O	1	1,25 a 2,25		2,4	75	14*

Somente para argamassas de laboratório. * Quando existir armadura incorporada à junta de argamassas, a quantidade de ar incorporado não deve ser maior que 12 %.

Fonte: ASTM C 270-86b (1987).

Tabela 2.8 - Especificações dos traços e propriedades das argamassas.

	Classe	Traço da argamassa (em volume)			Resistência média à compressão 28 dias (MPa)	
		Cim.: cal : areia	Ar incorporado na mistura		Ensaio em laboratório	Ensaio em obra
			Cimento de alvenaria: areia	Cim.: areia c/ plastificante		
	(i)	1:0 até 0,25:3	-	-	16,0	11,0
	(ii)	1:0,5:4 até 4,5	1:2,5 até 3,5	1:3 até 4	6,5	4,5
	(iii)	1:1:5 até 6	1:4 até 5	1:5 até 6	3,6	2,5
	(iv)	1:2:8 até 9	1:5,5 até 6,5	1:7 até 8	1,5	1,0
						
						

Fonte: (BS 5628-1, 1992)

A norma brasileira ABNT NBR 13281 (2001) também não determina limites granulométricos de utilização para agregados miúdos para as argamassas. A distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado na fabricação de argamassas pode influenciar suas propriedades no estado fresco. Desta forma, o estabelecimento de exigências ou limites granulométricos é de fundamental importância para a especificação de argamassas adequadas para o uso em alvenaria estrutural (MOHAMAD, 2007).

No Brasil existem apenas especificações granulométricas para agregados miúdos quando estes são utilizados para concretos, conforme a norma ABNT NBR 7211 (2009) - Agregados para concreto. Entretanto as normas BS 1200 (1976) e ASTM C-144 (1987)

especificam limites de utilização adequados para argamassas de assentamento de alvenaria, conforme pode ser observado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Limites da composição granulométrica do agregado miúdo para argamassas de assentamento.

Peneira (abertura em mm)	Porcentagem Retida		Porcentagem Retida	
	BS 1200 (1976)		ASTM C-144 (1987)	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
4,75	0	0	0	0
2,36	0	10	0	5
1,20	0	30	0	30
0,60	20	60	25	60
0,30	60	95	65	90
0,15	90	100	85	98

Fonte: BS 1200 (1976) e ASTM C-144 (1987).

Quanto à determinação das propriedades mecânicas das argamassas, especificamente para a determinação dos valores de resistência à compressão e tração na flexão, são utilizados os ensaios de caracterização conforme a ABNT NBR 13279 (2005) para corpos-de-prova prismáticos de dimensões (4x4x16) cm. A resistência à compressão é calculada conforme equação 2.4.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2.4)$$

Onde:

R_c = resistência à compressão, em megapascals;

F_c = carga máxima aplicada, em newton.

A velocidade de carregamento utilizada para este ensaio deve ser de 500 ± 50 N/s, até a ruptura do corpo-de-prova.

Para o cálculo da resistência à tração na flexão, segundo a mesma norma, utiliza-se a equação 2.5.

$$R_f = \frac{1,5.L.F_c}{40^3} \quad (2.5)$$

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão, em Megapascals;

F_c = carga aplicada verticalmente no centro do corpo-de-prova prismático, em Newton.

L = distância entre os suportes, em milímetros.

Quanto à determinação do módulo de elasticidade das argamassas, a norma ABNT NBR 15270-3 (2005) recomenda a mesma metodologia utilizada pela ABNT NBR 8522 (2008), para concreto, na qual o módulo é determinado através do gráfico tensão-deformação, entre os pontos com 0,5 MPa e 30% da carga de ruptura.

Para Cheema e Klingner (1986), o módulo de elasticidade tangente (E_{tg}) e o módulo de elasticidade secante (E_{sec}), respectivamente obtidos para níveis de tensão de 30% e 60% da resistência à compressão da argamassa (f_{arg}), podem ser estimados através das equações 2.6 e 2.7.

$$E_{tg} = 1000. f_{arg} \quad (2.6)$$

$$E_{sec} = 500. f_{arg} \quad (2.7)$$

No mesmo trabalho, os valores encontrados para o coeficiente de Poisson foram de 0,20 na fase inicial de deformação e 0,50 na tensão de esmagamento.

Khalaf *et al.* (1992) *apud* Mohamad (2007), realizaram estudos de caracterização das argamassas de assentamento, obtendo as propriedades mecânicas para três traços diferentes, em volume. Os resultados de Khalaf *et al.* (1992) não mostraram uma boa aproximação quando comparados com a estimativa do módulo de elasticidade das equações 2.6 e 2.7 proposta por Cheema e Klingner (1986), tanto para o módulo tangente como para o secante. As equações que melhor representaram os resultados experimentais da Tabela 2.10, foram $E_{tg} = 600. f_{arg}$ e $E_{sec} = 340.f_{arg}$, para os módulos de elasticidade tangente e secante, respectivamente.

Tabela 2.10- Propriedades mecânicas das argamassas obtidas no estudo de Khalaf *et al.*.

Traço (em volume)	f_{ag} (MPa)	E_{tg} (MPa)		E_{sec} * (MPa)		Coeficiente de Poisson	
		Khalaf et al.	$1000.f_{arg}$	Khalaf et al.	$500.f_{arg}$	Tensões iniciais	Tensões finais **
1:1:6	8,0	5603	8000	3696	4000	0,26	0,40
1:0,5:4,5	14,6	10250	14600	5000	7300	0,22	0,35
1:0,25:3	25,0	14119	25000	8140	12500	0,18	0,25

Nota: * O módulo de elasticidade secante foi determinado a 2/3 da resistência à compressão do corpo de prova. ** O coeficiente de Poisson para tensões finais é aquele medido quando a argamassa está próximo da tensão de ruptura.

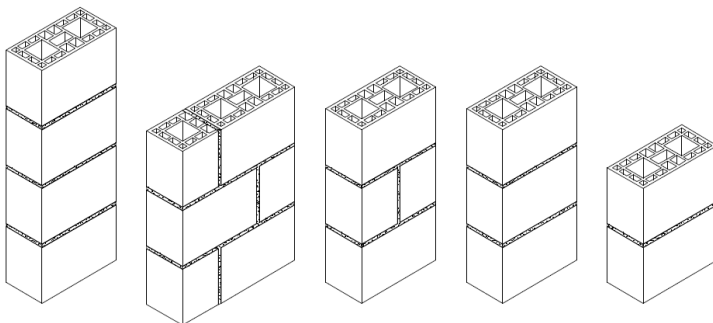
Fonte: Khalaf *et al.* (1992).

2.1.4. Prismas

Prismas de alvenaria são simulações mais simples e econômicas para a verificação das propriedades mecânicas de uma parede de alvenaria estrutural. Ensaios em paredes em escala natural seriam ideais, porém são muitas vezes técnica e economicamente inviáveis comparados com ensaios utilizando primas (MENDES, 1998). Para Silva Junior (2007), os prismas de alvenaria são corpos-de-prova usados para prever as propriedades básicas dos elementos a serem empregados efetivamente em uma construção executada em alvenaria estrutural.

Os prismas podem ter formas, tamanhos e modos de assentamento diferentes (Figura 2.3). Os prismas são compostos por dois ou mais blocos estruturais, assentados com argamassa na superfície total ou apenas na face lateral da seção transversal dos blocos. E conforme solicitação de projeto, os prismas podem ser grauteados ou não (GROHMANN, 2006).

Figura 2.3 - Modelos de prismas utilizados experimentalmente.



Fonte: Grohmann (2006).

Segundo Drysdale *et al.* (1994), os prismas tem geralmente uma unidade de largura, uma unidade de comprimento e altura variando entre 1,5 e 5 vezes a espessura. Na maioria das vezes são construídos com junta a prumo, mas podem ter junta amarrada, que representam melhor as condições da obra.

A norma brasileira ABNT NBR 15812-2 (2010), prescreve a utilização de prismas de 2 blocos de altura e argamassamento total na face de assentamento, com juntas de assentamento com espessura de 10 ± 3 mm. Ainda segundo a norma, para prismas grauteados, o grauteamento deve ser realizado após 24 ± 2 h após o assentamento dos prismas. Entretanto, quando utilizada a própria argamassa de assentamento em substituição ao graute, o preenchimento dos prismas pode ser executado logo após seu assentamento.

A norma americana ASTM E 447-84 (1987) recomenda que os prismas possuam três blocos assentados a prumo, com duas juntas de argamassa. Para Page (1991), Colville (1991), La Rovere e Rodrigues (1997), Rizzati (2003), os prismas devem ser os mais representativos possíveis das paredes de alvenaria para a verificação de suas propriedades mecânicas. Os autores afirmam que ensaios em prismas devem ter pelo menos três unidades para representar com melhor eficácia a parede e minimizar o confinamento imposto pelos pratos da prensa. Pois nestes prismas, o bloco central, geralmente livre do efeito de confinamento dos pratos da prensa, representa melhor o tipo de ruptura da alvenaria.

Quanto ao comportamento mecânico, os prismas, assim como as paredes, apresentam comportamento mecânico diferente da unidade (bloco). Isso ocorre principalmente a presença da junta horizontal de

argamassa, que é mais deformável que o bloco. Ao ser comprimida axialmente, a parede tende a se deformar lateralmente, devido ao efeito de Poisson, e a argamassa, por ter em geral módulo de elasticidade menor do que a do bloco tende a ter maior deformação. No entanto, por causa da aderência entre os blocos e a argamassa, esta deformação é impedida, surgindo tensões laterais de tração no bloco e de compressão na argamassa (LA ROVERE, 2001 apud MATA, 2006).

Quanto à representatividade dos prismas como corpo-de-prova das paredes de alvenaria, tomando-se um amplo conjunto de ensaios já realizados no Brasil, verifica-se que a resistência das paredes equivale em torno de 70 % da resistência dos prismas, tanto para blocos de concreto como para blocos cerâmicos (RAMALHO e CORRÊA, 2003). Este comportamento está de acordo com a norma ABNT NBR 15812-1 (2010). Segundo a norma, na falta de ensaios de resistência a compressão de paredes, a resistência característica à compressão da alvenaria pode ser estimada como 70 % da resistência característica de compressão simples de prismas.

2.1.5. Resistência à compressão na alvenaria

A resistência a compressão é, obviamente, o parâmetro de resistência mais importante para a alvenaria estrutural, pois suas paredes atuam basicamente sob compressão. Desta forma, muitos trabalhos e normas foram desenvolvidos com o objetivo de quantificá-la utilizando-se principalmente de prismas ou pequenas paredes, uma vez que ensaios com paredes em escala real são difíceis de serem executados.

De acordo com a norma ABNT NBR 15812-2 (2010), o valor da resistência à compressão característica dos elementos da alvenaria pode ser calculado através da seguinte equação:

$$f_{ek,est} = 2 \left[\frac{f_{e(1)} + f_{e(2)} + \dots + f_{e(i-1)}}{i-1} \right] - f_{ei} \quad (2.8)$$

Onde:

- $f_{ek,est}$ = resistência característica estimada da amostra, em MPa;
- $f_{b(1)}, f_{b(2)}, \dots, f_{bi}$ = valores de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova da amostra, ordenados crescentemente;
- f_{em} = média de todos os resultados da amostra;
- n = número de corpos-de-prova da amostra;
- $i = n/2$, se n for par;
- $i = (n - 1)/2$, se n for ímpar.

O valor de f_{ck} não deve ser superior a $0,85 \times f_{em}$ e nem inferior a $\emptyset \times f_{c(1)}$, sendo o valor de \emptyset indicado na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Valores de \emptyset em função da quantidade de elementos da alvenaria.

Nº de elementos	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
\emptyset	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99

Fonte: ABNT NBR 15812-2 (2010).

Na norma britânica BS 5628-1 (1992), a resistência característica à compressão da alvenaria pode ser determinada experimentalmente, tanto para blocos de concreto como cerâmicos, com teste em painéis cujas dimensões devem ser de 1,20 m a 1,80 m de comprimento por 2,40 m de altura, com área mínima da seção transversal de $0,125 \text{ m}^2$, conforme a equação 2.9.

$$f_k = \frac{F_m}{A} \times \frac{\psi_u \psi_m}{1,2} \quad (2.9)$$

Onde:

f_k = resistência característica à compressão da parede;

F_m = média da carga máxima de dois painéis teste;

ψ_m = fator de redução da resistência da argamassa, dado na

Tabela 15 da BS 5628-1;

ψ_u = fator de redução para amostras de elementos estruturais;

A = área da seção transversal de qualquer painel.

O código europeu EN 1996-1-1 (2005) determina a resistência característica à compressão da alvenaria conforme equação 2.10.

$$f_k = k \cdot f_b^\alpha \cdot f_{arg}^\beta \quad (2.10)$$

Onde:

f_k = resistência característica à compressão da parede, em MPa;

k , α , β = constantes;

f_{arg} = resistência média à compressão da argamassa, em MPa;

f_b = resistência à compressão normalizada da unidade, em MPa.

A resistência normalizada é o valor da resistência à compressão da unidade convertida no equivalente seco ao ar de uma amostra de 100 mm de largura por 100 mm de altura.

Para alvenarias executadas com argamassas correntes e leves, conforme o EN 1996-1-1, a equação 2.10 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$f_k = k \cdot f_b^{0,7} \cdot f_{arg}^{0,3} \quad (2.11)$$

O valor da constante k é determinado em função da argamassa utilizada na parede, do tipo de unidade e do grupo em que está classificada esta unidade. Na Tabela 2.12, encontram-se os valores de k para blocos cerâmicos. Para determinar a resistência característica da alvenaria utilizando-se da equação 2.11, alguns requisitos para a especificação da resistência do bloco e argamassa devem ser considerados:

a) para argamassa de uso geral: a resistência à compressão do bloco (f_b) não pode ser maior que 75 MPa, enquanto que a resistência da argamassa (f_{arg}) não pode ser maior que 20 MPa nem maior que duas vezes a resistência média à compressão dos bloco ($2 \cdot f_b$);

b) para argamassa de camada fina: a resistência média à compressão do bloco (f_b) não pode ser maior que 50 MPa;

c) para argamassas leves: a resistência da argamassa (f_{arg}) não pode ser maior que 10 MPa.

Tabela 2.12 – Valores de k para diferentes grupos de unidades cerâmicas e argamassas.

Grupo de Blocos Cerâmicos	Argamassa de uso geral	Argamassa de camada fina (espessura da junta entre 0,5 mm a 3 mm)	Argamassas Leves de densidade (kgf/m^3) entre:	
			$600 \leq \rho \leq 800$	$800 < \rho \leq 1300$
Grupo 1	0,55	0,75	0,30	0,40
Grupo 2	0,45	0,70	0,25	0,30
Grupo 3	0,35	0,50	0,20	0,25
Grupo 4	0,35	0,35	0,20	0,25

Fonte: EN 1996-1-1 (2005).

Alguns pesquisadores com o intuito de determinar a capacidade de resistência da alvenaria e explicar seu comportamento, também desenvolveram modelos matemáticos para estimar a resistência à

compressão da alvenaria. Assim em suas pesquisas, Rizzatti (2003) e Grohmann (2006) reuniram os principais modelos obtidos por pesquisadores para a determinação da resistência à compressão da alvenaria grauteada, para blocos de concreto, conforme Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Modelos matemáticos para a determinação da resistência à compressão da alvenaria para blocos de concreto.

Fonte	f (MPa)
Priestley e Yuk (1984)	$f_p = \{(p/1,5).([\ (0,1.f_b') + (\alpha.f_a)]/(0,1 + \alpha))\} + \{0,9375.(1-a).f_g\}$
Colville e Wolde-Tinsea (1991)	$f_p = 0,6. \{[f_b'.(\%sólidos/100) + [f_g.(1 - \%sólidos/100)]\}$
Hamid e Chandrakeerthy (1994)	$f_p = [0,64.f_b'(a-b)] + [1,07.b.f_g]$
Khalaf et al. (1994)	$f_m = 0,3.f_b + 0,2.f_a + 0,25.f_g$
<p>fm = resistência à compressão da alvenaria; fp = resistência à compressão do prisma; fb = resistência à compressão do bloco (área bruta); fb' = resistência à compressão do bloco (área líquida); fb = resistência à compressão do bloco (área bruta); fa = resistência à compressão da argamassa; fg = resistência à compressão do graute;</p>	<p>%sólidos = porcentagem da área de sólidos do bloco; p = percentual de sólidos do bloco; α = ha/(4 . hb); ha = altura da junta de argamassa; hb = altura do bloco; a = relação entre área líquida e área bruta; b = relação entre área grauteada e área bruta.</p>

Fonte: Rizzatti (2003) e Grohmann (2006).

2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA ESTRUTURAL

Vários fatores influenciam a resistência à compressão da alvenaria e devem ser levados em consideração quando esta é analisada. Neste item serão abordados apenas os fatores principais de interesse do desenvolvimento desta tese.

2.2.1. Resistência à compressão dos blocos

A resistência à compressão do bloco é a principal característica na resistência dos prismas e paredes, sendo que esta característica é válida principalmente quando estes não são grauteados. Fahmy e Ghoneim (1995), em estudo experimental, observaram que um acréscimo de 50 % na resistência à compressão do bloco pode aumentar em 15 % a resistência à compressão de prismas não grauteados, porém para prismas grauteados, o ganho de resistência é menor, da ordem de 6 a 8%.

Romagna (2000) ao ensaiar prismas não grauteados com blocos de concreto com três diferentes resistências e argamassa de traço 1: 1: 6 (em volume), com resistência média à compressão de 4,84 MPa, obteve os seguintes valores de resistência à compressão para prismas, conforme Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Resultados de resistência à compressão.

Resistência do Bloco - área bruta (MPa)	Resistência do Prisma – área bruta (MPa)
10,23	7,22
15,86	9,10
16,77	9,87

Fonte: Romagna (2000).

De acordo com o estudo de Romagna (2000), ao aumentar a resistência do bloco em 64%, obteve-se um aumento na resistência dos prismas de 37%. No entanto, segundo o autor, o aumento da resistência à compressão da alvenaria não é proporcional ao aumento da resistência à compressão do bloco.

Para La Rovere (2001) apud Mata (2006), quanto maior a resistência da unidade, maior será a resistência à compressão da alvenaria. Porém a autora ressalta que, a resistência à compressão da alvenaria será menor do que a resistência à compressão da unidade por dois motivos:

- 1) a resistência medida da unidade não é a verdadeira resistência uniaxial, e sim um valor superior ao verdadeiro, pois a restrição nas extremidades das unidades causada pelos pratos da prensa de ensaio, que dependerá da geometria da unidade, gera tensões de compressão transversais, como em um ensaio tri-axial à compressão;

2) devido ao fato da argamassa ser mais deformável do que as unidades, ela tenderá a deformar-se mais do que as unidades, deformação esta impedida pela aderência entre a argamassa e as unidades o que provoca o surgimento de tensões de tração nas unidades transversalmente ao eixo vertical de compressão.

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), a resistência do bloco tem caráter predominante dentre os fatores que exercem influência direta na resistência à compressão de painéis de parede. De uma forma geral, quanto mais resistente o bloco, mais resistente será a alvenaria.

Ainda segundo os autores, existe um conceito muito importante quando se trata da influência da resistência dos blocos na resistência à compressão das paredes. Trata-se da eficiência (η), ou seja, a relação existente entre a resistência da parede ou prisma e a resistência do bloco, onde quanto maior a resistência do bloco menor será a eficiência e vice-versa. Desta forma, o fator de eficiência que relaciona a resistência da parede e prisma com a resistência do bloco, pode ser expresso pela equação 2.12.

$$\eta = \frac{f_p}{f_b} \quad (2.12)$$

Onde:

η = eficiência parede-bloco ou prisma-bloco;

f_p = resistência do prisma ou parede;

f_b = resistência do bloco.

Assim, Ramalho e Corrêa (2003), conforme prática corrente no Brasil, apresentam-se na Tabela 2.15, valores de eficiência entre prismas, paredes e blocos cerâmicos e de concreto com resistência entre 4,5 MPa e 20 MPa, sendo as paredes e prismas não grauteados e com argamassas usuais.

Tabela 2.15 – Valores de eficiência para prisma-bloco e parede-bloco

Bloco	Fator de Eficiência (η)			
	Prisma-bloco		Parede-bloco	
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo
Cerâmico	0,30	0,60	0,20	0,50
Concreto	0,50	0,90	0,40	0,60

Fonte: Ramalho e Corrêa (2003).

2.2.2. Resistência à tração dos blocos

Na alvenaria, o esforço predominante é o de compressão, mas dependendo da rigidez dos seus materiais constituintes, surgem sempre tensões de tração nos blocos, em consequência principalmente da deformação da argamassa que leva as paredes dos blocos a uma tensão de tração superior à suportada por eles.

Shivre (1982) afirma que as tensões de tração que se concentram nas paredes dos blocos são responsáveis pela ruptura da alvenaria carregada axialmente. Assim, Forrest et al. (1986) observam que o conhecimento da resistência à tração dos blocos se torna um fator importante para o entendimento do comportamento da alvenaria, em virtude da ruptura das paredes ser atribuída a estas tensões de tração geradas nos blocos.

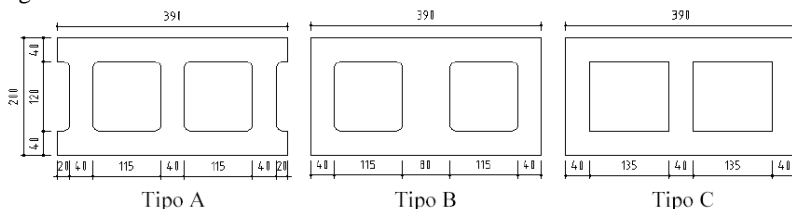
Entretanto, grande parte das pesquisas realizadas com prismas e paredes apontam a resistência à compressão de seus componentes como um dos principais fatores responsáveis pelo comportamento mecânico da alvenaria e que o aumento da capacidade resistente das paredes está relacionada ao aumento da resistência à compressão de suas unidades. Mas segundo Drysdale *et al* (1994), o aumento da resistência à compressão de prismas e paredes pode ser proporcionado pelo aumento de resistência à tração no bloco que decorre do acréscimo de sua resistência à compressão, sendo esta tomada como parâmetro por ser um ensaio de fácil execução. Entretanto Sahlin apud Gomes (1983) sugere que a resistência à tração nos blocos cerâmicos seja em torno de 3 a 5% da sua resistência à compressão.

2.2.3. Geometria do bloco

A geometria do bloco também tem influencia na resistência à compressão das paredes de alvenaria. Segundo Shrive (1983), a busca de uma geometria adequada para o bloco é importante para que se consiga um melhor desempenho mecânico de ambos, bloco e alvenaria quando submetidos à compressão. Esta conclusão foi observada após o autor estudar o mecanismo de ruptura da alvenaria e a distribuição de tensões no bloco e na alvenaria. Em seu estudo o autor propõe três tipos de blocos, testando unidades, prismas de três blocos e paredes de três blocos de largura e seis de altura, utilizando argamassa somente nas paredes laterais, com junta alternada. Neste estudo o autor conclui que existem vantagens em aumentar a espessura dos septos, reduzir o afinilamento dos furos e alinhar os furos.

Ganesan *et al* (1988) afirmam que o fator de eficiência varia com a forma do bloco e o tipo de assentamento. Em algumas formas de blocos e tipos de arranjo aparecem concentrações de tensões que reduzem a resistência à compressão da alvenaria. Em seus estudos foram testadas três formas diferentes de blocos. Os blocos tipo A foram assentados com argamassa apenas nas faces e os demais foram argamassados nas faces e septos. A Figura 2.4 mostra os tipos de blocos estudados, sendo que os valores de resistência para blocos (f_b) e paredes (f_w) estão mostrados na Tabela 2.16.

Figura 2.4 - Geometrias e dimensões dos blocos estudados.



Fonte: Ganesan *et al.* (1988).

Tabela 2.16 - Valores de resistência para blocos e paredes.

Bloco	f_b (MPa)	f_w (MPa)	Fator de Eficiência (f_w/f_b)
A	3,30	1,46	44,24 %
B	5,10	3,33	65,29 %
C	4,94	2,91	58,91 %

Fonte: Ganesan *et al.* (1988).

Conforme se observou nos resultados obtidos no estudo, o bloco “racionalizado” tipo B apresentou melhor desempenho que os outros. A análise de tensões indica concentração de tensões e variações bruscas das mesmas nos blocos convencionais, enquanto que nos blocos “racionais” a variação é suave.

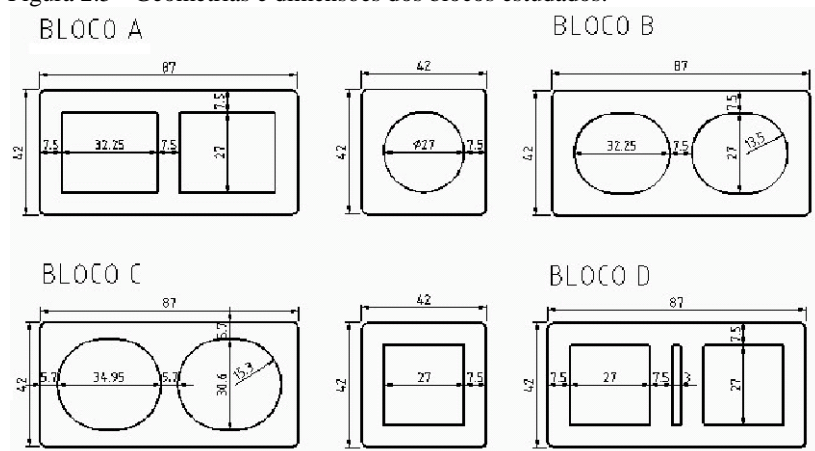
Ainda, segundo os autores, é necessário que a forma do bloco seja repensada a fim de que se aumente a eficiência de blocos estruturais. Os autores propõem que sejam utilizados blocos cujo septo central seja igual ao dobro da lateral mais a espessura da junta, conseguindo-se desta forma o alinhamento dos furos.

Ganesan e Ramamurthy (1992), através do método dos elementos finitos, realizaram um estudo analítico sobre o comportamento da

alvenaria de blocos de concreto considerando a influência de: diferentes geometrias, diferentes arranjos e propriedades das argamassas. Segundo os autores a forma do bloco influencia as tensões que se desenvolvem, tanto na sua distribuição, quanto na sua magnitude. Foi observado também que a geometria dos blocos influencia no comportamento dos prismas, através da superposição dos septos e faces, ocasionando níveis críticos de tensão.

Rizzatti (2003) investigou a resistência à compressão de quatro blocos cerâmicos com geometrias diferentes (Figura 2.5), e de prismas e paredes confeccionadas com estas unidades, em paredes não armadas. O estudo foi realizado através de análise experimental e análise numérica pelo método dos elementos finitos.

Figura 2.5 - Geometrias e dimensões dos blocos estudados.



Fonte: Rizzatti (2003).

Em termos de resistência à compressão, o bloco tipo D destacou-se em relação aos demais blocos estudados, proporcionando uma melhor capacidade de absorver esforços nas paredes, devido à coincidência de todos os septos entre as fiadas subsequentes provocada pela existência de um duplo septo central, proporcionando uma melhor transmissão de carregamentos. No entanto, este desempenho não se verificou nos ensaios de blocos e prismas. O autor conclui que, quando utilizado blocos vazados, a disposição e os tipos de furos podem ocasionar grandes concentrações de tensões, reduzindo a resistência das paredes e conduzindo a falhas frágeis das mesmas. Porém, embora o bloco tipo D tenha demonstrado desempenho superior nos ensaios de compressão de

paredes, existem outros parâmetros a serem considerados para a escolha de um bloco ideal, como por exemplo, a ocorrência de trincas, melhor queima, facilidade de manuseio e a qualidade da argila.

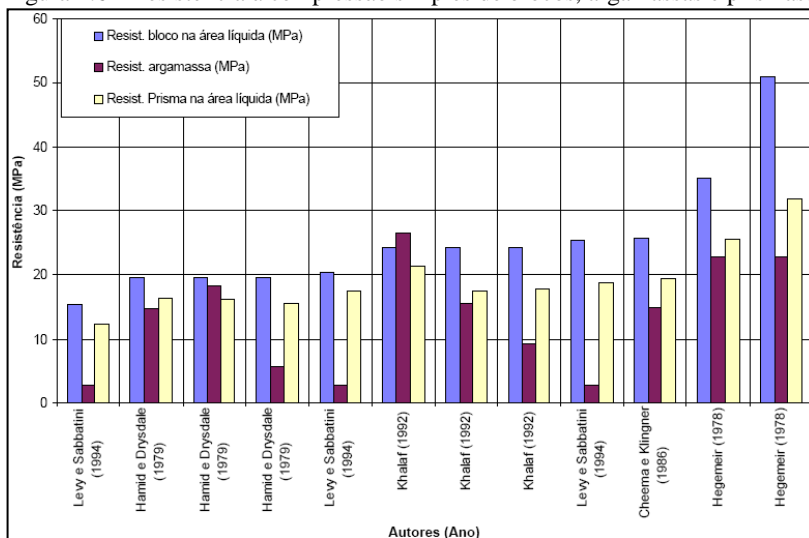
2.2.4. Argamassa de assentamento

A resistência da argamassa não é tão significativa para a resistência da parede quanto à resistência do bloco, principalmente na alvenaria grauteada. Gomes (1983), em estudo com alvenaria de blocos cerâmicos, concluiu que nas paredes submetidas à compressão simples, a resistência da argamassa de assentamento não precisa ultrapassar a resistência à compressão dos blocos, pois pode produzir uma argamassa muito rígida a qual não é adequada para o desempenho das paredes.

Mohamad (1998), pesquisando prismas não grauteados de blocos de concreto, verificou que quando usou uma argamassa com menor resistência do que a resistência do bloco, a ruptura do prisma foi dúctil, ocorrendo um esfacelamento da parte externa das paredes dos blocos, propagando-se da junta para o restante do bloco. Quando utilizou uma argamassa com a mesma resistência do bloco na área líquida, a ruptura foi essencialmente frágil, ocorrendo no sentido da seção transversal do prisma.

Ainda em seu estudo, reunindo dados de outros pesquisadores e comparando as resistências de blocos, argamassas e prismas (Figura 2.6), Mohamad observou que a maioria dos pesquisadores trabalha com níveis de resistência à compressão de argamassa da ordem de 40 a 60% da resistência do bloco na área líquida. Entretanto para o autor, conforme resultado de sua pesquisa deve existir a compatibilidade entre a argamassa e o tipo de bloco, na qual a resistência à compressão da argamassa esteja entre 0,70 à 1 vezes a resistência à compressão do bloco na área bruta.

Figura 2.6 - Resistência à compressão simples de blocos, argamassas e prismas.



Fonte: Mohamad (1998).

Garcia (2000) também realizou uma compilação de resultados de pesquisas de vários autores os quais observaram que a utilização de argamassas muito mais resistentes do que os blocos é antieconômica, pois o ganho de resistência obtido nos painéis de parede é irrelevante. Como exemplo os ensaios desenvolvidos na EESC, a pedido da Cerâmica Selecta, no qual se aumentou 79% da resistência da argamassa, e obteve-se um aumento de 1,9% na resistência dos painéis de parede; e os ensaios realizados por Franco (1987), quando o aumento de 45% da resistência da argamassa, produziu um aumento de apenas 3,2% na resistência das paredes.

Romagna (2000), trabalhando com prismas de blocos de concreto, também constatou que a influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas é, de maneira geral, menos importante para prismas grauteados do que para não grauteados.

Para Cunha (2001), o aumento de resistência da argamassa não influenciou na resistência de prismas, não grauteados e grauteados, uma vez que grandes aumentos na resistência das argamassas proporcionam acréscimos muito pequenos na resistência à compressão dos prismas de alvenaria.

Juste (2001) em seu trabalho utilizando blocos de concreto com baixa resistência à compressão, confirmou que a afirmação feita por

diversos pesquisadores de que a resistência à compressão de prismas depende principalmente da resistência e característica do bloco utilizado e em bem menor proporção das características da argamassa. Assim, segundo a autora para esta situação, deve-se escolher um tipo de argamassa com traço adequado, de modo a aperfeiçoar outras propriedades da argamassa, tais como trabalhabilidade e capacidade de absorver deformações. Porém, ao serem utilizados blocos de resistência à compressão elevada, a autora recomenda cuidado especial na escolha da argamassa, para que a mesma não interfira na resistência à compressão da alvenaria.

Steil (2003) também observou que as propriedades da argamassa têm influência sobre a resistência de prismas. Em seu trabalho, o autor notou que argamassas com praticamente a mesma resistência e rigidez, diferindo na capacidade de retenção de água e composição, podem produzir prismas que apresentem, além de diferentes tipos de ruptura, resistências à compressão e fatores de eficiência distintos. Assim para o autor, a especificação de argamassas para alvenaria estrutural não deve ser baseada unicamente em sua resistência à compressão. Deve-se dar especial atenção às demais propriedades da argamassa, tais como aderência ao bloco e retenção de água, principalmente quando do uso de argamassas industrializadas, já que, pela presença de aditivos, podem apresentar comportamento completamente distinto do comportamento de argamassas mistas de cimento e cal, mesmo que tenham algumas propriedades semelhantes.

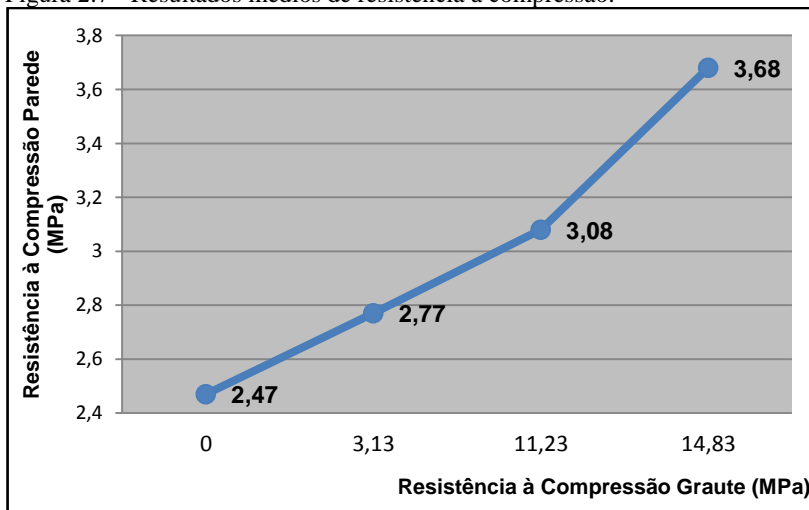
Para Grohmann (2006), em trabalho realizado com prismas não grauteados e grauteados de blocos cerâmicos utilizando dois traços de argamassa, constatou influência significativa da resistência da argamassa na resistência à compressão dos prismas. E para o autor, esta influência se torna mais evidente à medida que se utilizam grautes com maiores resistências à compressão.

2.2.5. Graute

Quanto a influência do graute, Gomes (1983) realizou um estudo em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, procurando estabelecer a influência da resistência do graute nas paredes, além de analisar a utilização de emendas na armadura e o módulo de deformação dos painéis. Na parte específica de comparação entre grautes foram utilizados blocos cerâmicos de resistência à compressão de 15,3 MPa e argamassa de 4,83 MPa. Os resultados obtidos para paredes grauteadas

com taxa de armadura igual a 0,2% são apresentados no gráfico da Figura 2.7.

Figura 2.7 - Resultados médios de resistência à compressão.



Fonte: Gomes (1983).

No trabalho, o autor concluiu que, para o graute colaborar no aumento da resistência das paredes, é necessário que sua resistência seja, no mínimo, igual a dos blocos. Nota-se que, se a resistência do graute se situa entre 3,0 e 11,0 MPa, o aumento de resistência destas paredes é pequeno, podendo se tornar desprezível. A norma americana *Uniform Building Code* (UBC) da Califórnia, genericamente, recomenda que a resistência do graute não deva ser inferior a 13,7 MPa, para o bloco cerâmico e para o tipo de parede ensaiada. Esta recomendação se justificou experimentalmente.

Khalifa e Magzoub (1994) apud Mendes (1998), em seu trabalho, relatam duas conclusões que são apresentados por diversos pesquisadores sobre os efeitos do grautes e da sua resistência na alvenaria. A primeira afirma que a resistência à compressão do prisma grauteado é maior que a média das resistências separadas do bloco e do grautes. Segundo os autores, tem-se que o grautes interno aos blocos providenciaria contraventamento lateral às paredes do bloco impedindo sua flambagem e por sua vez, o graute teria resistência à compressão aumentada em consequência ao fato de se encontrar confinado no interior do bloco. Em contraposição a primeira afirmativa, segundo

Khalifa e Magzoub (1994), outros pesquisadores afirmam que a presença do grautes reduziria significativamente a resistência à compressão do prisma, em razão das deformações incompatíveis entre bloco e graute. Ou seja, grautes muito deformáveis provocariam o aumento de tração nas paredes do bloco levando o mesmo ao colapso.

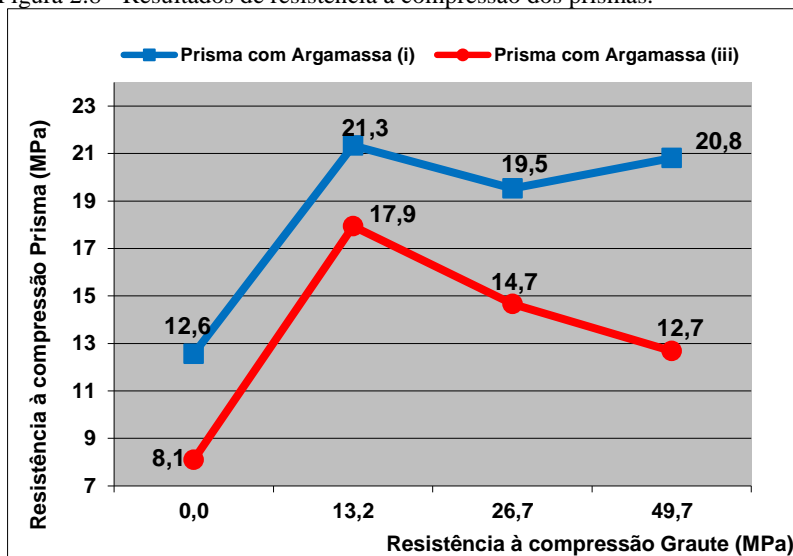
Ainda, segundo Khalifa e Magzoub (1994), o melhor desempenho da alvenaria grauteada é obtido quando os módulos de elasticidade do bloco e grautes são similares. Se o bloco é mais flexível do que o grautes, tensões de tração lateral seriam introduzidas na argamassa e a tensão vertical máxima no bloco aumentaria tanto quanto a tensão lateral máxima no grautes. E assim, tensões de tração horizontais seriam criadas nas paredes dos blocos por causa da restrição da expansão lateral de um graute mais flexível. Entretanto, por outro lado, quando a rigidez do graute é mais baixa que a do bloco, tensões explosivas seriam criadas no bloco e como consequência a resistência do prisma reduzida. Contudo, o aumento da resistência do graute não causa um aumento significativo na resistência do prisma, podendo causar uma alta concentração de tensões na interface de adesão graute/bloco, levando a ruptura prematura do prisma.

Khalaf (1996), avaliando os fatores que influenciam a resistência de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto, também observou que o maior desempenho dos prismas grauteados ocorre quando as características de deformação do bloco e do graute são as mesmas. O autor ainda observa que o aumento da resistência da argamassa para prismas grauteados apresenta efeito insignificante. Segundo o autor, uma explicação seria a influencia de tensões de confinamento horizontal exercida sobre a junta de argamassa pelo grautes, que aumenta a resistência aparente da argamassa. Estas tensões de confinamento são inversamente proporcionais a resistência da argamassa em consequência ao alto coeficiente de Poisson da mesma. Assim, de seus resultados o autor conclui que, para o aumento da resistência dos prismas, as propriedades de deformação do bloco e do grautes devem ser iguais.

Mendes (1998) teve conclusões similares estudando o comportamento mecânico de prismas grauteados e não grauteados de blocos cerâmicos com três blocos de altura. O pesquisador utilizou blocos com 22,89 MPa e dois tipos de argamassa, a argamassa (iii) com 6,64 MPa e a argamassa (i) com 20,18 MPa. Na fabricação dos prismas grauteados com três blocos de altura, para cada tipo de argamassa de assentamento, foi realizado o grauteamento com três grautes com resistências distintas. Os resultados obtidos no trabalho podem ser

observados na Figura 2.8. Observando os resultados obtidos nota-se que, com a argamassa com menor resistência à compressão, os prismas apresentam um melhor desempenho com grautes com menor resistência à compressão; já na utilização de argamassa com maiores valores de resistência à compressão, os prismas não apresentam resultados significativamente distintos com a variação dos grautes.

Figura 2.8 - Resultados de resistência à compressão dos prismas.



Fonte: Mendes (1998).

Através da análise dos resultados, Mendes (1998) concluiu que os prismas que apresentaram o melhor desempenho são aqueles preenchidos com grautes com módulos de deformação próximos ao módulo de deformação da argamassa e próximos ao módulo de deformação dos prismas não grauteados. Foi observada uma relação de resistência ótima entre argamassa e graute de 0,5. Segundo o autor, razões menores parecem levar à diminuição de resistência à compressão e maiores não implicam em aumento da mesma.

Camacho e Rodrigues (1999), em seu estudo sobre a influência do graute na resistência da alvenaria, verificaram que o grauteamento permite o aumento de resistência da alvenaria na mesma relação entre a área bruta e a área líquida do bloco, desde que graute e bloco apresentem aproximadamente a mesma resistência. Além de afirmarem

que a adoção de grautes cada vez mais resistentes representa elevação de custo e não contribui muito para o aumento da resistência da alvenaria.

Romagna (2000), em trabalho experimental realizado, estudou a influência dos materiais constituintes na resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto grauteados e não grauteados. No trabalho foram moldados 60 tipos de prismas com três blocos de diferentes resistências à compressão, dois tipos de argamassas (1:1:6) e (1:0,5:4,5), quatro tipos de grautes com diferentes resistências à compressão e dois tipos de assentamento, total e lateral.

Segundo o autor, para prismas não grauteados, tanto no argamassamento total quanto lateral, para um mesmo traço, à medida que se aumenta a resistência à compressão do bloco, aumenta a resistência à compressão do prisma. Porém, este aumento da resistência à compressão do prisma não é diretamente proporcional ao aumento da resistência à compressão do bloco. Já para os prismas grauteados, a partir de um determinado nível de resistência à compressão do bloco, na medida em que se aumenta a resistência à compressão do graute, quando utilizada argamassa menos resistente, não se obtém aumento de resistência à compressão nos prismas. Os resultados obtidos no trabalho mostraram que o uso de grautes com resistência à compressão acima da resistência do bloco medida na área líquida, não trouxe ganhos de resistência à compressão para a alvenaria. Os melhores resultados foram obtidos com grautes e blocos de resistências à compressão aproximadamente iguais. Entretanto, este fato pode não ocorrer somente como consequência ao aumento dos valores de resistência à compressão, mas também em razão dos valores de módulo de elasticidade dos componentes. O que reforça a necessidade de compatibilização dos materiais constituintes da alvenaria para o aumento de sua resistência mecânica à compressão.

Cunha (2001), apud Reis (2010), estudou prismas grauteados de concreto avaliando a resistência à compressão em função da resistência da argamassa e da absorção de água no graute. No seu programa experimental, o autor usou um tipo de bloco com dimensões de 14x19x39 cm, com resistência à compressão nominal de 4,5 MPa, três tipos de argamassas e três tipos de grautes, com resistências à compressão de 15 MPa, 25 MPa e 35 MPa. Segundo Cunha (2001), a resistência à compressão da argamassa não exerce influência na resistência à compressão dos prismas vazios e grauteados. Como em outros trabalhos, constatou-se que a resistência à compressão dos prismas aumenta com o acréscimo de resistência à compressão do graute.

O autor conclui também que a perda de água do graute para o bloco pode causar dois tipos de fenômenos: o primeiro é o aumento da resistência à compressão nos grautes que tem uma relação água/cimento maior; o segundo ocasiona a redução da resistência à compressão do graute de até 28,6%. Essa redução pode ser explicada pela perda de aderência na interface bloco/graute em razão do aumento de porosidade daquela região. O fato também pode ser entendido como a baixa relação água/cimento do graute em consequência da perda de água para o bloco, sem a retenção de água suficiente para uma correta hidratação do cimento.

Arantes (2003), *apud* Grohmann (2006), realizou sua pesquisa com o objetivo de estudar a influência do graute no aumento da capacidade de carga da alvenaria, através de ensaios de compressão de prismas contrafiados de alvenaria cerâmica, grauteados, parcialmente grauteados e não grauteados. Os prismas foram executados com um bloco e meio de largura por três blocos de altura, utilizando bloco de 13,08 MPa de resistência à compressão, dois tipos de argamassa, com 6,50 MPa e 18,80 MPa, e três tipos de grautes. Os resultados encontrados pelo autor, para prismas grauteados e não grauteados são mostrados na Tabela 2.17.

Tabela 2.17 – Resultados de resistência dos prismas.

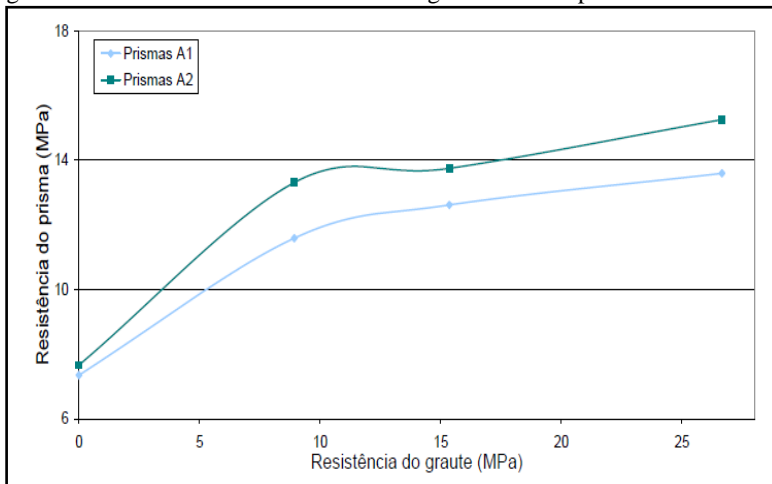
Prisma	Resistência à Compressão (MPa)		
	Graute	Prisma A1	Prisma A2
Vazio	-	7,35	7,66
G1	8,93	11,58	13,30
G2	15,36	12,61	13,74
G3	26,66	13,59	15,25

Fonte: Arantes (2003 *apud* GROHMANN, 2006).

Através dos resultados de Arantes (2003), percebe-se um aumento médio na resistência à compressão dos prismas de 6% quando a resistência à compressão do graute é aumentada em 72%, e um aumento médio de 16% quando se aumenta a resistência à compressão do graute em 199%, indicando que a resistência à compressão do prisma é influenciada pela resistência à compressão do graute, de forma relativamente proporcional. O gráfico da Figura 2.9 mostra o desempenho dos prismas estudados pelo autor. Com a análise dos

resultados o pesquisador concluiu que o melhor desempenho foi obtido para prismas com graute de resistência à compressão aproximadamente igual a do bloco e que é perfeitamente viável a utilização da técnica do grauteamento da alvenaria cerâmica para ganho de resistência mecânica das estruturas.

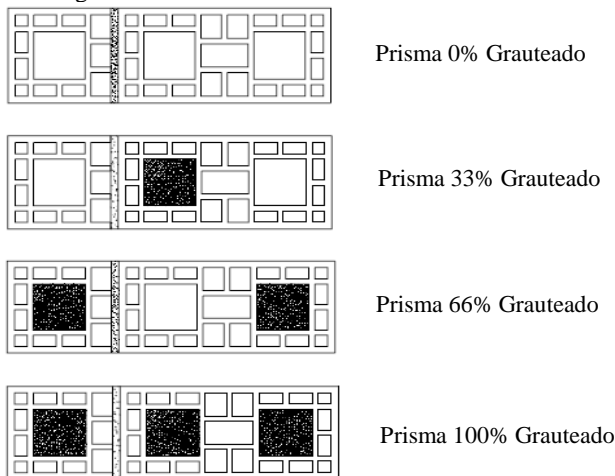
Figura 2.9 – Resultados de resistências dos grautes versus prismas.



Fonte: Arantes (2003 *apud* GROHMANN, 2006).

Grohmann (2006), em estudo experimental com blocos cerâmicos, também avaliou a influência do graute na resistência à compressão de prismas, utilizando diferentes três tipos de grautes - G1, G2 e G3, dois tipos de argamassas - A1 e A2 e quatro porcentagens de grauteamento de 0%, 33%, 66% e 100% (Figura 2.10).

Figura 2.10 – Secções transversais dos prismas adotados com os diferentes percentuais de grauteamento.



Fonte: Grohmann (2006).

Na comparação entre os prismas grauteados com diferentes tipos de grautes, o autor concluiu que o aumento de resistência à compressão dos grautes não gera um aumento significativo na resistência à compressão dos prismas. De forma geral, há um pequeno aumento na resistência à compressão dos prismas com o aumento da resistência à compressão dos grautes, mas em prismas com a totalidade dos furos grauteados a utilização de grautes de maior resistência à compressão pode gerar um decréscimo de resistência à compressão nos prismas. Este fato foi constatado somente nas séries de prismas em que se utilizou a argamassa de resistência à compressão menor. Os prismas com 100% dos furos grauteados sofrem maior influência das tensões geradas pelo graute em função do estado de confinamento do mesmo.

Segundo Grohmann (2006), para prismas parcialmente grauteados o aumento da porcentagem dos furos grauteados não gera um aumento significativo na resistência à compressão dos prismas. Entretanto, os prismas totalmente grauteados na sua maioria, têm um ganho significativo de resistência à compressão, principalmente na utilização de argamassas mais fortes.

Quanto à análise da ruptura do comportamento dos prismas à compressão, o autor relata que a ruptura da alvenaria grauteada ocorre em consequência da expansão do graute, que transmite tensões aos demais componentes do prisma, bloco e junta de argamassa, que tendem

a confinar o graute. A ação do graute sobre o prisma gera tensões de tração na interface bloco/argamassa, zona mais frágil do prisma, levando-o à ruína. Segundo o autor, quando o graute não atinge sua resistência máxima antes do conjunto bloco/argamassa, as faces do bloco são tracionadas ao restringirem as deformações da argamassa, que tem a tendência de se expandir lateralmente, ocasionando a ruptura do bloco por estas tensões de tração geradas. Ainda segundo o autor, prismas com argamassas mais fracas, na maioria das vezes, rompem de forma lenta, pois as argamassas mais fracas são mais dúcteis, com maior capacidade de absorver deformações. Já os prismas com argamassas mais fortes, geralmente, têm ruptura explosiva, fissurando subitamente. Prismas com grautes de resistência à compressão mais elevada são mais influenciados pelas tensões geradas pelo graute nos demais componentes. No caso de prismas totalmente grauteados esta situação se agrava pelo maior confinamento do graute.

No estudo realizado por Leão (2008), caracterizou-se o desempenho da alvenaria de blocos cerâmicos estruturais grauteada e não grauteada, investigando a resistência à compressão e à tração na flexão de prismas. O autor concluiu que o aumento no valor da proporção Resistência da argamassa/Resistência do bloco provoca um aumento na resistência à compressão do prisma sem graute. Porém, essa relação não é linear, apresentando um valor máximo de resistência à compressão do prisma quando a resistência à compressão da argamassa é próxima da resistência do bloco na área bruta. Ainda segundo o autor, a resistência de prismas grauteados, não é significativamente influenciada pela variação na resistência a compressão da argamassa. Isso porque o modo de ruptura do prisma grauteado é diferente do modo do não grauteado. Ou seja, mesmo que a resistência a compressão da alvenaria (bloco/argamassa) aumente com o aumento a resistência da argamassa, essa mesma alvenaria, quando grauteada rompe por tração provocada pela deformação transversal do graute no seu interior e não por compressão. Assim, o aumento na resistência do graute pode aumentar a resistência do prisma ou até mesmo reduzir a resistência do prisma. Concluindo-se com isso, a necessidade de compatibilização dos materiais utilizados na construção da alvenaria grauteada para melhor desempenho da mesma.

2.2.6. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos materiais constituintes dos prismas e paredes também são fatores importantes no desempenho mecânico da

alvenaria. O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez ou capacidade de deformação para o material ou componente ensaiado. Para a alvenaria, a deformabilidade ou capacidade de acomodar deformações é definida como “a capacidade que a parede de alvenaria possui de manter-se íntegra ao longo do tempo, distribuindo as deformações internas ou externas impostas em microfissuras não prejudiciais ao seu desempenho” (FRANCO, 1987).

Para alvenaria estrutural é recomendado o emprego de argamassas com baixos módulos de elasticidade, com a finalidade de absorver as deformações da estrutura (ISHIKAWA, 2001). Entretanto, segundo Rizzatti (2003), quanto maior a diferença de deformação específica entre a unidade e a argamassa, maior o diferencial de deformação entre os materiais, ocasionando um aumento das tensões de tração nas unidades e com isso uma ruptura da alvenaria com cargas menores.

O módulo de elasticidade dos elementos da alvenaria pode ser determinado através do traçado do diagrama tensão-deformação, obtido na compressão, a fim de avaliar e quantificar a deformação ocorrida durante a realização do ensaio. Normalmente, o módulo é determinado para os valores correspondentes de 40% a 60% da carga de ruptura para o módulo secante, e ao valor correspondente a 30% da carga de ruptura para o módulo tangente inicial. Isto acontece por ocorrer neste trecho um comportamento linear dos elementos (MOHAMAD, 2007).

Para o ACI 530-92 (1995) o módulo de elasticidade da alvenaria de unidades de concreto pode ser obtido em função da resistência do bloco e da argamassa por meio de ensaios com prismas, a partir da inclinação da reta secante entre os pontos correspondentes a 5% e 33% da máxima resistência à compressão dos prismas ensaiados.

Para Drysdale *et al.* (1994), ao se alcançar em torno de 50% da tensão máxima a não linearidade já é evidente nos ensaios à compressão realizados com prismas. Mas apesar dos prismas representarem melhor o comportamento da alvenaria, os autores citam que ensaios com a argamassa, graute e blocos isolados são também realizados para a aquisição de informações mais completas de suas características.

Garcia (2000), em sua pesquisa, considerou para a determinação do módulo de elasticidade os valores correspondentes entre 30% e 40% da carga de ruptura, de blocos, argamassas, prismas e painéis de parede. Segundo a autora, isto se deve ao fato que neste trecho o comportamento do gráfico tende a se manter linear. Para a obtenção do módulo, na realização do ensaio foi considerado pela autora o trecho médio do corpo-de-prova, por esse possuir menor influência dos pratos da prensa. O

mesmo procedimento de ensaio também foi utilizado por Mohamad (2007), pois segundo o autor os resultados são afetados pelos pratos da prensa quando se considera o deslocamento total do corpo-de-prova.

Para Dhanasekar (1985) *apud* Mohamad (2007), o valor do módulo de elasticidade da alvenaria pode ser determinado em função da sua resistência à compressão (f_c), conforme a equação abaixo:

$$E_{alv} = 1180 \cdot f_c^{0,83} \quad (2.13)$$

Segundo a norma européia EN 1996 1-1 (2005), na ausência de valores obtidos por ensaios, o módulo pode ser determinado de forma aproximada pela equação 2.14, onde f_k é a resistência característica à compressão da alvenaria, sendo que o valor recomendado para a constante K é 1000.

$$E_{alv} = K \cdot f_k \quad (2.14)$$

Parsekian (2002) *apud* Santos (2008), em sua pesquisa reuniu várias normas e autores nacionais e internacionais, relacionando em sua maioria, o módulo de elasticidade com a tensão de ruptura do elemento ou um coeficiente multiplicador da resistência da alvenaria ou do próprio bloco, conforme pode ser observado na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 – Normas e autores internacionais pesquisados, referentes a blocos cerâmicos.

Fonte	Tipo de bloco cerâmico	Argamassa	E_{alv} (MPa)	Observações
AS 3700 (1998)	Resistência entre 5 a 30 MPa	M2, M3	$700.f_p$	Carga de curta duração
	Resistência superior a 30 MPa	M3, M4	$1000.f_p$	
BS 5628 (1995)	-	-	$900.f_p$	-
Norma Americana	-	-	$700.f_p$	Especifica o módulo de elasticidade de acordo com a corda dos pontos de 5% e 33% de f_p do diagrama tensão-deformação
LEZNE R (1986)	Padrão Britânico	(i) e (ii)	$3750.(f_{bk} - 1000)^{1/2}$	-
WOLDET INSAE et al (1993)	Vazados	-	$550.f_p$	Grauteados ou não

Fonte: Parsekian (2002 *apud* SANTOS, 2008).

A norma brasileira ABNT NBR 15812-1 (2010), para alvenaria de blocos cerâmicos, estabelece que na falta de valores experimentais os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da alvenaria podem ser adotados de acordo com a Tabela 2.19.

Tabela 2.19 - Propriedades elásticas da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.

Propriedade	Valor	Valor Máximo
Módulo de Elasticidade	600 f_{pk}	12 GPa
Coefficiente de Poisson	0,15	-

Fonte: ABNT NBR 15812-1 (2010).

Mas, para Juste (2001) torna-se necessário uma norma específica para a obtenção do módulo de elasticidade das unidades e componentes da alvenaria, decorrente da não existência de nenhum método de ensaio padronizado. A autora relata ainda que os valores obtidos nas pesquisas já realizadas são afetados por vários fatores, tais como velocidade de carregamento, intensidade de carregamento, dimensões dos corpos-de-prova, prejudicando assim a comparação direta dos resultados entre os estudos realizados pelos pesquisadores.

2.2.7. Espessura da junta de assentamento

A norma ABNT NBR 8215 (1983) estabelece a espessura da junta de assentamento em alvenaria estrutural em 10 mm, com tolerância de mais ou menos 3 mm, pois valores fora deste intervalo prejudicam o desempenho da alvenaria. Valores inferiores, que teoricamente levariam a alvenarias mais resistentes, não são recomendáveis, pois a junta não conseguiria absorver as imperfeições que ocorrem nas unidades. Entretanto, o aumento da espessura da junta provoca redução na resistência do prisma. Segundo Roman (1991), a resistência da alvenaria diminui, em aproximadamente 15%, para cada aumento de 3 mm na espessura e vice-versa, considerando como base uma junta de 10 mm.

Esse comportamento também foi verificado por Mohamad (1998). Segundo o autor, a espessura da junta de argamassa influi significativamente na resistência à compressão da alvenaria e seu aumento impõe diminuição significativa na eficiência da mesma. Em estudo com prismas confeccionados com blocos de concreto, executando-se juntas de assentamento de 7 e 10 mm de espessura, Mohamad observou um aumento na resistência à compressão da alvenaria de 32,3 %, quando utilizado juntas com espessura de 7 mm.

Carvalho et al. (2006) também constatou que a diminuição da espessura das juntas de assentamento interfere na resistência dos

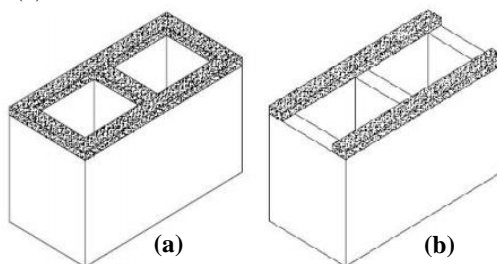
prismas. Em seu estudo com prismas de blocos cerâmicos, com juntas de 10 e 25 mm de espessura, o autor observou uma diminuição de 28 % na resistência dos prismas com o aumento da espessura de suas juntas de assentamento.

2.2.8. Tipo de assentamento

Sobre a forma de assentamento, os prismas podem ter argamassa de assentamento em toda superfície transversal do bloco ou somente nas paredes ou faces laterais (face shell), conforme Figura 2.11. O tipo de assentamento é um fator que também pode alterar a resistência do prisma.

Em estudo utilizando o método dos elementos finitos para estudar o comportamento de prismas com diferentes tipos de assentamento, Ganesan e Ramamurthy (1992) concluíram que a colocação de argamassa de assentamento somente nas paredes laterais dos blocos (face shell) implica no surgimento de grandes concentrações de tensões nas paredes transversais dos blocos, causando a redução na resistência à compressão do prisma ou parede. Ainda segundo os autores, através da simulação computacional, puderam observar que se a aplicação da argamassa em todo o bloco levou a eliminação dessas concentrações de tensões.

Figura 2.11 - Tipos de assentamento utilizados na construção dos prismas: (a) assentamento total e (b) assentamento nas faces laterais dos blocos.



Fonte: Leão (2008).

Pasquali (2006), *apud* Santos (2008), estudou o comportamento de pequenas paredes com dois tipos de geometria de blocos cerâmicos vazados, sendo um tipo com paredes vazadas e outro com paredes maciças. Foram utilizados três tipos de argamassas industrializadas a base de cal e areia calcária e dois tipos de assentamento (total e lateral).

Os resultados encontrados pelo autor são apresentados na Tabela 2.20. Analisando os dados da Tabela 2.20, conclui-se que as duas geometrias de blocos vazados apresentam uma redução significativa na resistência das pequenas paredes quando utilizado assentamento lateral. Esta redução varia de 16,1% a 25,9% para as paredes vazadas e de 38% a 49,3% para as paredes maciças.

Tabela 2.20 – Resistência das pequenas paredes em função do assentamento.

Tipo de Parede	Resistência Média da Argamassa (MPa)	Tipo de Assentamento	Resistência Pequenas Paredes – Área Bruta (MPa)	Redução (%)
Vazada	2,51	Total	4,32	18,3
		Lateral	3,53	
	4,25	Total	4,34	16,1
		Lateral	3,64	
	12,56	Total	5,71	25,9
		Lateral	4,23	
Maciça	2,51	Total	4,68	38,0
		Lateral	2,90	
	4,25	Total	5,60	43,0
		Lateral	3,19	
	12,56	Total	6,57	49,3
		Lateral	3,33	

Fonte: Pasquali (2006 apud SANTOS, 2006).

Entretanto, Colville e Woldetinsae (1990), também estudando a influência do tipo de assentamento na resistência à compressão de prismas moldados com blocos de concreto, concluíram que a resistência à compressão dos prismas vazados é aproximadamente 8% menor para prismas com assentamento total do que para prismas com assentamento lateral. É importante ressaltar que os autores chegaram a estes resultados considerando a resistência à compressão dos prismas quando calculada em relação à área de assentamento da argamassa. Segundo os autores, a resistência à compressão dos prismas vazados deve ser calculada em relação à área de assentamento e não de acordo com a área dos blocos utilizados.

2.2.9. Absorção de água inicial dos blocos

Outro fator a ser considerado na resistência das paredes de alvenaria é a absorção de água inicial ou sucção dos blocos. Blocos com altas taxas de absorção retiram a água da argamassa de assentamento, interferindo na resistência à compressão da argamassa e na aderência da mesma às unidades da alvenaria.

Conforme Franco (1993), blocos com altas taxas de absorção de água inicial provocam, quando em contato com a argamassa, diminuição da plasticidade da argamassa durante o assentamento, ocasionando perda da capacidade da alvenaria de absorver pequenas deformações pertinentes ao assentamento.

De acordo com a ABNT NBR 15270-3 (2005), caso o índice de absorção de água inicial (AAI) para os blocos cerâmicos estruturais seja superior a 30 g/193,55 cm² por minuto, os blocos devem ser umedecidos antes do assentamento para melhorar o seu melhor desempenho no momento do assentamento. Segundo Carvalho (2003), prismas construídos com blocos umedecidos apresentam uma tendência de aumento de resistência à compressão. Entretanto, conforme a ABNT NBR 15270-3 (2005), se o valor do índice de absorção inicial (AAI) resultar menor que o limite recomendado, os blocos podem ser assentados sem ser previamente umedecidos.

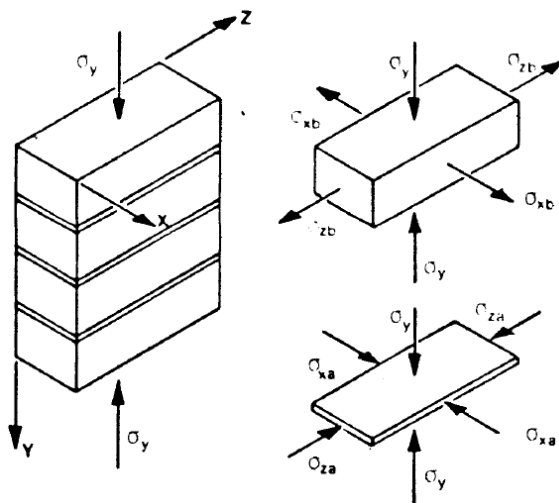
2.3. COMPORTAMENTO DA ALVENARIA SUBMETIDA À COMPRESSÃO

Segundo Hilsdorf (1969) apud Sabbatini (1984), a alvenaria é constituída por materiais (argamassa e bloco) com diferentes características mecânicas, onde a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade da argamassa de assentamento são geralmente menores que os do bloco. Porém, a aderência e o atrito entre os materiais constituintes impedem que a deformação lateral da argamassa seja maior que a dos blocos, criando um estado de tensão de compressão triaxial na argamassa e tração axial lateral nos blocos (Figura 2.12). Com isso, a alvenaria pode ser submetida a esforços maiores que os suportados pela argamassa em estado uniaxial.

Observando o comportamento dos tijolos sob este estado triaxial de tensões, o autor desenvolveu um critério de ruptura para um tijolo sob esta situação, como mostrado na Figura 2.13, para argamassas com menor módulo de elasticidade (mais deformáveis) em relação ao bloco. Conforme a teoria do autor, os fatores que afetam a resistência à

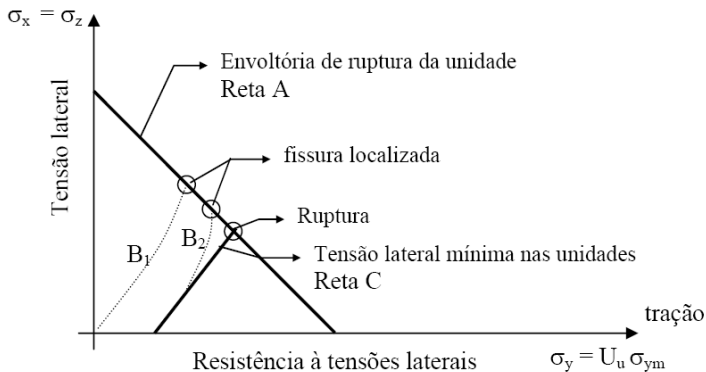
compressão da alvenaria são a resistência à compressão uniaxial do tijolo, a resistência à tração biaxial do tijolo, a resistência a compressão uniaxial da argamassa (início da linha C), o comportamento da argamassa sob um estado de compressão triaxial (linha C) e um coeficiente de não uniformidade U (uma medida de tensões adicionais devidas a não uniformidade de juntas e tijolos e suas propriedades).

Figura 2.12 - Tensões nas unidades e na argamassa submetidas a compressão simples.



Fonte: HILSDORF (1969).

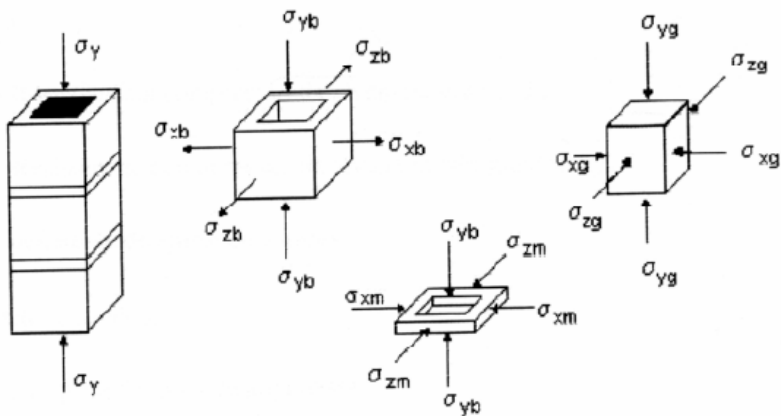
Figura 2.13 - Representação gráfica de tensões e critérios de ruptura para tijolos e alvenaria.



Fonte: HILSDORF (1969).

Hamid e Drysdale (1979) apud Grohmann (2006), estudando prismas grauteados de concreto, analisaram a interação entre bloco, argamassa e graute sob estado multiaxial de tensões (Figura 2.14), desenvolvendo um modelo de ruptura para a alvenaria. Os autores basearam-se nas seguintes hipóteses: aderência na interface bloco/argamassa/graute, distribuição proporcional de esforços verticais entre os componentes, distribuição uniforme de tensões ao longo da altura, teoria de Mohr e adoção das características do graute como sendo um concreto convencional.

Figura 2.14 - Estado multiaxial de tensões da alvenaria sob compressão.



Fonte: Hamid e Drysdale (1979).

Segundo os autores, ao se aplicar o carregamento à alvenaria o graute atinge sua capacidade resistente de compressão não confinado, expandindo em razão de suas deformações inelásticas ocasionadas pela microfissuração. Assim, como o bloco tende a restringir estas deformações e a confinar o graute, gera tensões de tração em suas paredes. No caso do graute não atingir a sua capacidade de resistência antes do conjunto bloco-argamassa, as faces do bloco são tracionadas ao restringirem as deformações da argamassa. Desta forma, o bloco sempre romperá em consequência às tensões de tração geradas pela deformação dos demais componentes.

Hamid e Drysdale (1979) também observaram que, quando os prismas eram submetidos à compressão axial surgiam fissuras verticais nos blocos que aumentava em função da carga aplicada. As fissuras

eram formadas em virtude da maior deformação lateral do graute e da argamassa em relação aos blocos.

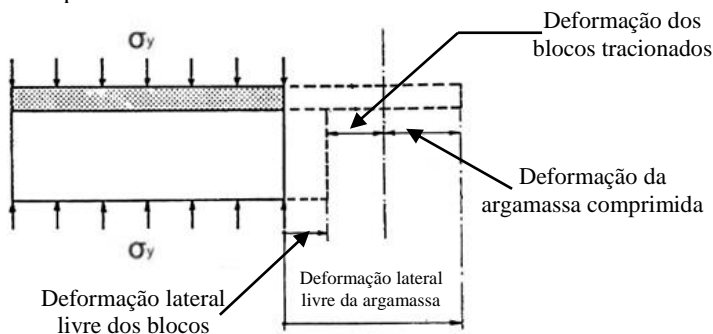
Para analisar a ruptura dos prismas grauteados, os pesquisadores igualaram elasticamente as deformações do graute e do conjunto bloco-argamassa. Os autores partiram do pressuposto que a resistência à compressão da alvenaria grauteada e não grauteada está em função dos seguintes fatores: resistência uniaxial do bloco, resistência à compressão não confinada da argamassa e do graute, módulos de deformação do graute e do bloco, proporção entre a área líquida e a área bruta do bloco, altura do bloco e espessura da junta de argamassa.

Assim, com suas pesquisas, Hamid e Drysdale (1979) chegaram as seguintes conclusões para prismas, quando grauteados:

- a resistência do prisma (na área líquida) diminui para prismas grauteados;
- a influência do tipo de bloco e de argamassa diminui para prismas grauteados;
- a ruptura para prismas grauteados ocorre pela ruptura à tração do bloco induzido pela deformação lateral do graute;
- grandes aumentos na resistência dos grautes têm pouco efeito na resistência dos prismas;
- a ruptura do graute governa a ruptura dos prismas.

O modelo de ruptura de Lenczner, apud Gomes (1983), leva em consideração a contribuição da argamassa de assentamento na resistência da alvenaria, considerando a compatibilidade de deformações entre bloco e argamassa, conforme Figura 2.15. Neste modelo, a argamassa por possuir módulo de elasticidade menor que o do bloco, é submetida a esforços de compressão e os blocos são submetidos a esforços de tração, ocasionando a ruptura por tração no bloco devido sua baixa resistência à tração.

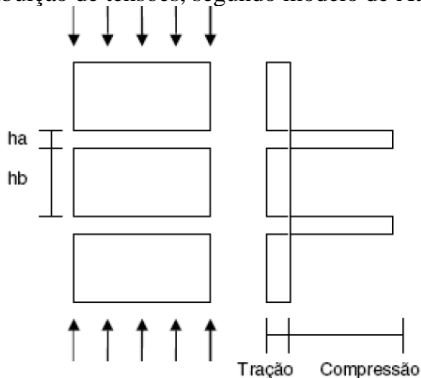
Figura 2.15 - Deformação lateral dos blocos e da argamassa submetidos à compressão simples.



Fonte: Gomes (1983).

Atkinson e Nolan (1985), baseando-se no critério de ruptura de Hilsdorf (1969), também relacionaram as propriedades de resistência e deformação de prismas submetidos à compressão. Segundo os autores, o prisma atua como um conjunto bloco/argamassa sujeito a uma tensão de compressão vertical uniforme, gerando tensões laterais de compressão e tração, também uniformes em ambos os componentes (Figura 2.16).

Figura 2.16 - Distribuição de tensões, segundo modelo de Atkinson e Nolan.



Fonte: Atkinson e Nolan (1985).

McNary e Abrams (1985), a partir do modelo proposto por Atkinson e Noland (1985), realizaram ensaio com prismas de blocos cerâmicos maciços e diferentes argamassas, para comparar os dados experimentais com os valores teóricos. Na realização dos procedimentos

experimentais foram feitos ensaios de compressão triaxial da argamassa, compressão uniaxial dos blocos e dos prismas.

Segundo os autores, como a argamassa tem a tendência a expandir lateralmente e como está aderida mecanicamente ao bloco, ela é restringida lateralmente, ocasionando tensões laterais de tração no bloco e de compressão na argamassa. Sendo assim, a resistência dos prismas é governada pela resistência à tração do bloco e pelas propriedades de deformação da argamassa.

Cheema e Klingner (1986), realizando ensaios experimentais com 1 tipo de bloco de concreto, 2 grautes de resistências diferentes e 2 tipos de argamassas de mesmo traço, porém de resistências diferentes, também desenvolveram um modelo de ruptura para a alvenaria. A partir dos resultados experimentais, os autores desenvolveram modelagem elástica em elementos finitos para a previsão da resistência do prisma e tipo de ruptura devido aos carregamentos. Com a modelagem foi determinada uma metodologia com equações e gráficos baseados nas características mecânicas dos materiais, que apontam qual o tipo de tensão gera a ruptura dos prismas. Esta metodologia determina se a ruptura no prisma ocorrerá por tração nos blocos, ou se pelas resistências à compressão dos materiais. Porém os gráficos e equações utilizados pelos autores são válidos apenas para os materiais empregados pelos autores, em virtude da grande variação existente entre aos materiais para alvenaria de país para país e até mesmo de região para região, restringindo a imediata utilização do modelo matemático proposto pelos autores.

Entretanto, nos resultados obtidos por Cheema e Klingner (1986), dois importantes fatos foram observados: a ocorrência de melhor desempenho à compressão do prisma grauteado com graute de menor resistência a compressão; para prismas não grauteados, o aumento da espessura da junta em 2,7 mm, diminuiu a resistência do prisma.

Ainda segundo os autores, os prismas grauteados usualmente atingem a ruptura quando a tensão de tração transversal perto da interface bloco/argamassa fendilha o bloco, mas também pode ocorrer a ruptura do prisma quando a tensão de compressão no bloco, argamassa ou graute esmaga o correspondente material.

Assim, os autores classificam e nomeiam as formas de ruptura que podem ocorrer na alvenaria grauteada de blocos de concreto em cinco tipos, em ordem decrescente de possibilidade de ocorrência:

- Fendilhamento lateral do bloco: ocorre quando a resistência à tração do bloco é alcançada, levando a ruptura da alvenaria por tração no bloco;

- Esmagamento da argamassa: ocorre quando a máxima tensão de compressão atuante na argamassa atinge a resistência de compressão da argamassa confinada;
- Esmagamento do bloco: ocorre quando é atingida a resistência à compressão do bloco;
- Fendilhamento da argamassa: ocorre quando é atingida a resistência à tração máxima da argamassa;
- Esmagamento do graute: ocorre quando a máxima tensão de compressão atuante no graute atinge a resistência à compressão confinada do graute.

Para a alvenaria não grauteada, os autores dividem as formas de ruptura das paredes de alvenaria em três tipos característicos:

- Tração no bloco: ocorre onde a tensão de tração principal no bloco supera a resistência à tração do bloco;
- Esmagamento do bloco: ocorre quando a tensão principal de compressão no bloco supera a resistência à compressão do bloco;
- Esmagamento da argamassa: ocorre quando a tensão de compressão axial na argamassa é maior que a resistência da argamassa confinada.

A partir dos modos de ruptura observados para a alvenaria não grauteada, os autores desenvolveram várias expressões utilizando as características dos materiais utilizados, que procuravam prever a tensão de compressão necessária para a ocorrência de cada tipo de ruptura, em função da relação entre o módulo de elasticidade da argamassa e do bloco.

Deste modo, no caso de ruptura por tração no bloco, a equação proposta é dada por:

$$f_{tb} = (1/\zeta) \cdot f_{hb1} \quad (2.15)$$

Onde:

f_{tb} = tensão de tração transversal principal no bloco;

f_{hb1} = tensão de compressão aplicada no prisma quando a ruptura é dada pela tração no bloco;

ζ = coeficiente de influência, obtido a partir da Figura 2.17.

Para a ocorrência de ruptura quando a tensão de compressão nominal no bloco alcançar a resistência à compressão uniaxial do bloco, a equação proposta será:

$$f_{hb} = \zeta \cdot f_{tb} \quad (2.16)$$

Onde:

$$f_{hb} < f_b$$

f_{hb} = tensão de compressão aplicado no prisma;

f_b = resistência à compressão uniaxial do bloco;

Para o caso de ruptura por esmagamento da argamassa, a equação é definida da seguinte forma:

$$f_{hm} = \gamma \cdot f_m \quad (2.17)$$

Onde:

f_{hm} = tensão de compressão máxima do prisma quando a ruptura ocorre pelo esmagamento da junta de assentamento;

f_m = resistência à compressão uniaxial do bloco;

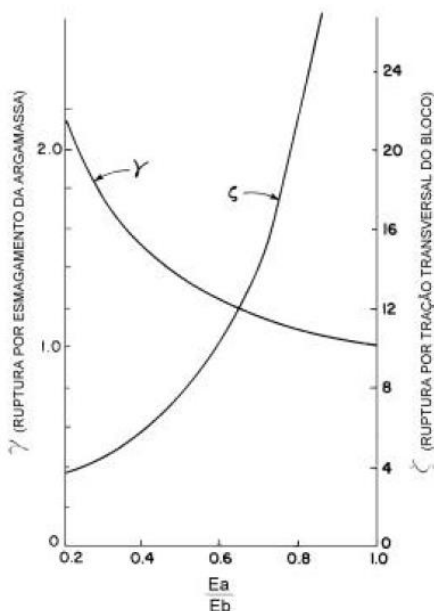
γ = coeficiente de influência, obtido a partir do gráfico da Figura 2.17.

Cheema e Klingner (1986) concluíram também que, para uma dada relação entre módulos de elasticidade da argamassa (E_a) e do bloco (E_b), a ruptura ocorre preferencialmente por tração no bloco ou por esmagamento da argamassa. Assim, tem-se que:

$E_a/E_b \geq 0,66 \rightarrow$ ruptura por esmagamento da argamassa;

$E_a/E_b < 0,66 \rightarrow$ ruptura por tração no bloco.

Figura 2.17 – Curvas de ruptura para prismas de blocos não grauteados.



Fonte: Cheema e Klingner (1986).

Mohamad (1998) estudou o comportamento da alvenaria estrutural de blocos de concreto não grauteados em relação às características mecânicas de diferentes traços de argamassas confinadas triaxialmente. O autor verificou que quando submetida a esforços de compressão a ruptura dos blocos de concreto ocorreu em razão dos seguintes fatores: esmagamento da argamassa, tração na argamassa e tração no bloco. O autor também observou que, quando utilizada argamassa com resistência à compressão inferior à do bloco, a ruptura foi dúctil, ocorrendo um esfacelamento da parte externa das paredes dos blocos. Quando foi utilizada argamassa com resistência à compressão do mesmo nível de resistência do bloco na área líquida, o tipo de ruptura foi frágil, no mesmo sentido da seção transversal do bloco.

O mesmo autor em seu trabalho desenvolvido em 2007, chegou as seguintes conclusões para prismas de três blocos de concreto assentados com duas juntas de argamassas: o surgimento das não-linearidades da alvenaria corresponde ao aumento das deformações laterais, em consequência à extensiva fissuração do material e a um aumento progressivo do coeficiente de Poisson.

Ainda, segundo Mohamad (2007), para prismas de três blocos construídos com a argamassa de traço I (1:0,25:3), com maior rigidez, as fissuras apresentam-se de forma vertical, acontecendo de forma simétrica em ambos os lados. Em nenhuma das amostras foram verificados pontos de esmagamento da junta de assentamento sendo que as trincas foram, para este tipo de prisma, simétricas, verticais e dispersas.

Para os prismas construídos com argamassa do tipo II (1:0,5:4,5), de menor rigidez, tiveram, por consequência do esmagamento localizado, uma associação de trincas verticais em razão da concentração de tensões em alguns pontos. No processo de ruptura, verificou-se o início da perda de coesão da argamassa, o esmagamento da junta de argamassa e o esfacelamento da superfície inferior e superior do bloco.

Ainda, de acordo com as análises efetuadas por Mohamad (2007), verificou-se que a alvenaria (bloco e argamassa) tende a igualar a rigidez dos materiais, ou seja, a junta de argamassa horizontal e o bloco passam a comportar-se como únicos. Partindo-se da hipótese de que os resultados obtidos nas deformações do conjunto (bloco e argamassa) são governados pela deformação da junta de argamassa, até níveis de tensão igual a 0,3 da resistência à compressão do prisma, o autor conclui que: a relação entre o módulo de elasticidade confinado e o uniaxial variou de 0,9 a 2,56 e depende da resistência da argamassa. Criou-se um modelo do comportamento da proporção entre os módulos de elasticidade da argamassa e do bloco, cuja proporção de rigidez foi de 0,75 e 1, respectivamente, até a relação tensão/resistência atingir 0,30. Após isso, para diferentes tipos de composição entre o bloco e a argamassa, ocorre uma diminuição na proporção de rigidez entre a argamassa e o bloco, por causa do esmagamento da junta de assentamento ou do desenvolvimento de tensões de tração localizadas.

2.4. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este texto tem como objetivo levantar alguns questionamentos e fazer algumas observações sobre o que já foi desenvolvido em pesquisas relacionadas à alvenaria estrutural, mais especificamente, de blocos cerâmicos.

De acordo com as normas técnicas de projeto para alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, ABNT NBR 15812-1 (2010), a escolha dos componentes é uma decisão que fica sob responsabilidade dos projetistas. Estas escolhas de projeto baseiam-se em normas, anos de

experiência em desenvolvimento de projetos e execução de obras e estão fundamentadas, principalmente, nos valores de resistência à compressão da alvenaria ou de seus componentes.

Entretanto, alguns autores observam que se torna necessária a compatibilização das propriedades dos componentes da alvenaria estrutural. Nesse caso, as decisões de projeto deveriam levar em conta os valores de módulo de elasticidade dos componentes. Por essa razão, são formuladas as seguintes questões: o que isto implicaria? Qual a relação entre os custos elevados *versus* maior confiabilidade de comportamento estrutural? Qual a melhor escolha a ser tomada pelos projetistas? Em vista disso, prevê-se a alteração dos custos (aumentariam) em função da dificuldade de obtenção destes valores de módulo em ensaios.

Outra questão que pode ser levantada: qual o método mais adequado para obtenção destes valores de módulo, tendo em vista que muitos destes ensaios são adaptados à alvenaria estrutural de blocos cerâmicos? Observa-se que muitos dos ensaios utilizados são adaptados por questões de facilidade, praticidade e custos. Isto não necessariamente implica em resultados confiáveis para análise do comportamento do conjunto, tendo em vista que em muitas metodologias leva-se em consideração o tipo de material que se está analisando.

Assim, encontra-se outro campo de pesquisa e diversas discussões, que não se entende como o objetivo deste trabalho. O presente trabalho visa analisar o comportamento da alvenaria e não novas metodologias de ensaios.

Outro ponto a ser discutido: para todos os autores, basicamente a ruptura da alvenaria ocorre por tensões de tração no bloco, ocasionada pela deformação da argamassa e/ou graute. Todavia, poucos trabalhos utilizam-se dos valores de tração dos blocos para comparação e análise do comportamento da alvenaria estrutural. Entende-se que isto se deve ao fato que a alvenaria estrutural funcione basicamente sobre compressão, daí a comparação de valores de resistência à compressão. Mas também se entende que a dificuldade de realização do ensaio para obtenção dos valores de resistência à tração faz com que boa parte dos pesquisadores opte por ensaios de compressão.

Para o ensaio de resistência a tração utiliza-se do mesmo método empregado para os corpos-de-prova de concreto, ou seja, ensaio de tração indireta por compressão; desenvolvido para o concreto e não para um bloco, cuja geometria e material são diferentes.

Para alguns autores o aumento da resistência à compressão dos blocos implica no aumento das suas resistências à tração. O que tornaria importante a normatização deste ensaio para blocos de alvenaria. Mas qual seria a relação/taxa de aumento no aumento da resistência à tração quando do aumento em sua resistência à compressão? Mostra-se, portanto, outra lacuna para investigação.

Voltando-se para o objetivo principal do trabalho, a norma técnica brasileira ABNT NBR 15812-2 (2010) permite o grauteamento das paredes com a própria argamassa de assentamento logo após o assentamento das unidades, desde que a alvenaria não seja armada. Contudo, nenhuma pesquisa foi encontrada para alvenaria de blocos cerâmicos para fundamentar tal especificação. O que leva a formulação de novas questões: a pressão de adensamento da argamassa utilizada como preenchimento não provocaria a expulsão desta quando fresca, ocasionando danos ao desempenho da parede? Seria melhor algum ensaio ou tempo mínimo de preenchimento com a argamassa? O que pode ocasionar esta decisão técnica no comportamento mecânico do conjunto bloco-argamassa de assentamento e argamassa como preenchimento estrutural?

Tendo em vista que todas as pesquisas com alvenaria grauteada baseiam-se na utilização de graute convencional, ou seja, de concreto e este obviamente, sob solicitação mecânica, tem função e comportamento distinto das argamassas, abre-se aqui precedentes para novas discussões e pesquisas.

Também se entende que devem ser consideradas em decisões de projeto, não somente as relações entre resistência à compressão dos blocos e da argamassa como preenchimento, mas também os valores de módulo de elasticidade destes componentes. Pois, sabe-se que propriedades mecânicas como módulo de elasticidade são fatores importantes no que diz respeito ao comportamento do conjunto. Este detalhe implicaria também na padronização de ensaios para componentes de alvenaria em função de suas características e também aplicação.

A norma técnica brasileira para a argamassa de assentamento, ABNT NBR 13281 (2005), classifica as argamassas em faixas de resistência quanto ao desempenho mecânico. Entretanto, não indica qual a aplicação mais adequada destas argamassas em função destes valores. Portanto, qual o objetivo de classificação se não há indicação de qual melhor aplicação deste componente? Adequar esta norma conforme o tipo de aplicação da argamassa seja para revestimento, assentamento ou

preenchimento torna-se também um desafio a ser encarado pelos pesquisadores.

Face ao exposto, há uma lacuna para investigação e discussões, o que justifica o objetivo principal deste trabalho.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será descrito o procedimento experimental adotado no trabalho. São apresentados os procedimentos de caracterização dos materiais e componentes utilizados na moldagem dos prismas, os traços em volume e massa das argamassas de assentamento e grautes, os procedimentos de moldagem bem como os equipamentos utilizados para os ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais e componentes.

O primeiro objetivo dos ensaios de caracterização é permitir a comparação das propriedades dos prismas e os seus componentes, procurando semelhanças e diferenças entre suas propriedades físicas e mecânicas, estudando desta forma a viabilidade de utilização da técnica de preenchimento das paredes de alvenaria com a argamassa de assentamento.

O objetivo secundário é a obtenção das principais propriedades mecânicas dos materiais e os diagramas tensão-deformação dos prismas, que viabilizam as análises numéricas pelo Método dos Elementos Finitos. Esta análise tem a finalidade de avaliar o comportamento de algumas séries de prismas, através de análise de tensões sob compressão axial, com a utilização do programa computacional Marc Mentat 2012. A análise numérica realizada é baseada no comportamento não linear dos materiais, sendo utilizado para os prismas a micromodelagem.

A caracterização se deu com a análise das resistências e propriedades elásticas dos blocos, das argamassas, dos grautes e dos prismas. Os ensaios em blocos e prismas foram conduzidos até a ruptura, para que através dos parâmetros obtidos, ou seja, medição dos deslocamentos, deformações e modo de ruptura, possibilite a comparação de comportamento e resistência entre as diferentes séries de prismas analisadas.

Para tanto, utilizaram-se três blocos de geometrias distintas, designados blocos tipo B6, B12 e B15. Para a realização do estudo utilizaram-se dois lotes de blocos produzidos em datas diferentes. Para a determinação da resistência à compressão dos prismas foram utilizados os blocos do lote 1, e para a determinação do módulo de elasticidade foram utilizados os blocos do lote 2, conforme 2ª e 3ª Etapas do fluxograma da Figura 3.1.

Para as argamassas, utilizaram-se seis traços com resistências distintas, sendo três traços de argamassas mistas, designadas argamassas

tipo A, B e C; três traços de argamassas industrializadas, designadas argamassas tipo M, 5 e 10.

Utilizaram-se também três traços de grautes, com resistências distintas, designados G1, G2 e G3.

Para este trabalho foram moldados prismas de três fiadas à prumo, com argamassamento total. Na 2ª Etapa do programa experimental, os prismas moldados foram utilizados para obtenção dos valores de resistência à compressão e os prismas moldados na 3ª Etapa do programa experimental, foram utilizados para obtenção dos valores de módulo de elasticidade. Divididos entre estas duas etapas do trabalho, foram moldados cinco prismas para cada combinação bloco-argamassa-graute, sendo 48 tipos de prismas com características distintas, totalizando 240 prismas.

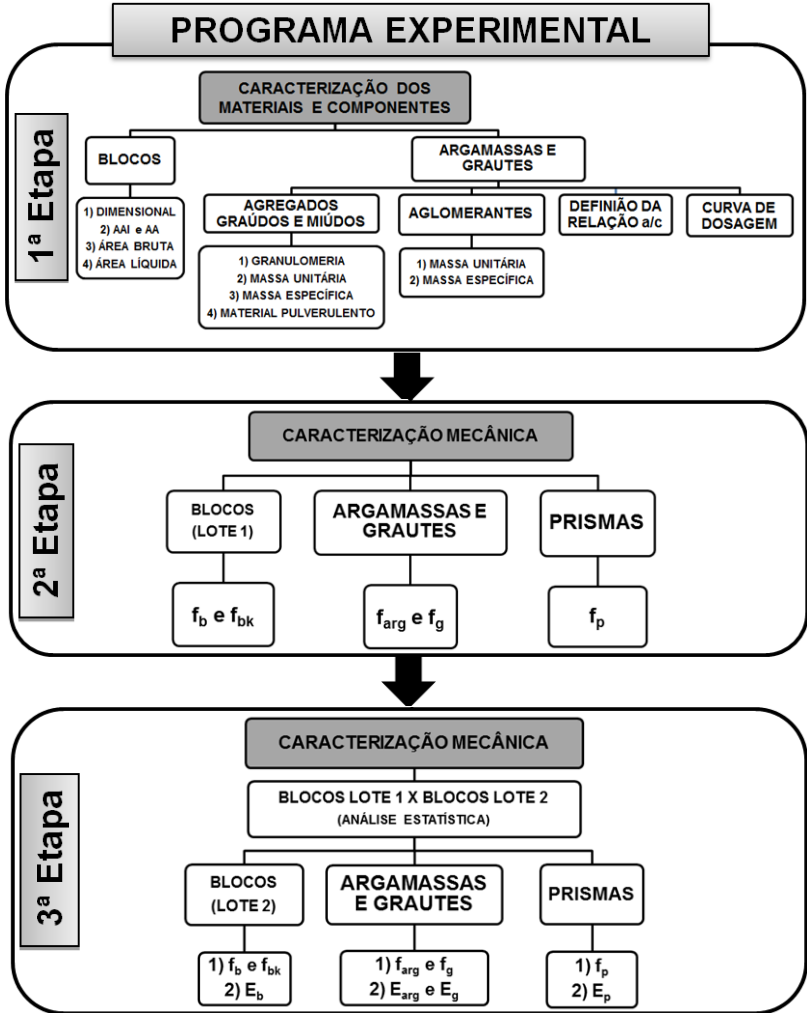
Basicamente, o programa experimental constitui-se de três etapas. Inicialmente, na primeira etapa, caracterizam-se os materiais empregados na produção das argamassas, grautes e os blocos utilizados na moldagem dos prismas. Nesta etapa também se realizou a definição e conversão dos traços das argamassas e grautes utilizados, conforme é apresentado no fluxograma da Figura 3.1.

Na segunda e terceira etapas do programa experimental realizou-se a caracterização mecânica dos blocos, argamassas, grautes, e prismas empregados no trabalho, conforme o fluxograma da Figura 3.1. De acordo com a Figura 3.1, f_b , f_{bk} e E_b , representam respectivamente, resistência média à compressão, resistência característica à compressão e módulo de elasticidade do bloco; f_{arg} e E_{arg} representam resistência média à compressão e módulo de elasticidade da argamassa; para os grautes, f_g e E_g , representam resistência média à compressão e módulo de elasticidade dos grautes; f_p e E_p representam a resistência média à compressão e módulo de elasticidade dos prismas.

A caracterização mecânica dividiu-se entre estas duas etapas em virtude das limitações do espaço físico e disponibilidade de equipamentos para a realização dos ensaios no laboratório. Entretanto, a terceira etapa do programa experimental realizou-se somente com a constatação de nenhuma diferença significativa entre os valores das propriedades mecânicas obtidas para os blocos dos dois lotes recebidos.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Figura 3.1 - Programa de caracterização dos materiais, argamassas, blocos e prismas.



Fonte: Autor (2015).

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do trabalho utilizaram-se materiais disponíveis na região da Grande Florianópolis e habitualmente utilizados em alvenaria estrutural. As propriedades e metodologias empregadas em suas caracterizações são descritos a seguir.

3.1.1. Agregados

Neste trabalho, para a produção das argamassas mistas e dos grautes, como agregado miúdo, utilizou-se areia quartzosa de origem natural. Em estudo prévio, realizou-se a análise granulométrica das areias comercializadas na região da Grande Florianópolis.

Para manter o padrão granulométrico em todo estudo, realizou-se a composição granulométrica da areia, conforme ABNT NBR 7211 (2009), BS 1200 (1976) e ASTM C-144 (1987), normas estas específicas para argamassas e concreto.

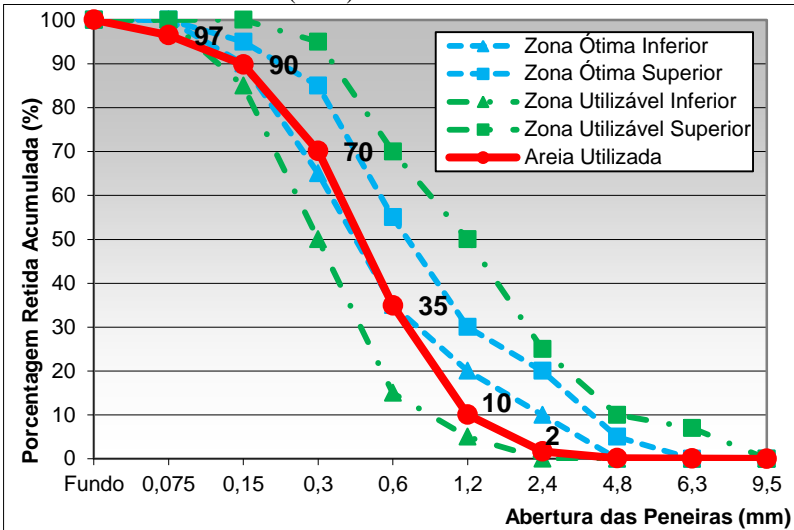
A caracterização granulométrica da areia realizou-se de acordo com a norma ABNT NBR NM 248 (2003): Agregados - Determinação da composição granulométrica. As porcentagens retidas acumuladas em cada peneira para a areia utilizada se encontram na Tabela 3.1, sendo que a curva granulométrica da areia e os limites granulométricos indicados pela ABNT NBR 7211 (2009), específica para concreto, estão apresentados na Figura 3.2. Na Figura 3.3, encontra-se a curva granulométrica da areia utilizada e os limites inferiores (LI) e superiores (LS) especificados pelas normas BS 1200 (1976) e ASTM C-144 (1987), indicadas para argamassas de assentamento.

Tabela 3.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado.

Peneira (abertura em mm)	% Retida Acumulada
4,75	0
2,36	2
1,20	10
0,60	35
0,30	70
0,15	90
0,075	97
Fundo	100

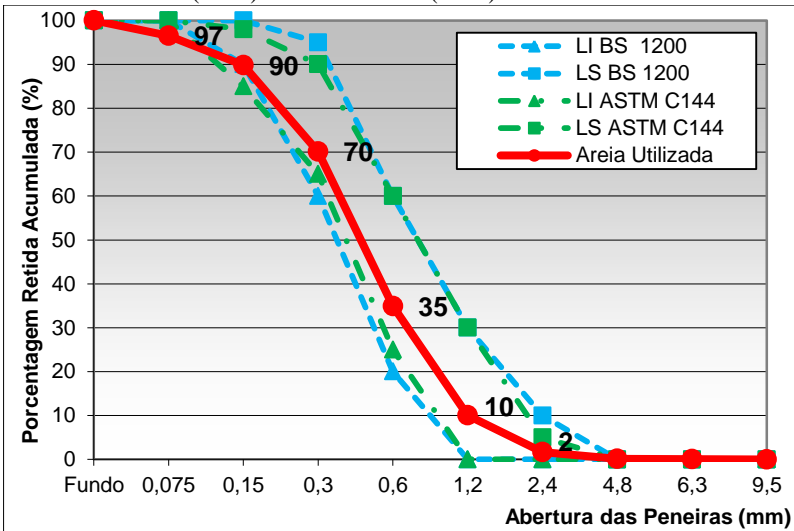
Fonte: Autor (2015).

Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia utilizada e zonas de utilização conforme ABNT NBR 7211 (2005).



Fonte: Autor (2015).

Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia utilizada e limites de utilização conforme BS 1200 (1976) e ASTM C-144 (1987).



Fonte: Autor (2015).

Para a produção dos grautes, como agregado graúdo, utilizou-se brita de origem granítica comercializada na região da Grande Florianópolis. Durante todo o estudo, foi mantido o mesmo padrão granulométrico do agregado graúdo para a confecção dos grautes.

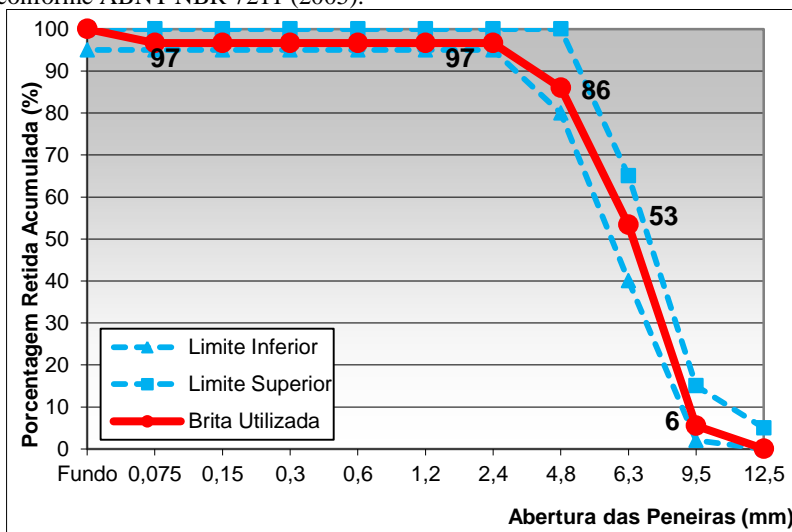
As porcentagens retidas acumuladas em cada peneira, da brita utilizada no estudo, se encontram na Tabela 3.2, sendo que sua curva granulométrica e os limites granulométricos indicados pela ABNT NBR 7211 (2009) estão apresentados na Figura 3.4. Conforme pode ser observado na Figura 3.4, a brita utilizada no estudo se encontra dentro dos limites granulométricos especificados pela norma ABNT NBR 7211 (2009), para uso em concretos, e situa-se na zona granulométrica 4,75/12,5. A dimensão máxima encontrada para o agregado graúdo foi de 12,5 mm, valor este dentro do limite de 1/3 da menor dimensão dos furos a serem preenchidos pelos grautes, preconizado pela norma ABNT NBR 15812-2 (2010).

Tabela 3.2 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado.

Peneira (abertura em mm)	% Retida Acumulada
12,50	0
9,50	6
6,30	53
4,75	86
2,36	97
Fundo	100

Fonte: Autor (2015).

Figura 3.4 - Curva granulométrica da brita utilizada e limites de utilização conforme ABNT NBR 7211 (2005).



Fonte: Autor (2015).

As determinações das massas específicas, massas unitárias e teor de material fino (material pulverulento) dos agregados realizaram-se de acordo com as normas ABNT NBR NM 52 (2003) – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, ABNT NBR NM 53 (2003) – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, ABNT NBR NM 45 (2006) – Agregados - Determinação da massa unitária, ABNT NBR NM 46 (2003) – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. As massas específicas e unitárias são características importantes na transformação de traços de argamassas e grautes em massa para volume e vice-versa.

Assim, os valores de massas específicas, massas unitárias e teores de material fino encontrados para os agregados utilizados encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características físicas dos materiais utilizados nas argamassas de assentamento e grautes.

Material	Massa Específica Aparente (kg/dm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)	Módulo de Finura	Teor de Material Fino (%)	Dimensão Máxima Característica (mm)
Areia	2,55	1,40	2,1	3,5	2,4
Brita	2,69	1,45	5,75	1,1	12,5

Fonte: Autor (2015).

3.1.2. Aglomerantes

O cimento utilizado neste estudo foi o cimento Portland CP II Z-32, proveniente da empresa Votorantim Cimentos Brasil S.A., indicado para argamassas e disponível no mercado. A caracterização química do cimento Portland CPII Z-23, cedida pela empresa Votorantim, encontra-se na Tabela 3.4. De acordo a ABNT NBR 11578 (1991): Cimento Portland composto – Especificação, o cimento utilizado encontra-se de acordo com os limites estabelecidos por norma.

Tabela 3.4 - Caracterização química do Cimento Portland CP II Z-32.

Ensaio	Teores (%)	Limites de Norma
Trióxido de enxofre – SO ₃	2,66	≤ 4,0
Óxido de magnésio - MgO	5,97	≤ 6,50
Perda ao Fogo	5,35	≤ 6,50
Resíduo insolúvel	7,80	≤ 16,0

Fonte: Empresa Votorantim Cimentos Brasil S.A. (2012).

A cal utilizada para o estudo foi do tipo hidratada CH III, proveniente da empresa Cal Cem, e que estava disponível no mercado. A caracterização química da cal hidratada CH III, cedida pela empresa Cal Cem, encontra-se na Tabela 3.5. De acordo com a ABNT NBR 7175 (2003): Cal hidratada para argamassas – Requisitos, a cal utilizada encontra-se dentro do especificado por norma.

Tabela 3.5 - Composição da Cal CH III.

Ensaio	Teores (%)	Limites de Norma
Óxidos Totais (CaO total + MgO total)	96,6	≤ 88,0
Anidrido Carbônico (CO ₂)	2,8	≤ 13,0
Óxidos Totais não hidratados (CaO + MgO)	5,7	≤ 15,0
Granulometria # 30 (0,600 mm)	0,0	≤ 0,5
Granulometria # 200 (0,075 mm)	12,0	≤ 15,0

Fonte: Empresa Cal Cem (2012).

Para os ambos aglomerantes, a determinação de suas massas específicas foi realizada conforme a norma ABNT NBR NM 23 (2000) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Para a obtenção das massas unitárias realizou-se o mesmo procedimento utilizado para os agregados. As massas unitárias são características importantes na transformação de traços de argamassas e grautes em massa para volume e vice-versa.

Assim, os resultados da caracterização física encontrados para cada um dos aglomerantes utilizados na produção das argamassas e grautes são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Características físicas dos materiais utilizados nas argamassas de assentamento e grautes.

Material	Massa Específica Aparente (kg/dm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)
Cimento CP II Z 32	2,82	1,13
Cal Hidratada CH III	2,35	0,70

Fonte: Autor (2015).

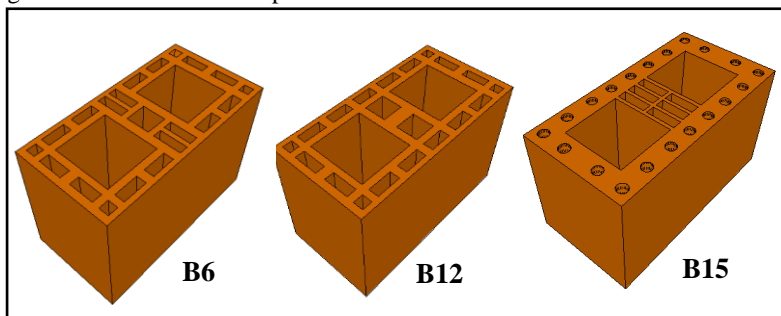
3.1.3. Água

A água utilizada no desenvolvimento do trabalho foi proveniente da rede de abastecimento local, CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento.

3.2. BLOCOS CERÂMICOS

Para a realização do trabalho utilizou-se blocos cerâmicos estruturais da classe T29, com dimensões nominais 14x19x29 cm com resistências nominais declaradas pelo fabricante de 6 MPa, 12 MPa e 15 MPa, com geometrias distintas conforme Figura 3.5. Para facilitar o entendimento ao longo do trabalho, as três classes de blocos foram denominadas de acordo com as suas resistências nominais, ou seja, como B6, B12 e B15.

Figura 3.5 - Geometria e respectivas resistências nominais dos blocos utilizados.



Fonte: Autor (2015).

Foram recebidos blocos de dois lotes (L1 e L2), produzidos em datas diferentes por uma mesma empresa da região do Alto Vale do Itajaí em Santa Catarina. Inicialmente, para ambos os lotes, fez-se a verificação das variações dimensionais dos blocos estudados de acordo com a ABNT NBR 15270-3 (2005). Para a determinação das dimensões, áreas bruta e líquida, índice de absorção d'água (AA) e índice de absorção inicial (AAI), utilizou-se uma amostra com treze blocos para cada lote recebido, de acordo com a norma ABNT NBR 15270-3 (2005).

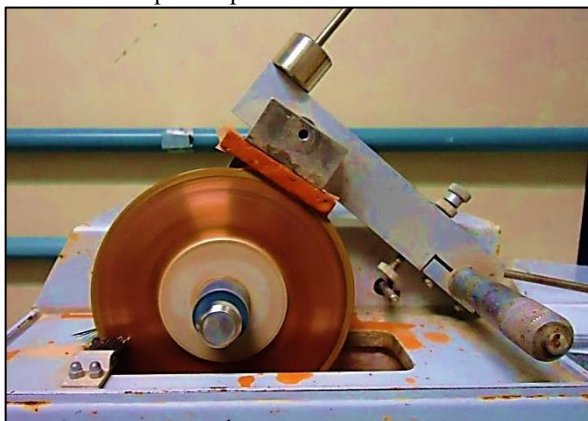
Logo após, iniciando a 2ª Etapa do programa experimental, realizou-se o ensaio de resistência à compressão para cada um dos treze blocos que constituíam a amostra, também conforme especificações da ABNT NBR 15270-3 (2005). Para os ensaios de resistência à compressão a velocidade de carregamento foi de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s, conforme norma ABNT NBR 15270-3 (2005), e para os ensaios de tração indireta utilizou-se a velocidade de 0,15 kN/s, conforme ASTM C 1006 (1984).

Conforme prescrito em norma, os blocos foram capeados com pasta de cimento, com no mínimo 48 h antes do ensaio, com espessura variando entre 1 e 3 mm. O capeamento foi utilizado para corrigir imperfeições das superfícies dos blocos, gerados pelo processo de fabricação, e para a melhor distribuição do carregamento em toda a área da seção do bloco, durante a realização dos ensaios. Para todos os ensaios de resistência à compressão e tração dos blocos, utilizou-se a prensa de sistema hidráulico SHIMADZU, com capacidade máxima de 2000 kN, do Laboratório de Materiais e Construção Civil – LMCC/UFSC.

Para a determinação do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material do bloco, referente à 3ª Etapa do programa experimental, foram extraídos três corpos-de-prova prismáticos de cada uma das classes de bloco, com dimensões de (20x40) mm e espessura variável de acordo com suas respectivas geometrias. Os corpos-de-prova foram extraídos das paredes localizadas na região central do bloco (septo) em razão da maior facilidade em cortá-las e a menor variação existente entre as espessuras das paredes desta região entre as três classes de blocos utilizadas, tentando-se assim padronizar o máximo possível estas dimensões.

Inicialmente cortaram-se os blocos em porções menores com uma serra circular, para posteriormente, os corpos-de-prova prismáticos serem cortadas nas dimensões finais com um disco de corte diamantado (Figura 3.6), que proporcionou melhor acabamento e maior controle nas dimensões dos corpos-de-prova.

Figura 3.6 - Corte dos corpos-de-prova do material dos blocos.

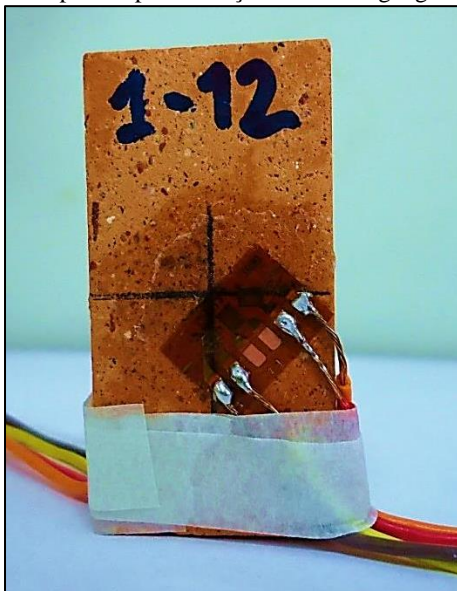


Fonte: Autor (2015).

Após esta etapa do processo, com os corpos-de-prova limpos e secos, realizou-se a preparação de suas superfícies para a fixação dos strain gauges, com cola da marca Loctite (Figura 3.7). Estes strain gauges foram utilizados na obtenção dos valores de deformação dos corpos-de-prova, utilizados na determinação dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para as respectivas classes de blocos. Os strain gauges estavam conectados a um sistema de aquisição de dados composto por um Datalogger Spider 8 da marca HBM e software CATMAN, do mesmo fabricante.

Para a obtenção de dados confiáveis para a determinação dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, utilizaram-se dois strain gauges fixados em cada um dos lados do corpo-de-prova, para compensar possíveis deformações excessivas apresentadas durante o ensaio, em cada um dos seus lados. Cada strain gauge fornecia valores de deformações longitudinal e transversal. Os valores de deformação utilizados na construção do diagrama tensão x deformação, foram obtidos com a média dos valores de deformação longitudinal e transversal registrados para cada um dos corpos-de-prova.

Figura 3.7 – Corpo-de-prova após a fixação dos strain gauges.



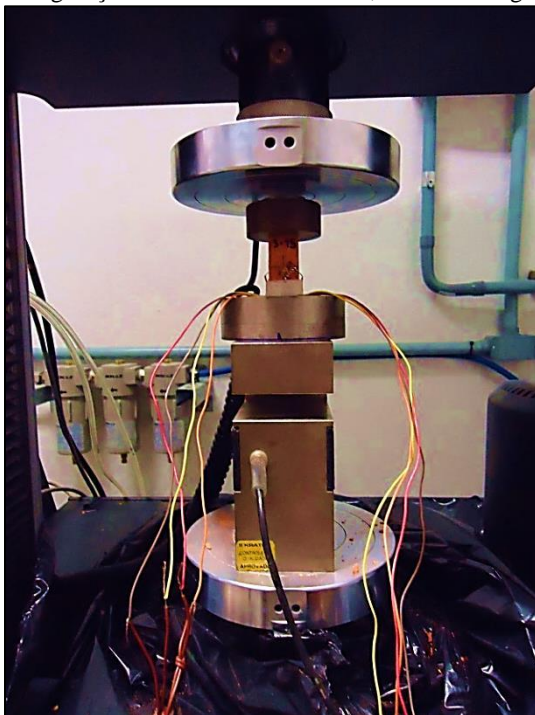
Fonte: Autor (2015).

Neste ensaio adotaram-se os procedimentos da norma ABNT NBR 8522 (2008), de acordo com as recomendações ABNT NBR 15270-3 (2005), devida a falta de ensaios normalizados utilizando estes corpos-de-prova para o material do bloco cerâmicos. Desta forma, adotou-se a velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, conforme a ABNT NBR 8522 (2008). A aplicação da carga foi realizada em um único ciclo, de forma lenta e contínua. Assim, de acordo com esta norma, calculou-se o módulo de elasticidade secante obtido para as tensões de 0,5 MPa e 30% da carga de ruptura, para todas os corpos-de-prova prismáticos.

Para a realização dos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos materiais dos blocos utilizou-se a prensa de sistema hidráulico INSTRON, com capacidade máxima de 50 kN, do Laboratório Nanotec – LMCC/UFSC, e uma célula de carga de 50 kN conectada ao equipamento de aquisição de dados (Figura 3.8), ambas com capacidade de carga adequada aos corpos-de-prova ensaiados, conforme observado em ensaios prévios. Foi necessária a utilização da célula de carga por causa da impossibilidade de aquisição direta dos dados de carregamento aplicada pela prensa hidráulica, durante os ensaios.

Para este ensaio, inicialmente fez-se a calibração da célula de carga, para a aquisição de dados compatíveis com os apresentados pela prensa e pelo software CATMAN. Os valores de carga mostrados pela prensa e da célula de carga foram filmados para correções, caso necessário. Durante a realização do ensaio, tomou-se o cuidado para que realmente estivessem sendo registrados pelo programa os dados de deformação dos strain gauges e de aplicação do carregamento pela célula de carga. Caso a diferença nos valores de deformação vertical fosse superior a 20%, o corpo-de-prova era reposicionado e inicia-se novamente o ensaio.

Figura 3.8 – Configuração do ensaio com amostra, célula de carga e prensa.



Fonte: Autor (2015).

3.3. ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizadas seis tipos de argamassas com diferentes resistências à compressão, sendo três traços de argamassas mistas (cimento, cal e areia) e três argamassas industrializadas, com dosagens e resistências distintas.

Os traços utilizados para a confecção das argamassas mistas foram os especificados pela norma britânica BS 5628: Part 1 (1992), como classe (i), (ii) e (iii). Esta classificação e o traço em volume correspondente pela norma britânica, bem como a denominação das argamassas utilizadas neste estudo, encontram-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Denominação das argamassas.

Classe	Traço (em volume)	Denominação
(i)	1 : 1/4 : 3	A
(ii)	1 : 1/2 : 4,5	B
(iii)	1 : 1 : 6	C

Fonte: Autor (2015).

Os traços prescritos pela BS 5628: Part 1 (1992), que são apresentados em volume, foram convertidos para massa para diminuir no processo de produção das argamassas as variações em razão de medições volumétricas imprecisas. Para esta conversão utilizou-se a seguinte equação:

$$1: \frac{V_{ch} \cdot \gamma_{ch}}{\gamma_c} : \frac{V_a \cdot \gamma_a}{\left(\frac{V_h}{V_0}\right) \cdot \gamma_c} \quad (3.1)$$

Onde:

V_{ch} = proporção da cal hidratada no traço da argamassa, em volume unitário (dm^3);

V_a = proporção do agregado miúdo no traço da argamassa, em volume unitário (dm^3);

γ_c = massa unitária do cimento no estado solto (kg/dm^3);

γ_{ch} = massa unitária da cal hidratada no estado solto (kg/dm^3);

γ_a = massa unitária da areia no estado solto (kg/dm^3);

V_h/V_0 = coeficiente médio de inchamento do agregado, conforme ABNT NBR 6467 (2006). Adotou-se coeficiente igual a 1, para areia seca.

Em estudo preliminar, para cada traço utilizado, definiram-se o índice de consistência e a relação água/cimento ($F_{a/c}$) em função da coesão e trabalhabilidade das argamassas e características dos materiais empregados em sua produção, procurando-se manter a mesma consistência para os seis traços durante todo o estudo. O procedimento para a determinação da consistência seguiram os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 13276 (2002). O teor de incorporação de ar e a capacidade de retenção de água também foram determinados para cada um dos traços de argamassas, respectivamente, conforme as normas EN 1015-7:1999 e ABNT NBR 13277 (2005). Estas características, depois de definidas, foram mantidas durante todo o estudo.

A Tabela 3.8 mostra os traços convertidos de volume para massa, a relação água/cimento ($F_{a/c}$), teor de ar incorporado, potencial de retenção de água e o índice de consistência das argamassas mistas utilizadas no estudo.

Tabela 3.8 - Denominação e características das argamassas mistas.

Tipo	Traço em volume (cim. : cal : areia)	Traço em massa (cim. : cal : areia)	Teor de Ar Incorp. (%)	Retenção de Água (%)	$F_{a/c}$	Consistência (mm)
A	1 : 1/4 : 3	1 : 0,15 : 3,72	5,8	80	0,95	± 260
B	1 : 1/2 : 4,5	1 : 0,31 : 5,58	6,0	75	1,45	± 275
C	1 : 1 : 6	1 : 0,62 : 7,43	5,2	80	1,95	± 285

Fonte: Autor (2015).

Para as argamassas industrializadas foram utilizadas argamassas do tipo Múltiplo Uso, de assentamento estrutural de 5 MPa e 10 MPa, produzidas por uma empresa atuante no mercado nacional. Na caracterização no estado fresco das argamassas industrializadas, foram realizados os mesmos ensaios utilizados na caracterização das argamassas mistas.

Assim a denominação para os três classes de argamassas industrializadas, a relação água/argamassa anidra ($F_{a/arg}$) e as demais propriedades determinadas em estudo preliminar, em função da coesão e trabalhabilidade desejada e que foram mantidas durante todo o estudo, encontram-se na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Denominação e características das argamassas industrializadas.

Tipo de Argamassa Industrializada	Denominação	Teor de Ar Incorporado (%)	Retenção de Água (%)	$F_{a/arg}$	Consistência (mm)
Múltiplo Uso	M	11,0	89,5	0,13 4	± 175
Assentamento Estrutural de 5 MPa	5	5,8	85,9	0,14 4	± 210
Assentamento Estrutural de 10 MPa	10	5,0	85,5	0,15 5	± 220

Fonte: Autor (2015).

As argamassas mistas e industrializadas apresentaram todos os requisitos exigidos pela norma NBR 13281 (2005), exceto a argamassa mista do tipo B, que apresentou valor de retenção de água abaixo dos limites desta norma. Entretanto, conforme observado em laboratório, esta diferença não inviabilizou sua utilização na moldagem e preenchimento dos prismas, não interferindo assim no objetivo principal do estudo.

A preparação das argamassas mistas, de acordo com a antiga ABNT NBR 8798 (1985), foi executada em misturador mecânico de eixo inclinado (betoneira), conforme a seguinte metodologia:

- 1) Colocava-se parte da água de amassamento e todo o agregado miúdo no misturador em funcionamento;
- 2) Em seguida, colocava-se todo o cimento no misturador, também em funcionamento;
- 3) Logo em seguida, adicionava-se a cal hidratada e o resto da água.

A mistura dos materiais, durante a preparação das argamassas mistas, foi realizada durante ± 5 min, com a quantidade de água necessária para conferir à mistura a consistência e trabalhabilidade determinadas em ensaios prévios.

Para a preparação das argamassas industrializadas foi utilizada uma argamassadeira de eixo vertical, em razão de indisponibilidade do equipamento indicado pelo fabricante. Mesmo assim, em ensaios preliminares, o uso deste equipamento demonstrou-se mais adequado do que o utilizado para a preparação das argamassas mistas, em consequência aos aditivos incorporadores de ar existentes na composição das argamassas industrializadas. Assim, a mistura das

argamassas industrializadas foi executada de acordo com a seguinte metodologia:

1) Colocava-se metade da água de amassamento na argamassadeira;

2) Em seguida, colocava-se toda a argamassa anidra na argamassadeira, em movimento;

3) Depois era realizada a mistura na argamassadeira por 3 min. Após esta etapa, quando necessário, era desligado o equipamento e retirava-se parte da argamassa aderida na parede da cuba da argamassadeira, por não mais do que 3 min;

4) Na sequência, colocava-se a outra metade da água na cuba e realizava-se novamente a mistura por 1 min, tempo necessário para conferir à mistura a consistência e trabalhabilidade determinadas em ensaios prévios.

Na 2ª Etapa do programa experimental, para cada moldagem de prismas vazios ou grauteados com as argamassas A, B, C, M, 5 e 10, foram moldados no mínimo três corpos-de-prova prismáticos (4x4x16) cm³, em moldes metálicos, para a determinação das propriedades mecânicas das argamassas, por meio de ensaio de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, aos 28 dias, de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 13279 (2005).

Na a realização de todos os ensaios de compressão e tração na flexão dos corpos-de-prova prismáticos das argamassas utilizou-se a prensa de sistema hidráulico da marca SOLOTEST, com capacidade máxima de 196 kN para o ensaio de compressão e 19,6 kN para o ensaio de tração na flexão, do Laboratório de Materiais e Construção Civil – LMCC/UFSC.

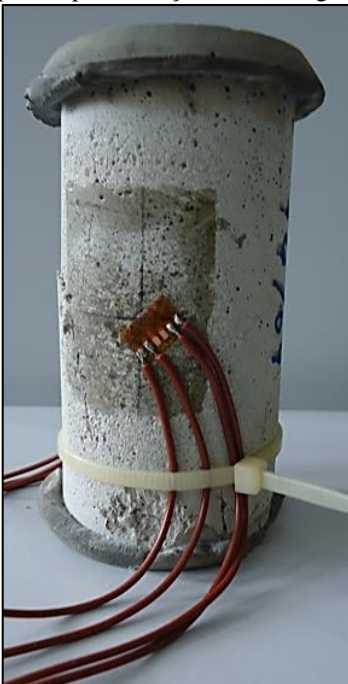
As velocidades de carga utilizadas para todos os ensaios resistência à compressão e tração na flexão foram, respectivamente, de 500 ± 50 N/s e 50 ± 10 N/s, conforme ABNT NBR 13279 (2005).

Para a determinação do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, ensaios referentes à 3ª Etapa do programa experimental, foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos ($\phi 5 \times 10$) cm para cada tipo de argamassa, adotando os procedimentos da norma ABNT NBR 8522 (2008), de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 15270-3 (2005).

Nesta 3ª Etapa, após o processo de cura em sala climatizada, realizou-se a preparação da superfície dos corpos-de-prova para a fixação dos strain gauges, com cola da marca Loctite (Figura 3.9). Os strain gauges estavam conectados a um sistema de aquisição de dados

composto por um Dataloger Spider 8 da marca HBM e software CATMAN, do mesmo fabricante.

Figura 3.9 –Corpo-de-prova após a fixação dos strain gauges.



Fonte: Autor (2015).

Para a obtenção de dados confiáveis para a determinação dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, utilizaram-se dois strain gauges fixados em cada um dos lados da amostra, para compensar possíveis deformações excessivas apresentadas durante o ensaio, em cada um dos lados da amostra. Cada strain gauge fornecia valores de deformações longitudinal e transversal. Os valores de deformação utilizados na construção do diagrama tensão x deformação cada classe de argamassa, foram obtidos com a média dos valores de deformação longitudinal e transversal registrados para cada corpo-de-prova.

Nestes estes ensaios de determinação do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das argamassas, utilizou-se a prensa de sistema hidráulico SHIMADZU com capacidade máxima de 2000 kN, entretanto

configurada na escala de 100 kN, e uma célula de carga de 50 kN conectada ao equipamento de aquisição de dados, ambas com capacidade de carga adequada aos corpos-de-prova utilizados, conforme observado nos ensaios de resistência a compressão. Foi necessária a utilização da célula de carga por causa da impossibilidade de aquisição direta dos dados de carregamento aplicados pela prensa hidráulica, durante os ensaios.

Para este ensaio, inicialmente fez-se a calibração da célula de carga, para a aquisição de dados compatíveis com os apresentados pela prensa e pelo software CATMAN. Os valores de carga registrados pela prensa e pela célula de carga foram filmados para correções, caso necessário. Durante a realização do ensaio, tomou-se o cuidado para que realmente estivessem sendo registrados pelo programa os dados de deformação dos strain gauges e de aplicação do carregamento pela célula de carga. Caso a diferença nos valores de deformação vertical fosse superior a 20%, o corpo-de-prova era reposicionado e inicia-se novamente o ensaio.

Para os ensaios de módulo de elasticidade e Poisson utilizou-se a velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, conforme ABNT NBR 8522 (2008), com a aplicação da carga ocorrendo em um único ciclo, de forma lenta e contínua. Assim, de acordo com esta norma, calculou-se o módulo de elasticidade secante obtido para as tensões de 0,5 MPa e 30% da carga de ruptura, para todas os corpos-de-prova de argamassas. Todos os equipamentos utilizados pertenciam ao Laboratório de Materiais e Construção Civil – UFSC.

3.4. GRAUTES

Neste trabalho foram utilizados três traços de grautes, de resistência e módulos de elasticidade distintos, para posterior comparação com o grauteamento utilizando-se a própria argamassa de assentamento. A dosagem dos grautes foi realizada de acordo com o método IPT/EPUSP. Com este procedimento de dosagem foram determinados os dois traços de menor resistência, que foram mantidos em todo o estudo. O cálculo da dosagem não será apresentado, pois o objetivo do estudo não era estudar a dosagem dos grautes, mas sim, utilizar traços que resultariam em resistências médias à compressão distintas.

Para obtenção do graute de maior resistência, foi utilizada uma mistura industrializada de base cimentícia, tradicionalmente empregado em reforços estruturais, com nome comercial Sika Grout, produzido pela

Empresa Sika S.A. Essa mistura consiste basicamente de cimento Portland, areia de quartzo de granulometria selecionada e aditivos especiais. Para a produção deste traço de maior resistência, foi seguida a recomendação do fabricante de incorporação de 30% de pedrisco, em massa, ao sika grout.

Assim, a Tabela 3.10 apresenta as denominações dos grautes, traços utilizados (em massa), relação água/cimento ($F_{a/c}$) e as resistências médias à compressão esperadas para cada um dos traços, que foram mantidas durante todo o estudo.

Tabela 3.10 - Denominação e resistências esperadas dos grautes.

Denominação	Traço (em massa) (cimento : areia : brita)	$F_{a/c}$	Resistência Média à Compressão Esperada (MPa)
G1*	1 : 0 : 0,3	0,13	40
G2	1 : 1,82 : 2,04	0,60	25
G3	1 : 2,56 : 2,58	0,80	15
Nota: *Traço em massa (sika grout : areia : brita)			

Fonte: Autor (2015).

Neste trabalho, para os grautes, adotaram-se estes valores de resistência médios à compressão tomando-se como referência trabalhos já realizados pelo grupo GDA da UFSC. Para o menor valor de resistência à compressão adotou-se o maior valor nominal de resistência à compressão dos blocos utilizados na moldagem dos prismas, neste caso, utilizou-se o valor de 15 MPa, referente ao bloco B15.

O abatimento do tronco de cone (*slump*) fixado para o estudo foi de 210 ± 10 mm, em função das características dos materiais empregados e da trabalhabilidade necessária para o grauteamento dos prismas. O *slump* para cada traço foi determinado, conforme a norma ABNT NBR NM 67 (1998).

A preparação dos três traços de grautes foi executada em misturador mecânico (betoneira de queda livre de 120 l de capacidade) de eixo inclinado, de acordo com a seguinte metodologia:

- 1) Inicialmente colocava-se 80% da água de amassamento na betoneira;
- 2) Depois, era colocado todo o agregado graúdo;
- 3) Na sequência, com a betoneira em movimento, se colocava todo o cimento;

- 4) Depois, todo o agregado miúdo;
- 5) Por último, adicionava-se o restante de água.

A mistura dos materiais, durante a preparação dos grautes, era realizada durante 3 a 5 min, com a quantidade de água necessária para conferir à mistura a consistência e trabalhabilidade, conforme determinado em ensaios prévios.

Durante a moldagem dos prismas grauteados, para cada graute do tipo G1, G2 e G3, foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos de ($\phi 10 \times 20$) cm, em moldes metálicos, para a determinação de suas propriedades mecânicas, ou seja, para os ensaios de resistência à compressão, de módulo de elasticidade e coeficiente Poisson, após 28 dias de moldagem.

As moldagens dos corpos-de-prova, os ensaios de resistências à compressão, os ensaios de módulo de elasticidade e Poisson para os três traços de grautes foram realizadas de acordo com as normas ABNT NBR 5738 (2003), ABNT NBR 5739 (2007) e ABNT NBR 8522 (2008). Para a realização de todos os ensaios de caracterização mecânica dos corpos-de-prova utilizou-se a prensa de sistema hidráulico SHIMADZU, com capacidade máxima de 2000 kN, do Laboratório de Materiais e Construção Civil – UFSC.

Na 2ª Etapa do programa experimental, os corpos-de-prova moldados para os três tipos de grautes foram utilizados para obtenção dos valores de resistência à compressão e os corpos-de-prova moldados na 3ª Etapa do programa experimental, foram utilizados para obtenção dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

A velocidade de carga utilizada para todos os ensaios de caracterização mecânica dos grautes foi de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, conforme as normas ABNT NBR 5739 (2007) e ABNT NBR 8522 (2008).

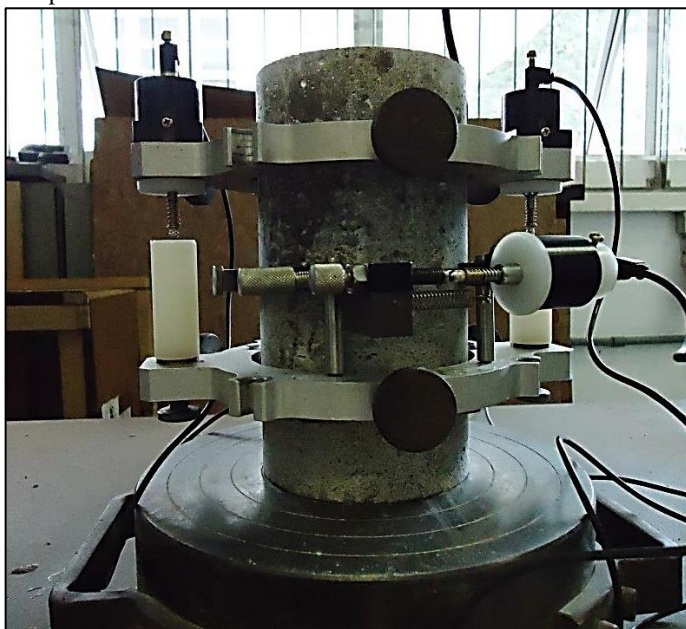
Na 3ª Etapa do programa experimental, realizaram-se dois ensaios diferentes para a determinação dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

No primeiro ensaio utilizou-se um compressômetro para a determinação dos módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson. Basicamente, o compressômetro consta de dois anéis metálicos fixados na base e no topo do corpo-de-prova para a determinação da deformação longitudinal e um anel diametral, para a determinação da deformação transversal (Figura 3.10). Este equipamento foi adaptado para a utilização de transdutores de deslocamento para as leituras dos deslocamentos, utilizados no cálculo das deformações. Estes transdutores de deslocamento estavam conectados a um sistema de

aquisição de dados composto por um Dataloger Spider 8 da marca HBM e software CATMAN, do mesmo fabricante.

Assim foram utilizados dois transdutores de deslocamento para a medição do deslocamento longitudinal e um para o transversal, conforme Figura 3.10. Para a construção do diagrama tensão x deformação foi utilizada a média dos valores de deformações longitudinais determinadas para as duas leituras de deslocamento vertical.

Figura 3.10 – Disposição da fixação dos transdutores de deslocamento nos corpos-de-prova.



Fonte: Autor (2015).

Entretanto, em virtude da dificuldade de realização do ensaio e o desgaste do equipamento, a leitura obtida no deslocamento diametral foi maior que a deformação observada no corpo-de-prova durante o ensaio. Após o tratamento dos dados, esse problema observado foi comprovado com os elevados valores de coeficiente de Poisson obtidos para os três traços de grautes, prejudicando a determinação experimental destes valores.

Assim, como segunda tentativa, optou-se pela utilização de strain gauges para a obtenção dos valores de deformação dos grautes, utilizados na determinação dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Após o processo de cura em sala climatizada, realizou-se a limpeza e preparação da superfície dos corpos-de-prova para a fixação dos strain gauges, com cola da marca Loctite (Figura 3.11). Estes strain gauges estavam conectados a um sistema de aquisição de dados composto por um Dataloger Spider 8 da marca HBM e software CATMAN, do mesmo fabricante.

Para a obtenção de dados confiáveis para a determinação dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, utilizaram-se dois strain gauges fixados em cada um dos lados dos corpos-de-prova, para compensar possíveis deformações excessivas apresentadas durante o ensaio, em cada um dos lados da amostra. Cada strain gauge fornecia valores de deformações longitudinal e transversal. Os valores de deformação utilizados na construção do diagrama tensão x deformação para cada um dos três traços de graute, foram obtidos com a média dos valores de deformação longitudinal e transversal registrados para cada corpo-de-prova.

Nestes ensaios de determinação dos valores de módulo de elasticidade e Poisson dos grautes, utilizou-se uma prensa de sistema hidráulico da marca SHIMADZU, com capacidade máxima de 2000 kN, entretanto configurada na escala de 400 kN, e uma célula de carga de 500 kN conectada ao equipamento de aquisição de dados (Figura 3.11), ambas com capacidade de carga adequada aos corpos-de-prova utilizados, conforme observado nos ensaios de resistência à compressão. Foi necessária a utilização da célula de carga por causa da impossibilidade de aquisição direta dos dados de carregamento aplicados pela prensa hidráulica, durante os ensaios.

Para este ensaio, inicialmente fez-se a calibração da célula de carga, para a aquisição de dados compatíveis com os apresentados pela prensa e pelo software CATMAN. Os valores de carga registrados pela prensa e pela célula de carga foram filmados para correções, caso necessário. Durante a realização do ensaio, tomou-se o cuidado para que realmente estivessem sendo registrados pelo programa os dados de deformação dos strain gauges e de aplicação do carregamento pela célula de carga. Caso a diferença nos valores de deformação vertical fosse superior a 20%, o corpo-de-prova era reposicionado e inicia-se novamente o ensaio.

Para os ensaios de módulo de elasticidade e Poisson utilizou-se a velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, conforme ABNT

NBR 8522 (2008), com a aplicação da carga ocorrendo em um único ciclo, de forma lenta e contínua. Assim, Assim, de acordo com esta norma, calculou-se o módulo de elasticidade secante obtido para as tensões de 0,5 MPa e 30% da carga de ruptura, para todas os corpos-de-prova de argamassas. Todos os equipamentos utilizados pertenciam ao Laboratório de Materiais e Construção Civil – UFSC.

Figura 3.11 – Configuração do ensaio com o corpo-de-prova com strain gauges, célula de carga e prensa.



Fonte: Autor (2015).

3.5. PRISMAS

Para o desenvolvimento do trabalho, a moldagem dos prismas foi dividida em três etapas:

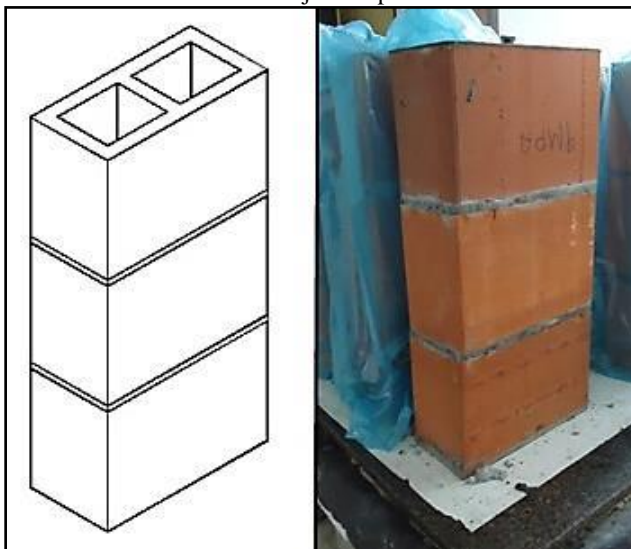
- *Etapa Referência (R)*: etapa na qual foram utilizados três tipos de argamassas de assentamento e três tipos de grautes, de resistências distintas;

- *Etapa Argamassa Industrializada (I)*: etapa na qual foram utilizados três tipos de argamassas industrializadas, de resistências distintas, como argamassa de assentamento e preenchimento;

- *Etapa Argamassa Mista (M)*: etapa na qual foram utilizados três tipos de argamassas de assentamento mistas, de resistências distintas, como argamassa de assentamento e preenchimento.

Para este trabalho foram moldados prismas de três fiadas à prumo com argamassamento total, em razão da economia e facilidade de execução, conforme Figura 3.12. Optou-se pelo emprego de prismas com três blocos por estes amenizarem os efeitos gerados pelo confinamento dos pratos da prensa aos blocos das extremidades e por terem boa correlação com o comportamento das paredes. Nestes prismas, o bloco central, geralmente livre do efeito de confinamento dos pratos da prensa, representa melhor o tipo de ruptura da alvenaria (PAGE, 1991; COLVILLE, 1991; LA ROVERE E RODRIGUES, 1997; RIZZATI, 2003).

Figura 3.12 - Prismas de 3 fiadas com junta a prumo.

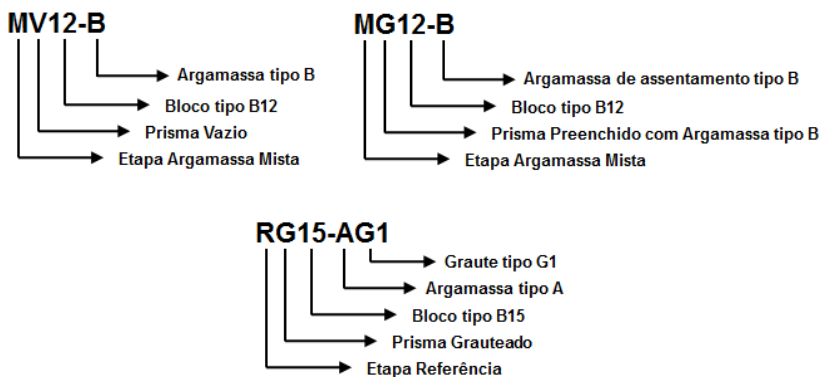


Fonte: Autor (2015).

Na 2ª Etapa do programa experimental, os prismas moldados foram utilizados para obtenção dos valores de resistência à compressão e os prismas moldados na 3ª Etapa do programa experimental, foram utilizados para obtenção dos valores de módulo de elasticidade.

Divididos entre estas duas etapas do trabalho, foram moldados cinco prismas para cada combinação bloco-argamassa-graute, totalizando 48 tipos de prismas de características distintas. Os blocos do Lote 1 foram utilizados para a moldagem dos prismas empregados nos ensaios de determinação da resistência à compressão, sendo que os blocos do Lote 2 foram utilizados nos prismas empregados nos ensaios de determinação do módulos de elasticidade.

Para a determinação da resistência à compressão, foram moldados cinco prismas para cada combinação bloco-argamassa-graute, totalizando 240 prismas. Dentre estes prismas, para a determinação do módulo de elasticidade, foram utilizados apenas dois prismas para cada combinação, em virtude da dificuldade de execução do ensaio, totalizando 96 prismas para este ensaio. Os prismas foram denominados em função da etapa (R, I ou M), prisma grauteado (G) ou prisma vazio (V), tipo de bloco (6, 12 e 15), tipo de argamassa de assentamento ou preenchimento (A, B, C, M, 5 e 10) e o tipo de graute (G1, G2 e G3), conforme exemplo a seguir:



Desta forma, as denominações e combinações utilizadas no trabalho para cada etapa são apresentadas na Tabela 3.11, Tabela 3.12 e Tabela 3.13.

Tabela 3.11 - Denominação dos prismas da Etapa de Referência.

Bloco	Nomenclatura dos Prismas								
	Arg. A (1:1/4:3)			Arg. B (1:0,5:4,5)			Arg. C (1:1:6)		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
B6	-	-	-	-	-	-	RG6- CG1	RG6- CG2	RG6- CG3
B12	-	-	-	RG12 -BG1	RG12 -BG2	RG12 -BG3	-	-	-
B15	RG15- AG1	RG15 -AG2	RG15 -AG3	-	-	-	RG15 -CG1	RG15 -CG2	RG15 -CG3

Fonte: Autor (2015).

Tabela 3.12 - Denominação dos prismas da Etapa com Argamassa Mista.

Bloco	Nomenclatura dos Prismas					
	Arg. A (1:1/4:3)		Arg. B (1:0,5:4,5)		Arg. C (1:1:6)	
	Vazio	Com Graute	Vazio	Com Graute	Vazio	Com Graute
B6	MV6-A	MG6-A	MV6-B	MG6-B	MV6-C	MG6-C
B12	MV12-A	MG12-A	MV12-B	MG12-B	MV12-C	MG12-C
B15	MV15-A	MG15-A	MV15-B	MG15-B	MV15-C	MG15-C

Fonte: Autor (2015).

Tabela 3.13 - Denominação dos prismas da Etapa com Argamassa Industrializada.

Bloco	Nomenclatura dos Prismas					
	Arg. Multiplouso		Arg. 5 MPa		Arg. 10 MPa	
	Vazio	Com Graute	Vazio	Com Graute	Vazio	Com Graute
B6	IV6-M	IG6-M	IV6-5	IG6-5	IV6-10	IG6-10
B12	IV12-M	IG12-M	IV12-5	IG12-5	IV12-10	IG12-10
B15	IV15-M	IG15-M	IV15-5	IG15-5	IV15-10	IG15-10

Fonte: Autor (2015).

A moldagem dos prismas foi executada sobre uma mesa de granito, nivelada, coberta com uma manta plástica untada com óleo mineral. A espessura das juntas de assentamento dos prismas foi executada com 10 ± 3 mm. Para a realização dos ensaios de caracterização mecânica dos prismas não grauteados, os blocos das extremidades foram capeados em uma das faces com pasta de cimento para corrigir as imperfeições do bloco e distribuir homogeneamente o

carregamento em toda a área da seção transversal (Figura 3.13), no mínimo dois dias antes do assentamento dos prismas. Procedimento este análogo ao utilizado para a caracterização mecânica dos blocos. Para os prismas grauteados, o capeamento dos blocos das extremidades foi realizado com no mínimo 48 h antes do ensaio de resistência, facilitando a preparação dos prismas para os ensaios.

Para a Etapa Referência, o grauteamento dos prismas foi realizado 24 ± 2 horas após o assentamento dos mesmos, em três camadas, sendo o adensamento realizado com 30 golpes/camada com haste de adensamento metálica, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 8215 (1983), pois este procedimento não é definido na norma ABNT NBR 15812 (2010).

Para os prismas preenchidos com argamassas, Etapas Argamassa Mista e Industrializada, o preenchimento dos prismas não ocorreu logo após o assentamento dos blocos, conforme indicado pela norma ABNT NBR 15812-2 (2010). Durante as moldagens, realizando o preenchimento dos prismas logo após o assentamento dos blocos, constatou-se que com o adensamento do preenchimento provocava-se a “expulsão” das juntas de argamassas, que ainda não apresentavam resistência necessária para combater este fenômeno. Assim, o preenchimento dos prismas com a argamassa se deu 1 h após o assentamento dos blocos, tempo este constatado como o mínimo necessário para que não ocorresse a expulsão das juntas de argamassa com o adensamento do preenchimento.

Figura 3.13 - Capeamento superior dos blocos para a moldagem dos prismas.



Fonte: Autor (2015).

Todos os blocos tiveram suas faces umedecidas pouco antes do assentamento, sendo mergulhados em uma lamina de água de 5 a 10 mm por cerca de 5 min antes do assentamento dos blocos (Figura 3.14). Segundo CARVALHO (2003), prismas construídos com blocos umedecidos apresentaram uma tendência de aumento de resistência à compressão.

Figura 3.14 - Blocos sendo umedecidos antes da moldagem do prisma.



Fonte: Autor (2015).

Após a moldagem dos prismas, os mesmos foram cobertos com capas plásticas, para minimizar a ação das intempéries do ambiente não controlado do laboratório, conforme Figura 3.15, para após 28 dias de moldagem serem realizados os ensaios de caracterização mecânica.

Figura 3.15 - Armazenamento e cuidados com os prismas após moldagem.



Fonte: Autor (2015).

Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade para os prismas não grauteados foram realizados 28 dias após o assentamento, enquanto que os ensaios dos prismas grauteados foram realizados 28 dias após o grauteamento, já que essa seria a idade em que o graute obterá a resistência esperada.

Na 3ª Etapa do programa experimental, para o ensaio do módulo de elasticidade, utilizou-se uma prensa hidráulica da marca SHIMADZU com capacidade máxima de 2000 kN, entretanto configurada na escala de 1000 kN, uma célula de carga de 500 kN e dois transdutores de deslocamento de curso de 20 mm. Novamente foi necessária a utilização da célula de carga, por causa da impossibilidade de aquisição direta dos dados de carregamento aplicados pela prensa hidráulica, durante os ensaios.

Os transdutores de deslocamento estavam conectados a um sistema de aquisição de dados composto por um Datalogger Spider 8 da marca HBM e software CATMAN, do mesmo fabricante. Os dois transdutores de deslocamento e as hastes ajustáveis para a leitura de deformação foram posicionados em cada um dos lados dos prismas através de fixadores metálicos desenvolvidos para estes ensaios, que foram fixados nas superfícies dos blocos com cola epóxi, conforme Figura 3.16.

Figura 3.16 – Detalhe de fixação dos transdutores de deslocamento no prisma.



Fonte: Autor (2015).

Inicialmente fez a calibração dos transdutores de deslocamento e da célula de carga, para a aquisição de dados compatíveis com os apresentados pela prensa e pelo software CATMAN. Os valores de carga registrados pela prensa e pela célula de carga foram filmados para correções, caso necessário.

Logo após a calibração do equipamento, para a realização do ensaio posicionou-se a célula de carga acima de um dos pratos da prensa, e o prisma ficou confinado entre os pratos, conforme se observa na Figura 3.17. Os pratos utilizados para o ensaio eram de uso específico para prismas, para a distribuição correta de tensões sobre toda a superfície de contato do prisma.

Após a calibração, fixação dos transdutores de deslocamento, posicionamento da célula de carga e do prisma na prensa, iniciou-se o ensaio. O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado até a carga referente a 50% da tensão de ruptura dos prismas, determinada na 2ª Etapa do programa experimental, em virtude da capacidade da célula de carga utilizada, evitando-se assim possíveis danos aos equipamentos.

Durante a realização do ensaio, tomou-se o cuidado para que realmente estivessem sendo registrados pelo programa os dados de deslocamento dos transdutores e de aplicação do carregamento pela

célula de carga. Caso a diferença nos valores de deslocamento vertical fosse superior a 20%, o prisma era reposicionado e inicia-se novamente o ensaio.

Para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos prismas utilizou-se a velocidade de carregamento de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s, conforme ABNT NBR 15270-3 (2005) e ABNT NBR 15812-2 (2010), com a aplicação da carga ocorrendo em um único ciclo, de forma lenta e contínua. Assim, de acordo com esta norma, calculou-se o módulo de elasticidade secante obtido para as tensões de 0,5% e 30% da carga de ruptura, para os prismas. Todos os equipamentos utilizados pertenciam ao Laboratório de Materiais e Construção Civil – UFSC.

Figura 3.17 – Configuração do ensaio com o prisma, célula de carga e prensa.



Fonte: Autor (2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica e física dos prismas e demais componentes utilizados no programa experimental, visando atingir o objetivo principal e objetivos específicos deste trabalho.

4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E FÍSICA DOS BLOCOS

Os valores de caracterização geométrica e mecânica dos blocos dos dois lotes recebidos, utilizados no programa experimental, encontram-se a seguir na Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Tabela 4.1 – Características físicas dos blocos dos Lotes 1 e 2.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS								
Classe de Bloco	Nº de exemplares	Dimensões (mm) e (CV - %)			Área Bruta (cm ²) e (C.V. - %)	Área Líquida (cm ²) e (C.V. - %)	AAI (*) e (C.V. - %)	
		Larg.	Altura	Comp.				
LOTE 1	B6	13	137,3 (0,2)	188,8 (0,3)	288,2 (0,2)	396,3 (0,4)	158,3 (0,8)	12,6 (14,8)
	B12	13	141,0 (0,3)	191,3 (0,3)	290,4 (0,2)	409,5 (0,5)	204,1 (0,4)	16,1 (10,6)
	B15	13	140,8 (0,6)	191,1 (0,6)	288,3 (0,6)	408,2 (1,0)	221,0 (0,9)	16,6 (13,6)
LOTE 2	B6	13	137,2 (0,4)	189,1 (0,3)	286,9 (0,2)	393,5 (0,4)	152,4 (0,5)	12,3 (14,1)
	B12	13	140,6 (0,4)	192,4 (1,1)	289,4 (0,5)	407,1 (0,9)	204,3 (0,8)	14,8 (19,1)
	B15	13	139,4 (0,6)	188,5 (0,5)	287,1 (0,6)	400,2 (1,1)	214,4 (1,4)	16,7 (15,1)

C.V. = coeficiente de variação; * AAI em g/193.55cm²/min.

Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.2 – Resistência à compressão dos blocos dos Lotes 1 e 2.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO								
Classe de Bloco	Nº de Exemplares	Área Bruta			Área Líquida			
		f_b (MPa)	f_{bk} (MPa)	C.V. (%)	f_b (MPa)	f_{bk} (MPa)	C.V. (%)	
LOTE 1	B6	13	11,0	9,2	11,3	27,0	22,6	13,1
	B12	13	14,8	10,2	15,0	30,3	23,2	11,8
	B15	13	16,1	12,9	14,0	32,7	24,9	11,3
LOTE 2	B6	13	10,5	8,5	13,8	26,8	19,5	14,7
	B12	13	14,1	11,2	17,0	29,0	22,5	10,0
	B15	13	16,7	13,6	15,3	32,8	23,6	15,5

Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.3 – Resistência à tração indireta dos blocos dos Lotes 1 e 2.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO						
Classe de Bloco	Nº de Exemplares	Área Bruta		Área Líquida		
		f_{bT} (MPa)	C.V. (%)	f_{bT} (MPa)	C.V. (%)	
LOTE 1	B6	6	0,46	13,2	0,56	13,2
	B12	6	0,46	13,5	1,21	12,2
	B15	6	0,68	10,7	1,43	10,9
LOTE 2	B6	6	0,48	16,00	0,59	15,94
	B12	6	0,49	15,35	1,32	14,52
	B15	6	0,71	8,36	1,47	8,10

Fonte: Autor (2015).

Inicialmente realizou-se uma análise de variância (ANOVA), para a verificação se há diferença estatisticamente significativa entre os valores de propriedades mecânicas dos blocos dos Lotes 1 e 2. A análise de variância é um teste de distribuição F, que determina se as médias de duas ou mais populações podem ser consideradas estatisticamente iguais, analisando suas variâncias. A análise mostrou que, tanto para os resultados de resistência à compressão como para os de tração indireta, não há diferença significativa para um nível de confiança de 95%, conforme Tabela 4.4. Deste modo, seguiu-se com as etapas seguintes de moldagens e caracterização mecânica dos prismas.

Entretanto, constata-se que a resistência característica à compressão (f_{bk}) para as amostras coletadas para cada uma das três classes de blocos cerâmicos, resulta em valores menores que os nominais declarados pela indústria cerâmica fornecedora, exceto para a classe B6. Os blocos das classes B12 e B15 apresentam, respectivamente, valores de resistência característica à compressão em média 14% abaixo do declarado.

Tabela 4.4 - Análise de variância para a resistência à compressão dos blocos dos Lotes 1 e 2 .

Blocos	Lotes Comparados	F (calculado)	F α (crítico)	Resultado
B6	Lote 1 e Lote 2	1,03	2,064	F < F α (Não Há Diferença)
B12	Lote 1 e Lote 2	0,748	2,064	F < F α (Não Há Diferença)
B15	Lote 1 e Lote 2	0,586	2,064	F < F α (Não Há Diferença)

Fonte: Autor (2015).

A resistência média à tração obtida para os blocos ficaram entre 3% a 4,2% da resistência à compressão. Esses baixos resultados eram esperados, em virtude das características do material e processo de fabricação para blocos cerâmicos.

Quanto à caracterização física, os resultados obtidos para os dois lotes de blocos apresentam-se na Tabela 4.1. Observa-se que as dimensões reais dos blocos (largura, altura e comprimento) estão em conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 15270-2 (2005), ou seja, dentro da variação de $\pm 3,0$ mm para as médias das dimensões efetivas. Os valores do AAI verificados para os blocos encontram-se abaixo do valor de 30 g/193,55cm² x min, que de acordo com a ABNT NBR 15270-3 (2005) não implica no prévio umedecimento dos blocos antes da moldagem dos prismas. Entretanto, conforme descrito no item 3.6 do programa experimental, todos os blocos foram umedecidos antes da moldagem para o aumento do desempenho dos prismas.

Na Tabela 4.5 encontram-se os valores de resistência à compressão (f_b), módulo de elasticidade (E_b) e coeficiente de Poisson (ν_b) do material dos blocos, para cada uma das três classes de blocos. Conforme descrito no item 3.3 do programa experimental, foram extraídos corpos-de-prova prismáticos com dimensões de (20x40) mm e espessura variável, de acordo com suas respectivas geometrias.

Tabela 4.5 – Característica mecânicas dos blocos para corpos-de-prova prismáticos (20x40) mm.

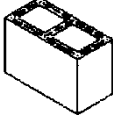


Bloco	Nº de Exemplos	Espessura (mm)	C.V. (%)	f_b (MPa)	C.V. (%)	E_b (MPa)	C.V. (%)	v_b	C.V. (%)
B6	3	7,7	0,8	32,8	14,2	8243,9	8,1	0,05	12,5
B12	3	10,5	6,3	50,7	8,2	11864,4	8,7	0,09	8,9
B15	3	8,1	5,4	34,9	11,5	8111,1	6,4	0,05	8,8

Fonte: Autor (2015).

Conforme a Tabela 4.2 e Tabela 4.5, os valores médios obtidos de resistência à compressão para os corpos-de-prova prismáticos dos blocos B6, B12 e B15 em comparação com os valores de f_b dos blocos, na área líquida, apresentaram um aumento de 21,5%, 67,3% e 6,7% respectivamente. Sendo que o resultado encontrado para o bloco B12 apresentou a maior diferença em relação aos demais resultados. Esses aumentos explicam-se pela diferença existente entre as geometrias dos blocos e dos corpos-de-prova prismáticos, onde os resultados encontrados para estes últimos podem ter sido afetados pelo confinamento gerado pelos contatos da prensa. Além da geometria, a porosidade da massa, processo e temperatura de queima e grau de vitrificação dos blocos interferem diretamente nas propriedades do material, o que também pode explicar as diferenças entre os resultados de resistência encontrados para os três tipos de blocos. Isto explicaria também a grande diferença no valor de módulo de elasticidade encontrado para o material do bloco B12, em relação aos blocos B6 e B15, mesmo este último apresentando o maior valor de f_b .

Ainda em relação aos valores de módulo de elasticidade, estes ficaram abaixo do esperado. Entretanto correspondem a valores intermediários, quando comparados aos valores de módulo de elasticidade dos blocos, na área líquida, para os trabalhos realizados por CESAR (2007) e SANTOS (2008), conforme Tabela 4.6. Em ambas as pesquisas utilizaram-se blocos cerâmicos com (14x19x29) cm de dimensão. Para o cálculo do módulo de elasticidade, utilizou-se o bloco inteiro, cuja aquisição dos dados de deformação foi realizada com strain gauges (CESAR, 2007) e transdutores de deslocamento (SANTOS, 2008).

Tabela 4.6 – Característica mecânicas dos blocos cerâmicos utilizados por Cesar (2007) e Santos (2008).

Fonte	Geometria	Área Bruta				Área Líquida			
		f_b (MPa)	C.V (%)	E_b (GPa)	C.V (%)	$f_{b\text{ líq}}$ (MPa)	C.V (%)	$E_{b\text{ líq}}$ (GPa)	C.V (%)
Cesar (2007)		8,3	13,7	1,9	24,0	20,8	13,7	4,7	24,0
Santos (2008)		11,7	9,9	4,1	15,7	28,5	9,9	10,4	15,7
		15,1	12,1	6,1	25,9	30,8	12,1	12,4	25,4

Fonte: Autor (2015).

Para Cesar (2007), o resultado encontrado para o módulo de elasticidade do bloco se mostrou relativamente baixo e disperso com coeficiente de variação em torno de 24%, o que segundo a autora, é comum em se tratando de materiais cerâmicos. A natureza frágil dos materiais cerâmicos, que é em consequência dos defeitos e imperfeições inerentes à estrutura do material ou gerado pelo processo de fabricação, tem a tendência em ser distribuídos aleatoriamente tanto em orientação quanto em tamanho, e por consequência as resistências à fratura exibirão uma grande variabilidade (GLEIZE, 2003 apud CESAR, 2007).

O mesmo observa-se para os valores obtidos na pesquisa realizada por Santos (2008), que apresentaram coeficientes de variação entre 15,7% e 25,4%. Entretanto, os valores de módulo de elasticidade do bloco, na área líquida, foram maiores quando comparados com os valores encontrados para os corpos-de-prova prismáticos da Tabela 4.5.

Ainda, verificando a relevância dos dados levantados pelos autores, os valores de módulo de elasticidade do bloco obtidos por Cesar (2007), na área líquida, foram utilizados no trabalho desenvolvido por Manzano (2013). O autor estudou o comportamento de um modelo de

conexão vertical concebido para atuar em conjunto com os painéis estruturais cerâmicos pré-fabricados, utilizando análise numérica com elementos finitos. Para esta análise, Manzano (2013) utilizou os dados experimentais obtidos Cesar (2007), para calibrar o modelo utilizado em sua pesquisa.

Os valores de Coeficiente de Poisson obtidos para o material dos blocos, também ficou abaixo do esperado, tomando-se por base o valor de 0,15 para alvenaria de blocos cerâmicos, conforme indicado pela norma ABNT NBR 15812-1 (2010). Cesar (2007) e Manzano (2013) adotaram em seus trabalhos, respectivamente, os valores de 0,20 e 0,15 para o Coeficiente de Poisson, valores estes próximos ao indicado pela norma ABNT NBR 15812-1, entretanto estes valores se referem a alvenaria e não ao material dos blocos.

Assim, os valores de caracterização mecânica dos blocos adotados para este trabalho, são os obtidos com os blocos do Lote 1, mostrados na Tabela 4.2 e Tabela 4.3. Somente na análise numérica, serão utilizados os valores de Módulo de Elasticidade encontrados nos ensaios com os corpos-de-prova prismáticos (20x40) mm, mostrados na Tabela 4.5.

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS ARGAMASSAS

A Tabela 4.7 e Tabela 4.8 apresentam os valores de caracterização mecânica das argamassas utilizadas no programa experimental, para os corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos.

Conforme a Tabela 4.7 e Tabela 4.8, para as mesmas classes de argamassas, observa-se que os valores de resistências média à compressão obtidos para cada geometria de corpo-de-prova não apresentam grande diferença. Em uma análise de variância (ANOVA), os valores de resistência média à compressão encontrados para as duas geometrias de corpo-de-prova de cada classe de argamassa, com um nível de confiança de 95%, não apresentam diferença significativa, conforme Tabela 4.9. De um modo geral os corpos-de-prova ($\phi 5 \times 10$) cm tiveram um acréscimo médio de aproximadamente 10% nos valores de resistência, quando comparados aos corpos-de-prova prismáticos de (4x4x16) cm. Isto se deve ao fato, que os ensaios de caracterização dos corpos-de-prova ocorreram com tempos de cura e equipamento diferentes, em virtude da complexidade na preparação corpos-de-prova ($\phi 5 \times 10$)cm utilizados nos ensaios de módulo de elasticidade.

Tabela 4.7 – Característica mecânicas das argamassas para corpos-de-prova prismático (4x4x16) cm.

Argamassa	Nº de Exemplares	f_{arg} (MPa)	f_{argk} (MPa)	C.V. (%)	f_{argT} (MPa)	C.V. (%)
A	12	12,7	10,7	9,2	3,9	13,1
B	12	6,4	5,6	7,7	2,1	9,7
C	12	3,1	2,6	9,6	1,3	7,6
10	12	9,5	7,3	13,9	3,7	7,7
M	12	6,8	6,1	5,9	2,9	11,3
5	12	4,8	4,0	10,2	1,2	13,5

Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.8 – Característica mecânicas das argamassas para corpos-de-prova (ϕ 5X10) cm.

Argamassa	Nº de Exemplares	f_{arg} (MPa)	f_{argk} (MPa)	C.V. (%)	E_{arg} (MPa)	C.V. (%)	v_{arg}	C.V. (%)
A	3	14,4	11,4	13,0	12554,2	11,2	0,17	13,0
B	3	6,7	6,0	6,4	7120,1	11,0	0,14	13,0
C	3	2,7	2,1	13,5	2529,6	13,0	0,14	11,2
10	3	10,9	8,8	11,4	12299,3	6,4	0,13	15,1
M	3	7,4	6,0	11,7	8717,1	6,3	0,21	13,0
5	3	5,5	4,3	13,1	7890,8	7,9	0,13	9,8

Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.9 - Análise de variância para a resistência à compressão para as duas geometrias de corpos-de-prova .

Argamassa	F (calculado)	$F\alpha$ (crítico)	Resultado
A	2,14	2,16	$F > F\alpha$ (Não Há Diferença)
B	0,99	2,16	$F > F\alpha$ (Não Há Diferença)
C	2,13	2,16	$F > F\alpha$ (Não Há Diferença)
10	1,66	2,16	$F > F\alpha$ (Não Há Diferença)
M	1,23	4,30	$F > F\alpha$ (Não Há Diferença)
5	2,08	2,16	$F > F\alpha$ (Não Há Diferença)

Fonte: Autor (2015).

Observa-se que os valores de resistência média à compressão das seis classes de argamassas (mistas e industrializadas) encontram-se abaixo de 70 a 100% da resistência dos blocos, indicados por pesquisadores como Mohamad (1998) e Ramalho e Corrêa (2003) para argamassas mistas, exceto o valor de f_{arg} da argamassa da classe A se comparado ao valor de f_b do bloco do tipo B6. Entretanto, essa faixa de utilização indicada pelos pesquisadores refere-se a argamassas de assentamento mistas, ou seja, argamassas de cimento, cal e areia.

Para as argamassas mistas, os valores de resistência média à compressão encontram-se abaixo dos indicados pela norma BS 5628-1 (1992), para as classes (i), (ii) e (iii). Estes resultados justificam-se por causa das propriedades dos materiais constituintes das argamassas e, como consequência, as relações água/cimento ($F_{a/c}$) necessária para atingir a trabalhabilidade adequada para o assentamento dos blocos, que resultariam nestes valores de resistências abaixo do indicado pela norma.

Para as argamassas industrializadas, visando atingir a consistência e trabalhabilidade adequada para o trabalho, utilizou-se na mistura um percentual de água abaixo do indicado pelo fabricante. Mesmo utilizando uma reação água/argamassa anidra ($F_{a/arg}$) abaixo do indicado, os valores encontrados de resistência média à compressão para as argamassas foram menores do que o esperado para as argamassas de assentamento estrutural de 5 e 10 MPa. Isto pode ser explicado pelo teor de ar incorporado das argamassas, que pode ter aumentado em consequência dos aditivos em sua composição e o equipamento utilizado na mistura durante a moldagem dos prismas, que foi diferente do equipamento utilizado na determinação dos teores de ar incorporado das argamassas, aumentando assim sua porosidade e consequentemente diminuindo sua resistência.

Assim, os valores de resistência mecânica das argamassas adotados para este trabalho, são os mostrados na Tabela 4.7, obtidos para os corpos-de-prova prismáticos, de acordo com a norma ABNT NBR 13281 (2005). Entretanto, para os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, serão utilizados os valores obtidos nos ensaios com os corpos-de-prova cilíndricos, apresentados na Tabela 4.8.

4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS GRAUTES

A Tabela 4.10 e a Tabela 4.11 apresentam os valores de caracterização mecânica dos grautes utilizados no programa experimental.

Observa-se na Tabela 4.10 e Tabela 4.11, para cada traço de grautes, que os valores de resistência média à compressão obtidos para cada tipo de corpo-de-prova não apresentam grande diferença. Adotando o mesmo procedimento utilizado com as argamassas, ou seja, fazendo uma análise de variância (ANOVA), os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para cada traço de graute nos ensaios com transdutores de deslocamento e strain gauges, com um nível de confiança de 95%, não apresentam diferença significativa, conforme Tabela 4.12.

Tabela 4.10 – Características mecânicas dos grautes para corpos-de-prova ($\phi 10 \times 20$) cm, utilizando transdutores de deslocamento.

Graute	Nº de Exemplos	f_g (MPa)	f_{gk} (MPa)	C.V. (%)	Nº de Exemplos	E_g (MPa)	C.V. (%)
G1	12	40,3	36,7	5,5	6	47490,2	9,6
G2	12	24,4	20,2	10,3	6	30657,8	10,3
G3	12	14,3	11,7	10,9	6	22375,9	5,3

Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.11 – Características mecânicas dos grautes para corpos-de-prova ($\phi 10 \times 20$) cm, utilizando strain gauge.

Graute	Nº de Exemplos	f_g (MPa)	f_{gk} (MPa)	C.V. (%)	Nº de Exemplos	E_g (MPa)	C.V. (%)	v_g	C.V. (%)
G1	3	44,2	34,7	13,0	3	52229,6	12,5	0,17	12,5
G2	3	28,1	22,1	12,9	3	33403,7	2,1	0,27	7,7
G3	3	16,2	13,2	13,2	3	28459,1	14,3	0,23	9,5

Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.12 - Análise de variância para a resistência à compressão para as duas geometrias de corpos-de-prova .

Graute	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
G1	1,99	2,16	F > F α (Não Há Diferença)
G2	2,14	2,16	F > F α (Não Há Diferença)
G3	1,92	2,16	F > F α (Não Há Diferença)

Fonte: Autor (2015).

De um modo geral os ensaios realizados com strain gauges tiveram um acréscimo médio de aproximadamente 20% nos valores de resistência, quando comparados aos valores obtidos com os ensaios realizados com transdutores de deslocamento. Isto se deve ao fato, que os ensaios de caracterização dos corpos-de-prova ocorreram com tempos de cura e teores de umidades diferentes, em virtude da complexidade na preparação corpos-de-prova utilizados nos ensaios com strain gauges. Para os ensaios com transdutores de deslocamento utilizaram-se os corpos-de-prova úmidos, conforme ABNT NBR 8522. Para os corpos-de-prova com strain gauges os ensaios foram realizados 7 dias após a cura de 28 dias em câmara úmida, pois a fixação dos strain gauges e a realização ensaio somente eram possíveis com os corpos-de-prova secos.

Os valores de Coeficiente de Poisson obtidos nos ensaio com transdutores de deslocamento foram descartados, em virtude dos elevados valores obtidos. Como apontado no programa experimental, nos ensaios com transdutores de deslocamento, em virtude da dificuldade de realização do ensaio e desgaste do equipamento, a leitura obtida no deslocamento diametral foi maior que a deformação observada no corpo-de-prova durante o ensaio, gerando valores elevados de Poisson para os três traços de grautes.

Todavia, os valores encontrados nos ensaios com strain gauges encontram-se próximos ao valor indicado pela norma ABNT NBR 6118 (2007) para concreto no caso da ausência de dados experimentais, ou seja, 0,20.

Assim, os valores de caracterização mecânica dos grautes adotados para este trabalho, são os mostrados na Tabela 4.10, obtidos nos ensaios com transdutores de deslocamento. Entretanto, para os valores de coeficiente de Poisson, serão utilizados os valores obtidos nos ensaios com strain gauge, conforme Tabela 4.11.

4.4. RESUMO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPONENTES

Neste item apresentam-se os valores de caracterização mecânica dos blocos, grautes e argamassas utilizadas na confecção dos prismas. Estes valores são utilizados como referência para análise dos resultados experimentais e na análise numérica.

Na Tabela 4.13 à Tabela 4.15 apresenta-se o resumo dos valores das propriedades mecânicas obtidos para os blocos B6, B12 e B15. Na Figura 4.1 apresentam-se os diagramas tensão versus deformação para cada classe de bloco utilizado no programa experimental.

Tabela 4.13 – Valores de resistência à compressão dos blocos.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO							
Classe de Bloco	Nº de Exemplos	Área Bruta			Área Líquida		
		f_b (MPa)	f_{bk} (MPa)	C.V. (%)	f_b (MPa)	f_{bk} (MPa)	C.V. (%)
B6	13	11,0	9,2	11,3	27,0	22,6	13,1
B12	13	14,8	10,2	15,0	30,3	23,2	11,8
B15	13	16,1	12,9	14,0	32,7	24,9	11,3

Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.14 – Valores de resistência à tração dos blocos.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO					
Classe de Bloco	Nº de Exemplos	Área Bruta		Área Líquida	
		f_{bT} (MPa)	C.V. (%)	f_{bT} (MPa)	C.V. (%)
B6	6	0,46	13,2	0,56	13,2
B12	6	0,46	13,5	1,21	12,2
B15	6	0,68	10,7	1,43	10,9

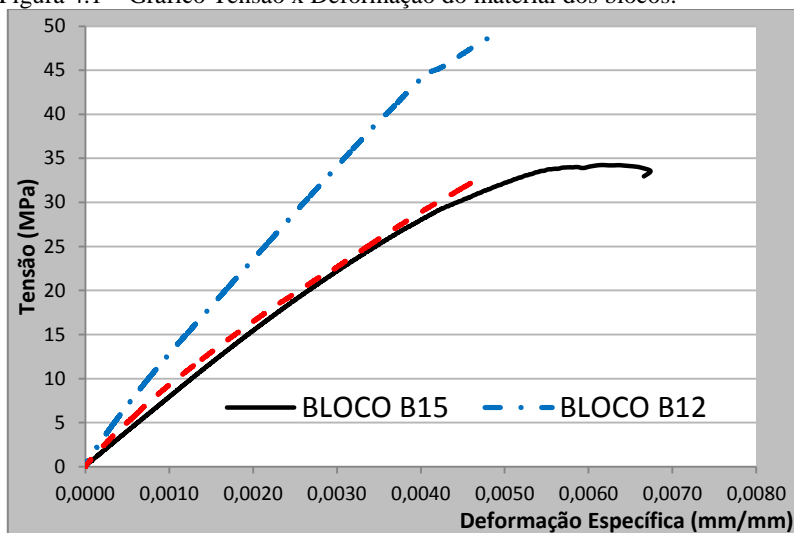
Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.15 – Valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos blocos.

Classe de Bloco	Nº de Exemplares	E_b (MPa)	C.V. (%)	ν_b	C.V. (%)
B6	3	8243,9	8,1	0,05	12,5
B12	3	11864,4	8,7	0,09	8,9
B15	3	8111,1	6,4	0,05	8,8

Fonte: Autor (2015).

Figura 4.1 – Gráfico Tensão x Deformação do material dos blocos.



Fonte: Autor (2015).

Com os valores de expostos na Tabela 4.13, fazendo uma análise de variância (ANOVA) para os valores de resistência à compressão, na área bruta e líquida, obtidos para as três classes de bloco, com um nível de confiança de 95%, constata-se que os blocos B12 e B15 não apresentam diferença significativa estes valores, sendo que estes valores diferem significativamente do valor de resistência à compressão encontrado para o bloco B6. Analisando os valores da Tabela 4.14, também se constatou para os valores de resistência à tração na área líquida, para as três classes de bloco, que não há diferença significativa. Entretanto, para os blocos B6 e B12, os valores de resistência à tração na área bruta, não apresentam diferença significativa.

Quanto aos valores de módulo de elasticidade, analisando a Tabela 4.15 e a Figura 4.1, observa-se que os blocos B15 e B6 não apresentam grande diferença entre estes valores, além de apresentarem comportamento similar na deformação.

Fazendo uma análise de variância (ANOVA) com os valores de expostos na Tabela 4.12, com um nível de confiança de 95%, constata-se que os valores de módulo de elasticidade obtidos para os blocos B6 e B15 não apresentam diferença significativa, sendo que estes valores diferem significativamente do valor de módulo obtido para o bloco B12.

Mesmo sem diferença significativa entre os valores de módulo de elasticidade, os blocos B6 e B15 apresentam valores distintos de resistências à compressão e tração. Isto ocorre em consequência das diferenças apresentadas em suas geometrias. O mesmo acontece com os valores de resistência à compressão dos blocos B12 e B15, que não apresentam diferença significativa, porém estas duas classes de blocos apresentam valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade distintos. Este comportamento evidencia a influência da geometria nos valores de resistência dos blocos, conforme já constatado por outros pesquisadores.

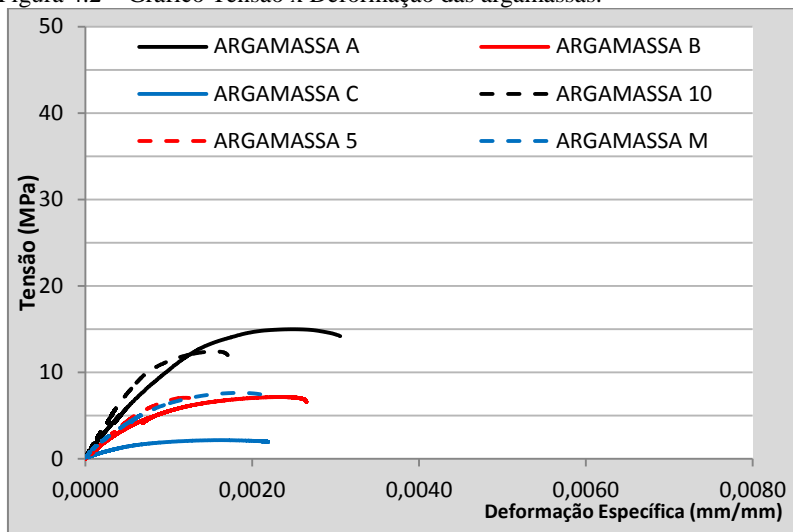
Para as argamassas, na Tabela 4.16 apresenta-se o resumo dos valores das propriedades mecânicas obtidos para as seis classes de argamassas. Na Figura 4.2 apresentam-se os diagramas tensão versus deformação para cada classe de argamassa utilizada no programa experimental.

Tabela 4.16 – Resumo das propriedades mecânicas das argamassas.

Arg.	Nº de Exemplos	f_{arg} (MPa)	f_{argk} (MPa)	C.V. (%)	f_{argT} (MPa)	C.V. (%)	E_{arg} (MPa)	C.V. (%)	v_{arg}	C.V. (%)
A	12	12,7	10,7	9,2	3,9	13,1	12554,2	11,2	0,17	13,0
B	12	6,4	5,6	7,7	2,1	9,7	7120,1	11,0	0,14	13,0
C	12	3,1	2,6	9,6	1,3	7,6	2529,6	13,0	0,14	11,2
10	12	9,5	7,3	13,9	3,7	7,7	12299,3	6,4	0,13	15,1
M	12	6,8	6,1	5,9	2,9	11,3	8717,1	6,3	0,21	13,0
5	12	4,8	4,0	10,2	1,2	13,5	7890,8	7,9	0,13	9,8

Fonte: Autor (2015).

Figura 4.2 – Gráfico Tensão x Deformação das argamassas.



Fonte: Autor (2015).

Analisando a Tabela 4.16 observa-se que as argamassas das classes B, 5 e M não apresentam grande diferença entre seus valores de módulo de elasticidade e apresentam comportamento similar na deformação (Figura 4.2). As argamassas das classes A e 10 também não apresentam grandes diferenças entre seus valores de resistência e módulo de elasticidade, bem como seu comportamento na deformação (Figura 4.2). Somente a argamassa C apresenta valores distintos de resistência e módulo, bem como comportamento distinto na deformação em relação às demais classes de argamassa (Figura 4.2).

Fazendo uma análise de variância (ANOVA) com os valores expostos na Tabela 4.16, com um nível de confiança de 95%, verifica-se que as argamassas B, 5 e M apresentam diferença significativa entre seus valores de resistência à compressão. Entretanto, como se observa na Figura 4.2, constata-se que estas classes de argamassas não apresentaram diferenças significativas entre seus valores de módulo de elasticidade, ou seja, encontram-se dentro de um mesmo grupo de valores de módulo de elasticidade.

Para as argamassas das classes A e 10, com um nível de confiança de 95%, verifica-se que os seus valores de resistência à compressão apresentam diferenças significativas. Entretanto, os valores de módulo de elasticidade encontrado para estas duas classes de

argamassas não apresentam diferença significativa. Este comportamento, provavelmente, está relacionado com o traço e aditivos utilizados para a fabricação da argamassa industrializada do tipo 10, não revelados pelo fabricante.

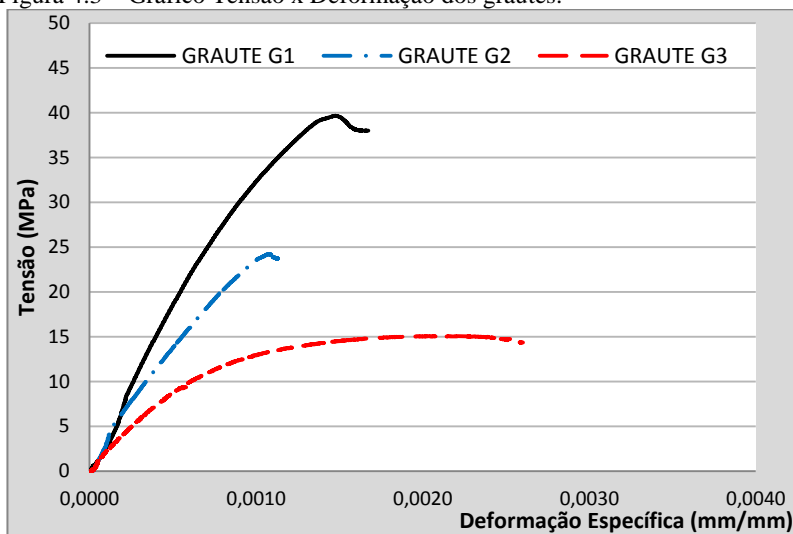
Para os grautes, na Tabela 4.17 apresenta-se o resumo dos valores das propriedades mecânicas obtidos para os três traços de grautes. Na Figura 4.3 apresentam-se os diagramas tensão versus deformação para cada traço de graute utilizado no programa experimental.

Tabela 4.17 – Resumo das propriedades mecânicas dos grautes.

Graute	Nº de Exemp- plares	fg (MPa)	fgk (MPa)	C.V. (%)	Nº de Exem- plares	Eg (MPa)	C.V. (%)	v _g	C.V. (%)
G1	12	40,3	36,7	5,5	6	47490,2	9,6	0,17	12,5
G2	12	24,4	20,2	10,3	6	30657,8	10,3	0,27	7,7
G3	12	14,3	11,7	10,9	6	22375,9	5,3	0,23	9,5

Fonte: Autor (2015).

Figura 4.3 – Gráfico Tensão x Deformação dos grautes.



Fonte: Autor (2015).

Analisando os valores expostos na Tabela 4.17, observa-se que os três traços de grautes apresentam diferentes valores em suas propriedades mecânicas, além de comportamento distinto na deformação (Figura 4.3). Em uma análise de variância (ANOVA), com um nível de confiança de 95%, constata-se que realmente existe diferença significativa entre os valores de resistência e módulo de elasticidade dos grautes. Estas diferenças entre os valores das propriedades mecânicas dos três traços de grautes eram esperadas, tendo em vista que os traços foram dosados com este objetivo.

4.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PRISMAS

Nesta parte do trabalho apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica realizados com os prismas, divididos nas três etapas definidas no programa experimental.

4.5.1. Resultados dos ensaios da Etapa Referência

Esta etapa teve como objetivo investigar e comparar os resultados obtidos para os prismas sob compressão uniaxial, preenchidos com graute e com a argamassa de assentamento.

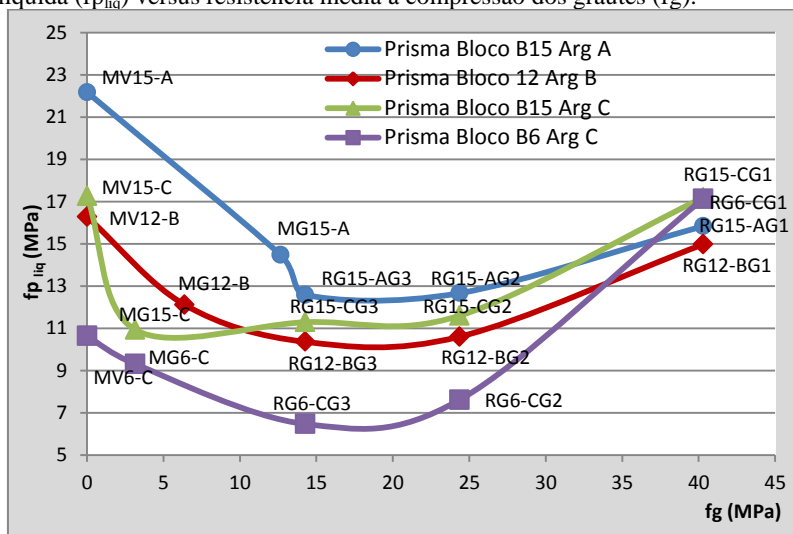
Na Tabela 4.18 apresentam-se os valores da caracterização mecânica obtidos para os prismas na Etapa Referência. Para a comparação, foram utilizados também os resultados obtidos para os prismas vazios e preenchidos com a própria argamassa da Etapa Argamassa Mista, moldados com os respectivos blocos e argamassas de assentamento utilizado em cada uma das quatro séries da Etapa de Referência. A partir destes resultados, construiu-se o gráfico da resistência média à compressão dos prismas ($f_{p_{liq}}$), na área líquida, versus resistência média à compressão dos grautes (f_g), conforme Figura 4.4, a fim de facilitar a identificação de tendências de comportamento para cada uma das séries de prismas.

Tabela 4.18 – Característica mecânicas dos prismas da Etapa Referência.

Prismas		Nº de Exemplares = 5					Nº de Exemplares = 2			Eficiência (η) – Área Bruta
		F _p (kN)	C.V. (%)	f _p (MPa)	f _{p liq} (MPa)	C.V. (%)	E _p (GPa)	E _{p Liq} (GPa)	C.V. (%)	
Bloco B15	RG15-AG1	550,3	11,9	13,6	15,8	12,2	36,5	41,4	14,4	0,85
	RG15-AG2	439,7	10,9	10,9	12,7	11,3	19,5	25,2	1,6	0,68
	RG15-AG3	437,3	5,0	10,8	12,6	5,4	15,0	14,5	7,0	0,67
	MG15-A	503,0	6,9	12,5	14,5	6,1	7,0	8,1	4,7	0,80
	MV15-A	482,9	15,0	12,0	22,2	15,3	6,3	11,7	5,1	0,74
Bloco B15	RG15-CG1	567,2	6,4	14,1	17,2	6,8	20,8	25,4	2,5	0,88
	RG15-CG2	381,7	6,6	9,6	11,6	7,2	19,8	24,0	5,7	0,59
	RG15-CG3	372,8	11,6	9,3	11,3	11,5	12,4	15,2	14,3	0,58
	MG15-C	382,3	6,9	9,3	10,9	10,0	4,1	7,6	8,2	0,58
	MV15-C	375,3	9,7	9,3	17,3	10,0	4,1	7,7	8,2	0,58
Bloco B12	RG12-BG1	477,0	11,9	11,8	15,0	12,1	19,4	24,8	9,0	0,80
	RG12-BG2	337,6	9,2	8,4	10,6	9,0	16,7	21,5	10,1	0,57
	RG12-BG3	329,9	10,0	8,2	10,4	9,8	13,0	16,9	2,6	0,55
	MG12-B	389,2	13,0	9,5	12,1	14,3	7,4	9,5	6,7	0,64
	MV12-B	333,6	11,1	8,1	16,3	11,8	5,6	11,5	8,1	0,55
Bloco B6	RG6-CG1	689,5	11,0	17,1	24,3	10,9	20,9	29,4	7,5	1,55
	RG6-CG2	216,6	9,6	5,3	7,6	9,1	10,7	16,6	11,8	0,48
	RG6-CG3	184,0	10,1	4,5	6,5	10,0	7,8	12,8	9,0	0,41
	MG6-C	262,2	7,7	6,6	9,3	7,7	2,8	3,9	7,3	0,60
	MV6-C	164,1	9,5	4,1	10,6	10,2	2,0	4,9	11,4	0,38

Fonte: Autor (2015).

Figura 4.4 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida ($f_{p_{liq}}$) versus resistência média à compressão dos grautes (f_g).



Fonte: Autor (2015).

Analisando a Tabela 4.18 e o gráfico da Figura 4.4, observa-se que quando preenchidos com a argamassa de assentamento, os prismas apresentam um pequeno aumento em suas resistências à compressão, em comparação aos prismas grauteados com os grautes G2 e G3, exceto para os prismas da série MG15-C, moldado com a argamassa da classe C. Isto se deve ao fato que a argamassa da classe C, com o menor valor de resistência à compressão, apresenta resistência abaixo do recomendado para o grauteamento de paredes de alvenaria. Ainda, os prismas preenchidos com os grautes G2 e G3, aparentemente, não apresentam diferença entre seus valores de resistência à compressão, exceto para os prismas moldados com os blocos B6. Os prismas grauteados que apresentam os maiores valores de resistência, com o aumento da resistência do grautes, são aqueles moldados com as argamassas de menor valor de resistência à compressão, neste caso a argamassa da classe C. Este comportamento condiz com os trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores, na qual o aumento da resistência da argamassa contribui pouco para o aumento da resistência dos prismas quando grauteados (Garcia, 2000; Romagna, 2000; Cunha, 2001; Juste, 2001), evidenciando a hipótese que o enrijecimento da

alvenaria com argamassas mais resistentes pode representar uma solução antieconômica e com pouca influência na resistência final das paredes.

Observa-se também, que os fatores de eficiência para os prismas vazios encontram-se em conformidade com os valores observados por Ramalho e Corrêa (2003) para prismas de blocos cerâmicos, variando entre 0,3 e 0,6; exceto para a série de prismas MV15-A que apresentam fator de eficiência de aproximadamente 0,74.

Para os prismas grauteados, os maiores valores encontrados foram para os prismas das séries RG15-AG1, RG15-CG1, RG12-BG1, RG6-CG1, preenchidos com os grautes da classe G1 de maior rigidez, e os prismas da série MG15-A, preenchido com a argamassa da classe A, também de maior rigidez entre as argamassas utilizadas.

A princípio nota-se que com o aumento da resistência dos grautes aumenta-se a eficiência dos prismas. Entretanto, para algumas séries de prismas (RG15-AG1 e MG15-A), isto não significa que ocorreu um aumento efetivo da carga de ruptura dos mesmos, tendo em vista que os valores de carga de ruptura obtidos para os prismas grauteados encontram-se próximos dos valores obtidos para os prismas vazios, assentados com a mesma classe de argamassa.

4.5.1.1 Análise da influência dos componentes na resistência à compressão dos prismas

Com o propósito de verificar a influência da variação da argamassa, bloco e o efeito conjunto do bloco e argamassa na resistência dos prismas, foi realizadas análises fatoriais de 2 fatores (ANOVA) para as séries de prismas grauteados, moldados com os blocos B15, B6 e argamassas das classes A e C.

Na primeira análise, para os prismas moldados com os blocos B6, B15 e argamassa classe C, os fatores avaliados foram os valores médios de resistência à compressão dos grautes e a resistência à compressão dos blocos (2 fatores). Para o graute utilizou-se 4 níveis de variação, ou seja, utilizou-se os grautes G1 (primeiro nível), G2 (segundo nível), G3 (terceiro nível) e argamassa C (quarto nível). Para os blocos, utilizaram-se os blocos da classe B6 (primeiro nível) e B15 (segundo nível). Todos os níveis de variação possuem valores distintos de resistência à compressão.

Os resultados encontrados com esta análise fatorial para os prismas grauteados, com um nível de confiança de 95%, apresentam-se na Tabela 4.19. Constata-se que a resistência média à compressão do graute, do bloco e a interação entre estes dois fatores, influenciam

significativamente na resistência média à compressão dos prismas, na área líquida. Ainda, o graute foi o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas, seguido da interação entre o bloco e graute, e por último pelo bloco. Este último fator apresenta pequena influência, em comparação aos demais fatores.

Tabela 4.19 – Análise de variância para o grautes e blocos na resistência à compressão dos prismas moldados com a argamassa da classe C.

PRISMAS GRAUTEADOS			
Variável	F (calculado)	F α (crítico)	Resultado
Graute	201,439	2,90	F > F α (Há influência)
Bloco	4,275	4,15	F > F α (Há influência)
Graute x Bloco	47,603	2,90	F > F α (Há influência)

Fonte: Autor (2015).

Na segunda análise, para os prismas moldados somente com os blocos B15 e as argamassas das classes A e C, os fatores avaliados foram os valores médios de resistência à compressão dos grautes e a resistência à compressão das argamassas (2 fatores). Para o graute utilizou-se 5 níveis de variação, ou seja, utilizou-se o grautes G1 (primeiro nível), G2 (segundo nível), G3 (terceiro nível), argamassa A (quarto nível) e argamassa C (quinto nível). Para as argamassas, utilizaram-se argamassas da classe A (primeiro nível) e classe C (segundo nível). Todos os níveis de variação possuem valores distintos de resistência à compressão.

Os resultados encontrados com esta análise fatorial para os prismas grauteados, com um nível de confiança de 95%, apresentam-se na Tabela 4.20. Consta-se que a resistência média à compressão do graute, da argamassa e a interação entre estes dois fatores, influenciam significativamente na resistência média à compressão dos prismas, na área líquida. Ainda, o graute foi o fator com maior influência na resistência dos prismas, seguido da argamassa e por último, da interação entre o graute e argamassa.

Tabela 4.20 – Análise de variância para o grautes e argamassas na resistência à compressão dos prismas moldados com os blocos da classe B15.

PRISMAS GRAUTEADOS			
Variável	F (calculado)	F α (crítico)	Resultado
Graute	33,472	2,90	F > F α (Há influência)
Argamassa	9,348	4,15	F > F α (Há influência)
Graute x Argamassa	7,228	2,90	F > F α (Há influência)

Fonte: Autor (2015).

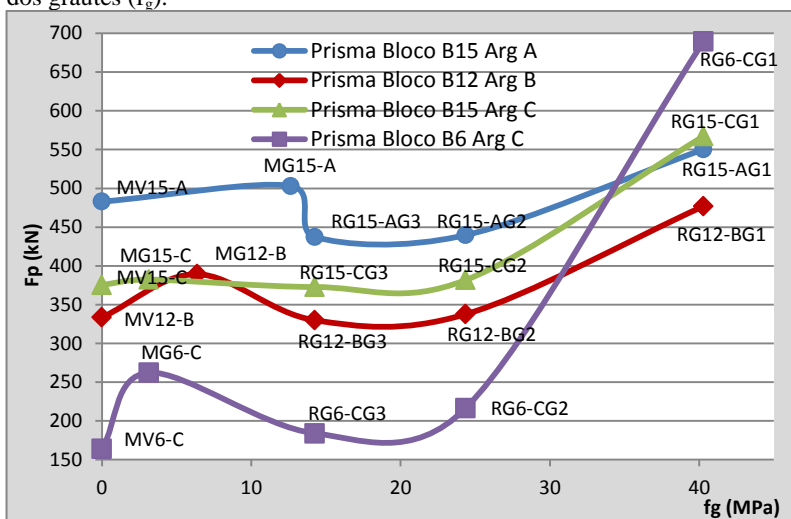
Observa-se que em ambas as análises, tanto o bloco, argamassa, graute e a combinações destes componentes influenciam na resistência dos prismas. Este comportamento já fora constatado em trabalhos realizados por outros pesquisadores. Entretanto, o aumento da resistência da argamassa possui pouca influência no aumento da resistência à compressão dos prismas. Isto é evidenciado quando comparados os valores de resistência dos prismas preenchidos moldados com o bloco B15, preenchidos com a mesma classe de grautes (Tabela 4.18). Enquanto que a argamassa A possui uma resistência cinco vezes maior que a da argamassa C, observa-se que os valores de resistências dos prismas moldados com a argamassa A não aumentaram proporcionalmente seus valores de resistência quando comparados com os prismas moldados com a argamassa C. Conforme Cunha (2001), o aumento de resistência da argamassa não influenciou na resistência de prismas, não grauteados e grauteados, uma vez que grandes aumentos na resistência das argamassas proporcionam acréscimos muito pequenos na resistência à compressão dos prismas de alvenaria, evidenciado aqui com os resultados encontrados para os prismas moldados com o bloco B15 e argamassas A e C. Conforme os resultados expostos na Tabela 4.19 e Tabela 4.20, este aumento na resistência dos prismas está relacionado principalmente ao graute e na interação entre bloco e graute.

4.5.1.2 Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados

Com o objetivo de identificar o aumento efetivo da capacidade de carga dos prismas quando grauteados, o gráfico da Figura 4.5 mostra as cargas de ruptura em função do aumento do preenchimento, para os prismas vazios e grauteados moldados com os grautes G1, G2, G3 e argamassas A, B e C, bem como os prismas preenchidos com suas respectivas argamassas de assentamento (MG6-C, MG12-B, MG15-C e

MG15-A). Conforme se observa na Figura 4.5, o preenchimento dos prismas com a argamassa de assentamento leva a um pequeno aumento na carga de ruptura dos prismas, quando comparados com os prismas vazios (MV6-C, MV12-B, MV15-C e MV15-A). Este aumento é mais evidente com os prismas moldados com os blocos B6 e com a argamassa classe C, de menores valores de f_b e f_{arg} . Conforme prismas moldados com os blocos B15 e argamassas A e C, não se observa aumento acentuado da carga de ruptura com o enrijecimento da argamassa e do grautes. Observa-se a princípio que o enrijecimento da alvenaria, com o aumento da resistência da argamassa, não representa aumento proporcional para a resistência dos prismas grauteados.

Figura 4.5 - Carga de ruptura média (F_p) versus resistência média à compressão dos grautes (f_g).



Fonte: Autor (2015).

Assim, com a intenção de verificar a eficácia da utilização dos grautes para estes prismas, novamente foi realizada uma análise de variância (ANOVA), utilizando os valores de resistência média à compressão dos prismas, na área bruta. Este procedimento teve como objetivo verificar se houve aumento efetivo nos valores de carga de ruptura dos prismas (forças últimas de ruptura dos prismas), com a utilização da argamassa de assentamento (como preenchimento estrutural) e os grautes G1, G2 e G3, quando comparados com os prismas vazios. Também se determinou o Efeito Relativo, ou seja, o

valor percentual de aumento ou não na carga de ruptura dos prismas quando preenchidos.

De acordo com Leão (2008), a comparação entre a resistência de prismas grauteados e não-grauteados levando-se em conta área líquida é feita para áreas diferentes, e eventualmente pode resultar que a resistência do prisma grauteado é inferior a resistência do prisma vazio. Essa consideração não leva em conta o efetivo aumento da carga de ruptura resistida pelos prismas grauteados. O meio técnico nacional trabalha com resistência bruta dos prismas, que faz com que se considere o efetivo aumento de resistência dos prismas com graute.

Neste trabalho, assim como na pesquisa realizada por Mendes (1998) e Leão (2008), a análise estatística de comparação entre a resistência média à compressão de prismas grauteados e não grauteados foi feita com os dados referidos à área bruta dos mesmos, visando verificar o efetivo aumento da carga de ruptura resistida pelos prismas.

Desta forma, com um nível de confiança de 95%, o resultado da análise de múltiplas médias obtida para os valores de resistência média à compressão dos prismas (f_p), na área bruta, bem como o Efeito Relativo, encontra-se na Tabela 4.21.

Analisando os resultados dispostos na Tabela 4.21, somente os prismas RG15-CG1, RG12-BG1, RG6-CG1 e RG6-CG2, preenchidos com os grautes G1 e G2, e os prismas MG6-C, preenchidos com a argamassa classe C, apresentam aumento significativo em suas resistências na área bruta, ou seja, em sua capacidade de carga. Este aumento, em média, nos valores de resistência à compressão (f_p), e consequentemente nas cargas de ruptura, observa-se para os prismas grauteados que apresentam valores de f_p superiores a 29,3%, em comparação aos valores de f_p dos prismas vazios (Efeito relativo > 29,3%). Este aumento significativo nos valores de carga de ruptura está relacionado com as diferenças existentes entre os valores das propriedades mecânicas dos materiais que o constituem (GOMES, 1983; MOHAMAD 1998; MENDES, 1998; CAMACHO E RODRIGUES, 1999; CUNHA, 2001; GROHMANN, 2006; LEÃO, 2008).

De acordo com o objetivo deste trabalho, somente a família de prismas MG6-C, preenchidos com a própria argamassa de assentamento, apresentam aumento significativo em sua capacidade de carga, aumento este de 61,0%. Esse aumento na resistência dos prismas, na área bruta, com a utilização da argamassa assentamento como preenchimento estrutural levanta a hipótese da viabilidade de utilização. Entretanto, as combinações MG15-A, MG15-C e MG12-B não apresentam esse mesmo comportamento.

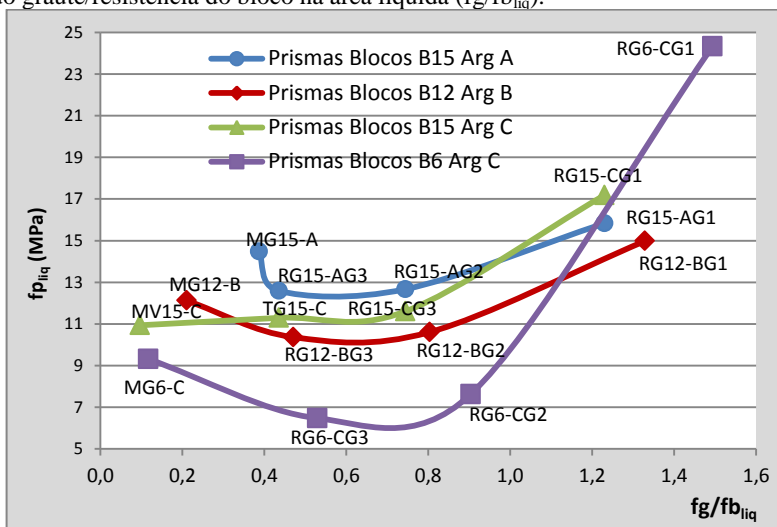
Tabela 4.21 – Aumento efetivo da capacidade de carga dos prismas preenchidos.

Prismas		F (calculado)	F α (crítico)	Conclusão	Efeito Relativo (%)	
Bloco B15	MV15-A	RG15-AG1	1,489	2,306	F < F α (Não há diferença)	+ 13,3
	MV15-A	RG15-AG2	1,081	2,306	F < F α (Não há diferença)	- 9,2
	MV15-A	RG15-AG3	1,326	2,571	F < F α (Não há diferença)	- 10,0
	MV15-A	MG15-A	0,535	2,306	F < F α (Não há diferença)	+ 4,2
Bloco B15	MV15-C	RG15-CG1	9,440	2,306	F > F α (Há diferença)	+ 51,6
	MV15-C	RG15-CG2	0,471	2,306	F < F α (Não há diferença)	+ 3,2
	MV15-C	RG15-CG3	0,065	2,306	F < F α (Não há diferença)	0,0
	MV15-C	MG15-C	0,110	2,306	F < F α (Não há diferença)	0,0
Bloco B12	MV12-B	RG12-BG1	6,343	2,306	F > F α (Há diferença)	+ 45,7
	MV12-B	RG12-BG2	0,529	2,776	F < F α (Não há diferença)	+ 3,7
	MV12-B	RG12-BG3	0,088	2,306	F < F α (Não há diferença)	+ 1,2
	MV12-B	MG12-B	1,852	2,306	F < F α (Não há diferença)	+ 17,3
Bloco B6	MV6-C	RG6-CG1	19,725	2,571	F > F α (Há diferença)	+ 317,1
	MV6-C	RG6-CG2	3,426	2,306	F > F α (Há diferença)	+ 29,3
	MV6-C	RG6-CG3	1,367	2,306	F < F α (Não há diferença)	+ 9,8
	MV6-C	MG6-C	4,512	2,306	F > F α (Há diferença)	+ 61,0

Fonte: Autor (2015).

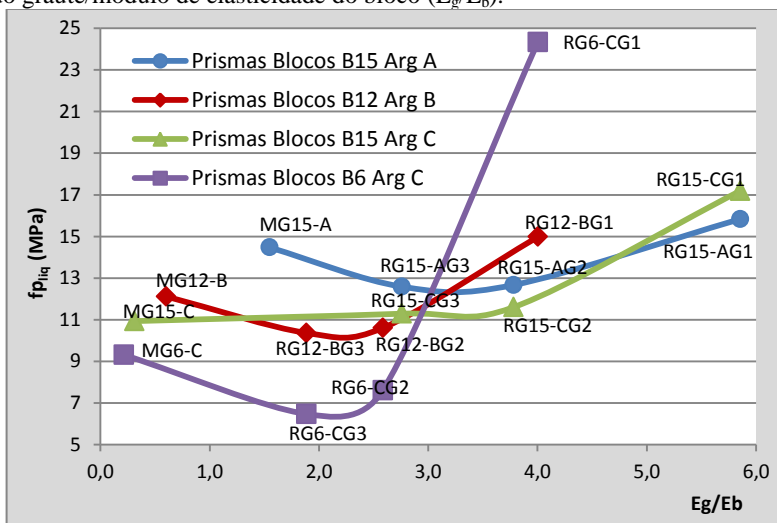
Assim, visando compreender este comportamento, construíram-se gráficos correlacionando as propriedades mecânicas dos materiais constituintes dos prismas. Mais especificamente, traçaram-se gráficos para a resistência média à compressão dos prismas ($f_{p_{liq}}$) versus as relações entre as resistências dos grautes e blocos ($f_g/f_{b_{liq}}$), entre as resistências das argamassas e blocos ($f_{arg}/f_{b_{liq}}$), entre os módulos de elasticidade do graute e bloco (E_g/E_b) e entre os módulos de elasticidade da argamassa e bloco (E_{arg}/E_b), todos na área líquida, conforme Figura 4.6 à Figura 4.9.

Figura 4.6 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida (fp_{liq}) versus relação entre os valores de resistência média à compressão do graute/resistência do bloco na área líquida (fg/fb_{liq}).



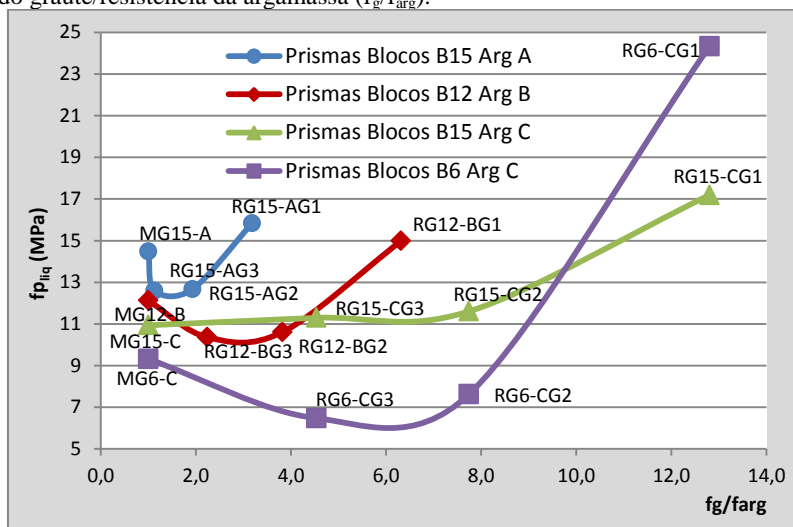
Fonte: Autor (2015).

Figura 4.7 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida (fp_{liq}) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade do graute/módulo de elasticidade do bloco (E_g/E_b).



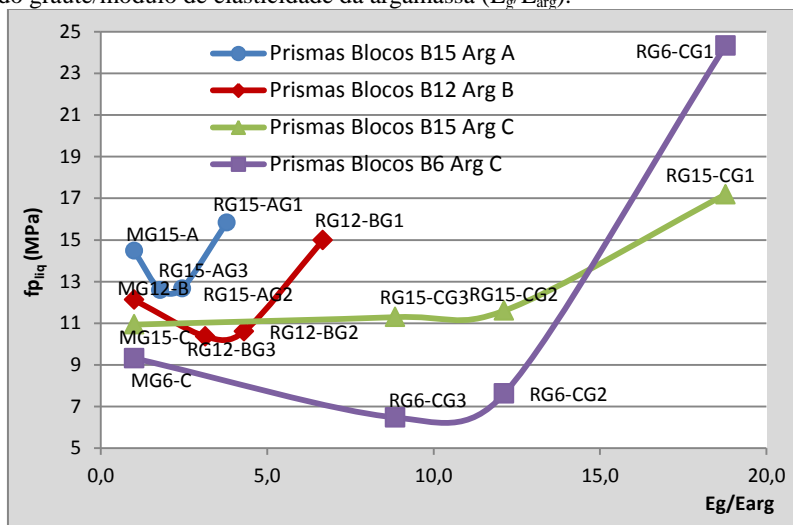
Fonte: Autor (2015).

Figura 4.8 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida ($f_{p_{liq}}$) versus relação entre os valores de resistência média à compressão do graute/resistência da argamassa (f_g/f_{arg}).



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.9 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida ($f_{p_{liq}}$) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade do graute/módulo de elasticidade da argamassa (E_g/E_{arg}).



Fonte: Autor (2015).

Analisando os resultados da Tabela 4.21 e os gráficos da Figura 4.6 à Figura 4.9, observa-se que com o aumento das relações $f_g/f_{b_{liq}}$, E_g/E_b , f_g/f_{arg} e E_g/E_{arg} , os prismas grauteados que apresentam maior desempenho (aumento na carga de ruptura), foram aqueles moldados com argamassa de assentamento com os menores valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, neste caso, os prismas RG15-CG1, RG12-BG1, RG6-CG1 e RG6-CG2, assentados com as argamassas das classes B e C. Esse comportamento fica evidente quando comparados os prismas moldados com os blocos B15, com argamassas das classes A e C, na qual o aumento no valor da resistência à compressão da argamassa não representou aumento significativo proporcional na resistência dos prismas, quando preenchidos com os grautes, ou seja, não ocorreu aumento efetivo em sua carga de ruptura. Em alguns casos, para os prismas RG15-AG2 e RG15-AG3, aparentemente ocorreu um decréscimo no valor da resistência quando preenchidos com os grautes G2 e G3. Entretanto, como se demonstra na Tabela 4.21, não se constata diferença significativa entre os valores de resistência para estas duas séries de prismas, em relação ao prisma vazio da família MV15-A, ou seja, não há aumento efetivo na carga de ruptura.

Este aumento, ou não, efetivo das cargas de ruptura dos prismas pode ser explicado pelas diferenças existentes entre os valores de resistência característica à compressão dos grautes e blocos, na área líquida. Geralmente, recomenda-se que a resistência característica do graute apresente no mínimo o mesmo valor da resistência característica do bloco, em relação à área líquida (RAMALHO e CORRÊA, 2003; PARSEKIAN et al, 2012). Para Dhanasekar (1994), a resistência ideal para o grautes devem ser igual a resistência da alvenaria, na área líquida, comportamento este também evidenciado por Mendes (1998). Ainda, de acordo com Ramalho e Corrêa (2003), o comportamento do prisma pode ser influenciado negativamente em razão das diferentes características elásticas dos materiais que compõem os prismas, o que foi observado para os prismas RG15-AG2 e RG15-AG3. Este comportamento evidencia-se por causa da grande diferença entre os valores de módulos de elasticidade da argamassa de assentamento e do material do bloco para estes prismas, que são da ordem de 54,8%, sendo que o material do bloco apresenta o menor valor de módulo de elasticidade. Os valores de resistência característica à compressão dos grautes G2 e G3 em relação ao f_{bk} do bloco B15, na área líquida, são menores, o que pode ter contribuído para o decréscimo nos valores de resistência dos prismas quando preenchidos com estes grautes.

Comparando-se os valores característicos de resistência dos blocos e grautes, Tabela 4.13 e Tabela 4.17, evidencia-se este comportamento, onde as séries de prismas que apresentam aumento significativo nos valores de carga de ruptura foram aquelas na qual os valores de resistência característicos à compressão dos grautes são próximos ou superiores aos valores de f_{bk} dos blocos que constituem estes prismas, neste caso os prismas das séries RG15-CG1, RG12-BG1, RG6-CG1 e RG6-CG2.

Desta forma evidencia-se que, para determinadas combinações de materiais, o aumento das relações entre as propriedades da argamassa, graute e bloco podem gerar o aumento nas resistências dos prismas, como visualizado anteriormente com os gráficos da Figura 4.6 à Figura 4.9.

Observa-se também que os prismas MG6-C não apresentam as maiores relações $f_g/f_{b_{liq}}$, E_g/E_b , f_g/f_{arg} e E_g/E_{arg} , entretanto apresentam aumento significativo em sua carga de ruptura quando preenchidos com a argamassa de assentamento. Comparando os valores característicos de resistência à compressão do bloco ($f_{bk_{liq}}$) e da argamassa (f_{argk}), utilizados na moldagem dos prismas MG6-C, observa-se a argamassa apresenta valor de resistência em torno de 90,7% menor que o valor de resistência do bloco, o que conforme observado por Ramalho e Corrêa (2003) e Parsekian et al. (2012), esta diferença entre os valores de resistência da argamassa e bloco não é indicada, e como consequência ocasionariam um decréscimo nos valores de carga a ser resistida para a série MG6-C, comportamento este não observado.

Mas de acordo com Mendes (1998), prismas grauteados que apresentam melhor desempenho são aqueles que são preenchidos com grautes com módulos de elasticidade próximos ao módulo de elasticidade da argamassa e dos prismas não grauteados. Comportamento este, também observado por Dhanasekar e Kumar (1994) e Khalifa e Magzoub (1994).

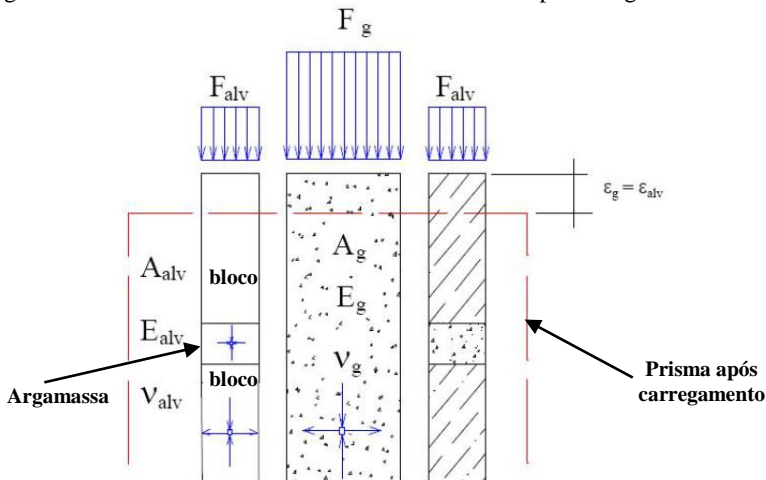
Para Mendes (1998), quanto maior o módulo de elasticidade do grautes, maior será a parcela de carregamento total por ele absorvido. Ainda, segundo o autor, para os grautes que apresentam pouca diferença entre seus coeficientes de Poisson, com o aumento da tensão vertical nos grautes maior será a tensão lateral gerada nestes e consequentemente maior será a possibilidade de ocorrer tensões de tração e cisalhamento no bloco. Contudo, para grautes que apresentam menores módulos de elasticidade, o conjunto de alvenaria (bloco e argamassa), absorve uma parcela maior do carregamento total. Deste modo, com o aumento do carregamento absorvido pelo bloco e, consequentemente, da tensão de

compressão efetiva nos blocos, há a diminuição de tensões laterais e o aumento da resistência ao cisalhamento dos blocos, tendo como consequência, o aumento na resistência à compressão dos prismas.

Desta maneira, visando identificar a parcela de carregamento suportado pelo graute e pelo prisma, foi adotado o mesmo procedimento teórico utilizado por Gomes (1983), Mendes (1998) e Leão (2008), ou seja, igualaram-se as deformações dos materiais do prisma grauteado de acordo com a Lei de Hooke. Como nos trabalhos desenvolvidos anteriormente pelos autores, aqui neste trabalho não se busca determinar valores absolutos, mas sim obter uma possível explicação do comportamento da alvenaria de blocos cerâmicos grauteados. Ressalta-se, que esse procedimento analisa a alvenaria dentro do seu regime elástico, diferente do comportamento que será analisado na análise numérica, ou seja, considerando a não linearidade do material dos componentes dos prismas.

Assim, como nos trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores citados, a Figura 4.10 exemplifica o sistema composto por graute e alvenaria, sendo esta última composta do conjunto bloco e argamassa.

Figura 4.10 – Módulos e áreas utilizados na análise de prismas grauteados.



Fonte: adaptado de Mendes (1998).

Onde, de acordo com a Figura 4.10, tem-se que:

F_g e F_{alv} são, respectivamente, as parcelas de carregamento absorvido pelo graute e pela alvenaria;

A_{alv} , E_{alv} e ν_{alv} são, respectivamente, a área resistente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson da alvenaria;

A_g , E_g e ν_g são, respectivamente, a área resistente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do graute;

ε_g e ε_{alv} são, respectivamente, as deformações específicas do graute e da alvenaria.

Assim, partindo da Equação 4.1 (Lei de Hooke) e igualando-se as deformações dos materiais, obtêm-se as Equações 4.2 e 4.3, que relacionam e fornecem as parcelas do carregamento total absorvidas pelo grautes e pela alvenaria.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A.E} \quad (4.1)$$

Fazendo a soma dos carregamento absorvidas pelo graute e pela alvenaria, igual ao carregamento total F_t , e igualando as deformações específicas do graute (ε_g) e da alvenaria (ε_{alv}) tem-se:

$$\frac{F_{alv}}{A_{alv} \cdot E_{alv}} = \frac{F_g}{A_g \cdot E_g} \quad \text{e} \quad F_t = F_g + F_{alv}$$

Logo, as parcelas de carregamento absorvidos pela alvenaria e pelo grautes são dadas pelas seguintes equações:

$$F_{alv} = \frac{F_t \cdot A_{alv} \cdot E_{alv}}{A_{alv} \cdot E_{alv} + A_g \cdot E_g} \quad (4.2)$$

$$F_g = \frac{F_t \cdot A_g \cdot E_g}{A_{alv} \cdot E_{alv} + A_g \cdot E_g} \quad (4.3)$$

Para o cálculo das parcelas de carregamentos absorvidos, de acordo com o proposto por Mendes (1998) e Leão (2008), neste trabalho também foram utilizados os módulos de elasticidade do graute e dos prismas não grauteados, obtidos na área líquida. Diferente do proposto por Gomes (1983), que utilizou o módulo de elasticidade do bloco ao invés do módulo da alvenaria. O procedimento aqui adotado, segundo Mendes (1998), faz com que a análise seja mais representativa do que realmente ocorre no prisma grauteado, já que o carregamento absorvido pelo bloco é influenciado pelas propriedades da argamassa de

assentamento. Na Tabela 4.22 encontram-se os valores percentuais estimados dos carregamentos absorvidos pelos grautes e alvenarias, calculados com as Equações 4.2 e 4.3, para as diferentes séries de prismas da Etapa Referência.

De acordo com os resultados da Tabela 4.22, percebe-se que com o aumento da rigidez do graute aumenta-se a parcela de carregamento deste em relação ao carregamento total do prisma, conseqüentemente, diminuindo a parcela de carregamento suportada pela alvenaria (bloco-argamassa). De acordo com Mendes (1998), ao se permitir uma menor sobrecarga na alvenaria, pela utilização de grautes mais resistentes e/ou argamassas mais deformáveis, dois efeitos somam-se e influenciam negativamente para um melhor desempenho à compressão do prisma grauteado: quando o bloco absorve uma menor parcela do carregamento total, o graute, por estar mais carregado, desenvolve maiores tensões laterais sobre o bloco; ao absorver uma menor parcela do carregamento total que incide sobre o prisma, o bloco fica sujeito a uma tensão de compressão menor, diminuindo sua resistência ao cisalhamento. Assim, este aumento de carregamento sob os grautes implica no aumento da tensão lateral sobre as paredes internas dos blocos, e como consequência, ocasiona a ruptura prematura do prisma.

Diferente dos resultados encontrados pelo pesquisador, conforme os valores expostos na Tabela 4.21 e Tabela 4.22, observa-se que o aumento na rigidez do graute não ocasiona a diminuição da resistência dos prismas. Entretanto, constata-se que não existe diferença significativa entre as cargas de ruptura dos prismas, com o aumento da rigidez do grautes, ou seja, não ocorre a diminuição da capacidade de carga dos prismas. Entretanto, também não ocorre o aumento de sua capacidade de carga, exceto para os prismas RG15-CG1, RG12-BG1, RG6-CG1, RG6-CG2 e MG6-C, que apresentaram aumento significativo em suas cargas de ruptura quando grauteados. Esta diferença observada em relação aos trabalhos de Mendes (1998) e também de Leão (2008), se deve ao fato que nos trabalhos destes dois pesquisadores adotaram-se blocos com geometrias e valores de resistências à compressão diferentes dos utilizados neste trabalho, onde a distribuição de tensão de um componente para o outro se comportando de forma distinta sob compressão.

Tabela 4.22 – Porcentagem estimada dos carregamentos absorvidos pelos grautes.

ETAPA REFERÊNCIA						
	Área Graute = 129,5 cm ²			Área Líquida alvenaria = 221,1 cm ²		f _{p liq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p liq} prisma vazio (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
Bloco B15	RG15-AG1	47490,2	11720,6	70,4	29,6	15,8
	RG15-AG2	30657,8	11720,6	60,5	39,5	12,7
	RG15-AG3	22375,9	11720,6	52,8	47,2	12,6
	MG15-A	12554,2	11720,6	38,6	61,4	14,5
	MV15-A	-	11720,6	0	100	22,2
	RG15-CG1	47490,2	7662,0	78,4	21,6	17,2
	RG15-CG2	30657,8	7662,0	70,1	29,9	11,6
	RG15-CG3	22375,9	7662,0	63,1	36,9	11,3
	MG15-C	2529,6	7662,0	16,2	83,8	10,9
MV15-C	-	7662,0	0	100	17,3	
Bloco B12	Área Graute = 116,8 cm ²			Área Líquida alvenaria = 204,1 cm ²		f _{p liq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p liq} prisma vazio (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	RG12-BG1	47490,2	11511,5	70,2	29,8	15,0
	RG12-BG2	30657,8	11511,5	60,4	39,6	10,6
	RG12-BG3	22375,9	11511,5	52,7	47,3	10,4
	MG12-B	7120,1	11511,5	26,1	73,9	12,1
	MV12-B	-	11511,5	0	100	16,3
Bloco B6	Área Graute = 126,4 cm ²			Área Líquida alvenaria = 158,3 cm ²		f _{p liq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p liq} prisma vazio (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	RG6-CG1	47490,2	4890,0	88,6	11,4	24,3
	RG6-CG2	30657,8	4890,0	83,3	16,7	7,6
	RG6-CG3	22375,9	4890,0	78,5	21,5	6,5
	MG6-C	2529,6	4890,0	29,2	70,8	9,3
MV6-C	-	4890,0	0	100	10,6	

Fonte: Autor (2015).

Desta maneira, para os resultados encontrados neste trabalho, o enrijecimento das argamassas e dos grautes não proporcionam aumento significativo nas cargas de ruptura dos prismas, exceto para as séries RG15-CG1, RG12-BG1, RG6-CG1 e RG6-CG2, moldados com as

argamassas de menor rigidez. Isto se evidencia com os prismas moldados com os blocos B15, na qual o aumento na resistência da argamassa, ou seja, com a utilização da argamassa A, não ocorreu diferença significativa entre os valores de resistência dos prismas grauteados e vazio (Tabela 4.21). Este comportamento também foi observado por Mendes (1998) e Leão (2008), ou seja, com o enrijecimento da argamassa e conseqüentemente da alvenaria, não ocorre aumento significativo dos valores de resistência dos prismas quando grauteados. Comportamento similar foi observado anteriormente com os gráficos da Figura 4.6 à Figura 4.9, na qual os prismas grauteados RG15-CG1 assentados com as argamassas das classes C, de menor rigidez, apresentam aumento significativo em sua capacidade de carga, quando comparados com os prismas vazios.

Para os prismas MG6-C, a diminuição da rigidez do graute, neste caso a argamassa C, contribui para o aumento da carga de ruptura do prisma. Nesta série de prismas, a diminuição da parcela de carga suportada pelo preenchimento em razão de sua baixa rigidez, provoca o aparecimento de baixas tensões sobre as paredes internas dos blocos, contribuindo para o aumento da capacidade de carga dos prismas.

Desta forma, o aumento na resistência à compressão dos prismas com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural, neste caso para a série MG6-C, levanta a hipótese da viabilidade de utilização desta técnica, desde que a escolha entre os materiais seja adequada. Entretanto, ressalta-se que este aumento não se observa nas demais séries de prismas preenchidos com argamassa, gerando-se dúvidas quanto ao desempenho mecânico dos prismas com a utilização desta técnica, o que se espera esclarecer ao longo das próximas etapas deste trabalho.

4.5.2. Resultados dos ensaios das Etapas com Argamassa Mista e Argamassa Industrializada

Estas etapas têm como objetivo investigar o comportamento de prismas sob compressão uniaxial com a utilização da argamassa de assentamento dos tipos mista e industrializada, como preenchimento estrutural dos prismas, conforme prescrito na norma ABNT NBR 15812-2 (2010).

Assim, na Tabela 4.23 apresentam-se os valores de caracterização mecânica obtidos para a Etapa com Argamassa Mista. A partir destes resultados, conforme Figura 4.11, construiu-se o gráfico da resistência média à compressão dos prismas (f_{pliq}), na área líquida, versus

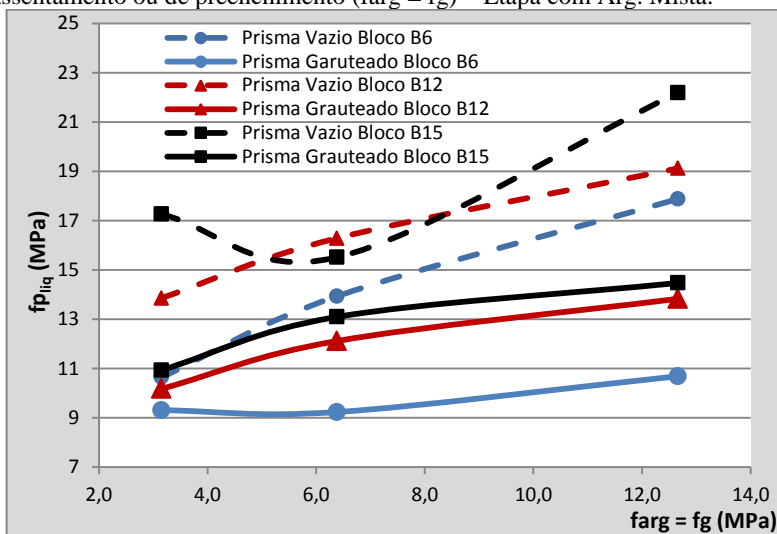
resistência média à compressão das argamassas, que para os prismas grauteados desempenham a mesma função do graute ($f_{arg} = f_g$). A construção deste gráfico teve como objetivo a identificação de tendências de comportamento para cada uma das séries de prismas.

Tabela 4.23 – Características mecânicas dos prismas da Etapa com Argamassa Mista.

ETAPA COM ARGAMASSA MISTA										
Prismas		Nº de Exemplares = 5				Nº de Exemplares = 2			Eficiência (η) – Área Bruta	
		F _p (kN)	C.V. (%)	f _p (MPa)	f _{p liq} (MPa)	C.V. (%)	E _p (GPa)	E _{p liq} (GPa)		C.V. (%)
Bloco B6	MV6-C	164,1	9,5	4,1	10,6	10,2	2,0	4,9	11,4	0,38
	MV6-B	214,5	13,6	5,4	13,9	13,9	3,4	9,5	4,3	0,49
	MV6-A	276,5	9,0	7,0	17,9	9,4	2,9	7,7	3,8	0,63
	MG6-C	262,2	7,7	6,6	9,3	7,7	2,8	3,9	7,3	0,60
	MG6-B	258,8	7,6	6,6	9,2	7,9	3,7	5,3	4,7	0,59
	MG6-A	300,2	13,6	7,6	10,7	12,9	3,7	5,3	3,5	0,69
Bloco B12	MV12-C	281,1	13,0	6,9	13,9	12,5	4,4	8,9	5,8	0,47
	MV12-B	333,6	11,1	8,1	16,3	11,8	5,6	11,5	8,1	0,55
	MV12-A	393,1	10,0	9,6	19,1	9,1	5,0	10,2	6,7	0,65
	MG12-C	326,7	6,6	8,0	10,2	7,2	4,5	5,5	9,2	0,54
	MG12-B	389,2	13,0	9,5	12,1	14,3	7,4	9,5	6,7	0,64
	MG12-A	442,8	9,6	10,9	13,8	9,7	6,1	8,0	6,7	0,74
Bloco B15	MV15-C	375,3	9,7	9,3	17,3	10,0	4,1	7,7	8,2	0,58
	MV15-B	335,0	6,9	8,4	15,5	7,8	5,2	9,6	6,7	0,52
	MV15-A	482,9	15,0	12,0	22,2	15,3	6,3	11,7	5,1	0,74
	MG15-C	382,3	6,9	9,4	11,0	5,9	6,6	7,6	8,9	0,58
	MG15-B	455,2	8,6	11,3	13,1	8,5	9,0	10,6	6,4	0,68
	MG15-A	503,0	6,9	12,5	14,5	6,1	7,0	8,1	4,7	0,80

Fonte: Autor (2015).

Figura 4.11 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida (fp_{liq}) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de preenchimento ($farg = fg$) – Etapa com Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

Analisando os valores da Tabela 4.23 e o gráfico da Figura 4.11, com o aumento da resistência à compressão da argamassa, os prismas apresentam um pequeno aumento em suas resistências, tanto para os prismas vazios como para os prismas preenchidos com a argamassa de assentamento. Este aumento na resistência dos prismas vazios e grauteados com o aumento da resistência da argamassa divergem com as conclusões de outros pesquisadores, no qual a resistência à compressão da argamassa não representa influencia significativa na resistência à compressão dos prismas vazios (Garcia, 2000; Romagna, 2000; Cunha, 2001; Juste, 2001).

Porém, para os prismas vazios MV15-B assentado com a argamassa da Classe B, o valor de resistência à compressão não apresenta o mesmo comportamento que os demais grupos de prismas. O valor de resistência à compressão destes prismas apresenta uma pequena queda quando comparado com os prismas MV15-C, moldados com a argamassa da Classe C, com menor valor de resistência. Entretanto, estes valores de resistência à compressão dos prismas encontram-se muito próximos, o que pode significar que não ocorre diferença significativa entre estes valores.

Observa-se, também, que os fatores de eficiência para os prismas vazios aumentam com o aumento da resistência da argamassa. Estes valores encontram-se próximos dos valores observados por Ramalho e Corrêa (2003), para prismas de blocos cerâmicos, variando entre 0,3 e 0,6; exceto para algumas séries de prismas, como a série MV15-A, que apresenta o maior fator de eficiência, no valor de 0,74, como já observado na Etapa de Referência. Para os prismas grauteados, os maiores valores encontrados foram para os prismas das séries preenchidas com a argamassa da classe A, de maior rigidez entre as argamassas utilizadas.

Para a Etapa com Argamassa Industrializada, diferente do observado na Etapa com Argamassa Mista, analisando os valores da Tabela 4.24 e o gráfico da Figura 4.12, com o aumento da resistência à compressão da argamassa ocorre um decréscimo na resistência dos prismas com a utilização da argamassa de resistência intermediária, neste caso a argamassa classe M. Esta tendência observada na Figura 4.12 para os prismas moldados com a argamassa M ocorre tanto para os prismas vazios como para os prismas preenchidos com esta classe de argamassa, exceto para os prismas IG6-M.

Este comportamento pode ser justificado em consequência da composição da argamassa classe M, que apresenta um percentual maior de aditivos incorporadores de ar, conforme o valor observado de teor de ar incorporado determinado para esta classe de argamassa (Tabela 3.9). A argamassa M apresentou praticamente o dobro dos valores de teor de ar incorporado obtidos para as outras duas classes de argamassa.

Para os prismas preenchidos, durante a moldagem do preenchimento, a barra utilizada no adensamento também pode ter contribuído para o aumento do teor de ar incorporado da argamassa classe M. A barra de adensamento possui uma superfície de contato diferente da superfície da haste utilizada na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, utilizados para a obtenção das propriedades mecânicas desta argamassa. Esta possível diferença na energia de adensamento pode ter contribuído para o aumento do teor de ar incorporado do preenchimento, afetando os valores das suas propriedades. Isto também justificaria este decréscimo observado para os valores de resistências obtidos para os prismas preenchidos moldados com esta argamassa classe M.

Outro fator que deve ser aqui colocado, é que a produção destas argamassas se deu em um equipamento não recomendado pelo fabricante. Este fator pode ter afetado o controle de suas propriedades, também influenciando nos resultados obtidos. Salienta-se que a

argamassa da classe M, é comercializada para ser utilizada também para assentamento de paredes de vedação e para revestimento. Entretanto, as argamassas das classes 5 e 10, são comercializadas para serem utilizadas para o assentamento de blocos de alvenaria estrutural.

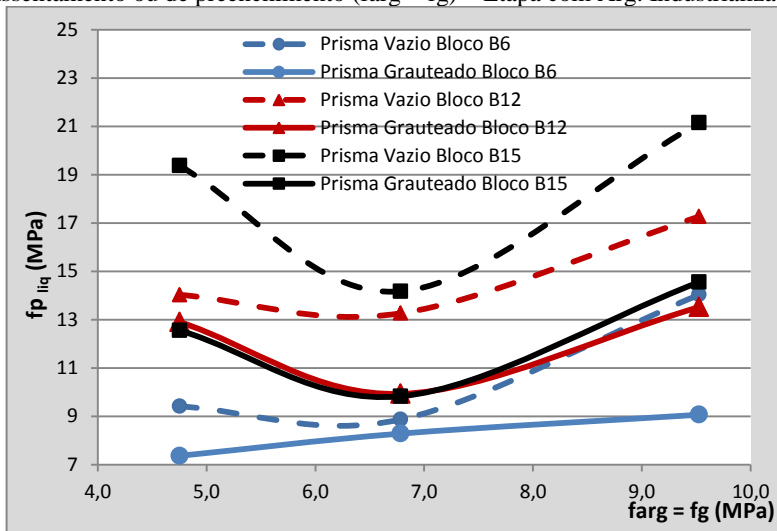
Para os prismas preenchidos IG6-M, como observado anteriormente, o valor de resistência à compressão não apresenta o mesmo comportamento que as demais séries de prismas. Entretanto, o valor de resistência à compressão dos prismas IG6-M apresenta um pequeno aumento quando comparado com os valores de resistência dos prismas IG15-5, moldados com a argamassa da Classe 5, com menor valor de resistência. Os valores de resistência à compressão destas duas séries de prismas encontram-se muito próximos, o que pode significar que não ocorre diferença significativa entre estes valores.

Tabela 4.24 – Característica mecânicas dos prismas da Etapa com Argamassa Industrializada.

ETAPARA COM ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA										
Prismas		Nº de Exemplares = 5					Nº de Exemplares = 2			Eficiência (η) – Área Bruta
		F _p (kN)	C.V. (%)	f _p (MPa)	f _{p liq} (MPa)	C.V. (%)	E _p (GPa)	E _{p liq} (GPa)	C.V. (%)	
Bloco B6	IV6-5	145,5	7,5	3,7	9,4	7,3	2,9	7,2	7,6	0,33
	IV6-M	136,3	13,2	3,5	8,9	14,0	2,9	7,4	5,2	0,31
	IV6-10	215,7	11,0	5,5	14,0	11,2	3,6	9,8	3,2	0,50
	IG6-5	206,5	9,4	5,2	7,4	9,4	3,6	5,1	11,2	0,47
	IG6-M	231,8	13,1	5,9	8,3	13,7	4,7	6,5	8,8	0,53
	IG6-10	254,8	8,4	6,4	9,1	9,3	3,5	4,9	2,9	0,58
Bloco B12	IV12-5	285,8	8,1	7,0	14,0	8,5	5,5	10,8	7,0	0,47
	IV12-M	270,0	11,3	6,6	13,3	12,1	3,2	6,1	2,9	0,45
	IV12-10	351,1	11,2	8,6	17,3	12,2	4,0	8,2	5,9	0,58
	IG12-5	413,0	9,9	10,2	12,9	11,1	4,9	6,0	7,2	0,69
	IG12-M	318,6	9,3	7,8	9,9	9,8	5,7	7,5	3,6	0,53
	IG12-10	435,0	8,2	10,6	13,5	8,7	4,4	5,6	1,0	0,72
Bloco B15	IV15-5	422,5	13,9	10,5	19,4	14,6	4,8	8,9	0,2	0,65
	IV15-M	306,1	7,2	7,7	14,2	6,6	5,5	9,9	3,7	0,48
	IV15-10	458,2	12,5	11,4	21,1	13,4	6,0	11,1	3,5	0,71
	IG15-5	415,6	10,7	10,3	12,6	10,9	5,5	6,6	6,5	0,64
	IG15-M	340,1	8,2	8,5	9,8	8,5	7,6	8,8	5,6	0,53
	IG15-10	505,4	11,4	12,5	14,6	12,3	5,8	6,8	1,1	0,78

Fonte: Autor (2015).

Figura 4.12 – Gráfico da resistência média à compressão dos prismas na área líquida (fp_{liq}) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de preenchimento ($farg = fg$) – Etapa com Arg. Industrializada.



Fonte: Autor (2015).

Para os prismas vazios, observa-se tanto para a Etapa com Argamassa Mista como a com Argamassa Industrializada, que tanto a resistência dos prismas como seus respectivos fatores de eficiência aumentam com o aumento da resistência das argamassas.

Para os prismas preenchidos, os maiores valores de eficiência encontrados também foram para os prismas das séries preenchidas com as argamassas de maior rigidez.

Entretanto, para estas séries de prismas isto não significa que ocorreu aumento em sua eficiência. Para os prismas preenchidos, a eficiência está ligada ao aumento efetivo da carga de ruptura dos mesmos. Conforme se observa na Tabela 4.23 e Tabela 4.24, para algumas séries destes prismas, os valores de carga de ruptura obtidos encontram-se próximos dos valores de carga de ruptura obtidos para os prismas vazios, assentados com a mesma classe de argamassa, o que pode indicar que não houve aumento significativo em suas resistências e, conseqüentemente, em seus fatores de eficiência.

Ressalta-se que esse fator de eficiência representa o quanto o bloco contribui para a resistência da alvenaria, o que fica mais claro quando se trata de paredes vazias. Entretanto, em se tratando de paredes

grauteadas, existe um terceiro componente (graute) e a sua presença pode levar a conclusões erradas quanto a eficiência dos prismas.

Assim, para aumentar o fator de eficiência de maneira que ocorra um acréscimo significativo nas resistências à compressão dos prismas torna-se necessário, porém, aprofundar o estudo das propriedades mecânicas dos materiais visando a correta compatibilização entre estes, não se limitando apenas a seus valores de resistência, mas também em suas propriedades elásticas.

4.5.2.1 Análise da influência dos componentes na resistência à compressão dos prismas

Com o objetivo de verificar a influência da variação da argamassa, bloco e o efeito conjunto do bloco e argamassa na resistência final dos prismas vazios e preenchidos, na área líquida, foi realizada uma análise fatorial de 2 fatores (ANOVA) para as séries de prismas das Etapas com Argamassa Mista e Industrializada, com um nível de 95% de confiança.

Os fatores avaliados foram os valores médios de resistência à compressão da argamassa de assentamento (e preenchimento) e a resistência à compressão dos blocos (2 fatores). Cada fator foi variado 3 vezes (3 níveis de variação), ou seja, para os blocos, utilizou-se os blocos da classe B15 (primeiro nível), B12 (segundo nível) e B6 (terceiro nível) e para a argamassa utilizou-se as argamassas da Classe A (primeiro nível), Classe B (segundo nível), e Classe C (terceiro nível), para a Etapa com Argamassa Mista. Para a Etapa com Argamassa Industrializada, para a argamassa, utilizou-se as argamassas da Classe 10 (primeiro nível), Classe M (segundo nível), e Classe 5 (terceiro nível). Todos os níveis de variação possuem valores distintos de resistência à compressão. Os resultados para estas análises encontram-se na Tabela 4.25.

Assim para a Etapa com Argamassa Mista, com os resultados encontrados com esta análise para os prismas vazios e preenchidos, constata-se que as resistências médias à compressão da argamassa, do bloco e a interação entre estes dois fatores, influenciam significativamente na resistência média à compressão dos prismas vazios. Este comportamento observa-se também para os prismas preenchidos, exceto a interação entre a argamassa e bloco.

Tabela 4.25 – Análise de variância para a argamassa e bloco na resistência à compressão dos prismas.

ETAPA ARGAMASSA MISTA	PRISMAS VAZIOS			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	37,352	3,28	F > F α (Há influência)
	Bloco	17,589	3,28	F > F α (Há influência)
	Argamassa x Bloco	2,855	2,65	F > F α (Há influência)
	PRISMAS PREENCHIDOS			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	25,649	3,28	F > F α (Há influência)
	Bloco	32,736	3,28	F > F α (Há influência)
	Argamassa x Bloco	2,214	2,65	F < F α (Não Há influência)
ETAPA ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA	PRISMAS VAZIOS			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	33,074	3,28	F > F α (Há influência)
	Bloco	63,021	3,28	F > F α (Há influência)
	Argamassa x Bloco	2,802	2,65	F > F α (Há influência)
	PRISMAS PREENCHIDOS			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	25,824	3,28	F > F α (Há influência)
	Bloco	59,322	3,28	F > F α (Há influência)
	Argamassa x Bloco	5,869	2,65	F > F α (Há influência)

Fonte: Autor (2015).

Conforme os resultados expostos na Tabela 4.25, para os prismas vazios, a argamassa foi o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas, seguida pelo bloco e por último, da interação entre a argamassa e bloco. Este último fator apresenta pequena influência, em comparação aos demais fatores. Para os prismas preenchidos, constata-se que o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas foi o bloco, seguido pela argamassa. Sendo

que a interação entre a argamassa e bloco, não influenciam significativamente na resistência final dos prismas preenchidos.

Para a argamassa, o resultado encontrado diverge dos resultados obtidos por outros pesquisadores (GARCIA, 2000; ROMAGNA, 2000 e CUNHA, 2001), na qual a argamassa tem pouca influência na resistência dos prismas. Entretanto Steil (2003) e Grohmann (2006) observaram que a resistência da argamassa influencia significativamente na resistência dos prismas, conforme se observa neste trabalho (Tabela 4.25).

Ainda para os prismas vazios, o aumento de resistência da argamassa gera um incremento, em média, de 5,8 MPa e o aumento de resistência dos blocos gera um incremento, em média, de 4,2 MPa, ambos sobre a resistência dos prismas. O mesmo não se observa com a interação entre estes dois fatores, ou seja, variando-se a resistência da argamassa e variando, ao mesmo tempo, a resistência do bloco. Esta interação gera um decréscimo na resistência dos prismas, em média, de 0,8 MPa. Para os prismas preenchidos, de acordo com a análise, o aumento de resistência da argamassa de assentamento gera um incremento, em média, de 2,8 MPa, e o aumento da resistência dos blocos gera um incremento, em média, de 3,1 MPa, sobre a resistência dos prismas. O efeito da interação entre os dois fatores, ou seja, variando-se a resistência da argamassa e variando, ao mesmo tempo, a resistência do bloco também gera um incremento. Entretanto, este incremento é, em média, de 0,7 MPa, sobre a resistência do prisma.

Para os prismas da Etapa com Argamassa Industrializada, conforme os resultados expostos na Tabela 4.25, para os prismas vazios constata-se que o bloco foi o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas, seguida pela argamassa e por último, da interação entre a argamassa e o bloco. Este último fator apresenta pequena influência, em comparação aos demais fatores. Para os prismas preenchidos, constata-se que o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas foi o bloco, seguido pela argamassa. Entretanto, diferente do observado na Etapa com Argamassa Mista, aqui se observa que a interação entre a argamassa e o bloco influencia significativamente na resistência final dos prismas preenchidos.

Novamente, para a argamassa, o resultado encontrado diverge dos resultados obtidos por outros pesquisadores, na qual este componente tem pouca influência sobre a resistência dos prismas. Entretanto, conforme Steil (2003) e Grohmann (2006) observa-se aqui que a resistência da argamassa influencia significativamente na resistência dos prismas (Tabela 4.25).

Ainda para os prismas vazios da Etapa com Argamassa Industrializada, o aumento de resistência da argamassa gera um incremento, em média, de 3,2 MPa e o aumento de resistência dos blocos gera um incremento, em média, de 7,5 MPa, sobre a resistência dos prismas. O mesmo não se observa com a interação entre estes dois fatores, ou seja, variando-se a resistência da argamassa e variando, ao mesmo tempo, a resistência do bloco gera-se um decréscimo na resistência dos prismas, em média, de 1,0 MPa. Para os prismas preenchidos, de acordo com a análise, o aumento de resistência da argamassa de assentamento gera um incremento, em média, de 1,4 MPa, o aumento de resistência dos blocos gera um incremento, em média, de 4,1 MPa, sobre a resistência dos prismas. O efeito da interação entre os dois fatores, ou seja, variando-se a resistência da argamassa e variando, ao mesmo tempo, a resistência do bloco também gera um incremento. Entretanto, este incremento é, em média, de 0,1 MPa, sobre a resistência dos prismas.

Ainda, buscando verificar se o preenchimento influencia significativamente na resistência dos prismas, realizou-se outra análise fatorial para as classes de prismas moldados com o mesmo bloco, para estas duas etapas do programa experimental. O objetivo desta análise consistiu em separar a influência da argamassa e do preenchimento tendo em vista que, para estas duas etapas do programa experimental, a argamassa de assentamento e de preenchimento (quando utilizada), é o mesmo material.

Aqui os fatores avaliados foram os valores médios de resistência à compressão da argamassa de assentamento (e preenchimento) e a utilização de preenchimento ou não (2 fatores). Na Etapa com Argamassa Mista, para a argamassa utilizou-se as argamassas da Classe A (primeiro nível), Classe B (segundo nível), e Classe C (terceiro nível), e para o preenchimento, utilizou-se a condição vazio (primeiro nível) e com preenchimento (segundo nível). Para a Etapa com Argamassa Industrializada adotou-se o mesmo procedimento, entretanto utilizando as três classes de argamassas industrializadas.

Os resultados encontrados com esta análise fatorial, com um nível de 95% de confiança, apresentam-se na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Análise de variância para a argamassa e preenchimento na resistência à compressão dos prismas.

ETAPA ARGAMASSA MISTA	Prismas moldados com bloco B6			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	26,345	3,4	F > F α (Há influência)
	Preenchimento	80,916	4,26	F > F α (Há influência)
	Argamassa x preenchimento	12,034	3,4	F > F α (Há influência)
	Prismas moldados com bloco B12			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	49,694	3,4	F > F α (Há influência)
	Preenchimento	143,894	4,26	F > F α (Há influência)
	Argamassa x preenchimento	1,701	3,4	F > F α (Não Há influência)
	Prismas moldados com bloco B15			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	18,382	3,4	F > F α (Há influência)
Preenchimento	73,033	4,26	F > F α (Há influência)	
Argamassa x preenchimento	6,095	3,4	F > F α (Há influência)	
ETAPA ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA	Prismas moldados com bloco B6			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	27,454	3,4	F > F α (Há influência)
	Preenchimento	42,086	4,26	F > F α (Há influência)
	Argamassa x preenchimento	10,872	3,4	F > F α (Há influência)
	Prismas moldados com bloco B12			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	17,213	3,4	F > F α (Há influência)
	Preenchimento	26,816	4,26	F > F α (Há influência)
	Argamassa x preenchimento	2,372	3,4	F > F α (Não Há influência)
	Prismas moldados com bloco B15			
	Variável	F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
	Argamassa	23,777	3,4	F > F α (Há influência)
Preenchimento	70,072	4,26	F > F α (Há influência)	
Argamassa x preenchimento	1,244	3,4	F > F α (Não Há influência)	

Fonte: Autor (2015).

Para a Etapa com Argamassa Mista, para todas as séries de prismas, constata-se que a argamassa, o preenchimento e a interação entre estes dois fatores, influenciam significativamente na resistência média final dos prismas vazios. Exceto para os prismas moldados com o bloco B12, onde a interação entre a argamassa e o preenchimento não influenciam significativamente na resistência à compressão dos prismas moldados com esta classe de bloco.

Para a Etapa com Argamassa Industrializada, novamente constata-se para todas as séries de prismas que a argamassa, o preenchimento e a interação entre estes dois fatores, influenciam significativamente na resistência média final dos prismas vazios. Exceto para os prismas moldados com o bloco B12 e B15, onde a interação entre a argamassa e o preenchimento não influenciam significativamente na resistência à compressão dos prismas moldados com estas classes de bloco. Entretanto, como esperado para todas as classes de prismas destas duas etapas do programa experimental, observa-se que o fator com maior influência trata-se da utilização ou não do preenchimento.

Prosseguindo com as análises, com o intuito de verificação se houve aumento significativo nas resistências à compressão dos prismas, na área líquida, com o aumento de resistência da argamassa, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com comparação de múltiplas médias entre as classes de prismas moldados com o mesmo tipo de bloco. Os resultados desta análise, com um nível de confiança de 95%, para as duas etapas do programa experimental, encontram-se na Tabela 4.27 e Tabela 4.28.

Tabela 4.27 – Análise de múltiplas médias entre a resistência à compressão dos prismas – Etapa com Argamassa Mista.

PRISMAS VAZIOS				
Prismas Comparados		F (calculado)	F α (crítico)	Resultado
Bloco B6	MV6-A, MV6-B e MV6-C	25,360	3,89	F > F α (Há Diferença)
	MV6-A e MV6-B	3,435	2,306	F > F α (Há Diferença)
	MV6-A e MV6-C	8,095	2,306	F > F α (Há Diferença)
	MV6-B e MV6-C	3,312	2,306	F > F α (Há Diferença)
Bloco B12	MV12-A, MV12-B e MV12-C	10,707	3,89	F > F α (Há Diferença)
	MV12-A e MV12-B	2,444	2,306	F > F α (Há Diferença)
	MV12-A e MV12-C	4,797	2,306	F > F α (Há Diferença)
	MV12-B e MV12-C	2,098	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
Bloco B15	MV15-A, MV15-B e MV15-C	11,222	3,89	F > F α (Há Diferença)
	MV15-A e MV15-B	4,132	2,571	F > F α (Há Diferença)
	MV15-A e MV15-C	2,885	2,306	F > F α (Há Diferença)
	MV15-B e MV15-C	1,865	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
PRISMAS PREENCHIDOS				
Prismas Comparados		F(calculado)	F α (crítico)	Resultado
Bloco B6	MG6-A, MG6-B e MG6-C	3,317	3,89	F < F α (Não Há Diferença)
Bloco B12	MG12-A, MG12-B e MG12-C	9,776	3,89	F > F α (Há Diferença)
	MG12-A e MG12-B	1,791	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
	MG12-A e MG12-C	5,379	2,306	F > F α (Há Diferença)
	MG12-B e MG12-C	2,367	2,306	F > F α (Há Diferença)
Bloco B15	MG15-A, MG15-B e MG15-C	18,444	3,89	F > F α (Há Diferença)
	MG15-A e MG15-B	2,155	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
	MG15-A e MG15-C	7,303	2,306	F > F α (Há Diferença)
	MG15-B e MG15-C	3,818	2,306	F > F α (Há Diferença)

Fonte: Autor (2015).

Para a Etapa com Argamassa Mista, de acordo com os resultados dispostos na Tabela 4.27, nos prismas vazios moldados com os blocos B6, o aumento da resistência da argamassa da classe C para a A, aumenta significativamente as resistências dos prismas. Os prismas vazios moldados com os blocos B12 e as argamassas das classes C e B (MV12-C e MV12-B), não apresentam diferença significativa entre suas resistências à compressão, mesmo apresentando um pequeno aumento na resistência, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 4.11. Para os prismas moldados com o bloco B12 e a argamassa da classe A, observa-se um aumento significativo nos valores de resistência quando comparados com os prismas moldadas com as argamassas das classes C e B. O mesmo comportamento observado para os prismas moldados com os blocos B12 ocorre para os prismas vazios moldados com os blocos B15.

As resistências das argamassas das classes C e B encontram-se abaixo da faixa entre 70% e 100% do valor de f_b do bloco B12 e B15, valores estes indicados como os mais adequados para prismas vazios (MOHAMAD, 1998). Valores abaixo desta faixa implicariam na incompatibilidade entre as propriedades dos materiais do prisma e como consequência justificariam o comportamento observado para os prismas MV12-B, MV12-C, MV15-B e MV15-C, cujo aumento na resistência da argamassa não aumentou significativamente a resistência dos prismas.

Nos prismas preenchidos foi realizada a mesma comparação entre os prismas de mesmo bloco, ou seja, variando-se as argamassas nas classes A, B e C, de resistências distintas. Com os prismas moldados com o bloco B6, o aumento da resistência da argamassa de assentamento e preenchimento da classe C para a A não gera aumento significativo na resistência dos prismas.

Para os prismas moldados com os blocos B12, os prismas assentados e preenchidos com as argamassas A e B (MG12-A e MG12-B), não apresentam diferença significativa entre seus valores de resistência à compressão. Entretanto, os prismas TG12-C assentados e preenchidos com a argamassa C apresentam valor de resistência significativamente menor, em comparação às outras duas séries. Para as séries de prismas moldadas com os blocos B15, ocorre o mesmo comportamento observado para as séries dos prismas moldados com o bloco B12.

Para Garcia (2000), Cunha (2001) e Juste (2001), o aumento na resistência à compressão da argamassa de assentamento contribui muito pouco para o aumento à compressão da alvenaria, demonstrando-se também um procedimento antieconômico. Neste trabalho é observado

que o aumento na resistência da argamassa gera aumento na resistência dos prismas, exceto para os prismas preenchidos quando moldados com os blocos B6. Entretanto, observa-se que quando ocorre aumento na resistência dos prismas este não é proporcional ao aumento da resistência das argamassas, o que neste aspecto conforme observado anteriormente, pode representar um procedimento antieconômico.

Ainda, para os prismas preenchidos, percebe-se que com o aumento da rigidez e resistência das argamassas de assentamento e consequentemente preenchimento, só ocorre aumento nos valores de resistências dos prismas quando estes são moldados com blocos de maior f_{bk} , neste caso os prismas moldados com os blocos B15 e B12. Esta observação contrasta com os resultados encontrados para os prismas vazios, na qual o aumento significativo foi mais acentuado nos blocos com os menores valores de f_{bk} , no caso o bloco B6. Isto se deve ao fato que a distribuição de tensões e o comportamento na ruptura para prismas vazios e preenchidos são distintos. Enquanto que para os prismas vazios o comportamento da argamassa comanda a ruptura dos prismas, para os prismas preenchidos, as propriedades mecânicas das argamassas de assentamento e preenchimento, bem como o comportamento deste último quando confinado dentro dos blocos, tem grande influência sobre a ruptura da alvenaria, dificultando assim a investigação deste fenômeno.

Para a Etapa com Argamassa Industrializada, de acordo com os resultados dispostos na Tabela 4.28, para os prismas vazios moldados com os blocos B6 e as argamassas das classes 5 e M (séries IV6-5 e IV6-M), não apresentam diferença significativa em sua resistência à compressão, mesmo apresentando uma pequena redução na resistência, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 4.12. Para os prismas moldados a argamassa da classe 10 (IV6-10), observa-se um aumento significativo nos valores de resistência quando comparados com os prismas moldadas com as argamassas das classes 5 e M. O mesmo comportamento observa-se para os prismas vazios moldados com os blocos B12.

Tabela 4.28 – Análise de múltiplas médias entre a resistência à compressão dos prismas – Etapa com Argamassa Industrial.

PRISMAS VAZIOS				
Prismas Comparados		F (calculado)	F α (crítico)	Resultado
Bloco B6	IV6-5, IV6-M e IV6-10	26,839	3,89	F > F α (Há Diferença)
	IV6-10 e IV6-M	5,753	2,306	F > F α (Há Diferença)
	IV6-10 e IV6-5	6,004	2,306	F > F α (Há Diferença)
	IV6-M e IV6-5	0,854	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
Bloco B12	IV12-5, IV12-M e IV12-10	8,003	3,89	F > F α (Há Diferença)
	IV12-10 e IV12-M	3,376	2,306	F > F α (Há Diferença)
	IV12-10 e IV12-5	2,987	2,306	F > F α (Há Diferença)
	IV12-M e IV12-5	0,854	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
Bloco B15	IV15-10, IV15-M e IV15-5	11,630	3,89	F > F α (Há Diferença)
	IV15-10 e IV15-M	5,213	2,571	F > F α (Há Diferença)
	IV15-10 e IV15-5	0,989	2,306	F > F α (Não Há Diferença)
	IV15-M e IV15-5	3,904	2,306	F < F α (Há Diferença)
PRISMAS PREENCHIDOS				
Prismas Comparados		F (calculado)	F α (crítico)	Resultado
Bloco B6	IG6-5, IG6-M e IG6-10	4,587	3,89	F > F α (Há Diferença)
	IG6-10 e IG6-M	1,270	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
	IG6-10 e IG6-5	3,582	2,306	F > F α (Há Diferença)
	IG6-M e IG6-5	1,567	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
Bloco B12	IG12-5, IG12-M e IG12-10	13,479	3,89	F > F α (Há Diferença)
	IG12-10 e IG12-M	5,383	2,306	F > F α (Há Diferença)
	IG12-10 e IG12-5	0,770	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
	IG12-M e IG12-5	3,985	2,306	F > F α (Há Diferença)
Bloco B15	IG15-10, IG15-M e IG15-5	15,195	3,89	F > F α (Há Diferença)
	IG15-10 e IG15-M	5,490	2,571	F > F α (Há Diferença)
	IG15-10 e IG15-5	2,020	2,306	F < F α (Não Há Diferença)
	IG15-M e IG15-5	3,842	2,571	F > F α (Há Diferença)

Fonte: Autor (2015).

As resistências das argamassas das classes 5 e M encontram-se abaixo da faixa entre 70% e 100% do valor de f_b do bloco B6 e B12,

valores estes indicados como os mais adequados para prismas vazios (MOHAMAD, 1998). Valores abaixo desta faixa implicariam na incompatibilidade entre as propriedades dos materiais dos prismas e como consequência justificariam o comportamento observado, cujo aumento na resistência da argamassa não aumentou significativamente a resistência dos prismas. Outro fato a ser considerado, é que estas duas classes de argamassas não apresentam diferença significativa entre seus valores de módulo de elasticidade, o que também justificaria este comportamento.

Para os prismas vazios moldados com o bloco B15 observa-se um comportamento distinto. O aumento da resistência da argamassa, não representou aumento significativo na resistência dos prismas vazios. Observa-se aqui para os prismas IV15-5 e IV15-10, moldados com as argamassas classes 5 e 10, não apresentam diferença significativa entre seus valores de resistência. E para os prismas moldados com a argamassa classe M (IV15-M), os resultados de resistência obtidos foram significativamente menores que os valores de resistência das outras duas séries de prismas. A utilização da argamassa M para assentamento de prismas vazios, tecnicamente, não se mostra como a opção mais indicada quando comparada com a utilização das argamassas das classes 5 e 10, que apresentaram melhores resultados de resistência média à compressão e eficiência. Para os prismas vazios moldados com o bloco B15, tendo em vista que não ocorreu aumento significativo na resistência dos prismas, apenas o aumento da resistência das argamassas sem a adequada compatibilização entre as propriedades mecânicas dos materiais dos prismas evidencia que a escolha inadequada destes componentes pode ser uma opção antieconômica e não indicada tecnicamente.

Para os prismas preenchidos com a argamassa industrializada, somente as séries moldados com os blocos B6 apresentam aumento significativo na resistência à compressão dos prismas com o aumento da resistência à compressão das argamassas, com a utilização das classes 5 à 10, indicadas para alvenaria estrutural. O prisma preenchido com a argamassa classe M, em função da variabilidade de seus valores de resistência, não apresenta diferença significativa entre seu valor de resistência e as resistências obtidas para as outras duas séries de prismas moldadas com o mesmo bloco.

Para os prismas moldados com os blocos B12 e B15, não ocorre aumento significativo em suas resistências à compressão com o aumento da resistência das argamassas. Entretanto, as séries de prismas moldados com estas duas classes de blocos e preenchidos com a argamassa da

classe M apresentam os menores resultados de resistência à compressão, em relação as séries moldadas com classes 5 e 10. Novamente, com o objetivo de aumentar a resistência dos prismas com o aumento da resistência das argamassas, a argamassa M não se mostra como a opção mais indicada quando comparada com a utilização das argamassas das classes 5 e 10, que apresentam melhores resultados de resistência média à compressão e eficiência, algo esperado pois essas argamassas são indicadas pelo fabricante para o assentamento de blocos de alvenaria estrutural.

Como comentado anteriormente, o procedimento de adensamento utilizado para o preenchimento pode ter aumentado o teor de ar incorporado para esta classe de argamassa, que durante os experimentos demonstrou-se mais suscetível à incorporação de ar. Isto justificaria este decréscimo nos valores de resistência à compressão obtida para estes prismas. Ressalta-se, que este baixo desempenho dos prismas utilizando a argamassa M era esperado, pois essas argamassas não são indicadas pelo fabricante para o assentamento de blocos de alvenaria estrutural.

Ainda, como Etapa com Argamassa Mista, observa-se que quando ocorre aumento na resistência dos prismas este não é proporcional ao aumento da resistência das argamassas, o que neste aspecto pode representar um procedimento antieconômico.

Por último, visando estimar os valores médios de resistência à compressão dos prismas (f_p), utilizando-se dos resultados experimentais individuais encontrados de resistência à compressão para cada série de prisma, construíram-se gráficos da Figura 4.13 e Figura 4.14, correlacionando às propriedades mecânicas dos materiais constituintes para cada série de prisma das Etapas com Argamassa Mista. Para a Etapa com Argamassa Industrializada, os gráficos encontram-se nas Figuras 4.15 e 4.16.

Para as duas etapas, as equações para a estimativa dos valores de f_{pliq} , que estabelecem a correspondência entre as relações f_{pliq}/f_{arg} e $f_{b_{liq}}/f_{arg}$, e que apresentaram melhor aproximação (maior valor de R^2), são apresentadas nestes gráficos. Reescrevendo estas equações, foi possível calcular o erro existente entre os valores médios experimentais e teóricos de resistência na área líquida, para cada série de prisma, conforme Tabela 4.29 e Tabela 4.30.

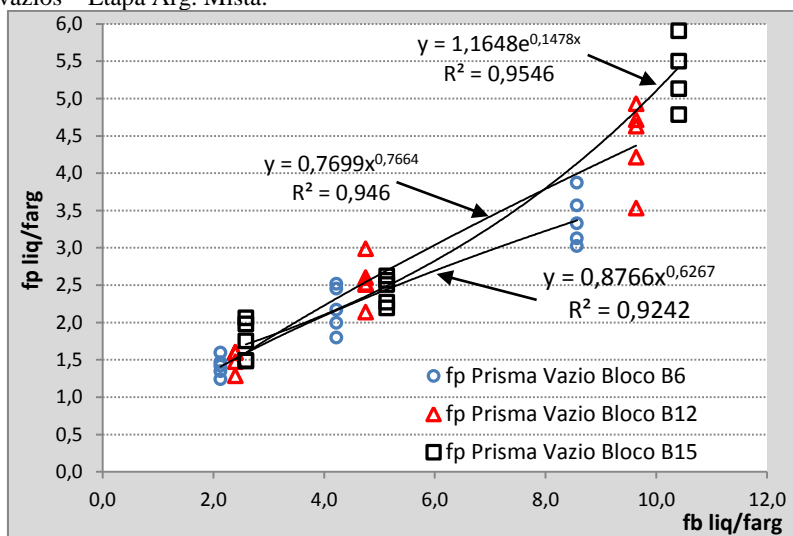
Com estas equações, é possível estimar os valores médios de resistência dos prismas que se enquadrem dentro dos valores de resistência de blocos e argamassas utilizados neste trabalho. Observa-se que para os dados expostos na Tabela 4.29 e Tabela 4.30, para as

equações obtidas é possível estimar valores bem próximos dos valores experimentais médios encontrados.

Para a Etapa com Argamassa Mista, o erro máximo encontrado para os prismas da classe MG6-B, no valor de 4,9%. Para a Etapa com Argamassa Industrializada, o erro máximo encontrado para os prismas da classe IG6-M, no valor de 1,2%.

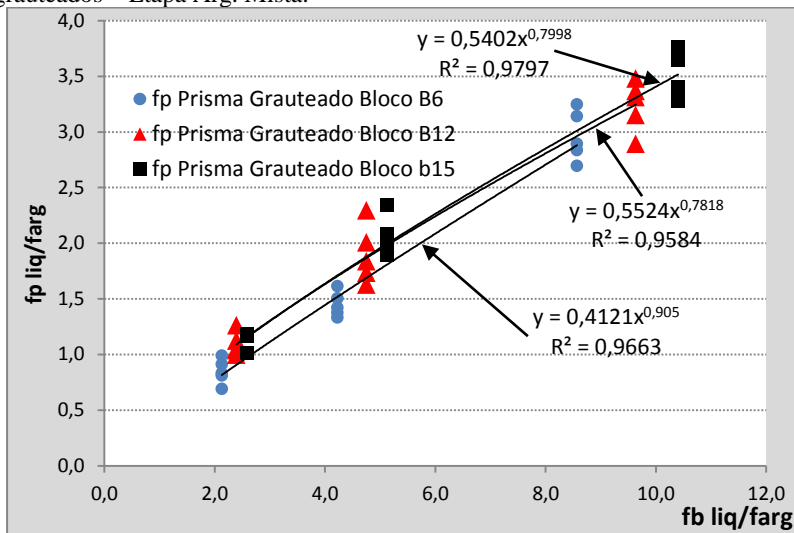
Entretanto, ressalta-se que estas equações correspondem somente aos materiais e componentes utilizados nesta pesquisa, podendo estas serem utilizadas somente como referência de cálculo desde que os materiais e componentes estudados apresentem propriedades mecânicas próximas das utilizadas nesta pesquisa.

Figura 4.13 – Gráfico da relação entre $f_{p \text{ liq}/f_{arg}}$ e $f_{b \text{ liq}/f_{arg}}$, para os prismas vazios – Etapa Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.14 – Gráfico da relação entre $f_{p \text{ liq}/f_{arg}}$ e $f_{b \text{ liq}/f_{arg}}$, para os prismas grauteados – Etapa Arg. Mista.



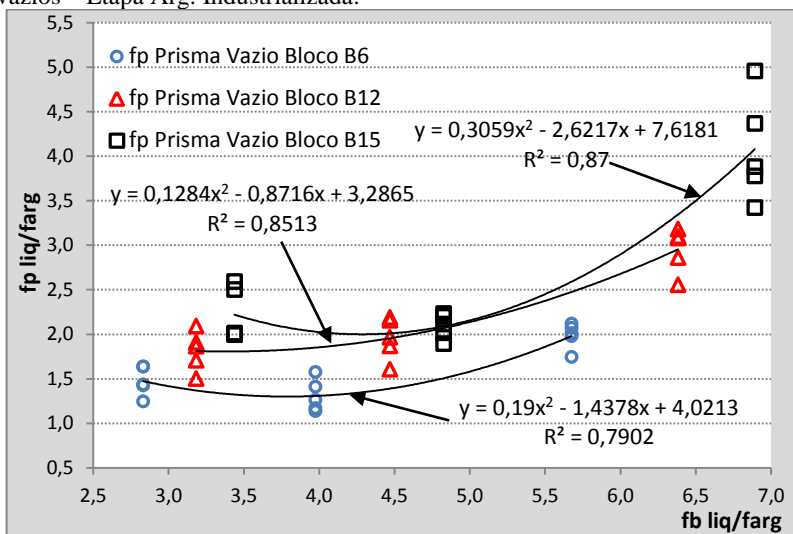
Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.29 – Valores experimentais e calculados de resistência média à compressão, na área líquida.

ETAPA ARGAMASSA MISTA					
Prismas		f _{p<liq< sub=""></liq<>} (MPa) - experimental	Equação	f _{p<liq< sub=""></liq<>} (MPa) - calculado	Erro (%)
Bloco B6	MV6-A	17,9	$f_{p_{liq}} = 0,8766 \cdot f_{arg}^{0,3733} \cdot f_{b_{liq}}^{0,6227}$	17,8	0,3
	MV6-B	13,9		13,8	0,9
	MV6-C	10,6		10,6	0,4
	MG6-A	10,7	$f_{p_{liq}} = 0,4121 \cdot f_{arg}^{0,095} \cdot f_{b_{liq}}^{0,905}$	10,3	3,2
	MG6-B	9,2		9,7	4,9
	MG6-C	9,3		9,1	2,7
Bloco B12	MV12-A	19,1	$f_{p_{liq}} = 0,7699 \cdot f_{arg}^{0,2336} \cdot f_{b_{liq}}^{0,7664}$	19,04	0,4
	MV12-B	16,3		16,22	0,4
	MV12-C	13,9		13,75	0,7
	MG12-A	13,8	$f_{p_{liq}} = 0,5524 \cdot f_{arg}^{0,2182} \cdot f_{b_{liq}}^{0,7818}$	13,84	0,1
	MG12-B	12,1		11,92	1,6
	MG12-C	10,2		10,22	0,2
Bloco B15	MV15-A	22,2	$f_{p_{liq}} = 1,1648 \cdot f_{arg} \cdot e^{0,1478 \cdot (f_{b_{liq}}/f_{arg})}$	21,61	2,6
	MV15-B	15,5		15,87	2,3
	MV15-C	17,3		17,06	1,2
	MG15-A	14,5	$f_{p_{liq}} = 0,5402 \cdot f_{arg}^{0,2002} \cdot f_{b_{liq}}^{0,7998}$	14,62	1,0
	MG15-B	13,1		12,75	2,6
	MG15-C	11,0		11,07	1,0

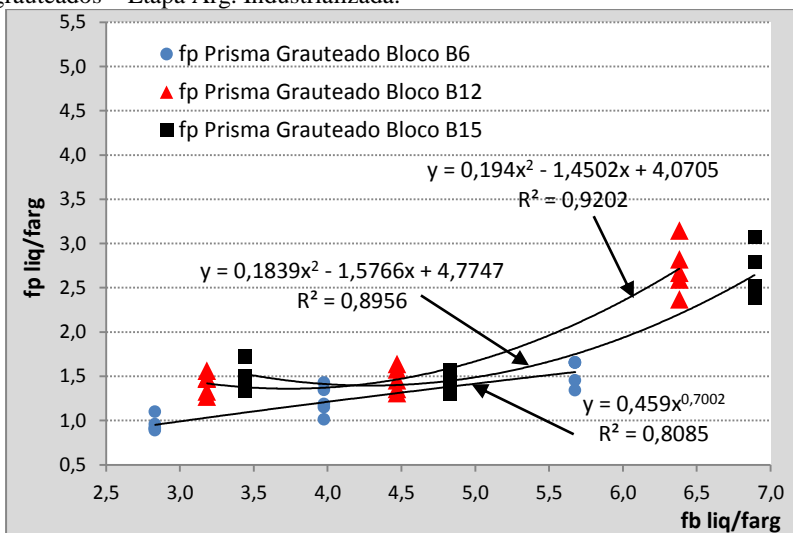
Fonte: Autor (2015).

Figura 4.15 – Gráfico da relação entre $fp_{liq/farg}$ e $fb_{liq/arg}$, para os prismas vazios – Etapa Arg. Industrializada.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.16 – Gráfico da relação entre $fp_{liq/farg}$ e $fb_{liq/arg}$, para os prismas grauteados – Etapa Arg. Industrializada.



Fonte: Autor (2015).

Tabela 4.30 – Valores experimentais e calculados de resistência média à compressão, na área líquida.

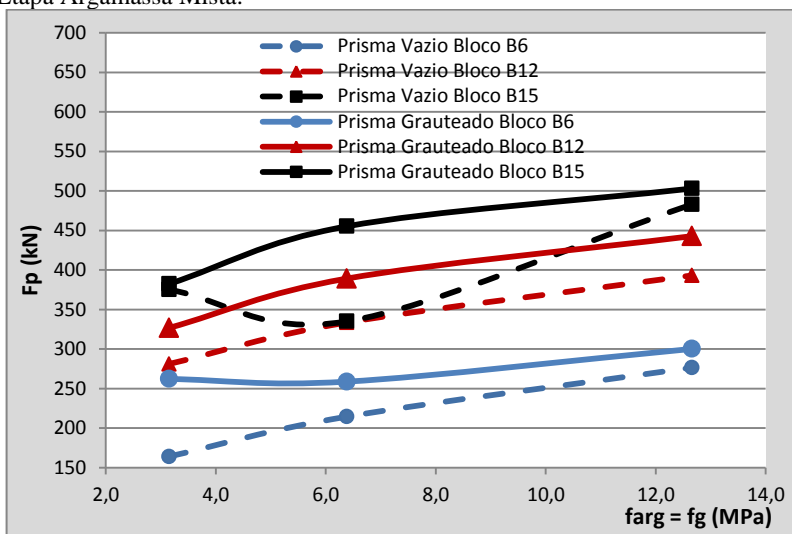
ETAPA ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA					
Prismas		$f_{p_{liq}}$ (MPa) - experimental	Equação	$f_{p_{liq}}$ (MPa) - calculado	Erro (%)
Bloco B6	IV6-5	9,4	$f_{p_{liq}} = 0,19 \cdot fb_{liq}^2 \cdot f_{arg}^{-1} - 1,437 \cdot fb_{liq} + 4,0213 \cdot f_{arg}$	9,4	0,27
	IV6-M	8,9		8,9	0,27
	IV6-10	14,0		14,1	0,16
	IG6-5	7,4	$f_{p_{liq}} = 0,459 \cdot fb_{liq}^{0,7002} \cdot f_{arg}^{0,2998}$	7,36	0,10
	IG6-M	8,3		8,18	1,20
	IG6-10	9,1		9,06	0,00
Bloco B12	IV12-5	14,0	$f_{p_{liq}} = 0,1284 \cdot fb_{liq}^2 \cdot f_{arg}^{-1} - 0,8716 \cdot fb_{liq} + 3,2865 \cdot f_{arg}$	14,04	0,02
	IV12-M	13,3		13,27	0,02
	IV12-10	17,3		17,27	0,01
	IG12-5	12,9	$f_{p_{liq}} = 0,194 \cdot fb_{liq}^2 \cdot f_{arg}^{-1} - 1,4502 \cdot fb_{liq} + 4,0705 \cdot f_{arg}$	12,91	0,04
	IG12-M	9,9		9,93	0,04
	IG12-10	13,5		13,53	0,02
Bloco B15	IV15-5	19,4	$f_{p_{liq}} = 0,3059 \cdot fb_{liq}^2 \cdot f_{arg}^{-1} - 2,6217 \cdot fb_{liq} + 7,6181 \cdot f_{arg}$	19,38	0,05
	IV15-M	14,2		14,18	0,04
	IV15-10	21,1		21,15	0,02
	IG15-5	12,6	$f_{p_{liq}} = 0,1839 \cdot fb_{liq}^2 \cdot f_{arg}^{-1} - 1,5766 \cdot fb_{liq} + 4,7747 \cdot f_{arg}$	12,56	0,02
	IG15-M	9,8		9,83	0,02
	IG15-10	14,6		14,56	0,01

Fonte: Autor (2015).

4.5.2.2 Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados da Etapa com Argamassa Mista

Com o objetivo de identificar o aumento efetivo da capacidade de carga dos prismas quando preenchidos, analisando o gráfico da Figura 4.17, observa-se que com o preenchimento dos prismas com a argamassa de assentamento, ocorreu um pequeno aumento na carga resistida pelos prismas até sua ruptura (F_p). Este aumento é mais evidente com os prismas moldados com os blocos B6, preenchidos com argamassas com menor resistência e módulo de elasticidade.

Figura 4.17 – Carga de ruptura média (F_p) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de preenchimento ($f_{arg} = f_g$) – Etapa Argamassa Mista.



Fonte: Autor (2015).

Assim, com a intenção de verificar a eficácia da utilização das argamassas como preenchimento para estes prismas, novamente foi realizada uma análise de variância (ANOVA), utilizando os valores de resistência média à compressão. Para este procedimento, utilizou-se a área bruta para manter a mesma área no cálculo da resistência dos prismas, com o objetivo de verificar se houve ou não aumento efetivo nos valores da carga resistida pelos prismas preenchidos com a argamassa de assentamento, até a sua ruptura, quando comparados com os prismas vazios. Determinou-se também o efeito relativo, ou seja, o valor percentual de aumento na carga resistida pelos prismas quando preenchidos com cada classe de argamassa até a sua ruptura. Com um nível de confiança de 95%, o resultado da análise de comparação de médias 2x2 obtida entre os valores de resistência média à compressão dos prismas (f_p) na área bruta, bem como o Efeito Relativo (aumento ou não de f_p), encontra-se na Tabela 4.31.

Tabela 4.31 – Efeito relativo da capacidade de carga dos prismas preenchidos.

ETAPA ARGAMASSA MISTA						
Prismas		F (calculado)	F α (crítico)	Conclusão	Efeito Relativo (%)	
Bloco B6	MV6-A	MG6-A	1,151	2,306	F < F α (Não Há Diferença)	+ 8,6
	MV6-B	MG6-B	2,750	2,306	F > F α (Há Diferença)	+ 22,2
	MV6-C	MG6-C	8,299	2,306	F > F α (Há Diferença)	+ 61,0
Bloco B12	MV12-A	MG12-A	2,173	2,306	F < F α (Não Há Diferença)	+ 13,5
	MV12-B	MG12-B	1,852	2,306	F < F α (Não Há Diferença)	+ 17,3
	MV12-C	MG12-C	2,300	2,306	F < F α (Não Há Diferença)	+ 15,9
Bloco B15	MV15-A	MG15-A	0,535	2,306	F < F α (Não Há Diferença)	+ 4,2
	MV15-B	MG15-B	5,568	2,306	F > F α (Há Diferença)	+ 34,5
	MV15-C	MG15-C	0,110	2,306	F < F α (Não Há Diferença)	+ 1,1

Fonte: Autor (2015).

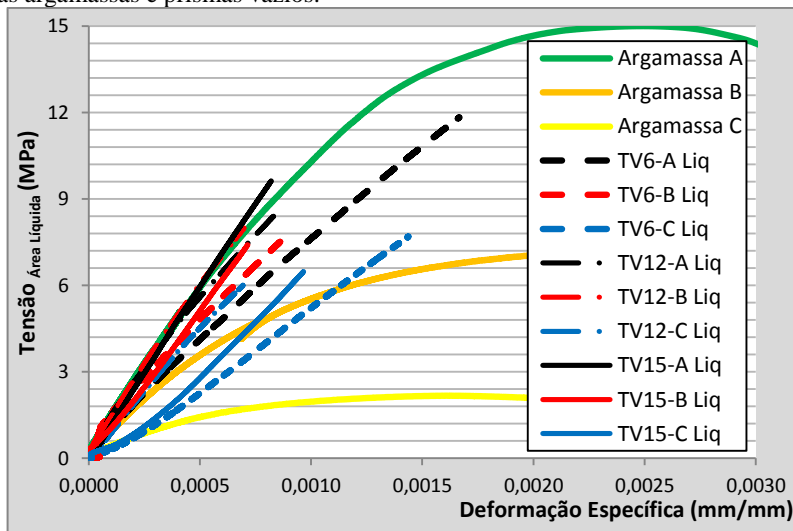
Analisando os resultados dispostos na Tabela 4.31, somente os prismas MG15-B, MG6-B e MG6-C, preenchidos com as argamassas B e C, apresentam aumento significativo em suas resistências à compressão. Este aumento nos valores de resistência à compressão na área bruta (f_p), mais especificamente na carga de ruptura, observa-se para os prismas preenchidos que apresentam f_p com valores 22,2% superior aos valores de f_p dos prismas vazios (Efeito relativo > 22,2%). Como observado na Etapa Referência, esse aumento na resistência para algumas séries de prismas, com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural, evidencia a viabilidade de utilização desta técnica de preenchimento dos prismas com a própria argamassa utilizada no seu assentamento.

Comparando os valores característicos de resistência à compressão do bloco e da argamassa dos prismas MG15-B, MG6-B e MG6-C, as argamassas apresentam valores de resistências características à compressão (f_{argk}) entre 73,4% a 90,7% menores que os valores de resistência à compressão características do bloco (f_{bk}), na área líquida. Esta diferença entre os valores de resistência à compressão do preenchimento e bloco não é recomendado. Conforme Ramalho e Corrêa (2003) e Parsekian et al (2012) indicam-se valores de resistência dos grautes próximos aos valores de f_{bk} dos blocos, na área líquida.

Como consequência, esta diferença observada para os prismas das séries MG15-B, MG6-B e MG6-C poderiam ocasionar um decréscimo nos valores de carga resistente para estes prismas. Entretanto, este comportamento não se observa para estas séries de prismas.

Conforme Mendes (1998), para argamassas com baixa resistência, prismas grauteados que apresentam melhor desempenho são aqueles que são preenchidos com grautes com módulos de elasticidade próximos ao módulo de elasticidade da argamassa e próximos ao módulo de elasticidade dos prismas não grauteados. Comportamento este, também observado por Dhanasekar e Kumar (1994) e Khalifa e Magzoub (1994). Entretanto, isto não se observa para as séries MG15-B, MG6-B e MG6-C (Figura 4.18). Para os prismas MG15-A, os valores de módulos de elasticidade dos prismas vazios MV15-A e da argamassa A são próximos, com uma diferença de apenas 7,1%, o que não resulta no aumento significativo na sua capacidade de carga, diferente dos resultados obtidos por Mendes (1998).

Figura 4.18 – Comparação entre os diagramas tensão-deformação obtidos para as argamassas e prismas vazios.



Fonte: Autor (2015).

Ainda, segundo este autor, quanto maior o módulo de elasticidade do graute, maior será a parcela de carregamento total por ele absorvido. Para os grautes que apresentam pouca diferença entre seus coeficientes

de Poisson, o autor afirma que com o aumento da tensão vertical nos grautes, maior será a tensão lateral gerada nestes e consequentemente maior será a possibilidade de ocorrer tensões de tração e cisalhamento no bloco. Contudo, para grautes que apresentam menores módulos de elasticidade, o conjunto de alvenaria (bloco e argamassa), absorve uma parcela maior do carregamento total. Deste modo, com o aumento da carga absorvida pelo bloco e, consequentemente, da tensão de compressão efetiva nos blocos, há a diminuição de tensões laterais e o aumento da resistência ao cisalhamento dos blocos, tendo como consequência, o aumento na resistência à compressão dos prismas.

Desta maneira, visando identificar a parcela de carregamento suportado pelo preenchimento e pelo prisma, foi adotado o mesmo procedimento utilizado na Etapa Referência. Os resultados obtidos com esta análise encontram-se na Tabela 4.32. Novamente ressalta-se, que esse procedimento analisa a alvenaria dentro do seu regime elástico, diferente do comportamento que será analisado na análise numérica, ou seja, considerando a não linearidade dos materiais dos prismas. Ainda, esta estimativa de carga apresenta limitações em relação a análise realizada na Etapa Referência. Para esta etapa e a etapa com argamassa industrializada, a argamassa de assentamento varia juntamente com o preenchimento, diferente da análise realizada anteriormente. Isto ocorre, pois o objetivo do estudo é preencher o prisma com a própria argamassa de assentamento, e utilizar traços diferentes para a argamassa da junta e para o preenchimento inviabilizaria a utilização da técnica prescrita pela norma ABNT NBR 15812-2 (2010).

Tabela 4.32 – Porcentagem estimada dos carregamentos absorvidos pelos grautes.

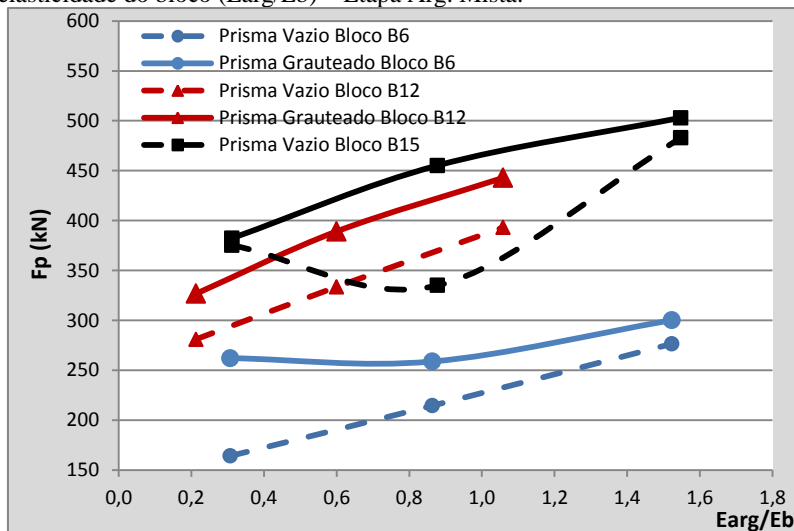
ETAPA ARGAMASSA MISTA						
Bloco B6	Área Graute = 126,4 cm ²			Área Líquida alvenaria = 158,3 cm ²		f _{p liq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p liq} prisma vazio (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	MG6-A	12554,2	7710,7	56,5	43,5	10,7
	MG6-B	7120,1	9485,2	37,5	62,5	9,2
MG6-C	2529,6	4890,0	29,2	70,8	9,3	
Bloco B12	Área Graute = 116,8 cm ²			Área Líquida alvenaria = 204,1 cm ²		f _{p liq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p liq} prisma vazio (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	MG12-A	12554,2	10194,5	41,3	58,7	13,8
	MG12-B	7120,1	11511,5	26,1	73,9	12,1
MG12-C	2529,6	8941,3	13,9	86,1	10,1	
Bloco B15	Área Graute = 129,5 cm ²			Área Líquida alvenaria = 221,1 cm ²		f _{p liq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p liq} prisma vazio (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	MG15-A	12554,2	11720,6	38,6	61,4	14,5
	MG15-B	7120,1	9603,5	30,3	69,7	13,1
MG15-C	2529,6	7662,0	16,2	83,8	11,0	

Fonte: Autor (2015).

De acordo com os resultados dispostos na Tabela 4.32 e como observados na Etapa Referência, para os prismas MG6-C, a diminuição da rigidez da argamassa de preenchimento da classe A para a classe C, pode ter contribuído para o aumento da capacidade de carga dos prismas MG15-B, MG6-B e MG6-C, quando comparadas as respectivas cargas de ruptura entre prisma vazio e preenchido. Nestas séries de prismas, a diminuição da parcela de carga absorvida pelo preenchimento, em virtude de seu baixo valor de módulo de elasticidade, contribui para o aumento significativo da carga de ruptura dos prismas. Neste caso, a baixa rigidez dos preenchimentos provocaria o aparecimento de baixas

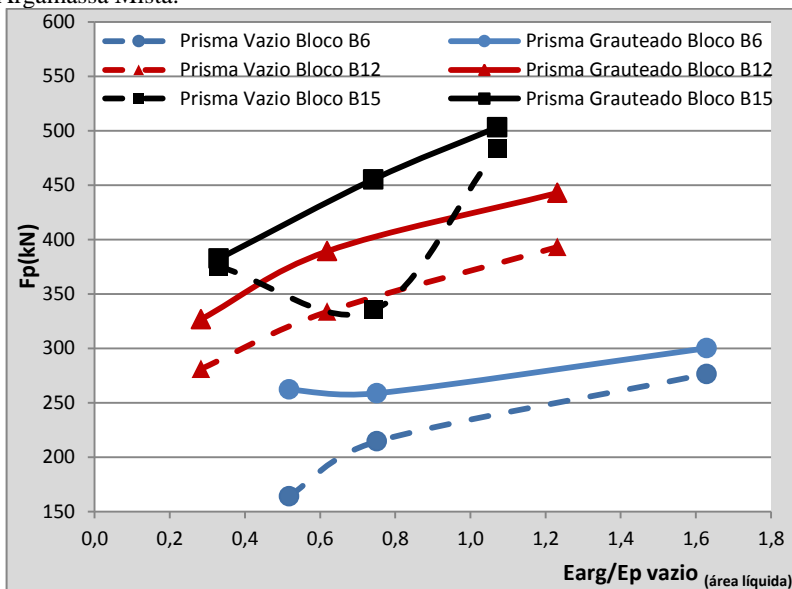
tensões sobre as paredes internas dos blocos, além de absorver parte da carga total do prisma. Ainda, com o aumento da parcela de carga sob a alvenaria (bloco-argamassa), aumentam-se as tensões de compressão sobre o bloco, aumentando sua capacidade de resistência às tensões de tração impostas pela deformação do preenchimento (MENDES, 1998). Isto pode ser evidenciado pelo fato de que para a série de prismas MG6-A, preenchida com a argamassa da classe A de maior valor de módulo de elasticidade e maior coeficiente de Poisson, que não apresenta aumento significativo em sua carga de ruptura quando preenchido com esta argamassa. Isto fica mais evidente com os gráficos da Figura 4.19 e Figura 4.20, onde o aumento da rigidez da argamassa e consequentemente aumento das relações existentes entre os módulos de elasticidade da argamassa e bloco (E_{arg}/E_b) e as relações entre os módulos de elasticidade da argamassa e do prisma vazio na área líquida ($E_{arg}/E_{p\text{vazio liq}}$), não proporcionam o aumento da carga resistida pelos prismas até sua ruptura (F_p).

Figura 4.19 – Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do bloco (E_{arg}/E_b) – Etapa Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.20 – Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do prisma vazio na área líquida [E_{arg}/E_p vazio_(área líquida)] – Etapa Argamassa Mista.



Fonte: Autor (2015).

Observa-se então que com a diminuição da rigidez da argamassa aumentam-se os valores dos efeitos relativos encontrados para cada série de prismas moldados com os blocos B6, e conseqüentemente, aumentam-se significativamente os valores das cargas resistidas por estes prismas, conforme os valores da Tabela 4.23 e Tabela 4.31.

Contudo, os prismas moldados com os blocos B12 não apresentam aumento em suas resistências quando preenchidos pela argamassa. O mesmo observa-se com os prismas moldados com os blocos B15, exceto para os prismas MG15-B, com argamassa de resistência intermediária. Este diferente comportamento apresentado para os prismas moldados com os três tipos de blocos, pode ser explicado pelas diferenças existentes entre os valores de módulos de elasticidade e , principalmente, pelas geometrias dos blocos. Mesmos estes blocos apresentando valores de f_{bk} muito próximos, os prismas moldados apresentam comportamento distintos sob compressão, indicando que a geometria influencia consideravelmente no

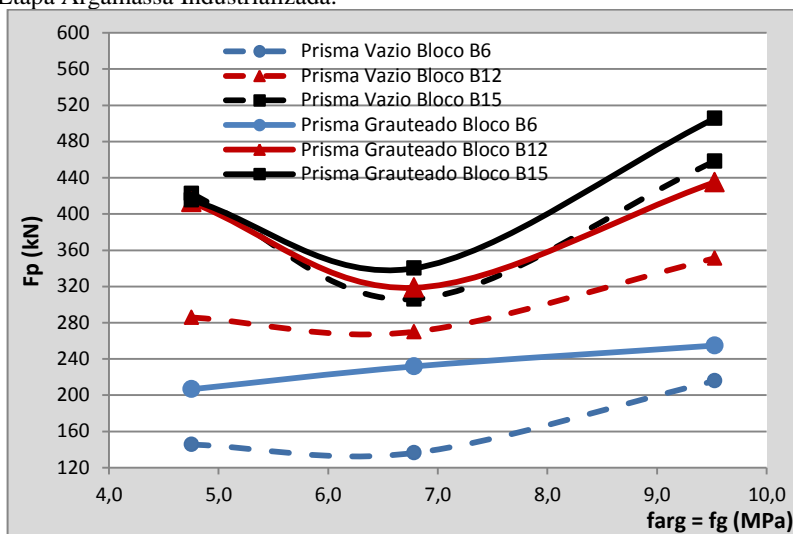
comportamento mecânico e distribuição de tensões para estes prismas, o que já fora comprovado por outros pesquisadores.

Diante do exposto, o aumento na resistência à compressão dos prismas com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural evidencia a viabilidade de utilização desta técnica, desde que a escolha entre os componentes dos prismas seja adequada. Isto ocorre, especificamente, para os prismas moldados com bloco B6 onde se constata o melhor desempenho dos prismas utilizando argamassas mistas com valores de resistências média à compressão entre 10% e 23,7% da resistência média à compressão do bloco, na área líquida ($f_{b\text{liq}}$). E dentro deste contexto, para algumas solicitações de projeto, além do aumento da capacidade resistente, a técnica proposta eleva também o peso próprio das paredes, diminuindo-se o nível de concentração de tensões de tração nestas paredes.

4.5.2.3 Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados das Etapas com Argamassa Industrializada

Com o objetivo de identificar o aumento efetivo da capacidade de carga dos prismas quando preenchidos, analisando o gráfico da Figura 4.21, observa-se que com o preenchimento dos prismas com a argamassa de assentamento, ocorreu um pequeno aumento na carga resistida pelos prismas até sua ruptura. Este aumento é mais evidente com os prismas moldados com os blocos B6 e B12, com os menores valores de f_{bk} .

Figura 4.21 - Carga de ruptura média (F_p) versus resistência média à compressão das argamassas de assentamento ou de preenchimento ($f_{arg} = f_g$) – Etapa Argamassa Industrializada.



Fonte: Autor (2015).

Desta forma, com a intenção de verificar a eficácia da utilização das argamassas como preenchimento para estes prismas, novamente foi realizada uma análise de variância (ANOVA), utilizando os valores de resistência média à compressão dos prismas na área bruta, conforme procedimento utilizado na Etapa com Argamassa Mista. Determinou-se também o efeito relativo. Com um nível de confiança de 95%, o resultado da análise de comparação de médias 2x2 obtida entre os valores de resistência média à compressão dos prismas (f_p) na área bruta, bem como o Efeito Relativo (aumento ou não de f_p), encontra-se na Tabela 4.33.

Analisando os resultados dispostos na Tabela 4.33, as séries de prismas moldadas com os blocos B6 e B12, preenchidos com as três classes de argamassas, apresentam aumento significativo em sua capacidade de carga. Este aumento nos valores de resistência à compressão na área bruta (f_p), mais especificamente na carga de ruptura, observa-se para os prismas preenchidos que apresentam f_p com valores 16,4% superior aos valores de f_p dos prismas vazios (Efeito relativo > 16,4%). Como observado na Etapa Referência e Argamassa Mista, o aumento na carga de ruptura para algumas séries de prismas, com a

utilização da argamassa como preenchimento estrutural, evidencia a viabilidade de utilização desta técnica de preenchimento dos prismas com a própria argamassa utilizada no seu assentamento.

Tabela 4.33 – Efeito relativo da capacidade de carga dos prismas preenchidos.

ETAPA ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA						
Prismas		F (calculado)	Fa (crítico)	Conclusão	Efeito Relativo (%)	
Bloco B6	IV6-5	IG6-5	6,211	2,306	F > Fa (Há Diferença)	+ 40,5
	IV6-M	IG6-M	5,778	2,306	F > Fa (Há Diferença)	+ 68,6
	IV6-10	IG6-10	2,488	2,306	F > Fa (Há Diferença)	+ 16,4
Bloco B12	IV12-5	IG12-5	5,527	2,306	F > Fa (Há Diferença)	+ 45,7
	IV12-M	IG12-M	2,365	2,306	F > Fa (Há Diferença)	+ 18,2
	IV12-10	IG12-10	3,166	2,306	F > Fa (Há Diferença)	+ 23,3
Bloco B15	IV15-5	IG15-5	0,171	2,306	F < Fa (Não Há Diferença)	- 1,9
	IV15-M	IG15-M	2,109	2,306	F < Fa (Não Há Diferença)	+ 10,4
	IV15-10	IG15-10	1,146	2,306	F < Fa (Não Há Diferença)	+ 9,6

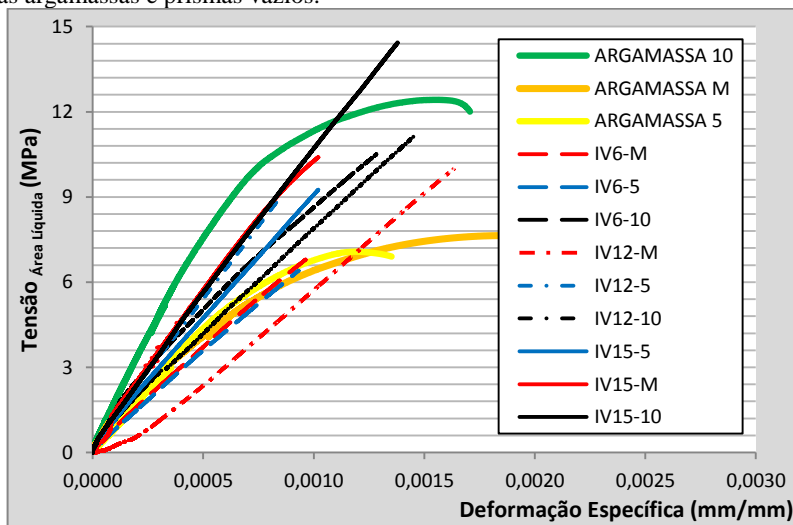
Fonte: Autor (2015).

Comparando os valores característicos de resistência à compressão do bloco e da argamassa dos prismas IV6-5, IV6-M, IV6-10, IV12-5, IV12-M e IV12-10, as argamassas apresentam valores de resistências à compressão (f_{argk}) entre 61,1% a 81,5% menores que os valores de resistência à compressão do bloco (f_{bk}), na área líquida. Conforme observado por Ramalho e Corrêa (2003) e Parsekian *et al* (2012) esta diferença entre os valores de resistência do preenchimento e bloco não é indicada, e como consequência ocasionariam um decréscimo nos valores de carga resistente para estes prismas. Entretanto, este comportamento não se observa para as séries de prismas moldadas com os blocos B6 e B12.

Conforme Mendes (1998), para argamassas com baixa resistência, prismas grauteados que apresentam melhor desempenho são aqueles que são preenchidos com grautes com módulos de elasticidade próximos ao módulo de elasticidade da argamassa e próximos ao módulo de elasticidade dos prismas não grauteados, conforme também

observado por Dhanasekar e Kumar (1994) e Khalifa e Magzoub (1994). Entretanto, isto se observa apenas para a série IG6-5 e IG6-M (Figura 4.22), onde o valor do módulo de elasticidade da argamassa de preenchimento em relação ao valor de módulo do prisma vazio apresentaram uma diferença de 9,7%. Para os prismas IG15-5 e IG15-10, a diferença entre os respectivos valores de módulo de elasticidade dos prismas vazios e das argamassas encontram-se abaixo de 10%, o que não resulta no aumento significativo na sua capacidade de carga, novamente contrastando com os resultados obtidos por Mendes (1998), conforme observado na Etapa com Argamassa Mista.

Figura 4.22 – Comparação entre os diagramas tensão-deformação obtidos para as argamassas e prismas vazios.



Fonte: Autor (2015).

Ainda para esta etapa do programa, com o intuito de investigar se o enrijecimento da alvenaria com argamassa diminui a resistência dos prismas, como observado para algumas séries de prismas das Etapas Referência e Argamassa Mista, novamente calculou-se a parcela de carregamento suportado pelo preenchimento e pelo prisma. Os resultados obtidos com esta análise encontram-se na Tabela 4.34.

De acordo com os resultados dispostos na Tabela 4.34 e como observado nas Etapas Referência e Argamassa Mista, a diminuição da rigidez da argamassa de preenchimento da classe 5 para a classe 10, pode ter contribuído para o aumento da resistência das séries de prismas

moldados com os blocos B6 e B12, quando comparadas as respectivas cargas de ruptura entre prisma vazio e preenchido. Diferente da Etapa Tradicional, nesta etapa utilizando argamassa industrializada, o aumento na capacidade de carga dos prismas também ocorre para os prismas moldados com os blocos B12.

Nos prismas moldados com os blocos B6 e B12, como observado para os prismas moldados com os blocos B6 da Etapa com Argamassa Mista, a diminuição da parcela de carga absorvida pelo preenchimento, em virtude de seu baixo valor de módulo de elasticidade, contribui para o aumento significativo da carga de ruptura dos prismas. Novamente, a baixa rigidez das argamassas utilizadas como preenchimento provocaria o aparecimento de baixas tensões sobre as paredes internas dos blocos, além de absorver parte da carga total do prisma. Ainda, com o aumento da parcela de carga sob a alvenaria (bloco-argamassa), aumentam-se as tensões de compressão sobre o bloco, aumentando sua resistência as tensões de tração impostas pela deformação do preenchimento (MENDES, 1998).

Tabela 4.34 – Porcentagem estimada dos carregamentos absorvidos pelos grautes.

ETAPA ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA						
Bloco B6	Área Graute = 126,4 cm ²			Área Líquida alvenaria = 158,3 cm ²		fp _{líq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p líq prisma vazio} (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	IG6-10	12299,3	9766,8	50,13	49,9	9,1
	IG6-M	8717,1	7354,1	48,6	51,4	8,3
	IG6-5	7890,8	7211,1	46,6	53,4	7,4
Bloco B12	Área Graute = 116,8 cm ²			Área Líquida alvenaria = 204,1 cm ²		fp _{líq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p líq prisma vazio} (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	IG12-10	12299,3	8237,6	46,1	53,9	13,5
	IG12-M	8717,1	6057,5	45,2	54,8	9,9
	IG12-5	7890,8	10802,4	29,5	70,5	12,5
Bloco B15	Área Graute = 129,5 cm ²			Área Líquida alvenaria = 221,1 cm ²		fp _{líq} (MPa)
	Prismas	E _g (MPa)	E _{p líq prisma vazio} (MPa)	% Carga Graute	% Carga Alvenaria	
	IG15-10	12299,3	11105,7	39,4	60,6	14,6
	IG15-M	8717,1	9866,4	34,1	65,9	9,8
	IG15-5	7890,8	8939,0	34,1	65,9	12,6

Fonte: Autor (2015).

Isto fica mais evidente com os prismas moldados com os blocos da classe B6, conforme os gráficos da Figura 4.23 e Figura 4.24. Para estes prismas e os prismas moldados com os blocos da classe B12 o aumento da rigidez da argamassa e, conseqüentemente, o aumento das relações existentes entre os módulos de elasticidade da argamassa e bloco (E_{arg}/E_b) e as relações entre os módulos de elasticidade da argamassa e do prisma vazio na área líquida ($E_{arg}/E_{p_{vazio\ liq}}$), não proporcionam o aumento da carga resistida pelos prismas até sua ruptura.

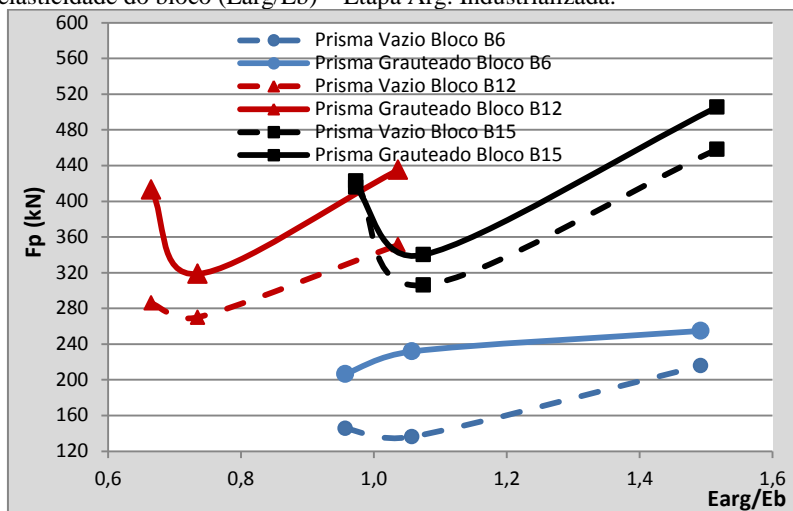
Como na Etapa Argamassa Mista, observa-se também com a diminuição da rigidez da argamassa o aumento nos valores dos efeitos relativos encontrados para cada família de prismas e conseqüentemente, aumentam-se significativamente os valores das cargas de ruptura por estes prismas moldados com os blocos B6 e B12, conforme os valores da Tabela 4.34.

Contudo, os prismas moldados com os blocos B15 não apresentam aumento em suas resistências quando preenchidos pela argamassa.

Como observado na Etapa com Argamassa Mista, este diferente comportamento apresentado para os prismas moldados com os três tipos de blocos, pode ser explicado pelas diferenças existentes entre os valores de módulos de elasticidade e, principalmente, pelas geometrias dos blocos, que influenciam consideravelmente no comportamento dos prismas, o que já fora comprovado por outros pesquisadores.

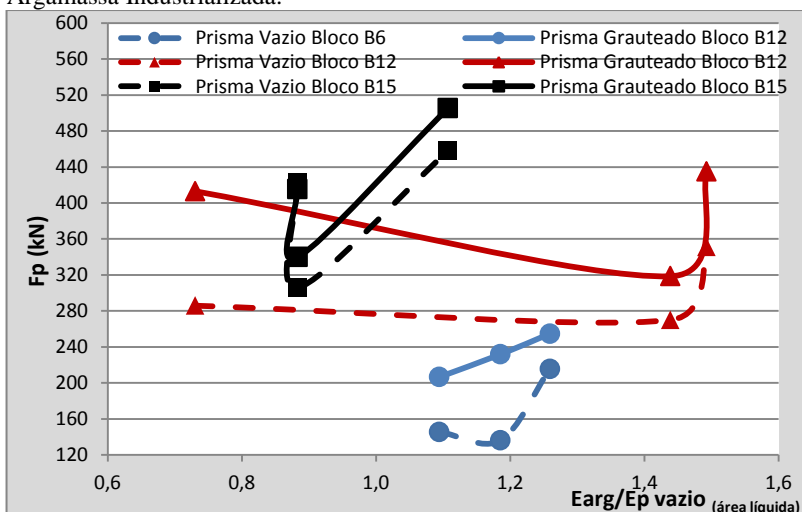
Diante do exposto, novamente observa-se que o aumento na resistência à compressão dos prismas com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural evidencia a viabilidade de utilização desta técnica, desde que a escolha entre os componentes dos prismas seja adequada. Isto ocorre, especificamente, para os prismas moldados com os blocos B6 e B12, onde se constata o melhor desempenho dos prismas utilizando argamassas industrializadas com valores de resistências média à compressão (f_{arg}) entre 17,9 e 35,2% da resistência média à compressão dos blocos B6, na área líquida (f_{bliq}); e para os prismas moldados com os blocos B12, argamassas com f_{arg} entre 15,8 e 31,4% do f_{bliq} do bloco B12. Dentro deste contexto, para algumas solicitações de projeto, além do aumento da capacidade resistente, a técnica proposta eleva também o peso próprio das paredes, diminuindo-se o nível de concentração de tensões de tração nestas paredes.

Figura 4.23 – Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do bloco (E_{arg}/E_b) – Etapa Arg. Industrializada.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.24 – Gráfico da carga de ruptura dos prismas (F_p) versus relação entre os valores médios de módulo de elasticidade da argamassa/módulo de elasticidade do prisma vazio na área líquida [E_{arg}/E_p vazio (área líquida)] – Etapa Argamassa Industrializada.



Fonte: Autor (2015).

4.5.3. Análise do modo de ruptura dos prismas

Nesta etapa do trabalho caracterizou-se o modo de ruptura observado para os prismas nas etapas Referência, Argamassa Mista e Industrializada.

Para os prismas vazios da Etapa com Argamassa Mista, a forma de ruptura dos prismas ocorreu de forma frágil, sem características explosivas, para os prismas assentados com as três classes de argamassas. A ruptura sem características explosivas aqui é designada pela ruptura de forma lenta, ou seja, o material perde a capacidade resistente com aviso.

Basicamente, a ruptura ocorreu de forma lenta, iniciando-se com o surgimento de fissuras e o esmagamento da argamassa em conjunto com a formação de fissuras e trincas verticais nos blocos, entre 60% e 70% da carga de ruptura. Para as argamassas C e B, observou-se um esmagamento acentuado das juntas em relação às juntas com a argamassa A. Na sequência, ocorreu a ruptura localizada dos blocos próxima à região da interface bloco-argamassa, geradas pela deformação excessiva junta, levando assim o conjunto ao colapso (Figuras 4.25 a 4.27).

Esta última característica observada, com rupturas localizadas nos blocos, ocorreu de forma acentuada com todas as séries de prismas moldados com blocos da classe B15. O mesmo observou-se com os prismas moldados com os blocos B12 e B6 e assentados com a argamassa classe A, de maior rigidez. Isto se deve as diferentes características elásticas existentes entre o bloco e argamassa, onde quanto maior a diferença de deformação específica entre a unidade e a argamassa, maior o diferencial de deformação entre os materiais, ocasionando um aumento das tensões de tração nas unidades (RIZZATTI, 2003). Ainda, o enrijecimento da alvenaria pode ser indesejado para as paredes de alvenaria, onde é recomendado o emprego de argamassas com baixos módulos de elasticidade, com a finalidade de absorver as deformações da estrutura (ISHIKAWA, 2001).

Figura 4.25 – Ruptura característica dos prismas vazios com os blocos B6 - Etapa Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.26 – Ruptura característica dos prismas vazios com os blocos B12 – Etapa Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.27 – Ruptura característica dos prismas vazios com os blocos B15 – Etapa Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

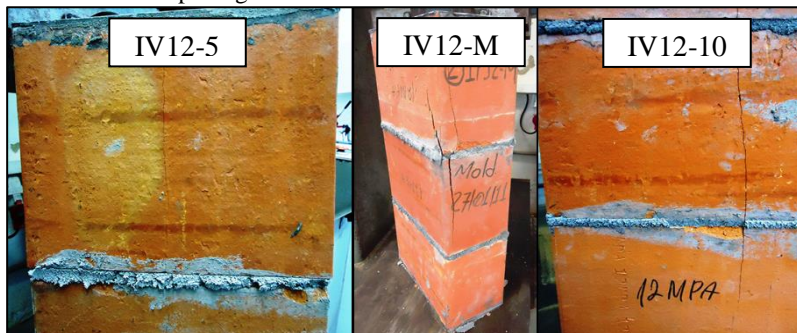
Para os prismas vazios da Etapa com Argamassa Industrializada, a forma de ruptura dos prismas também ocorreu de forma frágil, sem características explosivas, para os prismas assentados com as três classes de argamassas. Basicamente, a ruptura ocorreu de forma similar à ruptura apresentada pelos prismas vazios da Etapa Tradicional, ou seja, de forma lenta com formação de fissuras e o esmagamento da argamassa da junta em conjunto com a formação de fissuras e trincas verticais nos blocos. Na sequência, ocorreu a ruptura localizada dos blocos próxima à região da interface bloco-argamassa, levando o conjunto ao colapso (Figuras 4.28 a 4.30).

Figura 4.28 – Ruptura característica dos prismas vazios moldados com os blocos B6 – Etapa Arg. Industrial.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.29 – Ruptura característica dos prismas vazios moldados com os blocos B12 – Etapa Arg. Industrial.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.30 – Ruptura característica dos prismas vazios moldados com os blocos B15 – Etapa Arg. Industrial.



Fonte: Autor (2015).

Para a Etapa Referência, os prismas grauteados moldados com os blocos B6, grautes G2, G3 e assentados com as argamassas C (séries RG6-CG2 e RG6-CG3), apresentaram ruptura de forma frágil, sem características explosivas. Para estes prismas a ruptura ocorreu com aviso através da formação de fissuras e esmagamento da argamassa, formação acentuada de trincas verticais e rupturas localizadas nos blocos próximas a região da junta de argamassa, também entre 60% e 70% da carga de ruptura, até o colapso do conjunto, como mostra a Figuras 4.31.

Para os prismas da série RG6-CG1, moldados com o graute G1 de maior rigidez (maiores valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade), a ruptura ocorreu de forma frágil, entretanto com características explosivas, provocando o fendilhamento lateral das paredes dos blocos, indicando o aumento na tração das paredes como consequência da expansão do graute (Figura 4.31). Como o graute encontra-se confinado dentro do bloco, excedida a resistência à compressão do graute, a tensão interna gerada contra as paredes do bloco ocasiona sua ruptura por tração (HAMID e DRYSDALE, 1979; CHEEMA e KLINGNER, 1986). Como observado no Item 4.5.1.2, o enrijecimento do graute aumenta o nível de tensão sobre este, e como consequência, aumenta-se a tensão sobre as paredes do bloco, justificando este aumento na tração e o fendilhamento de suas paredes.

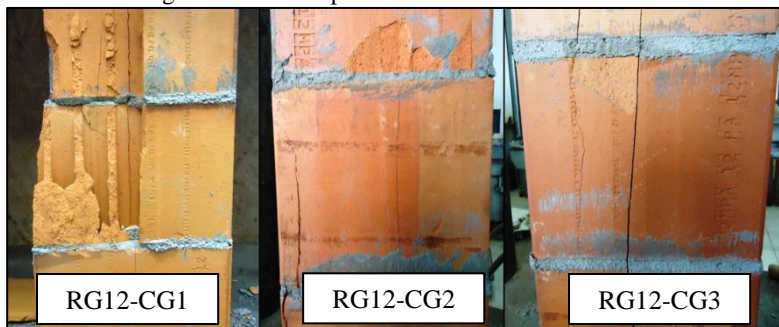
Figura 4.31 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B6 e argamassa C – Etapa Referência.



Fonte: Autor (2015).

Para as três séries de prismas moldados com os blocos B12, o comportamento foi similar ao observado para os prismas moldados com o bloco B6 (Figura 4.32).

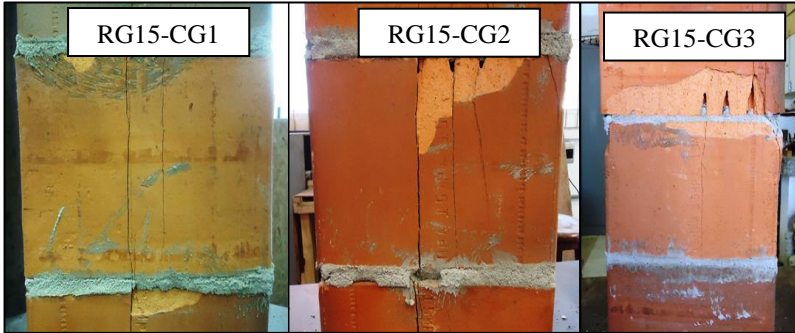
Figura 4.32 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B12 e argamassa B – Etapa Referência.



Fonte: Autor (2015).

Os prismas moldados com os blocos B15, assentados com a argamassa C e as três classes de grautes, apresentaram ruptura de forma frágil, sem características explosivas. Para estes prismas a ruptura ocorreu de forma lenta com a formação de fissuras e o esmagamento da argamassa, formação de fissuras e trincas verticais e rupturas localizadas nos blocos próximas a região da junta de argamassa, até o colapso do conjunto, como mostra a Figuras 4.33.

Figura 4.33 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B15 e argamassa C – Etapa Referência.



Fonte: Autor (2015).

Entretanto, para as séries de prismas moldados com os blocos B15, assentadas com a argamassa A e preenchidos com os grautes G1 e G2 (Figura 4.34), a ruptura também ocorreu de forma frágil e com características explosivas. Novamente, observou-se o fendilhamento lateral das paredes dos blocos, indicando aumento nas tensões contra as paredes dos blocos e nas regiões próximas à interface bloco-argamassa. Para a série RG15-AG3 a ruptura ocorreu de forma lenta, porém com a formação acentuada de trincas verticais ao longo dos blocos.

Observa-se que o enrijecimento da argamassa de assentamento e do graute, além de não aumentarem proporcionalmente os valores de resistências dos prismas (Item 4.5.1.1), provocam rupturas sem características dúcteis, comportamento este não indicado para a alvenaria estrutural. Isto é evidenciado quando comparadas as formas de rupturas das séries de prismas RG15-AG1 e RG15-CG1.

Figura 4.34 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B15 e argamassa A – Etapa Referência.



Fonte: Autor (2015).

Nas Etapas Argamassa Mista e Industrializada, todos os prismas preenchidos com argamassa apresentaram ruptura de forma frágil, sem características explosivas. Para estes prismas a ruptura ocorreu de forma lenta com a formação de fissuras e esmagamento da argamassa, formação de trincas verticais e o fendilhamento das paredes dos blocos, indicando aumento nas tensões de tração nas paredes dos blocos e nas regiões próximas à interface bloco-argamassa, em virtude da expansão do preenchimento confinado (Figuras 4.35 a 4.40). Entretanto, este comportamento acentuou-se com os prismas assentados e preenchidos com as argamassas de maior rigidez, neste caso as argamassas das classes A e 10. Isto pode ser justificado com o aumento do módulo de elasticidade dos preenchimentos, e conseqüentemente com o aumento da carga por ele absorvida (Tabela 4.32 e Tabela 4.34), aumentando-se assim o nível de tensão contra as paredes dos blocos.

Ainda, para estas duas séries de prismas, observou-se uma formação acentuada de fissuras e diminuição no esmagamento da junta, indicando aumento de tensões de tração sobre esta região. Observa-se que o enrijecimento da argamassa de assentamento e preenchimento, além de não aumentar proporcionalmente os valores de resistências dos prismas (Item 4.5.2.1), podem aumentar os níveis de tensões de tração próximos a região da junta de argamassa.

Figura 4.35 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B6 – Etapa Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.36 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B12 – Etapa Arg. Mista.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.37 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B15 – Etapa Arg. Mista.



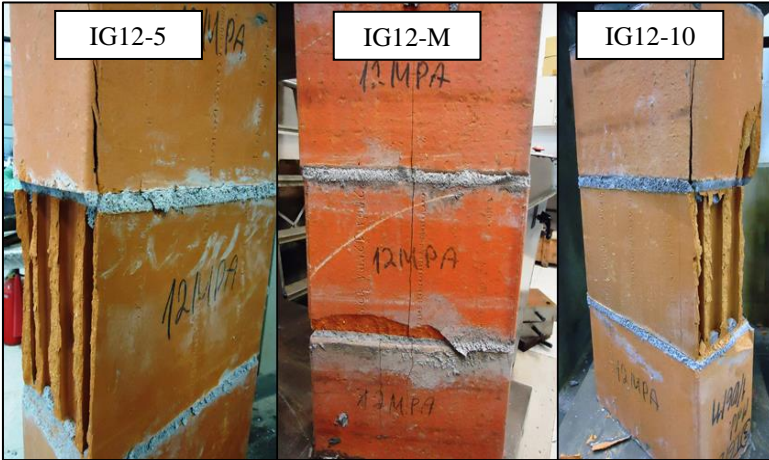
Fonte: Autor (2015).

Figura 4.38 – Ruptura característica dos prismas grauteados moldados com os blocos B6 – Etapa Arg. Industrial.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.39 – Ruptura característica dos prismas graateados moldados com os blocos B12 – Etapa Arg. Industrial.



Fonte: Autor (2015).

Figura 4.40 – Ruptura característica dos prismas graateados moldados com os blocos B15 – Etapa Arg. Industrial.



Fonte: Autor (2015).

5. ANÁLISE NUMÉRICA

A alvenaria é um material composto, formado de unidades (blocos ou tijolos) cerâmicas ou de concreto, e argamassa. Trata-se, então, de um material heterogêneo e anisotrópico, apresentando comportamento estrutural complexo e difícil de prever. Muitos trabalhos, tentando explicar esse comportamento, foram fundamentados utilizando-se conjuntamente análises experimentais e análises numéricas.

Geralmente, os modelos matemáticos utilizados para explicar o comportamento mecânico da alvenaria são equações simplificadas obtidas a partir de ajustes estatísticos dos dados experimentais, obtidos através de ensaios com prismas, mini-paredes e paredes. Entretanto, com o intuito de correlacionar melhor a interação entre os componentes da alvenaria e para o melhor entendimento do comportamento mecânico do conjunto, com o avanço dos recursos computacionais, cada vez mais vem sendo utilizado métodos numéricos, mais especificamente o Método dos Elementos Finitos (GONÇALVES JR, 2008). Em virtude de sua confiabilidade, flexibilidade e relativa facilidade de implementação computacional, o Método dos Elementos Finitos vem sendo empregado extensivamente na análise de sólidos, estruturas e a distribuição de tensões atuante nestes, sendo útil praticamente em todos os campos da engenharia.

O Método dos Elementos Finitos é um método numérico para solução de equações diferenciais, largamente utilizados por vários sistemas informatizados de cálculo para desenvolvimento de produtos, constituindo-se em uma das mais poderosas ferramentas para análise estrutural. O método tem como diretriz básica o conceito de que qualquer corpo pode ser dividido em um conjunto de elementos de dimensões finitas chamadas de elementos finitos, interligados por um número reduzido de pontos denominados nós (SORIANO, 2003). A este conjunto de elementos dá-se o nome de malha de elementos finitos. Estes elementos podem ter várias formas geométricas, definidas em função do sistema estrutural que se deseja analisar, onde associados aos recursos computacionais atuais, permitem uma maior flexibilidade na solução de problemas de engenharia.

Para que esses elementos possam se relacionar uns com os outros, é necessário que sejam interconectados por meio de pontos inseridos no contorno, chamados de pontos nodais, ou simplesmente nós. Assim, o comportamento estrutural de cada elemento pode ser dado em função

apenas dos dados nodais, tais como: coordenadas, deslocamentos e carregamentos, permitindo a montagem do sistema de equações governantes do sistema estrutural em estudo.

Na alvenaria estrutural, é de fundamental importância a escolha apropriada dos modelos matemáticos que representem seu comportamento estrutural. Estes modelos devem ser selecionados de acordo com os fenômenos a serem estudados ou do grau de precisão necessária (PELETEIRO, 2002; DIAZ et al, 2011).

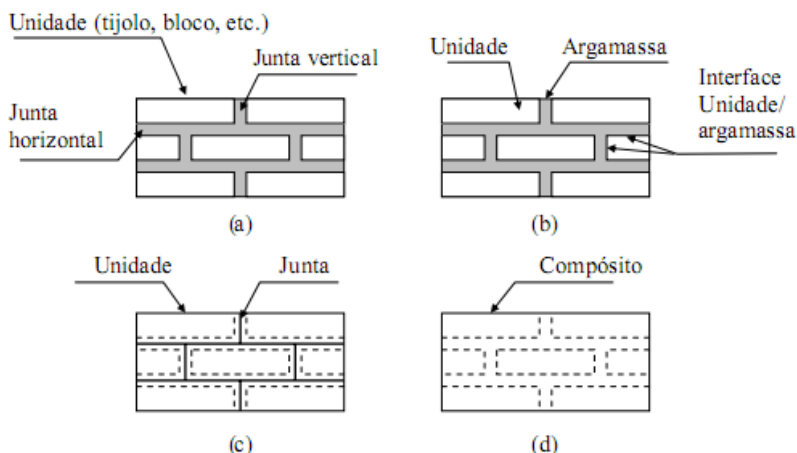
Em geral, para se efetuar uma modelagem numérica são utilizados dois modelos aproximados: a micromodelagem ou a macromodelagem. Na micromodelagem os seus componentes são discretizados individualmente, separando-se unidade e argamassa. A macromodelagem considera a alvenaria como um compósito, sem distinção entre argamassa e a unidade. Conforme Lourenço (1996), apud Peleteiro (2002), dependendo do nível de precisão e da simplicidade desejada, a alvenaria pode ser modelada numericamente de três formas distintas, conforme Figura 5.1:

a) Micromodelagem detalhada (Figura 5.1-b): os componentes, unidades e argamassa nas juntas são representados através de elementos contínuos, enquanto que a interface unidade-argamassa é representada através de elementos descontínuos. Cada material é considerado com suas características físico-mecânicas próprias, como a resistência, o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson etc.; a interface entre as unidades e a argamassa é modelada como elementos descontínuos, representando potenciais planos de fissuração e deslizamento. Este tipo de modelagem, imprescindível no estudo de detalhes estruturais, possibilita o estudo da interação entre as unidades e a argamassa, mostrando-se adequado para a verificação das tensões e deformações dos materiais.

b) Micromodelagem simplificada (Figura 5.1-c): neste modelo as unidades expandidas são representadas através de elementos contínuos, enquanto que o comportamento das juntas de argamassa e a interface unidade-argamassa são agregados em elementos descontínuos. É dado o mesmo tratamento às unidades, porém as juntas são representadas por elementos de contato. A alvenaria é modelada como um conjunto de unidades, com propriedades elásticas, unidas por elementos de contato não lineares. Essa modelagem é menos precisa que a detalhada, por necessitar de ajustes nas dimensões dos blocos em razão da não consideração da espessura das juntas e por não se considerar o coeficiente de Poisson da argamassa.

c) Macromodelagem (Figura 5.1-d): neste modelo não se tem a discretização da alvenaria em seus componentes. As unidades, a argamassa e a interface unidade-argamassa são unidas no contínuo. A alvenaria é tratada como um compósito, não se fazendo distinção entre blocos e argamassa (homogeneização). É apropriado para a análise de estruturas de grande escala, em que as dimensões do painel de alvenaria são grandes em relação às dimensões das unidades e da espessura das juntas, que se trabalha com os parâmetros elásticos da alvenaria como um conjunto.

Figura 5.1 - Estratégias de modelagem para estruturas de alvenaria: (a) alvenaria; (b) micromodelagem detalhada; (c) micromodelagem simplificada; (d) macromodelagem.



Fonte: adaptado de Lourenço (1996).

Peleteiro (2002) em seu estudo agrupou as vantagens e desvantagens dos diferentes modelos discretos e homogeneizados utilizados por outros pesquisadores, conforme Tabela 5.1. De acordo com a autora, não é possível afirmar qual das formas de modelagem é mais vantajosa em relação às outras, porque cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens para estudos específicos. A escolha deve ser feita de acordo com o objetivo a ser alcançado. Enquanto que o estudo da micromodelagem é necessário para fornecer um bom entendimento sobre o comportamento local das estruturas de alvenaria, a macromodelagem é mais adequada para análises mais gerais de estrutura,

como projeto de edifícios, principalmente quando se está estudando paredes sólidas com dimensões grandes o suficiente para garantir distribuições de tensões bastante uniformes. Esta característica torna a macromodelagem mais prática, apresentando um tempo de processamento reduzido e uma geração de malhas mais simples.

Tabela 5.1 – Vantagens e desvantagens dos modelos discretos e homogeneizados.

Modelo	Vantagens	Desvantagens
Modelo discreto com comportamento linear isotrópico.	Bons resultados em estruturas submetidas a baixos níveis de tensão.	Não adequado para casos em que as tensões são altas e onde é necessária uma análise de redistribuição de tensões.
Modelo homogeneizado com comportamento linear ortotrópico.	Adequado para estudo do comportamento global da estrutura. Com vantagem de uma modelagem mais simples e um tempo de processamento menor que o modelo discreto.	O modelo não é capaz de identificar picos de tensões em regiões localizadas, sendo que o modelo discreto consegue determinar.
Modelo homogeneizado com comportamento não linear do material.	Apresenta bons resultados em termos de comportamento global e determinação de carga de ruptura.	O modelo não é capaz de representar alguns mecanismos básicos de ruptura da alvenaria, como por exemplo, a fissuração nas juntas e unidades e o escorregamento das juntas.
Modelo discreto com comportamento elástico-linear para unidades e elemento de ligação não linear nas juntas.	Modelagem apropriada com vantagem de determinação das características do material através de ensaios uniaxiais.	Não considera a fissuração e a não linearidade da unidade. Não é capaz de determinar a ruptura da estrutura, quando fortemente influenciada pela ruptura das unidades.
Modelo discreto com características de deformação não linear para a argamassa e a unidade, critério para ruptura da unidade, da argamassa e da junta.	A idealização proposta é capaz de representar o comportamento nas estruturas em alvenaria, determinando a carga inicial de fissuração, a carga última e o padrão de ruptura com boa precisão.	São necessários ensaios complexos de caracterização das unidades, da argamassa e de amostras de paredes.
Modelo de fissuras discretas considerando-se as propriedades não lineares dos materiais.	Mais apropriado para a análise de painéis submetidos a forças concentradas.	Apresenta custo computacional elevado.
Modelo de fissuras espalhadas considerando o comportamento não linear dos componentes.	Bons resultados na determinação da força última de ruptura e no padrão de ruptura dos painéis. Tempo de processamentos mais baixo.	Podem aparecer tensões de travamento e os resultados devem ser analisados com cuidado devido à dependência da dimensão da malha de elementos finitos.

Fonte: (PELETEIRO, 2000).

5.1. NÃO LINEARIDADE DOS MATERIAIS

Além da escolha adequada da modelagem (micro ou macro), para a melhor representação do problema que se pretende investigar, outro parâmetro deve ser considerado com a utilização da análise numérica por elementos finitos da alvenaria estrutural. Trata-se do regime no qual se pretende analisar o comportamento da alvenaria, ou seja, regime elástico-linear ou não linear. Inicialmente, nos trabalhos desenvolvidos, era feita apenas uma análise elástico-linear, com as propriedades elásticas dos materiais ajustados pelos resultados experimentais. Era raro encontrar um modelo matemático não linear aplicado à prismas e/ou paredes de alvenaria, onde o comportamento mecânico dos materiais tenha recebido um tratamento matemático mais adequado ao seu comportamento real (GOMES, 2001).

O modelo elástico-linear era aceito e utilizado universalmente, em razão da simplicidade de seu equacionamento, porém ele não representava fielmente o comportamento real da estrutura (SILVA JR et al, 2010).

Entretanto, após o surgimento e aprimoramento dos computadores, pesquisadores desenvolveram modelos que possam melhor representar os sistemas estruturais, bem como os materiais que os compõem. Assim, a utilização de modelos não lineares tem sido alvo de muitas pesquisas, porém essa consideração leva a um equacionamento matemático bastante complexo, mas que, com a utilização de computadores e métodos numéricos apropriados, tornam a utilização desses modelos plenamente viáveis. Segundo Gomes (2001), a análise não linear é extremamente útil para obter a resposta estrutural completa do comportamento da alvenaria, desde o início do processo de carregamento quando o corpo ainda está no regime elástico-linear até a ruptura final, passando estágios intermediários em que o corpo está fissurando e/ou há esmagamentos localizados.

De uma forma geral, conforme exposto por Gomes (2001), é possível distinguir três tipos de não linearidade: a não linearidade geométrica, a não linearidade física ou do material e a não linearidade de estado.

Segundo o pesquisador, a não linearidade geométrica ocorre sempre que os deslocamentos e/ou deformações sejam suficientemente significativos para que a configuração inicial não possa mais ser utilizada para exprimir as condições de equilíbrio e compatibilidade. Os materiais utilizados na alvenaria apresentam comportamento frágil (bloco cerâmico, argamassa e graute), deformando-se muito pouco

durante o processo de carregamento. Assim, os deslocamentos e/ou deformações são suficientemente pequenos para que a diferença entre a configuração inicial e deformada seja desprezível.

Quando as alterações das condições de contorno ou de aplicação de cargas são suficientes para mudar significativamente o estado de tensões no corpo analisado, tem-se a não linearidade de estado. Entretanto este feito é, normalmente, desprezado.

Finalmente, a não linearidade física ou do material é a mais comum e ocorre quando as leis constitutivas (ou diagramas tensão-deformação) dos materiais são não lineares. Neste tipo de não linearidade é possível ter muitas subdivisões: a teoria da plasticidade, onde as leis constitutivas não lineares são levadas em conta; a viscoplasticidade, onde além das leis constitutivas não lineares, as propriedades mecânicas dos materiais dependem do tempo; materiais hiperelásticos, como a borracha, por exemplo, e modelos que representam a baixa resistência à tração dos materiais frágeis por meio de rupturas localizadas no corpo (fissuras), como os modelos de fissuração distribuída e discreta.

Para materiais com baixa resistência à tração, como blocos cerâmicos, argamassas e concreto, um dos critérios de ruptura mais adequado para representar o comportamento não linear destes materiais é o Critério de Mohr-Coulomb, critério este adotado neste trabalho.

O Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb, é uma generalização da equação de ruptura proposta por Coulomb, e definida por:

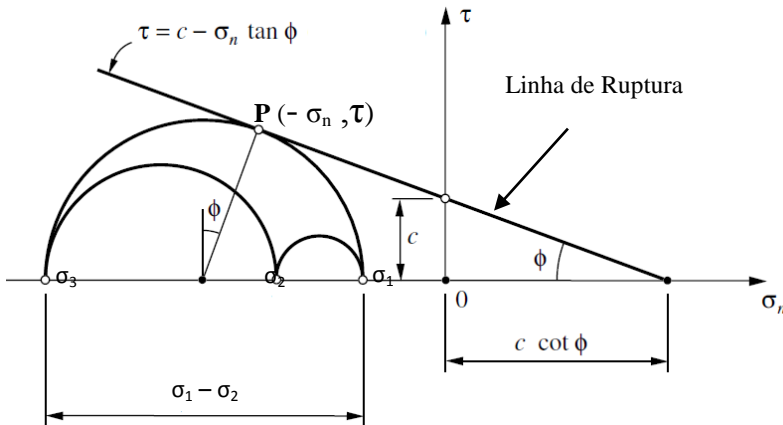
$$\tau = c - \sigma_n \tan \phi \quad (5.1)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, σ_n a tensão normal, c a coesão e ϕ o ângulo de atrito interno do material. Os dois parâmetros do material, c e ϕ , são determinados a partir de ensaios de compressão triaxial, levando o material até a condição de ruptura.

Graficamente, o critério é representado por uma reta tangente ao maior círculo formado pelas tensões principais (linha de ruptura), conforme ilustra a Figura 5.2.

Pela Figura 5.2, quando o par de tensões $P(-\sigma_n, \tau)$ atuantes em um ponto qualquer do material situarem-se sobre tal reta (linha de ruptura), ocorrerá a ruptura do material. Sendo que o domínio elástico para este material, de acordo com o critério de Mohr-Coulomb, é definido por qualquer círculo de Mohr que não toque (tangencie) a reta que define o critério de ruptura.

Figura 5.2 – Critério de Mohr-Coulomb no plano.



Fonte: adaptado de SOUZA NETO *et al* (2008).

De acordo com a figura, a equação 5.1 pode ser escrita em função das tensões principais:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi = 2c - [(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi] \tan \phi \quad (5.2)$$

Reescrevendo a equação 5.2, tem-se:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi = 2c \cos \phi \quad (5.3)$$

Assim, a equação expressa em função das tensões principais e definida pelo critério de Mohr-Coulomb pode ser escrita como:

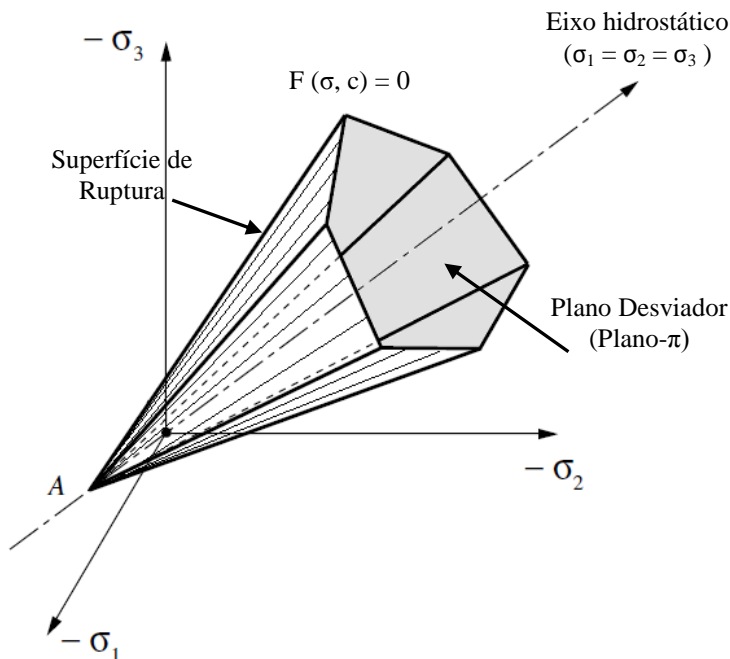
$$F(\sigma, c) = (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - 2c \cos \phi \quad (5.4)$$

Essa equação indica que há ruptura do material, quando a tensão de cisalhamento em um determinado plano ultrapassa a resistência a deslizamento originada de duas parcelas: uma proveniente da referida coesão do material, outra vinda de uma fração da tensão normal atuante nesse mesmo plano.

Graficamente, a equação 5.4 representa a superfície de ruptura dada por uma pirâmide hexagonal irregular (Figura 5.3), no plano das tensões principais. A seção transversal desta pirâmide denominada plano

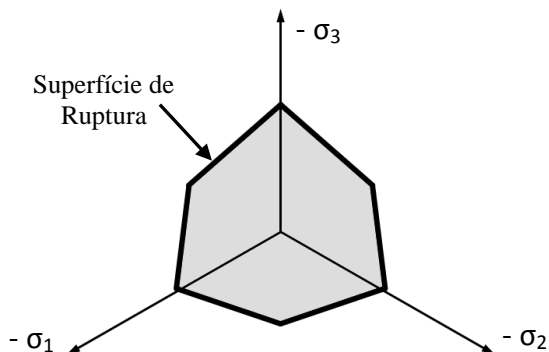
desviador ou Plano- π , dada quando $F(\sigma, c) = 0$ e c constante, é representada como mostra a Figura 5.4.

Figura 5.3 - Representação gráfica da superfície de ruptura do critério de Mohr-Coulomb no espaço das tensões principais.



Fonte: adaptado de SOUZA NETO *et al* (2008).

Figura 5.4 - Representação gráfica da superfície de ruptura no plano desviador.



Fonte: adaptado de SOUZA NETO *et al* (2008).

A equação 5.4 ainda pode ser escrita de uma forma alternativa (equação 5.5) em função de invariantes de tensões (I_1 , J_2 , θ) (Chen e Liu, 1990). Onde I_1 representa o primeiro invariante do tensor das tensões e é definido pela equação 5.6, J_2 o segundo invariante do tensor desviador dado pela equação 5.7, sendo que θ é o ângulo de Lode escrito em função dos invariantes de tensão J_2 e J_3 , e dado pela equação 5.8.

$$F(I_1, J_2, \theta) = \frac{I_1}{3} \text{sen} \phi + \sqrt{J_2} \text{sen}(\theta + 60^\circ) + \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{J_2} \text{sen} \phi \cdot \cos(\theta + 60^\circ) - c \cdot \cos \phi \quad (5.5)$$

Onde:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (5.6)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (5.7)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \text{sen}^{-1} \left(\frac{-3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \quad (5.8)$$

$$J_3 = \frac{2}{27} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - \frac{1}{9} [\sigma_1^2 (\sigma_2 + \sigma_3) + \sigma_2^2 (\sigma_1 + \sigma_3) + \sigma_3^2 (\sigma_1 + \sigma_2)] + \frac{4}{9} \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \quad (5.9)$$

Um modelo plástico é considerado de endurecimento isotrópico se a evolução da superfície de ruptura é tal que, para um estado de endurecimento, corresponda a uma expansão uniforme (isotrópica) da superfície de ruptura inicial. Para um modelo de plasticidade multiaxial com uma superfície de ruptura de Mohr-Coulomb, o endurecimento isotrópico corresponde a um aumento da seção transversal indicada na Figura 5.4. O controle do endurecimento isotrópico é, na prática, efetuado através da curva tensão-deformação extraída de ensaio de compressão uniaxial. Para a análise adotada neste trabalho, utilizou-se o endurecimento isotrópico associado ao critério de Moh-Coulomb Parabólico, pois era a única opção implementada no programa Marc Mentat.

Ainda, na aplicação do critério de Mohr-Coulomb para materiais cerâmicos, o ângulo de atrito interno e a coesão podem ser definidos em função da resistência a compressão (f_c) e a resistência à tração do material (f_t), obtidas por meio de ensaio de compressão simples e de tração simples, respectivamente, conforme as Equações 5.10 e 5.11 (SOUZA NETO et al, 2008).

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{f_c - f_t}{f_c + f_t} \right) \quad (5.10)$$

$$c = \frac{f_c f_t}{f_c - f_t} \tan \phi \quad (5.11)$$

Onde se tem que f_c representa a resistência à compressão uniaxial e f_t a resistência à tração uniaxial.

5.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A realização desta análise teve por objetivo compreender a distribuição das tensões desenvolvidas nos prismas e a influência da argamassa utilizada como preenchimento no desempenho mecânico dos modelos de prismas avaliados. A adoção de um modelo numérico parte habitualmente da consideração de que os seus resultados podem ser determinísticos e não probabilísticos, ou seja, as propriedades mecânicas são tomadas como médias, sem considerar a variabilidade. Não se pretende nesta análise a propositura de um modelamento numérico verificado pelo programa experimental, mas que os resultados da modelamento numérico utilizando as propriedades mecânicas dos materiais dos prismas obtidos no programa experimental, forneçam informações qualitativas e comportamentais da estrutura em análise. Basicamente, a intenção deste estudo é a obtenção de um modelo capaz de simular numericamente o ensaio de compressão em prismas, por meio de um modelo constitutivo usando a teoria de plasticidade. Como o modelamento numérico é sempre uma representação simplificada de um fenômeno físico complexo, é necessário simplificar este modelo para que este forneça resultados dentro de uma precisão considerada aceitável (GOMES, 2001).

Para este trabalho, desprezaram-se a não linearidade de estado e de geometria a partir da consideração de que os deslocamentos e/ou deformações são pequenos o suficiente para que a diferença entre a configuração inicial e deformada seja desprezível.

A única não linearidade considerada relevante foi a não linearidade física ou de material, visto que os prismas, composto por materiais cerâmicos, foram analisados até a sua ruptura.

Para a simulação numérica optou-se pelo uso do aplicativo Marc-Mentat 2012, pois este aplicativo computacional atende aos requisitos necessários e está acessível através de um trabalho em conjunto com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), que possui a licença de uso do programa.

Assim, para esta etapa do trabalho realizou-se a simulação somente para os prismas MG6-A, MG6-B e MG6-B. A escolha destas séries de prismas ocorreu em virtude da ocorrência do aumento significativo da capacidade de carga para os prismas preenchidos com as argamassas B e C, conforme observado nos resultados da Etapa Argamassa Mista do programa experimental, em contraste com o observado para os prismas MG6-A, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Efeito relativo da capacidade de carga dos prismas preenchidos .

Prismas		F (calculado)	F α (crítico)	Conclusão	Efeito Relativo (%)	
Bloco B6	MV6-A	MG6-A	1,151	2,306	F < F α (Não Há Diferença)	+ 8,6
	MV6-B	MG6-B	2,750	2,306	F > F α (Há Diferença)	+ 22,2
	MV6-C	MG6-C	8,299	2,306	F > F α (Há Diferença)	+ 61,0

Fonte: Autor (2015).

O modelo geométrico elaborado consistiu em uma representação verossímil do corpo de prova, ou seja, com todos os furos e recortes existentes nas unidades cerâmicas, com a espessura da camada de argamassa executada entre as unidades e com a geometria assumida pelos grautes (Figura 5.5), resultando em uma malha de elementos finitos densa. Em outras palavras, para a realização desta análise foi adotada a micromodelagem detalhada. Porém, nesses modelos não foi considerado o comportamento das interfaces bloco-argamassa e bloco-graute, ou seja, considerou-se a perfeita aderência entre os elementos. Optou-se por esta simplificação em razão da falta de dados experimentais e tempo disponível para a sofisticação do modelo.

Considerando-se como modelo o conjunto de dados que o usuário deve preparar para descrever completamente as características do problema a ser analisado, as etapas para a geração do modelo foram as seguintes:

1 – Inicialmente foi definida a seção transversal dos blocos, sendo utilizado para esse processo o programa AutoCAD 2012.

2 – Em seguida, transformou-se a seção transversal do bloco em uma única região para a inserção da malha de elementos finitos. Neste processo foi utilizado o programa GID 11.1.

3 – Finalizado esta etapa, na sequência, foi realizada a inserção da malha de elementos finitos utilizando o programa PATRAN.

Estas etapas iniciais foram realizadas nestes três programas em consequência da dificuldade encontrada para a geração da malha com o programa que utilizado para o processamento e análise de resultados, neste caso o programa Marc Mentat 2012.

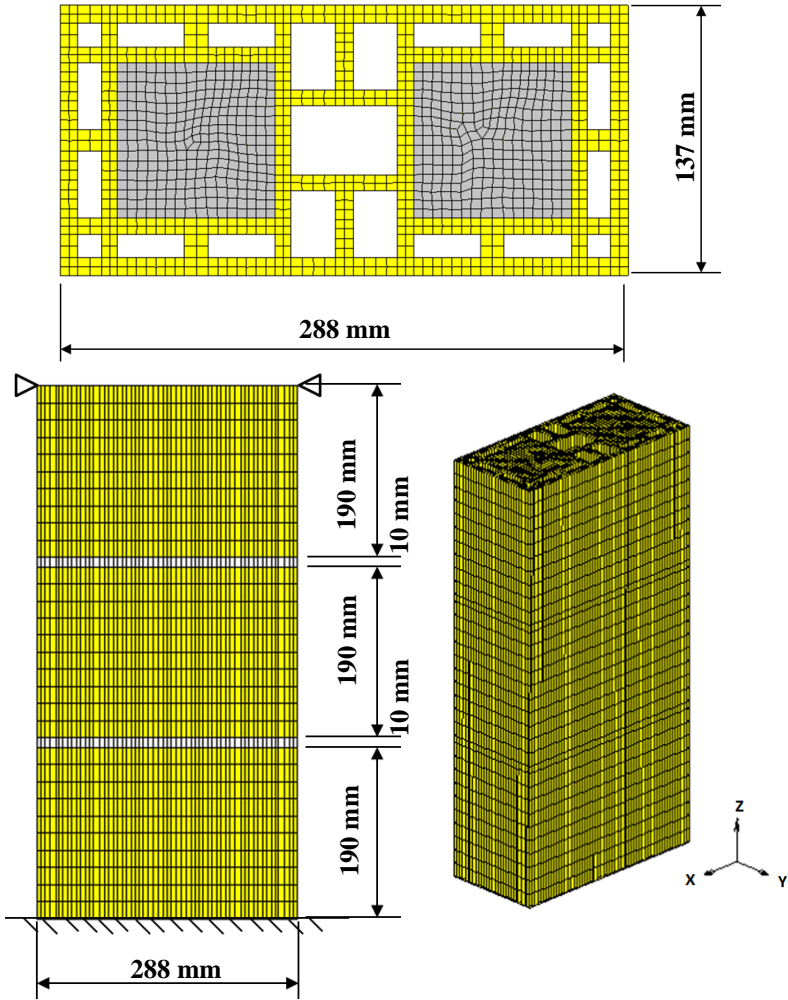
4 – Já com a seção transversal do bloco com as malhas definidas, esta foi inserida no programa Marc Mentat 2012 para a geração do modelo tridimensional dos prismas. Para isto foi usado um artifício que o programa dispõe para extrudar elementos de superfície transformando-os em elementos sólidos. Com essa ferramenta foi possível modelar o bloco o mais próximo da geometria real. Dessa forma, foram introduzidos os elementos sólidos hexaédricos de oito nós.

5 – Na sequência utilizou-se a ferramenta de cópia dos elementos, fazendo assim o conjunto de três blocos (unidades) ligados pelas duas juntas de argamassa, dando a forma geométrica desejada para os prismas (Figura 5.5).

6 – Com o prisma e componentes todos discretizados, fez-se necessária a definição das propriedades mecânicas dos elementos constituintes (bloco cerâmico, argamassa e graute).

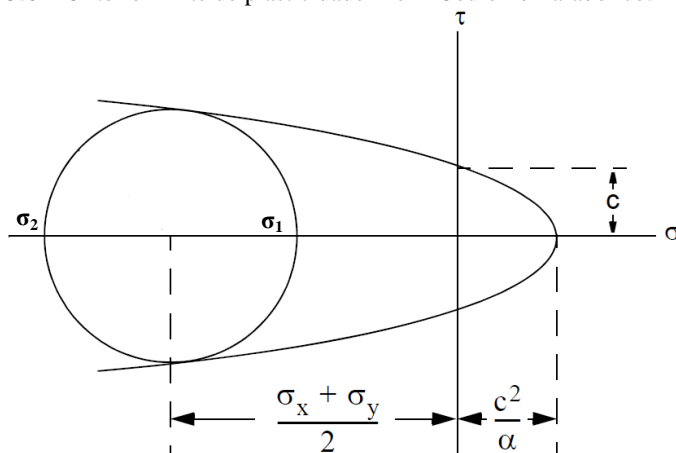
Para a cerâmica que compõe o bloco e a argamassa da junta e preenchimento empregou-se o modelo de material não linear apresentado pelo programa Marc Mentat 2012, onde as condições limite de plasticidade utilizada são estabelecidas pelo critério de Mohr-Coulomb Parabólico (Figura 5.6). Este modelo parabólico apresentado pelo programa é uma alternativa ao modelo de Mohr-Coulomb Linear e sua escolha ocorreu por causa dos melhores resultados terem sido obtidos com a utilização deste modelo para o problema estudado.

Figura 5.5 – Características geométricas dos prismas.



Fonte: Autor (2015).

Figura 5.6 – Critério limite de plasticidade Mohr-Coulomb Parabólico.



Fonte: Manual do usuário do Marc Mentat (2012).

A equação que descreve a superfície que representa o critério de Mohr-Coulomb Parabólico encontra-se abaixo:

$$F = (3.J_2 + \sqrt{3}.\beta.\bar{\sigma}.I_1)^{1/2} - \bar{\sigma} = 0 \quad (5.12)$$

Onde I_1 representa o primeiro invariante do tensor das tensões (equação 5.6), J_2 o segundo invariante do tensor desviador (equação 5.7), e σ e β são definidas pelas seguintes equações:

$$\bar{\sigma}^2 = 3\left(c^2 - \frac{\alpha^2}{3}\right) \quad (5.13)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{(3(3c^2 - \alpha^2))^{1/2}} \quad (5.14)$$

Onde:

$$\alpha = c \tan \phi \quad (5.15)$$

Os valores de c (coesão) e de ϕ (ângulo de atrito interno) foram determinados com as equações 5.10 e 5.11, utilizando os valores de resistência à compressão uniaxial dos materiais, obtidos no programa experimental. Sabe-se que as propriedades não lineares dos materiais (coesão e ângulo de atrito interno) são determinadas em ensaios de compressão triaxiais. Entretanto, em virtude da indisponibilidade do equipamento para este ensaio, as propriedades não lineares dos materiais

foram estabelecidas considerando o estado de tensão uniaxial, ou seja, os valores obtidos no programa experimental.

Ainda, as características não lineares utilizadas para cada modelo foram ajustadas de forma a ter uma tensão vertical última próxima ao valor de ruptura dos prismas do programa experimental. Estas características também foram ajustadas para a obtenção de diagramas tensão-deformação, gerados com os modelos numéricos, próximos aos diagramas obtidos experimentalmente com os prismas. Em síntese, a calibração do modelo numérico teve como referência o diagrama tensão-deformação obtida experimentalmente e a carga de ruptura dos prismas, na área líquida ($f_{p\text{liq}}$).

Assim, as características mecânicas lineares e não lineares dos materiais empregados na simulação encontram-se nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 – Características mecânicas lineares dos materiais.

Componente	E (MPa)	ν
Bloco B6	8243,9	0,05
Argamassa A	12554,2	0,17
Argamassa B	7120,1	0,14
Argamassa C	2529,6	0,14

Fonte: Autor (2015).

Tabela 5.4 – Características mecânicas não lineares dos materiais.

Componente	ϕ	c (MPa)
Bloco B6	54,30°	0,80
Argamassa A	32,12°	1,11
Argamassa B	29,12°	0,60
Argamassa C	24,22°	0,32

Fonte: Autor (2015).

7 – A vinculação do prisma foi baseada no equipamento de ensaio disponível (prensa SHIMADZU) no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), em que o carregamento é aplicado no topo do corpo-de-prova (de cima para baixo). Logo, na base do modelo foram restringidos os deslocamentos em x, y e z. No topo do modelo foram restringidas as translações somente em x e y deixando a translação em z livre para a aplicação da carga.

8 – O carregamento imposto no topo do modelo foi definido a partir da média da resistência à compressão dos prismas rompidos no

programa experimental. Neste caso, as resistências médias à compressão, na área líquida, das séries de prismas analisadas ($f_{p_{liq}}$).

Logo, a tensão de compressão aplicada nos modelos foi de 20 MPa, valor este aproximadamente igual ao dobro do valor de tensão, na área líquida, obtida na ruptura dos prismas, conforme constatado nos ensaios experimentais.

A inserção do carregamento foi feita como carga de superfície nos elementos situados no topo do modelo. O carregamento foi aplicado no topo do modelo, em função do tipo de aplicação de carga do equipamento onde foram realizados os ensaios de ruptura dos prismas no programa experimental.

5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

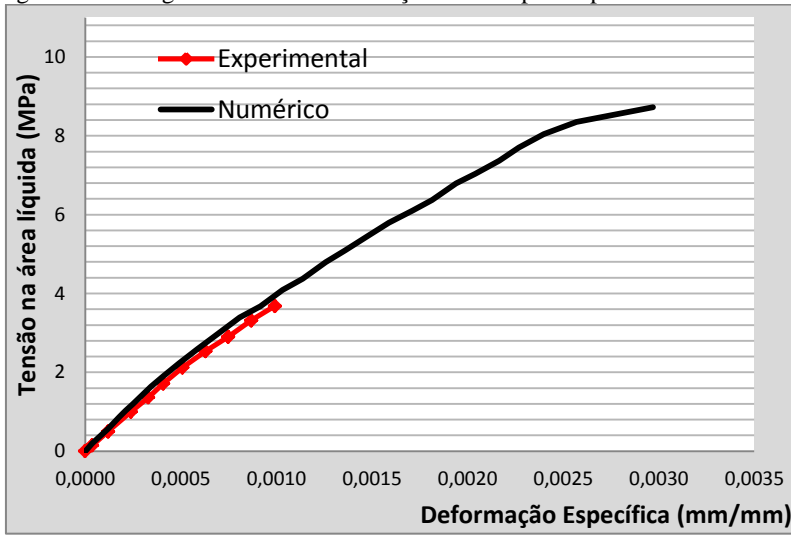
A simulação numérica utiliza elementos sólidos hexaédricos de oito nós, com uma malha de 41856 elementos, totalizando em 19984 nós.

5.3.1. Resultados para o prisma MG6-C

Abaixo, na Figura 5.7, encontra-se a comparação entre o diagrama tensão-deformação do prisma MG6-C, obtido experimentalmente e com a simulação numérica. Ressalta-se que a determinação do diagrama tensão-deformação, obtido experimentalmente, foi realizado até a carga referente a 50% da tensão de ruptura dos prismas, em virtude da capacidade da célula de carga utilizada, e também assim evitando-se possíveis danos aos equipamentos utilizados no ensaio. Após a determinação do diagrama tensão-deformação, obtido com o programa, foram extraídas uma série de informações do prisma simulado, para a melhor compreensão dos resultados obtidos com o programa experimental.

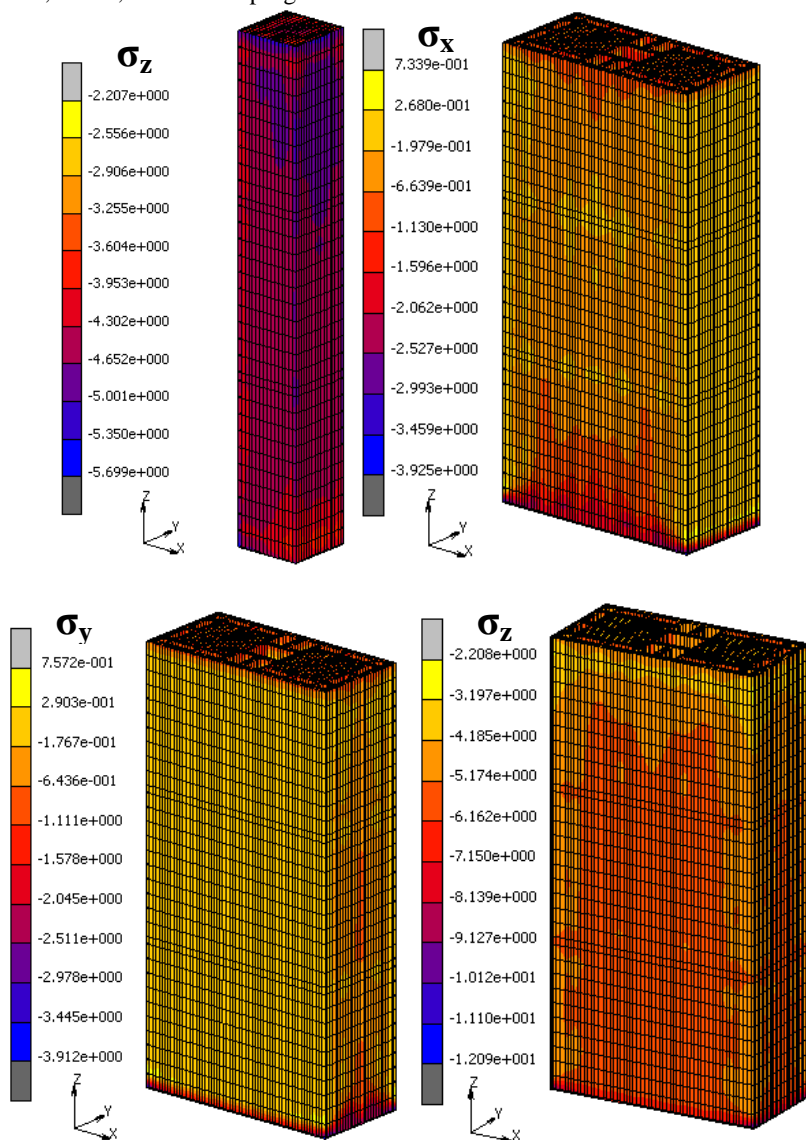
Assim, nas Figuras 5.8 e 5.9 mostra-se a distribuição de tensões para o graute na direção z (σ_z), para os prismas na direção x (σ_x), direção y (σ_y) e direção z (σ_z), para os carregamentos incrementais de 4,7 MPa (valor intermediário) e 8,7 MPa. Este último valor corresponde ao valor aproximado para a resistência à compressão na área líquida, de 9,3 MPa, obtida experimentalmente para o prisma MG6-C.

Figura 5.7 – Diagramas tensão-deformação obtidos para o prisma MG6-C.



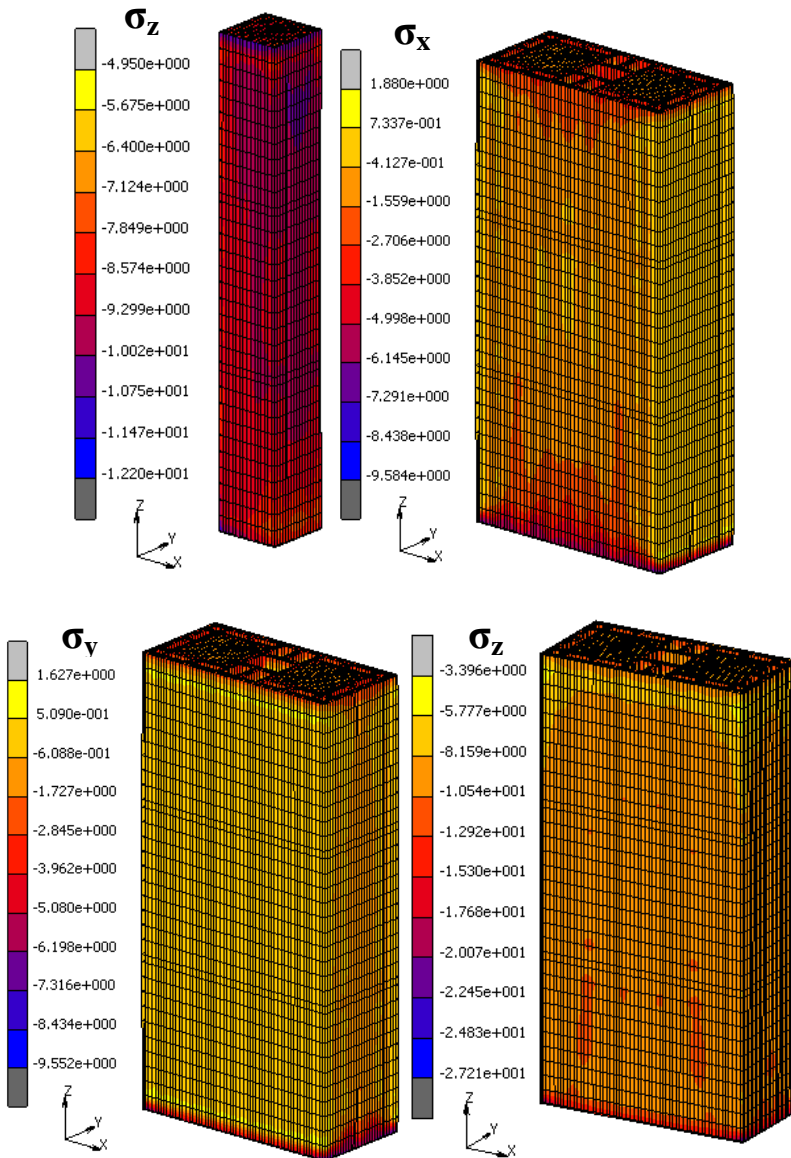
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.8 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-C e o graute para carga de 4,3 MPa, extraída do programa Marc Mentat.



Fonte: Autor (2015).

Figura 5.9 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-C e o graute para carga de 8,7 MPa, extraída do programa Marc Mentat.



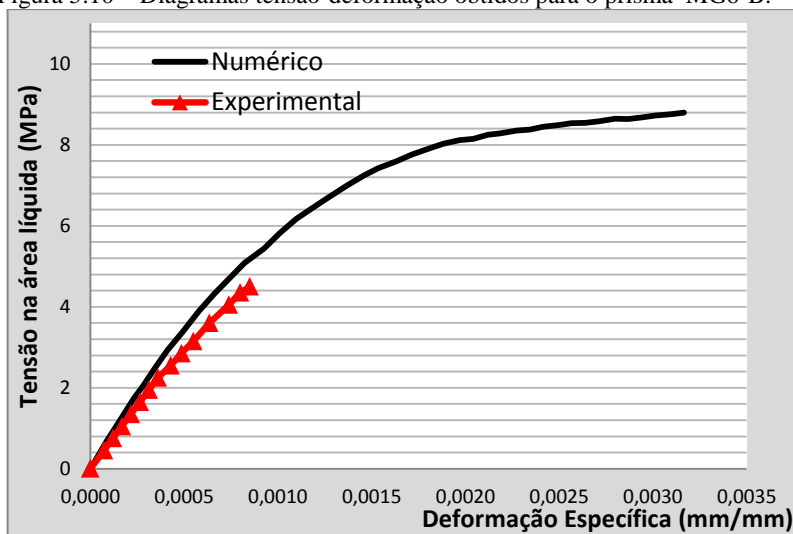
Fonte: Autor (2015).

5.3.2. Resultados para o prisma MG6-B

Na Figura 5.10, encontra-se a comparação entre o diagrama tensão-deformação do prisma MG6-B, obtido experimentalmente e com a simulação numérica. Para esta série de primas, o diagrama tensão-deformação obtido experimentalmente também foi determinado até 50% da carga de ruptura dos prismas.

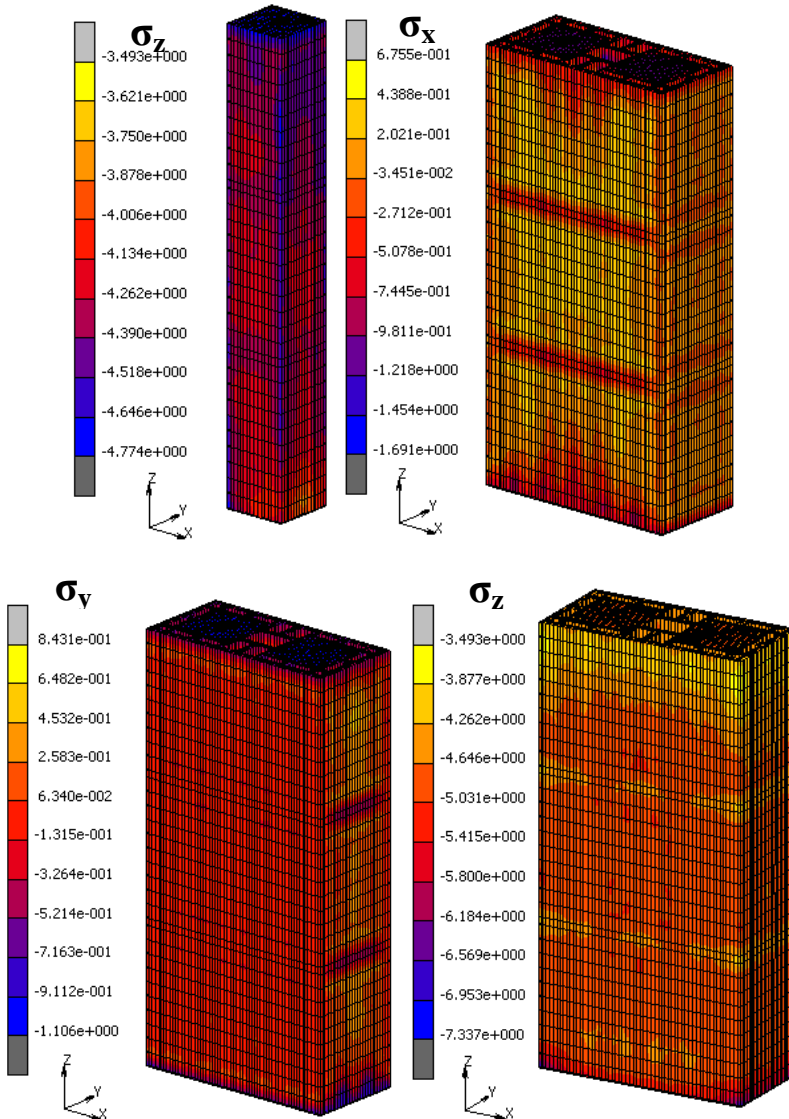
Assim, as Figuras 5.11 e 5.12 mostra-se a distribuição de tensões para o grautes na direção z (σ_z), para os prismas na direção x (σ_x), direção y (σ_y) e direção z (σ_z), para os carregamentos incrementais de 4,7 MPa (valor intermediário) e 8,7 MPa. Este último valor corresponde ao valor aproximado para a resistência à compressão na área líquida, de 9,2 MPa, obtida experimentalmente para o prisma MG6-B.

Figura 5.10 – Diagramas tensão-deformação obtidos para o prisma MG6-B.



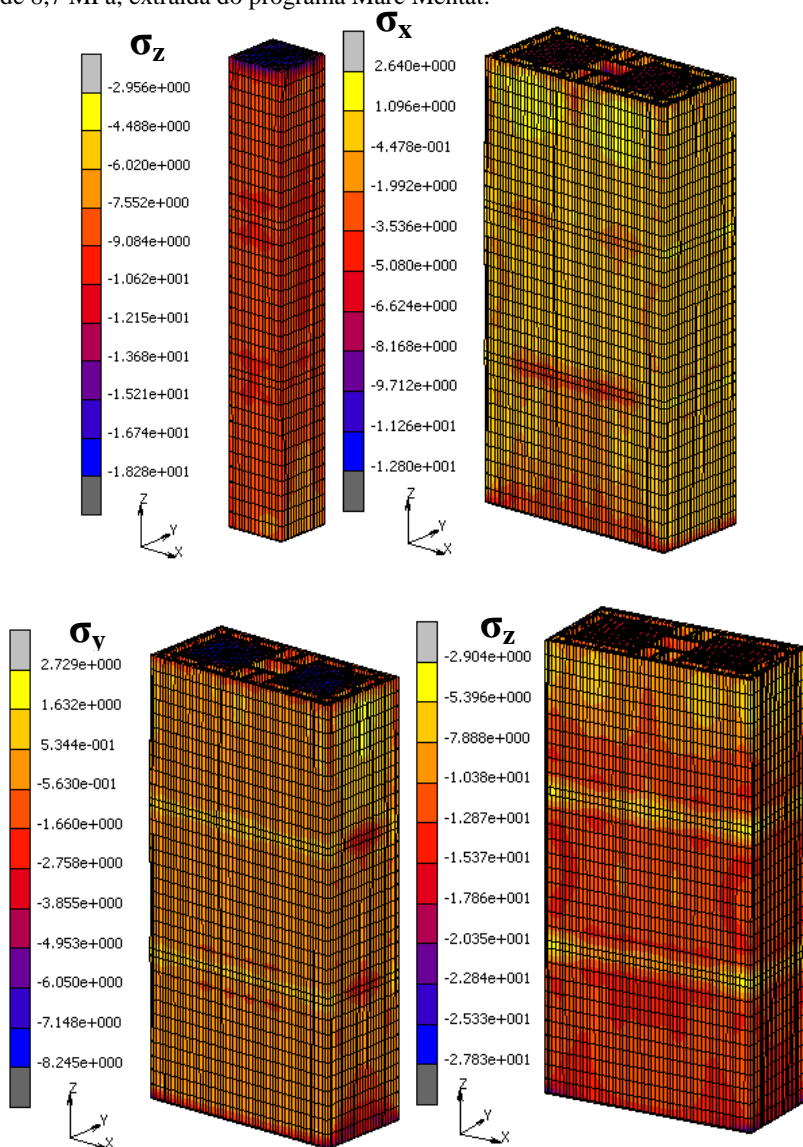
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.11 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-B e o graute para carga de 4,3 MPa, extraída do programa Marc Mentat.



Fonte: Autor (2015).

Figura 5.12 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-B e o graute para carga de 8,7 MPa, extraída do programa Marc Mentat.



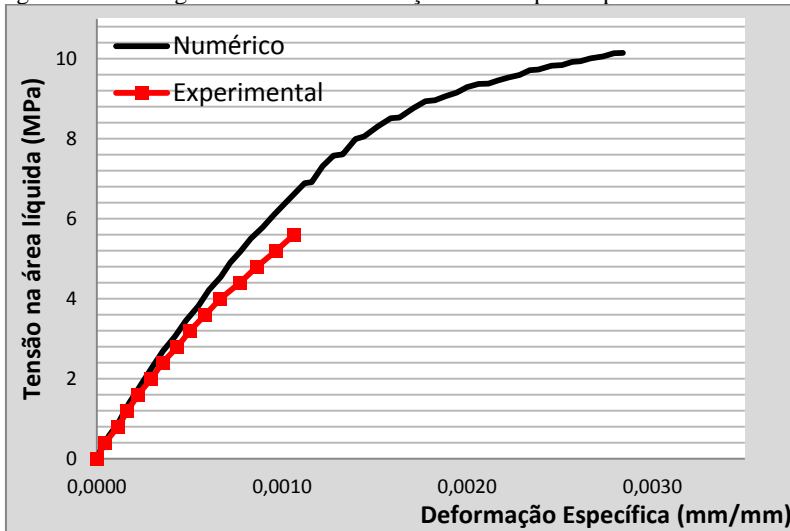
Fonte: Autor (2015).

5.3.3. Resultados para o prisma MG6-A

Na Figura 5.13, encontra-se a comparação entre o diagrama tensão-deformação do prisma MG6-A, obtido experimentalmente e com a simulação numérica. Com realizado com as séries de prismas anteriores, o diagrama tensão-deformação obtido experimentalmente também foi determinado até 50% da carga de ruptura dos prismas.

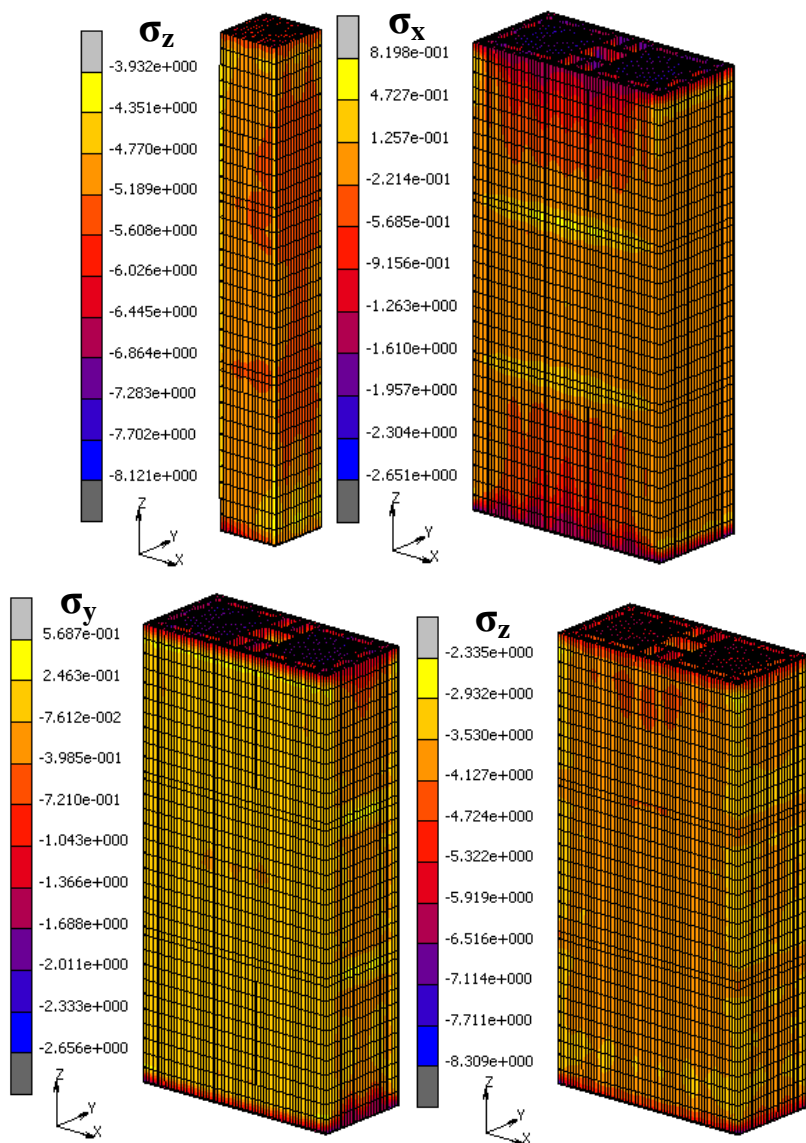
Assim, as Figuras 5.14 e 5.15 mostra-se a distribuição de tensões para o grautes na direção z (σ_z), para os prismas na direção x (σ_x), direção y (σ_y) e direção z (σ_z), para os carregamentos incrementais de 4,7 MPa, 8,7 MPa e 10,1 MPa; sendo os dois primeiros valores de tensão, os mesmo analisados para os prismas MG6-B e MG6-C. Este último valor corresponde ao valor aproximado para a resistência à compressão na área líquida, de 10,7 MPa, obtido experimentalmente para o prisma MG6-A.

Figura 5.13 – Diagramas tensão-deformação obtidos para o prisma MG6-A.



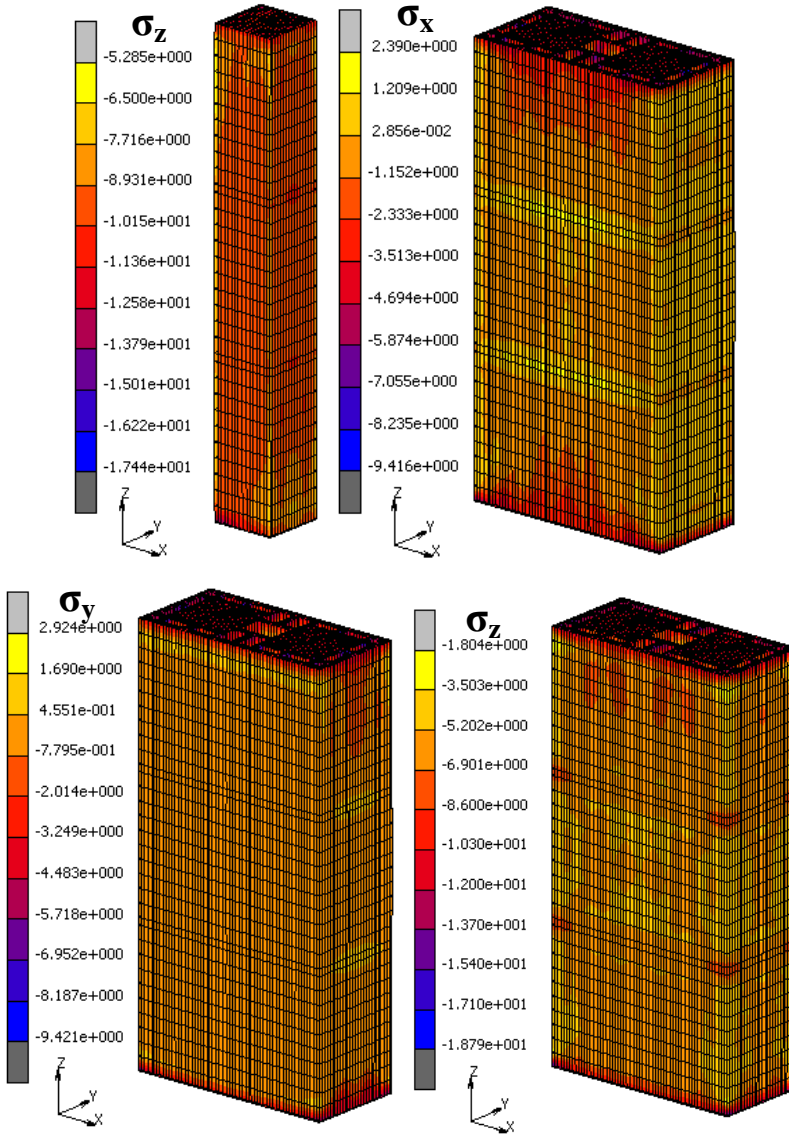
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.14 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-A e o graute para carga de 4,3 MPa, extraída do programa Marc Mentat.



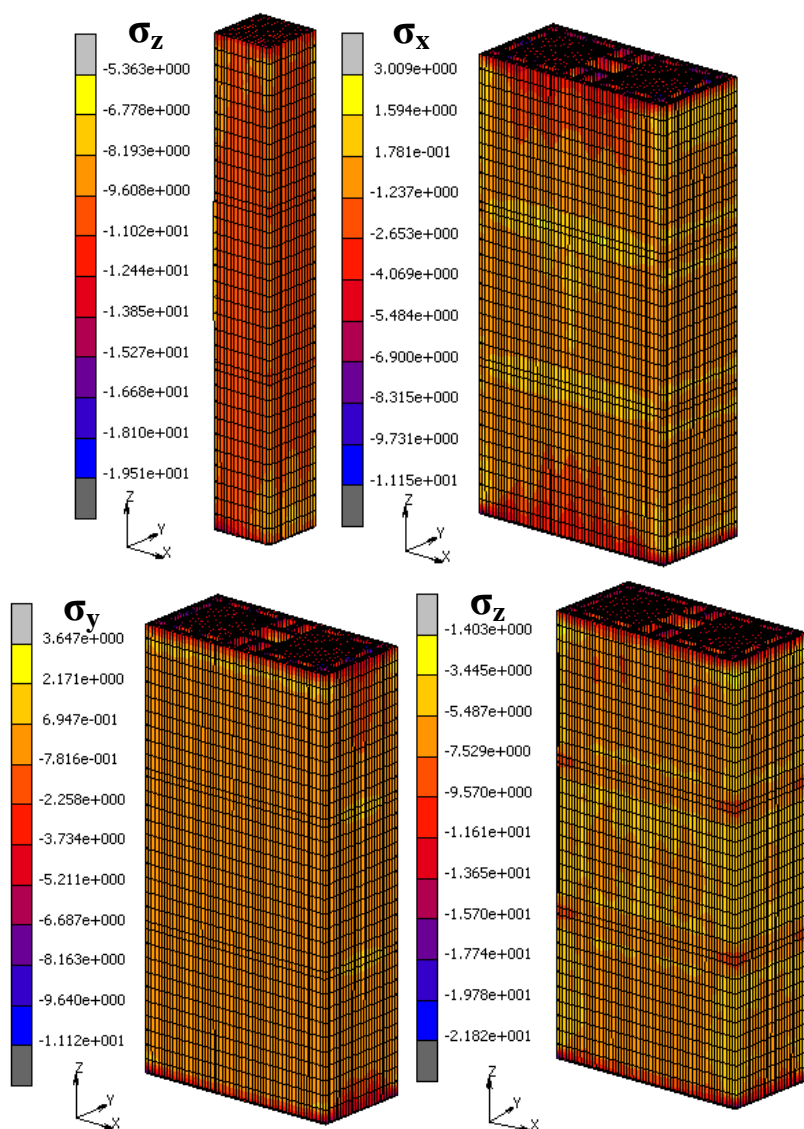
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.15 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-A e o graute para carga de 8,7 MPa, extraída do programa Marc Mentat.



Fonte: Autor (2015).

Figura 5.16 – Distribuição de tensão para o prisma MG6-A e o graute para carga de 10,1 MPa, extraída do programa Marc Mentat.



Fonte: Autor (2015).

5.3.4. Discussão dos resultados

Conforme a análise dos resultados experimentais, o aumento na resistência à compressão dos prismas com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural evidencia viabilidade de utilização desta técnica, desde que a escolha entre os materiais seja adequada, como por exemplo, os prismas das séries MG6-C e MG6-B. Observou-se que com o aumento da rigidez do preenchimento, aumenta-se a parcela de carregamento sob estes, aumentando-se assim o nível de tensão sobre a parede dos blocos. O que a princípio, justificaria o aumento efetivo da carga de ruptura para os prismas MG6-C e MG6-B, preenchidos com argamassa de menor rigidez, validando assim a utilização do preenchimento dos vazios dos blocos com a argamassa.

De acordo com os resultados das análises realizadas com a simulação numérica (Figuras 5.8, 5.9, 5.11, 5.12, 5.14 à 5.16), como esperado, para cada série de prismas, com o aumento do carregamento aumentam as tensões de compressão na direção z para os preenchimentos (grautes). Entretanto, para o carregamentos de 4,7 MPa, observa-se praticamente os mesmos valores de tensões de compressão para os três tipos de preenchimento. A diferença na distribuição de tensão ocorre próximo da carga da ruptura, acentuando-se principalmente para os prismas preenchidos com a argamassa de maior rigidez, neste caso os prismas MG6-A. Para este prisma, quando analisado as tensões próximas com a carga de ruptura (Figura 5.16), estes valores acentuam-se. Grautes com maior rigidez absorvem uma parcela maior do carregamento quando este é aplicado sob o prisma, então consequentemente, apresentam maiores valores de tensão de compressão, como visto no item 4.5.2.2 (Tabela 4.29). Isto é evidenciado nas Figuras 5.9, 5.12 e 5.16, onde ocorre o aumento da tensão σ_z no graute com o aumento da rigidez do mesmo e a diminuição de tensão nos prismas nesta mesma direção.

Com este aumento de tensões de compressão sob os grautes, aumentam-se também as trações nas direções x e y perpendiculares às paredes dos blocos (Figuras 5.9, 5.12 e 5.16). Os valores observados para as tensões de tração no bloco são superiores ao valor de 0,56 MPa, obtido experimentalmente para o bloco B6. Observa-se também o aumento nas tensões de tração na direção x e y na região das argamassas, o que provocariam sua ruptura por tração. Este efeito combinado (tração no bloco e argamassa) acentua o processo de ruptura dos prismas, algo observado experimentalmente. Ou seja, com o aumento do carregamento sob os prismas, aumentam-se as tensões

impostas pelo preenchimento sobre as paredes internas dos blocos e junto com a ruptura da argamassa, iniciar-se-ia o colapso do conjunto.

Entretanto, estes valores de resistência à tração determinados experimentalmente para o bloco e a argamassa, foram obtidos por meio de ensaios uniaxiais, o que pode não representar os valores de tração do material sob um estado triaxial de tensões, como ocorre com a argamassa confinada. A argamassa em regime de confinamento apresenta uma mudança significativa no seu comportamento mecânico. E isto ocorre por causa do estado triaxial de tensões de compressão surgidas na junta de argamassa e no bloco a um estado biaxial de tensões de tração (OLIVEIRA, 2001).

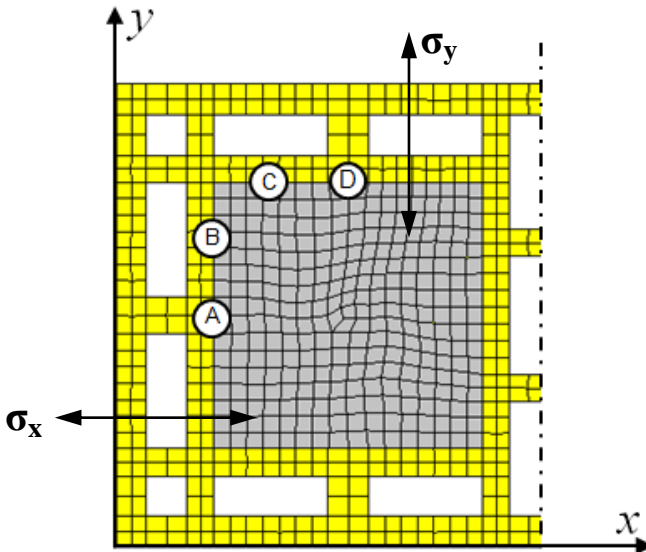
Esperava-se com o aumento da resistência das argamassas, que as tensões verticais de compressão nos preenchimentos, obtidas com a simulação, apresentassem aumento proporcional ao observado para as parcelas de cargas absorvidas pelos preenchimentos, calculado com os dados experimentais (Tabela 4.29). Entretanto, para os resultados da simulação, esta tendência não foi observada com o aumento da rigidez do preenchimento. Isto se deve ao fato que esta estimativa de carga foi realizada com os materiais sob regime linear, diferente do regime de análise adotado na simulação. Onde o caráter não linear dos materiais do prisma, evidenciado quando estes são analisados próximos à ruptura, torna o entendimento deste fenômeno ainda mais complexo do que apenas a correlação entre propriedades elásticas definidas em laboratório para os componentes do prisma.

Ainda, tentando verificar como se comporta a distribuição de tensão na região da interface entre bloco e a argamassa de preenchimento (graute) ao longo da altura dos prismas, foram analisados quatro pontos da seção transversal, neste caso os pontos A, B, C e D (Figura 7.17). Esta análise fez-se para os carregamentos aplicados de 1,2, 4,7, 8,7 MPa e 10,1 MPa; sendo este último apenas para o prisma MG6-A, que apresentou maior carga de ruptura. Esta representação da distribuição de tensões ao longo da altura das três séries de prismas é apresentada nas Figuras 5.18 à 5.20.

De acordo com os gráficos das Figuras 5.17 e 5.18, para os prismas MG6-C e MG6-B, com o aumento do carregamento ocorre o aumento nas tensões de tração impostas pelo preenchimento contra as paredes dos blocos. A junta de argamassa apresenta valores de tensão diferentes dos encontrados para os blocos. Este comportamento observado para estes materiais ocorre por se tratarem de materiais com diferentes valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson,

onde com a aplicação do carregamento, apresentam deformações e tensões distintas.

Figura 5.17 – Pontos da seção transversal para a análise da distribuição de tensão ao longo da altura.



Fonte: Autor (2015).

Entretanto, conforme os gráficos das figuras 5.16 e 5.18, os valores de tração observados são inferiores aos valores de resistência à tração do bloco de 0,56 MPa, o que não implicaria em seu colapso. Isto pode ser em consequência das seções analisadas ou simplificações do modelo utilizado, que não apresenta com precisão o comportamento da região de interface existente entre bloco-argamassa e principalmente bloco-graute.

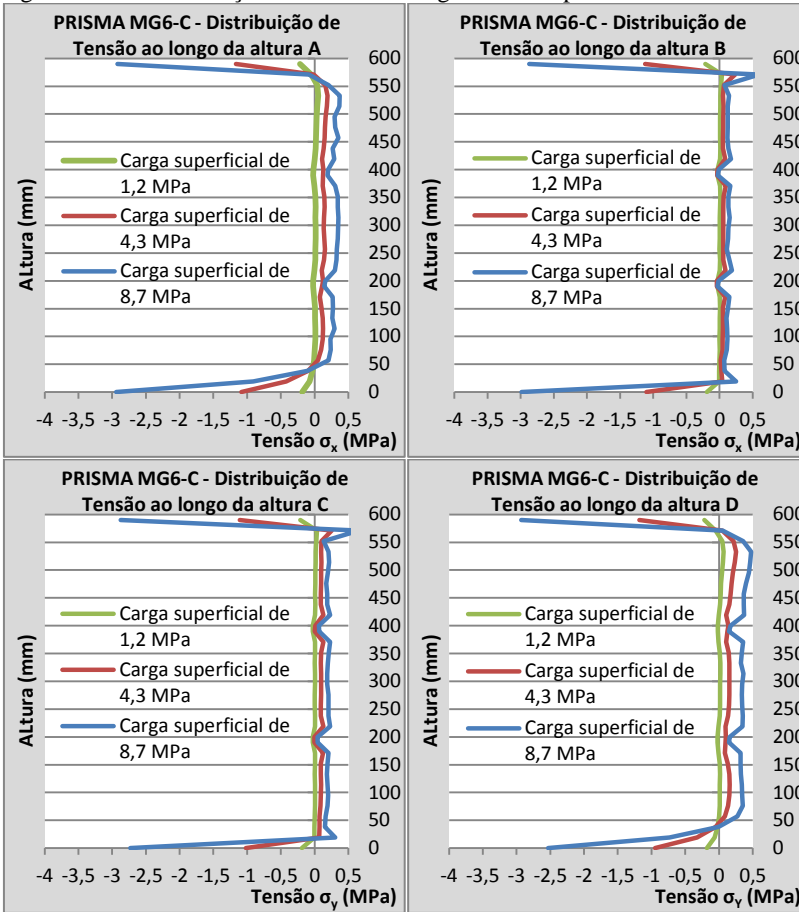
Para os prismas MG6-A (Figura 5.20), o comportamento difere do observado para as outras duas séries de prismas. Nesta série, preenchida com a argamassa A, observa-se o aumento nos valores de tração na região da junta de argamassa, com o aumento do carregamento. Isto pode evidenciar que para essa série de prisma, a ruptura se deu principalmente pela expansão lateral da argamassa (tração) do que tração das paredes dos blocos em consequência da expansão do preenchimento. Durante os ensaios de ruptura dos prismas, observou-se que o esmagamento da junta de argamassa dos prismas

MG6-A foi menor do que o observado para os prismas MG6-B e MG6-C, evidenciando o aumento nas tensões de tração sob a junta de argamassa para os prismas preenchidos com a argamassa A, de maior resistência.

Observa-se também que os níveis de tração desenvolvidos contra as paredes dos blocos do prisma MG6-A, foram menores dos que encontrado para as outras duas séries de prismas. Isto pode ser explicado pelo fato que o módulo da argamassa A ser maior, logo se desenvolveria tensões de tração menores para esse material sobre níveis de carregamento similares. Esta hipótese pode ser confirmada observando as Figuras 5.21 a 5.23, onde são apresentadas as tensões principais máximas para os preenchimento, sob os carregamentos incrementais de 1,2, 4,7 e 8,7 MPa.

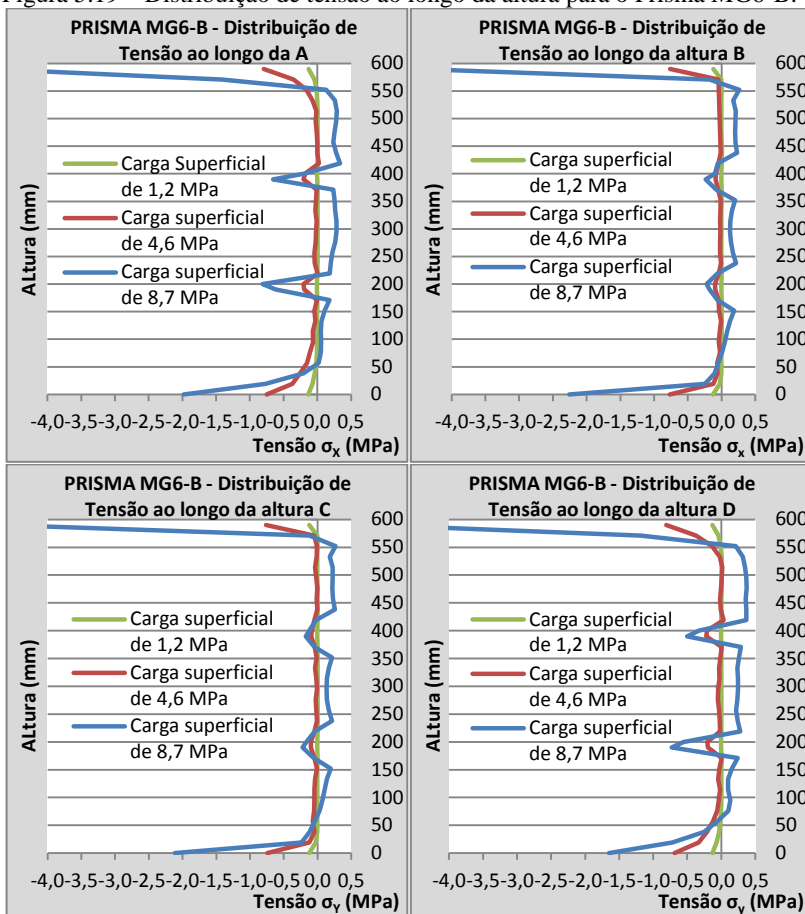
De acordo com a distribuição de tensões principais máximas apresentadas nas figuras, observa-se que com o enrijecimento do preenchimento, ou seja, aumento da resistência da argamassa de preenchimento da classe A para a C, os níveis de tensão de tração são menores para os prismas preenchidos com a argamassa mais rígida, argamassa A. Para os prismas da série MG6-A, os níveis de tensão de tração máximos encontram-se na região da junta de argamassa, o que novamente evidencia que para esta série de prismas o colapso do conjunto ocorreu com o aumento da tração da junta de argamassa para depois iniciar-se a ruptura localizada do bloco próximo a interface bloco-argamassa, em consequência do aumento das tensões de tração da junta nas direções x e y. Entretanto, esta hipótese difere da observado com a análise dos dados experimentais, onde com o aumento da rigidez do preenchimento, aumenta-se a carga sobre este se aumentando as tensões sobre as paredes dos blocos. Evidencia-se então que a viabilidade da técnica de preenchimento dos prismas com a argamassa de assentamento, mesmo que constatada com a análise dos dados experimentais, demanda modelos numéricos mais sofisticados, com a inclusão de elementos de interface, para um melhor entendimento do comportamento dos prismas e maior segurança na sua utilização da técnica.

Figura 5.18 – Distribuição de tensão ao longo da altura para o Prisma MG6-C.



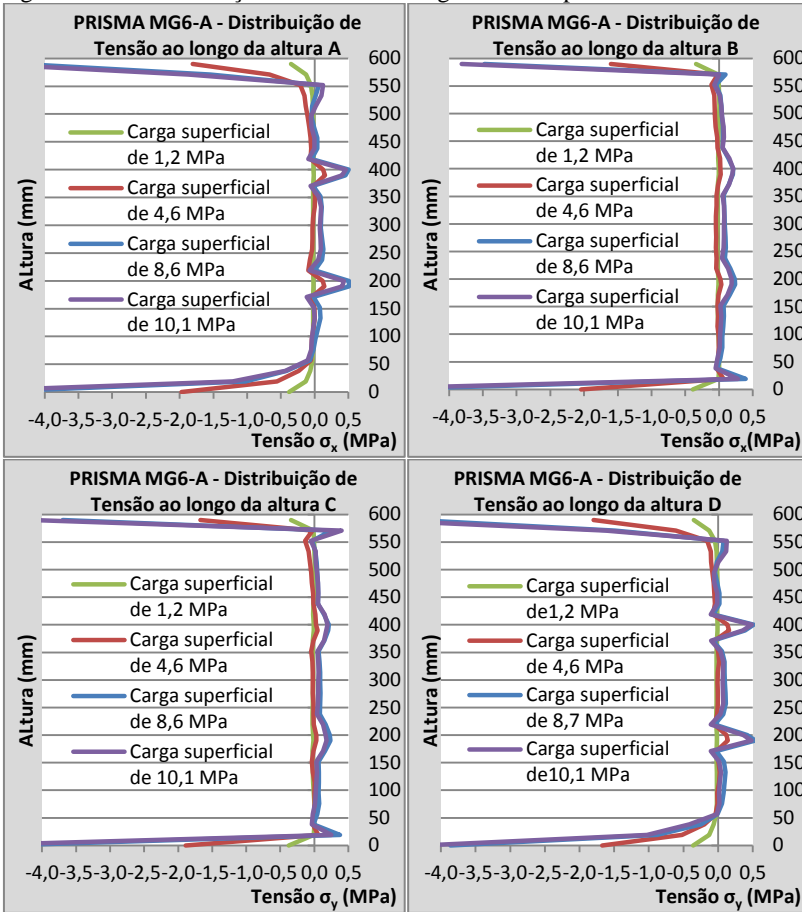
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.19 – Distribuição de tensão ao longo da altura para o Prisma MG6-B.



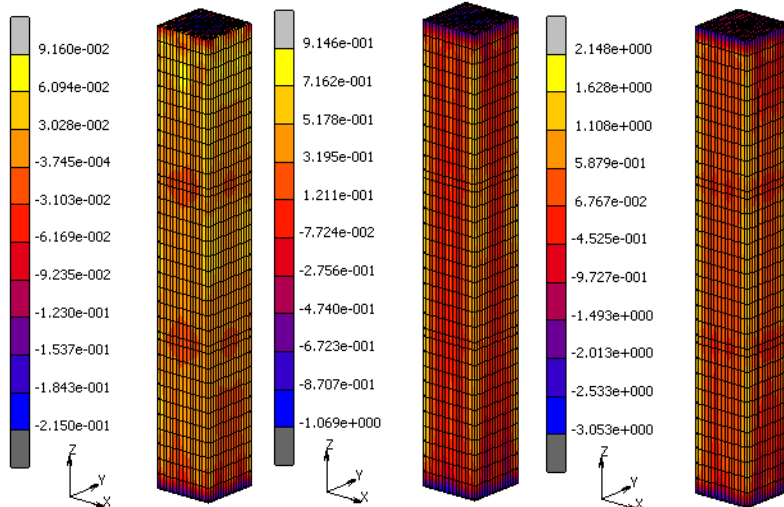
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.20 – Distribuição de tensão ao longo da altura para o Prisma MG6-A.



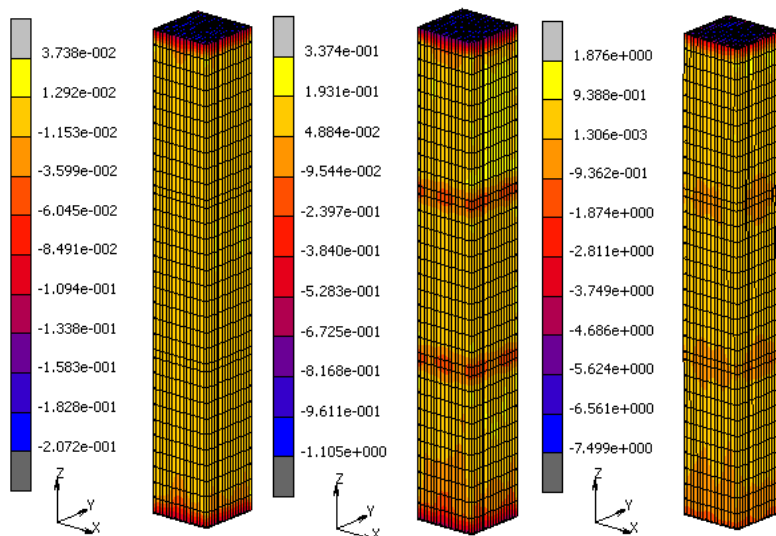
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.21 – Distribuição de tensões principais máximas para o graute do prisma MG6-C, extraída do programa Marc Mentat.



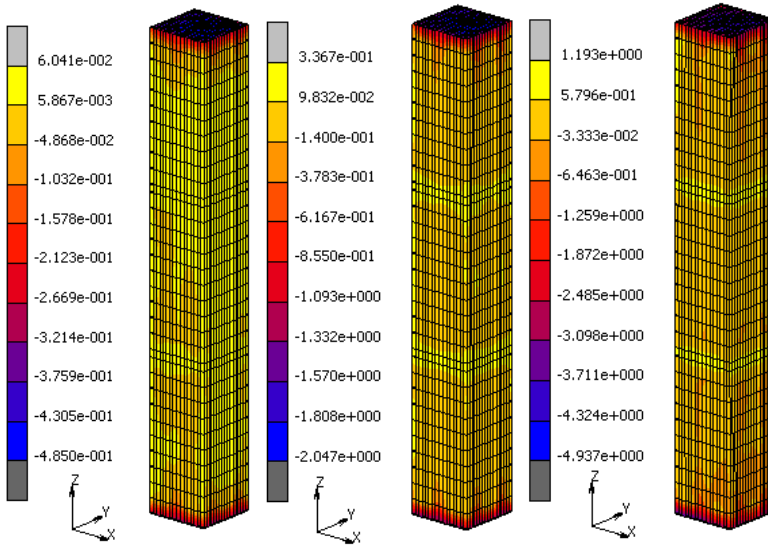
Fonte: Autor (2015).

Figura 5.22 – Distribuição de tensões principais máximas para o graute do prisma MG6-B, extraída do programa Marc Mentat.



Fonte: Autor (2015).

Figura 5.23 – Distribuição de tensões principais máximas para o graute do prisma MG6-A, extraída do programa Marc Mentat.



Fonte: Autor (2015).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

A presente tese teve por objetivo investigar o comportamento estrutural à compressão da alvenaria de blocos cerâmicos considerando o preenchimento dos furos com a argamassa de assentamento, substituindo o graute tradicionalmente utilizado para aumentar a capacidade resistente das paredes de alvenaria.

Os focos principais dos ensaios experimentais foram os componentes (blocos, argamassas e grautes) e os prismas, através das suas propriedades mecânicas e modos de ruptura. Para melhor entendimento, as conclusões foram subdivididas nos seguintes itens: ensaios de caracterização mecânica dos prismas e simulação numérica dos prismas.

6.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PRISMAS

Realizou-se a análise das propriedades mecânicas dos prismas, correlacionando-as com as propriedades obtidas com a caracterização dos blocos, argamassas e grautes.

6.1.1 Etapa Referência

6.1.1.1 Influência dos componentes na resistência dos prismas

Com o propósito de verificar a influência da variação da argamassa, bloco e o efeito conjunto do bloco e argamassa na resistência dos prismas, foram realizadas análises fatoriais de 2 fatores (ANOVA) para as séries de prismas grauteados, moldados com os blocos de 6 e 15 MPa e argamassas das classes A (traço 1:1/4:3) e C (traço 1:1:6), respectivamente, de maior e menor resistência à compressão.

Na primeira análise, para os prismas moldados com os blocos de 6 e 15 MPa e argamassa classe C (de menores resistência e módulo de elasticidade), com 95% de confiança, constata-se que o graute foi o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas, seguido da interação entre o bloco e graute, e por último pelo bloco.

Na segunda análise, para os prismas moldados somente com o bloco de 15 MPa e as argamassas das classes A e C, com 95% de confiança, constata-se que a resistência média à compressão do graute, da argamassa e a interação entre estes dois fatores, influenciam

significativamente na resistência média à compressão dos prismas, na área líquida. Ainda, o graute foi o fator com maior influência na resistência dos prismas, seguido da argamassa e por último, da interação entre o graute e argamassa.

Observa-se que em ambas as análises, tanto o bloco, argamassa, graute e a combinações destes componentes influenciam na resistência dos prismas. Este comportamento já fora relatado em trabalhos realizados por outros pesquisadores. Entretanto, o aumento da resistência da argamassa possui pouca influência no aumento da resistência à compressão dos prismas. Isto é evidenciado quando comparados os valores de resistência dos prismas moldados com o bloco de 15 MPa, preenchidos com a mesma classe de grautes. Enquanto que a argamassa A possui resistência cinco vezes maior que a da argamassa C, observa-se que os valores de resistências dos prismas moldados com a argamassa A não aumentaram proporcionalmente seus valores de resistência quando comparados com os prismas moldados com a argamassa C.

6.1.1.2 Análise da capacidade de carga dos prismas grauteados

Nesta análise, com 95% de confiança, somente os prismas RG15-CG1 (moldados com bloco de 15 MPa e argamassa do tipo C), prismas RG12-BG1 (moldados com bloco de 12 MPa e argamassa do tipo B), prismas RG6-CG1 (moldados com bloco de 6 MPa e argamassa do tipo C) e prismas RG6-CG2 (moldados com bloco de 6 MPa e argamassa do tipo C), preenchidos com os grautes G1 (maior resistência à compressão) ou G2 (resistência à compressão intermediária), apresentam aumento significativo em suas capacidades de carga, ou seja, em suas cargas de ruptura. Este aumento, em média, observa-se para os prismas grauteados que apresentaram Efeito relativo maior do que 29,3%. Constata-se que o enrijecimento das argamassas e dos grautes não proporcionam aumento significativo nas cargas de ruptura dos prismas, exceto para as séries RG15-CG1, RG12-BG1, RG6-CG1 e RG6-CG2, por serem moldados com as argamassas de menor rigidez, neste caso a argamassa B (traço 1:1/2:4,5) de resistência à compressão intermediária e argamassa C (traço 1:1:6), de menor resistência à compressão.

6.1.2 Etapas com Argamassa Mista e Industrializada

6.1.2.1 Influência dos componentes na resistência dos prismas

Para todas as séries de prismas vazios das Etapas com Argamassa Mista e Industrializada, a resistência média à compressão da argamassa, do bloco e a interação entre estes dois fatores, influenciaram significativamente na resistência média à compressão dos prismas vazios, na área líquida. Este comportamento observa-se também para os prismas preenchidos, exceto a interação entre a argamassa e bloco, que para os prismas preenchidos com argamassa mista não influencia significativamente na resistência dos prismas. Para os prismas preenchidos, em ambas as etapas, o fator com maior influência na resistência à compressão dos prismas foi o bloco. Entretanto, para os prismas vazios da Etapa com Argamassa Mista, a argamassa foi o fator de maior influência e para a Etapa com Argamassa Industrializada, o bloco.

Constatou-se que a resistência da argamassa influencia significativamente na resistência dos prismas, proporcionando o aumento ou não de sua capacidade de carga, de acordo com a combinação de materiais utilizada.

Com o aumento da resistência da argamassa, para os prismas da Etapa com Argamassa Mista, na área líquida, foi observado que:

- para os prismas vazios moldados com os blocos B6, com o aumento da resistência da argamassa, aumentam-se significativamente as resistências dos prismas. Os prismas vazios moldados com os blocos de 12 e 15 MPa e argamassas das classes C e B, não apresentam diferença significativa entre suas resistências à compressão, sendo que o aumento significativo nos valores de resistência dos prismas ocorre quando estes são assentados com a argamassa A, de maior resistência. Neste caso, para os prismas moldados com os blocos de 12 e 15 MPa, inicialmente indica-se para assentamento apenas a utilização das argamassas do tipo C (traço 1:1:6) e tipo A (traço 1:1/4;3), tendo em vista que não há diferença entre as resistências dos prismas moldados com as argamassas do tipo B (traço 1:1/2:4,5) e tipo C.

- Para os prismas preenchidos e moldados om o bloco de 6 MPa, o aumento da resistência da argamassa de assentamento e preenchimento não gera aumento significativo na resistência dos prismas, sendo aqui indicada apenas a moldagem dos prismas quando assentados e preenchidos com a argamassa C, traço com menor percentual de cimento em sua composição. Para os prismas moldados

com os blocos de 12 e 15 MPa, os prismas assentados e preenchidos com as argamassas A e B, não apresentam diferença significativa entre seus valores de resistência à compressão. Entretanto, para ambos os blocos, os prismas assentados e preenchidos com a argamassa C apresentam valor de resistência significativamente menor. Sendo assim, indica-se para estes prismas somente a utilização das argamassas C ou B.

Evidencia-se para esta etapa que a utilização da argamassa do tipo C (traço 1:1:6), para o assentamento e preenchimento dos prismas, tecnicamente, se demonstra como a opção mais indicada, por apresentarem os melhores resultados de resistência média à compressão e eficiência para os prismas.

Para a Etapa com Argamassa Industrializada, o aumento da resistência da argamassa não proporciona aumento significativo nas resistências à compressão dos prismas, na área líquida, para os prismas vazios moldados com os blocos de 6 MPa com as argamassas das classes 5 (argamassa de assentamento estrutural de 5 MPa) e M (argamassa multiplouso). Entretanto, para os prismas vazios moldados com a argamassa da classe 10 (argamassa de assentamento estrutural de 10 MPa), constata-se o aumento significativo nos valores de resistência quando comparados com estas duas séries de prismas vazios. O mesmo comportamento observa-se para os prismas vazios moldados com o bloco de 12 MPa.

Para os prismas vazios moldados com o bloco de 15 MPa o comportamento foi outro. O aumento da resistência da argamassa das classes 5 para 10, não representou aumento significativo na resistência dos prismas vazios. E para os prismas moldados com a argamassa classe M, os resultados de resistência obtidos foram significativamente menores que os valores de resistência das outras duas séries de prismas.

Para os prismas preenchidos com a argamassa industrializada, somente as séries moldados com os blocos de 6 MPa apresentam aumento significativo na resistência à compressão com o aumento da resistência das argamassas, com a utilização das classes de argamassa 5 à 10. O prisma preenchido com a argamassa M, em função da variabilidade de seus valores de resistência, não apresenta diferença significativa com os valores de resistências obtidas para as outras duas séries de prismas moldadas com o mesmo bloco.

Para os prismas preenchidos e moldados com os blocos de 12 e 15 MPa, não ocorre aumento significativo em suas resistências à compressão com o aumento da resistência das argamassas. Entretanto, as séries de prismas moldados com estas duas classes de blocos e

preenchidos com a argamassa da classe M apresentam os menores resultados de resistência à compressão, em relação às séries moldadas com classes 5 e 10.

Assim, nesta etapa, observou-se que a utilização das argamassas das classes 5 e 10 para o assentamento e preenchimento dos prismas, aparece como a opção mais indicada, por apresentarem os melhores resultados de resistência média à compressão e eficiência. Este comportamento era esperado, pois estas argamassas foram desenvolvidas para o assentamento de blocos de alvenaria estrutural.

Entretanto, para ambas as Etapas com Argamassa Industrializada e Mista, quando ocorre aumento na resistência dos prismas este não é proporcional ao aumento da resistência das argamassas, o que neste aspecto pode representar um procedimento antieconômico.

6.1.2.2 Aumento efetivo da capacidade de carga dos prismas das Etapas com argamassa mista e industrializada

De acordo com os resultados obtidos para os prismas da Etapa com Argamassa Mista, somente os prismas preenchidos moldados com blocos de 15 MPa e argamassa do tipo B (prismas MG15-B), prismas preenchidos moldadas com blocos de 6 MPa, assentados e preenchidos com as argamassas mistas B (traço 1:1/2:4,5) e C (traço 1:1:6), respectivamente, prismas MG6-B e MG6-C, apresentam aumento significativo em suas capacidades de carga. Este aumento nos valores da carga de ruptura observa-se para os prismas preenchidos que apresentam efeito relativo maior do que 22,2%.

Entretanto, para a Etapa com Argamassa Industrializada, as séries de prismas moldadas com os blocos de 6 e 12 MPa, preenchidos com as três classes de argamassas, apresentam aumento significativo em sua capacidade de carga. Este aumento nos valores da carga de ruptura observa-se para os prismas preenchidos que apresentam efeito relativo maior que 16,4%.

Para estas séries de prismas, a diminuição da rigidez da argamassa de preenchimento proporciona o aumento em sua capacidade de carga. Nestes prismas, a diminuição da parcela de carga absorvida pelo preenchimento, em virtude de seu baixo valor de módulo de elasticidade, contribui para o aumento significativo da carga de ruptura dos prismas. Neste caso, a baixa rigidez dos preenchimentos (baixos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade) provocaria o aparecimento de baixas tensões sobre as paredes internas dos blocos, além de absorver parte da carga total do prisma. Ainda, com

o aumento da parcela de carga sob a alvenaria (bloco-argamassa), aumentam-se as tensões de compressão sobre o bloco, aumentando sua capacidade de resistir às tensões de tração impostas pela deformação do preenchimento.

Isto se evidencia pelo fato que quando comparados os prismas moldados com os blocos de 6 MPa, assentados e preenchidos com as argamassas do tipo A (traço 1:1/4:3), do tipo B (traço 1:1/2:4,5) e do tipo C (traço 1:1:6), os prismas assentados e preenchidos com a argamassa do tipo A, com os maiores valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, não apresentam aumento significativo em sua carga de ruptura quando preenchido pela argamassa.

Ainda, para os prismas moldados com blocos de 6 MPa, assentados e preenchidos com as argamassa dos tipos B e C, por não apresentarem diferença significativa entre seus valores de resistências à compressão, na área líquida, os prismas moldados com a argamassa do tipo C (traço 1:1:6) demonstra-se o mais indicado para a utilização da técnica de preenchimento com a argamassa de assentamento, pois apresenta o maior efeito relativo encontrado para os prismas preenchidos com argamassa mista, no valor de 60,0%.

Para os prismas preenchidos com argamassa industrializada, analisando também suas resistências nas áreas líquidas os melhores resultados obtidos foram para os prismas preenchidos IG6-10 (moldados com blocos de 6 MPa, assentados e preenchidos com argamassa de assentamento estrutural de 10 MPa) e prismas preenchidos IG12-5 (moldados com bloco de 12 MPa, assentados e preenchidos com argamassa de assentamento estrutural de 5 MPa), que apresentam os maiores efeitos relativos, respectivamente, nos valores de 40,5% e 47,7%.

6.2 MODO DE RUPTURA DOS PRISMAS

Para os prismas vazios da Etapa Argamassa Mista e Industrializada, a forma de ruptura dos prismas ocorreu de forma frágil, sem características explosivas, para todos os prismas assentados com as seis classes de argamassas. Basicamente, a ruptura ocorreu de forma lenta, iniciando-se com a formação de fissuras e esmagamento da argamassa em conjunto com a formação de fissuras e trincas verticais nos blocos, entre 60% e 70% da carga de ruptura. Na sequência, ocorreu a ruptura localizada dos blocos próxima à região da interface bloco-

argamassa, geradas pela deformação excessiva junta, levando assim o conjunto ao colapso.

Para a Etapa Referência, os prismas grauteados moldados com os blocos B6, grautes G2, G3 (de resistência intermediária e menor resistência à compressão) e assentados com argamassa do tipo C (traço 1:1:6), de menor resistência à compressão, apresentaram ruptura frágil e lenta, sem características explosivas. Para os prismas da série RG6-CG1, moldados com blocos de 6 MPa, argamassa do tipo C e o graute G1, de maior resistência à compressão, a ruptura ocorreu de forma frágil e rápida, com características explosivas, provocando o fendilhamento lateral das paredes dos blocos, evidenciando o aumento na tração das paredes como consequência da expansão do grautes.

Para as três séries de prismas moldados com os blocos de 12 MPa, o comportamento foi similar ao observado para os prismas moldados com o bloco de 6 MPa.

Os prismas moldados com os blocos de 15 MPa, assentados com a argamassa C (de menor resistência) e as três classes de grautes, apresentaram ruptura frágil e lenta, sem características explosivas. Entretanto, para as séries de prismas moldados com os blocos de 15 MPa, assentadas com a argamassa A (de maior resistência com traço 1:1/4:3) e preenchidos com os grautes G1 e G2, respectivamente, de maior resistência e resistência à compressão intermediária (Figura 4.38), a ruptura ocorreu de forma frágil e rápida, com características explosivas, com o fendilhamento lateral das paredes dos blocos, indicando aumento nas tensões contra as paredes dos blocos e nas regiões próximas à interface bloco-argamassa. Para a série de prismas RG15-AG3, moldada com blocos de 15 MPa, argamassa do tipo A e graute G3, de menor resistência à compressão, a ruptura ocorreu de forma lenta, porém com a formação acentuada de trincas verticais ao longo dos blocos.

Nesta análise, constata-se que o enrijecimento da argamassa de assentamento e do graute, além de não aumentarem proporcionalmente os valores de resistências dos prismas, provocam rupturas sem características dúcteis, comportamento este não indicado para a alvenaria estrutural. Isto é evidenciado quando comparadas as formas de rupturas das séries de prismas RG15-AG1 e RG15-CG1.

Nas Etapas Argamassa Mista e Industrializada, todos os prismas preenchidos com argamassa apresentaram ruptura de forma frágil e lenta, sem características explosivas. Para estes prismas a ruptura ocorreu de forma lenta com a formação de fissuras e o esmagamento da argamassa, formação de trincas verticais e o fendilhamento das paredes

dos blocos, evidenciando também aumento nas tensões de tração nas paredes dos blocos e nas regiões próximas à interface bloco-argamassa, em consequência da expansão do preenchimento confinado. Entretanto, este comportamento acentuou-se com os prismas assentados e preenchidos com as argamassas de maior rigidez, neste caso as argamassas das classes A e 10. Isto pode ser justificado com o aumento do módulo de elasticidade do grautes, e consequentemente com o aumento da carga por ele absorvida, aumentando-se assim o nível de tensão contra as paredes dos blocos.

Ainda, para estas duas séries de prismas, observou uma formação acentuada de fissuras e diminuição no esmagamento da junta, indicando aumento de tensões de trações sobre esta região. Observa-se que o enrijecimento da argamassa de assentamento e preenchimento, além de não aumentar proporcionalmente os valores de resistências dos prismas, podem aumentar os níveis de tensões de tração próximos a região da junta de argamassa.

Diante do exposto, o aumento na resistência à compressão dos prismas com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural evidencia a viabilidade de utilização desta técnica, desde que a escolha entre os componentes dos prismas seja adequada.

6.3 SIMULAÇÃO DOS PRISMAS

A realização desta análise teve por objetivo compreender a distribuição das tensões desenvolvidas nos prismas e a influência da argamassa utilizada como preenchimento no desempenho mecânico dos modelos de prismas avaliados. Devida as limitações do modelo adotado, em função da ausência dos elementos de interface e a necessidade de ajustes nas propriedades não lineares dos materiais, os resultados obtidos com a simulação pouco contribuíram. Esperava-se com o aumento da resistência das argamassas, que as tensões verticais de compressão nos preenchimentos, obtidas com a simulação, apresentassem aumento proporcional ou próximo dos valores observados para as parcelas de cargas absorvidas pelos preenchimentos experimentalmente. Entretanto, para os resultados da simulação, esta tendência não foi observada com o aumento da rigidez do preenchimento. Isto se deve ao fato que esta estimativa de carga foi realizada com os materiais sob regime linear, diferente do regime de análise adotado na simulação. Onde o caráter não linear dos materiais do prisma, evidenciado quando estes são analisados próximos à ruptura, torna o entendimento deste fenômeno ainda mais complexo do que

apenas a correlação entre propriedades elásticas definidas em laboratório para os componentes do prisma.

Assim, conforme a análise, para os prismas MG6-C e MG6-B, moldados com as argamassas de menor resistência e o bloco de 6 MPa, com o aumento do carregamento ocorre o aumento nas tensões de tração impostas pelo preenchimento contra as paredes dos blocos, aumento este evidenciado com os dados experimentais.

Entretanto, o comportamento é diferente para os prismas MG6-A, moldado com a argamassa mais resistente. Nesta série de prismas, preenchida com a argamassa A, observa-se o aumento nos valores de tração na região da junta de argamassa, com o aumento do carregamento. Isto pode evidenciar que para essa série de prisma, a ruptura se deu principalmente pela expansão lateral da argamassa (tração) do que tração das paredes dos blocos em consequência da expansão do preenchimento. O que foi evidenciado com os ensaios de ruptura dos prismas, onde o esmagamento da junta de argamassa dos prismas MG6-A foi menor do que o observado para os prismas MG6-B e MG6-C, evidenciando o aumento nas tensões de tração sob a junta de argamassa para os prismas preenchidos com a argamassa A, de maior de resistência.

Observa-se também que os níveis de tração desenvolvidos no preenchimento para os prismas MG6-A, foram menores dos que encontrado para as outras duas séries de prismas. Isto pode ser explicado pelo fato que o módulo de elasticidade da argamassa A ser maior, logo se desenvolveria tensões de tração menores para esse material sobre níveis de carregamento similares.

De uma forma geral, a técnica investigada neste trabalho é viável para prismas moldados com blocos de 6 MPa, quando preenchidos com argamassas com baixos valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Mais especificamente para argamassas com resistência média à compressão entre 11,5 e 35,2% da resistência média à compressão (f_b) dos blocos de 6 MPa, na área líquida. Em alguns casos, para os prismas com argamassas dentro desta faixa de resistência, a utilização da argamassa como preenchimento proporciona forças de ruptura dos prismas (ou capacidade de carga) com valores superiores aos encontrados para os prismas preenchidos com os grautes com resistência de 15 e 25 MPa. Tornando, para estes casos, a utilização da argamassa como preenchimento mais eficiente que a utilização destes dois tipos de grautes. O que se demonstra, para estas combinações de argamassa-bloco, ser mais viável a utilização da argamassa como preenchimento em substituição ao graute.

6.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listadas as principais recomendações para os trabalhos futuros com o objetivo de complementar a compreensão do comportamento de prismas grauteados e preenchidos com a argamassa de assentamento:

- Realizar a mesma análise desenvolvida neste trabalho, entretanto utilizando paredes com as mesmas combinações de blocos e argamassas.

- Análise da influência do tempo entre o assentamento e preenchimento com argamassa, na resistência dos prismas.

- Análise da influência do tempo e tipo de equipamento utilizado no adensamento do preenchimento na resistência dos prismas.

- Estimar fator de eficiência prisma-graute, buscando identificar a contribuição do graute na resistência dos prismas e paredes.

- Realizar estudo comparativo de custos, para a utilização de grautes e/ou argamassa como preenchimento.

- Estudos para a verificação da influência da retração das argamassas, quando utilizadas como preenchimento, na resistência dos prismas.

- Estudo de metodologias mais adequadas para a obtenção das propriedades elásticas dos prismas, em função dos materiais que o constituem.

- Estudos triaxiais em argamassas, para avaliar sua resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson confinado e obtenção de suas propriedades não lineares, utilizadas para o ajuste de modelos numéricos. O mesmo tipo de ensaio recomenda-se para o material do bloco, visando fornecer aos modelos numéricos dados suficientes para a simulação em regime não linear.

- Utilização de modelos numéricos mais sofisticados, que proporcionem um maior entendimento do comportamento da alvenaria quando preenchida com argamassa de assentamento.

REFERÊNCIAS

ALY, V. L. C. **Determinação da capacidade resistente do elemento parede de alvenaria armada de blocos de concreto, submetido à esforços de compressão.** São Paulo, 1991. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 530-92 / ASCE 5-92 / TMS 402-92.** Building code requirements for masonry. Detroit, Michigan. 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 144-84.** Aggregate for masonry mortar. American Standard Test Method. Philadelphia, PA. 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 270-86b.** Standard Specification for mortar for unit masonry. American Standard Test Method. Philadelphia, PA. 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 476-83.** Grout for Masonry. American Standard Test Method. Philadelphia, PA. 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1006.** Standard test method for splitting tensile of masonry units. American Standard Test Method. Philadelphia, PA. 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1019** – Sampling and testing grout. Philadelphia, PA. 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 447-84.** Compressive strength of prisms. American Standard Test Method. Philadelphia, 1987.

ANDRADE A. A. **Comportamento estrutural de paredes de alvenaria.** São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo.

ARANTES, C. A. **Influência do graute na alvenaria estrutural cerâmica.** 2003. 175p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, Santa Maria-RS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2007. 221p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467:** Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2006. 5p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro. 2003. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2009. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. 1996. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8215:** Prismas de bloco de concreto para alvenaria estrutural – Preparo e ensaio à compressão. Rio de Janeiro. 1983. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro. 2008. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8798:** Execução e controle de obras em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro. 1985. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10837**: Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro. 1989. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro. 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2002. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro. 2005. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro. 2001. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: Componentes Cerâmicos – parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro. 2005. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: Componentes Cerâmicos – parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro. 2005. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: Componentes Cerâmicos – parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2005. 27p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro. 2010. 41p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-2**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro. 2010. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 2000. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2003. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de cone. Rio de Janeiro. 1998. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ATKINSON, R. H., e NOLAN, J. L. **Investigation into the failure theory for brick masonry in compression.** In: 3rd Canadian Masonry Symposium, 1985, Edmonton, Canada, Proceedings. 1985, p. 5.1-5.17.

BIGGS, D. T. **Grouting Masonry Using Portland Cement-Lime Mortars.** International Building Lime Symposium. March 9 -11, 2005. Florida, EUA.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1200.** Specification for buildings sand from natural sources. British Standard Institution, Londres, 1976.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 5628-1.** Code of practice for use of masonry - Part 1: Structural use of unreinforced masonry. British Standard Institution, Londres, 1992.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 5628-2.** Code of practice for use of masonry – Part 2: Structural use of unreinforced and prestressed masonry. British Standard Institution, Londres, 1995.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 5628-3.** Code of practice for use of masonry – Part 3: Materials and components, design and workmanship. British Standard Institution, Londres, 1985.

CALÇADA, L. M. L. **Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto.** 1998. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

CAMACHO, J. S.; RODRIGUES, R. O. **Utilização do graute na alvenaria estrutural.** Anais do 41º Congresso Brasileiro de Concreto, Salvador, 1999. Artigo técnico. Salvador, BA. 1999. p.142.

CAMARINI, Gladis; ISHIKAWA, Paulo Hidemitsu. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural.** 10th Encontro nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. 2004.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M.. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa.** In: 4º Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Brasília, Brasília: PECC/ANTAC, 2001. p. 43-67.

CARVALHO, J. M. **Desempenho estrutural de prismas de blocos cerâmicos com diferentes formas e dimensões.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.

CARVALHO, J. M.; CESAR, C. G.; ROMAN, H. R. **Influência da geometria de blocos cerâmicos no desempenho estrutural de prismas moldados com diferentes traços de argamassa e espessuras de juntas.** XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Florianópolis, SC. 2006.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão em armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** Goiânia. Editora UFG; Co-edição São Paulo: Pini, 1997.

CEB-FIP. (1990). CEB-FIP Model Code 1990, *Comité Euro-International du Béton*. ACI. (1999). *American concrete institute. Building code requirements for structural concrete with commentary*. ACI-318-99, Detroit.

CESAR, C. G. **Desempenho Estrutural de Painéis Pré-Fabricados Com Blocos Cerâmicos.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

CHEEMA, T. S. e KLINGNER R. E. **Compressive strength of concrete masonry prism.** American Concrete Institute Journal, 1986. January/February, p. 88-97.

CHEN, W.; LIU, X. **Limit Analysis in Soil Mechanics.** Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1990.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassa de revestimento: Características, propriedades e método de ensaio.** São Paulo: Boletim 68, IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas S/A, 1995. 118 p.

COLVILLE, J. **Compressive strenght of grouted concrete masonry.** In: 9th International Brick and Block Masonry Conference, Berlin, Alemanha, 1991. Proceedings. v.1, p. 149-156.

COLVILLE, J. e WOLDE-TINSAE, A. M.. **Compressive strength of hollow concrete masonry**. 5th North American Masonry Conference. 1990. June. University of Illinois at Urban-Champaign. p. 663 a 672.

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

DHANASEKAR, M. e KUMAR, M. **Parametric studies on the strength and stiffness of reinforced clay block masonry**. In: 10th International Brick/Block Masonry Conference. Alberta, Canada, 1994. Proceeding. V1, p 97-106.

DÍAZ, J. J.; NIETO, P.J; RABANAL, F.P; MARTÍNEZ-LUENGAS. **Design and shape optimization of a new type of hollow concrete masonry block using the finite element method**. Engineering Structures 33, 2011.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6 – Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures**. EN 1996-1-1. 2005.
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar**. EN 1015-7:1999.

FAHMY, E. H.; GHONEIM, T. G. M. **Behaviour of concrete block masonry prisms under axial compression**. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 22, nº 5. 1995.

FORREST, J. C. M. WILLBOURNE, J. KIPPS, R. M. **Some typical aspects of design and construction (Being as every day story of masonry folk!)** In: Practical Design of Masonry Structures, Proceedings, p. 71-100. London, 1986.

FRANCO, L. S. **Desempenho estrutural do elemento parede de alvenaria empregado na alvenaria estrutural não armada, quando submetido a esforços de compressão**. São Paulo, 1987. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FRANCO, L. S. **Parâmetros utilizados nos Projetos de Alvenaria Estrutural**. Textos Técnicos, Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1993.

GALLEGOS, H. **Albañileria Estructural**. Pontificia Universidad Católica Del Perú. Lima, Perú. 1989. 367p.

GANESAN, T. P.; RAMAMURTHY, K. **Efficient Hollow Block Geometries for Masonry Under Eccentric Compression**. Proceedings of the 4 th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, p.108-115, Madras, India. 1992.

GANESAN T. P. et al. **Structurally efficient hollow concrete blocks in load bearing masonry**. Proc. 8 th IBMAC. Elsevier, London, 1988.

GARCIA, P. D. **Contribuições ao Estudo da Resistência à Compressão de Paredes de Alvenaria de Blocos Cerâmicos**. São Carlos, 2000. 255p. Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

GOMES, I. R. **Simulação Numérica do Ensaio de Compressão de Prismas de Alvenaria pelo Método dos Elementos Finitos com Comportamento de Interface**. 2001. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

GOMES, N.S. **A resistência das paredes de alvenaria**. 1983. 190 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GONÇALVES JR., L.A. **Avaliação de Incertezas em Modelo de Dano com Aplicação a Prismas de Alvenaria Sob Compressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2008.

GROHMANN, L. Z. **Análise do Comportamento de Prismas Grauteados de Alvenaria Estrutural Cerâmica**. 2006. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal. Fundamentos e aplicações na engenharia civil.** São Paulo. Editora Pini, 2001. 341 p.

HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. Suggested failure criteria for grouted masonry under axial compressive. **American Concrete Institute Journal.** 1979. p. 1047-1061.

HILSDORF, H.R. **Investigation into the failure mechanisms of brick masonry loaded in axial compression.** Designing, Engineering and Construction with masonry product. Houston, Texas, Gulf Publishing Co. 1969. p. 34-41.

INTERNATIONAL UNION OF TESTING AND RESEARCH LABORATORIES FOR MATERIALS AND STRUCTURES – **RILEM. MR 3: The complex workability – consistence – plasticity.** France: E & FN Spon. RILEM, 1982.

ISHIKAWA, P. H. **Desempenho de argamassa de assentamento de bloco estrutural utilizando agregado miúdo de pedra britada.** IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Brasília, DF. 2001.

JUSTE, A. E. **Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão.** 2001. 126 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

KHALAF, F. M. **Factors influencing compressive strength of concrete masonry prisms.** Magazine of Concrete Research. June, 1996, v48, n° 175, p. 95-101.

KHALAF, F. M.; HENDRY, A. W. and FAIRBAIRN D. R. 1992. **The strength of blockwork prisms tested parallel to the bed face.** Masonry International- Journal of the British Masonry Society. Spring, vol. 6, n° 1, 29-35.

KHALIFA, M. A. e MAGZOUN, A. E. **Compressive strength of masonry prisms.** In: 12th Congress of the structures. EUA, 1994. Proceeding. p 1100-1005.

LA ROVERE, H.; RODRIGUES, R. M. **Análise do Comportamento Mecânico de Prismas de Alvenaria de Blocos de Concreto Pelo**

MEF. In: XXVIII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 1997, São Carlos. Anais - Estruturas e Fundações, 1997. v.1. p. 179-188.

LEÃO, C. T. Resistência de prismas de blocos estruturais cerâmicos submetidos a esforços de compressão e tração na flexão. 2008. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

LOURENÇO, P. B. Computational strategies for masonry structures. Netherlands, Delf University Press. 1996.

MANZANO, R. M.; ROMAN, H. R.; GÓMEZ, L. A. Análise do comportamento de conexão vertical de painéis estruturais cerâmicos pré-fabricados. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 35-50, jan./mar. 2013.

MATA, R. C. 2006. 180p. **Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini-paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

MENDES, R. J. K. Resistência à compressão de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais. 1998. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

McNARY, W. S.; ABRAMS, D. P. On the modulus of elasticity for masonry. Structural Engineering Journal. 1985. n 4, v. 111, p. 857-870.

MOHAMAD, G. Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto. 1998. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

MOHAMAD, G. Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos de concreto à compressão. 2007. 290 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho. Portugal.

OLIVEIRA, F. L. Reabilitação de paredes de alvenaria pela aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada. 2001.

Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). 203p. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Carlos, São Paulo.

OLIVEIRA, L. A. P. Estudo do desempenho dos grautes com adições para o enchimento dos blocos de alvenaria estrutural. 1986. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PAGE, A.W. A study of the relationship between unit, prism and wall strength for hollow masonry loaded in compression. In: 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, Alemanha, 1991. Proceedings. v.1, p. 263-243.

PARSEKIAN, G. A.; FURLAN JUNIOR, S. Compatibilização de Projetos de Alvenaria Estrutural. III Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção. São Carlos, SP. 2003.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural. São Carlos. Editora EdUFSCAR, 2012.

PAPADAKIS, V. G., VAYENAS, C. G., FARDIS, M. N. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. ACI Materials Journal. March-April. 1991.

PELETEIRO, S. C. (2002). Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural. 2002. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. A reologia da pasta de cimento e a influência da cal. In: 1º Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Goiânia: UFG/ANTAC, 1995, p. 25-32.

RAMALHO, M.; CORRÊA, M. R. S. Projeto de Edifícios de alvenaria estrutural. ed:1. São Paulo. Editora PINI, 2003.

REIS, P. F. O. Análise Numérica da Influência dos Segmentos Grauteados na Interação entre Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto. 2010. 169p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia

e Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Goiás.

RILEM-FIP-CEB. **Bond test for reinforcing steel – 2. Pull-Out test.** Matériaux et constructions, v.6, n° 32, p.102-105. 1973.

RILEM-CPC 18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth.** Materials and Structures, vol. 21 n° 126, p. 453-455. 1988

RIZZATTI, E. **Influência da Geometria do Bloco Cerâmico no Desempenho Mecânico da Alvenaria Estrutural sob Compressão.** 2003. 176p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

ROMAGNA, R. H. **Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados.** 2000. 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

ROMAN, H. R. **Argamassas de assentamento para alvenarias.** In: III Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil. Florianópolis: UFSC, 1991. p.111-116.

ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. **Construindo em alvenaria estrutural.** Florianópolis: EdUFSC, 1999. 83p.

SABBATINI, F. H. **Agregados miúdos para argamassas de assentamento.** In: 1º Simpósio Nacional de Agregados. São Paulo: Núcleo de Ligação Industrial – EPUSP, 1986, p. 17-25.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária.** 1984. 298p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SÁNCHEZ, E. **Histórico sobre pesquisas e elaboração de novas normas no Brasil sobre alvenaria estrutural.** Vol. 29. 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, 1994.

SANTOS, M. J. F. **Análise da Resistência de Prismas e Pequenas Paredes de Alvenaria Estrutural Cerâmica para Diferentes Tipos de**

Argamassas. 2008. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.

SHRIVE , N. G. **A fundamental approach to the fracture of masonry.** Third Canadian Masonry Symposium. University of Alberta, Edmonyon. 1983.

SHRIVE, N. G. The failure mechanism of face Shell bedded (ungrouted an unreinforced) masonry. International Journal of Masonry Construction, v. 2, nº 3, p. 115-128, London, 1982.

SILVA JR, D. M. **Análise Numérica do Comportamento Não-linear de Prismas de Alvenaria Estrutural Submetidos a Ações Verticais Utilizando o Elemento Finito Prismático Linear.** 2007. 86p. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, SP.

SILVA JR, D. M.; RODRIGUES, M. O.; CAMACHO, J. S. **Estudo Numérico da Influencia da Resistência à compressão dos blocos no comportamento Não-Linear de Prismas de Alvenaria Estrutural.** 2010. Revista Mecánica Computacional Vol. XXIX. p.1049-1061. Argentina.

SORIANO, H. L. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas.** São Paulo: EDUSP, 2003.

STEIL, R. O. **Efeito da Geometria do Bloco de Concreto e do Tipo de Argamassa no Desempenho à Compressão de Prismas de Alvenaria Não Grauteados.** 2003. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. M. S. B. **Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas.** I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, Brasil, 1995, p. 53-62.