



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

AFONSO HENRIQUE LACERDA BRITO DE OLIVEIRA

**EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PRISMAS DE BLOCOS DE
CONCRETO: ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA**

FORTALEZA

2016

AFONSO HENRIQUE LACERDA BRITO DE OLIVEIRA

EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PRISMAS DE BLOCOS DE
CONCRETO: ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como parte integrante do Projeto de Pesquisa.

Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini
Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O45e Oliveira, Afonso Henrique Lacerda Brito de.
Evolução da resistência à compressão de prismas de blocos de concreto: análise experimental e modelagem matemática / Afonso Henrique Lacerda Brito de Oliveira. – 2016.
129 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.
Coorientação: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian.
1. Alvenaria Estrutural. 2. Bloco de Concreto. 3. Resistência à Compressão. I. Título.

CDD 624.1

AFONSO HENRIQUE LACERDA BRITO DE OLIVEIRA

EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PRISMAS DE BLOCOS DE
CONCRETO: ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 19 / 08 / 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Humberto Ramos Roman
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dedico este trabalho a minha família, em especial ao meu pai, Carmanoelito Brito de Oliveira, minha mãe, Maria de Lourdes Lacerda Brito de Oliveira, às minhas irmãs, aos meus professores e a todos os meus amigos da Universidade Federal do Ceará que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

Aos meus pais, Carmanoelito Brito de Oliveira e Maria de Lourdes Lacerda Brito de Oliveira, pelo amor e incentivo para realização deste trabalho.

As minhas irmãs, Fatima Teresa e Carmelita Angélica, pelo apoio e descontração nos momentos difíceis da vida acadêmica.

Ao professor Alexandre Araújo Bertini, pela orientação, dedicação, confiança e amizade.

Ao professor Guilherme Aris Parsekian pela co-orientação, por suas contribuições para este trabalho e amizade.

Ao professor Antônio Eduardo Bezerra Cabral pelo apoio com os seus conhecimentos.

A todos os amigos e companheiros de Mestrado da Universidade Federal do Ceará, em especial, ao Maurício, Jordana, Heloína, George, David, Ana Mara, Sávio, Afrânia, Délcia, Bosco, Tiago e Shogo.

Aos colegas do NUTEC que ajudaram na realização dos ensaios, em especial, a engenheira Maria, ao Marcos e ao Valdemir.

Aos bolsistas da Engenharia Civil que ajudaram na realização dos ensaios, em especial, à Lidia, Flávia e ao Geovane.

Ao CNPq pelo apoio financeiro a este trabalho.

À empresa OSC Mineração e Empreendimentos pelo fornecimento dos blocos de concreto necessários para a realização desta pesquisa.

Às empresas Rejuntamix e Votorantim pelo fornecimento das argamassas necessárias a realização desta pesquisa.

A todos os professores que transmitiram seus conhecimentos nas disciplinas.

“Um gênio é 1% de inspiração e 99% de transpiração.”
Thomas Edson

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental com o objetivo de avaliar a evolução da resistência à compressão da alvenaria estrutural, ao longo das idades, através do estudo da resistência de primas, constituídos por dois blocos estruturais de concreto e propor um modelo matemático capaz de estimar a resistência à compressão dos prismas em diferentes idades.

Para tanto, foram realizados ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação de prismas não grauteados e grauteados, em idades de 7, 14 e 28 dias, utilizando blocos de três diferentes resistências, dois tipos de argamassa de assentamento industrializada e dois traços de graute, totalizando 12 diferentes tipos de prismas. Ademais, nas referidas idades, a argamassa e o graute foram avaliados quanto à resistência à compressão e ao módulo de deformação. Também foi avaliada a evolução da resistência da argamassa de assentamento, em função do método de moldagem e forma dos corpos de prova. Acrescenta-se que os prismas foram avaliados a respeito da interferência das suas dimensões nominais e efetivas no resultado do ensaio de resistência à compressão.

A partir da análise dos resultados dos ensaios, não há interferência significativa das dimensões dos prismas nos resultados do ensaio de resistência à compressão, bem como não há diferenças significativas em relação ao formato do corpo-de-prova da argamassa e o respectivo resultado de resistência à compressão.

Também observou-se que os resultados de resistência à compressão aos 14 dias é bem próximo do valor obtido aos 28 dias (superior a 80%). Concluiu-se também que a influência dos componentes na resistência final dos prismas pode ser analisada aos sete dias, de modo que, se, aos 7 dias, um aumento de resistência no bloco provoca aumento de resistência no prisma, esse mesmo efeito será observado aos 28 dias; da mesma forma, se, aos 7 dias, um aumento de resistência no graute provoca diminuição da resistência no prisma, esse mesmo efeito será observado aos 28 dias.

Por fim, o presente trabalho foi capaz de fornecer três expressões para a estimativa de resistência à compressão de prismas, em diferentes idades (7, 14 e 28 dias), grauteados ou não, a partir das resistências à compressão das unidades.

Palavras-chave: Alvenaria Estrutural. Bloco de Concreto. Resistência à Compressão.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study in order to assess the evolution of the compressive strength of masonry, throughout the ages, through the materials resistance study consisting of two structural concrete blocks and propose a mathematical model able to estimate compressive strength of the prisms at different ages.

For this purpose, the compressive strength tests were performed and prisms modulus of elasticity without grout and with grout, in ages of 7, 14 and 28 days, using three different resistances blocks, two types of mortar of industrialized and two lines of grout , totaling 12 different types of prisms. Moreover, in these ages, mortar and grout was evaluated for compressive strength and modulus of elasticity. It also evaluated the evolution of the mortar resistance, depending on the molding method and form of the specimens. It adds that the prisms were evaluated regarding the interference of their nominal and effective dimensions in the result of the compressive strength test.

From the analysis of the test results, there is no significant interference of the dimensions of the prisms on the results of the compressive strength test, and no significant differences in relation to the body-of-proof mortar format and the respective result of resistance compression.

It was also observed that the compressive strength results after 14 days is very close to value obtained after 28 days (greater than 80%). It was concluded that also influence of components in the final strength of the prisms can be analyzed at seven days, so that if, at 7 days, a resistance increased in block causes increase in resistance in the prism, this same effect is observed after 28 days; Likewise, if, at 7 days, a resistance increase in the grout causes a decrease in resistance in the prism, this same effect is observed after 28 days.

Finally, this study was able to provide three expressions for estimating prisms Compressive strength at different ages (7, 14 and 28 days), with grout or not, from the compressive strength of the units.

Keywords: Structural Masonry. Concrete block. Compressive Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Família de blocos estruturais de largura 14 cm com seus complementares	26
Figura 2	– Esquema do ensaio de tração indireta por compressão, conforme ASTM C1006 (1984)	33
Figura 3	– Tipos de prismas utilizados para caracterização mecânica da alvenaria estrutural: a) prisma com uma junta de argamassa, b) prismas com duas juntas de argamassa	42
Figura 4	– Esquema de distribuição de tensões na alvenaria quando submetida à compressão	43
Figura 5	– Dimensões de paredes (à esquerda) e mini-paredes (à direita) utilizadas em ensaios para determinação da resistência à compressão de alvenaria estrutural	45
Figura 6	– Variação da resistência à compressão de prismas de alvenaria de blocos vazados de concreto em função da resistência do bloco	49
Figura 7	– Efeito da resistência da argamassa na resistência à compressão de prismas de alvenaria de blocos vazados de concreto	50
Figura 8	– Efeito da espessura da junta de assentamento na resistência de prismas de alvenaria de blocos vazados de concreto	51
Figura 9	– Blocos de concreto utilizados na pesquisa sendo entregues sobre palets	56
Figura 10	– Equipamento utilizados nos ensaios de resistência a compressão dos blocos de concreto utilizados na pesquisa	58
Figura 11	– Etapas de produção dos prismas: a) identificação dos blocos; b) capeamento dos blocos com enxofre; c) assentamento dos blocos; d) verificação da espessura da junta; e) grauteamento dos furos; f) lote de prismas portos para serem ensaiados	65
Figura 12	– Fixação do equipamento utilizado na pesquisa para determinação do módulo de deformação dos blocos de concreto	66
Figura 13	– Fixação do equipamento utilizado na pesquisa para determinação do	

módulo de deformação das argamassas	68
Figura 14 – Fixação do equipamento utilizado na pesquisa para determinação do módulo de deformação dos prismas	70
Figura 15 – Resultados da resistência média à compressão (área líquida) dos blocos tipo B2 ao longo do tempo	74
Figura 16 – Curvas de resistência à compressão das argamassas utilizadas na pesquisa, considerando-se as diferentes formas dos corpos-de-prova ensaiados: prismáticos e cilíndricos	77
Figura 17 – Influência da resistência dos blocos na resistência dos prismas sem graute ...	82
Figura 18 – Influência da resistência dos blocos na resistência dos prismas grauteados ...	83
Figura 19 – Influência da resistência dos blocos na resistência dos prismas ao longo do tempo: a) 7dias, b) 14 dias e c) 28 dias.....	84
Figura 20 – Influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas das séries 1, 3, 5, 7, 9 e 11	85
Figura 21 – Influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas das séries 2, 4, 6, 8, 10 e 21 ao longo do tempo: a) 7dias, b) 14 dias e c) 28 dias	86
Figura 22 – Influência da resistência dos grautes na resistência dos prismas ao longo do tempo: a) 7dias, b) 14 dias e c) 28 dias	88
Figura 23 – Modos de ruptura de prismas não grauteados das séries 1 (B3-A1) e 2 (B2-A1) aos 28 dias: a) prisma antes da ruptura; b) prisma da série 2 após ruptura; c) prisma da série 1 após ruptura	89
Figura 24 – Modos de ruptura de prismas não grauteados das séries 7 (B3-A1) e 8 (B2-A1) aos 28 dias: a) prisma B3-A1, vista lateral; b) prisma B3-A1, perspectiva; c) prisma B2-A1, perspectiva; d) prisma B2-A1, vista lateral	90
Figura 25 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B3-A1-G1, vista lateral; b) prisma B3-A1-G1, perspectiva; c) prisma B2-A1-G1, perspectiva; d) prisma B2-A1-G1, vista lateral	91
Figura 26 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B3-A1-G2, vista lateral; b) prisma B3-A1-G2, perspectiva; c) prisma B2-A1-G2,	

perspectiva; d) prisma B2-A1-G2, vista lateral	91
Figura 27 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B1-A2-G1, vista lateral; b) prisma B1-A2-G1, perspectiva; c) prisma B2-A2-G1, perspectiva; d) prisma B2-A2-G1, vista lateral	92
Figura 28 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B1-A2-G2, vista lateral; b) prisma B1-A2-G2, perspectiva; c) prisma B2-A2-G2, perspectiva; d) prisma B2-A2-G2, vista lateral	92
Figura 29 – Evolução da resistência à compressão para as 12 séries de prismas, 2 tipos de argamassas e 2 tipos de grautes ensaiados durante a execução desta pesquisa	97
Figura 30 – Evolução da resistência à compressão para os 2 tipos de argamassas e 2 tipos de grautes ensaiados durante a execução desta pesquisa	98
Figura 31 – Evolução da resistência à compressão para as 12 séries de prismas ensaiados durante a execução desta pesquisa: a) todas as 12 séries; b) séries não grauteadas; c) detalhamento das séries B2-A1-G2 e B2-A2-G2	99
Figura 32 – R_j/R_{28} entre a resistência à compressão numa idade “j” (R_j) e a resistência à compressão aos 28 dias (R_{28}) para todas as séries de prismas, argamassas e grautes utilizados na pesquisa	100
Figura 33 – R_j/R_{28} entre a resistência à compressão numa idade “j” (R_j) e a resistência à compressão aos 28 dias (R_{28}) para: a) argamassas e grautes; b) todas as séries de prismas	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência mínima à compressão para blocos de concreto de acordo com a ASTM C90-15 (2015)	25
Tabela 2 – Dimensões padronizadas para algumas famílias de blocos de concreto inteiro, conforme ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014)	26
Tabela 3 – Espessura mínima das paredes dos blocos de concreto, conforme ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014)	27
Tabela 4 – Requisitos para absorção e retração de blocos de concreto, conforme a ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014)	28
Tabela 5 – Absorção máxima (%) para blocos de concreto segundo a ASTM C90-15 (2015)	28
Tabela 6 – Teor de umidade admissível para os blocos de concreto, conforme ASTM C90-15 (2015)	29
Tabela 7 – Valores de \emptyset para cálculo da resistência a compressão de blocos de concreto, conforme a ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014)	32
Tabela 8 – Valores de \emptyset	46
Tabela 9 – Dimensões dos blocos vazados de concreto utilizados na pesquisa	57
Tabela 10 – Características físicas dos blocos vazados de concreto utilizados na pesquisa.....	57
Tabela 11 – Propriedades da argamassa de assentamento A1 utilizada na pesquisa	59
Tabela 12 – Propriedades da argamassa de assentamento A2 utilizada na pesquisa	59
Tabela 13 – Traços dos grautes utilizados na pesquisa	60
Tabela 14 – Propriedades cimento utilizado para confecção dos grautes	61
Tabela 15 – Composição granulométrica da areia utilizada na pesquisa	61
Tabela 16 – Características físicas da areia utilizada na pesquisa	62
Tabela 17 – Características físicas da brita utilizada na pesquisa	62
Tabela 18 – Composição granulométrica da brita utilizada na pesquisa	62

Tabela 19 – Combinações de bloco, argamassa e graute utilizadas para confecção dos prismas	63
Tabela 20 – Resistência média à compressão dos blocos de concreto utilizados na pesquisa	73
Tabela 21 – Resistência média do módulo de elasticidade dos blocos de concreto utilizados na pesquisa	73
Tabela 22 – Cálculo do módulo de deformação dos blocos, de acordo com o ACI Building Code 318	74
Tabela 23 – Valores médios de resistência à tração na flexão de CP's prismáticos das argamassas utilizadas na pesquisa	75
Tabela 24 – Valores médios de resistência à compressão de CP's prismáticos das argamassas utilizadas na pesquisa	75
Tabela 25 – Valores médios de resistência à compressão de CP's cilíndricos das argamassas utilizadas na pesquisa	76
Tabela 26 – Valores médios de módulo de deformação das argamassas utilizadas na pesquisa	77
Tabela 27 – Valores médios de resistência à compressão dos grautes utilizadas na pesquisa	78
Tabela 28 – Valores médios de módulo de deformação dos grautes utilizadas na pesquisa	79
Tabela 29 – Valores médios de resistência à compressão dos diferentes tipos de prismas utilizados na pesquisa	80
Tabela 30 – Valores médios do módulo de deformação dos diferentes tipos de prismas utilizados na pesquisa	81
Tabela 31 – Diferença percentual entre as tensões de ruptura obtidas utilizando-se as dimensões efetivas e as tensões obtidas considerando-se as dimensões nominais, em relação às tensões obtidas considerando-se as dimensões efetivas, para os prismas das séries 01 a 06	93
Tabela 32 – Diferença percentual entre as tensões de ruptura obtidas utilizando-se as	

dimensões efetivas e as tensões obtidas considerando-se as dimensões nominais, em relação às tensões obtidas considerando-se as dimensões efetivas, para os prismas das séries 07 a 12	94
Tabela 33 – Comparativo dos Módulos de elasticidade das argamassas obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores	95
Tabela 34 – Comparativo dos Módulos de elasticidade dos grautes obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores	96
Tabela 35 – Comparativo dos Módulos de elasticidade dos prismas obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores	96
Tabela 36 – Comparativo dos Módulos de elasticidade dos prismas obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo do resultado de ensaios experimentais de algumas pesquisas nacionais sobre a resistência à compressão de alvenarias (valores em MPa)	46
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Problema	20
1.2	Justificativa	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Geral	21
1.3.2	Específicos	21
1.4	Estrutura do Texto	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Breve histórico da alvenaria estrutural	24
2.2	Componentes da alvenaria estrutural de blocos de concreto	24
2.2.1	Blocos de Concreto	24
2.2.1.1	Propriedades Físicas	27
2.2.1.2	Propriedades Mecânicas	30
2.2.2	Argamassa de Assentamento	34
2.2.2.1	Propriedades	35
2.2.2.2	Trabalhabilidade	35
2.2.2.3	Retenção de água	36
2.2.2.4	Aderência	37
2.2.2.5	Resiliência	37
2.2.2.6	Resistência à compressão	38
2.2.3	Graute	38
2.2.3.1	Propriedades	39
2.2.3.2	Trabalhabilidade	39
2.2.3.3	Aderência	40
2.2.3.4	Resistência à compressão	40
2.3	Alvenaria	41

2.3.1	<i>Prismas</i>	42
2.3.2	<i>Mecanismo de Ruptura</i>	43
2.3.3	<i>Resistência à Compressão</i>	44
2.3.4	<i>Fatores que afetam a resistência da alvenaria</i>	48
2.3.4.1	<i>Resistência do bloco</i>	48
2.3.4.2	<i>Resistência da argamassa de assentamento</i>	49
2.3.4.3	<i>Geometria do Bloco</i>	50
2.3.4.4	<i>Espessura da junta de assentamento</i>	51
2.3.4.5	<i>Características de deformação das unidades e da argamassa</i>	51
2.4	Equações para estimar a resistência e propriedades da alvenaria	52
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	56
3.1	Caracterização dos materiais e ensaios realizados	56
3.1.1	<i>Blocos</i>	56
3.1.2	<i>Argamassa de assentamento</i>	58
3.1.3	<i>Graute</i>	60
3.2	Prismas	63
3.3	Instrumentação e determinação do módulo de deformação para os prismas e seus componentes.	65
3.3.1	<i>Bloco</i>	66
3.3.2	<i>Argamassa de assentamento</i>	67
3.3.3	<i>Graute</i>	68
3.3.4	<i>Prisma</i>	69
3.4	Modelo matemático	71
4	ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	73
4.1	Blocos	73
4.2	Argamassas	74
4.3	Grautes	78
4.4	Prismas	79

4.4.1	<i>Influência da resistência do bloco na resistência do prisma.....</i>	82
4.4.2	<i>Influência da resistência da argamassa na resistência do prisma.....</i>	85
4.4.3	<i>Influência da resistência do graute na resistência do prisma.....</i>	87
4.4.4	<i>Modos de ruptura dos prismas.....</i>	89
4.4.5	<i>Influência das dimensões nominais e efetivas dos prismas no resultado do ensaio de compressão axial.....</i>	92
4.4.6	<i>Comparativo dos resultados de módulos de elasticidade obtidos experimentalmente e calculado a partir de equações analíticas.....</i>	94
4.5	Avaliação da resistência à compressão ao longo do tempo	97
4.6	Modelo Matemático	102
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	105
	REFERÊNCIAS	108
	ANEXO A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA	113
	ANEXO B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	124

1 INTRODUÇÃO

O direito à moradia estampa a necessidade básica do homem, sendo requisito imprescindível para uma vida plena. E como tal, está expressamente incluído no rol dos direitos constitucionais como direito social fundamental, conforme o artigo 6º da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988).

Apesar de caracterizada como direito fundamental e necessidade básica, nem todos os brasileiros tem acesso à moradia, pois, segundo dados da Fundação João Pinheiro (2015), o déficit habitacional no Brasil, em 2012, era da ordem de 5,43 milhões de moradias; no Ceará este número chega a 246.274 moradias; e só na região metropolitana de Fortaleza, o déficit chega a 123.361 domicílios.

Segundo artigo do portal Valor Econômico (BRASIL..., 2014) esse índice continuará crescendo, sendo necessário um investimento de R\$ 760 bilhões até o ano de 2024 para atender ao volume de construção de 1 milhão de residências por ano.

Por outro lado, o atual cenário de crise da economia brasileira, e a conseqüente redução do crédito imobiliário, dificultam ainda mais um investimento anual dessa ordem, impondo ao Setor da Construção uma renovação técnica e a busca por métodos de construção capazes de elevar a produtividade e minimizar custos.

Uma boa resposta a essa conjuntura é a opção pela alvenaria estrutural, sistema construtivo utilizado desde a Antiguidade até os dias atuais, cujas principais características são, dentre outras: fácil aplicação dos materiais, racionalização e a redução dos prazos de execução em comparação a outras técnicas construtivas, sendo frequentemente adotada em obras do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV).

Tal utilização no PMCMV decorre do fato de que as edificações tornam-se mais baratas para o construtor, tornando-se mais viáveis para o consumidor, evidenciando o grande benefício social que pode advir desse processo construtivo, principalmente num país que tem um grande déficit habitacional a eliminar (JUSTE, 2001).

Contudo, o conhecimento atual ainda não permite o estabelecimento límpido de um conjunto de parâmetros e seus respectivos coeficientes de segurança a serem utilizados em projetos de alvenaria estrutural (BARBOSA, 2008; PARSEKIAN & SOARES, 2010).

Alguns avanços foram introduzidos pelas normas de projeto de alvenaria estrutural atualmente em vigor no Brasil – ABNT NBR 15812-1 (ABNT, 2010) e ABNT NBR 15961-1 (ABNT, 2010) – como, por exemplo, emprego da análise estrutural através do Método dos Estados Limites em substituição ao Método das Tensões Admissíveis –

preconizado pela ABNT NBR 10837 (ABNT, 1989). Todavia, os mesmos dispositivos normativos estabelecem alguns coeficientes de segurança considerados bastante conservadores por alguns autores (IZIQUIERDO, 2015; PARSEKIAN & SOARES, 2010).

Vale ressaltar que à medida que o comportamento de um material (sistema construtivo) torna-se mais conhecido e dominado, os coeficientes de segurança e alguns parâmetros e/ou recomendações de projeto podem ser minimizados/otimizados. Deste modo, permite-se a utilização mais eficiente dos materiais – por exemplo, o emprego de seções mais esbeltas – possibilitando ganhos em menor consumo de material, conseqüentemente, menor custo de execução e, até mesmo, menor prazo de duração da obra.

Assim, os resultados de novas pesquisas sobre o comportamento da alvenaria, em especial, o desenvolvimento da resistência à compressão e suas correlações com as propriedades mecânicas dos componentes que a constituem contribuem para melhores esclarecimentos dos coeficientes a serem utilizados em projetos.

1.1 Problema

Obter parâmetros e formulação matemática para estimar a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo de prismas de blocos estruturais de concreto, conhecidas as propriedades mecânicas (resistência à compressão e/ou módulo de elasticidade) de seus constituintes – bloco, argamassa e graute.

1.2 Justificativa

A alvenaria estrutural, devido às diversas vantagens inerentes a esse sistema construtivo, tem sido bastante adotada para execução de Habitações de Interesse Social (HIS) (MATA, 2006; JUSTE, 2001).

Apesar do uso remoto desse sistema construtivo, ainda é incipiente o número de trabalhos conclusivos sobre o seu comportamento no que se refere a evolução e distribuição de tensões/deformações do material, coeficientes de segurança, dentre outras características (IZIQUIERDO, 2015; PARSEKIAN *et al.*, 2012; BARBOSA, 2008; SILVA, 2007; MATA, 2006; JUSTE, 2001).

Com isso, faz-se necessário isolar e conhecer melhor cada uma das variáveis que intervêm no comportamento estrutural, sobretudo as interferências e variabilidades no

desenvolvimento da resistência à compressão da alvenaria em decorrência das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

Seguindo essa linha, alguns estudos, além de normas estrangeiras, propõem modelos matemáticos para prever a resistência à compressão da alvenaria estrutural a partir da resistência à compressão dos seus componentes (JABER *apud* Fortes, 2012; KHALAF, 1991; HILSDORF, 1969; EUROCODE 6, 1996). Entretanto, a variável tempo não está associada a nenhum desses modelos, surgindo a necessidade do desenvolvimento de novos modelos que introduzam tal variável no cálculo.

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo central abrir possibilidade de estimar a resistência à compressão da alvenaria ao longo do tempo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

O objetivo geral da pesquisa é estudar o comportamento estrutural de prismas de blocos estruturais de concreto (prisma é um corpo-de-prova obtidos pela superposição de blocos unidos pro junta de argamassa, grauteados ou não) ao longo do tempo quando submetidos a ensaio de compressão axial, bem como a interferência das propriedades mecânicas de seus constituintes (bloco, argamassa e graute) nesse comportamento.

1.3.2 Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar mecanicamente os blocos de concreto, argamassas e grautes comumente utilizados em obra de alvenaria estrutural na Região Metropolitana de Fortaleza;
- b) Avaliar experimentalmente a resistência à compressão de blocos de concreto, argamassas e grautes, prismas ocos e cheios em diferentes idades;
- c) Verificar as propriedades mecânicas de blocos estruturais de concreto (resistência à compressão e módulo de deformação) e a influência dessas propriedades na resistência à compressão do prisma de alvenaria;

- d) Verificar as propriedades mecânicas de argamassas (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação) e a influência dessas propriedades na resistência à compressão do prisma de alvenaria;
- e) Verificar as propriedades mecânicas de grautes (resistência à compressão e módulo de deformação) e a influência dessas propriedades na resistência à compressão do prisma de alvenaria;
- f) Verificar a influência das dimensões nominais e efetivas de prismas de alvenaria no seu resultado do ensaio de compressão axial;
- g) Estabelecer relações (fatores de eficiência) entre a resistência à compressão dos blocos e a resistência à compressão de prismas de alvenaria;
- h) Analisar os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos componentes (bloco, graute e argamassa) em comparação com resultados obtidos através de equações para estimar essa propriedade;
- i) Analisar os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos prismas em comparação com resultados obtidos através de equações para estimar essa propriedade;
- j) Propor um modelo matemático capaz de estimar a resistência à compressão de primas de blocos estruturais de concreto ao longo do tempo em função da resistência à compressão de seus componentes em diferentes idades.

1.4 Estrutura do Texto

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo que na introdução foi apresentado o tema em estudo, indicando a hipótese do trabalho, os motivos que levaram à pesquisa, a importância e os objetivos desta.

O capítulo 2 apresenta revisão sobre o estado-da-arte da Alvenaria Estrutural, enfatizando os assuntos diretamente relacionados com os objetivos do presente trabalho, dissertando-se sobre os principais fatores intervenientes no comportamento estrutural dos elementos de alvenaria, as propriedades mecânicas dos materiais que constituem as unidades e sobre as pesquisas que utilizam modelos matemáticos para previsão da resistência e deformabilidade destas estruturas.

A parte metodológica da pesquisa é detalhada no Capítulo 3, destacando-se os ensaios realizados com os componentes (blocos, argamassas e grautes) e prismas.

Os resultados experimentais são apresentados no Capítulo 4, no qual as correlações entre as propriedades mecânicas dos materiais são estabelecidas e o comportamento dos elementos nos respectivos ensaios. Apresentam-se ainda a análise teórica embasada nos resultados experimentais e os resultados provenientes da modelagem matemática.

Finalmente, o Capítulo 5 destina-se à síntese das conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo descreve os materiais componentes da alvenaria estrutural em blocos de concreto, suas propriedades físicas e mecânicas, bem como essas características influenciam na resistência à compressão dos prismas de alvenaria estrutural e no seu modo de ruptura. Também está presente uma revisão de pesquisas anteriores, cujas abordagens envolvem tanto ensaios experimentais, como modelos matemáticos sobre o comportamento da alvenaria estrutural sob compressão.

2.1 Breve histórico da alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo bastante antigo em que o homem utilizava blocos espessos de pedra para construir as edificações. A estrutura e arquitetura das construções, nesta época, eram caracterizadas pela execução de paredes com grande espessura, e pela utilização de formas e arcos, na tentativa de alcançar maiores vãos (FRASSON JUNIOR, 2000).

As construções em alvenaria estrutural, até o final do século XIX, eram erguidas segundo regras puramente empíricas, baseadas nos conhecimentos adquiridos ao longo dos séculos (SABBATINI, 1984).

As pesquisas iniciais no Brasil, sobre alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, foram desenvolvidas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por volta das décadas de 70 e 80 (PARSEKIAN& SOARES, 2010).

Destaca-se ainda que o sistema de alvenaria estrutural é bastante aplicado em empreendimentos habitacionais de larga escala, em que é exigido uma maior racionalização dos processos, planejamento, controle, rapidez e menor custo, os quais constituem exigências que são contempladas pela opção do referido sistema (PARSEKIAN& SOARES, 2010).

2.2 Componentes da alvenaria estrutural de blocos de concreto

2.2.1 Blocos de Concreto

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014), o bloco vazado de concreto é o elemento básico da alvenaria cuja área líquida é igual ou inferior a

75% da área bruta. Ainda de acordo com a referida norma, também podem ser utilizados os blocos perfurados (quando a sua área líquida estiver entre 75 e 100% da área bruta) e maciços (quando a área líquida for igual a área bruta).

Medeiros & Sabbatini (1993) definem o bloco de concreto como “unidade de alvenaria constituída pela mistura homogênea, adequadamente proporcionada, de cimento Portland, agregado miúdo, grão e água, conformada através de vibração e prensagem possuindo dimensões superiores a 250 x 120 x 55 mm (comprimento x largura x altura)”.

Para a norma americana ASTM C 90-15 (2015), o bloco de concreto é uma unidade obtida a partir da mistura de cimento Portland, água e agregados minerais, com ou sem a adição de outros materiais.

Já a norma britânica BS 6073-2 (2008) define este mesmo bloco como sendo a unidade de alvenaria que excede as dimensões máximas dos tijolos, seja no comprimento, na altura ou na largura, devendo ter altura máxima de seis vezes a largura e o volume das cavidades que o atravessam na direção da altura, ser inferior a 50% do volume total do bloco.

Quanto a aplicação dos blocos, a ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014) os dividem em três classes:

- Classe A ($f_{bk} \geq 8,0\text{MPa}$) – podem ser aplicados em todas as situações, acima ou abaixo do nível do solo, e podem ser expostos à umidade;
- Classe B ($4,0\text{MPa} \leq f_{bk} < 8,0\text{MPa}$) – podem ser usados em qualquer estrutura, desde que esteja acima do nível do solo e sem contato com umidade;
- Classe C ($f_{bk} \geq 3,0\text{MPa}$) – única classe que pode ser utilizada como vedação, quando utilizado com função estrutural limita-se à edificações de cinco pavimentos, acima do nível do solo e sem contato com umidade.

Por outro lado, a ASTM C90-15 (2015) classifica os blocos estruturais vazados de concreto por sua resistência mínima à compressão (Tabela 1) de acordo com o uso – não por classes de resistência.

Tabela 1 – Resistência mínima à compressão para blocos de concreto de acordo com a ASTM C90-15 (2015).

Classe	Resistência à compressão (MPa)	
	Média de 3 blocos	Valor individual
N	6,88	5,51
S	4,42	4,13

Fonte: ASTM C90-15 (2015).

Com relação às medidas dos blocos, a ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014) preconiza dimensões padronizadas. A Tabela 2 mostra alguns desses valores para blocos inteiros das famílias de blocos mais utilizadas em edificações. Vale ressaltar que a referida norma permite tolerâncias para a largura de $\pm 2\text{mm}$ e para a altura e comprimento de $\pm 3\text{mm}$.

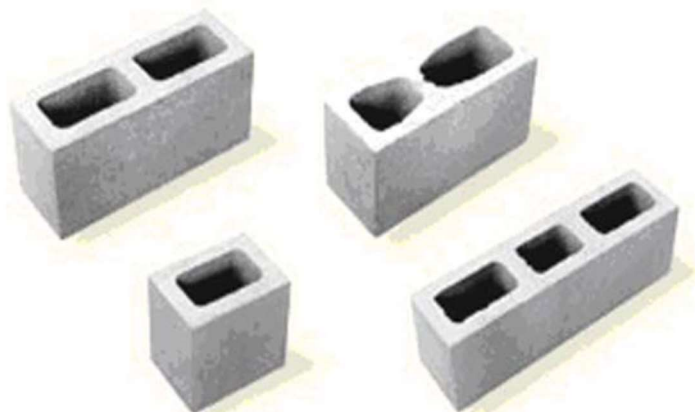
Tabela 2 – Dimensões padronizadas para algumas famílias de blocos de concreto inteiro, conforme ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014).

Família	Medida Nominal (mm)		
	Largura	Altura	Comprimento
20 x 40	190	190	390
15 x 40	140	190	390
15 x 30	140	190	290

Fonte: ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014).

A Figura 1 ilustra exemplos da geometria de uma família de blocos de 14 cm com seus elementos complementares.

Figura 1 – Família de blocos estruturais de largura 14 cm com seus complementares.



Fonte: Mohamad (2007)

Para que os blocos sejam considerados estruturais, as espessuras das paredes também devem atender à valores mínimos, especificados na norma ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014). A Tabela 3 mostra alguns desses valores para os blocos de Classe A e B. Ainda com relação a essa Tabela, as espessuras de paredes são obtidas calculando-se a média das medidas das paredes, em cada sentido (longitudinal/transversal), tomadas no ponto mais estreito. Já a espessura equivalente é obtida através da soma das espessuras de todas as

paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal dos blocos (em metros).

Tabela 3 – Espessura mínima das paredes dos blocos de concreto, conforme ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014).

Classe	Largura Nominal (mm)	Espessura das Paredes longitudinais (mm)	Paredes transversais	
			Espessura (mm)	Espessura Equivalente (mm/m)
A	190	32	25	188
	140	25		
B	190	32	25	188
	140	25		

Fonte: ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014).

2.2.1.1 Propriedades Físicas

Os blocos estruturais de concreto são caracterizados por três propriedades físicas: absorção, teor de umidade e retração por secagem (ABNT, 2014; MATA, 2006; STEIL, 2003). Adiante serão abordadas cada uma dessas propriedades.

A capacidade de absorção de água é utilizada como um indicador da quantidade de vazios e da permeabilidade do bloco e, conseqüentemente, de sua durabilidade. Além disso, se a absorção inicial é alta, quando em contato com a argamassa e o graute, o bloco pode absorver muita água destes materiais, prejudicando a hidratação da pasta de cimento dos mesmos e, com isso, diminuindo a resistência desses componentes, (PARSEKIAN& SOARES, 2010), além disso, a alta absorção dos blocos poderá ocasionar perda de aderência da argamassa e retração do graute (MATA, 2006; CALÇADA, 1998).

Para o cálculo desta propriedade, há um método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 12118:2007 (ABNT, 2007), no qual a absorção é calculada através da equação abaixo:

$$a(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

- a (%) = medida da absorção do (s) bloco(s);
- m_1 = massa seca em gramas (após secagem em estufa por 24 horas);
- m_2 = massa saturada em gramas (após imersão em água por 24 horas).

A ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014) estabelece valores limites para esta absorção, tais valores variam de acordo com a classe a que pertencem os blocos e o tipo de agregado utilizado na fabricação dos mesmos (Tabela 4). O menor valor desta propriedade, conforme a mesma norma, é estabelecido para os blocos de “classe A”, fabricados com agregados normais, cuja absorção máxima é de 8% para resultados individuais e 6% para a média dos blocos ensaiados.

Tabela 4 – Requisitos para absorção e retração de blocos de concreto, conforme a ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014).

Classe	Absorção (%)			
	Agregado normal		Agregado leve	
	Individual	Média	Individual	Média
A	≤ 8,0	≤ 6,0		
B	≤ 10,0	≤ 8,0	≤ 16,0	≤ 13,0
C	≤ 12,0	≤ 10,0		

Fonte: ABNT (2014)

A norma americana ASTM C90-15 (2015) também utiliza a classe dos blocos para definir o limite de absorção. Entretanto, para a fixação dos valores máximos dessa propriedade, utiliza-se o peso seco das unidades (Tabela 5), ao invés do tipo de agregado empregado na produção dos blocos.

Tabela 5 – Absorção máxima (%) para blocos de concreto segundo a ASTM C90-15 (2015).

Família	Absorção (média 3 blocos)		
	Massa específica seca (kgf/m³)		
	>2000	1680-2000	<1680
Vazado, classe N			
Vazado, classe S	13	15	18
Perfurado, classe N			
Perfurado, classe S			
Maciço, classe N	10	13	15
Maciço, classe S	13	15	18

Fonte: ASTM C90-15 (2015).

Com relação ao teor de umidade dos blocos, a ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014) não estabelece nenhum valor limite para fins de utilização em obra. Essa propriedade, segunda a referida norma, é estabelecida apenas para fins de aceitação dos resultados do ensaio de compressão destes componentes, prescrevendo as seguintes condições:

- Classe A ($f_{bk} \geq 8,0\text{MPa}$) – o teor de umidade média, no momento da execução do ensaio de compressão deve ser de $40 \pm 20\%$;
- Classe B e C ($f_{bk} < 8,0\text{MPa}$) – o teor de umidade média, no momento da execução do ensaio de compressão deve ser de $25 \pm 15\%$;

Em ambas as condições e quando o teor de umidade dos blocos for superior ao especificado acima, a norma brasileira permite a aceitação dos resultados do ensaio de compressão, no caso de valores superiores ao especificado em projeto.

Quando o teor de umidade dos blocos for inferior ao especificado acima, a norma brasileira indica a rejeição dos resultados do ensaio de compressão, mesmo no caso de valores superiores ao especificado em projeto.

Já a ASTM C90-15 (205) fixa o teor máximo de umidade para a utilização dos blocos, em função da sua retração por secagem e da umidade relativa anual média do local de utilização. Estes valores podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Teor de umidade admissível para os blocos de concreto, conforme ASTM C90-15 (2015).

Retração linear (%)	Umidade máxima de utilização dos blocos para diferentes condições de umidade relativa do ar		
	Úmido*	Intermediário**	Árido***
$S = 0,030$	45	40	35
$0,030 < S < 0,045$	40	35	30
$0,045 < S < 0,065$	35	30	25

* Umidade relativa anual média superior a 75%

** Umidade relativa anual média entre 50% e 75%

*** Umidade relativa anual média inferior a 50%

Fonte: ASTM C90-15 (2015).

O cálculo do teor de umidade dos blocos é normatizado pela ABNT NBR 12118:2007 (ABNT, 2007), e obtido através da equação abaixo:

$$u(\%) = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde: u (%) = medida do teor de umidade do(s) bloco(s);

m_1 = massa seca em gramas (após secagem em estufa por 24 horas);

m_2 = massa saturada em gramas (após imersão em água por 24 horas);

m_3 = massa aparente em gramas.

Em se tratando da retração linear por secagem, sabe-se que o bloco de concreto, semelhantemente ao concreto convencional, quando absorve umidade expande-se e, da mesma forma, quando perde umidade retrai-se. Este movimento do bloco quando inserido na parede pode provocar o aparecimento de fissuras e a diminuição da vida útil da parede. Assim a retração linear por secagem é uma medida dessa movimentação, sendo definida por Mata (2006) como a mudança de comprimento do bloco do estado úmido para seco, ocasionada pela diminuição do volume do mesmo quando a água presente no seu interior evapora.

A ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014) limita em 0,065% o valor máximo da retração linear por secagem para todos os blocos ensaiados, independente da classe a que pertencem – mesmo valor adotado pela ASTM C90 (1991). Todavia, a norma brasileira torna optativa a execução do ensaio para obtenção desta característica. O método para mensurá-la é especificado pela ABNT NBR 12118:2007 (ABNT, 2007), cujo resultado é obtido através da expressão abaixo:

$$S = \frac{L}{G} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

- S = medida da retração linear do bloco;
- L = variação média da dimensão do corpo de prova na condição saturada e o ponto de constância de massa ou de comprimento em milímetros, após ciclos de saturação em tanque de água e secagem em estufa;
- G = medida inicial da dimensão do corpo-de-prova analisada no ensaio.

2.2.1.2 Propriedades Mecânicas

Mata (2006) e Steil (2003) classificam a resistência à compressão, a resistência à tração, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson como sendo as principais propriedades mecânicas dos blocos de concreto. Adiante, tais propriedades serão detalhadas.

A resistência à compressão do bloco é o principal parâmetro de dimensionamento da alvenaria estrutural, sendo assim, esta propriedade é a principal variável do controle de qualidade dos blocos (PARSEKIAN *et al.*, 2012; FORTES, 2012; MATA, 2006; STEIL, 2003; DRYSDALE *et al.*, 2002).

Essa propriedade mecânica sofre influência de diversos fatores, que incluem desde o processo de produção (materiais utilizados, equipamentos de produção, tipo de cura, etc) até a execução do ensaio para medir esta característica – quanto menor a relação altura/espessura

da unidade, maior será o efeito do confinamento gerado pelo atrito com os pratos do equipamento de ensaio, induzindo a um estado triaxial de tensões e, com isso, elevando os resultados além dos valores reais para a compressão axial (MEDEIROS, 1993).

O ensaio para determinação da resistência à compressão de blocos de concreto é prescrito pela ABNT NBR 12118:2007 (ABNT, 2007). Já a equação para o cálculo dessa propriedade, é estabelecida pela ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014). Esta norma estabelece duas formas de cálculo: uma quando o desvio-padrão da série histórica é conhecido e outra quando tal medida de dispersão não é conhecida.

Quando se conhece o desvio-padrão da série histórica de ensaios, pode ser utilizada a equação abaixo:

$$f_{bk,est} = f_{bm} - 1,65 \times s_d \quad (4)$$

Onde: $f_{bk,est}$ = valor estimado da resistência característica à compressão dos blocos;
 f_{bm} = resistência característica à compressão média da amostra;
 s_d = desvio-padrão da série histórica de ensaios.

Caso o desvio-padrão seja desconhecido (caso mais comum), deve-se utilizar a seguinte expressão:

$$f_{bk,est} = 2 \frac{f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{bn-1}}{n-1} - f_{bi} \quad (5)$$

Onde: $f_{bk,est}$ = valor estimado da resistência característica à compressão dos blocos;
 $f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{bn-1}$ = valores individuais de resistência à compressão dos blocos da amostra, ordenados em ordem crescente;
 n = número de blocos da amostra;
 i = $\frac{n}{2}$, se n for par ou $i = \frac{n-1}{2}$, se n for ímpar.

ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014) prescreve ainda que não se deve adotar $f_{bk,est}$ menor que f_{bk1} – espécie de valor auxiliar de cálculo, obtido pela equação abaixo:

$$f_{bk1} = f_{b1} \times \emptyset \quad (6)$$

Sendo \emptyset dado pela Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de ϕ para cálculo da resistência a compressão de blocos de concreto, conforme a ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014).

Número de blocos da amostra	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ϕ	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1	1,01

Fonte: ABNT (2014)

Na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), os blocos estruturais de concreto comumente comercializados no mercado possuem resistência à compressão superiores a 4,0 MPa. Contudo, seguindo engenheiros estruturais da região, especializados em projetos de edificações em alvenaria estrutural, frequentemente indica-se a utilização de blocos com resistência à compressão de 6,0 MPa para edificações até 4 pavimentos, mesmo que as unidades com resistência à compressão de 4,0 MPa satisfaça as condições de cálculo – segundo os mesmos projetistas, os blocos de 4,0 MPa apresentam-se com extremidades quebradiças (informação verbal)¹.

Um fenômeno interessante que pode ocorrer com os blocos que constituem a alvenaria estrutural é o fato de estarem sujeitos a tensões de tração, mesmo a parede sendo carregada à compressão, isto decorre da interação bloco-argamassa nas juntas da alvenaria (MATA, 2006; STEIL, 2003; MOHAMAD, 1998).

Atualmente não existe normatização brasileira para obtenção da resistência à tração dos blocos. Um dos métodos mais utilizado para a obtenção dessa propriedade é o método indireto, no qual a resistência à tração é determinada a partir da compressão de um bloco apoiado sobre duas barras de aço (Figura 2). Este método é descrito na norma americana ASTM C1006 (1984) e a resistência à tração é obtida utilizando-se a seguinte equação:

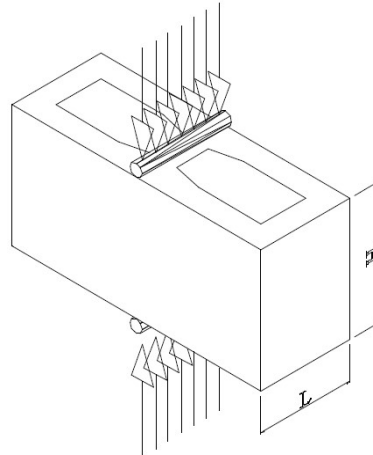
$$f_{bt} = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times H} \quad (7)$$

Onde:

- f_{bt} = valor da resistência à compressão indireta por compressão dos blocos;
- P = carga de ruptura;
- L = largura do bloco;
- H = altura do bloco.

¹ Informação obtida através de entrevistas com Engenheiros Calculistas da Região Metropolitana de Fortaleza.

Figura 2 – Esquema do ensaio de tração indireta por compressão, conforme ASTM C1006 (1984).



Fonte: ASTM C1006 (1994)

Existem duas outras propriedades mecânicas dos blocos que estão diretamente relacionadas com o desenvolvimento das tensões de tração nestas unidades: o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson – blocos mais deformáveis (menor módulo de elasticidade e maior coeficiente de Poisson) estão sujeitos a menores tensões de tração na interface bloco/argamassa (STEIL, 2003).

Ainda não há ensaios normalizados para a determinação destas propriedades mecânicas. Steil (2003) recomenda adotar o coeficiente de Poisson igual a 0,20.

Para a obtenção do módulo de elasticidade da unidade, tem-se adotado o mesmo procedimento utilizado em prismas de alvenaria: expressa o valor do módulo de elasticidade pelo coeficiente angular da reta que une os pontos correspondentes a 5% e 33% da tensão de ruptura no diagrama tensão x deformação, (DRYSDALE *et. al*, 2002).

Outra alternativa para obtenção do módulo de elasticidade dos blocos de concreto é a utilização de expressões matemáticas que estimam essa propriedade a partir da resistência à compressão da unidade. As equações 8, 9 e 10 – sugeridas respectivamente pela ABNT BR 6118:2014 (ABNT, 2014), por CEB - FIP Model Code 1990 (ASTM, 1993) e por ACI BuildingCode530 (2013), para concretos com massa específica entre 1442 e 2483 kg/m³ – ilustram algumas dessas expressões.

$$E_b = 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \text{ ou } \left(\frac{f_{ckj}}{f_{ck}}\right)^{0,5} \times E_b \quad (8)$$

$$E_b = 4730 \times \sqrt{f_{ck}} \text{ ou } 25000 \times \sqrt[3]{\frac{f_b}{10}} \quad (9)$$

$$E_b = 0,0428 \times \sqrt{f_b} \times (W_b)^{1,5} \quad (10)$$

Onde:

- E_b = valor módulo de elasticidade do bloco (MPa);
- f_b = resistência à compressão do bloco (MPa);
- f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto (MPa);
- f_{ckj} = resistência característica à compressão do concreto na idade em que se pretende estimar o módulo de elasticidade (MPa);
- W_b = massa unitária do bloco (kg/m³).

2.2.2 Argamassa de Assentamento

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR13281:2005 (ABNT, 2005), a argamassa de assentamento é uma mistura homogênea de agregados miúdo(s), aglomerante(s) e água contendo, ou não, aditivos com propriedades de aderência e endurecimento podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

Para Solórzano (1994), as argamassas de assentamento podem ser entendidas como um material de construção sem forma definida, mas com função específica de unir as unidades de alvenaria que, após emprego, converte-se em junta de argamassa com forma e funções bem definidas.

As principais funções que as argamassas destinadas ao assentamento de blocos de alvenaria estrutural devem apresentar são (PARSEKIAN & SOARES, 2010; MATA, 2006; GALLEGOS, 1989):

- Unir solidariamente as unidades de alvenaria, transmitindo esforços e transformando-a em uma estrutura monolítica;
- Distribuir uniformemente as cargas atuantes por toda a área resistente dos blocos;
- Resistir a esforços mecânicos;
- Acomodar as deformações naturais, as quais a parede estiver submetida;
- Selar as juntas contra penetração de água;
- Absorver as irregularidades dos blocos, de forma que as fiadas fiquem uniformes, aprumadas e niveladas.

Steil (2003) tipifica quatro classes de argamassa de assentamento: argamassas de cal, argamassas de cimento de alvenaria, argamassas de cimento Portland com ou sem aditivos e argamassas mistas de cal e cimento

De acordo com Sabbatini (1986) e Mata (2006), não se recomenda a utilização dos dois primeiros tipos de argamassa no assentamento de alvenaria estrutural. Já a argamassa de cimento Portland sem aditivos possui uso bastante restrito nesse tipo de edificação (SOLÓRZANO, 1984).

As argamassas mista de cimento e cal reúnem as propriedades e vantagens das argamassas feitas com cada material isolado: a resistência dada pelo cimento e a trabalhabilidade e retenção de água dada pela cal. Devido a estes benefícios, e à facilidade de produção no canteiro de obras, é o tipo de argamassa mais utilizada no assentamento estrutural.

Já as argamassas de cimento Portland com aditivos, têm sido cada vez mais utilizadas nesse tipo de obra. Um dos motivos, segundo Steil (2003), é a possibilidade de maior racionalização do processo construtivo quando da utilização deste insumo na forma de argamassas industrializadas, e por este motivo, esta classe de argamassa foi empregada para realização do presente estudo. Atualmente, existem mais de 20 fabricantes nacionais de argamassas industrializadas de assentamento estrutural.

Em um levantamento feito por Araújo (2001) junto às principais construtoras da grande Florianópolis observou-se que 80% das obras utilizavam argamassas mistas de cimento e cal e as outras 20% utilizavam argamassas industrializadas.

2.2.2.1 Propriedades

As principais propriedades das argamassas são: trabalhabilidade, retenção de água, aderência, resiliência e resistência à compressão (MATA, 2006; STEIL, 2003; SABBATINI, 1986). As duas primeiras são ditas propriedades do estado fresco, enquanto que as demais são classificadas como propriedades do estado endurecido. Adiante serão abordadas cada uma dessas propriedades.

2.2.2.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade mais importante da argamassa no estado fresco, porém de difícil definição e quantificação por ser, na realidade, uma combinação de

várias características reológicas da argamassa como plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e densidade (MATA, 2006; STEIL, 2003).

De acordo com Panarese, Kosmatka e Randall (1991) para que uma argamassa tenha boa trabalhabilidade ela deve ser fácil de manusear e de espalhar sobre a superfície da unidade de alvenaria; ter adesão para permitir a pré-colocação da argamassa nos topos das unidades para formação das juntas verticais; manter consistência durante um intervalo de tempo tal que permita o assentamento de algumas unidades consecutivamente; ter coesão suficiente para não escorrer pelas paredes da unidade inferior quando do assentamento da unidade superior; ter facilidade e rapidez para alcançar a espessura de junta desejada; manter a espessura da junta após o processo de assentamento e mesmo depois da confecção das fiadas subsequentes.

Atualmente não existe um método direto para medir a trabalhabilidade das argamassas de assentamento. Na prática, quem define se uma argamassa é trabalhável é o assentador da alvenaria, sendo que seu julgamento baseia-se no tipo de ferramenta utilizada e em critérios subjetivos (PRUDÊNCIO JR., OLIVEIRA e BEDIN, 2002).

Uma forma comumente utilizada para a avaliação da trabalhabilidade é através do ensaio normalizado que avalia a consistência da argamassa, indicado pela NBR 8798 (1985) e prescrito pela NBR 7215 (1991) (índice de consistência pela mesa de flow), a qual estabelece o valor de 230 ± 10 mm para a consistência das argamassas de assentamento.

2.2.2.3 Retenção de água

Sabbatini (1986) define a retenção de água como a capacidade que a argamassa possui de reter a água de amassamento quando em contato com uma superfície absorvente. Tal capacidade da água está diretamente relacionada com a manutenção da consistência da argamassa. Dessa forma, reter a água de amassamento é essencial para manter a consistência e, em consequência, a trabalhabilidade desejada.

Quando a argamassa não possui uma retenção de água adequada, o bloco poderá absorver boa parte da água de amassamento da argamassa, expandindo-se e aumentando o potencial de retração na secagem; do outro lado, a perda rápida de água da argamassa provoca prejuízos à hidratação do cimento, diminuição na resistência de aderência e aumento do módulo de deformação quando endurecida. Em decorrência destes fatores haverá, ainda, prejuízo na durabilidade e estanqueidade da parede (SABBATINI, 1986).

O ensaio para determinação da retenção de água é normatizado pela ABNT NBR 13277:2015 (ABNT, 2015).

2.2.2.4 Aderência

A aderência pode ser definida como a capacidade que a interface bloco-argamassa possui de absorver tensões de cisalhamento e de tração, sem romper-se. Uma união adequada vai depender fundamentalmente das características dos dois componentes individualmente e da sua compatibilidade.

A aderência entre a junta de argamassa e a unidade de alvenaria é um fenômeno mecânico que se processa pela ancoragem da argamassa na unidade através da penetração por sucção dos componentes da pasta de aglomerante nas reentrâncias e poros do substrato, ficando a argamassa endurecida encunhada na superfície rugosa do substrato (MÜLLER, 1999).

Segundo Drysdale, Hamid e Baker (1993) são vários os fatores que influenciam na aderência como, por exemplo, o tipo de argamassa, relação a/c, propriedades da unidade, mão-de-obra e condições de cura.

2.2.2.5 Resiliência

Resiliência é a capacidade que a argamassa possui de deformar-se sem apresentar ruptura, quando sujeita a solicitações diversas e de retornar ao estado original quando cessam estas solicitações. Entretanto, para argamassas de assentamento este conceito estende-se para um estado de deformação plástica em que a ruptura ocorre na forma de fissuras microscópicas ou capilares não prejudiciais (SABBATINI, 1986).

Uma argamassa adequada é aquela que, dentre outras características, permite a dissipação dos esforços atuantes sem a ocorrência das fissuras prejudiciais, portanto, sem perder a aderência com as unidades de alvenaria. Esta função das argamassas de absorver deformações na parede está ligada, principalmente, com a sua composição, dosagem e capacidade de aderência (SOLÓRZANO, 1994).

2.2.2.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão não é a mais importante das propriedades da argamassa de assentamento, entretanto a sua determinação serve como um parâmetro da qualidade e durabilidade do material (STEIL, 2003).

Segundo Mohamad (1998), deve haver uma compatibilidade entre a argamassa e o bloco de concreto, recomendando que a resistência à compressão da mesma seja entre 0,70 à 1 vez a resistência à compressão do bloco na área bruta.

A norma brasileira ABNT NBR15961-1:2010 (ABNT, 2010) indica que a resistência à compressão da argamassa deve ser limitada ao valor máximo de 0,7 em relação à resistência característica especificada para o bloco, referida sobre a área líquida. Segundo Parsekian & Soares (2010), recomenda-se utilizar uma argamassa com resistência média próxima de 70% da resistência do bloco referida à área bruta.

De acordo com Fortes (2012), argamassas muito resistentes aumentam consideravelmente o potencial de fissuração da alvenaria. O autor ainda explica que a ocorrência de fissuras prejudica o desempenho da alvenaria, e por esse motivo, recomenda-se um valor máximo de 20 MPa para resistência da argamassa, também afirma que deve-se evitar resistências maiores que duas vezes a resistência média dos blocos.

2.2.3 Graute

Segundo Cardoso (2007), o graute consiste em um concreto fino (microconcreto) formado de cimento, água, plastificante, agregado miúdo e agregado graúdo de pequena dimensão (até 9,5 mm), com alta fluidez. Esta fluidez é fundamental para que o graute possa preencher os furos dos blocos vazados 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.

Para Drysdale *et al.* (2002), o graute para a construção de alvenaria é uma forma de concreto com alta fluidez constituído de materiais cimentícios, agregados e água.

Recomenda-se a utilização de graute grosso em blocos que apresentam grandes furos, pelo fato de ser mais econômico (menor consumo de cimento) e por reduzir as fissuras causadas pela retração por secagem (CARDASO, 2007).

Segundo a ABNT NBR 15961-1:2010 (ABNT, 2010), o graute é um componente utilizado para preencher os vazados dos blocos com a finalidade de solidarizar as armaduras à

alvenaria, ou aumentar a sua capacidade de carregamento. Portanto, deve-se ter características no estado fresco que garantam o complemento preenchimento dos furos, e não apresente retração que provoque o deslocamento do graute das paredes dos blocos.

Por outro lado a ABNT NBR 15961-2:2010 (ABNT, 2010) permite o emprego de argamassa de assentamento na obra para preencher os vazios, em elementos de alvenaria não armados, ou com armadura construtiva, desde que os ensaios de prisma apresentem resultados especificados pelo projetista. A norma ainda permite o uso de cal na mistura do graute para se obter uma boa plasticidade do material, desde que seu teor não seja superior 10% em volume em relação ao cimento.

2.2.3.1 Propriedades

As principais propriedades dos grautes são: trabalhabilidade, aderência e resistência à compressão (CARDOSO, 2007). A seguir serão abordadas cada uma dessas propriedades.

2.2.3.2 Trabalhabilidade

Da mesma forma que nas argamassas, a trabalhabilidade do graute está ligada diretamente a outras propriedades como plasticidade e consistência. Assim, o parâmetro de medir a trabalhabilidade é a consistência. No caso do graute, a consistência é determinada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, como no concreto simples. Este ensaio é regulamentado pela NBR 7223 (ABNT, 1992).

Os valores de abatimento geralmente adotados para o graute estão entre 200 e 280 mm (CALÇADA, 1998). Segundo Drysdale *et. al* (2002) o abatimento pelo ensaio do tronco de cone deve ser de 200 a 250mm.

O graute para atender o requisito da trabalhabilidade, no estado fresco, precisa ter altas relações a/c (0,8 a 1,2) para preencher os furos da alvenaria. Altas relações de a/c podem reduzir a resistência à compressão do graute. Porém isto não ocorre desta forma, pois ao ser colocado nos furos das unidades, o graute entra em contato com uma superfície muito absorvente (a parede do bloco). Assim, parte da água é retirada, deixando o graute com uma relação a/c final da ordem de 0,5 a 0,6, proporcionando assim ganho de resistência (GALLEGOS, 1991).

2.2.3.3 Aderência

Para resistir às solicitações e para que o bloco e o graute atuem como uma estrutura homogênea, é necessário que exista uma boa aderência entre ambos. A ausência ou fraca aderência entre os blocos e o graute diminui o caráter de material composto da alvenaria, pois a transferência de tensões entre estes materiais depende desta aderência.

O mecanismo básico da aderência bloco-graute é similar à aderência entre o bloco e a argamassa, consistindo na penetração de parte de água do graute, contendo partículas de cimento, nos poros capilares e nas reentrâncias do bloco, que posteriormente se hidratam, criando um efeito de ancoragem.

Os fatores que mais influem na capacidade de aderência do graute são a absorção do bloco, a retenção de água do graute, a relação a/c e a superfície específica dos agregados (CARDOSO, 2007). A perda exagerada de água para o bloco pode reduzir aderência, pelo enrijecimento precoce do graute. Por isso deve-se ter um equilíbrio entre a perda de água para o bloco e a retenção de água do graute, de forma a proporcionar uma boa aderência entre os elementos, sem que haja prejuízo à completa hidratação do cimento. Segundo Pereira de Oliveira (1994), se esta perda de água for muito exagerada, ocorrerão retrações plásticas iniciais que prejudicarão o contato do graute com a superfície dos blocos.

Já a dimensão e a área específica dos agregados modificam o arranjo espacial e a estrutura do graute na zona de transição. Tanto valores baixos, como os altos, reduzem a resistência de aderência, pois superfícies específicas baixas promovem a presença de vazios e as altas superfícies provocam redução da quantidade de cimento por área dos agregados, reduzindo a ligação entre as partículas. Deve-se então ter uma área específica intermediária para atender bem à resistência de aderência do graute (PEREIRA DE OLIVEIRA, 1994).

2.2.3.4 Resistência à compressão

Ao se preencher os furos dos blocos com o graute, uma das suas funções é aumentar a capacidade de carga a compressão da alvenaria. Por isso, a resistência deste graute é extremamente importante para a resistência da alvenaria como um todo (CARDOSO, 2007).

Segundo o ACI 530 / ASCE 5 / TMS 402 (2013), a resistência do graute não deve ser inferior a 13,8 MPa, para corpos de prova moldados de acordo com a ASTM C1019-16 (ASTM, 2016).

A resistência à compressão característica deve ser especificada com um valor mínimo de 15 MPa, para elementos de alvenaria armada, de acordo com a ABNT NBR 15961-2:2010 (ABNT, 2010), caso o graute tenha sido produzido em obra, deve-se realizar ensaios com antecedência adequada, para garantir que o prisma grauteado atinja a resistência à compressão especificada pelo projetista.

A norma brasileira supracitada ainda especifica que a resistência à compressão simples do graute deve ser determinada de acordo com uma amostra mínima de 6 exemplares, moldadas em formas cilíndricas metálicas.

Parsekian & Soares (2010) avaliaram que, na ausência de ensaios, pode-se estimar a resistência à compressão do graute, para a alvenaria de blocos de concreto como sendo o dobro da resistência à compressão do bloco na área bruta. Os autores ainda recomendam valores para a resistência do graute entre 15 MPa e 30 MPa, pois fora desses limites o graute passa a prejudicar a resistência da alvenaria.

Segundo Drysdale *et al.* (2002), o ensaio de resistência à compressão do graute é importante do ponto de vista do controle da qualidade, além de ter influência no desenvolvimento do comprimento do reforço pela armadura e na resistência da alvenaria grauteada.

2.3 Alvenaria

De acordo com Hendry (1981), a alvenaria estrutural em bloco de concreto possui excelentes propriedades de durabilidade, aparência e custo em comparação com as alternativas (alvenaria em tijolos cerâmicos, blocos sílicos-calcáreo). O autor explica que a qualidade da alvenaria depende dos materiais usados e, portanto, todos os materiais da alvenaria devem atender os padrões mínimos exigidos na edificação.

A ABNT NBR 15961-2:2010 (ABNT, 2010), define três tipos de elemento de alvenaria como sendo: (i) elemento de alvenaria não armada; (ii) elemento de alvenaria armada e (iii) elemento de alvenaria protendida.

Elemento de alvenaria não armada, como o próprio nome sugere, é o elemento de alvenaria no qual não há armadura dimensionada para resistir aos esforços solicitantes. Elemento de alvenaria armado é o elemento de alvenaria no qual são utilizadas armaduras passivas para resistir aos esforços solicitantes. Elemento de alvenaria protendida é o elemento de alvenaria em que são usadas armaduras ativas.

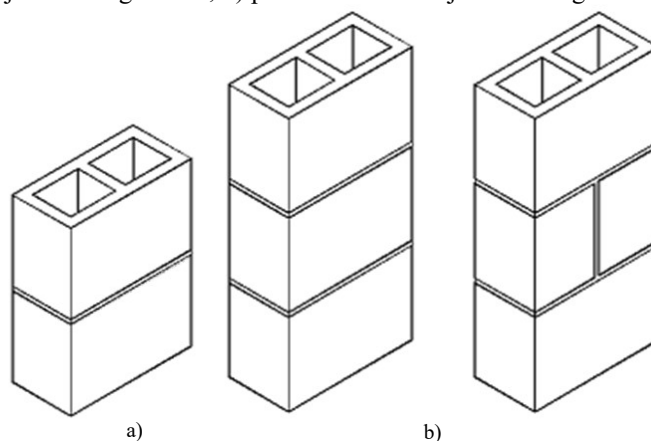
2.3.1 Prismas

Prismas são corpos-de-prova constituídos de dois ou mais blocos ligados entre si por juntas de argamassa (entre 7mm e 13mm de espessura), grauteados ou não. Usualmente os prismas se caracterizam geometricamente por uma unidade de comprimento, uma unidade de largura e altura entre 1,5 e 5 vezes a largura (CALÇADA, 1998).

O comportamento mecânico de uma parede é semelhantemente ao prisma, porém, diferente do comportamento mecânico da unidade (bloco). Isso é devido principalmente à presença da junta horizontal de argamassa, que é mais deformável que o bloco (MATA, 2006).

A figura a seguir, ilustra dois tipos de prismas: com uma junta de argamassa (Figura 3a) e com duas juntas de argamassa (Figura 3b). O primeiro é bem mais utilizado, visto que possui menor custo para confecção, maior facilidade de manuseio e mais equipamentos capazes realizar ensaios nestes elementos (quanto maior a altura do prisma, mais caro é o equipamento necessário para realização do ensaio, conseqüentemente, poucos laboratórios possuem tais equipamentos).

Figura 3 – Tipos de prismas utilizados para caracterização mecânica da alvenaria estrutural: a) prisma com uma junta de argamassa, b) prismas com duas juntas de argamassa.



Fonte: o Autor.

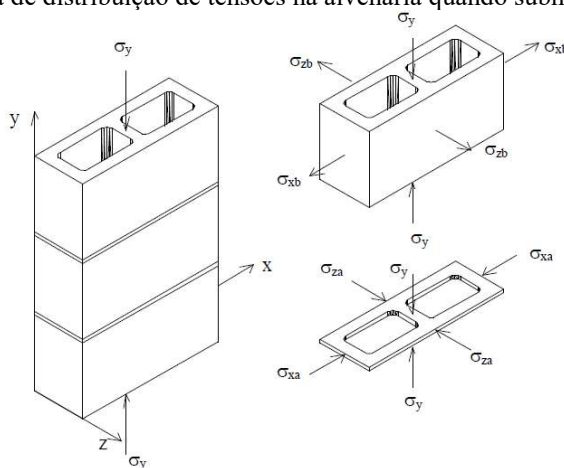
De acordo com Fortes (2012) e Mohamad (2007), os ensaios de compressão em prismas são usados como bases para determinar as tensões de projeto e como medida do controle da qualidade.

2.3.2 Mecanismo de Ruptura

As paredes de um edifício em alvenaria estrutural, embora sofram a atuação de outros esforços, são primordialmente submetidas à compressão. Por este motivo, e pelo fato de possuir geralmente um bom desempenho frente a este tipo de esforço, sua resistência à compressão é tão estudada. Os principais parâmetros de projeto levam em conta tal propriedade, o que faz com que receba especial atenção (CALÇADA, 1998).

Segundo Priestley & Yuk (1984), quando a alvenaria é submetida à compressão, a argamassa, por ser mais flexível que o bloco, tende a se expandir lateralmente, mas o atrito na interface bloco/argamassa restringe esta deformação. Devido a isto, surgem tensões de compressão na lateral da argamassa e, para que seja mantido equilíbrio de tensões, o bloco fica sujeito a tensões de tração. A Figura 4 ilustra um esquema desta distribuição de tensões.

Figura 4 – Esquema de distribuição de tensões na alvenaria quando submetida à compressão.



Fonte: Steil (2003)

De maneira geral, a resistência da alvenaria, quando submetida à compressão, é superior à resistência da argamassa, que na parede é favorecida pelas tensões de confinamento lateral, o que não ocorre quando ensaiada isoladamente à compressão, e inferior à resistência do bloco pois este, quando ensaiado separadamente, além de não estar sujeito à tração lateral, sofre o efeito de confinamento dos pratos da prensa (DRYSDALE *et. al.*, 2002).

Segundo Cheema & Klingner (1986) os modos de ruptura das alvenarias não grauteadas submetidas à compressão simples são:

- Tração no bloco, onde a tensão principal de tração no bloco é maior que a resistência à tração do bloco;

- Esmagamento do bloco, onde a tensão principal de compressão no bloco é maior que a resistência à compressão do bloco;
- Esmagamento da argamassa, onde a tensão de compressão axial na argamassa é maior que a resistência da argamassa confinada.

Já para a alvenaria grauteada, a expansão do graute provoca tensões de tração no bloco, ocasionando fissuras distribuídas na direção vertical (ROMAGNA, 2000).

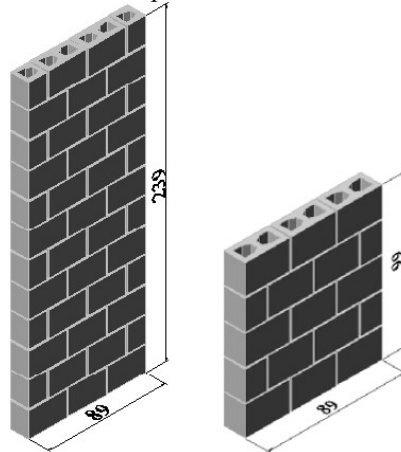
2.3.3 Resistência à Compressão

A resistência à compressão uniaxial da alvenaria é um parâmetro básico para o projeto estrutural. Há duas maneiras de se avaliar tal resistência: através de equações empíricas ou empírico-analíticas que correlacionam a resistência à compressão da alvenaria com as resistências à compressão dos componentes: bloco, argamassa e graute; a outra, através de ensaios experimentais de prismas, mini-paredes sob compressão axial, ou parede em escala real, onde são usados componentes idênticos aos que serão utilizados na obra (MATA, 2006; STEIL, 2003).

Segundo a ABNT NBR 15961-1:2010 (ABNT, 2010), a resistência característica à compressão simples da alvenaria (f_k) deve ser determinada com base no ensaio de paredes, conforme estabelecido pela ABNT NBR 8949:1985 (ABNT, 1985) ou ser estimada como 70% da resistência característica à compressão simples do prisma (f_{pk}) ou, ainda, 85% da resistência característica à compressão simples de pequena parede (f_{ppk}).

Ensaio em painéis de alvenaria em escala real são a maneira mais segura de se obter a resistência da alvenaria sob a ação de qualquer tipo de carregamento, seguido pelo ensaio de mini-paredes (STEIL, 2003). No entanto, é um método dispendioso em tempo e custo não sendo muito utilizado, pois necessita de vários equipamentos de grande porte para a realização dos ensaios. A Figura 5 ilustra as dimensões desses elementos.

Figura 6 – Dimensões de paredes (à esquerda) e mini-paredes (à direita) utilizadas em ensaios para determinação da resistência à compressão de alvenaria estrutural.



Fonte: o Autor.

De acordo com Steil (2003), os ensaios de prismas são os mais utilizados porque são realizados com os mesmos materiais da obra e podem ser facilmente realizados em qualquer laboratório que tenha uma prensa de porte médio.

Segundo a ABNT NBR 15961-2:2010 (ABNT, 2010), a resistência à compressão da alvenaria deve ser controlada pelo ensaio de prisma, conforme prescrições no anexo A desta norma. Para amostragem menor do que 20 e maior ou igual a 6 (caso mais comum), a resistência à compressão característica dos prisma deve ser calculada através das expressões indicadas a seguir.

Determina-se:

n : número de blocos da amostra;

i : $i = \frac{n}{2}$, se n for par ou $i = \frac{n-1}{2}$, se n for ímpar

$$f_{pk,1} = 2 \frac{f_{p1} + f_{p2} + \dots + f_{pn-1}}{n-1} - f_{pi} \quad (11)$$

Sendo,

$f_{p1} + f_{p2} + \dots + f_{pn-1}$ = os valores de resistência à compressão dos prismas da amostra, ordenados em ordem crescente;

$f_{pk,1}$ = resistência característica estimada da amostra.

Em seguida, calcula-se

$$f_{pk,2} = f_{p1} \times \emptyset \quad (12)$$

$$f_{pk,3} = \text{maior valor entre } f_{pk,1} \text{ e } f_{pk,2} \quad (13)$$

$$f_{pk,4} = 0,85 \frac{f_{p1} + f_{p2} + \dots + f_{pn}}{n} \quad (14)$$

$$f_{pk,est} = \text{menor valor entre } f_{pk,3} \text{ e } f_{pk,4} \quad (15)$$

Sendo \emptyset dado pela Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de \emptyset

Número de blocos da amostra	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
\emptyset	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1	1,01

Fonte: ABNT (2010)

O quadro abaixo ilustra alguns valores de resistência à compressão de prismas e paredes de alvenaria estrutural, no qual F_b representa a resistência à compressão do bloco, F_a é a resistência à compressão da argamassa, F_p é a resistência à compressão do prisma, F_{gk} é a resistência à compressão do graute e F_{par} é a resistência à compressão da parede.

Quadro 01 – Resumo do resultado de ensaios experimentais de algumas pesquisas nacionais sobre a resistência à compressão de alvenarias (valores em MPa).

	F_b	F_a	F_p	F_{gk}	F_{par}	Observações
Aly (1992)	7,90		6,40		5,10	
	10,60		9,30		6,40	
	13,30		9,80		8,30	
	7,90		6,40		8,10	
	10,60		9,30		9,90	Todos os furos grauteados
	13,30		9,80		11,10	
	7,90		6,40		10,00	Todos os furos grauteados, 0,2% de aço
	10,60		9,30		10,80	
	7,90		6,40		9,20	Todos os furos grauteados, 0,3% de aço
	10,60		9,30		12,30	

		Fb	Fa	Fp	Fgk	Fpar	Observações	
Medeiros (1993)	Blocos vazados de concreto	8,40	4,55			4,28		
		8,40	5,89			4,64		
		10,80	4,55			4,83		
		10,80	5,89			5,26		
		14,90	4,55			4,97		
		14,90	5,89			6,52		
Mendes (1998)	Bloco cerâmico vazado	22,89	6,47	8,18				
		22,89	6,68	12,28	49,87			
		22,89	7,00	14,66	28,32			
		22,89	6,52	17,94	13,94		Prisma de 3 blocos, argamassa em toda área de assentamento, quando indicada resistência do graute os prismas são grauteados	
		22,89	19,86	12,56				
		22,89	19,09	20,81	49,57			
		22,89	19,78	19,53	25,08			
		22,89	21,15	21,33	12,37			
Mohamad (1998)	Blocos vazados de concreto	10,70	19,90	10,56				
		10,70	8,63	8,60				
		10,70	4,20	8,17				Prisma de 3 blocos, argamassa em toda área de assentamento
		10,70	2,28	7,54				
		15,70	19,90	11,70				
		15,70	8,63	10,80				
		15,70	4,20	8,84				
Barbosa (2008)	Blocos vazados de concreto	20,0	7,5	17,8				
		24,5	9,4	18,2				
		26,8	15,5	21,5				
		38,9	22,2	30,1				
		20,9	10,90	15,15			Prisma de 3 blocos, argamassa em toda área de assentamento	
		20,9	9,38	10,07				
		20,9	6,85	8,53				
		22,2	15,44	14,8				
		22,2	10,90	15,87				
		22,2	9,38	13,9				
		22,0	6,35	11,74				

Fonte: o Autor.

2.3.4 Fatores que afetam a resistência da alvenaria

A resistência de um elemento da alvenaria depende, fundamentalmente, da resistência básica da mesma, das propriedades geométricas do elemento e da excentricidade do carregamento.

Hendry (1981) enumera, em ordem de importância, as seguintes características:

- Resistência do Bloco;
- Resistência da argamassa de assentamento;
- Geometria do bloco;
- Espessuras das juntas de assentamento;
- Selar as juntas contra penetração de água;
- Características de deformação do bloco e da argamassa.

Adiante será discorrido como cada uma desses itens influenciam na resistência à compressão da alvenaria.

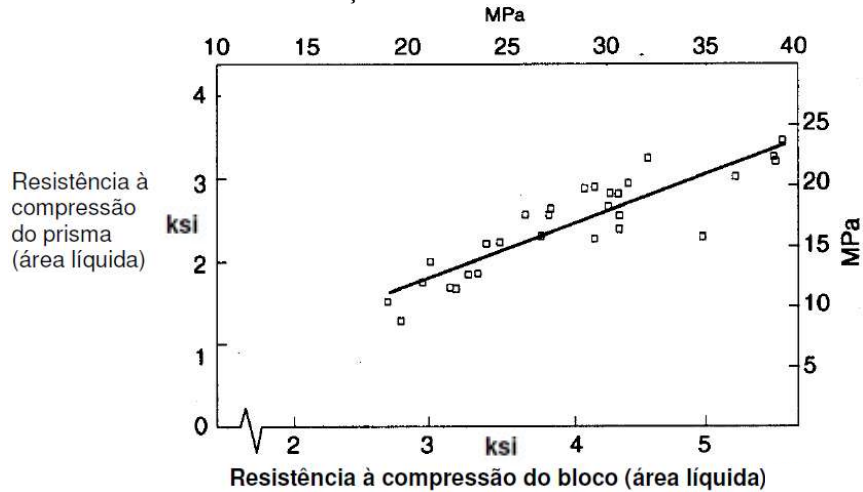
2.3.4.1 Resistência do bloco

A resistência à compressão dos blocos é o fator determinante na resistência final dos prismas (MATA, 2006; STEIL, 2003). Entretanto, como o mecanismo de ruptura do prisma é diferente do mecanismo de ruptura da unidade, outros fatores como a geometria, absorção e resistência à tração das unidades também influenciam na sua resistência (STEIL, 2003).

Um aumento na resistência do bloco resultaria em aumento na resistência do prisma. Mas esta relação não é linear e, para blocos com elevada resistência, a variação de ganho da resistência no prisma se torna menor. A explicação para esta proporcionalidade está ligada diretamente ao ganho de resistência à tração do bloco decorrente do aumento de sua resistência à compressão (OLIVEIRA, 2000). Camacho (1986) cita que a resistência à compressão da alvenaria varia aproximadamente com a raiz quadrada da resistência da unidade.

Para Drysdale *et al.* (2002), dentro dos limites usados na prática, a resistência da parede geralmente cresce linearmente com o aumento da resistência do bloco, esse fato pode ser percebido na Figura 6

Figura 6 – Variação da resistência à compressão de prismas de alvenaria de blocos vazados de concreto em função da resistência do bloco.



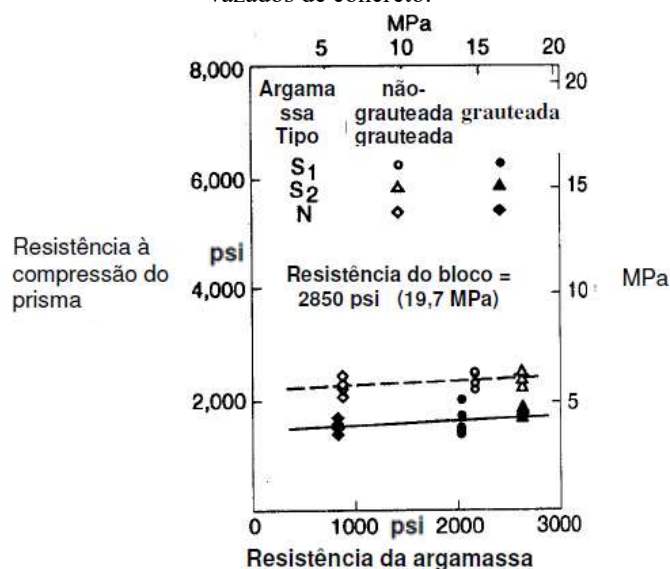
Fonte: Drysdale *et al.* (2002)

2.3.4.2 Resistência da argamassa de assentamento

A resistência da argamassa não é tão significativa para a resistência da alvenaria quanto à resistência do bloco. Um aumento na resistência da argamassa, em geral, eleva muito pouco a resistência de prismas e paredes (MATA, 2006; STEIL, 2003; DRYSDALE *et al.*, 2002). A Figura 7 ilustra esse comportamento, nela podemos observar que, para blocos vazados de concreto, com ou sem graute, o aumento da resistência à compressão da alvenaria é pouco significativo, apesar do aumento da resistência da argamassa.

Portanto, não seria econômica a utilização de argamassas muito fortes, sendo mais desejável a utilização de argamassas menos resistentes e mais deformáveis, para acomodar pequenas deformações (STEIL, 2003).

Figura 7 – Efeito da resistência da argamassa na resistência à compressão de prismas de alvenaria de blocos vazados de concreto.



Fonte: Drysdale *et al.* (2002)

Mata (2006) afirma que a resistência final de primas pode ser reduzida quando argamassas com pouca retenção de água entram em contato com unidades de elevada taxa de absorção, reduzindo sua plasticidade rapidamente, dificultando a acomodação das unidades durante o assentamento, ocorrendo assim, a redução da superfície de contato bloco/argamassa e o prejuízo da aderência entre os dois materiais. De acordo com Drysdale *et al.* (2002) uma redução de 15% na área de assentamento (15% de vazado na seção) pode provocar uma queda de até 45% da resistência dos prismas.

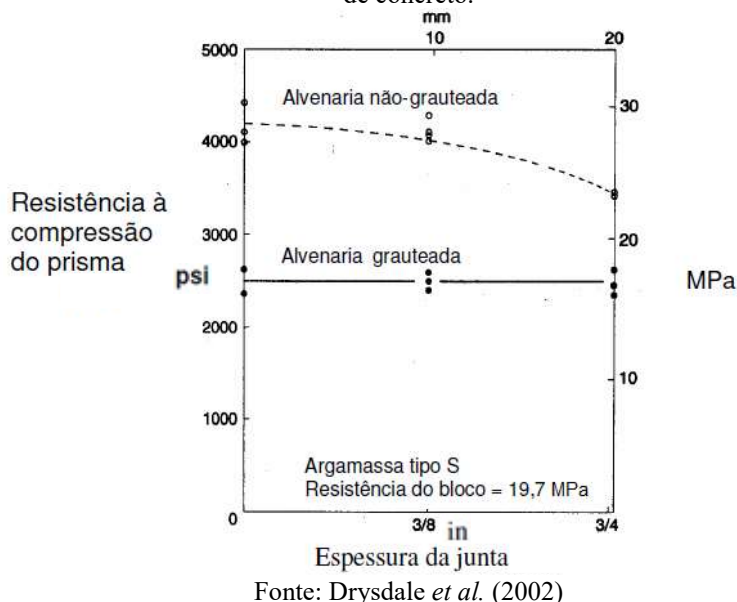
2.3.4.3 Geometria do Bloco

Em se tratando de blocos de concreto, a diferença de seção transversal entre o topo e a base dos blocos ocasiona tensões de tração no topo da unidade inferior que podem ser maiores que aquelas geradas pela diferença dos coeficientes de Poisson entre a unidade e a argamassa. Dessa forma, quanto menor for a variação na seção do furo, melhor será o desempenho do conjunto (KHALIFA e MAGZUB, 1994). Segundo os mesmos autores, a relação entre a área líquida e a área bruta do bloco não tem influência significativa na resistência de prismas.

2.3.4.4 Espessura da junta de assentamento

Segundo Drysdale *et al.*(2002), uma vez que a deformação lateral dos materiais solicitados axialmente é função de sua deformação no sentido de aplicação da carga – e esta é função do comprimento do elemento solicitado – são notórias as variações de resistência nos prismas causadas por variações na espessura da junta. Assim, como regra geral, o aumento da espessura da junta provoca redução na resistência do prisma. Este efeito é muito mais pronunciado em prismas não grauteados como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Efeito da espessura da junta de assentamento na resistência de prismas de alvenaria de blocos vazados de concreto.



2.3.4.5 Características de deformação das unidades e da argamassa.

Em prismas ociosos, a proporção da rigidez entre a argamassa e a unidade é um fator muito importante na determinação da resistência final dos prismas e também do tipo de ruptura que irá ocorrer devido ao surgimento de tensões de confinamento na argamassa e tração nos blocos. Estas tensões estão relacionadas à capacidade da argamassa de se deformar e a aderência na interface bloco/argamassa (MOHAMAD, 1998).

Quanto mais deformável for a argamassa em relação ao bloco (menor o módulo de elasticidade e maior o coeficiente de Poisson), maiores serão as tensões de tração ocasionadas nos blocos, como consequência, haverá queda na resistência à compressão do prisma (LA ROVERE & RODRIGUES, 1997). Entretanto, a argamassa deve apresentar uma deformabilidade tal que permita a acomodação de pequenas deformações da alvenaria.

2.4 Equações para estimar a resistência e propriedades da alvenaria

Vários pesquisadores desenvolveram equações baseadas em dados experimentais para determinar a resistência à compressão da alvenaria, em função da resistência à compressão de seus componentes.

Segundo a bibliografia pesquisada, os modelos encontrados que descrevem a resistência à compressão do prisma de alvenaria estrutural, o fazem considerando as resistências à compressão das unidades, isto é, do bloco, da argamassa e do graute (caso exista).

Hilsdorf (1969) sugere a seguinte equação para o cálculo da resistência à compressão de prismas não grauteados:

$$f_{pk} = \frac{f_b}{U_u} \times \left(\frac{f_{ut} + \alpha \times f_m}{f_{ut} + \alpha \times f_b} \right) \quad (16)$$

Onde:

- f_{pk} = resistência à compressão do prisma não grauteado na área bruta;
- f_b = resistência à compressão do bloco na área bruta;
- f_m = resistência à compressão da argamassa;
- f_{ut} = resistência à tração do bloco;
- U_u = parâmetro que varia com o tipo de bloco e argamassa;
- α = parâmetro que equivale a 4,1 vezes a altura do bloco.

Khalaf (1991 *apud* Fortes, 2012) propõe a seguinte equação para o cálculo da resistência à compressão de prismas grauteados:

$$f_{pk} = 0,3f_b + 0,1f_m + 0,5f_c \quad (17)$$

Onde:

- f_{pk} = resistência à compressão do prisma grauteado na área bruta;
- f_b = resistência à compressão do bloco na área bruta;
- f_m = resistência à compressão da argamassa;
- f_c = resistência à compressão do graute.

Khalaf *et al.* (1994) sugere a seguinte equação para o cálculo da resistência à compressão da alvenaria não grauteada:

$$f_k = 0,3f_b + 0,2f_m \quad (18)$$

Onde: f_k = resistência à compressão da alvenaria na área bruta;
 f_b = resistência à compressão do bloco na área bruta;
 f_m = resistência à compressão da argamassa.

EUROCODE 6 (1996) sugere a seguinte equação para o cálculo da resistência à compressão da alvenaria não grauteada:

$$f_k = k \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3} \quad (19)$$

Onde: f_k = resistência à compressão da alvenaria na área bruta;
 f_b = resistência à compressão do bloco na área bruta;
 f_m = resistência à compressão da argamassa;
 k = parâmetro que varia com o tipo de bloco e argamassa.

Mohamad (1998) sugere as seguintes equações para o cálculo da resistência à compressão da alvenaria não grauteada:

$$f_k = f_m \times 0,5794 \times \left(\frac{E_m}{E_b}\right)^{-1,1093} \quad (20)$$

Onde: f_k = resistência à compressão da alvenaria na área bruta;
 f_m = resistência à compressão da argamassa;
 E_m = módulo de elasticidade da argamassa;
 E_b = módulo de elasticidade do bloco.

$$f_k = f_{bt} \times \left[5,45 \times \left(\frac{E_m}{E_b}\right)^2 + 3,64 \times \left(\frac{E_m}{E_b}\right) + 10,22 \right] \quad (21)$$

Onde: f_k = resistência à compressão da alvenaria na área bruta;
 f_{bt} = resistência à tração do bloco;
 E_m = módulo de elasticidade da argamassa;
 E_b = módulo de elasticidade do bloco.

As equações (20) e (21) são utilizadas, respectivamente, quando ocorre ruptura na argamassa ou por tração no bloco.

No caso da utilização da equação (21), a resistência à tração dos blocos podem ser determinados pela equação proposta por CHEEMA e KLINGNER (1986):

$$f_{bt} = 0,41 \times \sqrt{f_b} \quad (22)$$

Onde: f_b = resistência à compressão do bloco;
 f_{bt} = resistência à tração do bloco.

Jaber (2010 *apud* Fortes, 2012) propõe a seguinte equação para o cálculo da resistência à compressão de prismas grauteados e não grauteados:

$$f_{pk} = 0,63f_b^{0,49} \times f_m + f_c^{0,3} \quad (23)$$

Onde: f_{pk} = resistência à compressão do prisma na área bruta;
 f_b = resistência à compressão do bloco na área bruta;
 f_m = resistência à compressão da argamassa;
 f_c = resistência à compressão do graute.

Pode-se notar que nenhum desses modelos utiliza a variável tempo. Esta pesquisa, buscou solucionar este problema, determinando-se modelos que considerem a variável tempo.

A norma brasileira ABNT NBR 15961-1:2010 (ABNT, 2010), na ausência de dados experimentais, recomenda adotar os seguintes valores para o módulo de elasticidade da alvenaria:

$$E_m = 800f_{pk} \leq 16 \text{ GPa} \quad (24)$$

Onde: E_m = módulo de elasticidade da alvenaria;
 f_{pk} = resistência à compressão do prisma na área bruta.

El-Nawawy & El-Haddad (1990) sugerem a seguinte equação para o cálculo do módulo de elasticidade da alvenaria grauteada:

$$E_m = 750f_k \quad (25)$$

Onde: E_m = módulo de elasticidade da alvenaria grauteada;

f_k = resistência à compressão da alvenaria grauteada.

Para o cálculo do módulo de elasticidade da argamassa, Mohamad (1998) propõe a seguinte equação:

$$E_m = -18,9f_m^2 + 939,4f_m \quad (26)$$

Onde: E_m = módulo de elasticidade da argamassa;

f_m = resistência à compressão da argamassa.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi concebido de forma a cumprir o objetivo de estudar o comportamento mecânico de prismas de blocos vazados de concretos, grauteados e não grauteados, utilizando diferentes resistências de blocos, argamassas e grautes.

Os ensaios foram realizados no Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – NUTEC e no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará.

A seguir serão descritos os materiais empregados e os procedimentos adotados para a sua caracterização, produção dos grautes, moldagem de prismas e ensaios em blocos, argamassas, grautes e prismas.

3.1 Caracterização dos materiais e ensaios realizados

3.1.1 Blocos

Para a realização deste trabalho, foram utilizados blocos com dimensões padronizadas de 14x29x19cm, fabricados por um grande produtor da Região Metropolitana de Fortaleza.

Figura 9 – Blocos de concreto utilizados na pesquisa sendo entregues sobre palets.



Fonte: o Autor.

Inicialmente foram previstos blocos de duas resistências diferentes: 6 MPa e 8 MPa, totalizando 600 blocos entregues em quatro palets (Figura 9). Tais resistências foram escolhidas por serem as mais baixas comumente utilizadas em HIS. Contudo, foi observado

durante a realização dos ensaios de compressão destas unidades que havia três resistências médias de blocos: 7,66 MPa, 13,23 MPa e 14,40 MPa; denominados respectivamente de B1, B2 e B3.

Foi verificado que atendiam aos aspectos visuais requisitados pela ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014), não apresentando defeitos sistemáticos, como trincas, rachaduras, quebras, superfícies irregulares ou deformações que impedissem a sua utilização.

As tolerâncias máximas de fabricação dos blocos de concreto, especificados na ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014), de ± 2 mm para a largura e de ± 3 mm para a altura e comprimento, foram satisfeitas conforme se observa na Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões dos blocos vazados de concreto utilizados na pesquisa.

Bloco	Dimensões (mm)					
	Nominais			Reais		
	Largura	Altura	Comprimento	Largura	Altura	Comprimento
B1	140	190	290	138,65	189,32	289,00
B2	140	190	290	138,67	191,09	288,90
B3	140	190	290	138,62	189,84	289,00

Fonte: o Autor.

As características físicas dos blocos estão apresentadas na Tabela 10. A área líquida, massa dos blocos, a absorção e teor de umidade foram determinadas de acordo com a ABNT NBR 12118:2007 (ABNT, 2007). Para cada um dos ensaios em questão, foram ensaiados três exemplares de cada resistência de bloco, conforme preconizado pela ABNT NBR 6136:2014 (ABNT, 2014).

Tabela 10 – Características físicas dos blocos vazados de concreto utilizados na pesquisa.

Característica	Tipo de Bloco		
	B1	B2	B3
Área bruta (cm ²)	400,70	400,61	400,62
Área líquida (cm ²)	252,21	254,75	250,86
Área bruta/Área líquida (%)	62,94	63,59	62,62
Absorção (%)	5,29	5,24	5,56
Massa dos blocos (kg)	10,02	10,21	9,83
Massa unitária (kg/dm ³)	2,098	2,097	2,064
Umidade Relativa (%)	14,07	21,99	14,22

Fonte: o Autor.

Para cada resistência de blocos, foram ensaiadas diversas unidades em idades diferentes, após os 28 dias, visando conhecer tanto a resistência das unidades, como avaliar se havia ganho significativo de resistência dos blocos ao longo do tempo. No total, foram ensaiados à compressão 7 blocos B1, 19 blocos B2 e 12 blocos B3. Os ensaios de compressão seguiram as recomendações da ABNT NBR 12118:2007 (ABNT, 2007), utilizando-se capeamento com enxofre para regularizar a superfície dos blocos. A Figura 10 ilustra o equipamento utilizado nos ensaios de resistência à compressão.

Figura 10 – Equipamento utilizados nos ensaios de resistência a compressão dos blocos de concreto utilizados na pesquisa.



Fonte: o Autor.

3.1.2 Argamassa de assentamento

Para a realização do experimento, foram utilizados dois tipos de argamassas de assentamento, todas industrializadas. A escolha se deu devido a sua recente utilização em obras de alvenaria estrutural na cidade de Fortaleza-CE, além da praticidade de manuseio dentro dos laboratórios.

A primeira argamassa, denominada de A1, possui resistência média de 5,37 MPa aos 28 dias e, de acordo com o fabricante, pode ser utilizada para o assentamento de elementos de alvenaria de vedação, com diversos tipos de blocos, como também para o assentamento de alvenaria estrutural.

A Tabela 11 ilustra algumas propriedades da argamassa A1, utilizada no assentamento dos prismas. Acrescenta-se que alguns ensaios foram realizados para a comprovação destas propriedades, os quais serão apresentados nos capítulos seguintes.

Tabela 11 - Propriedades da argamassa de assentamento A1 utilizada na pesquisa.

Propriedade	Referência Normativa	Valores	Especificação
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279/2005	4,0 a 6,5	P4
Densidade de massa aparente no estado endurecido(Kg/m³)	NBR 13280/2005	1400 a 1800	M4
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279/2005	1,5 a 2,7	R3
Coefficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2})	NBR 15259/2005	3,0 a 4,0	C4
Densidade de massa no estado fresco (Kg/m³)	NBR 13278/2005	1600 a 1800	D4
Retenção de água (%)	NBR 13277/2005	72 a 85	U2
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258/2005	≥ 0,20	A3

Fonte: Fabricante da argamassa A1, adaptada pelo Autor.

Já a outra argamassa de assentamento, denominada de A2, possui resistência média de 9,33 MPa aos 28 dias, cujas algumas propriedades são evidenciadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades da argamassa de assentamento A2 utilizada na pesquisa.

Propriedade	Referência Normativa	Valores	Especificação
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279/2005	6,0	P5
Densidade de massa aparente no estado endurecido(Kg/m³)	NBR 13280/2005	1200	M3
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279/2005	2,4	P4
Coefficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2})	NBR 15259/2005	4,2	C4
Densidade de massa no estado fresco (Kg/m³)	NBR 13278/2005	1600	D4
Retenção de água (%)	NBR 13277/2005	85	U3
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258/2005	0,3	A3

Fonte: Fabricante da argamassa A2, adaptada pelo Autor.

A argamassa A1 foi fornecida em embalagens de 50 kg e, segundo recomendações do fabricante, para uma boa consistência, devia ser adicionado 8,0 a 8,5 litros de água a cada embalagem. Já a argamassa A2, foi entregue em sacos de 30 kg, sendo recomendada a adição de 5,0 a 5,5 litros de água por saco. Contudo, para melhor controle da quantidade de água, o volume de água foi convertido em massa, considerando-se a densidade da água igual a 1g/cm³.

Devido à faixa de adição de água recomendada pelos fabricantes, a consistência ideal foi obtida a partir dos resultados de testes práticos preliminares de assentamento dos blocos, levando-se em conta a experiência prática do assentador. Desta forma, foi adicionada

água na argamassa de maneira progressiva, partindo do valor mínimo recomendando, isto é, 8,0 kg de água para a argamassa A1 e 5,0 kg de água para a argamassa dois.

Ao fim da fase preliminar de testes, chegou-se ao valor ótimo de consistência apontado pelo assentador, resultando numa adição de 8,25 kg de água por saco de argamassa A1, e 5,65 kg de água por saco de argamassa A2. Após a definição da quantidade ideal de água a ser adicionada, foi determinado o índice de consistência, através do método prescrito pela ABNT NBR 13276:2005 (ABNT, 2005), obtendo-se o valor de 249,66 mm para a argamassa A1 e 237,33 mm para a argamassa A2.

As argamassas foram produzidas em betoneira intermitente, de queda livre e eixo inclinado, com capacidade da cuba de 120 litros. O processo de produção deu-se adicionando parte da água de amassamento, em seguida, um saco de argamassa (A1 ou A2) e, por fim, o restante da água de amassamento. Após o período de mistura de 5 minutos, procedeu-se, para cada argamassa, com a moldagem de: 9 corpos-de-prova prismáticos de 4 x 16 cm, utilizados para determinar a resistência à tração na flexão e resistência à compressão, seguindo as prescrições da ABNT NBR 13279:2003 (ABNT, 2003); 18 corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm, utilizados para determinar a resistência à compressão e o módulo de deformação, conforme a ABNT NBR 7215:1996 (ABNT, 1996).

Os CP's prismáticos foram ensaiados em três idades diferentes: 7 dias, 14 dias e 28 dias – sendo 3 corpos-de-prova para cada idade. O mesmo ocorreu para os CP's cilíndricos, sendo ensaiados 6 CP's para cada idade.

3.1.3 Graute

Foram utilizados dois tipos de grautes, denominados de G1 e G2, cujas resistências média à compressão aos 28 dias de idade valem, respectivamente, 23,42 MPa e 20,98 MPa. Para maior controle, optou-se pelo traço em peso de materiais. Foram utilizados os mesmos materiais para ambos os grautes (cimento, areia, brita e água), variando-se apenas as proporções entre eles, conforme está evidenciado na Tabela 13.

Tabela 13 – Traços dos grautes utilizados na pesquisa.

Denominação	Traço em peso				Resistência média aos 28 dias
	Cimento	Areia	Brita	Relação a/c	
G1	1	1,82	2,21	0,65	23,42 Mpa
G2	1	1,90	2,35	0,70	20,98 Mpa

Fonte: o Autor.

O slump – determinado através do ensaio de abatimento de tronco de cone, prescrito pela ABNT NBR 7223:1992 (ABNT, 1992) – resultou nos valores de 18 cm para o graute G1 e 22 cm para o graute G2.

O cimento utilizado foi o CP II-Z-32, adquirido no comércio da Região Metropolitana de Fortaleza, cujas propriedades estão descritas na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades cimento utilizado para confecção dos grautes.

Propriedade	Valores
Finura - #200 (%)	1,02
Finura - # 325 (%)	7,55
Área de superfície específica (Blaine cm²/g)	4950
Água de consistência (%)	28,78
Tempo de pega - Início (min)	171
Tempo de pega - Fim (min)	233
Expansibilidade a quente (mm)	0,04
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	25,90
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	29,66
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	35,42

Fonte: Fabricante do cimento, adaptada pelo Autor.

A areia e a brita utilizadas também foram adquiridas no comércio da Região Metropolitana de Fortaleza, em lote único, a granel, posteriormente, armazenada em tambores metálicos.

A determinação da composição granulométrica da areia foi feita de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003), como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 – Composição granulométrica da areia utilizada na pesquisa.

Ø Peneira da (mm)	% Retida acumulada	% passante acumulada
12,5	0,00	100,00
9,5	0,10	99,90
6,3	0,10	99,90
4,75	0,10	99,90
2,36	1,50	98,50
1,18	9,30	90,70
0,6	40,40	59,60
0,3	85,00	15,00
0,15	97,60	2,40
Fundo (<0,15)	100,00	0,00

Fonte: o Autor.

As características físicas da areia utilizada, com as respectivas normas utilizadas para determinação das mesmas, são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Características físicas da areia utilizada na pesquisa.

Massa específica real (NBR NM 52/2009)	Massa unitária (NBR NM 45/2006)	Módulo de finura (NBR NM 248/2003)	Dimensão máxima característica (NBR NM 248/2003)
2,62 g/cm ³	1,46 g/cm ³	2,34	2,36 mm

Fonte: o Autor.

A brita utilizada para confecção dos grautes foi a brita 9,5 mm. A Tabela 17 apresenta as características físicas da brita.

Tabela 17 – Características físicas da brita utilizada na pesquisa.

Propriedade	Referência Normativa	Valores
Módulo de finura	NBRNM 248/2003	6,41
Dimensão máxima característica(mm)	NBR NM 248/2003	12,5
Massa específica (g/m³)	NBR NM 52/2009	2,71
Massa unitária – solto (g/m³)	NBR NM 45/2006	1,62
Massa unitária – compactado (g/m³)	NBR NM 45/2006	1,66
Teor de material pulverulento (%)	NBR NM 46/2003	0,33
Absorção (%)	NBR NM 53/2009	0,50

Fonte: o Autor.

A composição granulométrica da brita, determinada de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003), é mostrada na Tabela 18.

Tabela 18 – Composição granulométrica da brita utilizada na pesquisa.

Ø Peneira da (mm)	% Retida acumulada	% passante acumulada
19,0	0,00	100,00
12,5	8,60	91,40
9,5	52,53	47,47
6,3	94,00	6,00
4,75	97,15	2,85
2,36	97,70	2,30
1,18	98,18	1,82
0,6	98,83	1,37
0,3	98,85	1,15
0,15	99,45	0,55
Fundo (<0,15)	100,00	0,00

Fonte: o Autor.

Para cada tipo de graute, foram moldados 18 corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, obedecendo às prescrições da ABNT NBR 5738:1994 (ABNT, 1994). Tais corpos-de-prova foram ensaiados à compressão, seguindo às prescrições da ABNT NBR 5737:1994 (ABNT, 1994), sendo que os ensaios foram realizados em três idades distintas: 7 dias, 14 dias e 28 dias – 6 corpos-de-prova para cada idade. Estes mesmos CP's foram utilizados para a determinação do módulo de deformação dos grautes.

3.2 Prismas

Foram moldadas 12 séries com 18 prismas de 2 blocos de altura, moldados a prumo, todos assentados com a seção transversal do bloco totalmente preenchida com argamassa (argamassamento total) e regularizados com capeamento a base de enxofre, totalizando 216 prismas. Cada série representa uma combinação de bloco (B1, B2 e B3), argamassa (A1 e A2) e graute (G1 e G2). Desta forma, cada série continha 18 prismas com as mesmas características, os quais foram ensaiados à compressão e calculados os seus módulos em três diferentes idades: 7 dias, 14 dias e 28 dias – sendo 6 prismas para cada idade, dos quais três eram instrumentados objetivando determinar o módulo de deformação.

Tabela 19 – Combinações de bloco, argamassa e graute utilizadas para confecção dos prismas.

Nº da série	Identificação do prisma	Identificação dos componentes			Quantidade de prismas ensaiados					
		Bloco (MPa)	Argamassa (MPa)	Graute (MPa)	Resistência à compressão			Módulo de deformação		
					7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	B3-A1	14,40	5,37	-	6	6	6	3*	3*	3*
2	B2-A1	13,23	5,37	-	6	6	6	3*	3*	3*
3	B3-A1-G1	14,40	5,37	23,42	6	6	6	3*	3*	3*
4	B2-A1-G1	13,23	5,37	23,42	6	6	6	3*	3*	3*
5	B3-A1-G2	14,40	5,37	20,98	6	6	6	3*	3*	3*
6	B2-A1-G2	13,23	5,37	20,98	6	6	6	3*	3*	3*
7	B1-A2	7,66	9,33	-	6	6	6	3*	3*	3*
8	B2-A2	13,23	9,33	-	6	6	6	3*	3*	3*
9	B1-A2-G1	7,66	9,33	23,42	6	6	6	3*	3*	3*
10	B2-A2-G1	13,23	9,33	23,42	6	6	6	3*	3*	3*
11	B1-A2-G2	7,66	9,33	20,98	6	6	6	3*	3*	3*
12	B2-A2-G2	13,23	9,33	20,98	6	6	6	3*	3*	3*

* Não se tratam de prismas adicionais, sendo o módulo de deformação obtido durante o ensaio à compressão.

Fonte: o Autor.

Optou-se por prismas de 2 blocos por questões técnicas: os laboratórios disponíveis para a realização dos ensaios não possuíam equipamentos capazes de ensaiar prismas de 3 blocos.

Para um melhor entendimento das combinações analisadas, a Tabela 19 detalha todas as séries de prismas ensaiados.

Os prismas foram moldados em uma laje de reação nivelada em concreto. Com a finalidade de evitar o excessivo manuseio dos prismas após a sua moldagem, que poderia acarretar em perda de exemplares, os blocos já foram assentados com a face oposta à superfície de assentamento regularizada com capeamento a base de enxofre.

A argamassa era aplicada em toda a face superior do bloco com auxílio de uma colher de pedreiro. Em seguida, assentava-se o segundo bloco, quando eram verificados o nível e o prumo do bloco, bem como a espessura da junta, que era mantida em 10 ± 3 mm. O excesso de argamassa no exterior dos prismas sempre era removido; já o excesso no interior dos prismas só era removido para as séries grauteadas.

Nas séries grauteadas, foram feitos, cuidadosamente, aberturas no capeamento do bloco superior com o objetivo de verter o graute. O grauteamento foi executado conforme o prescrito na ABNT NBR 15961-2:2010 (ABNT, 2010).

Para efetuar o arrasamento dos grautes no topo dos prismas, foi deixado o excesso durante uma hora após o graute ter sido vertido e adensado, para posterior arrasamento, por meio de uma colher de pedreiro e uma espátula. Decorridas 24 horas do arrasamento, a superfície áspera do graute era nivelada com argamassa de regularização com 30 MPa de resistência à compressão.

A Figura 11 ilustra as etapas de montagem dos prismas.

Figura 11 – Etapas de produção dos prismas: a) identificação dos blocos; b) capeamento dos blocos com enxofre; c) assentamento dos blocos; d) verificação da espessura da junta; e) grauteamento dos furos; f) lote de prismas portos para serem ensaiados.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fonte: o Autor.

Para não haver excentricidade de carregamento e concentração de tensões, os prismas eram centralizados nos pratos da máquina de ensaio, através de medidas nas extremidades do prato, demarcando a região onde o prisma deveria ser posicionado.

3.3 Instrumentação e determinação do módulo de deformação para os prismas e seus componentes

Afim de melhor compreender a resistência à compressão dos prismas moldados. Bem como o seu modo de ruptura, foram determinados os módulos de deformação tanto dos prismas, como dos componentes: bloco, argamassa e graute.

3.3.1 Bloco

O método para a determinação do módulo de elasticidade do bloco vazado de concreto estrutural utilizado nesta pesquisa, seguiu as orientações prescritas pela ABNT NBR 8522:2008 (ABNT, 2008).

Para a realização dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dos blocos, utilizou-se um extensômetro com dupla base de medida, acoplado à máquina universal de ensaio, da marca EMIC, modelo DL100T, que é controlada pelo programa Test Script (TESC). Este software permite a sistematização dos ensaios, através da elaboração e aplicação de métodos de ensaio, conferindo consistência aos resultados.

Antes da efetiva realização do ensaio para a determinação do módulo de deformação, selecionou-se o *script* específico para este ensaio, e definiram-se os valores das variáveis, como as dimensões efetivas das faces do bloco, medida base do extensômetro e a resistência média de ruptura dos blocos ensaiados anteriormente apenas à compressão. Para esta pesquisa, utilizou-se o script de ensaio elaborado por Barreto (2015).

No que se refere à preparação dos corpos de prova, para a determinação do módulo de deformação, destaca-se que as amostras devem ser posicionadas no centro dos pratos da prensa, e os medidores de deformação devem ser fixados de forma que os pontos de medição fiquem equidistantes em relação aos extremos do corpo de prova, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Fixação do equipamento utilizado na pesquisa para determinação do módulo de deformação dos blocos de concreto.



Fonte: o Autor.

Inicia-se, então, de fato, o ensaio para a determinação do módulo de deformação do bloco, com a elevação do carregamento até a tensão de 30% da tensão de ruptura (σ_b), com

uma velocidade constante. Neste limite da tensão, mantém-se o carregamento por 60 (sessenta) segundos, e, em seguida, reduz-se o processo de carregamento, com a mesma velocidade constante, até a tensão básica de 5% da tensão de ruptura (σ_a), mantendo-se, mais uma vez, a carga por 60 (sessenta) segundos.

No que tange à referida velocidade, destaca-se que foi adotada a velocidade de 0,05 MPa/s, que é igual à velocidade aplicada nos ensaios para determinar a resistência à compressão dos blocos, a qual é especificada pela NBR 15270-3 (ABNT, 2005).

Na sequência, efetuaram-se mais três ciclos de carregamento, entre σ_a e σ_b . Salienta-se que, no último ciclo de carregamento, são registradas as medidas das deformações específicas ϵ_a e ϵ_b , correspondentes às tensões mencionadas.

Na etapa final, eleva-se o carregamento até atingir 50% da tensão estimada de ruptura, quando o programa solicita a retirada do extensômetro, para realizar a ruptura do bloco.

O cálculo do módulo de deformação é então calculado como o coeficiente angular da reta que passa pelos pontos (σ_a, ϵ_a) e (σ_b, ϵ_b).

3.3.2 Argamassa de assentamento

Para a realização dos ensaios de determinação do módulo de deformação da argamassa de assentamento, utilizou-se um extensômetro, com dupla base de medida, instalado na máquina universal de ensaio, da marca EMIC, modelo DL100T, adaptada com uma célula de carga de 2 toneladas força, e controlada pelo programa Test Script (TESC), o qual possibilitou programar o referido ensaio, a partir da definição de uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s, estabelecida pela NBR 7215 (ABNT, 1996).

Antes da efetiva realização do ensaio para a determinação do módulo de deformação, selecionou-se o *script* específico para este ensaio, e definiram-se os valores das variáveis, como o diâmetro do corpo de prova, a medida base do extensômetro e a resistência média de ruptura da argamassa, definida a partir dos valores de resistência à compressão de três amostras cilíndricas.

No que se refere à preparação dos corpos de prova, para a determinação do módulo de deformação, destaca-se que as amostras devem ser posicionadas no centro do dispositivo de carga, e os medidores de deformação devem ser fixados de forma que os pontos de medição fiquem equidistantes em relação ao diâmetro do corpo de prova, e no centro da

altura, conforme ilustra a Figura 13. Destaca-se, ainda, que a medida base do extensômetro utilizada foi de 50 mm.

Figura 13 – Fixação do equipamento utilizado na pesquisa para determinação do módulo de deformação das argamassas.



Fonte: o Autor.

Inicia-se, então, o ensaio para a determinação do módulo de deformação da argamassa, com a elevação do carregamento até a tensão de 30% da tensão de ruptura (σ_b), com a velocidade constante de 0,25 MPa/s. Neste limite da tensão, mantém-se o carregamento por 60 (sessenta) segundos, e, em seguida, reduz-se o processo de carregamento, com a mesma velocidade constante, até a tensão básica de 5% da tensão de ruptura (σ_a), mantendo-se, mais uma vez, a carga por 60 (sessenta) segundos.

Na sequência, efetuaram-se mais três ciclos de carregamento, entre σ_a e σ_b . Salienta-se que, no último ciclo de carregamento, são registradas as medidas das deformações específicas ϵ_a e ϵ_b , correspondentes às tensões mencionadas.

Na etapa final, eleva-se o carregamento até atingir 70% da tensão estimada de ruptura, quando o programa solicita a retirada do extensômetro, para realizar a ruptura do corpo de prova da argamassa.

O cálculo do módulo de deformação é então calculado como o coeficiente angular da reta que passa pelos pontos (σ_a, ϵ_a) e (σ_b, ϵ_b) .

3.3.3 Graute

Para a realização dos ensaios de determinação do módulo de deformação do graute, utilizou-se um extensômetro, com dupla base de medida, instalado na máquina universal de ensaio, da marca EMIC, modelo DL100T, e controlada pelo programa Test

Script (TESC), o qual possibilitou programar o referido ensaio, a partir da definição de uma velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s, estabelecida pela NBR 8522 (ABNT, 2008).

Antes da efetiva realização do ensaio para a determinação do módulo de deformação, selecionou-se o *script* específico para este ensaio, e definiram-se os valores das variáveis, como o diâmetro do corpo de prova, a medida base do extensômetro e a resistência média de ruptura do graute, definida a partir dos valores de resistência à compressão de três amostras cilíndricas, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007).

A NBR 8522 (ABNT, 2008) define que a base de medida das deformações deve ser no mínimo igual a 2/3 do diâmetro do corpo de prova e no máximo igual a esse diâmetro. Atendendo este parâmetro, definiu-se a medida base de 75 mm, utilizada no ensaio de módulo de deformação.

Os corpos de prova foram centralizados nos pratos da prensa e os medidores de deformação foram fixados de forma que os pontos de medição ficassem equidistantes dos extremos do corpo de prova.

O ensaio para a determinação do módulo de deformação do graute iniciou-se com a elevação do carregamento até a tensão de 30% da tensão de ruptura (σ_b), com a velocidade constante de 0,45 MPa/s. Neste limite da tensão, manteve-se o carregamento por 60 (sessenta) segundos, e, em seguida, reduziu-se o processo de carregamento, com a mesma velocidade constante, até a tensão básica de 0,5 MPa (σ_a), mantendo-se, mais uma vez, a carga por 60 (sessenta) segundos.

Na etapa seguinte, efetuaram-se mais três ciclos de carregamento, entre σ_a e σ_b . Salienta-se que, no último ciclo de carregamento, foram registradas as medidas das deformações específicas ϵ_a e ϵ_b , correspondentes às tensões mencionadas.

Na etapa final, elevou-se o carregamento até atingir 70% da tensão estimada de ruptura, quando o programa solicita a retirada do extensômetro, para realizar a ruptura do corpo de prova de graute.

O cálculo do módulo de deformação é então calculado como o coeficiente angular da reta que passa pelos pontos (σ_a, ϵ_a) e (σ_b, ϵ_b).

3.3.4 Prisma

Para a realização dos ensaios de determinação do módulo de deformação dos prismas não grauteados e grauteados, utilizou-se um extensômetro, com dupla base de medida, instalado na máquina universal de ensaio, da marca EMIC, modelo DL100T, e

controlada pelo programa Test Script (TESC), o qual possibilitou programar o referido ensaio, a partir da definição de uma velocidade de carregamento de 0,15 MPa/s, estabelecida pelo anexo A, da NBR 15961-2 (ABNT, 2011).

Antes da efetiva realização do ensaio para a determinação do módulo de deformação dos prismas, selecionou-se o *script* específico para este ensaio, e definiram-se os valores das variáveis, como as dimensões efetivas do prisma, a medida base do extensômetro e a resistência à compressão média do prisma, a qual foi estabelecida, anteriormente, a partir dos valores de resistência à compressão de três amostras de prisma, dentre as seis amostras inicialmente preparadas.

No que se refere à preparação dos corpos de prova, para a determinação do módulo de deformação, destaca-se que as amostras devem ser posicionadas no centro dos pratos da prensa, e os medidores de deformação devem ser fixados de forma que os pontos de medição fiquem equidistantes em relação aos extremos do corpo de prova, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Fixação do equipamento utilizado na pesquisa para determinação do módulo de deformação dos prismas.



Fonte: o Autor.

Inicia-se, então, o ensaio para a determinação do módulo de deformação dos prismas, com a elevação do carregamento até a tensão de 30% da tensão de ruptura (σ_b), com uma velocidade constante. Neste limite da tensão, mantém-se o carregamento por 60 (sessenta) segundos, e, em seguida, reduz-se o processo de carregamento, com a mesma velocidade constante, até a tensão básica de 5% da tensão de ruptura (σ_a), mantendo-se, mais uma vez, a carga por 60 (sessenta) segundos.

Na sequência, efetuaram-se mais três ciclos de carregamento, entre σ_a e σ_b . Salienta-se que, no último ciclo de carregamento, são registradas as medidas das deformações específicas ϵ_a e ϵ_b , correspondentes às tensões mencionadas. Na etapa final, eleva-se o carregamento até atingir 50% da tensão estimada de ruptura, quando o programa solicita a retirada do extensômetro, para realizar a ruptura do prisma.

O cálculo do módulo de deformação é então calculado como o coeficiente angular da reta que passa pelos pontos (σ_a, ϵ_a) e (σ_b, ϵ_b) .

3.4 Modelo matemático

Para a elaboração de um modelo matemático capaz de estimar as propriedades dos prismas a partir das propriedades de seus componentes (bloco, argamassa e graute), foi utilizada a técnica de Projeto de Experimentos. Segundo Montgomery (2001), os passos a serem seguidos no planejamento e execução de um projeto de experimentos são: reconhecimento e aceitação do problema a ser estudado; escolha dos fatores a serem variados no experimento e dos níveis de variação desses fatores; escolha das variáveis resposta; escolha do projeto de experimentos mais adequado; execução do mesmo com a coleta de dados; análise estatística dos dados coletados e apresentação das conclusões e recomendações.

Dessa maneira foram identificadas as quatro variáveis independentes (fatores): resistência do bloco, resistência da argamassa, resistência do graute e idade do prisma. Cada uma desses fatores possui dois níveis de variação: resistência do bloco de B1, B2 e B3; resistência da argamassa de A1 e A2; resistência do graute de G1 e G2, idade do prisma de 7 dias, 14 dias e 28 dias; e preenchimento do prisma, podendo ser oco ou cheio.

Segundo Ribeiro & Caten (2010), um projeto fatorial tipo misto 3^k e 2^k , sendo k o número de fatores, permite estudar os efeitos principais e todas as interações entre os fatores controláveis. Os autores afirmam ainda que tal projeto é indicado para o caso dos fatores possuírem dois ou mais níveis, como é o caso desta pesquisa.

Definido o projeto de experimento a ser utilizado, inicia-se a fase de modelagem numérica. Para atingir este objetivo foi utilizado a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), que, segundo Ribeiro & Caten (2010), é particularmente eficiente para toda a classe de projetos fatoriais mistos.

Foi utilizado o *software Estatística 7.0* para implementação da MSR, objetivando gerar uma equação repostada na forma:

$$f_{pk,med(i)} = b_0 + b_1 f_{bk,med(28)} + b_2 f_{gk,med(28)} + b_3 f_{ak,med(28)} + b_4 i \quad (25)$$

Sendo,

$f_{bk,med(28)}, f_{gk,med(28)}, f_{ak,med(28)}$ = valores de resistência média à compressão aos 28 dias do bloco, graute e argamassa, respectivamente;

b_0, b_1, b_2, \dots = coeficientes de ajuste;

$f_{pk,med(i)}$ = resistência média estimada do prisma na idade de “i” dias.

4 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Blocos

Conforme já havia sido dito no item 3.1.1, inicialmente foram previstas duas resistências para os blocos 6 MPa e 8 MPa, por se tratarem das resistências mais utilizadas em HIS. Ocorre que, no decorrer dos ensaios para verificar a resistência à compressão destas unidades, observou-se que os lotes fornecidos possuíam resistências distintas, resultando em três diferentes resistências à compressão, conforme ilustra a Tabela 20.

Tabela 20 – Resistência média à compressão dos blocos de concreto utilizados na pesquisa.

Tipo de Bloco	Nº de CP's Ensaiaados	Resistência na Área Bruta			Resistência na Área Líquida		
		Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	CV (%)
B1	7	7,66	1,64	2,679	12,17	2,60	6,762
B2	19	13,23	1,24	1,544	20,81	1,95	3,817
B3	12	14,40	1,81	3,276	23,00	2,89	8,356

Fonte: o Autor.

Com relação ao módulo de elasticidade dos blocos, notou-se que os valores da instrumentação dos blocos apresentaram-se com uma discrepância elevada, sugerindo que o equipamento não foi capaz de fornecer resultados confiáveis, a Tabela 21 ilustra os valores obtidos com o extensômetro para quatro dois blocos tipo B1, quatro blocos tipo B2 e quatro blocos tipo B3.

Tabela 21 – Resistência média do módulo de deformação dos blocos de concreto utilizados na pesquisa.

Identificação do CP	Módulo de Deformação (GPa)		
	Tipo de Bloco		
	B1	B2	B3
CP 01	13,5	542,17	172,60
CP 02	50,85	47,38	65,49
CP 03	-	47,43	21,16
CP 04	-	49,87	117,36

Fonte: o Autor.

Dada a não confiabilidade dos valores experimentais do módulo de deformação obtidos para os blocos, optou-se por seguir a mesma metodologia utilizada por Romagna (2000) e Steil (2003) e estimar o valor dessa propriedade através da equação (10). Tais valores estimados estão representados na Tabela 22.

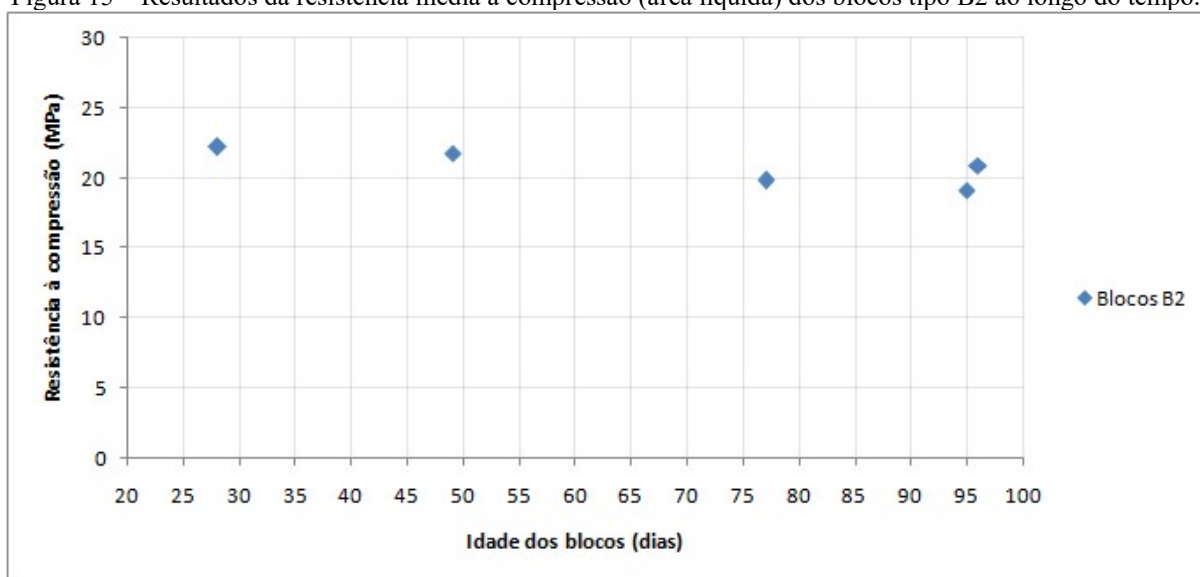
Tabela 22 – Cálculo do módulo de elasticidade dos blocos, de acordo com o ACI Building Code 318.

Bloco	B1	B2	B3
Fórmula ACI Building Code 318	$0,0428 \times \sqrt{f_b} \times (W_b)^{1,5}$	$0,0428 \times \sqrt{f_b} \times (W_b)^{1,5}$	$0,0428 \times \sqrt{f_b} \times (W_b)^{1,5}$
Apresentação	$0,0428 \times \sqrt{12,17} \times (2098)^{1,5}$	$0,0428 \times \sqrt{20,81} \times (2097)^{1,5}$	$0,0428 \times \sqrt{23,00} \times (2064)^{1,5}$
Módulo de Elasticidade (MPa)	14348,20	18748,97	19247,41

Fonte: o Autor.

Em se tratando da evolução da resistência à compressão dos blocos, assumiu-se a hipótese que, após os 28 dias, não haveria ganhos significativos de resistência dos blocos, fato este que motivou a moldagens de todos os primas após os blocos completarem os 28 dias de idade. A hipótese supracitada pode ser confirmada ensaiando-se os blocos em diferentes idades. A Figura 15 ilustra os resultados médios de resistência à compressão para os blocos tipo B2 ensaiados nas idades de 28 dias (5 blocos), 49 dias (4 blocos), 77 dias (4 blocos), 95 dias (4 blocos) e 96 dias (2 blocos). Observando tal figura, percebe-se que não há tendência de ganho de resistência ao longo do tempo e, assim, confirmando a hipótese adotada.

Figura 15 – Resultados da resistência média à compressão (área líquida) dos blocos tipo B2 ao longo do tempo.



Fonte: o Autor.

4.2 Argamassas

Os ensaios de argamassa tiveram como objetivo determinar a resistência à tração na flexão, resistência à compressão e o módulo de elasticidade, sendo que estes dois últimos dados serviram para avaliar o comportamento dos prismas e também a variabilidade dessas propriedades da argamassa ao longo do tempo.

A Tabela 23 ilustra os resultados médios para a resistência à tração na flexão, seguindo as prescrições da NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram ensaiados três corpos-de-prova prismáticos para cada idade (7 dia, 14 dias e 28 dias) e para cada tipo de argamassa (A1 e A2), totalizando 18 CP's de argamassa ensaiados à tração na flexão. Podemos ver nesta tabela que os valores de resistência à tração, como já esperado, aumentam ao longo do tempo, isto pode ser explicado pela contínua hidratação do cimento presente na argamassa ao longo dos 28 dias. Um dado interessante é o fato da resistência à tração na flexão das duas argamassas possuírem, aos 7 dias, mais de 60% da resistência aos 28 dias, indicando um rápido ganho de resistência, ganho este mais acentuado na argamassa tipo A1.

Tabela 23 – Valores médios de resistência à tração na flexão de CP's prismáticos das argamassas utilizadas na pesquisa.

Idade (dias)	Nº de CP's Ensaiaados	Argamassa A1			Argamassa A2		
		Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)	Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)
7	3	1,42	0,093	75,53	2,27	0,210	66,95
14	3	1,62	0,070	86,44	2,32	0,013	68,55
28	3	1,88	0,112	-	3,39	0,196	-

Fonte: o Autor.

Após a ruptura por flexão, os corpos-de-prova prismáticos foram submetidos ao ensaio de compressão, sendo que cada barra prismática, após rompida por flexão, gerou dois corpos-de-prova para serem ensaiados à compressão, totalizando 18 CP's para cada tipo de argamassa (6 ensaiados com 7 dias, 6 ensaiados com 14 dias e outros 6 ensaiados com 28 dias). Os resultados médios desses ensaios estão evidenciados na Tabela 24. Observa-se também nesta tabela o rápido ganho de resistência da argamassa, chegando, aos 14 dias, a quase 95% da resistência à compressão obtida aos 28 dias.

Tabela 24 – Valores médios de resistência à compressão de CP's prismáticos das argamassas utilizadas na pesquisa.

Idade (dias)	Nº de CP's Ensaiaados	Argamassa A1			Argamassa A2		
		Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)	Média(MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)
7	6	3,877	0,166	72,13	6,832	0,460	73,20
14	6	5,098	0,276	94,85	7,712	0,427	82,63
28	6	5,375	0,224	-	9,333	0,723	-

Fonte: o Autor.

Alternativamente ao ensaio de resistência à compressão com barras prismáticas, foram realizados ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos. A princípio foi estabelecida a mesma quantidade de CP's ensaiados com a forma prismática (18 amostras para cada tipo de argamassa, sendo: 6 ensaiados com 7 dias, 6 ensaiados com 14 dias e outros 6 ensaiados com 28 dias). Contudo, dos 6 CP's previstos para ensaio da argamassa tipo A2 aos 14 dias, apenas três foram efetivamente ensaiados, os demais foram danificados antes da realização do ensaio. A Tabela 25 apresenta os valores médios para esse ensaio. Observando os valores desta tabela, confirma-se o elevado ganho de resistência de ambas as argamassas, uma vez que, tanto para o tipo A1, quanto para o tipo A2, a resistência à compressão aos 14 dias chega a mais de 80% da resistência à compressão verificada aos 28 dias.

Tabela 25 – Valores médios de resistência à compressão de CP's cilíndricos das argamassas utilizadas na pesquisa.

Idade (dias)	Nº de CP's Ensaiaados	Argamassa A1			Argamassa A2		
		Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)	Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)
7	6	4,306	0,310	76,52	6,823	0,647	73,56
14	6*/3**	4,859	0,511	86,35	7,558	0,835	81,49
28	6	5,627	0,544	-	9,275	0,827	-

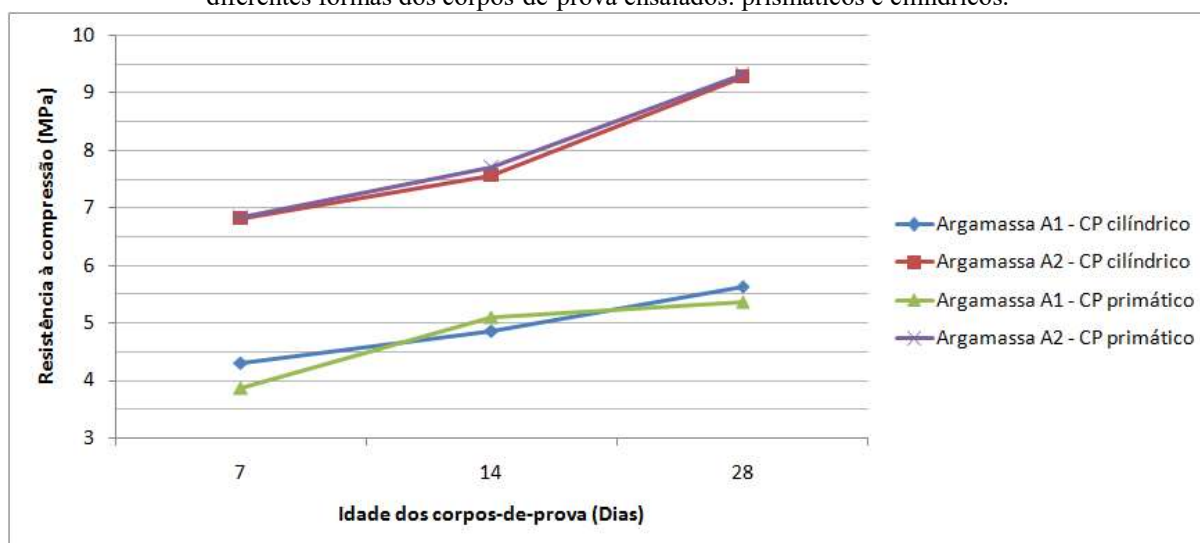
* para a argamassa tipo A1

** para a argamassa tipo A2

Fonte: o Autor.

A Figura 16 ilustra os resultados do ensaio de compressão das argamassas para as diferentes formas dos corpos-de-prova (prismáticos e cilíndricos). Observando a Figura, nota-se a aderência das curvas de resistência para cada tipo de argamassa, isto é, a curva de resistência à compressão utilizando-se CP's prismáticos para a argamassa tipo A2, por exemplo, é bem próxima da curva utilizando-se CP's cilíndricos dessa mesma argamassa. Tal fato indica resultados equivalentes de resistência à compressão, independente da forma do corpo-de-prova.

Figura 16 – Curvas de resistência à compressão das argamassas utilizadas na pesquisa, considerando-se as diferentes formas dos corpos-de-prova ensaiados: prismáticos e cilíndricos.



Fonte: o Autor.

Para determinação do módulo de elasticidade, foram instrumentados três dos seis corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão, sendo o módulo obtido durante este ensaio, seguindo a metodologia proposta por Barreto (2015). Assim, a princípio, foi estabelecida uma quantidade de 9 CP's instrumentados para cada tipo de argamassa (3 ensaiados com 7 dias, 3 ensaiados com 14 dias e outros 3 ensaiados com 28 dias). Contudo, dos 3 CP's previstos para determinação do módulo de deformação aos 14 dias de cada tipo de argamassa, apenas em dois foram possível a determinação do módulo; o mesmo ocorreu para as amostras da argamassa tipo A1 ensaiadas aos 7 dias e amostras da argamassa tipo A2 ensaiadas aos 28 dias. A Tabela 26 apresenta os valores médios para essa propriedade. Observa-se nesta Tabela que as argamassa tornam-se mais rígidas (aumento do módulo de deformação) com o passar tempo.

Tabela 26 – Valores médios de módulo de deformação das argamassas utilizadas na pesquisa.

Idade (dias)	Nº de CP's Ensaíados	Argamassa A1			Argamassa A2		
		Média (GPa)	Desvio-Padrão (GPa)	Relação com módulo aos 28 dias (%)	Média (GPa)	Desvio-Padrão (GPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)
7	2	7,795	0,120	92,06	8,845	0,262	62,72
14	2*/3**	7,920	0,551	93,54	9,950	0,469	70,55
28	3	8,467	0,892	-	14,103	1,588	-

* para a argamassa tipo A1

** para a argamassa tipo A2

Fonte: o Autor.

4.3 Grautes

Os dois tipos de grautes utilizados neste programa experimental foram ensaiados à compressão e alguns CP's instrumentados para determinação do módulo de deformação. Para a determinação da resistência à compressão, foram ensaiados 18 corpos-de-prova para cada tipo de graute (6 ensaiados aos 7 dias, 6 ensaiados aos 14 dias e 6 ensaiados aos 28 dias). A Tabela 27 apresenta os valores médios dessa característica mecânica. Podemos notar que o ganho de resistência dos grautes, ao longo do tempo, é similar àquele observado para as argamassas (Tabela 25), na qual a resistência à compressão aos 14 dias já representa um valor superior a 80% dessa mesma resistência verificada aos 28 dias.

Tabela 27 – Valores médios de resistência à compressão dos grautes utilizadas na pesquisa.

Idade (dias)	Nº de CP's Ensaiaados	Graute G1			Graute G2		
		Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)	Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)
7	6	16,772	1,090	71,63	15,126	0,807	72,08
14	6	21,023	0,585	89,78	18,372	0,737	87,54
28	6	23,415	0,548	-	20,986	0,557	-

Fonte: o Autor.

Para determinação do módulo de elasticidade, foram instrumentados três dos seis corpos-de-prova cilíndricos ensaiados à compressão, sendo o módulo obtido durante este ensaio, seguindo a metodologia proposta por Barreto (2015). Assim, a princípio, foi estabelecida uma quantidade de 9 CP's instrumentados para cada tipo de graute (3 ensaiados com 7 dias, 3 ensaiados com 14 dias e outros 3 ensaiados com 28 dias). A Tabela 28 apresenta os valores médios para essa propriedade. Observa-se nesta Tabela que os grautes, similar ao que ocorre com as argamassas, tornam-se mais rígidos com o passar tempo. Nota-se ainda que o módulo de deformação dos dois tipos de grautes são bem semelhantes.

Tabela 28 – Valores médios de módulo de deformação dos grautes utilizadas na pesquisa.

Idade (dias)	Nº de CP's Ensaíados	Graute G1			Graute G2		
		Média (GPa)	Desvio-Padrão (GPa)	Relação com módulo aos 28 dias (%)	Média (GPa)	Desvio-Padrão (GPa)	Relação com resistência aos 28 dias (%)
7	3	15,59	0,476	82,88	16,521	0,559	88,60
14	3	17,14	0,991	91,12	16,850	0,225	90,36
28	3	18,81	0,161	-	18,647	0,699	-

Fonte: o Autor.

Optou-se, neste estudo, por não extrair corpos-de-prova de grautes a partir dos prismas, pois, vários pesquisadores sugerem não haver diferenças significativas na resistência à compressão de grautes moldados em cilindros metálicos e extraídos dos blocos (CALÇADA, 1998; MENDES, 1998).

4.4 Prismas

Para a realização desta pesquisa, foram moldados 12 tipos de prismas de diferentes características. Para cada tipo de prisma foi moldado uma amostra de 18 prismas (6 para serem ensaiados aos 7 dias, 6 a serem ensaiados aos 14 dias e outros 6 a serem ensaiados aos 28 dias), totalizando 216 corpos-de-prova. Contudo, alguns prismas foram danificados no manuseio, não sendo possível a realização do ensaio de resistência à compressão. Tais prismas danificados somam 12 corpos-de-prova sendo: 06 prismas não rompidos para a série 1 (B3-A1); 01 prisma não rompido para a série 2 (B2-A1); 01 prisma não rompido para a série 3 (B3-A1-G1); 01 prisma não rompido para a série 5 (B3-A1-G2); 01 prisma não rompido para a série 6 (B2-A1-G2); e 02 prismas não rompidos para a série 7 (B1-A2). Assim, foram efetivamente ensaiados 204 prismas, dos 216 inicialmente moldados.

Os resultados médios da resistência à compressão obtidos para cada série de prismas são mostrados na Tabela 29, juntamente com o fator de eficiência e a relação da resistência obtida nas idades de 7 dias e 14 dias em relação ao resultado verificado aos 28 dias.

Tabela 29 – Valores médios de resistência à compressão dos diferentes tipos de prismas utilizados na pesquisa.

Nº da série	Identificação do prisma	Identificação dos componentes			Resultados do Ensaio					
		Bloco (MPa)	Argamassa (MPa)	Graute (MPa)	Resistência à compressão (MPa)			Relação com resistência aos 28 dias (%)		Fator de Eficiência
					7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	
1	B3-A1	14,40	5,37	-	8,718	8,717	8,753	99,59	99,59	0,608
2	B2-A1	13,23	5,37	-	8,782	9,524	9,862	89,05	96,57	0,745
3	B3-A1-G1	14,40	5,37	23,42	13,996	16,003	16,747	83,57	95,56	0,728
4	B2-A1-G1	13,23	5,37	23,42	13,845	14,237	14,894	92,96	95,59	0,716
5	B3-A1-G2	14,40	5,37	20,98	13,413	13,712	18,393	72,92	74,55	0,800
6	B2-A1-G2	13,23	5,37	20,98	13,010	14,394	14,622	88,97	98,44	0,703
7	B1-A2	7,66	9,33	-	6,915	6,982	7,571	91,34	92,23	0,988
8	B2-A2	13,23	9,33	-	9,859	10,798	11,780	83,69	91,66	0,890
9	B1-A2-G1	7,66	9,33	23,42	10,307	10,998	11,443	90,07	96,11	0,940
10	B2-A2-G1	13,23	9,33	23,42	12,739	14,308	14,374	88,62	99,54	0,691
11	B1-A2-G2	7,66	9,33	20,98	11,435	12,486	13,112	87,21	95,23	1,077
12	B2-A2-G2	13,23	9,33	20,98	13,289	13,787	14,776	89,94	93,31	0,710

Fonte: o Autor.

Como se pode observar na Tabela 29, com exceção dos prismas da série 5 (B3-A1-G2), todos os tipos de prismas chegaram a um valor de resistência à compressão aos 14 dias superior a 90% da resistência verificada aos 28 dias. Em alguns casos, a resistência aos 14 dias foi menos de 1% da resistência verificada aos 28 dias. Atribui-se essa proximidade de resistência aos 14 e 28 dias a dois fatos: primeiro deles é a resistência do bloco utilizado possuir idade superior a 28 dias, desta forma não há ganho significativo de resistência ao longo do tempo; segundo, tanto a resistência do graute, quanto da argamassa, se elevam rapidamente, tendo sido observado uma diferença inferior a 20% entre as resistências à compressão desses componentes aos 14 e 28 dias. – como dito outrora. Resultado semelhante também foi observado por Mendizabal (2011), que obteve resistências de prismas aos 14 dias bem próximas da resistência aos 28 dias.

Ainda na tabela acima, os fatores de eficiência estão dentro do intervalo de valores obtido para este parâmetro por outros autores (IZQUIERDO, 2015; FORTE, 2012; BARBOSA, 2008; ROMAGNA, 2000; MOHAMAD, 1998), isto é, dentro do intervalo de 0,50 a 1,20.

Para determinação do módulo de elasticidade, foi previsto inicialmente a instrumentação de três dos seis prismas ensaiados à compressão, sendo o módulo obtido durante este ensaio, seguindo a metodologia proposta por Barreto (2015). Assim, a princípio,

foi estabelecida, para cada tipo de prisma moldado, a instrumentação de 9 prismas (3 para serem ensaiados aos 7 dias, 3 a serem ensaiados aos 14 dias e outros 3 a serem ensaiados aos 28 dias), totalizando 108 corpos-de-prova instrumentados para determinação do módulo de deformação. Contudo, durante o manuseio dos equipamentos no laboratório, a leitura do medidor de deformação foi comprometida, não sendo possível determinação do módulo de elasticidade. Tais prismas danificados somam 13 corpos-de-prova sendo: 02 prismas da série 2 (B2-A1); 01 prisma da série 3 (B3-A1-G1); 01 prisma da série 4 (B2-A1-G1); 01 prisma da série 5 (B3-A1-G2); 02 prisma da série 6 (B2-A1-G2); 02 prismas da série 7 (B1-A2); 02 prismas da série 8 (B2-A2); e 02 prismas da série 9 (B1-A2-G1). Assim, foi determinado, efetivamente, o módulo de deformação de 95 prismas, dos 108 inicialmente previstos.

Os resultados médios do módulo de deformação para cada série de prismas são mostrados na Tabela 30, juntamente os valores desse parâmetro obtido nas idades de 7 dias e 14 dias em relação ao resultado verificado aos 28 dias.

Tabela 30 – Valores médios do módulo de deformação dos diferentes tipos de prismas utilizados na pesquisa.

Nº da série	Identificação do prisma	Identificação dos componentes			Resultados do Ensaio					
		Bloco (MPa)	Argamassa (MPa)	Graute (MPa)	Módulo de Deformação (GPa)			Relação com módulo aos 28 dias (%)		
					7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	
1	B3-A1	14,40	5,37	-	8,087	12,190	14,250	56,75	85,54	
2	B2-A1	13,23	5,37	-	6,590	7,623	7,653	86,11	99,61	
3	B3-A1-G1	14,40	5,37	23,42	8,523	19,703	12,785	66,67	154,11	
4	B2-A1-G1	13,23	5,37	23,42	14,347	20,615	24,313	59,01	84,79	
5	B3-A1-G2	14,40	5,37	20,98	16,397	18,282	19,407	84,49	94,20	
6	B2-A1-G2	13,23	5,37	20,98	18,980	20,740	20,720	91,60	100,10	
7	B1-A2	7,66	9,33	-	7,220	7,390	7,433	97,13	99,42	
8	B2-A2	13,23	9,33	-	11,510	11,895	12,743	90,32	93,34	
9	B1-A2-G1	7,66	9,33	23,42	13,167	13,980	13,975	94,22	100,04	
10	B2-A2-G1	13,23	9,33	23,42	21,827	24,833	19,970	109,30	124,35	
11	B1-A2-G2	7,66	9,33	20,98	20,903	15,620	16,470	126,92	94,84	
12	B2-A2-G2	13,23	9,33	20,98	24,193	25,977	21,280	113,69	122,07	

Fonte: o Autor.

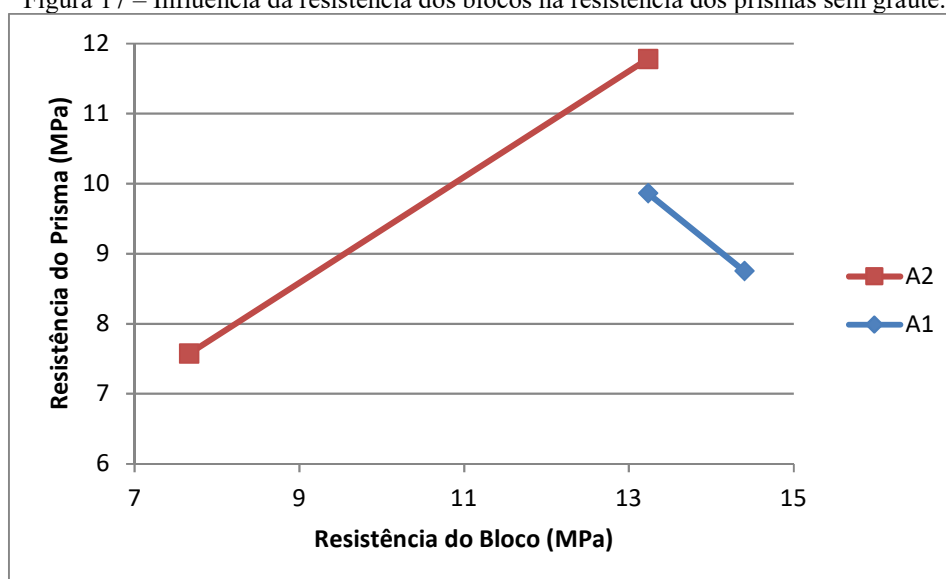
Observando os valores da Tabela 30, pode-se notar que para as séries 3, 10, 11 e 12 o módulo de deformação diminuiu ao longo do tempo, levando a acreditar que tais medidas estão distorcidas e não representam o comportamento real de deformação dos prismas.

Para as demais séries, observa-se que os prismas tornam-se mais rígidos ao longo do tempo (módulo de deformação cresce), contudo há uma maior distância entre os valores desse parâmetro nas idades iniciais em relação ao resultado obtido aos 28 dias.

4.4.1 *Influência da resistência do bloco na resistência do prisma*

A Figura 17 ilustra o comportamento, aos 28 dias, dos prismas não grauteados ao se aumentar a resistência do bloco. Nessa Figura, podemos observar que para os prismas assentados com a argamassa A2, um aumento de resistência dos blocos, provoca um aumento de resistência do prisma. Entretanto, para os prismas assentados com argamassa A1, um aumento de resistência dos blocos, provoca uma diminuição da resistência do prisma. Não há razão aparente para este resultado, embora Romagna (2000) tenha chegado a uma conclusão semelhante ao constatar a diminuição da resistência de prismas não grauteados com o aumento da resistência da argamassa.

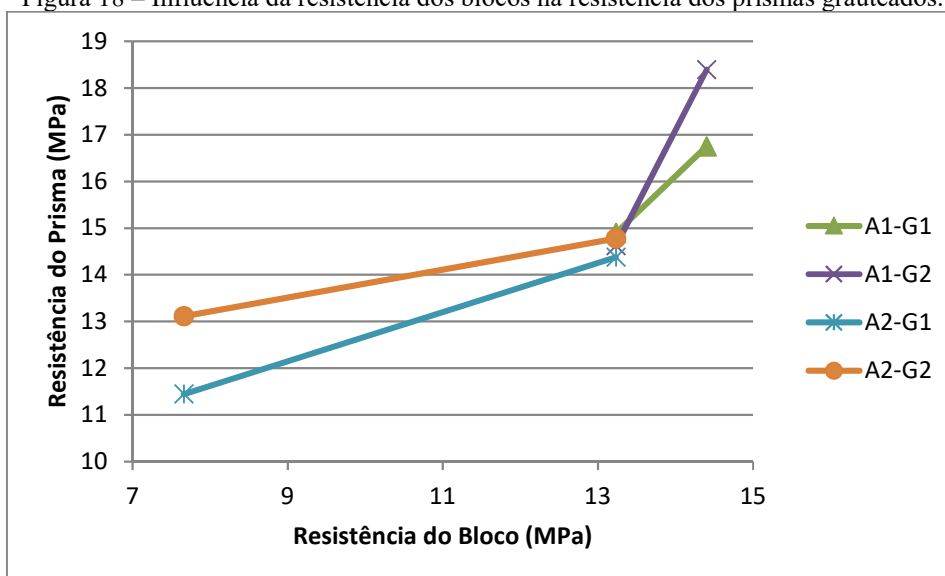
Figura 17 – Influência da resistência dos blocos na resistência dos prismas sem graute.



Fonte: o Autor.

Com relação aos prismas grauteados, também aos 28 dias, a Figura 18 mostra que, a medida que se aumenta a resistência dos blocos, há um aumento de resistência do prisma.

Figura 18 – Influência da resistência dos blocos na resistência dos prismas grauteados.

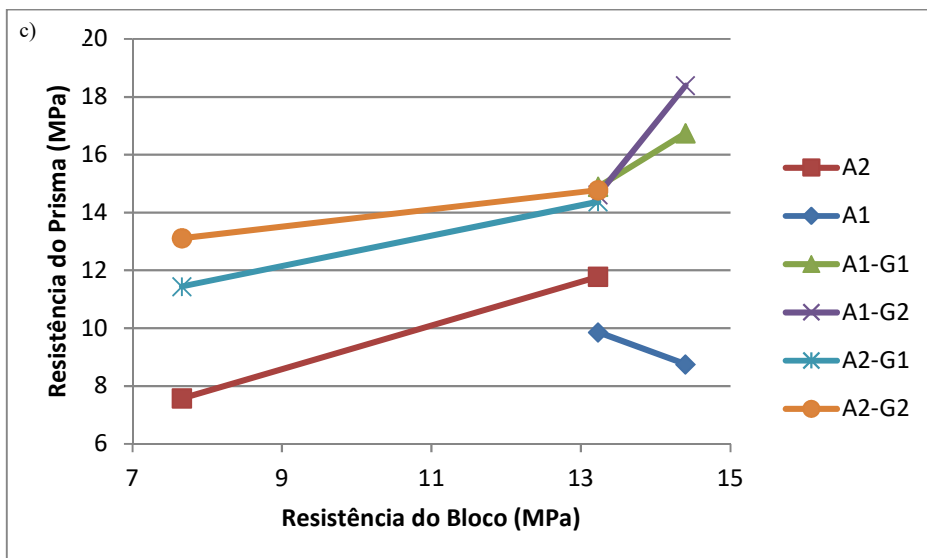
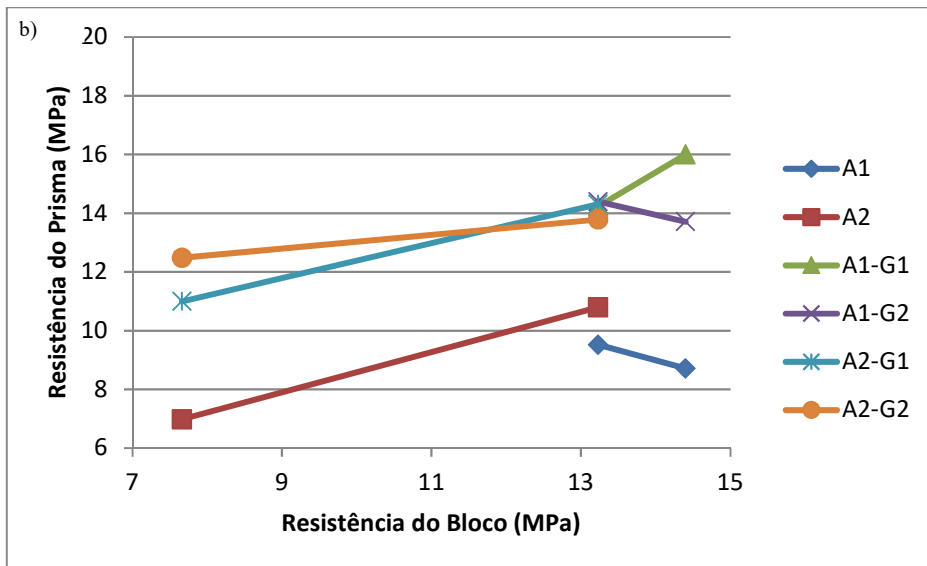
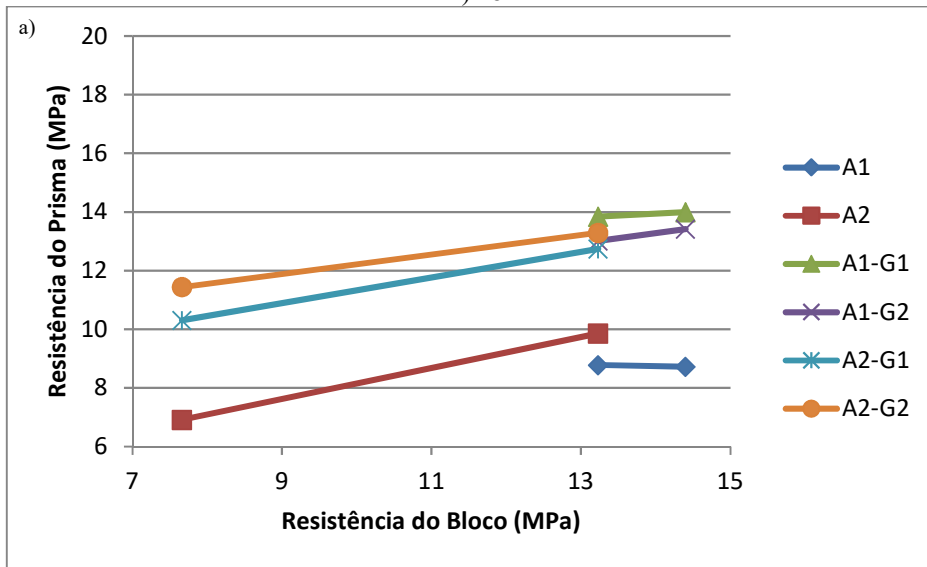


Fonte: o Autor.

Em se tratando da influência da resistência do bloco na resistência dos prismas ao longo do tempo, a Figura 19 mostra como se dá esse comportamento para as séries de prismas estudadas nas idades de 7 dias (Figura 18a), 14 dias (Figura 18b) e 28 dias (Figura 18c). Nessa Figura nota-se que para as séries A2, A2-G1 e A2-G2 a influência do aumento de resistência do bloco se mantém praticamente a mesma ao longo do tempo, visto que as retas possuem inclinação equivalente quando se compara os resultados em diferentes dias.

Já para as séries assentadas com a argamassa A1 (A1, A1-G1 e A1-G2), a influência da resistência do bloco se intensifica – seja aumentando a resistência do prisma ou diminuindo-a – ao longo do tempo, pois os resultados aos 7 dias (Figura 19a) apresentam-se como retas quase horizontais, enquanto que aos 28 dias (Figura 19c) os resultados já forma retas bem inclinadas.

Figura 19 – Influência da resistência dos blocos na resistência dos prismas ao longo do tempo: a) 7 dias, b) 14 dias e c) 28 dias.

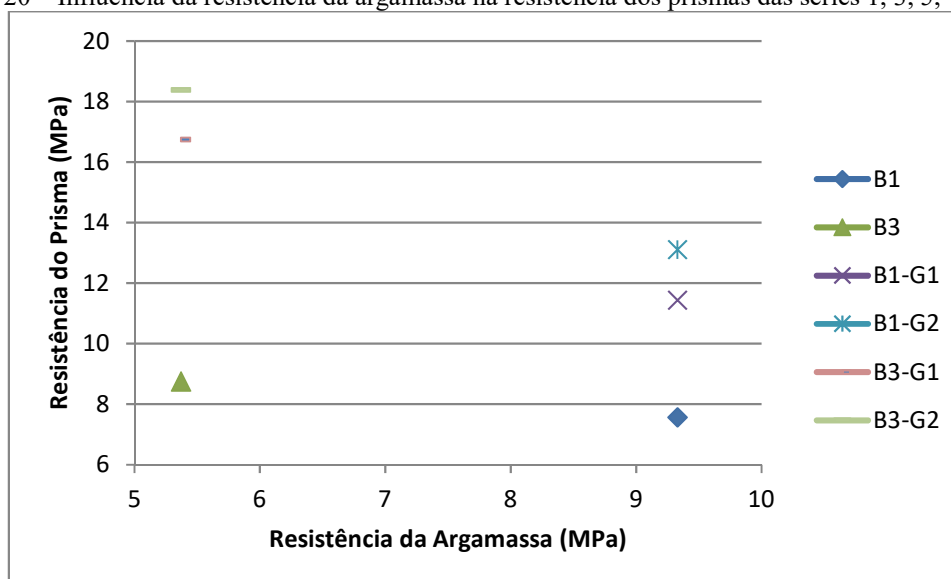


Fonte: o Autor.

4.4.2 Influência da resistência da argamassa na resistência do prisma

A Figura 20 ilustra os resultados da influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas das séries 1 (B3-A1), 3 (B3-A1-G1), 5 (B3-A1-G2), 7 (B1-A2), 9 (B1-A2-G1) e 11 (B1-A2-G2). Para essas séries não é possível analisar tal influência através da Figura 20, uma vez que os dados formam apenas pontos e, com isso, não há nenhuma linha de tendência formada para esses tipos de prismas.

Figura 20 – Influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas das séries 1, 3, 5, 7, 9 e 11.

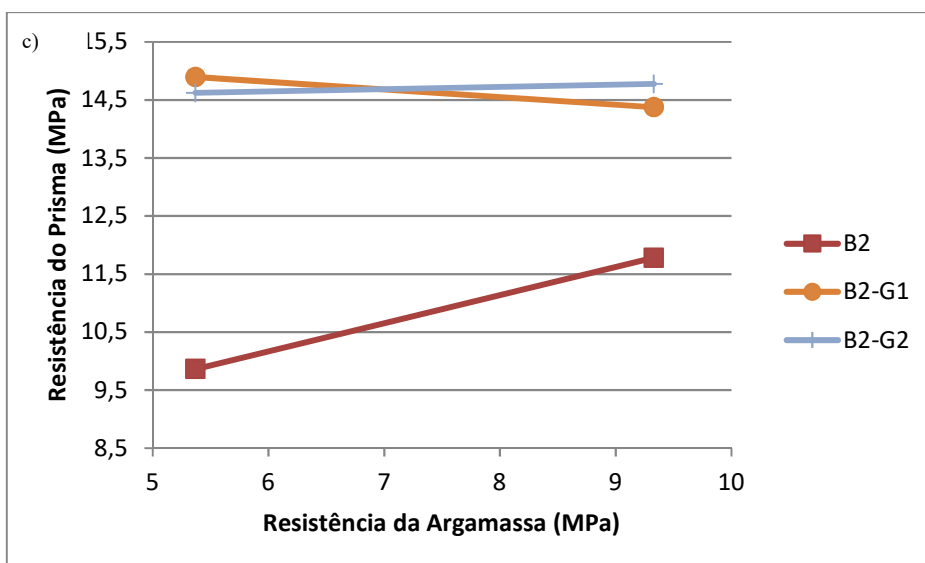
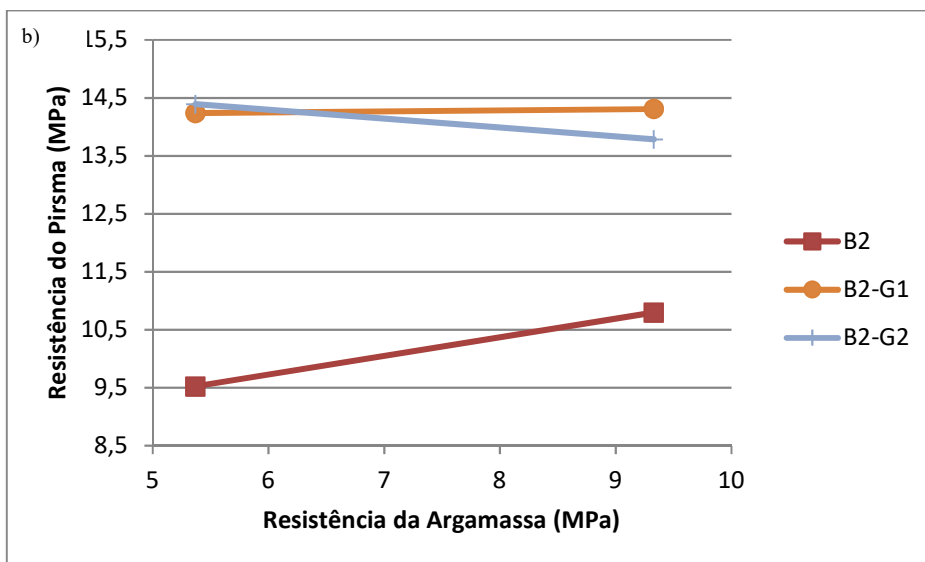
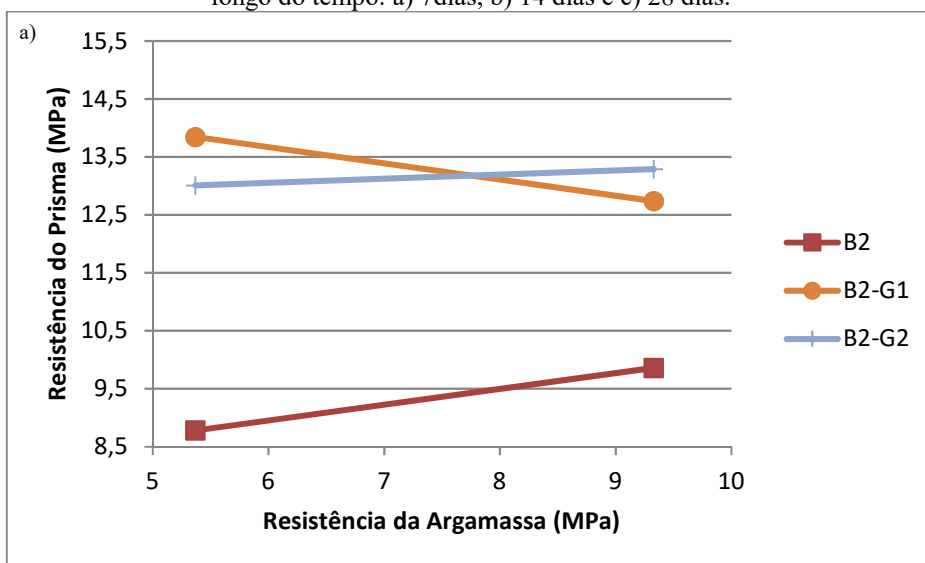


Fonte: o Autor.

Para as séries de prismas que foram moldadas utilizando o bloco B2 – séries 2 (B2-A1), 4 (B2-A1-G1), 6 (B2-A1-G2), 8 (B2-A2), 10 (B2-A2-G1) e 12 (B2-A2-G2) – uma análise visual já é possível, conforme podemos observar na Figura 21: para os prismas não grauteados (séries 2 e 8), o aumento de resistência da argamassa provoca um aumento da resistência do prismas, seja aos 28 dias (Figura 21c), seja em idades anteriores (Figura 21a e b). O mesmo ocorre para as séries 6 e 12 (B2-G2), quando há um aumento de resistência do prismas proporcional ao aumento de resistência da argamassa, tanto aos 28 dias (Figura 21c), como aos 7 dias (Figura 21a).

Contudo, para as séries 4 e 10 (B2-G1) um aumento na resistência da argamassa, provoca um decréscimo da resistência do prisma, isto ocorre tanto aos 28 dias (Figura 21c), como as 7 dias (Figura 21a).

Figura 21 – Influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas das séries 2, 4, 6, 8, 10 e 21 ao longo do tempo: a) 7 dias, b) 14 dias e c) 28 dias.



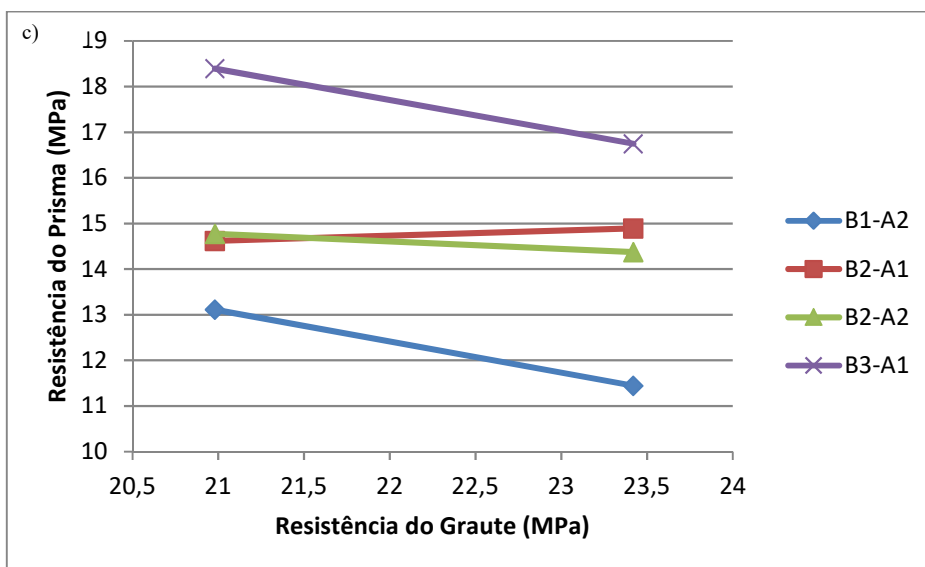
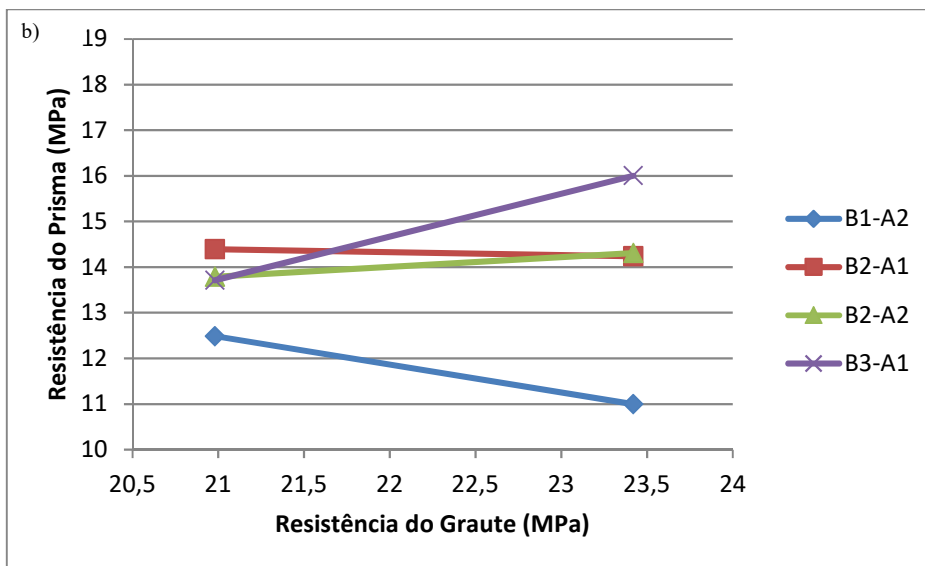
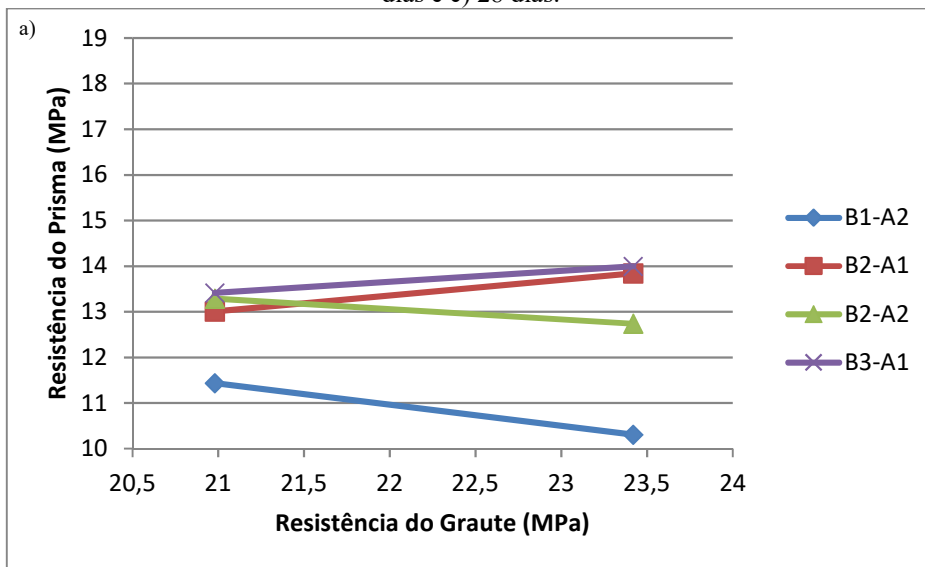
Fonte: o Autor.

4.4.3 Influência da resistência do graute na resistência do prisma

A Figura 22 mostra como se dá a influência da resistência do graute na resistência do prisma para as séries de prismas estudadas nas idades de 7 dias (Figura 22a), 14 dias (Figura 22b) e 28 dias (Figura 22c). Nessa Figura 22c nota-se que, aos 28 dias, apenas para a série B2-A1, há um aumento de resistência do prisma ocasionado pelo aumento de resistência do graute; para as demais séries (A1-B2, B2-A2, B3-A1), um aumento de resistência do graute provoca diminuição na resistência do prisma. Kaaki (2013) chegou a um resultado semelhante, observando uma diminuição da resistência dos prismas com aumento da seção grauteada em prismas de 4 blocos.

Esse mesmo fato pode ser percebido aos 7 dias (Figura 22a), isto é, aqueles prismas que tiveram sua resistência aumentada aos 7 dias, também ganharam resistência aos 28 dias; bem como aqueles que diminuíram a resistência aos 7 dias; os resultados também mostraram queda de resistência aos 28 dias. A série B3-A1 é uma exceção a esta regra, visto que aos 7 dias há ganho de resistência, enquanto que aos 28 dias há decréscimo de resistência.

Figura 22 – Influência da resistência dos grautes na resistência dos prismas ao longo do tempo: a) 7 dias, b) 14 dias e c) 28 dias.



Fonte: o Autor.

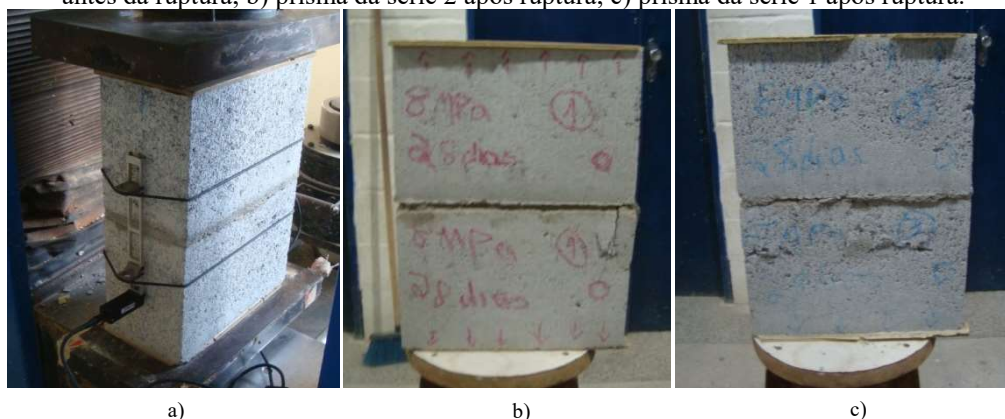
4.4.4 Modos de ruptura dos prismas

Os prismas não grauteados das séries 1 (B3-A1) e 2 (B2-A1) iniciaram a ruptura pelo esmagamento da junta de argamassa, como pode ser observado na figura abaixo. A Figura 23a mostra um prisma antes da ruptura. Comparando a espessura da junta de argamassa da Figura 23a com as espessuras de junta das Figuras 23b e Figura 23c, é notável que a junta de argamassa sofreu esmagamento, seja pelo destacamento de argamassa (visto na Figura 23b), seja pela deslocamento vertical dos blocos, mantendo-os mais próximos (visto na Figura 23c).

Este modo de ruptura ocorre quando a argamassa utilizada no assentamento possui uma resistência bem inferior ao bloco, tal como ocorre nas séries 1 e 2, uma vez que os blocos utilizados possuem resistência média à compressão de 14,40 MPa e 13,23 MPa, respectivamente, enquanto que a argamassa utilizada em ambos os casos possui resistência média à compressão de 5,37 MPa. Esse mesmo modo de ruptura foi observado por Juste (2001) ao ensaiar prismas de 3 blocos utilizando uma argamassa industrializada com resistência à compressão média de 5,2 MPa e blocos com resistência média de 10 MPa. Também foi verificado o mesmo modo de ruptura durante os ensaios realizados por Silva (2007).

Nas idades de 7 dias e 14 dias, os prismas dessas séries apresentaram o mesmo comportamento quanto ao modo de ruptura.

Figura 23 – Modos de ruptura de prismas não grauteados das séries 1 (B3-A1) e 2 (B2-A1) aos 28 dias: a) prisma antes da ruptura; b) prisma da série 2 após ruptura; c) prisma da série 1 após ruptura.



Fonte: o Autor.

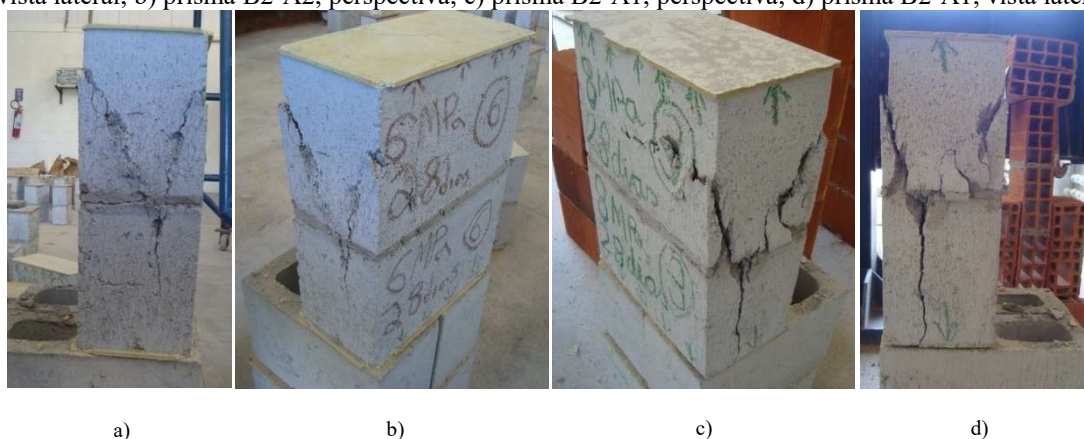
Os prismas não grauteados das séries 7 (B1-A2) e 8 (B2-A2) iniciaram a ruptura por esforços de tração induzidos no bloco, como pode ser observado na figura abaixo (ruptura brusca). A Figura 24a mostra a vista lateral de um prisma da série 7 rompido aos 28 dias,

nota-se que as fissuras inclinadas no bloco superior, bem como a fissura vertical no bloco inferior foram provocadas por tensões de tração. O mesmo padrão de ruptura é observado no prisma da série 8 (Figura 24c e Figura 24d).

Este modo de ruptura ocorre quando se utiliza argamassas mais resistentes, e quando da compressão e expansão da junta de argamassa, esta induz esforços de tração no bloco, tal como ocorre nas séries 7 e 8, uma vez que os blocos utilizados possuem resistência média à compressão de 7,66 MPa e 13,23 MPa (considerando a área bruta), respectivamente, enquanto que a argamassa utilizada em ambos os casos possui resistência média à compressão de 9,33 MPa. Esse modo de ruptura foi observado por Silva (2007) ao utilizar argamassas mais resistentes.

Nas idades de 7 dias e 14 dias, os prismas dessas séries apresentaram o mesmo comportamento quanto ao modo de ruptura.

Figura 24 – Modos de ruptura de prismas não grauteados das séries 7 (B1-A2) e 8 (B2-A2) aos 28 dias: a) prisma B1-A2, vista lateral; b) prisma B2-A2, perspectiva; c) prisma B2-A1, perspectiva; d) prisma B2-A1, vista lateral.



Fonte: o Autor.

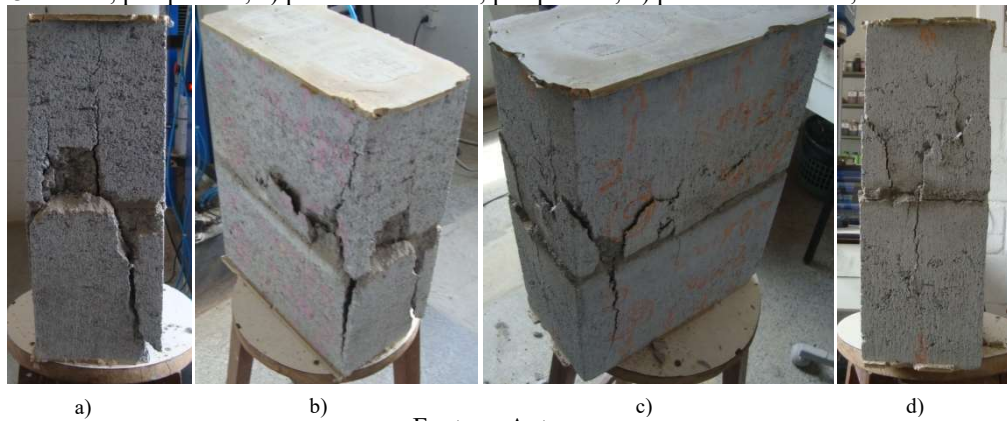
Para os prismas grauteados – séries 3 (B3-A1-G1), 4 (B2-A1-G1), 5 (B3-A1-G2), 6 (B2-A1-G2), 9 (B1-A2-G1), 10 (B2-A2-G1), 11 (B1-A2-G2) e 12 (B2-A2-G2) – todas as séries apresentaram modo de ruptura semelhante: fissuração vertical dos blocos, indicando expansão do graute. Tal modo de ruptura também foi observado por Izquierdo (2015) e Romagna (2000).

Segundo Drysdale *et. al* (2002) uma das formas de rupturas de prismas grauteados é quando o graute sofre grande expansão lateral associada à alta fissuração (característica de materiais frágeis), que induz o aparecimento de tensões de confinamento no graute e por conseqüência, a ruptura do prisma.

As Figuras 25 a 28 ilustram as rupturas, aos 28 dias, dos diferentes tipos de prismas grauteados. Nestas figuras é possível observar as similaridades das fissuras verticais nas seis séries de prismas grauteados utilizados na pesquisa.

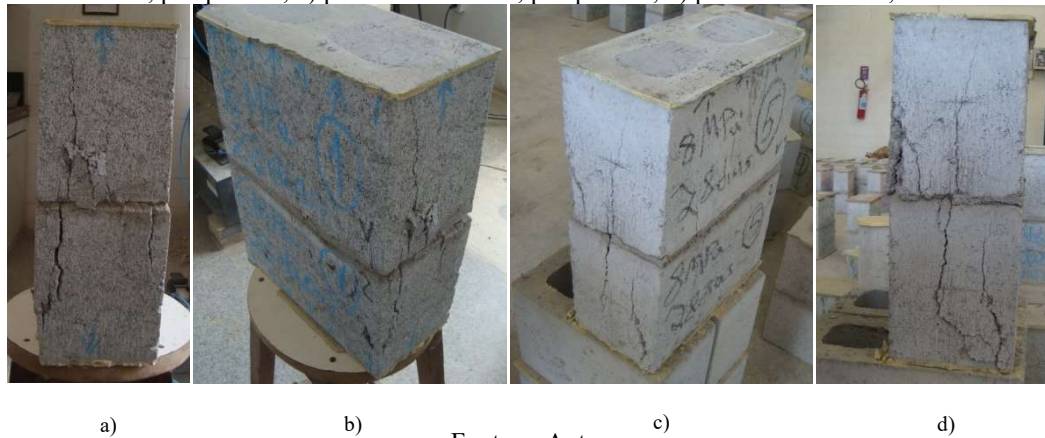
Nas idades de 7 dias e 14 dias, os prismas dessas séries apresentaram o mesmo comportamento quanto ao modo de ruptura.

Figura 25 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B3-A1-G1, vista lateral; b) prisma B3-A1-G1, perspectiva; c) prisma B2-A1-G1, perspectiva; d) prisma B2-A1-G1, vista lateral.



Fonte: o Autor.

Figura 26 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B3-A1-G2, vista lateral; b) prisma B3-A1-G2, perspectiva; c) prisma B2-A1-G2, perspectiva; d) prisma B2-A1-G2, vista lateral.



Fonte: o Autor.

Figura 27 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B1-A2-G1, vista lateral; b) prisma B1-A2-G1, perspectiva; c) prisma B2-A2-G1, perspectiva; d) prisma B2-A2-G1, vista lateral.

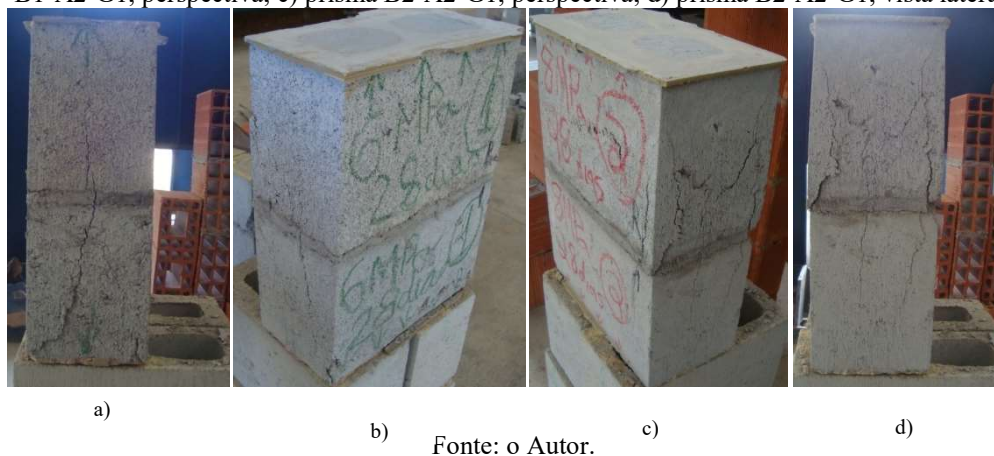
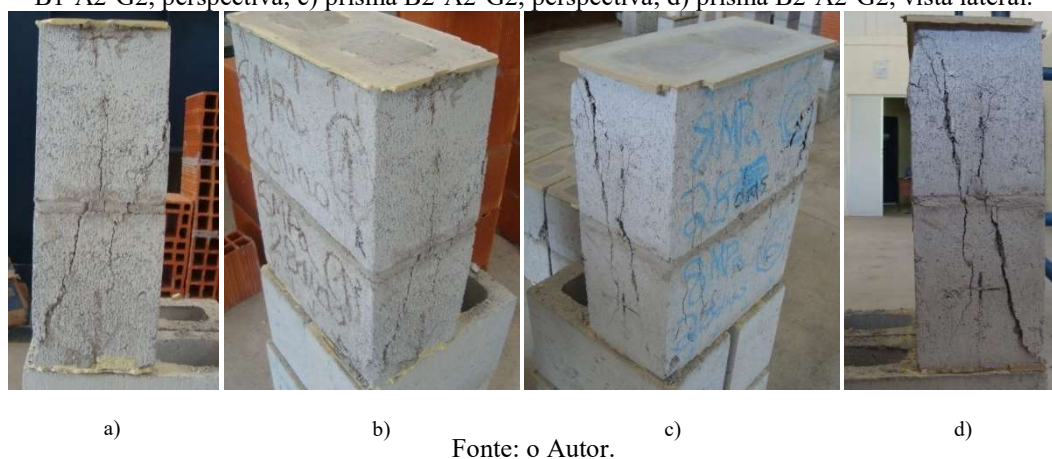


Figura 28 – Modos de ruptura de prismas grauteados aos 28 dias: a) prisma B1-A2-G2, vista lateral; b) prisma B1-A2-G2, perspectiva; c) prisma B2-A2-G2, perspectiva; d) prisma B2-A2-G2, vista lateral.



4.4.5 *Influência das dimensões nominais e efetivas dos prismas no resultado do ensaio de compressão axial*

A norma ABNT NBR 15961-2:2010 (ABNT, 2010) não detalha sobre o procedimento a ser adotado para o cálculo da área do prismas a ser utilizada no resultado do ensaio de compressão axial, isto é, não faz qualquer menção sobre a utilização das dimensões nominais para cálculo da área bruta, ou dimensões efetivas, ou ainda se tais medidas devem ser tiradas em ambos os blocos.

Desta forma, foram comparados os resultados do ensaio de compressão das 12 séries de prismas moldadas (204 prismas rompidos) considerando-se a área bruta calculada com as dimensões nominais dos blocos (largura de 140 mm e comprimento de 290 mm) e a área efetiva calculada com as dimensões efetivas.

No caso das dimensões efetivas de cada prisma, estas foram obtidas medindo-se duas vezes cada dimensão do bloco (largura e comprimento), tanto superior, quanto o inferior, totalizando 4 medidas de largura (2 para o bloco superior e 2 para o bloco inferior) e 4 medidas para o comprimento (2 para o bloco superior e 2 para o bloco inferior), ambas tomadas na face de maior espessura de paredes. As dimensões efetivas foram calculadas através da média das medidas, obtendo-se uma largura média e comprimento médio para cada um dos 206 prismas.

As Tabelas 31 e 32 mostram a diferença percentual entre as tensões de ruptura obtidas utilizando-se as dimensões efetivas e as tensões obtidas considerando-se as dimensões nominais, em relação às tensões obtidas considerando-se as dimensões efetivas. Nessas tabelas, as maiores diferenças percentuais estão destacadas em vermelho. Observando estas tabelas, nota-se não há diferenças significativas entre o resultado das tensões de ruptura utilizando-se as dimensões nominais ou efetivas. A maior diferença percentual ocorre para o primeiro prisma da série B3-A1-G1 rompido aos 28 dias, diferença de 2,152% o que representa ainda um valor pequeno, em se tratando de controle de obras.

Tabela 31 – Diferença percentual entre as tensões de ruptura obtidas utilizando-se as dimensões efetivas e as tensões obtidas considerando-se as dimensões nominais, em relação às tensões obtidas considerando-se as dimensões efetivas, para os prismas das séries 01 a 06.

Idade do prisma	Identificação do CP	Tipo de prisma					
		B3-A1	B3-A1-G1	B3-A1-G2	B2-A1	B2-A1-G1	B2-A1-G2
7 dias	01	0,619%	0,879%	1,537%	0,382%	1,477%	1,585%
	02	-0,035%	0,628%	1,352%	0,884%	1,413%	0,899%
	03	1,385%	1,115%	1,794%	0,723%	0,766%	1,022%
	04	0,852%	1,291%	1,349%	1,241%	1,481%	1,364%
	05		1,214%	1,384%	1,015%	1,066%	1,072%
	06		0,461%	1,629%		1,384%	1,678%
14 dias	01	1,032%	2,108%	1,303%	1,113%	1,722%	-0,273%
	02	0,975%	1,741%	0,407%	1,130%	1,516%	0,583%
	03	0,896%	1,892%	0,521%	0,949%	1,605%	0,933%
	04	1,172%	1,288%	1,233%	0,933%	1,535%	0,776%
	05		1,543%	1,006%	0,777%	1,385%	0,722%
	06		1,707%		1,064%	1,527%	0,652%
28 dias	01	0,498%	2,152%	1,311%	1,121%	1,746%	0,671%
	02	1,249%	1,740%	0,560%	1,133%	1,554%	0,387%
	03	1,256%	1,854%	0,573%	0,905%	1,660%	1,321%
	04	0,233%	1,798%	0,649%	0,894%	0,312%	0,557%
	05		1,655%	1,544%	0,302%	1,512%	0,419%
	06			0,316%	0,510%	1,724%	

Fonte: o Autor.

A medição das dimensões dos blocos de cada prisma é um trabalho extenuante e trabalhoso, e conforme os comparativos apresentados na Tabela 31 e 32, a utilização das dimensões nominais não provoca grandes diferenças no resultado do ensaio de compressão axial, contudo, a utilização destas gera facilita o trabalho experimental, uma vez que pode ser dispensada a etapa de medição dos blocos de cada prisma.

Tabela 32 – Diferença percentual entre as tensões de ruptura obtidas utilizando-se as dimensões efetivas e as tensões obtidas considerando-se as dimensões nominais, em relação às tensões obtidas considerando-se as dimensões efetivas, para os prismas das séries 07 a 12.

Idade do prisma	Identificação do CP	Tipo de prisma					
		B1-A2	B1-A2-G1	B1-A2-G2	B2-A2	B2-A2-G1	B2-A2-G2
7 dias	01	1,666%	1,531%	1,341%	1,158%	1,518%	0,660%
	02	1,069%	0,875%	1,254%	1,130%	0,950%	0,873%
	03	1,028%	0,779%	1,313%	0,937%	0,946%	0,717%
	04	0,664%	1,371%	0,896%	0,931%	0,196%	1,000%
	05	1,554%	0,783%	1,336%	0,783%	0,942%	1,124%
	06		1,399%	0,906%	1,070%	1,337%	0,361%
14 dias	01	0,978%	1,096%	1,229%	1,300%	1,102%	0,316%
	02	1,184%	1,208%	1,089%	1,800%	0,948%	0,720%
	03	0,944%	0,825%	1,085%	1,033%	0,519%	0,383%
	04	0,899%	0,881%	1,151%	1,295%	0,626%	1,113%
	05	1,172%	1,001%	1,087%	1,585%	1,254%	0,909%
	06		0,821%	0,713%	1,348%	1,165%	0,434%
28 dias	01	1,332%	1,452%	1,065%	1,107%	0,786%	0,697%
	02	1,306%	0,751%	0,922%	1,114%	0,585%	1,118%
	03	0,196%	1,658%	0,145%	0,934%	0,557%	0,820%
	04	1,248%	1,320%	1,059%	0,938%	0,598%	0,859%
	05	0,688%	1,160%	0,932%	0,298%	0,736%	0,810%
	06	0,547%	1,198%	1,387%	0,459%	1,280%	1,127%

Fonte: o Autor.

4.4.6 Comparativo dos resultados de módulos de elasticidade obtidos experimentalmente e calculado a partir de equações analíticas.

As Tabelas 33 a 35 mostram os resultados obtidos nos ensaios para o módulo de elasticidade, e os resultados obtidos pelo uso de equações propostas por normas brasileiras e por outros autores.

Como pode ser observado nessas tabelas, os resultados dos ensaios realizados foram diferentes dos propostos pelas equações.

No caso das argamassas (Tabela 33) acredita-se que tal diferença deve-se ao fato das equações propostas pelos respectivos autores levarem em conta o uso de argamassas não industrializadas, sendo, em geral, são mais deformáveis que as argamassas industrializadas. Entretanto, o valor do módulo de elasticidade da argamassa A1 condiz com o resultado obtido por Juste (2001) para argamassa industrializada com resistência à compressão média de 5,7 MPa, em seu trabalho, o autor obteve, experimentalmente, um valor de 8,879 GPa para o módulo de elasticidade dessa argamassa.

Já no caso dos grautes, os resultados experimentais ficaram abaixo daqueles calculados com uso de equações. Acredita-se que isto se deve ao uso de um alto fator água/cimento nos grautes utilizados na pesquisa (G1: a/c = 0,65 e G2: a/c = 0,70), aumentando, assim, a sua deformabilidade. Entretanto, os valores obtidos neste trabalho são compatíveis com os resultados encontrados por Romagna (2000), cujo módulo de deformação para os grautes utilizados na pesquisa deste autor variam de 6,805 GPa a 26,843 GPa.

Para os prismas, a equação a forneceu maior quantidade de resultados próximos aos obtidos experimentalmente foi a fórmula proposta pelo EUROCODE 6, descrevendo de forma razoável o módulo de deformação da série B1-A2. Ainda assim, são resultados pouco expressivos diante da quantidade de séries de prismas. Contudo,

Na Tabela 35, os valores obtidos através de equações mais próximos dos resultados experimentais estão destacados em vermelho. Os valores de módulo de deformação dos prismas, obtidos experimentalmente, estão de acordo com os resultados encontrados por Romagna (2000), cujos módulos de prismas variam de 5,857 GPa a 32,678 GPa. Também são compatíveis com os resultados encontrados por Steil (2003), cujo módulo de deformação para os prismas utilizados na pesquisa deste autor variam de 9,439 GPa a 26,968 GPa.

Tabela 33 – Comparativo dos Módulos de elasticidade das argamassas obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores.

Idade (dias)	Argamassa A1 (GPa)			Argamassa A2 (GPa)		
	Ensaio	Mohamad (1998) $E_m = -18,9f_m^2 + 939,4f_m$	Barbosa (2008) $E_m = 2191f_m^{0,66}$	Ensaio	Mohamad (1998) $E_m = -18,9f_m^2 + 939,4f_m$	Barbosa (2008) $E_m = 2191f_m^{0,66}$
7	7,795	3,694	5,742	8,845	5,529	7,781
14	7,920	4,117	6,219	9,950	6,020	8,324
28	8,467	4,687	6,851	14,103	7,087	9,529

Fonte: o Autor.

Tabela 34 – Comparativo dos Módulos de elasticidade dos grautes obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores.

Idade (dias)	Graute G1 (GPa)			Graute G2 (GPa)		
	Ensaio	NBR 6118 (ABNT, 2014)	Barbosa (2008)	Ensaio	NBR 6118 (ABNT, 2014)	Barbosa (2008)
		$E_m = 5600f_c^{0,5}$	$E_m = 5600f_c^{0,45}$		$E_m = 5600f_c^{0,5}$	$E_m = 5600f_c^{0,45}$
7	15,59	22,933	19,918	16,521	21,779	19,013
14	17,14	25,676	22,049	16,850	23,776	20,575
28	18,81	27,097	23,145	18,647	25,653	22,032

Fonte: o Autor.

Tabela 35 – Comparativo dos Módulos de elasticidade dos prismas obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores.

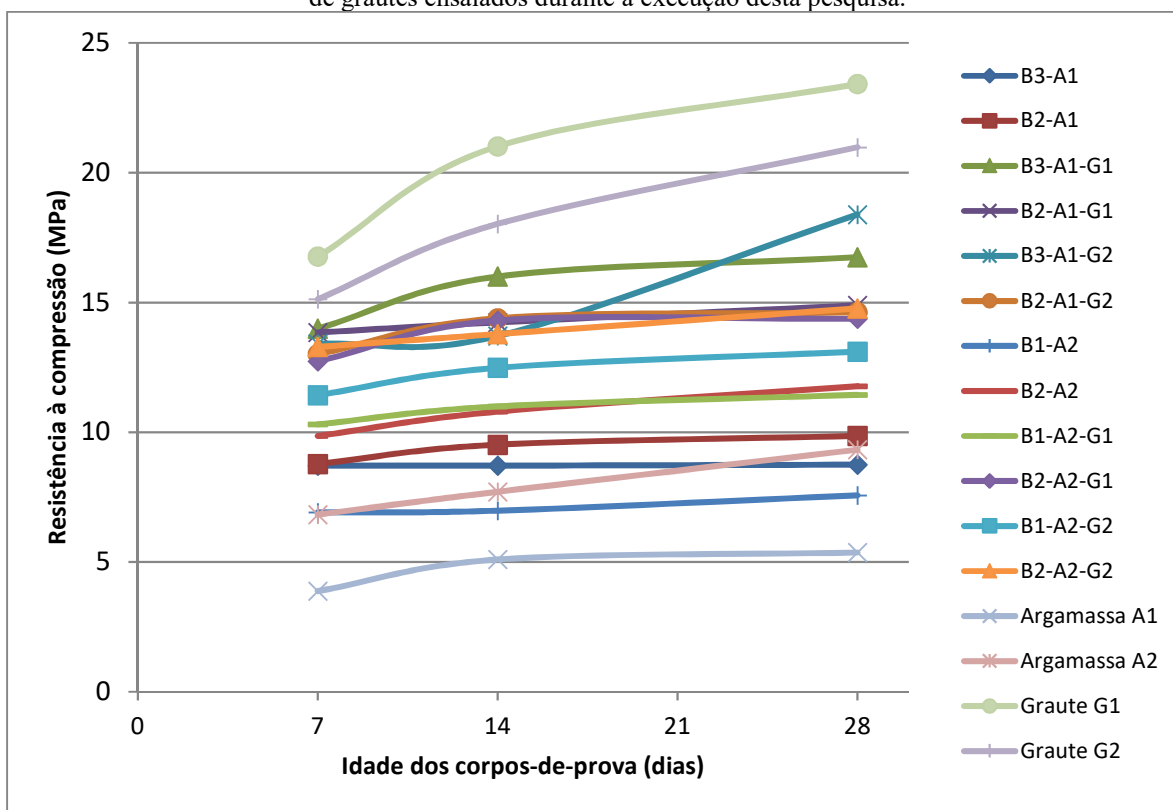
Nº da série	Idade	Id. do prisma	Módulo de deformação (GPa)				
			Ensaio	NBR 15961-1 (ABNT, 2010)	El-Nawawy & El-Haddad (1990)	Hendry (1987 <i>apud</i> Mohamad, 1998)	EUROCODE 6
				$E_m = 800f_{pk}$	$E_m = 750f_k$	$E_m = 1180f_k^{0,83}$	$E_m = 1000f_k$
1	7 dias	B3-A1	8,087	6,974	6,539	6,689	8,718
2		B2-A1	6,590	7,026	6,587	5,644	8,782
3		B3-A1-G1	8,523	11,197	10,497	6,987	13,996
4		B2-A1-G1	14,347	11,076	10,384	10,764	13,845
5		B3-A1-G2	16,397	10,730	10,060	12,026	13,413
6		B2-A1-G2	18,980	10,408	9,758	13,579	13,010
7		B1-A2	7,220	5,532	5,186	6,088	6,915
8		B2-A2	11,510	7,887	7,394	8,966	9,859
9		B1-A2-G1	13,167	8,246	7,730	10,024	10,307
10		B2-A2-G1	21,827	10,191	9,554	15,249	12,739
11		B1-A2-G2	20,903	9,148	8,576	14,711	11,435
12		B2-A2-G2	24,193	10,631	9,967	16,609	13,289
1	14 dias	B3-A1	12,190	6,974	6,538	9,403	8,717
2		B2-A1	7,623	7,619	7,143	6,369	9,524
3		B3-A1-G1	19,703	12,802	12,002	14,007	16,003
4		B2-A1-G1	20,615	11,390	10,678	14,543	14,237
5		B3-A1-G2	18,282	10,970	10,284	13,163	13,712
6		B2-A1-G2	20,740	11,515	10,796	14,616	14,394
7		B1-A2	7,390	5,586	5,237	6,207	6,982
8		B2-A2	11,895	8,638	8,099	9,214	10,798
9		B1-A2-G1	13,980	8,798	8,249	10,535	10,998
10		B2-A2-G1	24,833	11,446	10,731	16,973	14,308
11		B1-A2-G2	15,620	9,989	9,365	11,551	12,486
12		B2-A2-G2	25,977	11,030	10,340	17,619	13,787
1	28 dias	B3-A1	14,250	7,002	6,565	10,704	8,753
2		B2-A1	7,653	7,890	7,397	6,389	9,862
3		B3-A1-G1	12,785	13,398	12,560	9,782	16,747
4		B2-A1-G1	24,313	11,915	11,171	16,677	14,894
5		B3-A1-G2	19,407	14,714	13,795	13,832	18,393
6		B2-A1-G2	20,720	11,698	10,967	14,604	14,622
7		B1-A2	7,433	6,057	5,678	6,237	7,571
8		B2-A2	12,743	9,424	8,835	9,756	11,780
9		B1-A2-G1	13,975	9,154	8,582	10,532	11,443
10		B2-A2-G1	19,970	11,499	10,781	14,164	14,374
11		B1-A2-G2	16,470	10,490	9,834	12,071	13,112
12		B2-A2-G2	21,280	11,821	11,082	14,931	14,776

Fonte: o Autor.

4.5 Avaliação da resistência à compressão ao longo do tempo

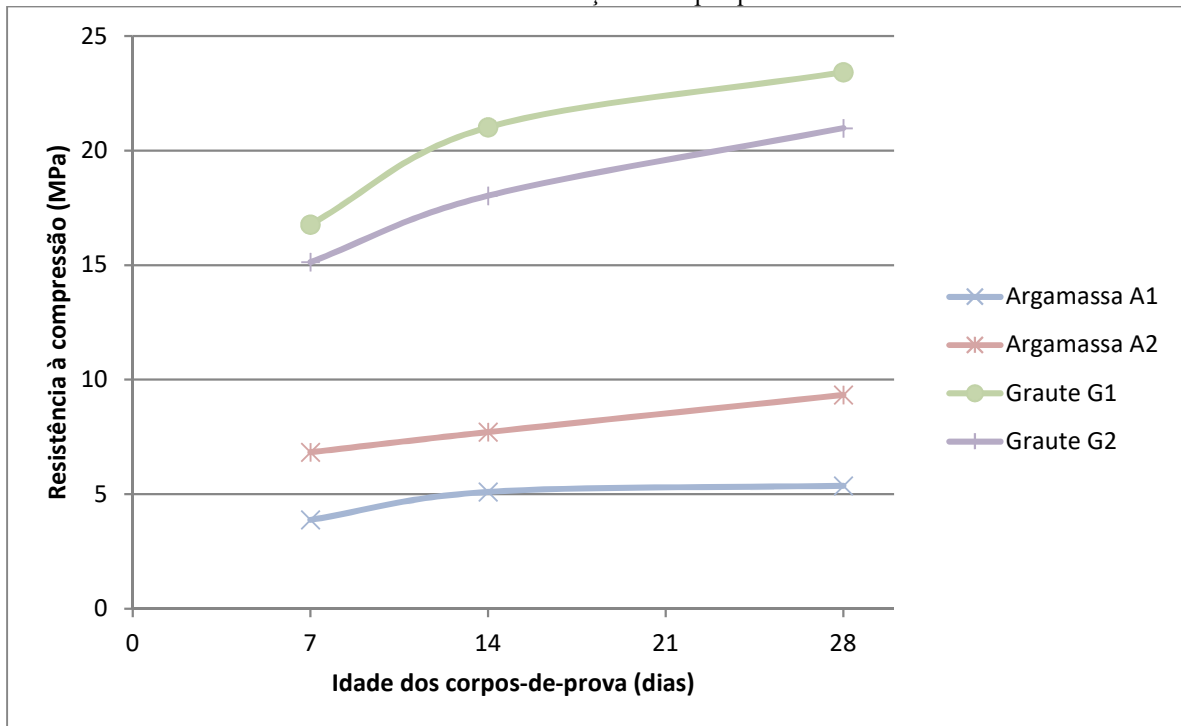
A Figura 29 ilustra os resultados da resistência à compressão dos diferentes tipos de prismas ensaiados, bem como das argamassas e grautes utilizados na sua confecção. Na Figura 30 é possível observar melhor a evolução da resistência à compressão dos grautes e argamassas utilizados nesta pesquisa. Observando tal figura, percebe-se esses componentes possuem ganho resistência ao longo do tempo, entretanto, aos 14 dias nota-se um ponto de inflexão nas curvas (exceto para a argamassa A2), representando uma diminuição no ganho de resistência e assim, aproximando os valores de resistência obtidos aos 14 e 28 dias.

Figura 29 – Evolução da resistência à compressão para as 12 séries de prismas, 2 tipos de argamassas e 2 tipos de grautes ensaiados durante a execução desta pesquisa.



Fonte: o Autor.

Figura 30 – Evolução da resistência à compressão para os 2 tipos de argamassas e 2 tipos de grautes ensaiados durante a execução desta pesquisa.



Fonte: o Autor.

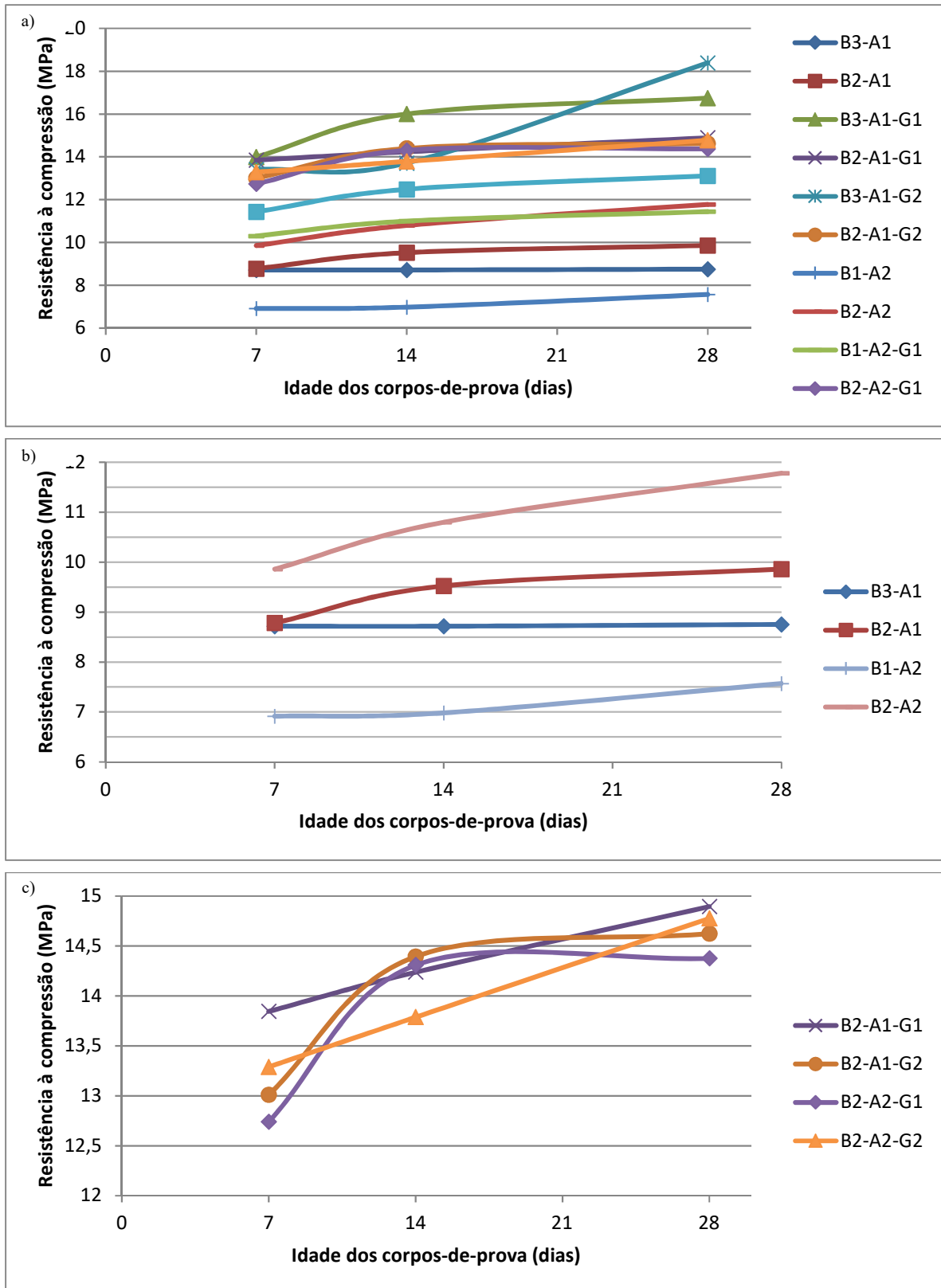
A Figura 31 ilustra com mais detalhes os resultados da resistência à compressão dos diferentes tipos de prismas ensaiados. Observa-se na Figura 31a a curvas de evolução da resistência à compressão dos prismas seguem, em sua maioria, a mesma tendência das curvas observadas na Figura 30: ponto de inflexão na curva, aproximando os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 14 e 28 dias.

Nos prismas não grauteados, apenas a série B1-A2 possuem um comportamento diferente (Figura 31b), no qual o ponto de inflexão elevada o ganho de resistência ao longo do tempo. O mesmo ocorre para a série B3-A1-G2 (Figura 31a). Não há razão aparente para estes resultados.

Ainda em relação aos prismas grauteados, as séries B2-A1-G2 e B2-A2-G2 possuem um gráfico retilíneo (Figura 31c), sem ponto de inflexão. Também não há razão aparente para estes resultados.

Provável que a execução de ensaios de resistência à compressão aos 21 dias fornecessem resultados capazes de explicar melhor o comportamento destas 4 séries de prismas.

Figura 31 – Evolução da resistência à compressão para as 12 séries de prismas ensaiados durante a execução desta pesquisa: a) todas as 12 séries; b) séries não grauteadas; c) detalhamento das séries B2-A1-G2 e B2-A2-G2.

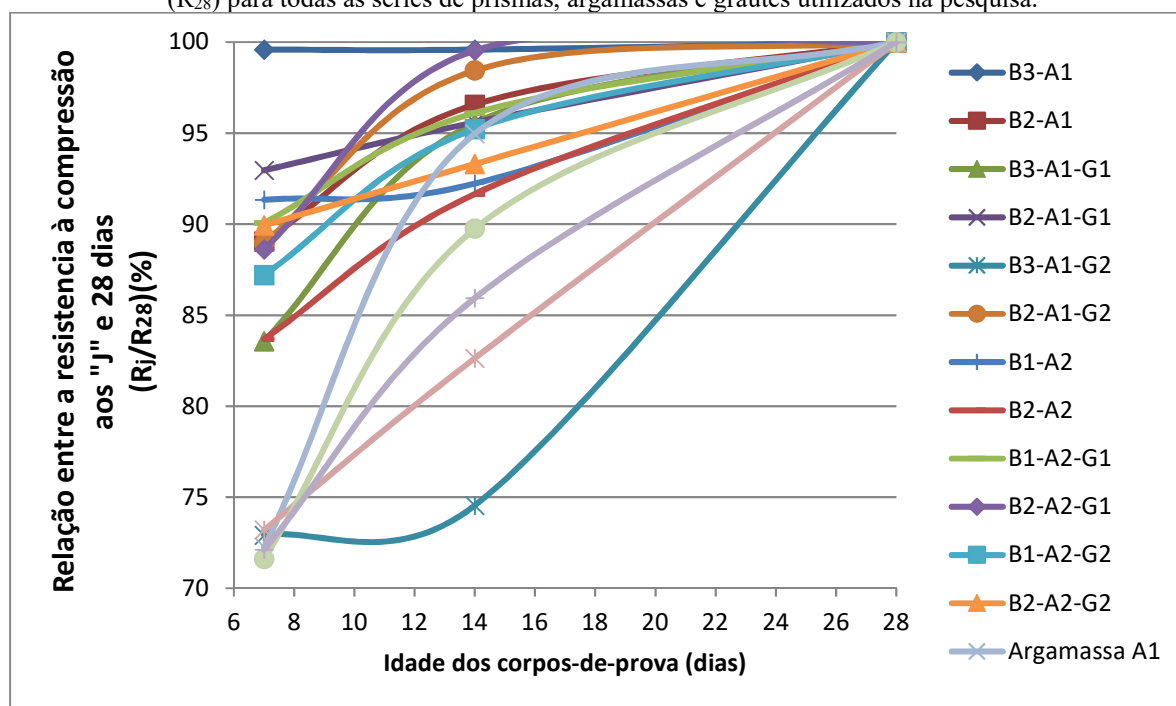


Fonte: o Autor.

Podemos observar na Figura 32 um gráfico que mostra a relação R_j/R_{28} entre a resistência à compressão numa idade “j” (R_j) e a resistência à compressão aos 28 dias (R_{28}) para todas as séries de prismas, argamassas e grautes utilizados na pesquisa. Para melhor avaliação deste quociente a Figura 32 foi reproduzida separando-se as curvas dos componentes (Figura 33a) das curvas dos prismas (Figura 33b).

Analisando a Figura 33a, nota-se que a relação R_j/R_{28} aos 7 dias é bem semelhante tanto para argamassas quanto para grautes; observa-se também que há um distanciamento das curvas aos 14 dias, sendo que a Argamassa A1 e o Graute G1 são os que possuem maior coeficiente R_j/R_{28} .

Figura 32 – R_j/R_{28} entre a resistência à compressão numa idade “j” (R_j) e a resistência à compressão aos 28 dias (R_{28}) para todas as séries de prismas, argamassas e grautes utilizados na pesquisa.

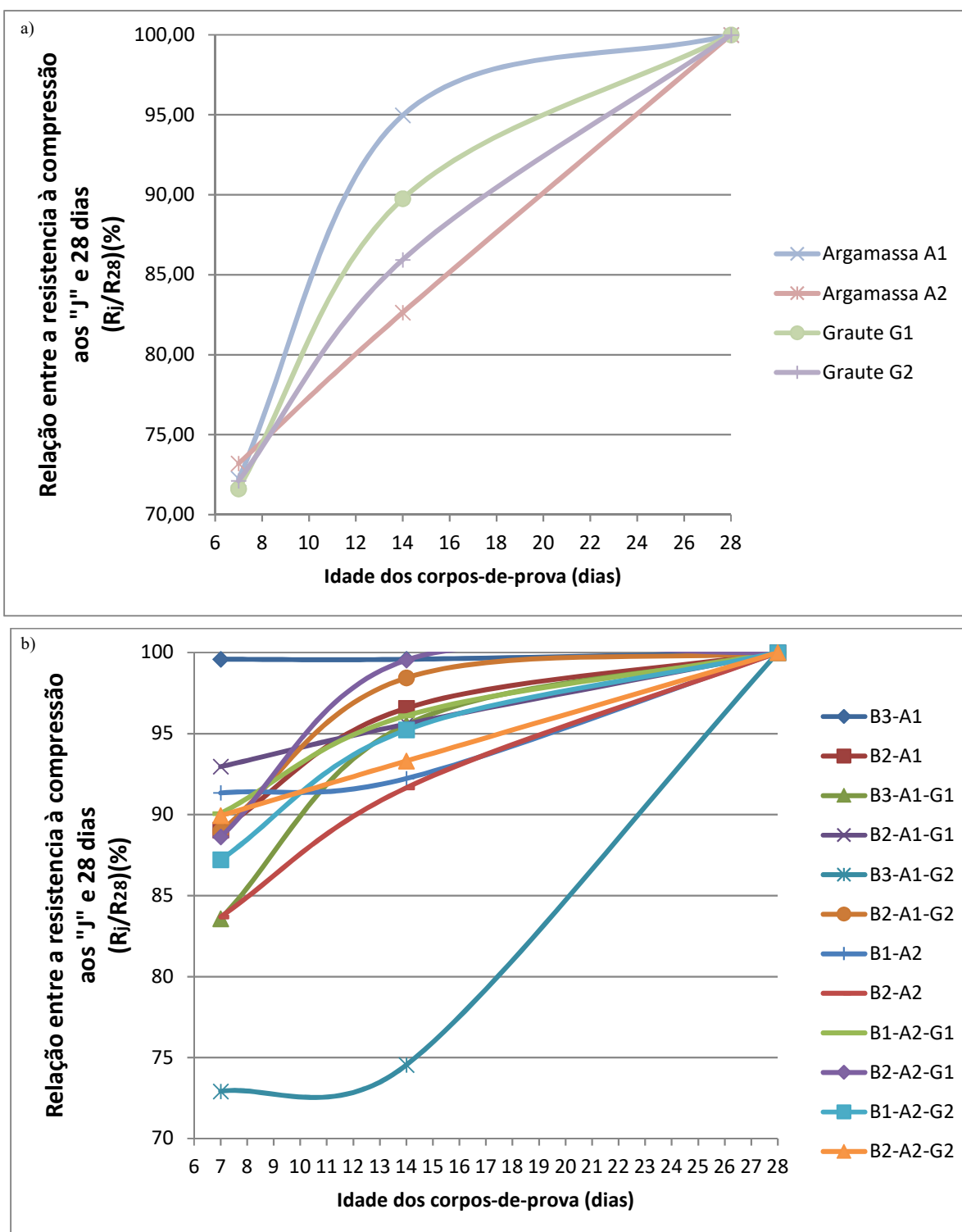


Fonte: o Autor.

Analisando a Figura 33b, percebe-se que o quociente R_j/R_{28} para a quase totalidade da série de prismas está acima dos 90% aos 14 dias, indicando uma proximidade entre os valores de resistência à compressão aos 14 e 28 dias. Nota-se também que, no geral, as séries moldadas com a Argamassa A1, possuem, aos 14 dias, maior relação R_j/R_{28} quando se compara com as séries moldadas com a Argamassa A2. O mesmo ocorre para quando se compara as séries moldadas com diferentes tipos de Grautes: no geral, as séries moldadas com o Graute G1, possuem, aos 14 dias, maior relação R_j/R_{28} em relação às series moldadas com o Graute G2.

Com isso, há uma forte indicação de que quanto maior for a relação R_j/R_{28} dos componentes, maior será a relação R_j/R_{28} dos prismas. Contudo, faz-se necessários mais estudos para obter um resultado mais conclusivo.

Figura 33 – R_j/R_{28} entre a resistência à compressão numa idade “j” (R_j) e a resistência à compressão aos 28 dias (R_{28}) para: a) argamassas e grautes; b) todas as séries de prismas.



Fonte: o Autor.

4.6 Modelo Matemático

Utilizando o *software Statistica 7.0* foi possível obter um conjunto de equações para prever a resistência à compressão do prisma em função da resistência à compressão do bloco, da argamassa e do graute (no caso de prismas grauteados).

Por limitações técnicas do *software* usado nesta pesquisa, não foi possível encontrar uma equação que modelasse o tempo como uma variável independente. Uma forma de contornar esse problema foi gerando equações para prever a resistência à compressão em idades distintas, a saber: 7 dias, 14 dias e 28 dias.

Dessa maneira o modelo matemático proposto inclui três variáveis independentes (fatores): resistência do bloco (três níveis de variação – B1, B2 e B3), resistência da argamassa (dois níveis de variação – A1 e A2) e resistência do graute (três níveis de variação – sem graute, G1 e G2).

As expressões obtidas através do software são evidenciadas pelas equações (27), (28) e (29) capazes de estimar a resistência à compressão de prismas nas idades de 7 dias ($R^2=0,9748$), 14 dias ($R^2=0,9435$) e 28 dias ($R^2=0,9354$), respectivamente.

$$\begin{aligned} f_{pk,med(7)} = & -4,158 + 1,429f_{bk,med(28)} - 0,043f_{bk,med(28)}^2 + 0,554f_{gk,med(28)} - \\ & 0,007f_{gk,med(28)}^2 + 0,285f_{ak,med(28)} - 0,018f_{ak,med(28)}f_{gk,med(28)} - \\ & 0,006f_{bk,med(28)}f_{gk,med(28)} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} f_{pk,med(14)} = & -8,473 + 1,986f_{bk,med(28)} - 0,063f_{bk,med(28)}^2 + 0,861f_{gk,med(28)} - \\ & 0,015f_{gk,med(28)}^2 + 0,423f_{ak,med(28)} - 0,024f_{ak,med(28)}f_{gk,med(28)} - \\ & 0,011f_{bk,med(28)}f_{gk,med(28)} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} f_{pk,med(28)} = & 7,143 - 1,695f_{bk,med(28)} + 0,112f_{bk,med(28)}^2 + 0,543f_{gk,med(28)} + \\ & 0,005f_{gk,med(28)}^2 + 0,756f_{ak,med(28)} - 0,042f_{ak,med(28)}f_{gk,med(28)} - \\ & 0,009f_{bk,med(28)}f_{gk,med(28)} \end{aligned} \quad (29)$$

Sendo,

$f_{bk,med(28)}, f_{gk,med(28)}, f_{ak,med(28)}$ = valores de resistência média à compressão aos 28 dias do bloco, graute e argamassa, respectivamente;

$f_{pk,med(i)}$ = resistência média estimada do prisma na idade de “i” dias.

A Tabela 36 mostra os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos prismas e os resultados obtidos pelo uso de equações modeladas neste trabalho e outras propostas por alguns autores.

Analisando os valores na Tabela 36, pode-se observar que, para os prismas grauteados, as equações propostas por outros autores superestimam a resistência à compressão dos prismas nas idades iniciais (7 dias e 14 dias), com exceção de Mohamad (1998), cujas equações superestimam essa resistência.

Em se tratando dos resultados aos 28 dias, percebe-se que as equações obtidas por Khalaf (1991) e Jaber (2010) fornecerem resultados compatíveis com os dados experimentais. Há uma distorção relativamente grande no caso dos prismas não grauteados.

Percebe-se que os modelos propostos são capazes de estimar a resistência à compressão de prismas grauteados e não-grauteados com certa precisão, inclusive nas idades iniciais (7 dias e 14 dias), sendo uma grande vantagem em relação aos demais modelos pesquisados.

Tabela 36 – Comparativo dos Módulos de elasticidade dos prismas obtidos experimentalmente e calculados através de equações propostas por outros autores.

Idade	Id. do prisma	Resistência à compressão dos prismas (MPa)						
		Ensaio	Modelo da Pesquisa	Khalaf (1991)	Khalaf <i>et. al</i> (1994)	Mohamad (1998)	Jaber (2010)	
7 dias	B3-A1	8,718	9,034	4,857	5,394	7,737*	12,500	
	B2-A1	8,782	8,752	4,506	5,043	7,515*	11,992	
	B3-A1-G1	13,996	13,881	16,567		20,033	15,076	
	B2-A1-G1	13,845	13,764	16,216		19,350	14,567	
	B3-A1-G2	13,413	13,735	15,347		20,033	14,992	
	B2-A1-G2	13,01	13,600	14,996		19,350	14,484	
	B1-A2	6,915	6,924	3,231	4,164	21,632	15,940	
	B2-A2	9,859	9,880	4,902	5,835	23,923	20,835	
	B1-A2-G1	10,307	11,050	14,941		21,623	18,516	
	B2-A2-G1	12,739	13,223	16,612		23,923	23,410	
	B1-A2-G2	11,435	10,978	13,721		21,623	18,432	
	B2-A2-G2	13,289	13,233	15,392		23,923	23,327	
	14 dias	B3-A1	8,717	9,333	4,857	5,394	7,737*	12,500
		B2-A1	9,524	9,046	4,506	5,043	7,515*	11,992
B3-A1-G1		16,003	14,542	16,567		20,033	15,076	
B2-A1-G1		14,237	14,557	16,216		19,350	14,567	
B3-A1-G2		13,712	14,767	15,347		20,033	14,992	
B2-A1-G2		14,394	14,750	14,996		19,350	14,484	
B1-A2		6,982	6,990	3,231	4,164	21,632	15,940	
B2-A2		10,798	10,721	4,902	5,835	23,923	20,835	
B1-A2-G1		10,998	11,709	14,941		21,623	18,516	
B2-A2-G1		14,308	14,006	16,612		23,923	23,410	

	B1-A2-G2	12,486	11,986	13,721		21,623	18,432
	B2-A2-G2	13,787	14,432	15,392		23,923	23,327
	B3-A1	8,753	10,019	4,857	5,394	7,737*	12,500
	B2-A1	9,862	8,382	4,506	5,043	7,515*	11,992
	B3-A1-G1	16,747	17,161	16,567		20,033	15,076
	B2-A1-G1	14,894	15,770	16,216		19,350	14,567
	B3-A1-G2	18,393	16,161	15,347		20,033	14,992
	B2-A1-G2	14,622	14,745	14,996		19,350	14,484
28 dias	B1-A2	7,571	7,784	3,231	4,164	21,632	15,940
	B2-A2	11,78	11,375	4,902	5,835	23,923	20,835
	B1-A2-G1	11,443	12,452	14,941		21,623	18,516
	B2-A2-G1	14,374	14,869	16,612		23,923	23,410
	B1-A2-G2	13,112	11,710	13,721		21,623	18,432
	B2-A2-G2	14,776	14,249	15,392		23,923	23,327

* A estimativa da resistência à foi calculada utilizando a equação (20), para os demais casos foram utilizadas, conjuntamente, as equações (21) e (22).

Fonte: o Autor.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho consistiu em estudar a influência dos componentes, comumente utilizados em obras de alvenaria estrutural na Região Metropolitana de Fortaleza, na resistência à compressão de prismas de blocos estruturais de concreto grauteados e não grauteados, com a verificação da resistência à compressão, módulo de elasticidade e modo de ruptura dos prismas e a resistência à compressão, módulo de elasticidade dos blocos, argamassas e grautes.

Foram moldados 12 tipos de prismas, utilizando três diferentes resistências de blocos, dois tipos de argamassa industrializada e dois tipos de grautes, sempre utilizando argamassamento total.

Os principais resultados foram:

A resistência à compressão dos prismas aos 14 dias é bem próxima da resistência aos 28 dias, superior a 80% da resistência aos 28 dias, na grande maioria dos casos analisados.

Com relação a influência dos componentes na resistência final dos prismas observou-se que, o aumento de resistência dos blocos, provoca, na grande maioria dos casos analisados, aumento da resistência dos prismas (seja eles grauteados ou não). Já com relação a influência da argamassa e do graute, foi observado que algumas séries de primas tiveram suas resistência diminuída ao se aumentar a resistência desses componentes, indicando que deve haver uma compatibilização entre as propriedades mecânicas do bloco, argamassa e graute, visto que, de acordo com os resultados desta pesquisa, elevar a resistência dos componentes não necessariamente ocasionará uma elevação da resistência do prisma.

Uma importante observação e sobre a influência dos componentes na resistência final do prisma é o fato dos dados deste trabalho mostrarem que essa influência pode ser analisada aos sete dias, de modo que, se, aos 7 dias, um aumento de resistência no bloco provoca aumento de resistência no prisma, esse mesmo efeito será observado aos 28 dias; da mesma forma, se, aos 7 dias, um aumento de resistência no graute provoca diminuição da resistência no prisma, esse mesmo efeito será observado aos 28 dias.

Os resultados deste trabalho também mostraram que diferentes combinações de componentes podem ocasionar modos de ruptura distintos, uma vez que alguns prismas romperam por esmagamento da argamassa (notadamente os prismas da série B3-A1 e B2-A1, os quais possuíam resistência de argamassa bem inferior à resistência do bloco), por tração no

bloco ocasionada por expansão da junta de argamassa (notadamente os prismas da série B1-A2 e B2-A2, os quais possuíam resistência de argamassa mais próxima resistência do bloco) e por tração no bloco ocasionada por expansão do graute (em todas as séries de prismas grauteados). Também foi observado que modo de ruptura foi o mesmo, independente da idade do prisma.

Neste trabalho também foi possível concluir que as medidas efetivas dos blocos pouco interferem nos resultados de resistência à compressão dos prismas em relação as medidas nominais dos mesmos, assim é, de certo modo, dispensável o procedimento de medir todos as dimensões de todos os prismas a serem ensaiados à compressão.

Observou-se que as curvas de evolução de resistência à compressão para prismas possuem, em sua maioria, pontos de inflexão aos 14 dias, indicando que após essa idade há diminuição no ganho de resistência, conseqüentemente, há indícios de que o controle de obras poderá ser realizados aferindo-se a resistência à compressão aos 14 dias. Contudo, outros estudos conclusivos sobre essa questão deverão confirmar a afirmação anterior.

Concluiu-se também que há uma forte indicação de que quanto maior for a relação R_j/R_{28} dos componentes, maior será a relação R_j/R_{28} dos prismas. Contudo, faz-se necessários mais estudos para obter um resultado mais conclusivo.

Por fim, o presente trabalho foi capaz de fornecer três expressões para a estimativa de resistência à compressão de prismas, em diferentes idades, grauteados ou não, a partir das resistência à compressão das unidades, conforme evidenciam as fórmulas abaixo, para cálculo da resistência à compressão de prismas nas idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 f_{pk,med(7)} = & -4,158 + 1,429f_{bk,med(28)} - 0,043f_{bk,med(28)}^2 + 0,554f_{gk,med(28)} - \\
 & 0,007f_{gk,med(28)}^2 + 0,285f_{ak,med(28)} - 0,018f_{ak,med(28)}f_{gk,med(28)} - \\
 & 0,006f_{bk,med(28)}f_{gk,med(28)}
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 f_{pk,med(14)} = & -8,473 + 1,986f_{bk,med(28)} - 0,063f_{bk,med(28)}^2 + 0,861f_{gk,med(28)} - \\
 & 0,015f_{gk,med(28)}^2 + 0,423f_{ak,med(28)} - 0,024f_{ak,med(28)}f_{gk,med(28)} - \\
 & 0,011f_{bk,med(28)}f_{gk,med(28)}
 \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
f_{pk,med(28)} = & 7,143 - 1,695f_{bk,med(28)} + 0,112f_{bk,med(28)}^2 + 0,543f_{gk,med(28)} + \\
& 0,005f_{gk,med(28)}^2 + 0,756f_{ak,med(28)} - 0,042f_{ak,med(28)}f_{gk,med(28)} - \\
& 0,009f_{bk,med(28)}f_{gk,med(28)}
\end{aligned} \tag{32}$$

Cabe ressaltar que as equações supracitadas estimaram com erro mínimo todos os resultados dos ensaios experimentais, quando comparadas a equações propostas por outros autores. Entretanto, mais estudos são necessários para avaliar a validade das equações propostas para componentes diversos dos estudados.

Algumas outras sugestões de trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- Modelar o módulo de elasticidade de prismas de blocos de concreto em diferentes idades;
- Modelar uma única equação matemática para estimar a resistência à compressão de blocos de concreto em diferentes idades;
- Investigar a influência da resistência à tração da argamassa na resistência à compressão de prismas de blocos concreto;
- Investigar a influência das propriedades elásticas dos componentes (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) na resistência à compressão de prismas de blocos de concreto;
- Avaliar a evolução da resistência à compressão de dos prismas e seus componentes em mais idades (3, 7, 14, 21 e 28 dias, por exemplo);
- Avaliar a relação R_j/R_{28} para outras combinações de argamassas e grautes.

REFERÊNCIAS

ALY, V. L. C. **Determinação da capacidade resistente do elemento parede de alvenaria armada de blocos de concreto, submetidos a esforços de compressão.** 1992. 300f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE; AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS; THE MASONRY SOCIETY. **Building Code Requirements for Masonry Structures.** ACI 530/ASCE 5/TMS 402, Detroit, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **CEB-FIP Model Code 1990: design code.** Philadelphia, 1993.

_____. **Standard specification for hollow load-bearing concrete masonry units.** ASTM C90-15. Philadelphia, 2015.

_____. **Standard test method for splitting tensile strength of masonry units.** ASTM C1006-07. Philadelphia, 2013.

_____. **Standard test method for sampling and testing grout.** ASTM C 1019-16. Philadelphia, 2016.

ARAÚJO, F. E. **Técnicas construtivas de edifícios residenciais em alvenaria estrutural não armada de blocos vazados de concreto.** 2001. 207p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.** NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – Requisitos.** NBR 6136. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **Parede de alvenaria estrutural – Ensaio à compressão simples.** NBR 8949. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.** NBR 13277. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de Ensaio.** NBR 12118. Rio de Janeiro, 2007.

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

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

_____. **Alvenaria Estrutural – Blocos cerâmicos Parte 1: Projeto**. NBR 15812-1. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Alvenaria Estrutural – Blocos de concreto Parte 1: Projeto**. NBR 15961-1. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Alvenaria Estrutural – Blocos de concreto Parte 2: Execução e controle de obras**. NBR 15961-1. Rio de Janeiro, 2010.

BARBOSA, C. S. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes**. 2008. 262f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos na Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acesso em: 12 fev. 2016.

BRASIL precisa de R\$ 76 bi ao ano para zerar o déficit habitacional. **Valor Econômico**, São Paulo, 13 out. 2014. Disponível em: <http://www.valor.com.br/brasil/3733244/fgv-brasil-precisa-de-r-76-bi-ao-ano-para-zerar-deficit-habitacional>. Acesso em: 23 jan. 2016.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Specification for precast concrete masonry units**. BS 6073-2. London, 2008

CALÇADA, L. M. L. **Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de bloco de concreto**. 1998. 187f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

CAMACHO, J. S. **Alvenaria estrutural não armada – parâmetros básicos a serem considerados no projeto dos elementos resistentes**. 1986, 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

CARDOSO, G. R. F. **Influência das resistências dos componentes de paredes solo-cimento na sua resistência à compressão**. 2007. 163f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

CHEEMA, T. S.; KLINGNER, R. E. Compressive strength of concrete masonry prisms. **American Concrete Institute Journal**. Farmington Hills, p.88-97, jan./feb. 1986.

DRYSDALE, R. G.; HAMID, A. A.; BAKER, L. R. **Masonry Structures – Behavior and Design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2002. 2. Ed.

EL-NAWAWY, O.A., EL-HADDAD, M.H., **Prediction of strength and fracture behavior of concrete masonry wall units**. Proceedings Fith North American Masonry Conference. Volume II, June 1990.

EUROCODE 6. 1996-1-1: **Rules for reinforced and unreinforced masonry**. Madrid, Espanha, 1996.

FORTES, E. S. **Influência do capeamento e caracterização da resistência à compressão de alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2012. 303f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

FRASSON JÚNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo construtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Florianópolis, 2000. 146p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit Habitacional no Brasil 2011-2012**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<http://www.fjp.mg.gov.br>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

GALLEGOS, H. **Albñileria Estructural**. Pontificia Universidad Católica do Peru. Fondo Editorial. Lima 1991.

HENDRY, A. W. **Introduction to Load Bearing Brickwork Design**. New York: Ellis Horwood, 1981.

HILSDORF, H. K. **Investigation into Failure Mechanism of Brick Masonry Loaded in Axial Compression**. Texas: Gulf Publishing Company, 1969.

HOOKER, K. A. Mortar, brick, and IRA. **Magazine of Masonry Construction**. V. 7, n. 6, p. 249–251. 1994

JUSTE, A. E. **Estudo da Resistência e da Deformabilidade de Paredes Comprimidas de Alvenaria de Blocos de Concreto**. 2001. 255f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

KAAKI, T. **Behavior and strength of masonry prisms loaded in compression**. 2013. 112f. Dissertação (Mestrado) – Dalhousie University, Halifax, 2013.

KHALAF, F. M.; HENDRY, A. W.; FAIRBRAIN, D. R. **Mechanical properties of material used in concrete blockwork construction**. Magazine of Concrete Research. Edinburgh, 1994.

KHALIFA, M. A.; MAGZOUN, A. E. Compressive strength of masonry prisms. In: STRUCTURES CONGRESS, XII, 1994, Nova York. **Proceedings...** Nova York: ASCE, 1994. p. 1100-1105.

IZQUIERDO, O. S. **Estudo da interface bloco/graute em elementos de alvenaria estrutural**. 2015. 324f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

LA ROVERE, H. L.; RODRIGUES, R. de M. Análise do comportamento mecânico de prismas de alvenaria de blocos de concreto por M.E.F. In: JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, XXVIII, 1997, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 1997. p.179-188.

LOGULLO, B. G. **Influência do graute e da taxa de armadura no comportamento da alvenaria de blocos de concreto.** 2006. 197f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

MATA, R. C. **Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini-paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto.** 2006. 180f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. Alvenaria Estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. **Boletim Técnico** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 20 p. 1993.

MENDES, J. R. K. **Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais.** 1998. 185f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MENDIZABAL, J. M. S. **Compressive strength of concrete masonry prisms made with mortar type S and variable grout mixes.** 2011. 70f. Dissertação (Mestrado) – Brigham Young University, Provo, 2011.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto.** 1998. 200f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G. **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão.** 2007. 310f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2007.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments.** New York: Jonh Wiley and Sons, 2001.

OLIVEIRA, R. A. **Análise da resistência de prismas de blocos de concreto fabricados no Estado de Goiás submetidos à compressão simples.** 2000, 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2000.

PARSEKIAN, G. A.; FRANCO, L. S. Time-Dependent Strength and Creep in Masonry. **The Masonry Society Journal.** V. 2, n. 6, p. 83–94. 2006

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural.** São Carlos: EdUFSCar, 2012. v. 1. 625p.

PARSEKIAN, G. A.; SOARES M. M. **Alvenaria estrutural em blocos cerâmicos: Projeto, execução e controle.** São Paulo: Nome da Rosa, 2010. 238p.

PEREIRA DE OLIVEIRA, L. A. A resistência de aderência como um parâmetro de compatibilidade entre o graute de enchimento e as unidades de alvenaria estrutural. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1994, p.214-227.

PRIESTLEY, M. J. N.; YUK, C. **Prediction of masonry compressive strength Part. I.** In: NEW ZEALAND CONCRETE CONSTRUCTION. p. 21-24, apr. 1984.

RIBEIRO, J. L. D.; C. S. T. CATEN. **Projeto de experimentos**. Porto Alegre: FEEng/UFRGS, 2010. 145p.

ROMAGNA, R. H. **Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteado**. 2000. 215f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SABBATINI, F. H. **Processos construtivos de edifícios de alvenaria sílico-calcária**. São Paulo, 1984. 298p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SABBATINI, F. H. Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente. **Boletim Técnico** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 26 p. 1986.

SALÓRZANO, M. G. P. **Características e desempenho de juntas de argamassa na alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 1994. 203p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SHRIVE, N. G. The failure mechanism of face-shell bedded (ungROUTED and unreinforced) masonry. **International Journal of Masonry Construction**. V. 2, n. 6, p. 249–251. 1985

SILVA, A. F. **Avaliação da resistência à compressão da alvenaria estrutural**. 2007. 110f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2007.

STEIL, R. O. **Efeito da geometria de blocos de concreto e do tipo de argamassa no desempenho à compressão de prismas de alvenaria não grauteados**. 2003. 178f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ANEXO A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Tabela A1 – Resultados individuais de resistência à compressão dos blocos de concreto.

Tipo de Bloco	Data do ensaio	Id. do CP	Resistência à Compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B1	04/12/2015	01	5,870	7,660	1,637	2,679
		02	10,410			
		03	7,089			
		04	9,081			
	22/12/2015	05	7,930			
		06	6,027			
	23/12/2015	07	7,190			
B2	16/10/2015	01	14,610	12,230	1,242	1,543
		02	14,620			
		03	14,360			
		04	12,648			
		05	14,345			
		06	13,410			
	06/11/2015	07	13,230			
		08	13,720			
		09	14,905			
		10	10,160			
	04/12/2015	11	13,770			
		12	12,720			
		13	13,701			
	22/12/2015	14	13,220			
		15	11,240			
		16	12,660			
		17	11,530			
		18	13,860			
	23/12/2015	19	12,740			
01		12,580				
B3	16/10/2015	02	13,550	14,440	1,810	3,276
		03	12,570			
		04	13,620			
		05	17,019			
		06	12,460			
	06/11/2015	07	15,080			
		08	13,438			
		09	15,650			
	22/12/2015	10	16,470			
		11	14,020			
	23/12/2015	12	17,590			

Fonte: o Autor.

Tabela A2 – Resultados individuais de resistência à tração de argamassas.

Tipo de Argamassa	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
A1	7 dias	01	1,320	1,420	0,093	0,87%
		02	1,434			
		03	1,505			
	14 dias	01	1,638	1,625	0,070	0,49%
		02	1,688			
		03	1,549			
	28 dias	01	1,978	1,880	0,112	1,26%
		02	1,758			
		03	1,905			
A2	7 dias	01	2,058	2,267	0,209	4,40%
		02	2,477			
		03	2,266			
	14 dias	01	2,316	2,321	0,013	0,02%
		02	2,311			
		03	2,337			
	28 dias	01	3,307	3,386	0,196	3,85%
		02	3,609			
		03	3,241			

Fonte: o Autor.

Tabela A3 – Resultados individuais de resistência à compressão de argamassas utilizando CP's cúbicos.

Tipo de Argamassa	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
A1	7 dias	01	3,930	3,877	0,166	0,02%
		02	3,950			
		03	3,740			
		04	3,940			
		05	4,080			
		06	3,620			
	14 dias	01	4,670	5,098	0,275	0,07%
		02	4,970			
		03	5,390			
		04	5,270			
		05	5,320			
		06	4,970			
	28 dias	01	5,490	5,375	0,223	0,05%
		02	5,540			
		03	5,570			
		04	5,440			
		05	5,210			
		06	5,000			
A2	7 dias	01	7,030	6,832	0,460	0,21%

A2	7 dias	02	7,470	6,832	0,460	0,21%
		03	6,980			
		04	6,870			
		05	6,140			
		06	6,500			
		01	7,290			
	14 dias	02	7,490	7,712	0,426	0,18%
		03	8,180			
		04	8,320			
		05	7,490			
		06	7,500			
		01	8,640			
	28 dias	02	8,390	9,333	0,723	0,52%
		03	10,110			
		04	10,130			
		05	9,310			
		06	9,420			
		01	8,640			

Fonte: o Autor.

Tabela A4 – Resultados individuais de resistência à compressão de argamassas utilizando CP's cilíndricos.

Tipo de Argamassa	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
A1	7 dias	01	4,810	4,306	0,310	0,09%
		02	4,000			
		03	4,060			
		04	4,414			
		05	4,103			
		06	4,446			
	14 dias	01	5,500	4,859	0,511	0,26%
		02	4,710			
		03	4,070			
		04	4,601			
		05	5,008			
		06	5,262			
	28 dias	01	6,250	5,627	0,544	0,29%
		02	5,360			
		03	5,520			
		04	5,152			
		05	5,122			
		06	6,355			
A2	7 dias	01	6,360	6,823	0,647	0,41%
		02	7,260			
		03	7,500			
		04	5,758			

A2	14 dias	05	7,109	7,558	0,835	0,69%
		06	6,950			
		01	Falha no CP			
		02	6,630			
		03	Falha no CP			
		04	8,250			
	28 dias	05	Falha no CP	9,275	0,827	0,68%
		06	7,793			
		01	9,560			
		02	9,720			
		03	8,390			
		04	9,985			
	05	9,921				
	06	8,074				

Fonte: o Autor.

Tabela A5 – Resultados individuais de resistência à compressão de grautes.

Tipo de Graute	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
G1	7 dias	01	16,830	16,772	1,090	1,18%
		02	17,420			
		03	18,000			
		04	16,770			
		05	14,770			
		06	16,840			
	14 dias	01	20,410	21,023	0,585	0,34%
		02	22,130			
		03	21,060			
		04	20,930			
		05	20,852			
		06	20,755			
28 dias	01	23,740	23,415	0,548	0,30%	
	02	23,480				
	03	22,410				
	04	23,629				
	05	23,255				
	06	23,975				
G2	7 dias	01	14,920	15,126	0,807	0,65%
		02	16,120			
		03	13,840			
		04	14,720			
		05	15,591			
		06	15,563			
	14 dias	01	17,690	18,026	0,653	0,42%

G2	14 dias	02	18,810	18,026	0,653	0,42%
		03	Falha no CP			
		04	18,279			
		05	Falha no CP			
		06	17,326			
		01	21,570			
	28 dias	02	20,140	20,986	0,557	0,31%
		03	20,960			
		04	20,555			
		05	21,178			
		06	21,512			
		01	21,570			

Fonte: o Autor.

Tabela A6 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 1.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B3-A1	7 dias	01	8,680	8,718	0,029	0,08%
		02	8,750			
		03	8,710			
		04	8,730			
		05	Falha no CP			
		06	Falha no CP			
	14 dias	01	Falha no CP	8,717	0,085	0,07%
		02	Falha no CP			
		03	8,830			
		04	8,714			
		05	8,704			
		06	8,621			
	28 dias	01	8,990	8,753	0,474	0,22%
		02	Falha no CP			
		03	8,190			
		04	Falha no CP			
		05	8,563			
		06	9,270			

Fonte: o Autor.

Tabela A7 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 2.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B2-A1	7 dias	01	8,940	8,782	0,408	0,16%
		02	9,050			
		03	9,100			
		04	8,720			
		05	8,100			
		06	Falha no CP			
	14 dias	01	9,570	9,524	0,475	0,22%
		02	9,750			
		03	9,320			
		04	8,685			
		05	10,043			
		06	9,778			
	28 dias	01	10,070	9,862	0,194	0,03%
		02	9,920			
		03	9,800			
		04	9,510			
		05	9,974			
		06	9,899			

Fonte: o Autor.

Tabela A8 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 3.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B3-A1-G1	7 dias	01	13,740	13,996	0,651	0,42%
		02	13,850			
		03	14,640			
		04	13,172			
		05	14,909			
		06	13,666			
	14 dias	01	17,100	16,003	1,544	2,38%
		02	13,590			
		03	14,880			
		04	15,835			
		05	16,981			
		06	17,633			
	28 dias	01	17,190	16,747	0,791	0,62%
		02	16,670			
		03	17,800			
		04	15,731			
		05	16,346			
		06	Falha no CP			

Fonte: o Autor.

Tabela A9 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 4.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B2-A1-G1	7 dias	01	16,130	13,845	1,33	1,78%
		02	12,430			
		03	12,860			
		04	13,974			
		05	13,230			
		06	14,446			
	14 dias	01	12,890	14,237	1,289	1,66%
		02	13,140			
		03	15,340			
		04	15,443			
		05	15,448			
		06	13,159			
	28 dias	01	17,180	14,894	1,712	2,93%
		02	12,870			
		03	13,250			
		04	15,960			
		05	14,197			
		06	15,905			

Fonte: o Autor.

Tabela A10 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 5.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B3-A1-G2	7 dias	01	14,400	13,413	1,399	1,95%
		02	13,960			
		03	13,650			
		04	14,978			
		05	11,274			
		06	12,213			
	14 dias	01	12,270	13,712	1,058	1,12%
		02	15,180			
		03	13,430			
		04	14,101			
		05	13,581			
		06	Falha no CP			
	28 dias	01	18,060	18,393	1,058	1,12%
		02	17,750			
		03	19,090			
		04	20,053			
		05	18,364			
		06	17,038			

Fonte: o Autor.

Tabela A11 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 6.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B2-A1-G2	7 dias	01	12,260	13,010	0,796	0,63%
		02	13,310			
		03	12,360			
		04	12,321			
		05	13,803			
		06	14,006			
	14 dias	01	15,520	14,394	1,838	3,37%
		02	11,560			
		03	14,300			
		04	16,360			
		05	15,674			
		06	12,949			
	28 dias	01	Falha no CP	14,622	1,280	1,63%
		02	14,810			
		03	12,880			
		04	13,892			
		05	15,351			
		06	16,179			

Fonte: o Autor.

Tabela A12 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 7.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B1-A2	7 dias	01	6,630	6,915	0,191	0,03%
		02	Falha no CP			
		03	7,060			
		04	6,921			
		05	7,116			
		06	6,846			
	14 dias	01	6,940	6,982	0,593	0,35%
		02	6,070			
		03	6,980			
		04	Falha no CP			
		05	7,217			
		06	7,703			
	28 dias	01	7,630	7,571	0,343	0,11%
		02	8,030			
		03	7,340			
		04	7,622			
		05	7,039			
		06	7,762			

Fonte: o Autor.

Tabela A13 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 8.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B2-A2	7 dias	01	9,910	9,859	0,599	0,35%
		02	10,490			
		03	10,160			
		04	10,153			
		05	9,670			
		06	8,772			
	14 dias	01	10,520	10,798	0,526	0,27%
		02	11,020			
		03	11,420			
		04	10,993			
		05	9,895			
		06	10,940			
	28 dias	01	11,510	11,780	0,497	0,24%
		02	11,880			
		03	11,400			
		04	11,236			
		05	12,089			
		06	12,566			

Fonte: o Autor.

Tabela A14 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 9.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B1-A2-G1	7 dias	01	9,650	10,307	0,77	0,60%
		02	10,190			
		03	11,470			
		04	9,714			
		05	9,755			
		06	11,063			
	14 dias	01	11,730	10,998	0,774	0,60%
		02	11,450			
		03	9,620			
		04	11,472			
		05	11,081			
		06	10,635			
	28 dias	01	12,220	11,443	0,601	0,36%
		02	11,890			
		03	11,270			
		04	10,916			
		05	10,652			
		06	11,711			

Fonte: o Autor.

Tabela A15 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 10.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B2-A2-G1	7 dias	01	11,030	12,739	1,226	1,50%
		02	13,550			
		03	12,570			
		04	14,279			
		05	13,349			
		06	11,656			
	14 dias	01	11,670	14,308	2,134	4,55%
		02	11,490			
		03	15,330			
		04	16,025			
		05	15,981			
		06	15,349			
	28 dias	01	18,940	14,374	2,520	6,35%
		02	13,590			
		03	14,280			
		04	12,308			
		05	15,097			
		06	12,030			

Fonte: o Autor.

Tabela A16 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 11.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B1-A2-G2	7 dias	01	11,150	11,435	0,788	0,62%
		02	10,430			
		03	10,970			
		04	12,710			
		05	11,852			
		06	11,500			
	14 dias	01	12,760	12,486	0,813	0,66%
		02	12,350			
		03	11,250			
		04	13,431			
		05	13,189			
		06	11,937			
	28 dias	01	13,810	13,112	0,880	0,77%
		02	13,630			
		03	13,910			
		04	12,833			
		05	12,912			
		06	11,575			

Fonte: o Autor.

Tabela A17 – Resultados individuais de resistência à compressão de prismas serie 12.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B2-A2-G2	7 dias	01	13,250	13,289	0,619	0,38%
		02	12,370			
		03	12,820			
		04	13,898			
		05	13,426			
		06	13,971			
	14 dias	01	12,820	13,787	1,094	1,19%
		02	12,130			
		03	13,810			
		04	14,490			
		05	14,644			
		06	14,827			
	28 dias	01	15,230	14,776	0,678	0,46%
		02	14,930			
		03	15,560			
		04	14,234			
		05	13,718			
		06	14,982			

Fonte: o Autor.

ANEXO B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Tabela B1 – Resultados individuais do módulo de deformação de argamassas.

Tipo de Argamassa	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
A1	7 dias	01	Falha no CP	7,795	0,120	0,01%
		02	7,710			
		03	7,880			
	14 dias	01	8,310	7,920	0,551	0,30%
		02	7,530			
		03	Falha no CP			
	28 dias	01	8,400	8,467	0,891	0,79%
		02	7,610			
		03	9,390			
A2	7 dias	01	Falha no CP	8,845	0,261	0,06%
		02	9,030			
		03	8,660			
	14 dias	01	9,640	9,950	0,469	0,22%
		02	10,490			
		03	9,720			
	28 dias	01	14,720	14,103	1,587	2,52%
		02	15,290			
		03	12,300			

Fonte: o Autor.

Tabela B2 – Resultados individuais do módulo de deformação de grautes.

Tipo de Graute	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
G1	7 dias	01	15,870	15,590	0,476	0,22%
		02	15,86			
		03	15,040			
	14 dias	01	17,550	17,140	0,990	0,98%
		02	16,010			
		03	17,860			
	28 dias	01	18,980	18,810	0,160	0,02%
		02	18,660			
		03	18,790			
G2	7 dias	01	16,280	16,521	0,559	0,31%
		02	17,160			
		03	16,122			
	14 dias	01	16,590	16,850	0,225	0,05%
		02	16,980			
		03	16,980			
	28 dias	01	17,840	18,647	0,698	0,48%
		02	19,070			
		03	19,030			

Fonte: o Autor.

Tabela B2 – Resultados individuais do módulo de deformação de prismas séries 1 e 2.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B3-A1	7 dias	01	12,760	8,087	4,232	17,91%
		02	6,99			
		03	4,510			
	14 dias	01	15,570	12,190	3,178	10,10%
		02	9,260			
		03	11,740			
	28 dias	01	13,260	14,250	1,078	1,16%
		02	14,090			
		03	15,400			
B2-A1	7 dias	01	6,590	-	-	-
		02	Falha no CP			
		03	Falha no CP			
	14 dias	01	7,350	7,623	1,282	1,64%
		02	9,020			
		03	6,500			
	28 dias	01	4,780	7,653	2,579	6,65%
		02	9,770			
		03	8,410			

Fonte: o Autor.

Tabela B2 – Resultados individuais do módulo de deformação de prismas séries 3 e 4.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)			
B3-A1-G-	7 dias	01	11,130	8,523	3,145	9,89%			
		02	9,41						
		03	5,030						
	14 dias	01	20,470						
		02	16,850				19,703	2,557	6,54%
		03	21,790						
	28 dias	01	12,810				12,785	0,035	0,01%
		02	12,760						
		03	Falha no CP						
B2-A1-G1	7 dias	01	10,520	14,347	5,791	33,54%			
		02	21,010						
		03	11,510						
	14 dias	01	Falha no CP				20,615	9,199	84,63%
		02	27,120						
		03	14,110						
	28 dias	01	16,040				24,313	7,238	52,39%
		02	29,480						
		03	27,420						

Fonte: o Autor.

Tabela B2 – Resultados individuais do módulo de deformação de prismas séries 5 e 6.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)			
B3-A1-G2	7 dias	01	21,270	16,397	4,431	19,63%			
		02	12,61						
		03	15,310						
	14 dias	01	Falha no CP				18,282	1,581	2,50%
		02	19,400						
		03	17,163						
	28 dias	01	18,970				19,407	0,591	0,35%
		02	20,080						
		03	19,170						
B2-A1-G2	7 dias	01	20,060	18,980	1,090	1,18%			
		02	19,000						
		03	17,880						
	14 dias	01	19,590				20,740	1,626	2,64%
		02	Falha no CP						
		03	21,890						
	28 dias	01	Falha no CP				20,720	1,640	2,69%
		02	19,560						
		03	21,880						

Fonte: o Autor.

Tabela B2 – Resultados individuais do módulo de deformação de prismas séries 7 e 8.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B1-A2	7 dias	01	6,640	7,220	0,820	0,67%
		02	7,8			
		03	Falha no CP			
	14 dias	01	Falha no CP			
		02	8,470			
		03	6,310			
	28 dias	01	10,530			
		02	3,380			
		03	8,390			
B2-A2	7 dias	01	Falha no CP	11,510	0,537	0,28%
		02	11,130			
		03	11,890			
	14 dias	01	11,440			
		02	Falha no CP			
		03	12,350			
	28 dias	01	12,600			
		02	11,400			
		03	14,230			

Fonte: o Autor.

Tabela B2 – Resultados individuais do módulo de deformação de prismas séries 9 e 10.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B1-A2-G1	7 dias	01	13,870	13,167	1,801	3,24%
		02	11,12			
		03	14,510			
	14 dias	01	13,050			
		02	14,910			
		03	Falha no CP			
	28 dias	01	14,320			
		02	13,630			
		03	Falha no CP			
B2-A2-G1	7 dias	01	24,160	21,827	2,469	6,09%
		02	22,080			
		03	19,240			
	14 dias	01	26,840			
		02	23,910			
		03	23,750			
	28 dias	01	20,970			
		02	22,480			
		03	16,460			

Fonte: o Autor.

Tabela B2 – Resultados individuais do módulo de deformação de prismas séries 11 e 12.

Tipo de prisma	Idade	Id. do CP	Resistência à tração (MPa)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
B1-A2-G2	7 dias	01	20,820	20,903	1,666	2,77%
		02	19,28			
		03	22,610			
	14 dias	01	16,480	15,620	2,106	4,43%
		02	17,160			
		03	13,220			
	28 dias	01	17,250	16,470	1,316	1,73%
		02	14,950			
		03	17,210			
B2-A2-G2	7 dias	01	22,160	24,193	1,801	3,24%
		02	25,590			
		03	24,830			
	14 dias	01	23,600	25,977	2,105	4,43%
		02	27,610			
		03	26,720			
	28 dias	01	20,580	21,280	1,126	1,27%
		02	22,580			
		03	20,680			

Fonte: o Autor.