

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE NASCIMENTO DE LIMA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA
RESISTÊNCIA E ESPESSURA DA ARGAMASSA DE
ASSENTAMENTO NO DESEMPENHO MECÂNICO DE
PRISMAS DE BLOCOS CERÂMICOS**

MACEIÓ 2010

ALEXANDRE NASCIMENTO DE LIMA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA
RESISTÊNCIA E ESPESSURA DA ARGAMASSA DE
ASSENTAMENTO NO DESEMPENHO MECÂNICO DE
PRISMAS DE BLOCOS CERÂMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas
como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil.

Área de concentração: *Estruturas*

Orientador: Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima

MACEIÓ

2010

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Dilma Maria dos Santos Cunha

L732a Lima, Alexandre Nascimento de.
Análise experimental da influência da resistência e espessura da argamassa de assentamento no desempenho mecânico de prismas de blocos cerâmicos / Alexandre Nascimento de Lima. – 2010.

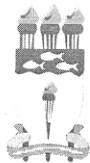
xvi, 128 f. : il., tabs.

Orientador: Flávio Barboza de Lima.
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2010.

Bibliografia: f. 122-128.

1. Alvenaria estrutural. 2. Bloco cerâmico. 3. Argamassa. 4. Prisma. I. Título.

CDU: 691.53



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC



**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA E ESPESSURA DA
ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO NO DESEMPENHO MECÂNICO DE PRISMAS DE
BLOCOS CERÂMICOS.**

ALEXANDRE NASCIMENTO DE LIMA

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 29 do mês de novembro do ano de 2010.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Plávio Barboza de Lima
Orientador – CTEC/UFAL

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
UNICAP

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis
CTEC/UFAL

Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1863
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br
Homepage: www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças para conseguir chegar a este lugar, por me mostrar saídas humanamente impossíveis e me dar a tranquilidade necessária.

Agradeço a minha paciente esposa (nem sempre!) pela compreensão de me dividir com outras causas, pelo nosso bem comum.

Aos meus filhos, Giovanna e Gustavo, por terem compreendido que a minha ausência temporária tinha um objetivo futuro melhor para todos nós.

Ao meu orientador, professor Flávio, pela ajuda prestada em toda a minha carreira na UFAL, pela paciência e pelos puxões de orelha.

Ao professor Paulo César, por me “esquecer” quando eu precisava.

A todos os funcionários do LEMA e do NPT, técnicos e apoio, pela contribuição nos ensaios e pelas resenhas.

Aos meus colegas Karlisson e Fernanda, pelo apoio nos trabalhos do curso.

À Cerutti Engenharia, pelo fornecimento dos blocos cerâmicos que tornou possível a realização dos ensaios.

Resumo

Uma das saídas para diminuir o déficit habitacional no Brasil é a utilização de sistemas construtivos econômicos e racionais. A alvenaria estrutural pode ser apontada como uma das soluções. Ela é formada pela junção de blocos unidos com uma argamassa de assentamento. Este trabalho objetivou analisar experimentalmente, através de um planejamento fatorial 3^2 , a influência da resistência à compressão e da espessura da camada de assentamento no desempenho mecânico de prismas de blocos estruturais cerâmicos não grauteados, um dos métodos adotados pela norma brasileira para análise da alvenaria. Para isto, foram estudados blocos de mesma resistência à compressão, confeccionando prismas de dois blocos com espessuras variáveis de 10 mm, 15 mm e 20 mm e resistências equivalentes a 50%, 100% e 150% da resistência do bloco na área bruta. Com os resultados dos ensaios, conseguiu-se constatar a influência destes parâmetros e construir modelos estatísticos representativos dos efeitos individuais e conjunto das variáveis estudadas.

Palavras chave: alvenaria estrutural, bloco cerâmico, argamassa, prisma.

Abstract

The use of the structural masonry can help to reduce the habitational deficit in Brazil, for being a constructive economic and rational system. It is formed by the junction of blocks united with an establishment mortar. This work has as purpose to analyze experimentally, through a factorial planning 3^2 , the influence of the compressive strength and of the thickness of the bedding mortar in the mechanical acting of no grouted prisms of structural clay blocks, one of the methods adopted by the Brazilian standard for analysis of the masonry. For this, it was studied blocks of same compressive strength, making prisms of two blocks with variable thickness of 10 mm, 15 mm and 20 mm and equivalent resistances to 50%, 100% and 150% of the strength of the block in the gross area. With the results of the tests, it was gotten to build representative models of the effects individual and united of the variables thickness and compressive strength of the mortar.

Keywords: structural masonry, ceramic block, mortar, prism.

Lista de figuras

Figura 1.1 – Fotografia durante a fase de construção do condomínio Eco Villares II, em Maceió-AL – FONTE: http://cerutti.tmp.2i9.com.br/pt/obras	19
Figura 1.2 – Grande pirâmide de Quéops – FONTE: http://turismoemuitomais.blogspot.com/2010/03/grande-piramide-de-queops.html	20
Figura 1.3 – Farol de Alexandria – FONTE: http://memorias-de-uma-et.blogspot.com/2008_06_01_archive.html	20
Figura 1.4 – Coliseu em Roma – FONTE: http://www.viaje.info/2008/11/27/el-coliseo-de-roma-nueva-maravilla-del-mundo/	21
Figura 1.5 – Catedral de Reims na França – FONTE: http://pt.wikipedia.org/wiki/Catedral_de_Notre-Dame_de_Reims	21
Figura 1.6 – Templo Zigurate – FONTE: http://revoltadopt.wordpress.com/2010/08/16/sumerios-arte-e-arquitectura/	22
Figura 1.7 – Monadnock Building, em Chicago – FONTE: http://en.wikipedia.org/wiki/Monadnock_Building	23
Figura 1.8 – Fotografia do Residencial Comendador Antonio Silveira Coutinho	26
Figura 1.9 – Fotografia do Condomínio Eco Villares Residence I	21
Figura 1.10 – Fotografia do Condomínio Eco Villares Residence II	27
Figura 2.1 – Tipos de prismas ensaiados por PRUDÊNCIO JR (1986)	31
Figura 2.2 – Diferentes geometrias de blocos ensaiados por SANTOS <i>et al</i> (2007)	32
Figura 2.3 – Geometrias dos blocos pesquisados por CARVALHO (2003)	33
Figura 2.4 – Prismas ensaiados por STEIL (2003)	34
Figura 2.5- Ensaio de aderência por flexão – extraído de SOLÓRZANO & SABBATINI	35
Figura 2.6 – Ensaio de tração realizado por SARANGAPANI <i>et al</i> (2005)	36
Figura 2.7 – Prisma ensaiado por MORENO JR & ALBUQUERQUE (2002)	38
Figura 2.8 – Prisma confeccionado por LEÃO & PERDIGÃO (2004)	39
Figura 2.9 – Um dos tipos de tijolo ensaiados por ARYANA (2006)	40
Figura 2.10 – (a) Prisma instrumentado e (b) parede estudados por MOHAMAD (2007)	41
Figura 2.11 – Placa-escova usada por BARBOSA (2008)	42
Figura 2.12 – Configurações típicas de paredes de alvenaria – extraído de HENDRY <i>et al.</i> (2003)	50

Figura 2.13 – Tensões atuantes no prisma-adaptado de MOHAMAD (2007)	52
Figura 2.14 - Tensões atuantes no bloco e na argamassa - adaptado de MOHAMAD (2007)	53
Figura 3.1 – Bloco cerâmico estrutural usado neste trabalho	62
Figura 3.2 – Bloco submerso, sendo pesado com a balança hidrostática	63
Figura 3.3 – Blocos capeados nas duas faces	64
Figura 3.4 – Bloco cerâmico na prensa durante ensaio	65
Figura 3.5 – Bloco cerâmico ensaiado até ruptura	65
Figura 3.6 – Determinação da composição granulométrica da areia	76
Figura 3.7 – Medição dos diâmetros de espalhamento da argamassa	79
Figura 3.8 – Molde para confecção dos corpos de prova de argamassa	83
Figura 3.9 – Corpos de prova moldados	83
Figura 3.10 – Ensaio de compressão da argamassa	84
Figura 3.11 – Prismas sendo apurados	87
Figura 3.12 – Prismas sendo nivelados	87
Figura 3.13 – Medição da espessura da junta de assentamento	88
Figura 3.14 – Esquema do bloco e sua área de argamassamento	88
Figura 3.15 – Capeamento da fase inferior dos prismas	89
Figura 3.16 – Exemplo de um prisma 50.10 após ruptura	91
Figura 3.17 – Exemplo de um prisma 50.15 após ruptura	92
Figura 3.18 – Exemplo de um prisma 50.20 após ruptura	93
Figura 3.19 – Exemplo de um prisma 100.10 após ruptura	94
Figura 3.20 – Exemplo de um prisma 100.15 após ruptura	95
Figura 3.21 – Exemplo de um prisma 100.20 após ruptura	96
Figura 3.22 – Exemplo de um prisma 150.10 após ruptura	97
Figura 3.23 – Exemplo de um prisma 150.15 após ruptura	98
Figura 3.24 – Exemplo de um prisma 150.20 após ruptura	99
Figura 4.1 – Influência da espessura da argamassa na resistência dos prismas	101
Figura 4.2 – Influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas	101
Figura 4.3 – Matriz dos coeficientes de contraste da análise experimental	105
Figura 4.4 – Superfície de resposta para o modelo adotado	114
Figura 4.5 – Influência da resistência da argamassa na eficiência dos prismas	115
Figura 4.6 – Influência da espessura da argamassa na eficiência dos prismas	116

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Variação nas propriedades de uma argamassa – Extraído de SABBATINI (1986)	37
Tabela 2.2 - Coeficientes de correção da em função da esbeltez do prisma – DUARTE (1999)	51
Tabela 3.1: Combinações dos ensaios de prismas executados.	60
Tabela 3.2 - Resultados individuais de resistência à compressão dos blocos cerâmicos estruturais.	66
Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de absorção de água da amostra de blocos.	69
Tabela 3.4 - Composição granulométrica segundo a BS 1200 e a ASTM C-144. - SABBATINI (1986)	75
Tabela 3.5 - Determinação da composição granulométrica da areia usada na argamassa.	76
Tabela 3.6 - Índices de consistência, umidade e fator água/cimento das argamassas testadas.	79
Tabela 3.7 - Retenção de água das argamassas testadas	81
Tabela 3.8 - Resistência à compressão dos traços testados, aos 28 dias	84
Tabela 3.9 - Resistência à compressão dos prismas 50.10	90
Tabela 3.10 - Resistência à compressão dos prismas 50.15	91
Tabela 3.11 - Resistência à compressão dos prismas 50.20	92
Tabela 3.12 - Resistência à compressão dos prismas 100.10	93
Tabela 3.13 - Resistência à compressão dos prismas 100.15	94
Tabela 3.14 - Resistência à compressão dos prismas 100.20	95
Tabela 3.15 - Resistência à compressão dos prismas 150.10	96
Tabela 3.16 - Resistência à compressão dos prismas 150.15	97
Tabela 3.17 - Resistência à compressão dos prismas 150.20	98
Tabela 4.1: Resistências médias dos prismas ensaiados	100
Tabela 4.2 - Efeitos relativos das mudanças na espessura da argamassa de assentamento	103
Tabela 4.3- Efeitos relativos das mudanças na resistência da argamassa de assentamento	103
Tabela 4.4 - Codificação adotada dos níveis dos fatores considerados	103
Tabela 4.5 - Resistências médias dos prismas ensaiados sobre a codificação dos níveis	104
Tabela 4.6 - Sinal dos efeitos da combinação dos níveis representados	104

Tabela 4.7 - Efeitos calculados para o planejamento fatorial	107
Tabela 4.8 - Resistências médias dos prismas ensaiados	109
Tabela 4.9 - Valores de eficiência dos prismas ensaiados	115
Tabela 4.10 - Resistência relativa da argamassa para cada combinação	116

Lista de símbolos

β	Coeficientes populacionais
γ	Massa específica da água
ϵ	Erro aleatório
η	Eficiência do prisma

Lista de abreviaturas

AA	Índice de absorção do bloco
A_{liq}	Área líquida do bloco cerâmico
AF	Fator água argamassa fresca
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano do Concreto)
ANOVA	Análise de variação
ASTM	American Society for Testing and Materials
a.C.	Antes de Cristo
BS	British Standard (Norma Britânica)
b	Coefficientes amostrais
cim	Cimento
CH	Cal hidratada
CV	Coefficiente de variação
d. C.	Depois de Cristo
E	Efeito relativo
EUA	Estados Unidos da América
EN	European Norme (Norma Europeia)
e_a	Espessura da argamassa
F	Filler
F_c	Carga de compressão
f_a	Resistência da argamassa
f_b	Resistência do bloco
f_{bk}	Resistência característica do lote de blocos
f_p	Resistência do prisma
G	Valor do teste de Grubbs
h	Altura do prisma
H	Altura do bloco
IRA	Initial rate of absorption (índice de absorção inicial)
kN	Quilonewton
ln	Logaritmo Neperiano

M	Massa dos materiais anidros da argamassa
M_f	Massa do conjunto de papéis-filtro molhados
M_m	Massa do molde de retenção vazio
M_{ma}	Massa do molde de retenção com a argamassa
M_{se}	Massa do conjunto de papéis-filtro secos
M_w	Massa de água
MPa	Megapascal
MPa/s	Megapascal por segundo
m	Metro
m_a	Massa do bloco submerso
m_s	Massa seca em estufa do bloco
m_u	Massa do bloco saturado
mm	Milímetro
mm^2	Milímetro quadrado
N	Newton
N/s	Newton por segundo
NBR	Norma Brasileira
R_a	Retenção de água da argamassa
R_c	Resistência à compressão da argamassa
R^2	Coefficiente de correlação
R_a^2	Coefficiente de correlação ajustado
s	Segundos; desvio padrão da amostra
s^2	Variância da amostra
t	Espessura do prisma

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	17
1.1. Histórico	19
1.2. Objetivos	27
1.2.1. Objetivos específicos	28
1.3. Justificativa	28
1.4. Estrutura da dissertação	29
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	30
2.1. Relação da resistência de prismas com seus componentes	30
2.2. Fatores de influência nos ensaios de prismas	42
2.3. Normalização	44
2.3.1. A norma europeia	45
2.3.2. A norma australiana	46
2.3.3. A norma americana	47
2.3.4. Normas brasileiras	48
2.4. Outras referências	49
2.5. Mecanismo de ruptura dos prismas	52
Capítulo 3 – Experimentação	58
3.1. Planejamento experimental	58
3.2. Materiais	61
3.2.1. Unidade	61
3.2.1.1. Determinação da área líquida	62
3.2.1.2. Determinação da resistência à compressão	63
3.2.1.3. Determinação da absorção	68
3.2.2. Argamassa	70
3.2.2.1. Cimento Portland	72
3.2.2.2. Cal hidratada	73
3.2.2.3. Areia	74
3.2.2.4. Experimentos	76
3.2.2.4.1. Determinação da consistência	77
3.2.2.4.2. Determinação da retenção de água	80

3.2.2.4.3. Determinação da resistência à compressão	81
3.2.3. Prismas	85
3.2.3.1. Apresentação dos resultados	90
Capítulo 4 – Análise dos resultados	100
4.1. Resumo dos resultados	100
4.2. Determinação dos efeitos	102
4.3. Determinação da estimativa do erro experimental	106
4.4. Modelo estatístico	108
4.4.1. Superfície de resposta	113
4.5. Análise em função da eficiência dos materiais	114
Capítulo 5 – Considerações finais	118
5.1. Análise dos resultados	118
5.2. Sugestões de trabalhos complementares	120
Referências	122

1 Introdução

A indústria de construção civil do Brasil tem uma necessidade urgente de produzir habitações. Segundo dados dum estudo desenvolvido pelo Ministério das Cidades (2010), o indicador do déficit habitacional estimado é de 5,572 milhões de domicílios, dos quais 83% estão localizados nas áreas urbanas. Outro ponto abordado pelo estudo é que as principais áreas metropolitanas do país abrigam 1,5 milhão de domicílios representando 27% das carências habitacionais do país. Também demonstrou que, em relação ao total dos domicílios, o déficit representa 9,7% do país, sendo 9,4% nas áreas urbanas e 11,3% nas rurais.

Dada a grande carência de habitação, sobretudo nas periferias das grandes cidades, devem-se observar aspectos de tempo de construção e a maior redução do custo dos imóveis, considerando-se tratar, na sua maioria, de uma demanda por habitação da classe menos favorecida economicamente. Porém, fundamental é também não perder o foco em relação à qualidade, durabilidade e segurança. Para trabalhar esta questão o governo tem realizado programas habitacionais, quer seja facilitando o empréstimo, quer seja construindo os imóveis. Num primeiro momento foi desenvolvido o *PAR (Programa de Arrendamento Residencial)*, e mais recentemente o programa *Minha Casa, Minha Vida*, ambos patrocinados pela Caixa Econômica Federal. Dada suas características o sistema construtivo em alvenaria estrutural tem se mostrado como uma das alternativas para a resolução desse problema.

A alvenaria estrutural é o processo construtivo que usa as paredes como principal estrutura suporte da edificação, dimensionada através de cálculo racional, sendo um processo racionalizado e organizado. Embora, na sua essência, seja utilizado há séculos pelo homem, com o emprego de blocos de pedra e argila, este processo só teve seu desenvolvimento enquanto sistema estrutural potencializado, na última metade do século XX, com o desenvolvimento de novos materiais. Deu-se início também a sua crescente conscientização de que se podia aperfeiçoar a alvenaria estrutural no sentido de minimizar as suas patologias, aperfeiçoar as técnicas construtivas e o cálculo estrutural, buscando conseguir um perfeito

resultado final para a obra, com a tradicional redução de custos que este sistema alcança (RAMALHO & CORRÊA, 2003).

Outro aspecto a ser considerado é que, pelas suas características de execução e afinidade com os processos de racionalização e industrialização da construção, a alvenaria estrutural apresenta um forte potencial de crescimento na região Nordeste e em especial de Alagoas, onde ainda convive-se com o empirismo na execução de edifícios em alvenaria resistente, carecendo dos cuidados inerentes à alvenaria estrutural, resultando, portanto em edificações com problemas, sem condições de verificação de segurança em termos de modelo de cálculo.

Algumas das principais vantagens do sistema alvenaria estrutural que podem ser apontadas são: a economia do uso de formas, a redução significativa nos revestimentos, a redução dos desperdícios do material e mão de obra, a redução do número de especialidades e a flexibilidade no ritmo de execução da obra. Como pontos negativos pode-se citar a interdependência entre os projetos e a necessidade de mão de obra bem qualificada (RAMALHO & CORRÊA, 2003).

A alvenaria estrutural é composta pela junção de blocos (de concreto, cerâmicos ou sílico-calcáreos) com argamassa de assentamento em juntas horizontais e verticais. Os elementos assim formados podem ou não receber algum tipo de revestimento. A resistência à compressão (principal parâmetro) do conjunto é influenciada principalmente pela resistência à compressão do bloco estrutural, mas as características da argamassa (resistência à compressão, espessura e aderência) também exercem importância nos resultados do conjunto.

Este trabalho está voltado para uso dos blocos cerâmicos, considerando-se que são os mais comuns no mercado local. A figura 1.1 apresenta uma fotografia durante a construção de um dos mais recentes empreendimentos executados empregando-se alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em Maceió.

O trabalho adquire relevância também por ser o primeiro trabalho nesta área dentro do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e visa contribuir com o meio técnico dos projetistas em relação aos mecanismos resistentes e dos construtores e empreendedores contribuindo com o entendimento do sistema em si e sanando eventuais dúvidas.



Figura 1.1 – Fotografia durante a fase de construção do condomínio Eco Villares II, em Maceió-AL - FONTE: <http://cerutti.tmp.2i9.com.br/pt/obras>. Acessado em outubro de 2010.

1.1. Histórico

A utilização das paredes como estrutura é a técnica construtiva mais antiga utilizada pelo homem. GOMES (1983) *apud* (MOTA, 2001) relata que as civilizações assíria e persa desenvolveram tijolos secos ao sol, já por volta do ano 10.000 a.C., usados em alvenaria. Em torno do ano 3.000 a.C., surgiram os primeiros tijolos de barro queimados em fornos, material mais resistente e durável (MOTA, 2001).

No decorrer dos séculos, grandes obras foram construídas e marcaram a História pela beleza e imponência. RAMALHO & CORRÊA (2003) cita alguns exemplos:

- As pirâmides de Guizé (Gizé), no Egito: as três pirâmides, considerada uma das sete maravilhas do mundo antigo, foram construídas em alvenaria de blocos de pedra (cerca de 2.600 a.C.). A figura 1.2 apresenta a Grande pirâmide de Quéops na planície de Guizé com 147 metros de altura e base quadrada com 230 metros de lado;

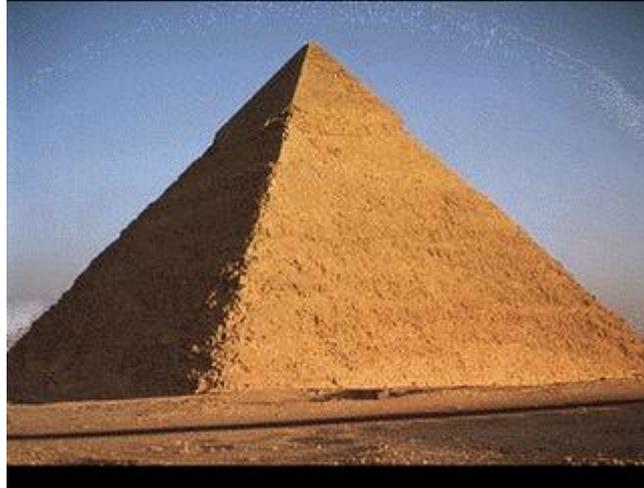


Figura 1.2 - Grande pirâmide de Quéops – FONTE: <http://turismoemuitomais.blogspot.com/2010/03/grande-piramide-de-queops.html>. Acessado em outubro de 2010.

- O Farol de Alexandria, Egito: também considerada uma das sete maravilhas do mundo antigo (cerca de 280 a.C.), foi construído em mármore branco, com 134 metros de altura, conforme ilustração da figura 1.3;

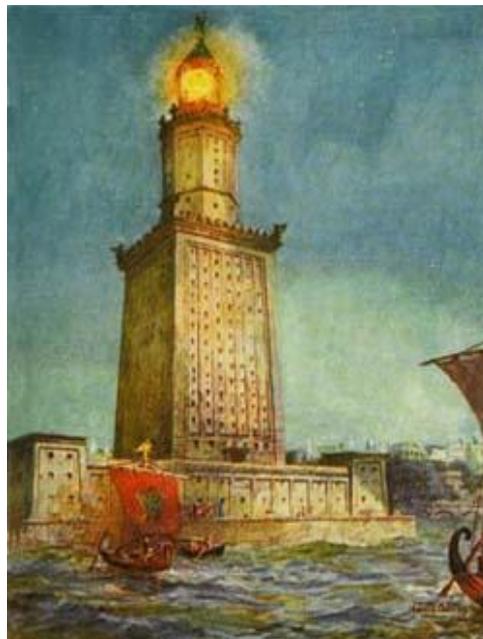


Figura 1.3 – Farol de Alexandria. FONTE: http://memorias-de-uma-et.blogspot.com/2008_06_01_archive.html. Acessado em outubro de 2010.

- O Coliseu, em Roma, Itália: anfiteatro com capacidade para 50.000 pessoas, possui mais de 500 metros de diâmetro e 50 metros de altura (construída em cerca de 70 d.C.), suportados por pórticos formados por pilares e arcos de alvenaria, conforme ilustrada na figura 1.4;



Figura 1.4 – Coliseu em Roma. FONTE: <http://www.viaje.info/2008/11/27/el-coliseo-de-roma-nueva-maravilla-del-mundo>. Acessado em outubro de 2010.

- Catedral de Reims, na França: construída entre 1211 e 1300 d.C., utilizou, na sua construção, técnicas construtivas em alvenaria, com pilares esbeltos contraventados externamente, possibilitando vãos relativamente grandes, dando sensação de amplitude e grandeza no interior, ilustrada na figura 1.5;



Figura 1.5 – Catedral de Reims na França. FONTE: http://pt.wikipedia.org/wiki/Catedral_de_Notre-Dame_de_Reims. Acessado em outubro de 2010.

MOTA (2001) também cita o Templo Zigurate (figura 1.6), na antiga Babilônia, atual Iraque, edificado com tijolos de barro em 2.200 a.C., como uma grande obra do passado, construída em alvenaria, que marcou a História pela sua beleza e opulência.

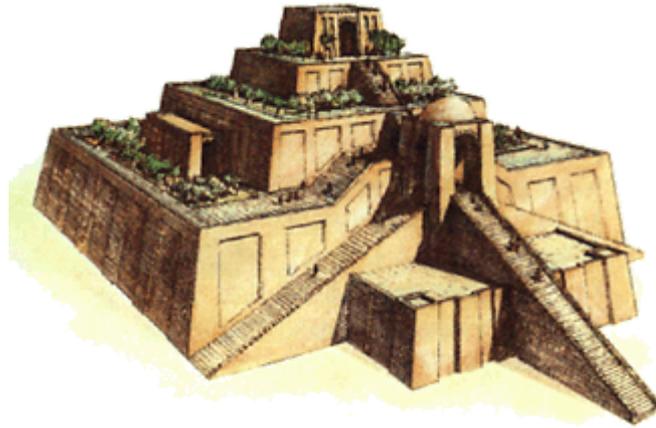


Figura 1.6 – Templo Zigurate. FONTE: <http://revoltadopt.wordpress.com/2010/08/16/sumerios-arte-e-arquitettura>. Acessado em outubro de 2010.

Os sistemas construtivos empregados até então eram limitados aos conhecimentos técnicos da época, com procedimentos de cálculo empíricos. As construções possuíam paredes largas, como consequência do desconhecimento das solicitações atuantes na alvenaria e da resistência dos materiais. Na época, as unidades empregadas (blocos de pedra ou tijolos) eram maciças e unidas através de algum material cimentício. Como resultado, predominava construções de alto custo e onde a potencialidade dos materiais não era totalmente explorada.

Com o advento da era industrial e com a mudança nos padrões das construções, começou-se a se exigir obras rápidas e de menor custo. Neste período, a construção civil passa a ter um novo rumo, em direção ao melhor entendimento das propriedades físicas dos materiais utilizados em obra (MOTA, 2001).

Ainda nessa época, porém, não existia nenhum código ou normalização para este tipo de construção, que fixassem parâmetros de projeto. Todas as estruturas concebidas em alvenaria até o início do século XX foram dimensionadas empiricamente, baseadas em experiências anteriores ou na intuição de projetistas e construtores. Como consequência, os edifícios construídos ainda possuíam paredes espessas e havia um grande desperdício de material. Um exemplo é o *Monadnock Building*, em Chicago, mostrado na figura 1.7, tido como um símbolo da alvenaria estrutural. Marcando a 1ª fase do sistema construtivo, possui 16 pavimentos e foi construído entre 1889 e 1891 e as paredes da base apresentam espessura de 1,80 metro.



Figura 1.7 - *Monadnock Building*, em Chicago. FONTE: http://en.wikipedia.org/wiki/Monadnock_Building. Acessado em outubro de 2010.

No início do século XX, a evolução das pesquisas e uso do concreto armado e do aço estrutural, possibilitou a construção de estruturas esbeltas e de grande altura. Nesta época, a alvenaria foi rebaixada à construção de pequeno porte e não foi tratada como sistema construtivo no mesmo nível que a construção em aço e em concreto. Em consequência, diminuíram as pesquisas e o desenvolvimento da alvenaria estagnou (MOTA, 2001).

PRUDÊNCIO JR (1986) aponta que as primeiras pesquisas experimentais sistemáticas em alvenaria de tijolos que se tem notícia foram aquelas executadas no Watertown Arsenal em Massachusetts, EUA, na década de 1880.

No início do século XX, os Estados Unidos estabeleceram laboratórios de resistência dos materiais e alguns destes estavam voltados para testes em alvenaria (STEIL, 2003). Na Índia, na década de 1920, extensos programas experimentais sobre a alvenaria foram executados e segundo PRUDÊNCIO JR (1986), em 1923, foi publicado um trabalho na Índia contendo uma teoria racional de projeto, sendo este considerado o verdadeiro início da alvenaria armada. Ainda segundo o mesmo autor, somente em 1948, na Inglaterra, é que foi elaborada a primeira norma consistente para o cálculo de alvenaria de tijolos.

A partir da década de 50, com o conhecimento já adquirido e a necessidade de reconstrução em face das guerras mundiais, surgiram inúmeras aplicações da alvenaria estrutural armada e não armada em âmbito mundial. Por exemplo, após inúmeras pesquisas

experimentais, o engenheiro suíço Paul Haller dimensionou e construiu na Basileia, em 1951, um edifício de 13 andares em alvenaria não armada (MOTA, 2001).

A alvenaria com bloco cerâmico é um desenvolvimento natural da alvenaria com tijolo maciço. Segundo MOTA (2001), por motivos econômicos, pois os blocos têm maior tamanho que os tijolos, e por motivos técnicos, pois eles oferecerem condições de serem armados e grauteados, especialmente em edifícios sujeitos a ação do vento e em regiões suscetíveis a abalo sísmico. Além desses motivos, este tipo de unidade proporciona uma melhor distribuição de carga por metro quadrado e aumento da produtividade da mão de obra. a partir da década de 1960, com a melhora das características dos blocos, apareceram os blocos com função estrutural. Pelo fato de propiciar uma maior racionalidade na execução da obra, reduz-se o consumo e o desperdício dos materiais, aumentando-se a eficiência da utilização da mão de obra (GARCIA, 2000).

No Brasil, segundo ARAÚJO (1987) *apud* MOTA (2001), o início do uso da alvenaria como estrutura de edifícios data da época da colônia. As primeiras estruturas eram predominantemente executadas com pedras como componentes de alvenaria.

Segundo PRUDÊNCIO JR (1986), as primeiras pesquisas sobre alvenaria, no Brasil, ocorreram na década de 1930 e concentraram-se nos elementos cerâmicos (maciços). Naquele tempo, a resistência mínima exigida para estes elementos não era suficiente para serem utilizados em alvenaria estrutural.

O efetivo estabelecimento da alvenaria estrutural viria um pouco mais tarde, em fins da década de 60 com a montagem de grandes fábricas produtoras de blocos de concreto, como a *Reago*, em São Paulo no ano de 1968. No Brasil, com a instalação de indústrias, os blocos de concreto foram os grandes responsáveis pelo crescimento da alvenaria estrutural (ALY, 1992 *apud* STEIL, 2003). Os blocos cerâmicos estruturais só apareceram na década de 1980, quando foram instaladas as primeiras indústrias em solo nacional (GARCIA, 2000).

De acordo com CURY (1977) *apud* (MOTA, 2001), os primeiros prédios em alvenaria armada de blocos de concreto foram construídos em São Paulo, no conjunto habitacional Central Parque da Lapa (edifícios de 4 pavimentos), em 1966. Mas o marco mais importante foi a construção em 1972 de 4 edifícios de 12 pavimentos no mesmo conjunto.

A alvenaria estrutural permaneceu subutilizada por muitos anos no Brasil devido a fatores como o maior domínio da tecnologia do concreto armado e a pouca divulgação desse sistema construtivo no conteúdo programático das universidades brasileiras. Somente a partir dos anos 1970, os blocos estruturais de concreto começaram a ser usados na construção de edifícios. Segundo CAMACHO (1995), as pesquisas sobre a alvenaria estrutural só surgiram

no final da década de 1970, em São Paulo, e em 1983, em Porto Alegre. As pesquisas com alvenaria estrutural de blocos cerâmicos no Brasil tomaram impulso no início da década de 1980. MOTA (2001) aponta GOMES (1983) como um dos primeiros a estudar a resistência à compressão de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos.

Para CARVALHO (2003), dos processos construtivos baseados na alvenaria estrutural, introduzidos no país, o que melhor adaptou-se à realidade brasileira foi o da alvenaria não armada. Dentre os materiais utilizados para alvenaria estrutural no Brasil, merece destaque o bloco cerâmico, pelo potencial que apresenta. Potencial este adquirido devido à disponibilidade da matéria-prima, ao baixo custo relativo, à facilidade e simplicidade da adaptação tecnológica à produção. Podem-se acrescentar ainda, como vantagens, a disponibilidade de mão de obra utilizada e a satisfatória qualidade do produto quanto à resistência, conforto térmico e durabilidade, que somadas à facilidade de execução e aos vantajosos resultados econômicos, são fatores mais do que suficientes para estudar o desempenho de bloco cerâmico.

RAMALHO & CORRÊA (2003) concordam que, apesar da chegada tardia deste sistema no país e de um desenvolvimento mais lento no início e bem mais rápido nos últimos anos, o sistema alvenaria estrutural foi muito bem aceito como alternativa para a execução de edificações residenciais e também industriais, percebido principalmente pela quantidade de empresas produtoras de blocos, já nos anos iniciais do século XXI.

Atualmente, devido à estabilidade econômica, a concorrência tem levado as empresas a melhorarem os custos da implantação deste sistema (RAMALHO & CORRÊA). Embora predomine a alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto, os blocos cerâmicos vêm ganhando força, principalmente com o lançamento de normas específicas, como a NBR 15270 (ABNT, 2005) e a NBR 15812 (ABNT, 2010) e o aumento da qualidade de fabricação, principalmente no que se refere à resistência à compressão.

Em Alagoas, a tendência é muito parecida ao que ocorreu nas demais regiões do país, com a utilização predominante inicial de blocos de concreto, seguida de crescimento do uso de blocos cerâmicos. Principalmente aplicadas nos programas governamentais citados anteriormente, nos primeiros edifícios de 2 a 4 pavimentos era comum a utilização de blocos cerâmicos estruturais, na época produzidos no próprio estado. A figura 1.8 apresenta uma fotografia de um desses exemplos de empreendimentos de interesse social Trata-se do residencial Comendador Antonio Silveira Coutinho situado no Bairro do Ouro Preto em Maceió, constituindo-se de 20 edifícios com 4 pavimentos e 4 apartamentos por andar, totalizando 320 unidades habitacionais.



Figura 1.8 – Fotografia do Residencial Comendador Antonio Silveira Coutinho.

Segundo informação colhida junto ao Presidente do Sindicato das Indústrias Cerâmicas (SINDICER) em Alagoas, atualmente não se tem registro junto ao sindicato sobre a produção comercial de bloco cerâmico estrutural no Estado de Alagoas. Por exemplo, na obra apresentada na figura 1.1 foi empregado um bloco cerâmico estrutural produzido na Paraíba, conforme informação do construtor. Além disso, o estado de Alagoas não dispõe de fábricas que produzam o bloco de concreto estrutural em grande escala e que atenda às recomendações normativas. Obras de grande porte utilizam blocos produzidos em outros estados ou, para obras de menor porte, a produção do bloco de concreto é executada no próprio canteiro, com todas as limitações que este tipo de produção pode gerar para o desempenho da edificação. A não existência de fábricas para produção do elemento básico em Alagoas, sem sombra de dúvida tem-se colocado como um gargalo para o desenvolvimento desse sistema construtivo local.

As figuras 1.9 e 1.10 apresentam exemplos recentes de empreendimentos habitacionais empregando-se alvenaria estrutural com bloco cerâmico em Maceió, ambos com seis apartamentos por andar, sendo o primeiro com 4 pavimentos (4 edifícios) e o seguinte com 5 pavimentos (3 edifícios).



Figura 1.9 - Fotografia do Condomínio Eco Villares Residence I.



Figura 1.10 - Fotografia do Condomínio Eco Villares Residence II.

1.2. Objetivos

Através da realização deste trabalho, busca-se realizar um estudo sobre a influência da resistência à compressão e da espessura da argamassa de assentamento na resistência à compressão da alvenaria estrutural por meio de um estudo experimental em prismas de blocos cerâmicos.

1.2.1. Objetivos específicos

Na avaliação do desempenho mecânico dos prismas de blocos cerâmicos busca-se especificamente atingir os seguintes objetivos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a alvenaria estrutural, seu comportamento à compressão, estudo de prismas e argamassa de assentamento;
- Caracterizar os diversos materiais e componentes empregados na confecção de prismas;
- Confeccionar e realizar ensaios de prismas de blocos cerâmicos;
- Analisar o comportamento mecânico dos prismas, sobre a tensão oriunda de ações de compressão;
- Analisar os resultados, comparando-os com os estudos teóricos identificados na literatura;
- Elaborar um modelo estatístico que considere a resistência à compressão e a espessura da junta horizontal no valor da resistência à compressão de prismas de blocos cerâmicos.

1.3. Justificativa

O estudo da argamassa justifica-se porque, como esta desempenha um papel fundamental de ligação entre os blocos da alvenaria, é muito importante entender as variáveis que influem nas suas características. É válido confirmar que, além de rigorosa seleção dos materiais para sua produção, é indispensável o controle da execução, garantindo-se a espessura estabelecida em projeto e as características do produto final.

Entender como a espessura e a resistência à compressão da argamassa de assentamento podem influenciar na resistência da alvenaria pode levar a otimização da utilização dos materiais associados.

O plano de trabalho procurou também avançar no conhecimento através da análise teórica e experimental minuciosa de prismas de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos não grauteados.

Finalizando, o projeto buscará interação com a cadeia produtiva da construção civil em Alagoas, visando à utilização da alvenaria estrutural, oferecer suporte técnico e científico, contribuindo para o emprego correto e seguro desse sistema construtivo.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta a importância do sistema alvenaria estrutural no desenvolvimento da resolução do problema habitacional no Brasil, um breve histórico da utilização e do desenvolvimento deste sistema no mundo, no Brasil e a situação em Alagoas. Segue-se uma explicação dos objetivos geral e específicos deste trabalho, bem como sua justificativa no contexto da pesquisa atual.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o tema alvenaria estrutural, enfocando principalmente os fatores que influenciam o comportamento mecânico de prismas e paredes confeccionadas com blocos estruturais. Estão também apresentadas as especificações das normas internacionais e nacionais para a determinação deste comportamento e o estado da arte sobre o comportamento de prismas durante o ensaio à compressão.

O capítulo 3 consta de uma descrição detalhada do planejamento e do trabalho experimental desenvolvido a respeito dos prismas não grauteados confeccionados com dois blocos cerâmicos e uma única junta horizontal. São apresentados os ensaios preliminares dos blocos e argamassas para a escolha das argamassas ideais e os ensaios finais das argamassas e prismas. Ao fim deste capítulo, apresenta-se uma análise de inferência estatística dos resultados dos ensaios, objetivando verificar a consistência dos dados utilizados nas análises do capítulo 4.

No capítulo 4 está apresentada a análise dos resultados, a construção de modelos de regressão e das superfícies de resposta determinadas pelos modelos para os resultados provenientes dos valores específicos e globais.

No capítulo 5 estão mostradas as considerações finais do trabalho e propostas de continuação da pesquisa.

Por fim, está apresentada a bibliografia consultada durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo apresentam-se, de forma resumida, estudos concernentes à alvenaria, identificados na literatura técnica e relacionados com os objetivos deste trabalho. Primeiro, foca os estudos relativos à relação dos componentes do prisma com sua resistência à compressão, seguido daqueles que destacam os fatores construtivos que afetam o comportamento mecânico de prismas e paredes. Identificou-se também, trabalhos relacionados aos materiais empregados, normas técnicas e mecanismo de ruptura dos prismas.

É importante ressaltar certos conceitos comuns apresentados nestes estudos que servem para o entendimento dos programas experimentais e resultados apresentados, conceitos também utilizados neste trabalho. Primeiro, pode-se distinguir, em alvenaria estrutural, os conceitos de componente e elemento. Componente é uma entidade básica (unidade, argamassa, etc.), que compõe, junto de outros componentes, a alvenaria. Elemento é uma parte suficientemente elaborada da estrutura (parede, pilar, cinta, verga, etc.), sendo formado por pelo menos dois componentes (RAMALHO & CORRÊA, 2003).

Outro conceito refere-se à eficiência da parede ou prisma. RAMALHO & CORRÊA (2003) define-a como a relação entre duas resistências: a “eficiência da parede” é a relação entre a resistência à compressão da parede e a resistência à compressão do bloco; a “eficiência do prisma” é a relação entre a resistência à compressão do prisma e a resistência à compressão do bloco (ou da argamassa). Autores como BARBOSA (2008) também citam a relação entre as resistências à compressão da parede e do prisma. Esta relação também é conhecida como “fator de eficiência” e “índice de eficiência” da parede ou do prisma.

2.1. Relação da resistência de prismas com seus componentes

Os estudos estão voltados para análise da resistência à compressão da alvenaria (ou de prisma), sendo que ela está relacionada com os seus constituintes, quais sejam: a resistência à

compressão, a resistência à tração e a absorção da unidade (tijolo ou bloco), resistência à compressão e espessura da argamassa de assentamento, resistência de ligação na interface unidade-argamassa, esbeltez do prisma, entre outros.

Dentre os fatores que exercem influência na resistência à compressão da alvenaria, a resistência à compressão dos blocos é muito importante. A sua composição e geometria alteram a própria resistência da unidade, interferindo, junto com a resistência à tração, na resistência final do conjunto.

Num estudo desenvolvido por PRUDÊNCIO JR (1986), foram ensaiados elementos de alvenaria confeccionados com tijolos maciços fabricados em cinco olarias diferentes, variando-se a esbeltez e o padrão de assentamento dos prismas, com um único tipo e espessura de argamassa de assentamento. Seu programa experimental incluiu os ensaios à compressão das unidades, da argamassa, dos prismas e de paredes confeccionadas com os mesmos materiais. Foram confeccionados e ensaiados três tipos de elementos: prismas com quatro fiadas de tijolos contrafiadas¹ (sem junta vertical); pequenas paredes com cinco fiadas não contrafiadas (com junta vertical) e com sete fiadas não contrafiadas, adaptando-se às exigências de diferentes normas (figura 2.1). Uma quarta amostra foi confeccionada com maior cuidado na mão de obra.

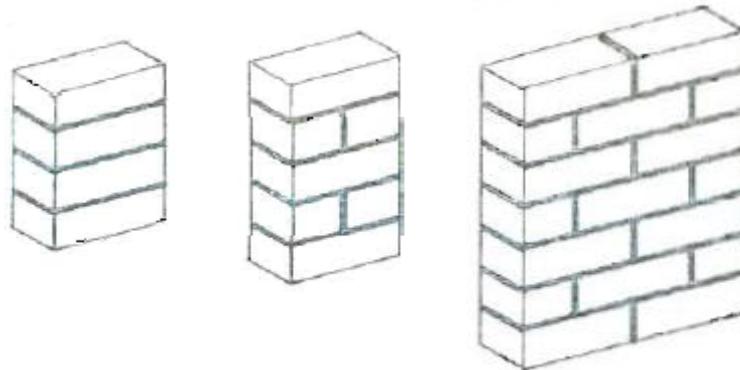


Figura 2.1 - Tipos de elementos ensaiados por PRUDÊNCIO JR (1986).

Os resultados foram analisados estatisticamente por programas computacionais que determinaram boas relações (coeficiente de correlação alto) entre os resultados das unidades, dos prismas e das paredes, determinando curvas (modelos) lineares para a eficiência

¹ Fiadas contrafiadas usam unidades de mesmo tamanho, assentadas uma exatamente sobre as outras, seguindo o mesmo prumo, sem juntas verticais e sem amarração. Fiadas não contrafiadas usam unidades de mesmo modulação mas de tamanhos diferentes (um bloco e meio bloco, por exemplo) assentados e amarrado também com juntas verticais.

parede/prisma e curvas não lineares para as eficiências parede/tijolo e prisma/tijolo. Também foi constatada a pequena influência do padrão de assentamento dos prismas e a grande influência da qualidade da mão de obra na confecção dos prismas. Vale salientar que este estudo, conforme destacado pelo próprio autor, é restrito aos materiais utilizados, pois não houve variação do tipo de unidade nem do tipo (resistência) de argamassa.

Quanto à variação da geometria da seção transversal da unidade, SANTOS *et al.* (2007) investigaram a influência desta (em blocos cerâmicos) na resistência à compressão de prismas confeccionados com três blocos e pequenas paredes. Seu programa experimental utilizou oito diferentes geometrias de blocos (figura 2.2) e três resistências e dois tipos de argamassamento – total (preenchimento de todas as paredes do bloco) ou longitudinal (preenchimento somente das paredes longitudinais do bloco) com a argamassa de assentamento.

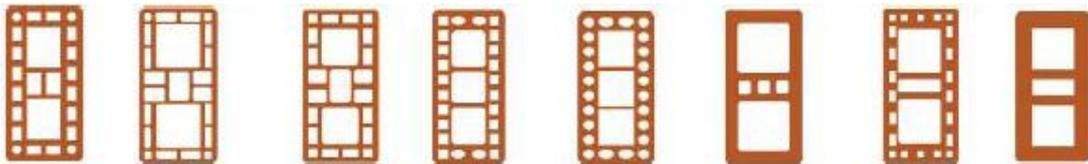


Figura 2.2 - Diferentes geometrias de blocos ensaiados por SANTOS *et al.* (2007).

Neste trabalho é possível observar a grande influência da geometria do bloco, da resistência à compressão da argamassa e do tipo de argamassamento na resistência à compressão de prismas e pequenas paredes. Aumento da espessura das paredes e septos do bloco, argamassamento total e maior resistência à compressão da argamassa de assentamento conduzem a aumento da resistência dos prismas e pequenas paredes. Foram utilizados prismas de três fiadas, segundo os autores, para reduzir o efeito gerado pelo confinamento dos pratos da prensa sobre o bloco central do prisma. O estudo não levou em consideração a resistência à compressão dos blocos nem a variação da espessura da argamassa.

A geometria dos blocos cerâmicos também foi assunto de pesquisa de CARVALHO (2003). Ele desenvolveu um extenso programa experimental, ensaiando prismas confeccionados com três blocos com junta a prumo, seis geometrias diferentes de blocos (figura 2.3) e os efeitos de três diferentes relações altura/espessura (h/t), de dois traços de argamassa de assentamento, de duas espessuras de juntas (10 milímetros e 25 milímetros), de duas quantidades de fiadas (três e quatro) e de duas formas de assentamento (total ou só nas paredes longitudinais). Foram determinadas as resistências à compressão e à tração dos blocos

cerâmicos, a resistência à compressão e o módulo de deformação das argamassas, e a resistência à compressão, módulo de deformação e forma de ruptura dos prismas das combinações acima citadas.

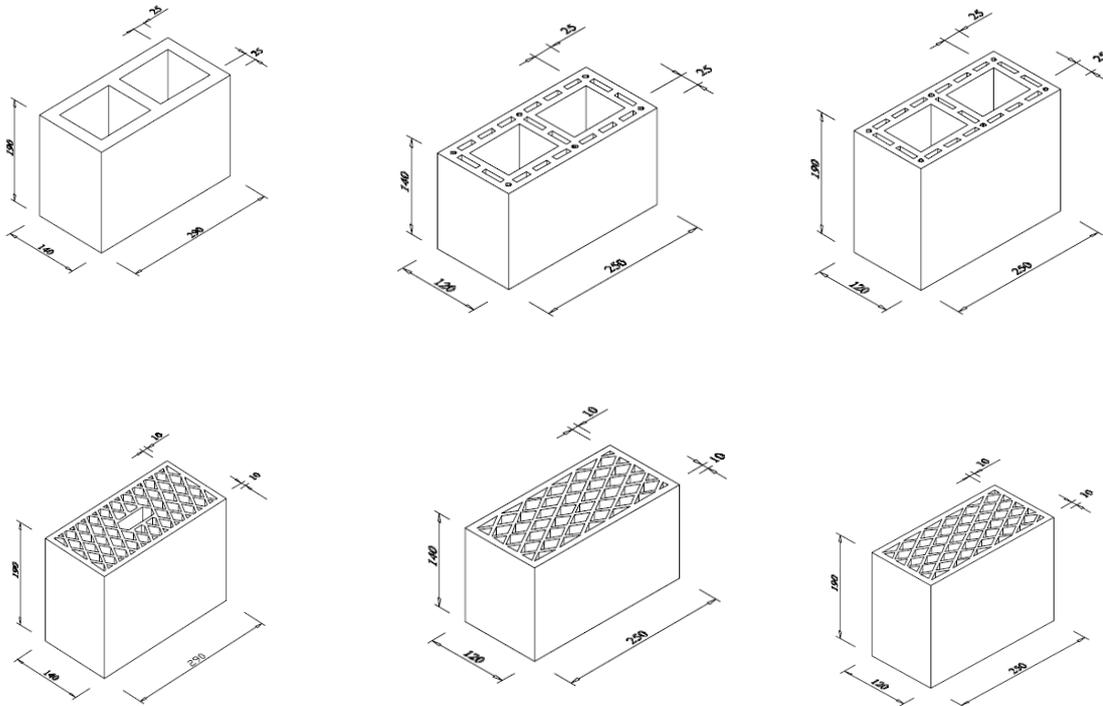


Figura 2.3 - Geometrias dos blocos pesquisados por CARVALHO (2003).

Os resultados dos ensaios conseguiram determinar que as características geométricas dos blocos (configuração da seção transversal) nem influenciaram na resistência à compressão dos prismas nem no efeito da flambagem dos prismas; que os prismas com bloco de menor altura apresentaram maiores resistências do que os com os de maiores alturas; que os prismas executados com argamassa mais resistentes apresentaram maiores resistências que os confeccionados com argamassa menos resistentes, porém, o aumento da resistência nos prismas não foi proporcional para cada tipo de bloco.

Os resultados também levam a conclusão de que existe uma tendência de diminuição da resistência na medida em que aumentou a espessura de junta; que deve-se molhar previamente os blocos cerâmicos antes do assentamento; que os prismas com argamassa em toda superfície apresentaram maiores valores de resistência do que os prismas com argamassa somente na face externa e que quanto maior a área da argamassa, maior a resistência do prisma; que o aumento da resistência à compressão da argamassa gera aumento do módulo de deformação dos prismas; por fim, que notou-se a diminuição do fator de eficiência com o

aumento da espessura de junta e um incremento em função da molhagem dos blocos. Apesar do tratamento estatístico dado aos resultados, usando-se inclusive análise de variância (ANOVA), não foram determinadas relações entre as combinações ensaiadas.

Trabalho semelhante foi desenvolvido por STEIL (2003) que estudou a influência da geometria do bloco de concreto e do tipo de argamassa no comportamento mecânico de prismas confeccionado com três blocos (figura 2.4) de concreto (para evitar o efeito de confinamento dos pratos da prensa). Seu programa experimental teve o objetivo de comparar o fator de eficiência, a deformabilidade e a distribuição de tensões (por meio de modelagem por elementos finitos) de prismas confeccionados com cinco geometrias de blocos de concreto e três argamassas de assentamento, duas mistas de cimento e cal e uma industrializada.



Figura 2.4 - Prismas ensaiados por STEIL (2003)

Foram determinadas e comparadas as resistências à compressão e à tração e o módulo de deformação longitudinal dos blocos de concreto, a resistência à compressão e o módulo de deformação longitudinal das argamassas e a resistência à compressão e o módulo de deformação longitudinal dos prismas.

O trabalho concluiu que blocos possuindo furos mais cônicos apresentam fatores de eficiência mais baixos; que os prismas feitos com a argamassa industrializada apresentaram menores resistências do que com as argamassas mistas (devido a maior retenção de água). Este trabalho não contemplou a variação da espessura da argamassa como variável e não apresentou análise estatística dos resultados.

Outro fator que pode influenciar a resistência à compressão da alvenaria é a zona de ligação entre a argamassa e a unidade, que pode ser determinada pela resistência cisalhante

entre elas. Abordando este assunto, destaca-se o trabalho de SOLÓRZANO & SABBATINI (1996), que desenvolveram um estudo experimental onde ensaiaram pequenas paredes (dois blocos de comprimento por três de altura) à compressão e prismas de quatro blocos à flexão (figura 2.5), confeccionados com blocos de concreto. As variáveis utilizadas foram o traço da argamassa, o tipo de aglomerante secundário (cal e saibro) e o tipo de bloco (absorção inicial). Eles optaram por confeccionar duas séries de paredes e prismas, onde variou-se o cuidado da mão de obra, ou seja, o mesmo pedreiro confeccionou uma série sem erros de execução e outra executada com os erros mais frequentes observados na prática. Esses erros incluem tempo de aplicação da argamassa, espessura errada da camada de assentamento, e reaplicação de água após algum tempo.

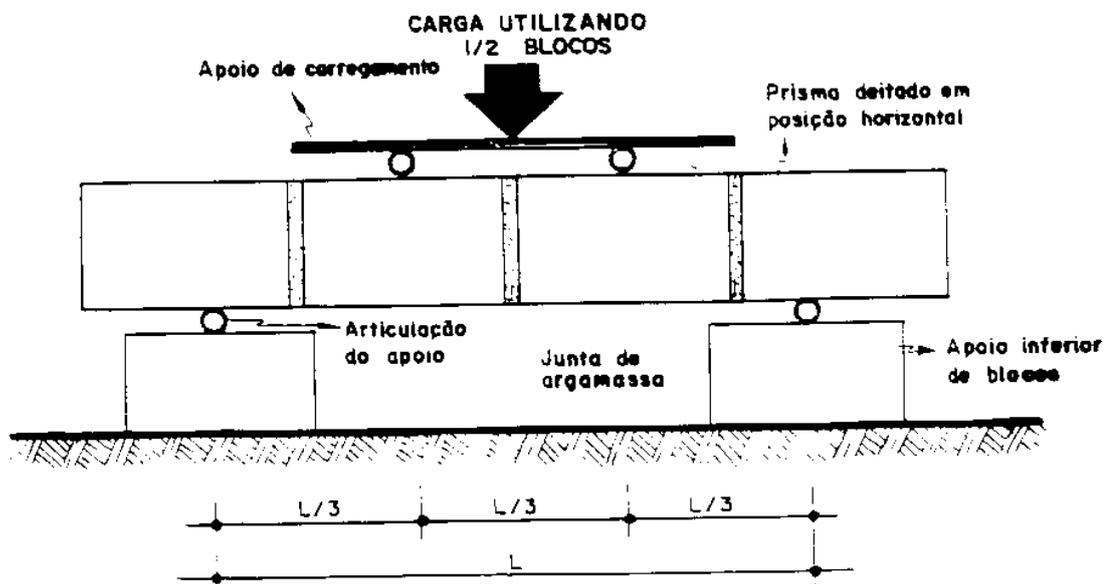


Figura 2.5 - Ensaio de aderência por flexão – extraído de SOLÓRZANO & SABBATINI (1995).

Como resultado, este estudo atestou que, quanto à aderência argamassa-bloco, as resistências mais elevadas ocorreram nas argamassas com o maior consumo de cimento e com menor consumo de cal, com maior consumo de cimento e menor consumo de saibro nos blocos com absorção inicial elevada e com consumo intermediário de cimento e saibro, para qualquer faixa de absorção inicial do bloco.

Quanto à resistência à compressão, confirmou que ela depende principalmente da absorção inicial do bloco (pois blocos mais porosos geralmente são menos resistentes) e que não sofre influência significativa da argamassa. Quanto ao módulo de deformação, a absorção inicial tem uma forte influência e as características da argamassa têm uma fraca influência sobre ela. A mão de obra não incide significativamente nos valores da resistência à

compressão das pequenas paredes, mas incide significativamente na resistência de aderência entre o bloco e a junta de argamassa. Este trabalho não considerou a variação da espessura da argamassa de assentamento.

Outro pesquisador que estudou esta ligação foi SARANGAPANI *et al* (2005). Ele estudou a influência da ligação argamassa-bloco em prismas confeccionados com tijolos maciços cerâmicos queimados (muito usados na Índia). Em seu programa experimental, determinou as resistências à compressão e à flexão, a absorção e o módulo de deformação de três tipos de tijolos e a resistência à compressão e módulo de deformação de quatro tipos de argamassa (duas simples, uma mista de cimento e cal e outra mista de solo-cimento). Depois, foram confeccionados prismas de três e cinco tijolos de altura e determinadas as resistências à flexão, à tração (figura 2.6) e ao cisalhamento da ligação argamassa-bloco e a resistência à compressão das combinações dos tijolos com as argamassas.

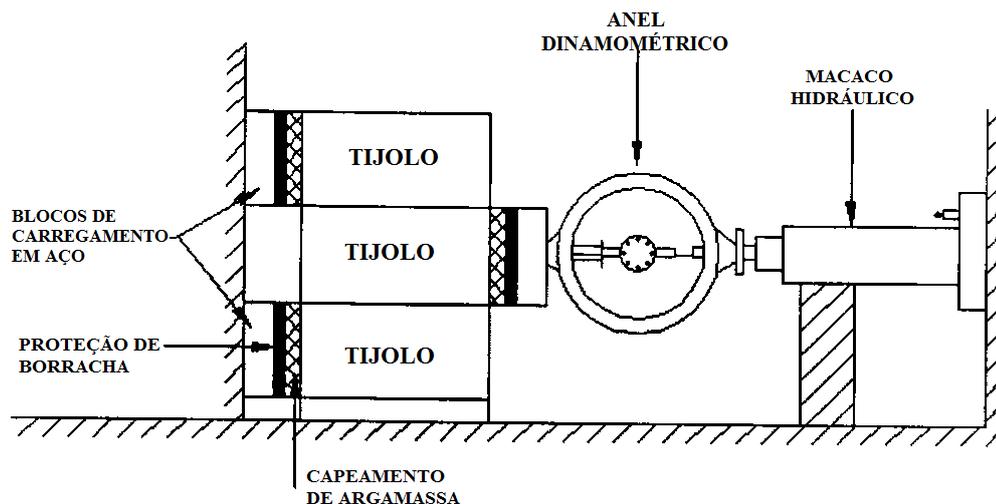


Figura 2.6 - Ensaio de tração realizado por SARANGAPANI *et al.* (2005).

Esta pesquisa comprovou que argamassas mistas (com mais de um aglomerante) possuem uma melhor aderência com os tijolos cerâmicos, em relação às argamassas simples e que a resistência da ligação argamassa-bloco tem relação direta com a resistência à compressão dos prismas. A pesquisa não levou em consideração a variação na espessura da camada de assentamento.

Como elemento essencial na confecção da alvenaria, a resistência à compressão da argamassa de assentamento também exerce certa influência nas propriedades mecânicas dos prismas. SABBATINI (1986) pesquisou e resumiu as principais características para argamassas utilizadas em alvenaria estrutural. Faz um levantamento contemporâneo das

recomendações e requisitos quanto às argamassas (trabalhabilidade, retenção de água, aderência, resistência à compressão, resiliência, durabilidade e classificação) e quanto aos materiais (granulometria e análise petrográfica de areias e composição dos aglomerantes) em diversos estudos e normas espalhados pelo mundo. A tabela 2.1 resume suas conclusões. Aborda também os principais ensaios relacionados à argamassa (em laboratório e no campo), bem como recomendações de sua composição e quanto à sua fabricação em função da utilização.

Tabela 2.1 - Variação nas propriedades de uma argamassa – Extraído de SABBATINI (1986).

Propriedade	Aumento na proporção de cal no aglomerante	
Resistência à compressão	Decresce	Propriedades melhoradas com maior teor relativo de cimento
Resistência à tração	Decresce	
Capacidade de aderência	Decresce	
Durabilidade	Decresce	
Impermeabilidade	Decresce	
Resistência a altas temperaturas	Decresce	
Resistências iniciais	Decresce	
Retração na secagem inicial	Cresce	Propriedades melhoradas com maior teor relativo de cal
Retenção de água	Cresce	
Plasticidade	Cresce	
Trabalhabilidade	Cresce	
Resiliência	Cresce	
Módulo de elasticidade	Decresce	
Retração na secagem reversível	Decresce	
Custo	Decresce	

Além da resistência à compressão, a espessura da argamassa de assentamento também é de fundamental importância no comportamento mecânico da alvenaria. MORENO JR & ALBUQUERQUE (2002) desenvolveram trabalho sobre prismas confeccionados com blocos de concreto, variando a espessura e a resistência da argamassa de assentamento. Eles utilizaram três argamassas com resistências diferentes e quatro espessuras de juntas (5, 10, 15 e 20 mm), cujas combinações totalizaram 60 prismas confeccionados com dois blocos de concreto. Tanto as argamassas quanto os blocos e os prismas foram ensaiados à compressão, determinando-se sua resistência e o modo de ruptura (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Prisma ensaiado por MORENO JR. & ALBUQUERQUE (2002).

Os resultados deste estudo demonstraram que a resistência à compressão dos prismas de dois blocos diminui com o aumento da espessura da argamassa de assentamento, independente da resistência à compressão da mesma. Foi comprovado também que este decréscimo de resistência é maior para as argamassas com uma menor resistência à compressão.

LEÃO & PERDIGÃO (2004), realizaram um trabalho inicial no Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade Federal de Alagoas onde foram executados ensaios com blocos estruturais de concreto do mesmo lote (mesma resistência) e uma argamassa industrializada à compressão. Os prismas de dois blocos (figura 2.8) foram confeccionados variando-se a espessura da camada de assentamento de argamassa (quatro espessuras). A argamassa foi confeccionada seguindo rigorosamente as especificações do fabricante.

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da espessura da argamassa de assentamento na resistência à compressão dos prismas por meio da comparação dos fatores de eficiência destes. Como resultado, as comparações comprovaram a relação inversa entre espessura da argamassa de assentamento e a resistência e a eficiência do prisma confeccionado com blocos de concreto. Este trabalho utilizou um único tipo de argamassa; logo, só consegue caracterizar a relação da espessura da argamassa na resistência do prisma.



Figura 2.8 - Prisma confeccionado por LEÃO & PERDIGÃO (2004).

Os trabalhos de MORENO JR. & ALBUQUERQUE (2002) e LEÃO & PERDIGÃO (2004) abordaram os aspectos aqui estudados porém não fizeram uma análise experimental completa dos resultados e também trabalharam apenas com blocos de concreto.

Um trabalho muito completo, abrangendo quase todos os fatores influentes, foi executado por ARYANA (2006). Primeiro ele elaborou um estudo estatístico detalhado com vários dados de ensaios da resistência à compressão de prismas confeccionados com tijolos cerâmicos furados já existentes, que foram fontes de dados também para as recomendações normativas vigentes nos Estados Unidos da América. Para completar as faixas onde não havia dados, ele executou ensaios em prismas de tijolos.

Em seu programa experimental, ele determinou a resistência à compressão de três tipos de tijolos (figura 2.9) e seis tipos de argamassa. Para relacionar as variáveis, confeccionou e determinou a resistência à compressão de prismas, combinando os tijolos e as argamassas e duas alturas de prismas. Com os resultados, ele completou a base de dados existente e, utilizando análise de regressão, elaborou vários modelos matemáticos tentando se enquadrar nas recomendações da norma americana. Os modelos identificaram e quantificaram a influência de fatores tais como o tipo de tijolo, o tipo de argamassa, ausência ou presença de grauteamento, entre outros.



Figura 2.9 - Um dos tipos de tijolos ensaiados por ARYANA (2006).

No entanto, este estudo não levou em consideração a variação da espessura da argamassa de assentamento nas propriedades mecânicas dos prismas.

Estudos também têm apontado a influência do módulo de deformação dos componentes na resistência à compressão do prisma. Pode-se citar o trabalho executado por MOHAMAD (2007), que analisou os mecanismos de ruptura de prismas de blocos de concreto de vários tamanhos (esbeltezas). Em seu programa experimental, determinou a resistência à compressão e à tração por compressão e por flexão, junto com o módulo de deformação e o coeficiente de Poisson de um tipo de bloco de concreto, a resistência à compressão (em formas cilíndricas e cúbicas) e à tração na flexão, o módulo de deformação e o coeficiente de Poisson de três tipos de argamassas normalizadas.

Foram confeccionados prismas de três blocos com duas configurações (com e sem junta vertical na fiada central). Os prismas foram ensaiados à compressão, tendo-se a preocupação de determinar seu módulo de deformação longitudinal e coeficiente de Poisson da parte do prisma com uma junta horizontal e com as duas juntas horizontais (Figura 2.10a) e do modo de ruptura. Paredes de oitenta centímetros de largura por um metro de altura também foram ensaiadas (Figura 2.10b)

Este estudo chegou à conclusão que prismas confeccionados com três fiadas e uma junta vertical obtêm resistência à compressão e módulo de deformação longitudinal mais próximos à das paredes, ou seja, que prismas com esta configuração representam melhor as características da alvenaria. Também foi observado que o módulo de deformação da alvenaria diminui com o decréscimo da resistência à compressão (e conseqüentemente do módulo de deformação) da argamassa. O autor utilizou os resultados encontrados para gerar modelos numéricos adequados para prever a ruptura dos prismas em função das características dos seus componentes.

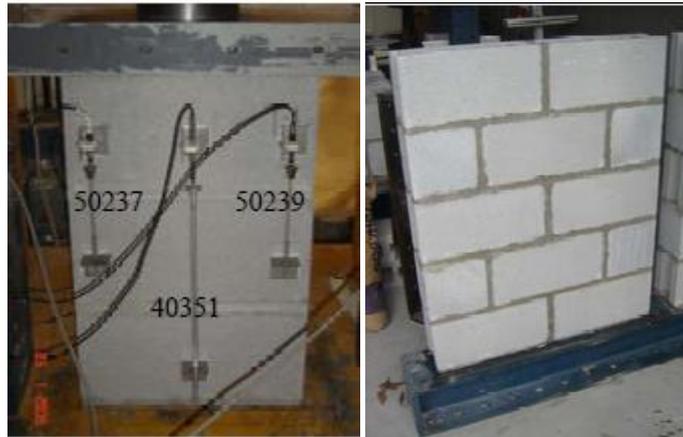


Figura 2.10 - (a) Prisma instrumentado e (b) parede estudados por MOHAMAD (2007).

Trabalho interessante foi desenvolvido por GOMES (2001). Seu objetivo foi desenvolver um modelo matemático capaz de simular numericamente o ensaio de compressão uniaxial de prismas de blocos tanto de concreto quanto de material cerâmico. Para validar o modelo foram estudados seis tipos de prismas: prismas simples de concreto com argamassamento total e lateral, prismas simples de material cerâmico com argamassamento total, prisma grauteado de concreto com argamassamento total e lateral e prismas grauteado de material cerâmico com argamassamento total. A análise tridimensional utilizou elementos finitos para discretizar os materiais contínuos e para representar as interfaces.

GOMES (2001) obteve as propriedades elásticas e plásticas dos materiais empregados (argamassa, blocos e graute) dos trabalhos de MOHAMAD (1998), ROMAGNA (2000) e MENDES (1998). A partir destas propriedades, efetuou-se a modelagem dos ensaios de compressão de prismas, por meio do programa computacional *DIANA*. Todos os prismas considerados apresentaram espessura de 10 milímetros.

Compararam-se os resultados obtidos pelo programa com os resultados experimentais, chegando a seguintes conclusões: a) os diagramas tensão-deformação experimental e analítico (do programa) mantêm-se relativamente próximos; b) esta proximidade foi mais bem alcançada quando se trabalhou com relações entre os módulos de deformação longitudinal da argamassa e do bloco não muito baixas ou muito elevadas, devido às redistribuições bruscas de tensões; c) a resposta estrutural do prisma é muito sensível às variações nas propriedades plásticas das interfaces, assim como as mudanças nas condições de contorno; d) de maneira geral, o modelo apresentou bons resultados para as resistências à compressão dos prismas, para todas as combinações de materiais, modos de assentamentos e proporções de rigidez; e) a compatibilização das propriedades mecânicas dos componentes dos prismas, isto é, utilizar

materiais com propriedades semelhantes, parecer ser uma boa recomendação a nível de projeto.

2.2. Fatores de influência nos ensaios de prismas

Podem-se citar alguns fatores específicos nos ensaios de prismas que são apontados como influenciadores nos resultados: tipo de placa de ensaio, esbeltez dos prismas e presença ou ausência de junta vertical.

As placas maciças utilizadas nos ensaios para determinação da resistência de elementos e componentes geram confinamento durante o ensaio, diferentemente do que acontece na alvenaria. BARBOSA (2008) realizou uma detalhada investigação experimental com o objetivo de identificar e correlacionar as propriedades mecânicas do concreto e da argamassa de assentamento com o comportamento estrutural de blocos vazados de concreto, prismas e paredes. Neste trabalho, analisou-se principalmente o efeito de confinamento que se apresenta nos ensaios com blocos isolados e a influência do efeito de confinamento e do processo de cura das juntas de argamassa.

O efeito de confinamento foi praticamente anulado por utilizar placas constituídas por uma série de filamentos de aço delgadas, chamadas de placas-escova (figura 2.11), que minimizam o efeito da restrição lateral. O concreto utilizado na confecção dos blocos era fluído, com o objetivo de comparar as propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão e módulo de deformação) do bloco com os de corpos de prova cilíndricos. A influência do processo de cura da argamassa foi investigada por se moldar corpos de prova em fôrmas cilíndricas de aço e cúbicas de gesso e concreto (simulando a absorção do bloco no prisma).

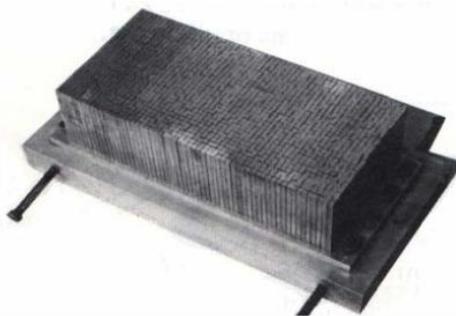


Figura 2.11 - Placa-escova usada por BARBOSA (2008).

Seu programa experimental incluiu: a) determinação da resistência à compressão (corpos de prova cilíndricos) e resistência à tração (por compressão diametral e à flexão) de três traços de concreto, comparando-as com as resistências à compressão e à tração dos blocos; b) determinação da resistência à compressão (triaxial em três níveis) da argamassa em corpos de prova cilíndricos e cúbicos e da resistência à tração por compressão diametral e à flexão da argamassa, para dois traços de argamassa; c) determinação da resistência à compressão e deformabilidade de prismas confeccionados com três blocos e miniparedes (79 cm x 79 cm), comparando com os resultados dos componentes e entre elementos. Para a determinação das resistências à compressão dos concretos, blocos e argamassas, foram ensaiados corpos de prova tanto com placas-padrão quanto com placas-escova.

As propriedades dos materiais obtidas nos experimentos foram implementadas num modelo numérico de elementos finitos que representa o comportamento dos diversos elementos de alvenaria à compressão. Correlações e formulações algébricas foram estabelecidas para análise do comportamento e previsão quantitativa da resistência e da deformabilidade dos blocos, prismas e paredes.

Como resultado, observaram-se as diferenças das propriedades mecânicas do concreto ensaiados com corpos de prova cilíndricos e como bloco, devido ao efeito de confinamento gerado pelas diferentes formas geométricas, bem como o efeito das placas de ensaio sobre a resistência à compressão tanto no concreto quanto na argamassa, também devido ao confinamento. Não foram observadas diferenças significativas do módulo de deformação entre os ensaios realizados com placas-padrão e placas-escova. A deformação dos prismas e das miniparedes sofre uma forte influência das propriedades da argamassa de assentamento, mas a resistência à compressão não sofre influência significativa. A perda de água da argamassa de assentamento, devido ao contato com o bloco no prisma, aumenta suas propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de deformação longitudinal).

Entretanto, não foi verificada a influência da espessura da camada de assentamento de argamassa na resistência dos prismas e miniparedes neste trabalho.

Quanto à configuração do prisma, MOTA (2001) realizou um estudo experimental com prismas de blocos de concreto celular autoclavado (bastante utilizado em países de clima frio) e de concreto convencional, dando atenção especial à resistência à compressão e ao módulo de deformação dos mesmos. Os prismas foram confeccionados com três camadas de blocos contrafiadas, com duas juntas horizontais e uma junta vertical. O estudo verificou o desempenho dos prismas tendo como variáveis o tipo de bloco (concreto convencional ou

concreto celular autoclavado), a resistência da argamassa de assentamento (uma para cada tipo de bloco), a existência ou não de junta vertical no bloco central do prisma e o preenchimento ou não desta junta vertical com argamassa.

Foram determinados a resistência à compressão e o módulo de deformação das argamassas e dos prismas de três fiadas. A configuração dos prismas consistiu em blocos serrados na altura média, posicionados na base e topo; e, na fiada central, foram usados blocos inteiros ou dois meio-blocos para deixar a junta vertical. O motivo apontado pelo autor para se usar prismas com esta configuração foi justificado por representar melhor o desempenho de paredes.

Verificou-se, como resultado, que a utilização de junta vertical (preenchida ou não) não afeta a resistência à compressão do prisma nem seu modo de ruptura, mas não foi concludente com respeito ao efeito sobre o módulo de deformação do prisma. Os resultados foram comparados estatisticamente, para o mesmo tipo de bloco. O autor também não verificou a influência da espessura das juntas na resistência dos prismas.

Nota-se nestes trabalhos a abrangência da diversidade de parâmetros que podem influenciar a resistência à compressão de prismas de blocos ou tijolos, mas a grande maioria deles não se preocupou com uma análise estatística dos resultados, principalmente da influência de cada fator sobre estes, utilizando análise experimental. A análise estatística é importante porque pode aferir maior confiabilidade aos resultados.

Outro aspecto identificado na literatura é o estudo sobre a influência da argamassa de revestimento na capacidade resistente de alvenarias. Pode-se destacar, por exemplo, os trabalhos orientados pelo professor Romilde Almeida de Oliveira, na Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) e na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), voltados para a preocupação com a recuperação estrutural de alvenaria. Pode-se citar os trabalhos de ARAÚJO NETO (2006) e MOTA (2006), que comprovaram o aumento da resistência à compressão de prismas com o revestimento dos mesmos com argamassa (chapisco e reboco).

2.3. Normalização

Apresentam-se a seguir a forma como algumas das principais normas internacionais abordam essa a relação entre os componentes da alvenaria e a resistência à compressão de paredes, em alvenarias.

2.3.1. A norma europeia

Na norma europeia EN 1996 (2005), conhecida também como Eurocode 6, as unidades são classificadas de acordo com o volume ou área de vazios ou reentrâncias, espessura das paredes e septos e direção dos furos (Grupos 1, 2, 3 e 4). A resistência à compressão do bloco deve ser normalizada para uso no cálculo da alvenaria. A argamassa pode ser definida como: para uso geral, para camada delgada ou argamassa leve, de acordo com seu material constituinte; e considerada como: argamassa projetada ou argamassa prescrita, de acordo com sua composição. As argamassas projetadas recebem classificação de acordo com sua resistência à compressão, por exemplo M5 significa argamassa (*Mortar*) com 5 N/mm^2 de resistência. A resistência mínima para a argamassa é de 1 N/mm^2 .

As propriedades mecânicas da alvenaria são determinadas em ensaios em corpos de prova de paredes ou pela resistência dos elementos que a compõem e a resistência à compressão da alvenaria pode ser calculada mediante a equação 1 (para alvenaria com propósito geral) ou equação 2 (para alvenaria com junta fina).

$$f_k = K f_b^{0,7} f_m^{0,3} \quad \text{Equação 1}$$

$$f_k = K f_b^{0,85} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: f_k é a resistência característica à compressão da alvenaria;

f_b é a resistência característica à compressão normalizada da unidade;

f_m é a resistência característica à compressão da argamassa;

K é um fator tabelado relacionado com o tipo da unidade e o tipo de argamassa.

Segundo esta norma, a resistência à compressão da unidade, calculada mediante ensaio prescrito na EN 771 (2003), deve ter coeficiente de variação máximo de 25 %.

2.3.2. A norma australiana

A norma australiana AS 3700 (2007), aplicada a qualquer tipo de alvenaria, determina que a resistência da alvenaria seja calculada em função dos elementos que a formam – tipo de assentamento, composição e espessura da junta de argamassa e altura e resistência característica à compressão da unidade, de acordo com as equações 1 e 2.

$$f_m' = k_h f_{mb}' \quad \text{Equação 3}$$

$$f_{mb}' = k_m \sqrt{f_{uc}'} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: f_m' é a resistência característica à compressão da alvenaria;

k_m é um fator de correção tabelado em função do tipo de assentamento e da resistência da unidade;

k_h é um fator de correção tabelado em função da relação entre a altura da unidade e a espessura da junta de argamassa;

f_{uc}' é a resistência característica à compressão da unidade

Como alternativa, pode-se testar prismas confeccionadas com os mesmos materiais e mão de obra da alvenaria ou extraídos de alvenaria já construída. Os prismas devem ter relação altura/largura entre 2 (dois) e 5 (cinco), mas com, no mínimo, 3 (três) fiadas. A resistência da alvenaria é calculada em função da resistência destas paredes, sendo corrigida por um fator ligado à relação altura/largura.

Por esta norma, a espessura das juntas verticais e horizontais de argamassa não deve exceder 10 mm (com tolerância de ± 3 mm). A argamassa de assentamento é classificada de M1 a M4, de acordo com o traço e os aglomerantes empregados (cimento simples ou composto, cal ou cimento de alvenaria). Ela considera unidade sólida aquela que contém no máximo 10 % de área de furos e distingue unidade furada (*cored unit*) de unidade vazada (*hollow unit*), estes últimos com argamassamento somente sobre as paredes externas, e unidade com furos na horizontal.

2.3.3. A norma americana

A norma americana ACI 530 (2008) recomenda que a resistência da alvenaria seja calculada em função dos elementos que a formam: tipo de unidade (sólida ou vazada, cerâmica, de concreto, etc.), resistência da argamassa e tipo de argamassa (aglomerante principal que a compõe). A resistência à compressão da alvenaria é extraída de tabelas, que foram determinadas com base nos dados catalogados nas últimas décadas.

A argamassa recebe classificação quanto à resistência (M, S, N ou O)² e quanto ao tipo de aglomerantes utilizados (cimento e cal, cimento de argamassa – *mortar cement* – ou cimento de alvenaria – *masonry cement*). A espessura máxima da junta é de 5/8 de polegadas (15,9 mm).

A especificação americana define a unidade sólida, como o elemento cerâmico, de concreto ou de outro material, que tenha área líquida igual ou maior que 75% de sua área bruta e unidade vazada àquela que tem área líquida menor que 75% de sua área bruta. Cada tipo de unidade, tijolo (ou briquete) ou bloco, recebe classificações, normalmente de acordo com ao tipo de exposição, aplicação, resistência e peso. Os elementos devem ser ensaiados isoladamente de acordo com as normas específicas da *American Society of Testing and Materials* (ASTM).

O ACI 530 (2008) considera o método para determinação da resistência da alvenaria pela resistência das unidades conservativo. Como alternativa, pode-se ensaiar prismas confeccionados com os mesmos materiais, ensaiados conforme a ASTM C 1314 (ASTM, 2009). A resistência do prisma deve ser corrigida em função da esbeltez (relação altura/espessura) dos mesmos.

² Os tipos de argamassa seguem a denominação *MaSoNwOrK* (trabalho de pedreiro, em inglês), *M* para a mais forte e *K* para a mais fraca. A argamassa tipo K não é usada em alvenaria estrutural (DUARTE, 1999)

2.3.4. Normas brasileiras

A norma brasileira para cálculo de alvenaria estrutural com blocos de concreto NBR 10837 (ABNT, 1989) determina que as tensões admissíveis para a alvenaria devem ser baseadas na resistência de prismas exclusivamente confeccionados com dois blocos inteiros e uma junta horizontal de argamassa, ensaio preconizado na NBR 8215 (ABNT, 1983). A norma admite também ensaios em paredes, seguindo os procedimentos da NBR 8949 (ABNT, 1985), utilizando corpos de prova representativos com dimensões mínimas de 1,20 metro de largura por 2,60 metros de altura.

A NBR 8798 (ABNT, 1985) trata dos requisitos quanto à execução de obras em alvenaria estrutural em blocos de concreto. Determina o controle das propriedades dos materiais utilizados na alvenaria no que diz respeito a dosagens, critérios de desempenho, armazenamento, execução e controle de produção. Argamassa com consistência mínima de 230 ± 10 milímetros, retenção de água mínima de 75% e resistência à compressão mínima de 9 MPa são algumas das exigências desta norma. Até pouco tempo, esta norma era usada tanto para blocos estruturais de concreto quanto para blocos cerâmicos (RAMALHO & CORREIA, 2003).

Recentemente entrou em vigor uma norma específica para alvenaria estrutural em blocos cerâmicos. A NBR 15812 (ABNT, 2010) determina que a resistência à compressão da argamassa deve ser, no mínimo, de 1,5 MPa e, no máximo, 70% da resistência à compressão característica da unidade na área líquida (descontando os vazios). A resistência à compressão da alvenaria é determinada por meio de ensaios à compressão de paredes segundo a NBR 8949 (ABNT, 1985) ou estimada como 70% da resistência à compressão de prismas ou ainda como 85% da resistência de pequenas paredes. Esta resistência deve ser corrigida em função da área de argamassamento dos blocos.

A NBR 15812 (ABNT, 2010) ainda recomenda que a espessura das juntas horizontais e verticais de argamassa deve ter 10 ± 3 mm, com exceção da junta de assentamento inicial, que pode variar entre 5 e 20 mm, quando precisa-se corrigir o nivelamento da laje. O anexo A desta norma define a metodologia para os ensaios de prisma, que devem ser confeccionados com dois blocos principais sobrepostos, com argamassamento entre eles em toda a área líquida do bloco. O anexo B da norma define a metodologia para os ensaios de pequenas paredes (ou prismas contrafiados) com comprimento mínimo equivalente a dois blocos e de altura equivalente a 5 vezes a espessura do bloco e não inferior a 70 cm.

2.4. Outras referências

Outras publicações técnicas também apontam a importância da alvenaria, destacando suas vantagens e técnicas de construção. BEALL (2004) trata da importância da alvenaria em construções residenciais, desde as características do concreto fresco e endurecido, seus componentes e adições, detalhes construtivos de projeto, lançamento, acabamento e cura. Aborda também os materiais e as propriedades básicas da alvenaria: unidades (tijolos cerâmicos, blocos de concreto), rochas ornamentais, argamassa e groute.

Apesar de focar principalmente alvenarias de blocos de concreto, este trabalho cobre também alvenarias de tijolos cerâmicos e de rocha quanto às técnicas de construção, tipos de amarração da alvenaria, tipos de juntas, acessórios para reforço e limpeza. Aborda também tipos e detalhes construtivos das alvenarias usadas em fundações, camadas externas, pavimentação (calçadas e vias), paredes de jardins e paredes de contenção.

Um pouco mais amplo é o trabalho de HENDRY *et al.* (2004). Eles iniciam destacando detalhes construtivos de edifícios construídos em alvenaria, como configurações típicas de paredes (figura 2.12): sistema celular (onde todas as paredes são resistentes); sistema com paredes transversais (*cross-wall*) simples (onde há algumas paredes não resistentes em uma direção) e duplo (onde há algumas paredes não resistentes em ambas as direções) e complexas (junção de arranjos com paredes transversais simples com o duplo). Seguem analisando os tipos de armação de lajes (em uma ou duas direções), critérios de estabilização global de estruturas e utilização de paredes de cisalhamento e paredes com função de diafragma e algumas considerações sobre alvenaria armada e protendida.

A seguir, eles se preocupam com a classificação das unidades, inclusive quanto à resistência ao ciclo de congelamento e degelo e quanto à salinidade; com precauções quanto à fissuração (movimentações térmica e devido à mudança de umidade); patologia nas alvenarias (eflorescência, ataque de sulfatos e incêndios); características das argamassas (requisitos para cimento, cal, areia, água, adições e aditivos); ganchos e gravatas para paredes de duas folhas; aços para reforço e protensão; tensões atuantes em alvenaria e defeitos de mão de obra.

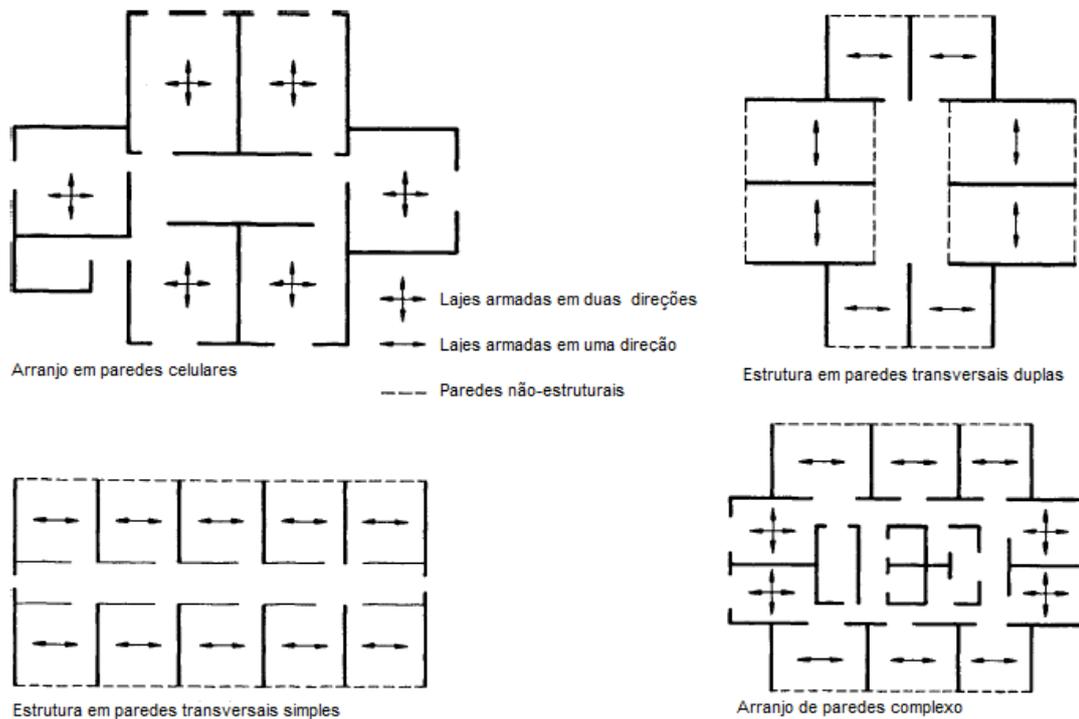


Figura 2.12 - Configurações típicas de paredes de alvenaria – extraído de HENDRY *et al.* (2003).

Por fim, seguem-se procedimentos de dimensionamento de elementos de alvenaria sob carregamento à compressão, dimensionamento quanto a cargas de vento, quanto a carregamento lateral de painéis e o dimensionamento de elementos de alvenaria estrutural, incluindo exemplos de cálculos. Esses dimensionamentos são calculados de acordo com a norma BS 5628, partes 1 e 2, normas britânicas para alvenaria não armada e armada, respectivamente, que estavam em vigor na época da publicação deste trabalho. O trabalho compara o dimensionamento com as recomendações da ENV-1996-1-1 (que se tornou mais tarde o Eurocode 6), discutindo em detalhes as diferenças de dimensionamento.

Uma vez que, no Brasil, o sistema alvenaria estrutural demorou em ser implementado, em relação a outros países, as publicações especializadas apareceram só recentemente. Um exemplo é o trabalho de DUARTE (1999). Preocupou-se inicialmente com as principais propriedades dos componentes e as características das alvenarias, concepções de projeto (modulação e formato), a importância da compatibilidade com os demais projetos, escolha do tipo de laje, importância e recomendações das juntas de controle e de movimentação no edifício, quanto a materiais e posicionamento. Quando trata de estabilidade vertical, ele recomenda a determinação da resistência prévia de cinco prismas (de dois blocos ou cinco tijolos) à compressão e de ensaios de três prismas de mesmo formato para cada 460 m^2 de

área construída. A resistência dos prismas deve ser corrigida por coeficientes em função da sua esbeltez (tabela 2.2). Estas recomendações e outros procedimentos de dimensionamento, de acordo com o autor, seguem as normas internacionais e nacionais vigentes quando da publicação do livro.

Tabela 2.2 - Coeficientes de correção da em função da esbeltez do prisma – DUARTE (1999).

Índice de esbeltez do prisma (h/t)	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Coeficiente de correção	0,86	1,00	1,04	1,07	1,15	1,22

DUARTE (1999) encerra seu trabalho tratando de análise da estabilidade horizontal de edifícios e dos tipos de sistemas estruturais de alvenaria estrutural (“crosswall”, espinha de peixe e celular), encerrando com recomendações com respeito às distorções angulares e deflexões (recalques) das fundações, que podem provocar fissurações excessivas na alvenaria.

Um pouco mais recente é o trabalho sobre alvenaria estrutural organizado por SÁNCHEZ (2002), que juntou diversos artigos relacionados à alvenaria estrutural, abordando recomendações sobre os materiais utilizados na alvenaria, dimensionamento da alvenaria à compressão, flexão simples, cisalhamento e flambagem, pela NBR 10837 (ABNT, 1989) – método das tensões admissíveis – e pelo Eurocode 6 – método dos estados limites. As tensões admissíveis são determinadas em função da resistência de prismas ou paredes. Como foi patrocinado pela indústria cerâmica, este livro atém-se, principalmente, a alvenaria construída com blocos cerâmicos.

Sem dúvida alguma, um dos trabalhos brasileiros mais completos sobre alvenaria estrutural é o livro de RAMALHO & CORRÊA (2003). Após considerar os aspectos históricos do uso da alvenaria e de aspectos técnicos dos componentes e do sistema, este trabalho dá ênfase à modulação e disposição de amarrações de paredes. Na sequência, aborda os principais sistemas estruturais, os tipos de carregamento e procedimentos de distribuição de cargas, relacionados à análise estrutural para ações verticais, e as considerações de contraventamento relacionadas à análise estrutural para ações horizontais. Segue com os parâmetros de dimensionamento utilizando as recomendações da NBR 10837 (ABNT, 1989) pelo método das tensões admissíveis, mas destacando também o método dos estados limites seguido por outras normas estrangeiras, dimensionamento de elementos à compressão, à flexão simples, ao cisalhamento e à flexão composta. Por fim, traz exemplos detalhados de dimensionamento tanto de componentes isolados (parede, pilar e viga) quanto de um edifício completo em alvenaria estrutural, de pequeno porte. Destacam o caráter predominante da

resistência do bloco, variando conforme as características do bloco, a pouca influência da resistência à compressão da argamassa de assentamento e a grande influência da espessura dessa argamassa sobre a resistência dos painéis de alvenaria.

2.5. Mecanismo de ruptura dos prismas

Alguns pesquisadores observaram o mecanismo de ruptura dos prismas durante o ensaio de determinação da resistência à compressão. Segue um resumo deste mecanismo em prismas de dois blocos e uma junta de assentamento durante o ensaio de resistência à compressão (prismas não grauteados):

- Quando submetido a uma carga de compressão axial, todo o prisma começa a se comportar como um único material (figura 2.13);

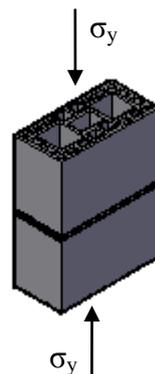


Figura 2.13 - Tensões atuantes no prisma – adaptado de MOHAMAD (2007).

- Devido ao efeito de restrição imposto pelas placas da prensa, ocorre concentração de tensões nas extremidades do prisma. Próximo da argamassa ocorre uma distribuição mais uniforme de tensões (STEIL, 2003). A distribuição não uniforme de tensões ao longo das paredes longitudinais e dos septos transversais ocasiona diferentes valores de deformação nos blocos e, conseqüentemente, na argamassa (BARBOSA, 2008);
- Verifica-se que o prisma tende a igualar a rigidez dos materiais, ou seja, a junta de argamassa horizontal e o bloco passam a comportarem-se como únicos, sendo que as deformações do prisma são governadas pela deformação da junta de argamassa, até níveis de tensão igual a 30% da resistência à compressão do prisma (MOHAMAD, 2007);

- Como a argamassa é mais deformável (flexível) que os blocos, ao ser comprimida, ela tende a expandir-se lateralmente mais do que os blocos, mas é impedida devido à aderência (ligação argamassa/bloco), restringindo esta deformação. Devido a isto, surgem tensões de compressão lateral da argamassa e, para que seja mantido equilíbrio de tensões, o bloco fica sujeito a tensões de tração (STEIL, 2003), esquema apontado na figura 2.14;
- A argamassa começa então a apresentar deformações plásticas antes das unidades e a maior parte das deformações não lineares do prisma, até antes da ruptura, ocorre apenas nas juntas. As maiores deformações plásticas de compressão são identificadas na junta de argamassa, bastante distintas dos valores encontrados no bloco. Sob a compressão axial do prisma, os blocos e a junta de argamassa são caracterizados pelo comportamento não linear e pela distribuição de tensões, originando um estado triaxial de compressão na argamassa e o estado biaxial de compressão-tração nos blocos (BARBOSA, 2008);

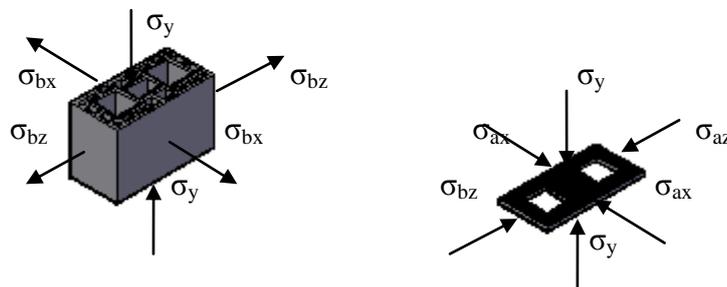


Figura 2.14 - Tensões atuantes no bloco e na argamassa – adaptado de MOHAMAD (2007).

- O atrito entre o topo e a base do prisma, levando em conta ainda sua forma geométrica, origina tensões transversais confinantes que impedem a deformação transversal da região próxima às extremidades superior e inferior destes elementos, aumentando, desta forma, o valor da resistência à compressão no ensaio (BARBOSA, 2008).
- KHALIFA & MAGZOUN (1994) *apud* CARVALHO (2003) apontam o desenvolvimento de tensões de compressão lateral no fundo da unidade superior enquanto que são desenvolvidas tensões de tração laterais significativas no topo da unidade inferior. Estas tensões laterais são muitas maiores que as geradas pela diferença dos coeficientes de Poisson entre unidade e argamassa.

- As primeiras finas fissuras verticais podem ser visíveis num intervalo entre 50 a 80% da carga última de ruptura. Esse fissuramento vertical ocorre porque o módulo de elasticidade da argamassa é inferior ao da unidade, porém o seu coeficiente de Poisson é maior. Devida a estas diferenças nestas propriedades, a alvenaria sob compressão vertical tende a deformar-se mais na junta de argamassa do que nas unidades (DUARTE, 1999);
- Segundo AFSHARI & KALDJAN (1989) *apud* MOHAMAD (2008), as tensões horizontais de tração desenvolvidas no bloco são maiores próximas da junta e, diminuem à medida que se afastam da mesma. Na argamassa, as tensões de compressão são máximas próximas da interface e atinge um mínimo a meia altura da junta;
- Estas tensões de tração dependem da rigidez relativa entre a argamassa e o bloco. Com o aumento do carregamento, começa um aumento desproporcional das deformações laterais quando a tensão atinge 70% da resistência à compressão última do prisma (MOHAMAD, 2007);
- MOHAMAD (1998) *apud* MOHAMAD (2007) verificou diferenças no comportamento das interfaces de contato entre a junta de argamassa e o bloco superior e inferior. As análises visuais (pós-ruptura) mostraram que a argamassa continuava aderente à superfície do bloco inferior, ou seja, notava-se uma perda de aderência na interface superior da argamassa, provavelmente pela existência de uma maior porosidade na interface superior da argamassa, devida a fenômenos físicos, como a exsudação;
- Após isso, para diferentes tipos de composição entre o bloco e a argamassa, ocorre uma diminuição na proporção de rigidez entre a argamassa e o bloco, devido ao esmagamento da junta de assentamento ou ao desenvolvimento de tensões de tração localizadas (MOHAMAD, 2007);
- A pequena altura da junta de argamassa através do efeito da restrição lateral exercida pelas placas rígidas aumenta a resistência à compressão (MOHAMAD, 2007). O aumento da espessura da junta horizontal de argamassa faz com que aumente a tensão lateral que a argamassa exerce sobre os blocos ao se expandir lateralmente (DUARTE, 1999). Para RAMALHO & CORRÊA (2003), o aumento da espessura da argamassa de assentamento diminui seu confinamento. Segundo HEDRY *et al.* (2004) juntas de assentamento de 16–19 mm de espessura

resultarão numa redução da resistência à compressão de até 30% quando comparado com juntas de 10 mm de espessura. SAHLIN (1971) *apud* MORENO JR. & ALBUQUERQUE (2000) afirma que pode ser razoável assumir que a resistência da alvenaria diminua em aproximadamente 15% para cada aumento de 3 mm na espessura da junta, e vice versa;

- HAMID & DRYSDALE (1979), *apud* MOHAMAD (2007) apontam que quando a relação tensão atuante/resistência à compressão dos prismas atingirem um nível de cerca de 80%, acontece o surgimento de microfissuras ao longo de toda a extensão dos prismas. Os autores citam que o surgimento de tensões de tração lateral é relativamente pequeno quando comparado com a resistência à tração uniaxial. Portanto, pode concluir-se que o surgimento de não linearidades do diagrama tensão-deformação vertical corresponde ao aumento das deformações laterais, associando-as à extensiva fissuração do material e a um aumento progressivo do coeficiente de Poisson;
- A ruína à compressão é caracterizada pela união e crescimento de microfissuras difusas, por progressivas deformações localizadas e o desenvolvimento de microfissuras livres de tração. Em um estágio mais avançado, um modo contínuo e distribuído de fissuras de separação e cisalhamento é formado (BARBOSA, 2008);
- Conforme MOHAMAD (2007) destaca, é a argamassa quem governa o modo de ruptura do conjunto. O esmagamento da junta de argamassa gera concentrações de tensões no bloco;
- As fissuras iniciam-se quando as tensões de tração aumentam o suficiente para quebrar a adesão interpartícula. A fissuração é iniciada pelo aumento das tensões nos vazios dentro do material, produzindo tensões de tração suficientes para quebrar a interação interatômica. A ruptura ocorre quando estas fissuras se propagam através do corpo de prova (MOTA, 2001);
- De acordo com o mecanismo de ruína, antes da ruptura ocorre a fissuração da estrutura, provocada por forças de tração que se desenvolvem perpendicularmente à direção do carregamento de compressão. Essa fissuração diminui a capacidade resistente do conjunto e um aumento expressivo do carregamento pode levá-lo à ruína. Assim, quanto maior for a resistência do bloco à tração maior será a capacidade da parede de resistir a esforços de compressão (GARCIA, 2000).

MENDES (1998) *apud* CARVALHO (2003) argumenta que vários fatores podem influenciar a resistência à tração do material cerâmico, tais como: porosidade da massa, grau de vitrificação, tempo e temperatura de queima;

- Para prismas confeccionados com traço de argamassa fraco verifica-se o surgimento de esmagamentos localizados e esfacelamentos nos prismas. Os esmagamentos normalmente são localizados na argamassa da junta do prisma para um nível de tensão próximo de 50% da resistência à compressão, após isso começa os esfacelamentos da superfície do bloco e a propagação de trincas verticais. Para prismas confeccionados com traço de média resistência verifica-se a existência de trincas verticais para níveis de tensão próximos de 80% da resistência à compressão. O aumento da deformação lateral é progressivo e não repentino. Em alguns pontos do prisma, verifica-se a existência de trincas verticais e esmagamentos localizados da junta de assentamento. Observa-se o aumento das deformações laterais quando a tensão atinge, aproximadamente, 60% da resistência à compressão. As fissuras dos prismas construídos com a argamassa de traço mais forte geralmente são verticais, acontecendo de forma simétrica em ambos os lados, geralmente sem pontos de esmagamento da junta de assentamento. O aumento da deformação lateral é repentino. Visualmente, pode-se notar que o prisma comporta-se como um material único. (MOHAMAD, 2007).

O modo de ruptura pode ocorrer de 4 formas, sendo este dependente da resistência da ligação argamassa-bloco, resistência à compressão da argamassa e do bloco e resistência à tração do bloco:

1. Separação entre a argamassa e o bloco, devido à fraca resistência de ligação. Dois modos de ruptura são possíveis: ruptura por tração (induz uma abertura de junta) e cisalhamento (deslizamento entre as superfícies com o atrito) (MOHAMAD, 2007);
2. Esmagamento da argamassa: ocorre quando a tensão de compressão axial atinge a resistência à compressão da argamassa confinada (CHEEMA & KLINGNER, 1986 *apud* MOHAMAD, 2007). Para prismas com argamassas mais fracas, a progressão da fissuração é mais lenta e o colapso é dúctil e a curva tensão x deformação é não linear (MOTA, 2001). Quanto mais baixa a

relação entre as propriedades mecânicas da argamassa e do bloco, maior será a tendência de ruína por esmagamento da junta (BARBOSA, 2008);

3. Esmagamento do bloco: ocorre quando a tensão principal de compressão no bloco atinge a resistência do bloco à compressão (CHEEMA & KLINGNER, 1986 *apud* MOHAMAD, 2007);
4. Tração no bloco: ocorre quando a tensão principal de tração ultrapassa a resistência à tração do bloco. Como a resistência à tração dos blocos é pequena (normalmente menor que 10% da sua resistência à compressão), a ruptura da alvenaria ocorre sob um estado triaxial de tensões que é caracterizado pela fissuração vertical perpendicular às tensões de tração nos blocos (STEIL, 2003). Com argamassa mais resistente, a capacidade resistente do prisma é esgotada em função da ruína dos blocos, decorrente dos esforços internos de tração (BARBOSA, 2008). A relação da resistência de cisalhamento e de compressão existe até certo valor limitante da compressão vertical, além da qual a falha da junta é substituída pela fissuração através das unidades. Para blocos cerâmicos este limite é de aproximadamente 2.0 N/mm² (MPa). Os prismas com argamassa forte fissuram subitamente e rompem explosivamente no carregamento último. Para a argamassa mais forte, a curva tensão deformação é essencialmente linear (MOTA, 2001)

A resistência à compressão e o modo de ruptura dos materiais cerâmicos são significativamente diferentes quando comparados com os de concreto. Os materiais cerâmicos possuem uma faixa de resistência à compressão maior e um modo de ruptura mais frágil. O concreto possui uma faixa de resistência menor, uma ruptura mais dúctil e uma fissuração mais distribuída, quando comparado com o cerâmico (MOHAMAD, 2007).

HENDRY *et al.* (2004) observa que a resistência da alvenaria à compressão é menor que a força de compressão nominal das unidades ensaiadas isoladamente. Por isso que a eficiência de prisma nunca excede a unidade. Por outro lado, a resistência da alvenaria pode grandemente exceder a resistência à compressão da argamassa usada nela.

3 Experimentação

Neste capítulo é apresentado o planejamento experimental determinado para se alcançar a análise proposta pelo trabalho. Inicia-se com a abordagem do projeto experimental, seguido pelas características dos materiais empregados para a confecção dos prismas e das justificativas para a escolha destes materiais, encerrando-se com os procedimentos usados na execução dos ensaios e a apresentação dos resultados alcançados por ensaio.

3.1. Planejamento experimental

MONTGOMERY (2001) define experimento como um teste ou uma série de testes em que mudanças propositalmente são efetuadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema para que possamos observar e identificar as razões para as mudanças que podem ser observadas na variável de saída (resposta).

Segundo CALADO & MONTGOMERY (2003), através do planejamento experimental, pode-se determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo. Eles apontam a redução do custo operacional e a melhoria no tempo dos processos como alguns dos resultados práticos de se utilizar este tipo de planejamento. O planejamento experimental permite também obter um modelo matemático adequado para descrever um fenômeno, que é um dos objetivos deste trabalho.

Foi estabelecido um projeto experimental com a finalidade de planejar, executar e analisar o material estudado, no caso, blocos, argamassas e prismas de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural. No projeto experimental foram determinados os fatores – variáveis de entrada do sistema que podem ser controladas ou modificadas – e as respostas – variáveis de saída do sistema que são afetadas pelas modificações nos fatores. Para isso, foi determinado

um planejamento fatorial que permite estudar o efeito dos fatores e de suas interações. Este planejamento é de suma importância nos estágios iniciais de um trabalho experimental, principalmente quando há muitas fontes de variação a serem investigadas (BARROS NETO *et al.*, 2003).

O planejamento fatorial permite avaliar simultaneamente o efeito de um grande número de variáveis, a partir de um número reduzido de ensaios experimentais. Além de ser ao mesmo tempo útil e simples, ele apresenta um modelo físico-matemático que representa de maneira adequada os fenômenos que se deseja estudar. Este planejamento serve como ferramenta estatística para avaliação e otimização de parâmetros envolvidos numa pesquisa científica experimental. Para MONTGOMERY (2001), o planejamento fatorial é a estratégia experimental mais eficiente que existe.

Optou-se empregar um programa experimental com um fatorial quantitativo do tipo 3^k , onde a base representa o número de níveis do fator principal, ou seja, o número de variações de cada fator, e a potência “k” representa o número de efeitos principais ou fatores, quer dizer, quantas variáveis serão modificadas. Considerando que o objetivo do trabalho é estudar o comportamento mecânico à compressão dos prismas de alvenaria estrutural, esta propriedade será adotada como variável de resposta (dependente). O comportamento mecânico refere-se, neste trabalho, a resistência à compressão do prisma e ao modo de ruptura do mesmo.

Seguindo um **planejamento fatorial 3^2** , os fatores foram a resistência à compressão da argamassa de assentamento do prisma e a espessura desta camada de assentamento (2 fatores). Como cada fator, neste planejamento, é variado 3 vezes (3 níveis de variação), optou-se pela variação da resistência à compressão da argamassa, a priori, como sendo de metade da resistência do bloco utilizado (primeiro nível), aproximadamente a mesma do bloco (segundo nível), e cerca de uma vez e meia a do bloco (terceiro nível), sendo a resistência do bloco calculado pela sua área bruta. Para a variação da espessura da argamassa de assentamento, optou-se pelas espessuras de 10 milímetros (primeiro nível), 15 milímetros (segundo nível) e 20 milímetros (terceiro nível). Devido à variabilidade dimensional do bloco, permitida por norma, de ± 5 milímetros, evitou-se espessuras menores, para evitar que os blocos do prisma fiquem muito próximos, gerando concentração de tensões que prejudicariam a resistência do prisma (RAMALHO & CORRÊA, 2003). Deve ser observado que a variação entre espessura da argamassa foi de 5 milímetros, para evitar mudanças significativas no índice de esbeltez dos prismas.

Conforme observado no capítulo 2, outros fatores podem influenciar o comportamento mecânico dos prismas, mas todos estes foram garantidos uniformes para todas as

combinações, neste trabalho. O módulo de elasticidade do prisma é considerado proporcional à resistência do mesmo. O EN 1996 (2005), por exemplo, considera o módulo de deformação longitudinal da alvenaria igual a mil vezes a resistência da mesma. Todos os prismas tiveram o mesmo índice de esbeltez e foram capeados com o mesmo material.

Como a resistência das argamassas escolhidas dependeriam da resistência do bloco, precisou-se, primariamente, determinar esta última resistência. Para este fim, vários traços de argamassas, pesquisados na literatura, foram testados até serem definidos os três que compuseram os prismas para os ensaios.

Foram confeccionados 5 prismas para cada combinação resistência/espessura da argamassa. Esta quantidade foi escolhida por causa do tamanho da amostra de blocos existente, mas suficiente para poder se executar uma análise estatística. Segundo FUSCO (1976) *apud* MOTA (2001), para pequenas amostras (quantidade não superior a 30 exemplares), a verificação da variabilidade dos resultados experimentais pode ser dada a partir de análises estatísticas, através da Distribuição “t” de *Student*, desde que a amostra considerada tenha no mínimo quatro ou cinco exemplares.

Vale ressaltar que todos os ensaios foram realizados em duplicata, provendo-se uma réplica. CALADO & MONTGOMERY (2003) apontam dois motivos para seguir este procedimento: permitir a determinação de erros experimentais e a obtenção mais precisa do efeito da média de um fator determinado experimentalmente. A tabela 3.1 retrata as combinações que foram executadas, com os níveis, fatores e quantidades de corpos de prova (prismas) para os ensaios.

Tabela 3.1: Combinações dos ensaios de prismas executados.

Resistência do prisma (MPa)	Níveis de resistência da argamassa (MPa)	Níveis de espessura da argamassa (mm)	1ª determinação	Réplica
f_p	$= 0,5 \times f_b$	10	5	5
		15	5	5
		20	5	5
	$= 1 \times f_b$	10	5	5
		15	5	5
		20	5	5
	$= 1,5 \times f_b$	10	5	5
		15	5	5
		20	5	5
Total de prismas			45	45

3.2. Materiais

Descreve-se, a seguir, a caracterização dos materiais utilizados na produção dos prismas de alvenaria estrutural, destacando-se suas características e os ensaios realizados para cada material.

3.2.1 Unidade

As unidades são os componentes principais de um elemento de alvenaria. DUARTE (1999) destaca que as unidades representam aproximadamente 80% de seu volume. Elas são as principais responsáveis pela sua resistência à compressão, estanqueidade à água de chuva e conforto térmico e acústico. As unidades podem ser cerâmicas, de concreto ou sílico-calcáreas. No Brasil, predomina o uso de blocos de concreto, seguido pelos cerâmicos, em alvenaria estrutural (RAMALHO & CORREA, 2003).

Uma das vantagens do bloco cerâmico é possuir uma porosidade muito inferior à do bloco de concreto. Esta porosidade inferior assegura uma maior estanqueidade das paredes externas contra infiltrações provenientes da chuva. Outra vantagem reside no fato de que a alvenaria cerâmica não apresenta retração, necessitando menor quantidade de juntas de movimentação (DUARTE, 1999).

A norma brasileira NBR 15270 (ABNT, 2005), determina as especificações e procedimentos de ensaios para blocos cerâmicos de alvenaria. Ela está dividida em três partes, sendo que a primeira trata das especificações para blocos de vedação, a segunda das especificações concernentes aos blocos estruturais e a terceira cobre os métodos de ensaios de ambos os tipos de blocos.

O bloco escolhido para a análise experimental é fabricado no estado da Paraíba (atualmente não são fabricados em Alagoas), estrutural vazado, normalmente comercializado na cidade de Maceió. Suas dimensões nominais são de 14x19x29, que significa que tem 140 milímetros de largura, 190 milímetros de altura e 290 milímetros de comprimento (figura 3.1).

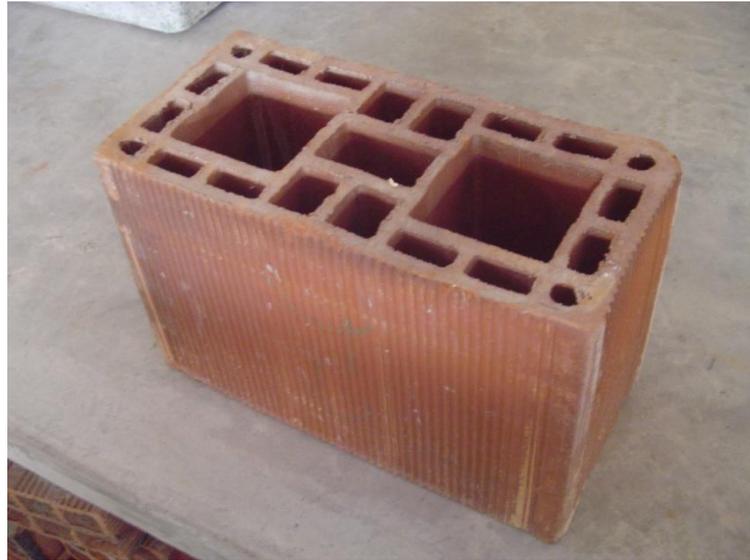


Figura 3.1 - Bloco cerâmico estrutural usado neste trabalho.

3.2.1.1. Determinação da área líquida

Como destacado no capítulo anterior, a NBR 15812-1 (ABNT, 2010) sugere que a resistência da argamassa de assentamento para alvenaria estrutural de blocos cerâmicos seja no mínimo de 1,5 MPa e no máximo de 70 por cento da resistência característica à compressão dos blocos estruturais, relacionada à sua área líquida. DUARTE (1999) sugere que as argamassas para assentamento de alvenaria estrutural não pode ser excessivamente rico em cimento porque pode causar problemas de trabalhabilidade, retração excessiva e fissuração, devido ao alto teor de cimento. Para a escolha da resistência limite da argamassa, precisamos determinar a área líquida dos blocos cerâmicos.

A área líquida nada mais é que a área de assentamento do bloco, delimitada pelas arestas do bloco, com desconto das áreas dos furos. Para sua determinação, seguiram-se os procedimentos de ensaio recomendados pelo anexo A da NBR 15270-3 (ABNT, 2005). Ela preconiza que, para a determinação da área líquida, retira-se da amostra 6 blocos representativos, de maneira aleatória. Como o nosso objetivo é a determinação da resistência à compressão na área líquida, retirou-se os 13 blocos que serão aproveitados para a determinação desta resistência. Estes blocos foram identificados de 1 a 13, a seguir medidos no comprimento, largura e altura (duas medições opostas).

Após as medições, os blocos foram imersos em água com temperatura ambiente por 24 horas. Passado o período de imersão, cada bloco foi pesado imerso na água, com uma balança

hidrostática (figura 3.2). Retirados os blocos, eles foram enxutos superficialmente e novamente pesados (massa saturada). A área líquida de cada bloco foi então determinada pela equação 3.1.

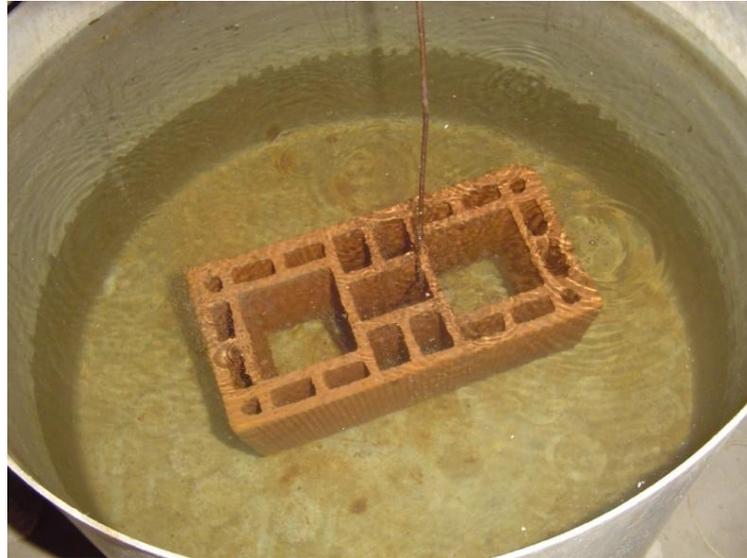


Figura 3.2 - Bloco submerso, sendo pesado com a balança hidrostática.

$$A_{liq} = \frac{(m_u - m_a)}{\gamma \cdot H}$$

Equação 3.1

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

m_u é a massa do bloco saturado;

m_a é a massa aparente do bloco (submerso);

γ é a massa específica da água (1 g/cm^3);

H é a altura do bloco, em centímetros

3.2.1.2. Determinação da resistência à compressão

Segundo RAMALHO & CORRÊA (2003), o principal conceito estrutural ligado à utilização da alvenaria estrutural é a transmissão das ações através de tensões de compressão. Para STEIL (2003), esta propriedade depende fundamentalmente da resistência à compressão das unidades de alvenaria. Dessa forma, a resistência à compressão do bloco é o principal parâmetro de dimensionamento da alvenaria e, por isso, esta propriedade é a principal variável

do controle de qualidade dos blocos. Sem alterações nos outros parâmetros, quanto mais resistente o bloco, mais resistente será a alvenaria (RAMALHO & CORRÊA, 2003).

Para a determinação da resistência à compressão dos blocos estruturais cerâmicos, seguiram-se os procedimentos de ensaio preconizados no anexo C da NBR 15270-3 (ABNT, 2005). Como supracitado, aproveitou-se os mesmos 13 blocos da determinação da área líquida, depois de encerrado este ensaio.

Para a regularização das faces de trabalho dos blocos, devem-se utilizar pastas de cimento ou argamassas com resistências maiores que as previstas para os blocos, ou retífica. As faces dos blocos foram regularizadas com pasta de cimento, numa proporção adequada, com consistência e resistência endurecida já conhecida na experiência de laboratório. A pasta é espalhada sobre uma pedra de granito impregnada de óleo mineral para ajudar na retirada, em quantidade e espessura adequada e os blocos são colocados sobre a pasta, exercendo sobre estes uma pequena pressão manual, para garantir melhor aderência e que a espessura da pasta de regularização fique no máximo em 3 milímetros. Com auxílio de um nível de pedreiro, corrigem-se eventuais desníveis. Devido à espera pelo tempo de endurecimento da pasta de regularização, preferiu-se aguardar 24 horas para a regularização da face oposta (figura 3.3).



Figura 3.3 - Blocos capeados nas duas faces.

As faces que recebem regularização são as faces de trabalho na alvenaria que, no caso de blocos estruturais, são sempre as faces perpendiculares aos furos. Após o endurecimento da pasta de regularização da segunda face, os blocos foram imersos num tanque de água. Para evitar que eles flutuassem, alguns furos foram feitos na pasta de regularização na área dos vazados do bloco, o que não prejudica o ensaio.

Após o tempo mínimo de 6 horas imersos, os blocos foram retirados da água e imediatamente ensaiados à compressão. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica à pêndulo, modelo SZM200 da marca *Amsler* com capacidade máxima de 200 toneladas-força. Os blocos foram colocados sobre o prato inferior da prensa, centralizados para garantir que a carga fosse aplicada no centro de gravidade dos mesmos (figura 3.4).



Figura 3.4 - Bloco cerâmico na prensa durante ensaio.

Os blocos foram ensaiados à compressão, até atingir a ruptura (figura 3.5), numa velocidade constante de $(0,05 \pm 0,01)$ megapascals por segundo (MPa/s) em relação à área bruta.



Figura 3.5 - Bloco cerâmico ensaiado até ruptura.

A resistência à compressão individual dos blocos foi calculada dividindo-se a força de ruptura, em newtons (N), pela área da face de aplicação da carga, obtidas multiplicando-se as dimensões médias de comprimento e largura do bloco (em milímetros quadrados). Note que esta é a área bruta do bloco, não descontando os vazios, seguindo-se a recomendação da norma. Os resultados dos ensaios nos 13 blocos estão resumidos na tabela 3.2 A tabela apresenta as áreas brutas e líquidas de cada bloco e as resistências individuais à compressão em relação à área bruta e à área líquida.

Tabela 3.2 - Resultados individuais de resistência à compressão dos blocos cerâmicos estruturais.

N	Comp. (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Área Bruta (mm ²)	Área líquida (mm ²)	Esforço (N)	Tensão na área bruta (MPa)	Tensão na área líquida (MPa)
01	293,5	140,5	190,5	41237	15486	450125	10,9	29,1
02	294,0	140,5	190,5	41307	15486	472190	11,4	30,5
03	291,5	141,5	190,0	41247	15579	292238	7,1	18,9
04	294,5	141,0	190,0	41524	15474	420215	10,1	27,0
05	293,5	141,0	190,5	41383	15433	428551	10,4	27,6
06	291,5	140,0	191,0	40810	14869	435415	10,7	28,5
07	292,5	140,5	189,0	41096	15503	448654	10,9	29,1
08	293,5	141,0	190,5	41383	15486	472681	11,4	30,5
09	293,5	141,0	190,0	41383	15421	452087	10,9	29,1
10	292,5	140,0	190,0	40950	15368	508475	12,4	33,1
11	292,5	140,5	190,0	41096	15421	323619	7,9	21,0
12	292,5	140,5	190,0	41096	15421	404034	9,8	26,2
13	294,0	141,5	190,5	41601	15486	353039	8,5	22,6
Resistência média (MPa)							10,2	27,2
Desvio padrão (MPa)							1,52	4,07
Coefficiente de variação – CV (%)							15,0	15,0
Valores Anômalos							Não	

Cabe aqui destacar a preocupação com a variação dos resultados, embora não seja obrigatória pela norma, mas comum em ensaios de laboratório, que foi aplicada neste trabalho. Ao contrário de se propor valores máximos de coeficientes de variação da resistência, em todos os ensaios, procurou-se determinar se havia valores anômalos (*outliers*, em inglês). Valor anômalo nada mais é do que um ou mais valores individuais de resultados que, por estarem muito longe dos outros resultados, não pode ser considerado como vindo da mesma distribuição que produziu os demais, sendo então retirado da análise estatística

(BARROS NETO *et al.*, 2003). Este valor também é conhecido como valor espúrio (PRUDÊNCIO JR, 1986). Para se determinar a existência de algum valor anômalo, existem muitas variações de testes, como o de *Dixon*, *Modelos de discordância*, *Z-scores* e outros. Foi utilizado o teste de *Grubbs*, recomendado pela *International Organisation for Standardization – a ISO* (BARRETOS NETO *et al.*, 2003).

O teste de Grubbs compara a distância, medida em desvios padrão, do valor suspeito em relação à média do conjunto de valores, desvio padrão e média calculados com o valor suspeito. Se esta distância for maior do que um certo limite crítico tabelado, o valor suspeito é considerado anômalo (BARROS NETO *et al.*, 2003). Para este teste, foi usada a equação 3.2.

$$G = \frac{|x_a - \bar{x}|}{s} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde: G é o valor do teste de Grubbs;

x_a é o valor suspeito;

\bar{x} é o valor médio da amostra;

s é o desvio padrão da amostra

Neste caso, usando os treze resultados de resistência à compressão e o valor de 7,1 MPa como valor suspeito (o mais distante da média), obteve-se

$$G = \frac{|7,1 - 10,2|}{1,52} = 2,04$$

Este valor é menor que o valor de G tabelado pelo teste igual a 2,462, para um nível de confiança de 95%. Logo, o valor suspeito não é considerado anômalo, e todos os valores são aceitos. Pode-se, agora, determinar os outros parâmetros da tabela.

Por se tratar de um estudo de laboratório específico, foi considerada a resistência média dos blocos, como a resistência do lote, e não a resistência característica (f_{bk}) citada na NBR 15270-2 (ABNT, 2005). A resistência característica é uma determinação estatística que se refere à resistência prevista que pode ser alcançada por 95% dos blocos do lote. Para todos os materiais ensaiados (blocos, argamassas e prismas) a resistência média foi considerada como a resistência da amostra.

Para aceitar os resultados obtidos na amostra de blocos analisada, foi executado um teste de aderência para comprovar a normalidade dos dados da tabela 3.2. Para este fim, foi utilizado o programa *Minitab*, versão 15.1.30.0. Das opções propostas pelo programa,

escolhe-se o Teste de Ryan-Joiner. Para a amostra analisada, o programa comprovou a normalidade dos resultados.

Independente da resistência adotada, o coeficiente de variação (15%) encontra-se dentro dos padrões brasileiros de fabricação de blocos. SABATINI (2003) considera o valor máximo de 20% (para blocos cerâmicos) como aceitável.

Levando em consideração o resultado do ensaio de resistência à compressão dos blocos, chegou-se aos valores desejáveis das resistências à compressão das argamassas: **5,1 MPa** (50% da resistência média dos blocos), **10,2 MPa** (100% da resistência média dos blocos) e **15,3 MPa** (150% da resistência média dos blocos), e a resistência máxima de **19,0 MPa** (70% da resistência média dos blocos, na área líquida). Vale ressaltar que estes valores são somente referenciais, que seria admissível usar resistências próximas a estes valores.

3.2.1.3. Determinação da absorção

Como demonstrado no capítulo 2, a resistência de aderência entre a argamassa e o bloco nos prismas e paredes é de fundamental importância no seu comportamento mecânico. E observou-se também que um dos fatores determinantes desta aderência está relacionado à absorção de água por parte do bloco. Esta propriedade é um indicador da permeabilidade da parede à água de chuva (CARVALHO, 2003).

O efeito de absorção de água da argamassa por parte da unidade depende tanto das propriedades de absorção das unidades (disposição dos poros, da textura da unidade e do seu índice de absorção inicial) como das propriedades da argamassa no seu estado fresco. CARVALHO (2003) também aponta a composição da argila como fator influenciador da absorção da unidade. Um baixo índice de absorção de água pode ocasionar prejuízos ao assentamento. Embora certa quantidade de absorção seja desejável para aumentar a profundidade de penetração da pasta de argamassa, a sucção excessiva reduz a quantidade de água disponível para hidratação de cimento à superfície de unidade (BEALL, 2004). Além disso, a aderência bloco-argamassa ficará prejudicada, com a argamassa apresentando maior módulo de deformação quando endurecida, o que resultará em menor capacidade de absorver deformações (BARBOSA, 2008).

O procedimento para a obtenção da absorção do bloco é determinada pela NBR 15270-3 (ABNT, 2005) no seu Anexo B. Após a escolha aleatória de 6 corpos de prova

(amostra), eles foram identificados de 1 a 6 e colocados em estufa a $105 \pm 5^\circ \text{C}$ até constância de massa, pesados em intervalos de 1 hora. Alcançando-se esta constância, suas massas secas foram anotadas e os blocos foram submersos em água à temperatura ambiente por 24 horas. Uma alternativa seria submetê-los ao procedimento acelerado de fervura em água em ebulição por 2 horas, mas preferiu-se utilizar a primeira metodologia. Cumpridas as 24 horas de saturação, os blocos foram retirados da água, colocados sobre uma tela para escorrer o excesso de água e secos superficialmente com um pano úmido e determinadas as suas massas no estado saturado. O índice de absorção é calculado pela equação 3.3.

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

onde: m_u é a massa úmida (saturada) dos blocos e

m_s é a massa seca em estufa dos blocos.

A NBR 15270-2 (ABNT, 2005) determina que o índice de absorção (AA) para blocos cerâmicos para alvenaria deve estar entre 8% e 22%. Embora a absorção não seja uma das variáveis de estudo, foi providenciada sua determinação no lote apenas para garantir sua homogeneidade e adequação à norma de especificação. A tabela 3.3 apresenta os resultados dos ensaios.

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios de absorção de água da amostra de blocos.

Corpo de prova	Índice de absorção (%)
01	9,4
02	9,3
03	9,4
04	9,1
05	9,5
06	9,6
Média	9,4
CV	1,8

Como este ensaio não será utilizado na relação de resistência, objetivo deste trabalho, não foi executado o teste de Grubbs (valor anômalo). Observe que todos os valores individuais e a média apresentaram-se dentro da especificação da norma.

A literatura pesquisada destaca que a absorção da unidade é mais importante no início do processo de cura e endurecimento da argamassa de assentamento em contato com a unidade nos prismas e paredes. Por isso, alguns recomendam a determinação do índice de absorção inicial (IRA, em inglês) das unidades (SOLÓRZANO & SABBATINI, 1996; SARAGANPANY *et al.*, 2005; ARYANA, 2006; CARVALHO, 2003). Este ensaio,

basicamente, consiste em se determinar a massa de água absorvida por uma face da unidade após este ser imerso em uma profundidade de água durante certo tempo. O ensaio mede a tendência de absorção de água das unidades, e sua magnitude depende das características superficiais da unidade (CARVALHO, 2003).

Os procedimentos para a determinação do índice de absorção inicial é preconizado no anexo E da NBR 15270-3 (ABNT, 2005). Pela dificuldade da realização do ensaio, concernente aos equipamentos, por não ser tão relevante neste trabalho e pelo fato de não possuir caráter obrigatório, segundo a norma brasileira, este ensaio não foi realizado para os blocos.

3.2.2. Argamassa

MOTA (2001) define junta de assentamento como “um componente de alvenaria formado a partir da aplicação do material argamassa que adquire forma e funções definidas ao entrar em contato com as unidades de assentamento de alvenaria, após o endurecimento”.

A argamassa de assentamento, em alvenaria, é importante pois tem a função de solidarizar as unidades, transmitir e uniformizar as tensões entre as unidades, absorver pequenas deformações nas edificações (RAMALHO & CORRÊA, 2003).

De acordo com MOTA (2001), a influência da junta de argamassa no desempenho funcional da parede estrutural é crítica, principalmente se ela for exterior à edificação e aparente (sem revestimento protetor). Ele aponta que as propriedades da argamassa têm uma forte influência sobre a deformação de prismas e paredes de alvenaria.

Para a argamassa de assentamento são fundamentais as características de trabalhabilidade, aderência e deformabilidade (quando endurecida) tendo a resistência uma importância secundária. Como a argamassa ocupa um volume aproximado de 20% na parede, aumentos significativos de resistência à compressão da argamassa apenas incidem sobre este percentual de 20% do total da parede (DUARTE, 1999).

Conforme encontrado na literatura, as funções primárias das juntas de argamassa em uma parede de alvenaria são:

- Unir solidamente as unidades de alvenaria e ajudá-las a resistir aos esforços laterais;

- Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos componentes de alvenaria;
- Absorver as deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita;
- Selar as juntas contra a penetração de água de chuva.

HENDRY *et al.* (2004) destacam algumas das características que uma argamassa para assentamento deve apresentar, para alcançar estas funções:

- Desenvolvimento de resistência rapidamente;
- Trabalhabilidade – habilidade para esparramar facilmente;
- Retenção de água – habilidade da argamassa para reter água contra a sucção da unidade;
- Desenvolvimento apropriado da ligação com a unidade;
- Resistência à fissuração e penetração de chuva;
- Resistência ao congelamento e ataque químico, por exemplo, de sulfato solúvel;
- Aparência imediata e em longo prazo.

SOLÓRZANO *apud* MOTA (2001) acrescenta mais algumas exigências para poder cumprir com as funções:

- Capacidade de resistir a esforços mecânicos;
- Capacidade de absorver deformações;
- Durabilidade;
- Eficiência (que significa bons índices de produção, manuseio, racionalização e economia)

MOTA (2001) explica a importância destas características. A trabalhabilidade (consistência, plasticidade e coesão) ajuda para que o pedreiro produza com rendimento otimizado um trabalho satisfatório, rápido e econômico. A capacidade de retenção de água impede para que uma elevada sucção do elemento não prejudique as suas funções primárias. Adquirir rapidamente alguma resistência após assentada permite a argamassa resistir a esforços que possam atuar durante a construção. Ter adequada aderência aos componentes incorre que a interface possa resistir a esforços cisalhantes e de tração e prover a alvenaria de juntas estanques à água de chuva. Ter suficiente resiliência (baixo módulo de deformação) de maneira a acomodar as deformações intrínsecas (retração na secagem e de origem térmica) e

as decorrentes de movimentos estruturais (de pequena amplitude) da parede de alvenaria, sem fissurar.

Além do supracitado, boa ligação entre a argamassa e as unidades provê tanto estabilidade física quanto também resistência às cargas de vento e penetração de umidade (BEALL, 2004).

Com respeito à espessura da camada de assentamento de argamassa, DUARTE (1999) argumenta que, como a argamassa é a parte mais fraca da alvenaria, ao se aumentar a espessura da junta de assentamento também aumenta a proporção de argamassa no volume da parede. Como consequência, a resistência à compressão da alvenaria também é reduzida. O autor considera que a espessura ideal das juntas horizontais deve ser em torno de 1 cm, admitindo-se aumentos até 1,5 cm. Juntas mais espessas somente conduzem a aumentos de custos e reduções da resistência à compressão da alvenaria, gastando-se mais para obter uma alvenaria de pior qualidade.

3.2.2.1. Cimento Portland

Basicamente, a resistência à compressão da argamassa aumenta com a proporção de cimento na mistura (BEALL, 2004). Obviamente a classe do cimento (25 MPa, 32 MPa ou 40 MPa) também causará mudanças no comportamento mecânico da argamassa, principalmente na resistência à compressão, não causando mudanças significativas na sua trabalhabilidade e na sua resiliência.

As argamassas exclusivamente de cal e areia desenvolvem uma resistência pequena e de maneira lenta e cujo valor depende muito da umidade apropriada e da adequada absorção do dióxido de carbono do ar para ser atingida, produzindo valores máximos pequenos. Além disso, ele não dá pega, endurecendo inicialmente por perda de água para os elementos e por evaporação. Por estas razões, as argamassas de cal não são recomendadas para a alvenaria com blocos estruturais. Ao contrário, as argamassas de cimento dependem menos das condições ambientais, para desenvolver a resistência à compressão esperada. As argamassas de cimento Portland adquirem com rapidez resistências mecânicas elevadas e, portanto, desenvolvem, sem problemas, resistências adequadas para suportar as cargas durante uma construção de alvenaria estrutural.

Entretanto, as argamassas só com cimento como aglomerante tem uso restrito na alvenaria estrutural. São empregadas em situações especiais como, por exemplo, fundações em solos agressivos, fundações abaixo do nível do lençol freático ou ainda quando utilizados blocos de altíssimas resistências à compressão. Fora os casos específicos, não se recomenda a utilização de argamassas de cimento na alvenaria estrutural.

As argamassas de cimento com pequena proporção deste em relação à areia podem ser empregadas se a elas foram adicionados aditivos plastificantes. Estes aditivos tornam a argamassa trabalhável e com capacidade de retenção de água. A desvantagem desta argamassa é que seu custo é maior. Além disto, o teor de aditivo é crítico e quantidades incorretas podem trazer consequências adversas. Não são recomendadas para a alvenaria estrutural, pois seu custo e tecnologia de utilização conduzem a estruturas de alto módulo de deformação, incapazes de absorverem as deformações naturais sem apresentarem rupturas macroscópicas (MOTA, 2001).

Os cimentos que apresentam maior finura (superfície específica) têm potencial para tornar a argamassa mais trabalhável e com maior retenção de água. Os cimentos de endurecimento mais lento podem produzir argamassas mais resilientes. Assim, o cimento Portland pozolânico, que possui as duas características pode vir a compor uma argamassa com propriedades otimizadas (SABBATINI, 1986).

Para este trabalho foi utilizado cimento Portland composto com filler (CP-II-F-32) por simples opção de mercado.

3.2.2.2. Cal hidratada

Em relação à capacidade de retenção de água da argamassa, a cal tem um importante papel na composição de seu traço, aumentando essa capacidade e favorecendo a hidratação do cimento (BARBOSA, 2008). Segundo CARVALHO (2003), a cal possui também, por sua finura, importantes propriedades plastificantes. Assim, a cal confere à argamassa coesão e extensão de aderência, sendo o componente fundamental para assegurar a durabilidade da aderência. Por sua vez, a durabilidade da aderência é proporcionada pela habilidade da cal em evitar minúsculas fissuras e preencher vazios através da carbonatação que se processa ao longo do tempo.

MOHAMAD (2007) indica também que a cal gera a diminuição na exsudação e retração na secagem. Segundo SABBATINI (1986), a cal apresenta boas características de retenção de água, não só em razão de sua elevada superfície específica, mas também devido a grande capacidade adsortiva de seus cristais.

Segundo MOTA (2001), a pasta de cal preenche os vazios entre os grãos de areia, proporcionando trabalhabilidade e retenção de água otimizada em comparação com outros tipos de argamassa.

HENDRY *et al.* (2004) lembra que a propriedade de retenção de água da cal na argamassa é particularmente importante em situações onde unidades secas podem remover uma quantidade considerável de água da argamassa, levando assim a quantidade insuficiente para a hidratação do cimento.

MOTA (2001) concorda que as argamassas mistas reúnem as propriedades satisfatórias das argamassas de cal e das argamassas de cimento simultaneamente, onde se combina a resistência dada pelo cimento com a trabalhabilidade e retenção de água conferida pela cal.

Na confecção das argamassas para o assentamento dos prismas, neste trabalho, foi utilizada argamassa mista de cimento e cal hidratada, sendo a cal utilizada a do tipo CH-I, normalmente encontrada no mercado da cidade de Maceió.

3.2.2.3. Areia

A areia na argamassa atua como um filler. A pasta cimentícia deve completamente cobrir cada partícula para lubrificar a mistura. Areias que têm uma alta porcentagem de grãos maiores produzem vazios entre as partículas e tornam as argamassas pobres em trabalhabilidade e com baixa resistência à penetração de umidade. Quando a areia é bem proporcionada tanto de grãos finos quanto de graúdos, os grãos menores preenchem estes vazios e produzem argamassas que são mais trabalháveis e plásticas.

HENDRY *et al.* (2004) destacam que areias muito finas são desfavoráveis a adesão. Se a percentagem de partículas finas é muito alta, mais cimento é requerido para cobrir as partículas completamente, mais água de mistura é requerida para produzir boa trabalhabilidade, e a argamassa será mais fraca, mais porosa, e sujeita à retração (BEALL, 2004).

CARASEK *apud* CARVALHO (2003) ressalta que as areias muito grossas não produzem argamassas com boa capacidade de aderir porque prejudicam a sua trabalhabilidade e conseqüentemente a sua aplicação ao substrato, reduzindo a extensão de aderência, enquanto que as areias muito finas também podem prejudicar a aderência.

Segundo SABBATINI (1986), as normas BS 1200 (BSI, 1976), hoje substituída, e C-144 (ASTM, 2004) estabelecem a composição granulométrica de areia para uso em assentamento de alvenaria, que podem ser vistas na tabela 3.4. A areia que representa melhor potencial de produzir uma argamassa adequada é a que tem granulometria contínua e classificada como média (módulo de finura entre 1,8 e 2,8). SAHLIN (1971) *apud* PRUDÊNCIO JR. (1986) recomenda o que módulo de finura da areia deve estar entre 1,6 e 2,5 e o diâmetro máximo não deve exceder a 1/3 ou 1/2 da espessura da junta.

Para seguir as recomendações supracitadas, a areia foi passada pela peneira de abertura 4,75 milímetros. Esta medida também foi tomada em virtude da tolerância permitida pela NBR 15270-2 (ABNT, 2005) quando às dimensões dos blocos cerâmicos de ± 5 milímetros que poderia criar contato dos blocos dos prismas e gerar tensões pontuais excessivas, principalmente nos prismas com argamassa de 10 milímetros de espessura.

Tabela 3.4 - Composição granulométrica segundo a BS 1200 e a ASTM C-144.

FONTE: SABBATINI (1986).

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante	
	BS 1200	ASTM C-144
4,8	100	100
2,4	90 a 100	95 a 100
1,2	70 a 100	70 a 100
0,6	40 a 80	40 a 75
0,3	5 a 40	10 a 35
0,15	0 a 10	2 a 15

A areia escolhida é comumente encontrada na cidade de Maceió. A única preocupação tomada diz respeito a sua composição granulométrica. Para sua determinação, seguiram-se os procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Após colocar uma porção em estufa a (105 ± 5) °C, a areia foi separada em duas amostras, pesada inicialmente, e passadas no conjunto de peneiras normais, aberturas de 150 micrometros (μm); 300 μm ; 600 μm ; 1,18 milímetros (mm); 2,36 mm e 4,75 mm. Não foram utilizadas as peneiras de abertura de 6,3 mm e 9,5,

pelos motivos supracitados. Cada amostra foi agitada no conjunto de peneiras (figura 3.6), separada e pesada individualmente, determinando-se sua curva granulométrica. A tabela 3.5 destaca a média das duas amostras.



Figura 3.6 - Determinação da composição granulométrica da areia.

Tabela 3.5 - Determinação da composição granulométrica da areia usada na argamassa.

Abertura de malha	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)	Porcentagem passante (%)
4,75 mm	-	-	100
2,36 mm	5	5	95
1,18 mm	14	19	81
600 µm	32	51	49
300 µm	36	87	13
150 µm	10	97	3
fundo	3	-	0
Total		259	-
Tamanho máximo (mm)		2,36	-
Módulo de finura		2,59	-

3.2.2.4. Experimentos

Como citado anteriormente, deveriam ser escolhidas três níveis de argamassa, relacionadas à sua resistência à compressão. Estas resistências deveriam ser metade, uma vez e uma vez e meia a resistência adotada para os blocos. Como a resistência à compressão dos blocos foi de 10,2 MPa, as resistências dos três níveis de argamassas deveriam ser, respectiva e aproximadamente, 5,1 MPa (50%), 10,2 MPa (100%) e 15,3 MPa (150%).

Conforme destacado por STEIL (2003), a especificação de argamassas para alvenaria estrutural não deve ser baseada unicamente em sua resistência à compressão. Deve-se dar especial atenção às demais propriedades da argamassa, tais como aderência ao bloco e retenção de água.

Foram pesquisados na literatura traços de argamassa mista de cal que corresponderiam às resistências supracitadas, levando em consideração as diferenças de materiais de uma região para a outra. Escolhidos os traços, extraídos da pesquisa, procedeu-se a confecção de argamassas testes para os ensaios a seguir.

3.2.2.4.1. Determinação da consistência

MOTA (2001) aponta que, qualitativamente, uma argamassa tem boa trabalhabilidade quando se distribui facilmente ao ser assentada, preenchendo todas as reentrâncias, agarra à colher de pedreiro (quando transportada e não agarra quando distribuída no componente de alvenaria); não segrega ao ser transportada; não endurece em contato com o componente de sucção elevada e permanece plástica por tempo suficiente para que os componentes sejam ajustados no nível e no prumo. SAHLIN (1971) *apud* MOTA (2001), afirma que sem uma boa trabalhabilidade as chances de se obter juntas uniformes (bem preenchidas) são muito pequenas.

De acordo com SABBATINI (1986), é impossível mensurar a trabalhabilidade de uma argamassa em laboratório, pois ela é uma propriedade de avaliação indefinível, arbitrária e pessoal, sendo na realidade uma combinação de várias características reológicas da argamassa: plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e adesividade.

MOTA (2001) argumenta que as normas brasileiras baseiam-se demasiadamente em critérios de resistência, não havendo preocupação maior com outras propriedades e funções das argamassas como retenção de água, estanqueidade às juntas e absorção de deformações. Segundo MOHAMAD (2007), as normas não sugerem parâmetros de trabalhabilidade fixos de acordo com o tipo de assentamento. Isto pode interferir nos resultados mecânicos, causando inconsistências entre os dados obtidos experimentalmente e os fornecidos pelas normalizações.

Não existe um método direto para medir a trabalhabilidade. O que se mede é a consistência e a plasticidade (CARVALHO, 2003). A NBR 8798 (ABNT, 1985), aplicada a

alvenaria estrutural de blocos de concreto, apenas determina que a consistência mínima para alvenaria estrutural seja de 230 ± 10 mm. A NBR 13276 (ABNT, 2005), aplicada a argamassas de forma geral, estabelece o valor de 260 ± 5 mm e a NBR 15812-2 (ABNT, 2010) não especifica valores para trabalhabilidade, apenas recomenda sua compatibilidade com os outros materiais constituintes da alvenaria e com os equipamentos empregados para a execução da alvenaria. Optou-se seguir a recomendação da NBR 13276 (ABNT, 2005). Influem na consistência de uma argamassa: relação água/aglomerante; relação aglomerante/areia; granulometria da areia e natureza e qualidade do aglomerante.

A consistência da argamassa foi determinada de acordo com as especificações da norma brasileira NBR 13276 (ABNT, 2005), concernente a argamassas mistas cimento-cal. Numa argamassadeira com capacidade líquida de 5 litros, primeiramente foram misturados a areia, a cal e a quantidade total estimada de água, por 4 minutos, em velocidade baixa. Retirou-se a mistura da cuba da argamassadeira, colocando-a num recipiente hermeticamente fechado e determinando sua massa, deixando em maturação. O objetivo da maturação, segundo SABBATINI (1986) é a otimizar as propriedades da argamassa mista e evitar o desperdício de cimento pois, devido ao inchamento da areia, normalmente introduz-se um erro que conduz a um consumo maior de cimento.

Após 24 horas de maturação, determinou-se novamente sua massa. Se houve alguma perda de água por evaporação (diferença entre as massas), acrescenta-se a quantidade de água e o cimento definido. Misturou-se novamente por mais 4 minutos em velocidade baixa da argamassadeira.

O índice de consistência foi determinado utilizando-se uma mesa de consistência. Após a limpeza do tampo da mesa e da parede do molde tronco-cônico com uma esponja umedecida, colocou-se o molde no centro do tampo, preencheu-se o molde com a argamassa recém-misturada em três camadas de alturas aproximadamente iguais, aplicando-se, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com um soquete metálico. Quando necessário, completou-se o volume do molde com argamassa, rasando-a a seguir com uma régua metálica.

Após a limpeza externa do molde, retirou-se o molde com um movimento vertical e acionou-se a manivela da mesa de consistência, fazendo-a cair 30 vezes em 30 segundos, espalhando a argamassa sobre o tampo da mesa. O índice de consistência corresponde à média das medidas de 3 diâmetros uniformemente distribuídos ao longo do perímetro (figura 3.7), expressa em milímetros.



Figura 3.7 - Medição dos diâmetros de espalhamento da argamassa.

Caso o índice de consistência tenha sido inferior ao valor desejado (260 ± 5 mm), a argamassa voltou novamente para a cuba da argamassadeira, um pouco mais de água foi acrescentada e todo o procedimento de ensaio foi repetido, até se alcançar o índice desejado. Esse procedimento, quando necessário, só foi repetido duas vezes, para a mesma mistura, considerando que as perdas por evaporação poderiam afetar sua relação água/cimento estimada. Quando o índice de consistência foi ultrapassado, toda a amostra foi descartada, levando a repetição inicial de pré-mistura (maturação). Pela experiência de laboratório, mais de uma mistura, do mesmo traço (com quantidades de água diferentes), foram pré-misturados, para evitar perda de tempo.

A tabela 3.6 aponta os resultados das determinações de fator água/cimento, umidade e consistência para os traços testados. Como a consistência da argamassa não foi considerada como variável na análise experimental, ela foi considerada fixa para todos os traços de argamassa. Observa-se também a pequena variabilidade na umidade da argamassa.

Tabela 3.6 - Índices de consistência, umidade e fator água/cimento das argamassas testadas.

Traço (cim:cal:areia) em volume	Índice de consistência (mm)	Fator água/cimento	Umidade (%)*
1:0,5:6	258	1,68	22,4
1:1:6	257	1,92	24,0
1:2:9	261	2,55	21,2
1:0,4:3,2	255	0,9	19,6
1:0,5:4	261	1,1	20,0
1:0,5:2	261	0,7	20,0

*Umidade da argamassa é a relação da quantidade de água em relação à quantidade de materiais secos.

3.2.2.4.2. Determinação da retenção de água

A retenção de água da argamassa é a capacidade desta de evitar a saída de água, no estado fresco. Ensaio de prismas realizados por STEIL (2003) constataram que argamassas com praticamente as mesmas resistências e rigidez, diferindo na capacidade de retenção de água e composição, podem produzir prismas que apresentam, além de diferentes tipos de ruptura, resistências à compressão e fatores de eficiência distintos.

Pela sua importância no comportamento mecânico dos prismas à compressão, relacionado à aderência argamassa/bloco, junto com a absorção do bloco, foi resolvido determinar a retenção de água para as argamassas escolhidas. Deve-se ressaltar, entretanto, que ela não foi considerada como uma variável para a análise experimental. Mas tentou-se utilizar argamassas com valores de retenção parecidos.

Como no caso da consistência, a NBR 15812-2 (ABNT, 2010) também não especifica valores de retenção de água. A NBR 8798 (ABNT, 1985) determina que a retenção de água de argamassas para alvenaria estrutural de blocos de concreto deve ser de, no mínimo, 75% e é este valor que foi tomado com parâmetro neste trabalho.

Os procedimentos de ensaio para determinação da retenção de água de argamassa é estabelecido na NBR 13277 (ABNT, 2005). Como o laboratório não possuía os equipamentos necessários exigidos por esta versão da norma, o procedimento seguiu as recomendações de uma versão anterior da norma, a NBR 13277 (ABNT, 1995). Este procedimento foi tomado pelo fato de apenas ser necessário determinar a homogeneidade dos valores de retenção de água para os diversos traços.

O ensaio foi executado do seguinte modo: após ter sido determinada a quantidade de água para a consistência desejada, preparou-se uma nova quantidade de argamassa, seguindo os mesmos procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2005), para cada traço. Determinou-se a massa do molde cilíndrico vazio, sem sua tampa, e a massa de 12 folhas de papel-filtro. Preencheu-se o molde com a argamassa fresca, golpeando-a com um soquete metálico, seguido de seu rasamento no topo do molde, seguido pela determinação da massa do conjunto. Sobre a argamassa colocou-se uma folha de gaze e as 12 folhas de papel-filtro, a tampa do molde e um peso com 2 quilogramas de massa, durante 2 minutos. Passado o tempo, o peso e a tampa foram retirados e foi determinada a massa das 12 folhas de papel-filtro que estiveram em contato com a argamassa fresca. A retenção de água foi calculada pela equação

3.4, cujo resultado deve ser expresso em percentagem, arredondando ao número inteiro mais próximo.

$$Ra = \left[1 - \frac{(M_f - M_{se})}{AF \times (M_{ma} - M_m)} \right] \times 100 \quad \text{Equação 3.4}$$

$$\text{sendo: } AF = \frac{M_w}{M + M_w} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde: M_w = massa total de água acrescentada a mistura, em g;

M = massa de argamassa industrializada ou soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra, em g;

AF = fator água argamassa fresca;

M_f = massa do conjunto de discos molhados em papel filtro, em g;

M_{se} = massa do conjunto de discos secos, em g;

M_{ma} = massa do molde com argamassa, em g;

M_m = massa do molde vazio, em g.

A tabela 3.7 indica os resultados deste ensaio para as argamassas testadas. Observe-se homogeneidade dos resultados e que todas alcançaram o valor mínimo (70%). Todos os traços foram aceitos.

Tabela 3.7 - Retenção de água das argamassas testadas.

Traço (cim:cal:areia) em volume	Retenção de água (%)
1:0,5:6:1,68	97,6
1:1:6:1,92	94,6
1:2:9:2,55	97,4
1:0,4:3,2:0,9	96,6
1:0,5:4:1,1	96,8
1:0,5:2:0,7	96,3

3.2.2.4.3. Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão da argamassa de assentamento, na prática, é o principal parâmetro utilizado em projetos de alvenaria estrutural. Segundo SABBATINI (1986), os motivos para ainda hoje se ensaiar a resistência à compressão de corpos de prova da

argamassa empregada na alvenaria estrutural são: o ensaio permite um controle estatístico da qualidade da argamassa em si e porque a resistência à compressão reflete o grau de hidratação da argamassa – que tem influência em outras características de desempenho, como a durabilidade.

Os procedimentos para este ensaio são determinados pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Os corpos de prova para este ensaio possuem um formato prismático, com 4 centímetros de largura, 4 centímetros de altura e 16 centímetros de comprimento. A NBR 13279 (ABNT, 2005) permite que os moldes possam ser confeccionados de forma a preencher três fôrmas (corpos de prova) por vez.

Estudos apontam a diferença do formato dos corpos de prova dos ensaios em relação ao formato da junta de argamassa, levando a diferentes situações de confinamento e consequentemente resistências diferentes (BARBOSA, 2008; MOHAMAD, 2007). Mas o formato prismático dos corpos de prova da atual norma conseguiu diminuir estas diferenças, em relação ao formato cilíndrico (5 centímetros de diâmetro e 10 centímetros de altura) da versão anterior da norma.

Logo após a mistura final da argamassa, seguindo os mesmos procedimentos para determinação da consistência e da retenção de água, colocou-se os moldes triplos sobre a mesma mesa utilizada para o ensaio de consistência, fixando o molde ao tampo da mesa com o auxílio de sargentos (figura 3.8). Aplicou-se uma fina camada de óleo mineral no fundo e laterais internas do molde. Introduziu-se, em cada compartimento do molde, uma porção de argamassa, espalhando com o nivelador de camadas. Com a primeira camada nivelada, aplicou-se 30 quedas da mesa de adensamento. Introduziu-se a segunda camada de argamassa, em excesso, seguida de novo nivelamento e mais 30 quedas. Os corpos de prova foram rasados com uma régua metálica, permanecendo dentro dos moldes por 48 horas (figura 3.9). Após este tempo, eles foram desmoldados e mantidos em condições de laboratório até o dia dos ensaios.



Figura 3.8 - Molde para a confecção dos corpos de prova de argamassa.



Figura 3.9 - Corpos de prova moldados.

Foram moldados 3 corpos de prova para 7 dias e 3 corpos de prova para 28 dias, para cada traço. A idade básica escolhida para a análise executada neste trabalho foi de 28 dias. Mas optou-se também pelo ensaio aos 7 dias para se ter uma previsão de resistência e a necessidade ou não de se testar outros traços.

Na idade de ensaio, os corpos de prova foram levados à prensa para a determinação da resistência à tração e à compressão. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios, da marca *EMIC*, modelo *DL30000*, com capacidade de 300 kN. Apesar de não ser foco deste trabalho, a NBR 13279 (ABNT, 2005) determina que a resistência à compressão de argamassa seja determinada após estes corpos de prova terem sido ensaiados à tração por flexão. Após este ensaio, as metades dos três corpos de prova se convertem nos seis corpos de prova para o ensaio à compressão.

Para a determinação da resistência à compressão, posicionou-se cada corpo de prova no centro do prato inferior da máquina de ensaio, entre duas placas quadradas de 40

milímetros de lado por 10 milímetros de espessura, seguida de aplicação de carregamento com velocidade de (500 ± 50) N/s, até sua ruptura, (figura 3.10). A resistência à compressão é determinada pela equação 3.6.



Figura 3.10 – Ensaio de compressão da argamassa

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Equação 3.6

Onde: R_c é a resistência à compressão, em megapascals;

F_c é a carga máxima aplicada, em newtons;

1600 é a área da seção das placas auxiliares, em milímetros quadrados.

A tabela 3.8 mostra o resultado dos corpos de prova ensaiados à compressão dos traços testados. Note que há diferença entre os valores seguindo o método de cálculo da NBR 13729 (ABNT, 2005), que permite um desvio absoluto máximo de 0,5 MPa, descartando os valores nos dois extremos, e o valor médio considerado, calculado após o *teste de Grubbs* para descartar valores anômalos, se houver.

Tabela 3.8: Resistência à compressão dos traços testados, aos 28 dias.

Traço (cim:cal:areia) em volume	Resistência à compressão média	Resistência pela NBR 13279	Valores anômalos
1:0,5:6:1,68	2,1	1,8	Não
1:1:6:1,92	2,4	2,4	Não
1:2:9:2,55	1,3	1,3	Não
1:0,4:3,2:0,9	7,9	7,6	Não
1:0,5:4:1,1	3,1	3,4	Não
1:0,5:2:0,7	12,7	13,1	Não

Os três traços escolhidos, levando em consideração a consistência, a retenção de água e a resistência à compressão foram: **1:0,5:4:1,1** a partir de agora chamado *traço 50*, por ter resistência igual a 50 %, em relação a resistência à compressão assumida dos blocos cerâmicos **1:0,4:3,2:0,9** a partir de agora chamado *traço 100*, por ter resistência igual a 100 %, em relação a resistência à compressão assumida dos blocos cerâmicos e **1:0,5:2:0,7** a partir de agora chamado *traço 150*, por ter resistência igual a 150 %, em relação a resistência à compressão assumida dos blocos cerâmicos.

Os traços adotados foram escolhidos com suas resistências propositalmente um pouco abaixo do desejado, pois esperava-se que a metodologia diferente empregada para a confecção dos mesmos afetasse sua resistência para cima.

3.2.3. Prismas

Como apontado no capítulo 2, no Brasil, tanto a NBR 10837 (ABNT, 1989), para alvenaria de blocos de concreto, quanto a NBR 15812-2 (ABNT, 2010), para alvenaria de blocos cerâmicos, admitem o teste em prismas de bloco estrutural, confeccionados com dois blocos aprumados, com uma única junta horizontal. Segundo STEIL (2003), os ensaios de prismas são os preferidos pelas normalizações para inferir a resistência da alvenaria, pois consideram o efeito da presença da junta de argamassa, do prumo e da qualidade da mão de obra, são viáveis de serem realizados em quase todas as prensas próprias para ensaio de cilindros de concreto e têm custo bastante inferior ao ensaio de paredes.

Entretanto, conforme apontado por CARVALHO (2003), diversos pesquisadores têm ressaltado que os ensaios de prismas fornecem resultados que normalmente não reproduzem as condições reais a que estão submetidos os elementos parede. Isto ocorre porque os prismas são ensaiados entre os pratos da prensa e por isso sofrem restrição à expansão lateral, o que não ocorre normalmente nas paredes de alvenaria.

Alguns estudos mostraram a eficácia de utilizar prismas com outras configurações, apontando motivos como a liberdade do bloco central quanto ao confinamento (CARVALHO, 2003; SANTOS *et al.*, 2007). Neste trabalho, optou-se por confeccionar prismas de acordo com as especificações das normas brasileiras.

A NBR 15812-2 (ABNT, 2010) determina os procedimentos para confecção, capeamento e ensaio dos prismas à compressão. Os materiais para confecção das argamassas

foram medidos (exceção ao cimento) e misturados em uma betoneira com capacidade de 180 litros, seguindo os mesmos procedimentos quanto à sequência e tempo de mistura quando da mistura das argamassas para os ensaios de consistência, retenção de água e resistência à compressão. Após o tempo de mistura, a argamassa foi deixada em estado de maturação por 24 horas, em recipiente fechado, para garantir que não houvesse perda de água. Pouco antes da confecção dos prismas, a amostra voltou para a betoneira, sendo acrescentado o cimento e novamente misturado por mais 4 minutos.

Para cada argamassa confeccionada, foram moldados três corpos de prova prismáticos para determinação das resistências à tração e à compressão e, imediatamente depois, confeccionados os prismas.

Seguindo as recomendações e procedimentos de MORENO JR. & ALBUQUERQUE (2002), CARVALHO (2003), BEALL (2004) e SANTOS *et al.* (2007), os blocos foram molhados antes da confecção dos prismas, para evitar a absorção excessiva da água da argamassa fresca por parte do bloco, o que poderia prejudicar a aderência desta ao bloco e evitar o retempero (aplicação de mais água) da argamassa. SINHA (1967) *apud* SARAGANPANY *et al.* (2004) atestou que a força de ligação argamassa bloco média alcançou seu valor mais alto quando a umidade da unidade (tijolo maciço) estava aproximadamente em 80% do valor de saturação.

Segundo DUARTE (1999), há evidências de que unidades excessivamente porosas e com alta sucção inicial de umidade tendem a reduzir a resistência à compressão de paredes, devido a rápida redução de plasticidade da argamassa quando em contato com unidades de alta sucção, causando um enxugamento da junta de argamassa com prejuízos à aderência. Para HENDRY *et al.* (2004), se água é retirada rapidamente por uma unidade de alta absorção, haverá água insuficiente deixada dentro da junta de argamassa para hidratação do cimento, resultando em ligação pobre entre unidade e argamassa. Como apontado ainda por STEIL (2003), a queda de plasticidade dificulta 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.

Sobre uma base plana e firme, o bloco inferior foi colocado, e uma porção da argamassa aplicada sobre este, cobrindo toda a área do bloco, com altura suficiente para, após a arrumação, garantir a espessura de argamassamento desejada. O bloco superior foi assentado sobre a argamassa, sem movimentos horizontais, sendo nivelados com o auxílio de um prumo (figura 3.11) e de um nível de bolha (figura 3.12). A camada de argamassa inicialmente preencheu toda a área bruta do bloco (*full bed*, em inglês) e não apenas nas

paredes das faces longitudinais externas (*shell bed*, em inglês). Segundo HENDRY *et al.* (2004), testes comprovaram que o enchimento incompleto das juntas de assentamento podem reduzir a resistência da alvenaria em até 33%, além de prejudicar a proteção contra as intempéries e isolamento acústico, sem falar que este é o procedimento adotado pela NBR 15812-2 (ABNT, 2010).



Figura 3.11 - Prisma sendo aprumado.



Figura 3.12 - Prisma sendo nivelado.

Para garantir a espessura da argamassa de assentamento, foram utilizados gabaritos e uma régua metálica graduada (figura 3.13). Para todos os prismas, foi permitida uma variação de ± 3 milímetros na espessura da argamassa de assentamento, devido às imperfeições dos blocos.



Figura 3.13 - Medição da espessura da junta de assentamento.

Para evitar a influência da quantidade de argamassa em excesso diferente devido à variação da espessura, ela foi retirada na parte interna dos blocos, com o auxílio de uma espátula, sendo que a área de argamassamento cobrisse somente a área de trabalho do prisma de modo a se obter a configuração apresentada na figura 3.14. Após a limpeza dos prismas, eles foram deixados em repouso por, no mínimo, 24 horas, sendo então identificados e transportados para a área de cura, próxima da área de confecção. Os prismas receberam uma identificação numérica de três valores. Por exemplo, **100.15.1**, significa argamassa com resistência de 100%, espessura de 15 mm e primeira determinação; **150.20.2**, significa argamassa com resistência de 150 %, espessura de 20 mm e segunda determinação (réplica).

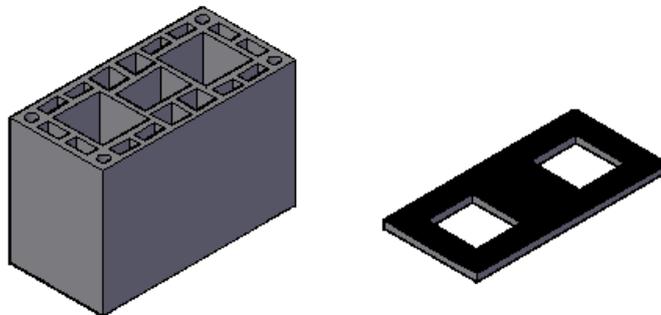


Figura 3.14 - Esquema do bloco e sua área de argamassamento.

Os prismas permaneceram em situação de cura seca até o dia do capeamento. A cura seca favorece a perda natural de água da argamassa, durante a cura, proporcionando elevação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade da argamassa nas juntas do prisma

(BARBOSA, 2008). BEALL (2004) aconselha a cura úmida depois da construção, pois isto assegura completa hidratação do cimento e melhora a ligação da argamassa à unidade. A cura seca foi escolhida, seguindo as recomendações da NBR 12812-2 (ABNT, 2010).

Dois dias antes do ensaio, os prismas foram cuidadosamente transportados para evitar trepidações ou choques que pudessem causar a ruptura da aderência nas interfaces entre a argamassa e os blocos. O capeamento de cada face de trabalho foi feito com pasta de cimento, semelhante à utilizada para os ensaios dos blocos. Uma das faces foi capeada em um dia e a segunda após 24 horas, sendo que o prisma foi virado com cuidado para evitar que o bloco desprendesse da argamassa (figura 3.15).

Após o endurecimento da segunda face, na idade de 28 dias de confecção, os prismas foram medidos (largura, comprimento, altura e espessura de junta) em dois pontos opostos e colocados centralizados sobre a placa inferior da prensa e a carga foi aplicada de forma constante até 50% da carga prevista e depois com uma velocidade que permitiu a ruptura acontecer entre 1 e 2 minutos, anotando-se a carga e modo de ruptura dos prismas (esmagamento da argamassa e/ou ruptura à tração do bloco). Como não houve interesse na determinação do módulo de elasticidade do prisma, não foram colocados leitores de deformação.

Todos os prismas foram ensaiados com placas de ensaio maciças, sem a preocupação de usar métodos para diminuir o efeito de confinamento, visto ser este o procedimento adotado pela NBR 12812-2 (ABNT, 2010).



Figura 3.15 - Capeamento da face inferior dos prismas.

3.2.3.1. Apresentação dos Resultados

Seguem-se os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão das argamassas e dos prismas de blocos estruturais cerâmicos, de acordo com a combinação resistência/espessura de argamassa. Cada tabela mostra os resultados individuais de cada corpo de prova de argamassa (seis) e de cada prisma (cinco), com seus parâmetros estatístico (média e desvio padrão). Para cada amostra, foram determinados *testes de Grubbs* (para determinar valores anômalos). Os parâmetros estatísticos mostrados nas tabelas referem-se, quando encontrado, sem os valores anômalos.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 10 milímetros e resistência de 50% são apresentados na tabela 3.9. Os valores de resistência correspondem a resistência à compressão na área bruta, seguindo a recomendação da NBR 15612-2 (ABNT, 2010). Encontrou-se um valor anômalo para os resultados dos prismas da réplica. Este resultado anômalo, bem como os demais encontrados nas outras combinações podem ser atribuídos à variações da espessura da argamassa de assentamento que compensou as variações dimensionais dos blocos ou da falta de nível do prisma. A figura 3.16 destaca um exemplo de corpo de prova rompido, mostrando um modo de ruptura típico desta combinação. Observe que houve algum esmagamento da argamassa, com um pouco de ruptura do bloco por tração.

Tabela 3.9 - Resistência à compressão dos prismas **50.10**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	7,9	6,8	7,1	7,3
2	8,1	6,2	8,0	6,6
3	7,3	8,0	8,5	5,3*
4	6,4	6,6	7,8	6,9
5	7,7	6,9	7,2	7,2
6	7,6	-	5,6	-
Modo de ruptura típico	-	Argamassa/ bloco	-	Argamassa/ bloco
Média	7,5	6,9	7,4	7,0
Desvio Padrão	0,60	0,67	1,01	0,32
* Valor anômalo				



Figura 3.16 - Exemplo de um prisma 50.10 após ruptura.

Para uma comparação entre os resultados, foi executada uma análise de variância (ANOVA), com o auxílio do programa computacional *Excel 2007*. A análise de variância é um *teste de distribuição F*, que determina se as médias de duas ou mais populações podem ser consideradas estatisticamente iguais, analisando suas variâncias. Tanto para os resultados entre as argamassas, quanto para os prismas, a análise comprovou a igualdade estatística dos resultados.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 15 milímetros e resistência de 50% são apresentados na tabela 3.10. Não se encontrou valores anômalos nem para as argamassas nem para os prismas. A figura 3.17 destaca um exemplo de corpo de prova rompido, mostra um modo de ruptura típico desta combinação, com algum esmagamento da argamassa e um pouco de ruptura do bloco por tração. A análise de variância comprovou que os resultados, tanto para as argamassas quanto para os prismas são estatisticamente semelhantes.

Tabela 3.10 - Resistência à compressão dos prismas 50.15.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	7,7	5,9	5,8	7,2
2	6,9	6,6	7,4	7,3
3	5,1	6,2	6,7	6,1
4	8,1	7,2	8,7	6,6
5	8,0	6,0	7,8	7,3
6	7,6	-	8,6	-
Modo de ruptura típico	-	Argamassa/ bloco	-	Argamassa/ bloco
Média	7,2	6,4	7,5	6,9
Desvio Padrão	1,13	0,53	1,12	0,53



Figura 3.17 - Exemplo de um prisma 50.15 após ruptura.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 20 milímetros e resistência de 50% são apresentados na tabela 3.11. Todos os resultados foram aceitos, sem descartes. A análise de variância comprovou a igualdade estatística dos resultados. A figura 3.18 aponta um exemplo de corpo de prova rompido. Houve esmagamento da argamassa e bem pouca ruptura de tração no bloco.

Tabela 3.11 - Resistência à compressão dos prismas **50.20**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	6,6	5,4	7,3	4,9
2	5,5	5,9	7,3	4,4
3	8,2	3,3	8,8	5,4
4	9,2	5,1	8,0	3,4
5	8,3	4,6	7,9	3,5
6	7,5	-	6,3	-
Modo de ruptura típico	-	Argamassa	-	Argamassa
Média	7,5	4,8	7,6	4,3
Desvio Padrão	1,33	0,99	0,84	0,87



Figura 3.18 - Exemplo de um prisma 50.20 após ruptura.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 10 milímetros e resistência de 100% são apresentados na tabela 3.12. A análise de variância também foi aceitável. Nenhum resultado precisou ser descartado. Na figura 3.19 aparece um modo de ruptura típico. Nota-se um dano maior sobre o bloco em um dos lados do prisma e a argamassa não apresentou ruptura por esmagamento, mas por tração, acompanhando as fissuras dos blocos.

Tabela 3.12 - Resistência à compressão dos prismas **100.10**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	8,9	8,9	10,3	8,7
2	8,9	7,0	12,4	7,0
3	12,1	7,1	10,7	8,6
4	11,4	7,5	8,5	6,8
5	10,7	7,6	10,6	6,4
6	10,5	-	11,6	-
Modo de ruptura típico	-	Bloco	-	Bloco
Média	10,4	7,6	10,7	7,5
Desvio Padrão	1,30	0,76	1,32	1,07



Figura 3.19 Exemplo de um prisma 100.10 após ruptura.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 15 milímetros e resistência de 100% são apresentados na tabela 3.13. Os valores ficaram dentro da análise de variância. Um modo de ruptura típico é mostrado na figura 3.20. Apresenta um pouco de esmagamento da argamassa e tração do bloco em um lado do prisma.

Tabela 3.13 - Resistência à compressão dos prismas **100.15**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	8,9	7,2	7,1	7,0
2	8,9	7,8	11,0	7,0
3	12,1	6,4	12,1	7,8
4	11,4	7,1	8,7	7,3
5	10,7	5,6	11,7	6,8
6	10,5	-	11,0	-
Modo de ruptura típico	-	Argamassa/ bloco	-	Argamassa/ bloco
Média	10,4	6,8	10,3	7,2
Desvio Padrão	1,30	0,84	1,95	0,39



Figura 3.20 - Exemplo de um prisma 100.15 após ruptura.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 20 milímetros e resistência de 100% são apresentados na tabela 3.14. Nenhum valor foi considerado anômalo. A análise de variância comprovou a igualdade estatística das amostras. A figura 3.21, aponta esmagamento da argamassa e ruptura à tração do bloco isolado.

Tabela 3.14 - Resistência à compressão dos prismas **100.20**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	8,0	5,0	10,7	5,0
2	7,2	5,8	9,5	4,3
3	10,7	5,6	12,0	5,9
4	12,1	5,6	8,1	6,1
5	10,9	5,6	8,9	4,1
6	9,8	-	8,9	-
Modo de ruptura típico	-	Argamassa/ bloco	-	Argamassa/ bloco
Média	9,8	5,5	9,7	5,1
Desvio Padrão	1,86	0,30	1,43	0,91



Figura 3.21 - Exemplo de um prisma 100.20 após ruptura.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 10 milímetros e resistência de 150% são apresentados na tabela 3.15. Foram encontrados valores anômalos nas duas determinações de prismas, descartados para as determinações estatísticas finais. Análise de variância dentro do aceitável. A figura 3.22 mostra um prisma desta combinação rompido, mostrando ruptura por tração dos blocos em vários pontos, carregando parte da argamassa. O som verificado no momento da ruptura foi tipicamente maior que os outros prismas já ensaiados.

Tabela 3.15 - Resistência à compressão dos prismas **150.10**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	16,1	10,1	17,4	9,6
2	17,8	8,4	20,4	11,3*
3	19,6	10,1	22,4	9,9
4	19,8	8,6	16,0	10,5
5	17,6	15,0*	20,6	8,1
6	17,9	-	17,8	-
Modo de ruptura típico	-	Bloco	-	Bloco
Média	18,1	9,3	19,1	9,5
Desvio Padrão	1,38	0,93	2,41	1,02
* Valores anômalos				



Figura 3.22 - Exemplo de um prisma 150.10 após ruptura.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 15 milímetros e resistência de 150% são apresentados na tabela 3.16. As duas determinações apresentaram um valor anômalo, cada, para cima. Estes valores elevados podem ser atribuídos à pequenas variações de espessura da argamassa de assentamento para menos, transferindo as tensões para o blocos (mais resistente). A análise de variância aceitou as amostras como estatisticamente iguais. Na figura 3.23, observa-se um prisma desta combinação rompido por tração nos blocos.

Tabela 3.16 - Resistência à compressão dos prismas **150.15**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	17,5	7,8	17,4	6,3
2	22,5	8,0	20,4	8,6
3	23,1	6,7*	22,4	7,7
4	19,5	8,1	16,0	6,2
5	16,7	7,7	20,6	8,2
6	23,1	-	17,8	-
Modo de ruptura típico	-	Bloco	-	Bloco
Média	20,4	7,9	19,1	7,4
Desvio Padrão	2,89	0,18	2,41	1,10
* Valor anômalo				



Figura 3.23 - Exemplo de um prisma 150.15 após ruptura.

Os resultados dos ensaios dos prismas com espessura de 20 milímetros e resistência de 150% são apresentados na tabela 3.17, com seus valores estatísticos. Nenhum valor foi descartado. A figura 3.24 mostra um prisma desta combinação rompido, mostrando a ruptura do prisma por tração do bloco, mas com um pequeno esmagamento da argamassa. Análise de variância comprovou a igualdade estatística dos resultados.

Tabela 3.17 - Resistência à compressão dos prismas **150.20**.

CP	1ª determinação (MPa)		Réplica (MPa)	
	Argamassa	Prisma	Argamassa	Prisma
1	18,5	7,9	19,7	7,9
2	18,3	5,9	19,1	6,8
3	15,6	7,4	19,8	7,9
4	21,1	6,8	14,6	7,3
5	20,8	6,7	19,7	7,4
6	16,0	-	17,2	-
Modo de ruptura típico	-	Argamassa/ Bloco	-	Argamassa/ Bloco
Média	18,4	6,9	18,3	7,5
Desvio Padrão	2,31	0,76	2,08	0,46



Figura 3.24 - Exemplo de um prisma 150.20 após ruptura.

Além da análise de variação para as amostras de argamassas e dos prismas, dois a dois, foi executada também uma análise de variação para as seis amostras de cada resistência de argamassa e para todas foram obtidas a semelhança estatística.

Em resumo, podem-se apontar algumas conclusões iniciais sobre os ensaios. Primeiro, as resistências à compressão das argamassas foram maiores do que as obtidas durante a fase de testes. Isto já era esperado, visto que a betoneira utilizada para a mistura das argamassas para a confecção dos prismas possuía uma abertura maior que a da argamassadeira nos testes iniciais, provendo maior área e maior perda de água por evaporação e, conseqüentemente, reduzindo a relação água/cimento. Este fenômeno também teve a contribuição do local de confecção dos prismas, mais fechado, abafado e com maior temperatura que o primeiro.

Segundo, notou-se que a argamassas mais fracas tendem a sofrer maior potencial de esmagamento. Esta tendência também foi observada à medida que se aumentou a espessura da junta. Inversamente ao supracitado, o dano por tração do bloco tendeu a aumentar para argamassas mais fortes e camadas mais finas.

4 Análise dos resultados

São analisados neste capítulo os resultados obtidos no programa experimental desenvolvido para a caracterização das propriedades mecânicas dos prismas confeccionados com blocos cerâmicos. Primeiro, faz-se uma avaliação geral da resistência à compressão dos prismas relacionada às variações impostas no planejamento experimental.

4.1. Resumo dos resultados

Para a análise dos resultados obtidos nos experimentos com prismas, utilizaram-se as resistências médias dos resultados obtidos nas resistências à compressão das argamassas e as médias das resistências à compressão dos prismas, médias estas entre os resultados das duas determinações, consideradas estatisticamente iguais pela análise de variância (ANOVA). A tabela 4.1 resume os dados citados, mostrando, na primeira coluna, a combinação resistência da argamassa (porcentagem em relação à resistência do bloco) e espessura da argamassa de assentamento, na segunda coluna, a resistência média dos prismas ensaiados, considerando a média das duas determinações e, na terceira coluna, o modo de ruptura típico.

Tabela 4.1: Resistências médias e modos de ruptura dos prismas ensaiados.

Combinação	Resistência média do prisma (MPa)	Modo de ruptura típico
50.10	6,9	Argamassa/bloco
50.15	6,6	Argamassa/bloco
50.20	4,5	Argamassa
100.10	7,5	Bloco
100.15	7,0	Argamassa/bloco
100.20	5,3	Argamassa/bloco
150.10	9,4	Bloco
150.15	7,7	Bloco
150.20	7,2	Argamassa/bloco

Através da análise dos resultados apresentados na tabela 4.1, pode-se identificar que a resistência dos prismas aumenta como o incremento da resistência da argamassa de assentamento e decresce com o aumento da espessura da argamassa de assentamento e que quanto maior for a resistência da argamassa, mais acentuada é esta queda. As figuras 4.1 e 4.2 destacam, em gráficos, estas relações, considerando tanto a influência da variação da espessura da argamassa de assentamento (figura 4.1) quanto a influência da variação da resistência à compressão da argamassa de assentamento (figura 4.2) sobre a resistência à compressão dos prismas (valores médios).

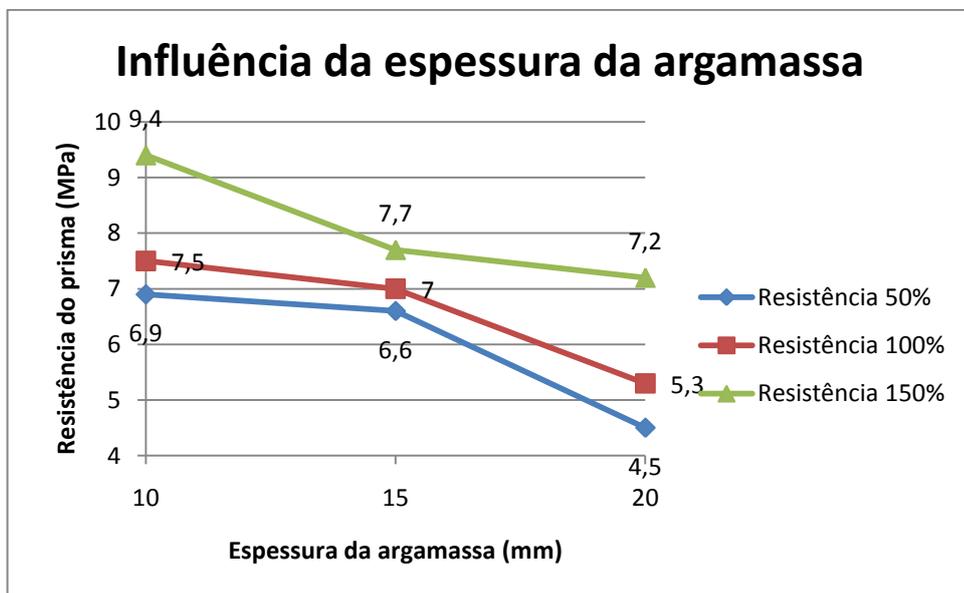


Figura 4.1 - Influência da espessura da argamassa na resistência dos prismas.

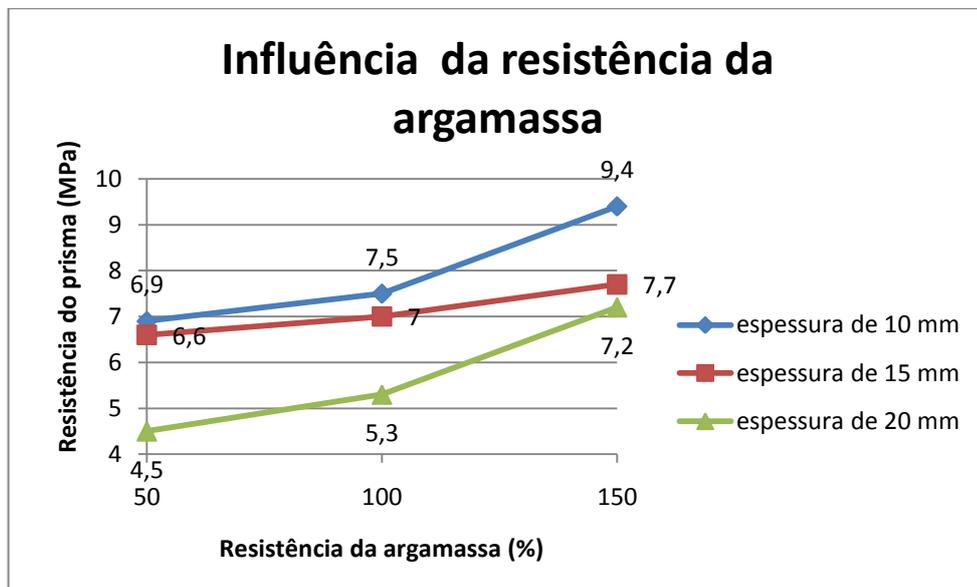


Figura 4.2 - Influência da resistência da argamassa na resistência dos prismas.

4.2. Determinação dos efeitos

Pela análise da tabela 4.1 e das figuras 4.1 e 4.2, pode-se identificar que tanto a variação da espessura da argamassa de assentamento quanto à variação da resistência à compressão desta argamassa influenciam na resistência à compressão do prisma. Podem-se quantificar os efeitos individuais de cada mudança de nível, para cada fator. Usando a letra **E** para representar o efeito, e sendo \bar{y}_i a resposta média observada no *i-ésimo* ensaio, podemos considerar a equação 4.1 para calcular estes efeitos, permanecendo fixo o outro fator.

$$E = \frac{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{\bar{y}_1} \times 100 \quad \text{Equação 4.1}$$

Por exemplo, para o efeito da resistência da argamassa de 50% sobre a resistência dos prismas, variando a espessura da argamassa de 10 milímetros para 15 milímetros, temos:

$$E = \frac{6,6 - 6,9}{6,9} \times 100 = \frac{-0,3}{6,9} \times 100 = -4,3$$

Ou seja, para a argamassa com resistência de 50%, variando a espessura de argamassa de 10 milímetros para 15 milímetros, resultou uma diminuição de 4,3% na resistência do prisma. Para os efeitos individuais de cada variação, apresenta-se, nas tabelas 4.2 e 4.3, um resumo dos resultados. Na tabela 4.2, a primeira coluna registra as três diferentes resistências relativas das argamassas, a segunda e a terceira colunas a mudança de espessura, para cada variação de resistência e a última coluna, o efeito relativo de cada mudança, calculado de acordo com a equação 4.1. A tabela 4.3 apresenta as três diferentes espessuras de argamassa, com a variação das resistências relativas das argamassas e os valores de cada efeito relativo individual, também calculado pela equação 4.1.

Para a determinação da significância dos efeitos das modificações expostas na análise experimental, seguiram-se as notações de MONTGOMERY (2001). Para um projeto fatorial 3^2 quantitativo, pode-se denotar os níveis mais baixo, intermediário e mais alto por -1, 0 e +1, respectivamente. Esta codificação facilita a interpretação dos efeitos individuais e conjunto, relacionando as respostas aos níveis dos fatores.

Neste caso, os níveis dos fatores aqui considerados podem ser representados conforme a tabela 4.4, que apresenta cada fator com sua respectiva codificação. A tabela 4.5 apresenta a aplicação desta representação nos resultados, mostrando a codificação conjunta de cada fator, de acordo com a combinação resistência relativa da argamassa com a espessura da argamassa e o resultado médio dos prismas.

Tabela 4.2 - Efeitos relativos das mudanças na espessura da argamassa de assentamento.

Resistência da argamassa	Mudança de espessura (mm)		Efeito relativo (%)
	de	para	
50%	10	15	-4,3
	15	20	-31,8
	10	20	-34,8
100%	10	15	-7,1
	15	20	-24,3
	10	20	-29,3
150%	10	15	-18,1
	15	20	-6,5
	10	20	-23,4

Tabela 4.3 - Efeitos relativos das mudanças na resistência da argamassa de assentamento.

Espessura da argamassa (mm)	Mudança de resistência da argamassa		Efeito relativo (%)
	de	para	
10	50%	100%	8,7
	100%	150%	25,3
	50%	150%	36,2
15	50%	100%	6,1
	100%	150%	10,0
	50%	150%	16,7
20	50%	100%	17,8
	100%	150%	35,8
	50%	150%	60,0

Tabela 4.4 - Codificação adotada dos níveis dos fatores considerados.

Fatores	(-1)	0	(+1)
Espessura da camada de assentamento (mm)	10	15	20
Resistência da argamassa de assentamento (%)	50	100	150

Tabela 4.5 - Resistências médias dos prismas ensaiados sobre a codificação dos níveis.

Combinação	Resistência da argamassa	Espessura da argamassa	Resistência média do prisma (MPa)
50.10	-1	-1	6,9
50.15	-1	0	6,6
50.20	-1	+1	4,5
100.10	0	-1	7,5
100.15	0	0	7,0
100.20	0	+1	5,3
150.10	+1	-1	9,4
150.15	+1	0	7,7
150.20	+1	+1	7,2

Pode-se assim, determinar o sinal do efeito das interações, multiplicando-se os valores representados por cada nível dos fatores. A tabela 4.6, acrescenta uma coluna à tabela 4.5, que apresenta estes valores. Estes valores (sinais) são importantes para a determinação dos efeitos.

Tabela 4.6 - Sinal dos efeitos da combinação dos níveis representados.

Combinação	Resistência da argamassa	Espessura da argamassa	Combinação dos níveis	Resistência média do prisma (MPa)
50.10	-1	-1	+1	6,9
50.15	-1	0	0	6,6
50.20	-1	+1	-1	4,5
100.10	0	-1	0	7,5
100.15	0	0	0	7,0
100.20	0	+1	0	5,3
150.10	+1	-1	-1	9,4
150.15	+1	0	0	7,7
150.20	+1	+1	+1	7,2

Para calcular qualquer efeito sem dificuldade, escrevem-se os termos da tabela anterior em forma de matriz, considerando na primeira coluna da matriz os valores das médias dos resultados como +1 (coluna **M**), na segunda coluna a representação das resistências das argamassas (coluna **R**), na terceira coluna a representação das espessuras das argamassas (coluna **E**) e na quarta coluna a representação das interações (coluna **RE** ou **RxE**). Chega-se então a matriz 9x4 apresentada na figura 4.3. Esta matriz é chamada de **tabela de coeficientes de contraste** (BARROS NETO *et al.*, 2003).

$$\begin{array}{cccc}
 & M & R & E & RE \\
 \left[\begin{array}{cccc}
 +1 & -1 & -1 & +1 \\
 +1 & -1 & 0 & 0 \\
 +1 & -1 & +1 & -1 \\
 +1 & 0 & -1 & 0 \\
 +1 & 0 & 0 & 0 \\
 +1 & 0 & +1 & 0 \\
 +1 & +1 & -1 & -1 \\
 +1 & +1 & 0 & 0 \\
 +1 & +1 & +1 & +1
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figura 4.3: Matriz dos coeficientes de contraste da análise experimental.

Com esta matriz pode-se calcular todos os efeitos com uma única equação matricial. Cada efeito é dado pelo produto escalar do seu vetor matriz de coeficientes de contraste pelo vetor das respostas, a menos de um divisor. Este divisor, em um planejamento 3^k é igual a 3^{k-1} para os efeitos e igual a 3^k para a média. Chamando de \mathbf{X} a matriz completa de coeficientes de contrastes e \mathbf{y} o vetor coluna com os resultados médios, os efeitos serão, a menos dos divisores, os elementos do produto $\mathbf{X}^t \mathbf{y}$, que é um vetor coluna. Neste caso:

$$\mathbf{X}^t \mathbf{y} = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & +1 & +1 & +1 \\ -1 & 0 & +1 & -1 & 0 & +1 & -1 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6,9 \\ 6,6 \\ 4,5 \\ 7,5 \\ 7,0 \\ 5,3 \\ 9,4 \\ 7,7 \\ 7,2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 62 \\ 6,2 \\ -4,6 \\ 0,2 \end{bmatrix}$$

Dividindo o primeiro elemento por 9 (3^2) e os demais por 3, obtém-se, finalmente:

$$\begin{bmatrix} M \\ R \\ E \\ RE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,9 \\ 2,1 \\ -1,5 \\ 0,07 \end{bmatrix}$$

Este resultado indica que a média dos resultados dos prismas é de 6,9 MPa; que o aumento de resistência da argamassa de assentamento, de 50% para 150% da resistência do bloco gera um incremento, em média, de 2,1 MPa e que o aumento da espessura da camada de assentamento dos prismas de 10 milímetros para 20 milímetros gera um decréscimo, em média, de 1,5 MPa sobre a resistência do prisma. O efeito da interação entre os dois fatores,

ou seja, o ganho de resistência do prisma por se variar a resistência da argamassa de 50% para 150% da resistência do bloco e variando, ao mesmo tempo, a espessura da argamassa de assentamento de 10 milímetros para 20 milímetros é, em média, de 0,07 MPa. Para poder analisar a significância destes efeitos, deve-se determinar primeiro a estimativa do erro experimental.

4.3. Determinação da estimativa do erro experimental

Como citado anteriormente, os ensaios foram realizados em duplicata para que pudesse ser determinado o erro experimental e, conseqüentemente, poder avaliar-se a significância estatística dos efeitos. Para que este erro seja estimado, garantiu-se que não houvesse outros fatores que influenciassem os resultados (com exceção dos níveis pré-definidos).

A partir das repetições feitas numa determinada combinação de níveis, pode-se obter uma estimativa de erro experimental nessa combinação. Como observado no capítulo 3, para todas as combinações, foi efetuada uma análise de variância e todas apontaram a igualdade estatística dos resultados entre as primeiras determinações e suas respectivas réplicas. Pode-se tomar a variância do par de valores como uma estimativa de variância típica do procedimento experimental. Admitindo-se que a variância das repetições é a mesma em toda a região investigada, podem-se combinar as informações de todos os ensaios.

Quando o número de repetições é o mesmo em todos os ensaios, a estimativa da variância experimental é simplesmente a média aritmética das variâncias observadas nos ensaios individuais. No caso geral, a estimativa conjunta da variância experimental será dada pela equação 4.2.

$$s^2 = \frac{v_1 s_1^2 + v_2 s_2^2 + \dots + v_m s_m^2}{v_1 + v_2 + \dots + v_m} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde: $v_i = n_i - 1$ é o número de graus de liberdade de s_i^2 , a estimativa da variância do i -ésimo ensaio.

Como alguns valores, considerados anômalos, foram descartados, o número de graus de liberdade são diferentes, e deve ser aplicada a equação 4.2, utilizando as variâncias dos dois resultados de cada combinação, calcula-se a variância experimental dos ensaios.

$$s^2 = 0,58$$

E o desvio padrão associado a uma observação, o erro experimental característico ou **erro padrão** das respostas, é a raiz quadrada desta variância. Temos:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,58} = 0,76 \text{ MPa}$$

O erro padrão de um efeito é a raiz quadrada da metade da variância experimental. Usa-se a metade, pois os efeitos são calculados com os valores médios de duas determinações. Logo:

$$s(\text{efeito}) = \sqrt{\frac{s^2}{2}} = \sqrt{\frac{0,58}{2}} = 0,54 \text{ MPa}$$

Assim, podemos agora determinar mais precisamente os valores dos efeitos apresentados na seção 4.2, incluindo o erro calculado. A tabela 4.5 indica, para cada fator, e para a interação, seu efeito. Note que o erro padrão da média global é igual a metade do erro padrão dos efeitos.

Tabela 4.7 - Efeitos calculados para o planejamento fatorial.

Média global	6,9 ± 0,27 MPa
Efeitos principais	-
R	2,1 ± 0,54 MPa
E	- 1,5 ± 0,54 MPa
Efeito de interação	-
RE	0,07 ± 0,54 MPa

Para determinar se os efeitos são estatisticamente significativos, ou seja, merecedores de interpretação, precisa-se determinar o valor mínimo, usando a distribuição “t” de *Student* (equação 4.3).

$$t_v \times s(\text{efeito})$$

Equação 4.3

onde: t_v é ponto de distribuição de Student;

Para as amostras pesquisadas, com um nível de confiança de 95% e 8 graus de liberdade, temos:

$$t_v \times s(\text{efeito}) = 2,306 \times 0,54 = 1,245 \text{ MPa}$$

Observando os valores da tabela 4.7, nota-se que os efeitos tanto da resistência à compressão da argamassa quanto da espessura da argamassa produzem efeitos significativos nos resultados dos prismas (maiores que 1,245 MPa). Entretanto, o efeito da interação entre as mudanças de resistência e espessura da argamassa não pode ser considerado significativo e, portanto, desprezado. Este procedimento serve para determinar a significância dos efeitos de cada variável de entrada (ou interação) sobre a variável de resposta.

4.4. Modelo estatístico

Um dos objetivos deste trabalho é a construção de um modelo estatístico onde pode-se conseguir, para quaisquer valores de resistência à compressão e de espessura de argamassas, prever os valores de resistência à compressão de prismas, com as mesmas características dos aqui usados (quantidade de blocos, índice de esbeltez, argamassas mistas de cal, etc.).

A análise de regressão é uma das técnicas mais utilizadas para a análise de dados. Os modelos de regressão têm por finalidade explicar uma ou várias variáveis (respostas) de interesse, que estão em função de outras variáveis, chamadas covariáveis ou variáveis explicativas. Construído o modelo, o mesmo pode ser usado para realizar previsões, calcular probabilidades, entre outras coisas. Os modelos de regressão, linear ou não linear, são utilizados em todas as áreas do conhecimento. Na área de estatística, a maioria dos métodos de análise utiliza a teoria de regressão.

Para a construção dos modelos de regressão, preferiu-se utilizar os valores reais (e médios) de resistência das argamassas e não a codificação utilizada anteriormente (50%, 100% e 150% da resistência do prisma). Logo, a tabela de resultados agora utilizada é a tabela 4.8, que relaciona, para cada resistência efetiva da argamassa e espessura da camada de assentamento, a resistência à compressão média dos prismas.

Tabela 4.8 - Resistências médias e modo de ruptura dos prismas ensaiados.

Resistência à compressão da argamassa (MPa)	Espessura da argamassa (mm)	Resistência média dos prismas (MPa)	Modo de ruptura típico
7,5	10	6,9	Argamassa/bloco
7,5	15	6,6	Argamassa/bloco
7,5	20	4,5	Argamassa
10,2	10	7,5	Bloco
10,2	15	7,0	Argamassa/bloco
10,2	20	5,3	Argamassa/bloco
18,9	10	9,4	Bloco
18,9	15	7,7	Bloco
18,9	20	7,2	Argamassa/bloco

Um modelo para planejamento fatorial 3^2 pode ser representado adequadamente pela equação 4.4.

$$\beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \epsilon \quad \text{Equação 4.4}$$

onde: x_1 e x_2 são as variáveis para resistência e espessura da argamassa, respectivamente;

β_0 é o valor populacional da média de todas as respostas do planejamento;

β_1 , β_2 , β_{11} , β_{12} e β_{22} são os valores populacionais dos efeitos principais e do efeito de interação, por unidade de x_1 e x_2 e

ϵ é o erro aleatório

o termo x_1x_2 representa a interação das variáveis e os termos x_1^2 e x_2^2 representam as variáveis na forma quadrática

Um modelo estatístico usado para descrever as respostas de um planejamento fatorial é formulado em função da variação dos fatores e pode ser assim expresso pela equação 4.5. A variável y , neste caso, é o valor da resistência à compressão do prisma.

$$y(x_1, x_2) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 4.5}$$

Como os coeficientes dos parâmetros populacionais da equação 4.5 (os β 's) podem ser representados pelos valores amostrais, utilizando os resultados dos experimentos realizados neste trabalho, chamados de **estimadores**, e representados pela letra do alfabeto latino b

(BARROS NETO *et al.*, 2003). Assim, para o cálculo dos estimadores, a equação 4.5 pode ser transformada na equação 4.6.

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 4.6}$$

onde: $\hat{y}(x_1, x_2)$ representa o valor da resistência da equação aproximada e;

$b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}$ e b_{22} representam os estimadores.

Utilizando o programa *DataFit* versão 9.059, chega-se aos seguintes parâmetros amostrais:

$$b_0 = 5,4; b_1 = 0,29; b_2 = 0,077; b_{11} = -0,005; b_{22} = -0,011, b_{12} = 0,001$$

E a equação 4.6 pode ser representada pela equação 4.7.

$$y(x_1, x_2) = 5,4 + 0,29x_1 + 0,077x_2 - 0,005x_1^2 - 0,011x_2^2 + 0,001x_1x_2 \quad \text{Equação 4.7}$$

Esta proposta de modelo possui um erro padrão estimado de 0,53 MPa, coeficiente de correlação inicial $R^2 = 94,6\%$ e coeficiente de correlação ajustado $Ra^2 = 85,7\%$. Como aqui representado, um coeficiente de correlação relaciona a curva ajustada com os dados determinados pelo experimento. Quanto mais próximo de 100% for este valor, melhor será o ajuste.

Retirando o parâmetro de interação, comprovadamente insignificante na proposta, como verificado anteriormente, tem-se:

$$y(x_1, x_2) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 4.8}$$

Utilizando o programa *DataFit* versão 9.059, chega-se aos seguintes parâmetros amostrais:

$$b_0 = 4,9; b_1 = 0,3; b_2 = 0,13; b_{11} = -0,004; b_{22} = -0,012$$

Esta nova proposta de modelo possui um erro padrão estimado de 0,46 MPa, coeficiente de correlação inicial $R^2 = 94,6\%$ e coeficiente de correlação ajustado $Ra^2 = 89,2\%$, mostrando a melhora na aproximação do modelo. Entretanto, como o coeficiente para a variação da espessura b_2 (de grau 1) apresenta sinal positivo (o que indicaria relação direta entre aumento de espessura de argamassa e resistência do prisma – que na realidade não acontece), resolveu-se estudar outros modelos.

Uma proposta encontrada em algumas publicações (MOHAMAD, 2008; EN 1996, 2005), uma função potência teria uma aproximação melhor, do tipo da equação 4.9.

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 4.9}$$

Utilizando o programa *DataFit* versão 9.059, chega-se aos seguintes parâmetros amostrais:

$$b_0 = 10,3; b_1 = 0,32; b_2 = -0,444$$

Esta proposta de modelo apresentou um erro padrão estimado de 0,52 MPa, coeficiente de correlação inicial $R^2 = 90,0\%$ e coeficiente de correlação ajustado $Ra^2 = 86,5\%$. Estes valores são um pouco melhores que o modelo anterior. Note também que o coeficiente relacionado com a espessura é negativo, destacando a relação inversa entre a espessura e a resistência do prisma.

Utilizando uma adaptação da norma americana, ARYANA (2006) propôs modelos do tipo mostrado na equação 4.10.

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 4.10}$$

Utilizando o programa *DataFit* versão 9.059, chega-se aos seguintes parâmetros amostrais:

$$b_0 = 9,8; b_1 = 2,3; b_2 = -3,2$$

Para esta proposta de modelo resultou um erro padrão estimado de 0,47 MPa, coeficiente de correlação inicial $R^2 = 91,4\%$ e coeficiente de correlação ajustado $Ra^2 = 88,6\%$. Estes valores são um pouco melhores que o modelo anterior. Nota-se, também, o sinal

negativo do parâmetro b_2 , relacionado à relação da resistência do prisma com a espessura, comprovadamente inversa.

Observando a pequena influência das relações quadráticas da equação 4.7 e utilizando uma variação da proposta de ARYANA (2006) com uma parte linear, pode-se propor o modelo apresentado pela equação 4.11.

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 \ln(x_1) + b_2 x_2 + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 4.11}$$

Utilizando o programa *DataFit* versão 9.059, chega-se aos seguintes parâmetros amostrais:

$$b_0 = 4,7; b_1 = 2,3; b_2 = -0,23$$

Esta proposta de modelo possui um erro padrão estimado de 0,42 MPa, coeficiente de correlação inicial $R^2 = 93,3\%$ e coeficiente de correlação ajustado $Ra^2 = 91,1\%$. Estes valores são os melhores dos modelos propostos. Nota-se, também, o sinal negativo do parâmetro b_2 , comprovando a relação inversa entre a resistência do prisma e a espessura da argamassa.

A equação 4.11, pode ser escrita da forma da equação 4.12.

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 4,7 + 2,3 \ln(x_1) - 0,23 x_2 + \epsilon(x_1, x_2) \quad \text{Equação 4.12}$$

Para o sistema proposto nesse trabalho, ela pode ser reescrita da forma mostrada na equação 4.13.

$$f_p(f_a, e_a) = 4,7 + 2,3 \ln(f_a) - 0,23 e_a \pm (0,42) \quad \text{Equação 4.13}$$

onde: f_p é a resistência do prisma em MPa;

f_a é a resistência da argamassa de assentamento em MPA e

e_a é a espessura da argamassa de assentamento em mm.

Para testar se a equação de regressão é estatisticamente significativa, deve-se fazer uma análise de variância da equação do modelo. Efetuando a ANOVA da equação 4.13, com o programa *DataFit* versão 9.059, o valor de F é igual a 41,9. Este é maior que o de F

tabelado, que é, para um nível de confiança de 95%, igual a 5,32. Pode-se concluir, assim, que a equação 4.13 possui significância estatística e pode ser utilizada como modelo experimental satisfatório.

Este modelo pode ser utilizado para qualquer valor de resistência de argamassa e para qualquer valor de espessura de argamassa de assentamento, dentro das faixas de resistência e espessura da argamassa aqui estudadas, para este nível de resistência do bloco estrutural cerâmico.

4.4.1. Superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta (RSM, em inglês) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para a modelagem e análise dos problemas em que uma resposta de interesse é influenciada por várias variáveis e o objetivo é otimizar esta resposta (MONTGOMERY, 2001). A superfície de resposta normalmente é representada graficamente, num gráfico em três dimensões, onde a variável de resposta $y(x_1, x_2)$ escolhida, plotada contra os níveis x_1 e x_2 .

O método de superfície de resposta é um processo em quatro etapas: 1) **identificação dos fatores** responsáveis pelas variações no processo; 2) **definição dos níveis**, ou seja, a faixa em que os fatores estão contidos; 3) **escolher o desenho experimental** apropriado, para poder se destacar o (s) ponto (s) principal (is) e 4) **análise dos dados**, normalmente utilizando um programa computacional.

Para a geração da superfície de resposta e da análise dos dados também foi utilizado o programa *DataFit* versão 9.059. A superfície de resposta para o modelo linear sugerido na equação 4.13 pode ser observada pela figura 4.4. Cada cor na superfície de resposta indica uma faixa de valores de resistência do prisma.

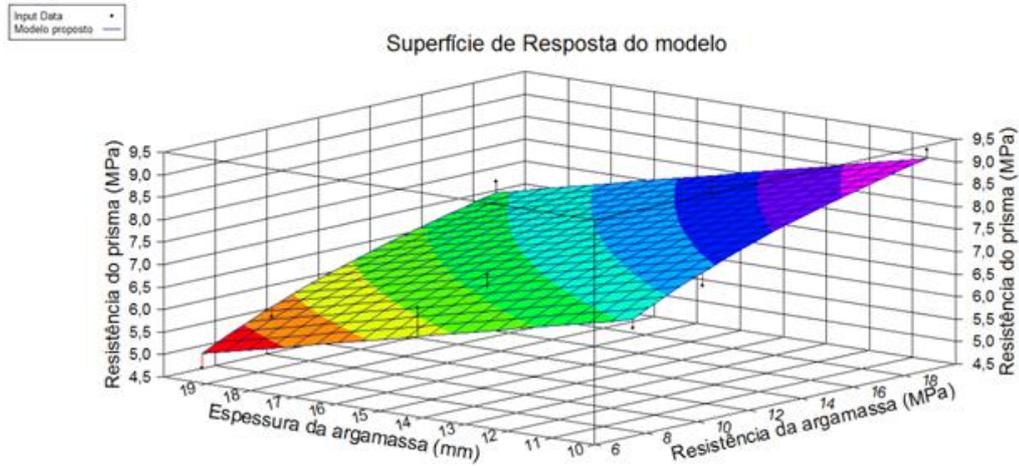


Figura 4.4: Superfície de resposta para o modelo adotado.

Pode-se observar a tendência já comentada da influência direta do aumento da resistência à compressão da argamassa de assentamento da argamassa e a influência negativa do aumento da espessura da argamassa de assentamento na resistência à compressão do prisma. Pode-se observar, também, como consequência, a tendência da resistência máxima do prisma na direção da maior resistência da argamassa e da menor espessura da argamassa, representada pela faixa na extrema direita do gráfico da superfície de resposta. Consegue-se também observar a pequena dispersão dos pontos, plotados em preto, para a curva proveniente da regressão, comprovando a existência de poucos resíduos em relação aos pontos determinados na experimentação, conforme demonstrado anteriormente pelo alto valor do coeficiente de correlação ajustado (Ra^2).

4.5. Análise em função da eficiência dos materiais

Para a análise dos resultados obtidos nos experimentos com prismas, é comum apresentá-los em forma do coeficiente de eficiência dos materiais, conceito apresentado no capítulo 2. A eficiência do prisma pode ser determinada pela equação 4.14.

$$\eta = \frac{f_p}{f_b} \quad \text{Equação 4.14}$$

onde: η é a eficiência do prisma;

f_p é a resistência média dos prisma, considerando-se área bruta;

f_b é a resistência média dos blocos, considerando-se área bruta

Segundo RAMALHO & CORRÊA (2003), prismas de blocos estruturais cerâmicos possuem coeficiente de eficiência entre 0,5 e 0,9. Para a determinação da eficiência dos prismas, foi utilizada a resistência média das duas determinações, para cada combinação de prismas. A tabela 4.9 resume os resultados dos coeficientes de eficiência dos prismas. Pode-se observar que a variação do coeficiente de eficiência foi de 0,44 a 0,92, próximo da apontada por RAMALHO & CORRÊA (2003).

Tabela 4.9 – Valores de eficiência dos prismas ensaiados.

Combinação	Coefficiente de Eficiência
50.10	0,68
50.15	0,65
50.20	0,44
100.10	0,74
100.15	0,69
100.20	0,52
150.10	0,92
150.15	0,75
150.20	0,71

As figuras 4.5 e 4.6 destacam, por meio de gráficos, a variação da eficiência dos prismas em relação à resistência à compressão da argamassa e à espessura da camada de assentamento. Os valores de eficiência dos prismas aparecem em porcentagem.

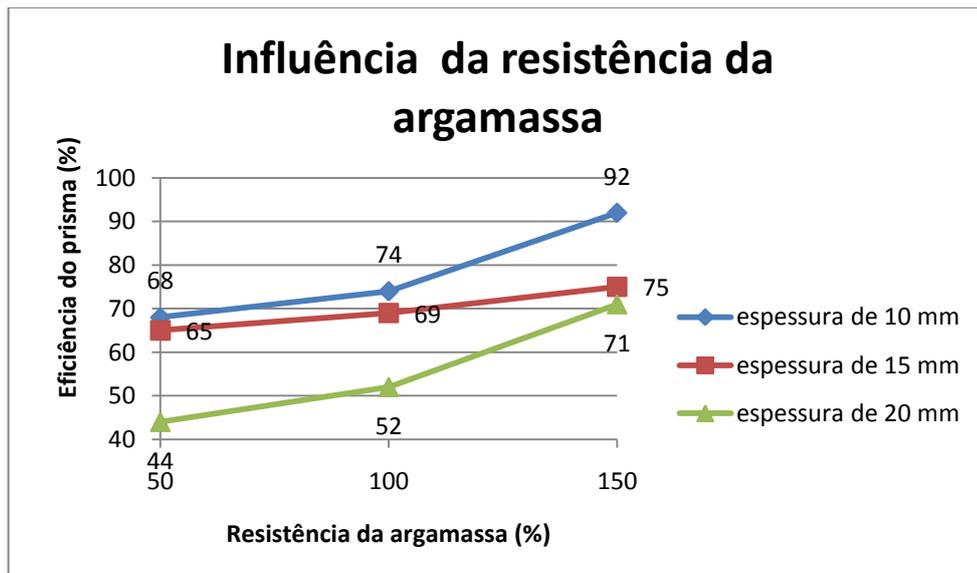


Figura 4.5 - Influência da resistência da argamassa na eficiência dos prismas

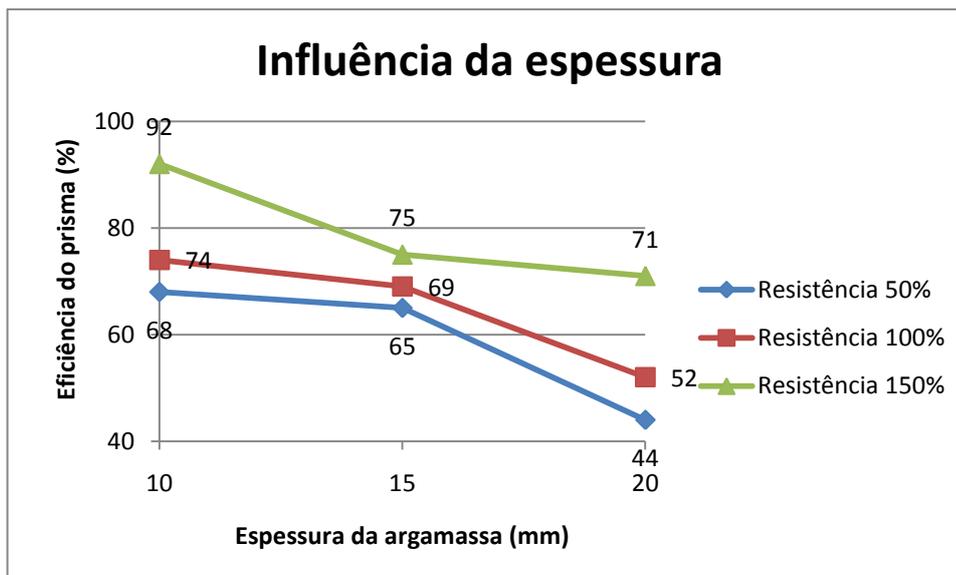


Figura 4.6 - Influência da espessura da argamassa na eficiência dos prismas.

Semelhante ao que foi comentado sobre as figuras 4.1 e 4.2 pode-se notar a tendência do aumento da eficiência do prisma em função do aumento da resistência da argamassa e a tendência do decréscimo da eficiência do prisma em função do aumento da espessura da argamassa de assentamento.

Como citado anteriormente, o modelo proposto na equação 4.13 pode ser aplicado a prismas confeccionados com blocos cerâmicos estruturais ao nível de resistência apresentados neste trabalho ($\pm 10,2$ MPa, na média). A equação 4.13 pode ser aplicada a todos os níveis de resistência de blocos desde que seja transformada em valores relacionados à relação entre resistência à compressão da argamassa e a resistência à compressão do bloco, em relação à sua área bruta (valores médios) e a eficiência do prisma. A tabela 4.10 apresenta os valores convertidos.

Tabela 4.10 – Resistência relativa da argamassa para cada combinação.

Combinação	Resistência média à compressão da argamassa (MPa)	Relação resistência da argamassa/resistência do bloco	Eficiência do prisma
50.10	7,5	0,74	0,68
50.15	7,5	0,74	0,65
50.20	7,5	0,74	0,44
100.10	10,2	1,00	0,74
100.15	10,2	1,00	0,69
100.20	10,2	1,00	0,52
150.10	18,9	1,85	0,92
150.15	18,9	1,85	0,75
150.20	18,9	1,85	0,71

Convertendo os valores para relação resistência da argamassa/resistência do bloco e eficiência do prisma, a equação 4.13 Se transforma na equação 4.15.

$$\eta = 0,99 + 0,22 \ln \left(\frac{f_a}{f_b} \right) - 0,022 e_a \pm (0,042) \quad \text{Equação 4.15}$$

onde: η é a eficiência do prisma;

$\frac{f_a}{f_b}$ é a relação entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco e

e_a é a espessura da camada de argamassa

O modelo assim convertido na proposta de modelo possui um erro padrão estimado de 0,042, coeficiente de correlação inicial $R^2 = 92,1\%$ e coeficiente de correlação ajustado $Ra^2 = 89,5\%$, próximos dos valores apresentados pela equação 4.13, estando adequado para caracterizar a relação da eficiência do prisma em função da relação resistência da argamassa/resistência do bloco e da espessura da camada de assentamento da argamassa.

Ambos os modelos aqui apresentados corroboram com as normas internacionais sobre a espessura da camada de assentamento. Como já mencionado no capítulo 2, tanto a norma europeia quanto a norma brasileira, por exemplo, determinam que a espessura ideal para assentamento de alvenaria seja de 10 mm.

5 Considerações finais

Este trabalho constituiu-se na análise experimental do desempenho mecânico de prismas de blocos estruturais cerâmicos não grauteados com diferentes resistências a compressão e espessuras da camada de assentamento de argamassa. Foram estudadas três resistências diferentes de argamassas, que representaram aproximadamente 50%, 100% e 150% do valor da resistência a compressão do bloco e três diferentes espessuras da camada de assentamento, tendo 10 mm, 15 mm e 20 mm. Apresentam-se considerações finais sobre a análise dos resultados e propostas de continuidade da pesquisa.

5.1. Análise dos resultados

Como resultado geral das análises efetuadas a partir dos valores obtidos, observou-se que o incremento da resistência à compressão da argamassa de assentamento, permanecendo constante a espessura da argamassa de assentamento, produz aumento na resistência à compressão do prisma, para todas as espessuras de argamassa de assentamento. Este aumento foi de 36% para a espessura de 10 milímetros, 17% para a espessura de 15 milímetros e 60% para a espessura de 20 milímetros, variando a resistência a compressão da argamassa de 7,5 MPa para 18,9 MPa. A análise do efeito da variação da resistência à compressão da argamassa foi considerado estatisticamente significativo.

Por outro lado, o aumento da espessura da camada da argamassa de assentamento causou um decréscimo na resistência à compressão dos prismas, para todas as resistências ensaiadas. Este decréscimo foi de 35% para a resistência da argamassa de 7,5 MPa, de 29% para a resistência da argamassa de 10,2 MPa e de 23% para a resistência de 18,9 MPa, variando-se a espessura de 10 milímetros para 20 milímetros. A análise do efeito da variação da espessura da camada de assentamento da argamassa também foi considerada estatisticamente significativa.

Em relação ao comportamento conjunto das variações, os resultados dos ensaios mostraram que o efeito conjunto das variações, da resistência a compressão e da espessura da argamassa de assentamento é insignificante e pode-se afirmar com total precisão, pela análise estatística aqui empregada, que não existe interação entre estas variáveis.

A construção de um modelo de regressão que consegue expressar a dependência da resistência à compressão do prisma à resistência à compressão e à espessura da camada de assentamento, encontrou, como modelo mais fiel, com o menor erro padrão e maior coeficiente de correlação, um modelo que expressa uma relação logaritmo normal para a resistência à compressão da argamassa e uma relação linear para a espessura da camada de assentamento da argamassa.

Pela visualização da superfície de resposta pode-se interpretar que a resistência à compressão do prisma de bloco cerâmico para alvenaria estrutural tem seu máximo na direção da maior resistência da argamassa e da menor espessura da camada de assentamento.

Esta superfície de resposta só é restrita aos parâmetros de norma, como a resistência máxima da argamassa e espessura mínima da camada de assentamento. Esta resistência é restrita no máximo aos 70% da resistência do bloco, calculado na área líquida (NBR 15812-2, 2010). Esta restrição ocorre principalmente para evitar o aumento excessivo do módulo de elasticidade da argamassa, prejudicando a deformação da alvenaria, o que pode causar aumento de tensões e fissuras localizadas na parede (BARBOSA, 2008).

No outro extremo, a restrição para a espessura da camada da argamassa de assentamento ocorre no mínimo de 10 milímetros, conforme especificados pelas normas brasileiras. Entretanto, como citado no capítulo 2, algumas normas internacionais não possuem esta restrição, utilizando espessuras menores (EN 1996, 2005) e maiores (ACI 530, 2008).

A interpretação da superfície de resposta mostra a importância de se preocupar com a variabilidade excessiva da junta, quando do assentamento dos blocos, o que exige um controle rigoroso na mão de obra.

A análise fatorial com replicação mostrou-se eficiente para alcançar os objetivos deste trabalho, conseguindo determinar a influência dos fatores estudados no desempenho mecânico dos prismas não grauteados de blocos cerâmicos estruturais e a construção do modelo de cálculo.

Não se encontrou, na literatura, modelos que, ao mesmo tempo, apresentassem as relações da resistência de prismas com a resistência da argamassa e com a espessura da camada de assentamento. Entretanto, o modelo aqui adotado está de acordo com a literatura,

demonstrando a relação logaritmo natural da resistência do prisma com a resistência à compressão da argamassa e a relação linear da resistência do prisma com a espessura da argamassa de assentamento.

Comprovou-se também que o aumento da resistência à compressão da argamassa não é tão determinante na resistência à compressão do prisma. O aumento de resistência da argamassa de 7,5 MPa para 18,9 MPa (152%) causou um aumento máximo de apenas 60% na resistência do prisma. Entretanto, este trabalho ressaltou que a resistência da argamassa afeta o modo de ruptura do prisma. Argamassas com resistência à compressão, no estado confinado, menores que a resistência à tração dos blocos levam a uma ruptura mais frágil do prisma (esmagamento da argamassa). Argamassas mais fortes levam a uma ruptura mais dúctil do prisma (fendilhamento à tração) e provocando um som característico.

5.2. Sugestões de trabalhos complementares.

Como sugestões para trabalhos futuros, relacionados à continuação desta pesquisa, podem-se citar:

- Utilizar blocos de resistências à compressão diferentes (maiores e menores) do utilizado neste trabalho, para comprovar o efeito da relação resistência da argamassa/resistência do bloco para outras faixas, na eficiência dos prismas;
- Construir modelos para prismas confeccionados com bloco de concreto ou blocos cerâmicos sem orifícios para entender o efeito da resistência à tração da argamassa que penetra nos orifícios dos blocos cerâmicos sobre o efeito de fendilhamento na ruptura dos prismas;
- Variar a geometria dos blocos cerâmicos para descobrir o efeito da resistência à tração destes no desempenho mecânico dos prismas;
- Repetir este mesmo trabalho para prismas grauteados;
- Determinar a influência da resistência à compressão e espessura camada da argamassa de assentamento no módulo de deformação dos prismas;
- Comparar os resultados com os de prismas confeccionados com três blocos.

Os resultados e conclusões apresentados neste trabalho são válidos para os materiais empregados, principalmente devido à grande variabilidade dos materiais utilizados em alvenaria, de país para país e até mesmo de região para região. Além disso, os dados obtidos são particulares das condições locais, características dos blocos e dos materiais constituintes das argamassas.

Referências

AFSHARI, F.; KALDJIAN M. J. **Finite element analysis of concrete masonry prisms.** American Concrete Institute Materials Journal, Set./Out., vol. 86, 1989.

ALY, V. L. C. **Determinação da capacidade resistente do elemento parede de alvenaria armada de blocos de concreto submetido a esforços de compressão.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 530: Specification for Masonry Structures.** Detroit, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-144: Standard specification for aggregate for masonry mortar.** 2004.

ARAÚJO, M. M. **A Utilização da Alvenaria no Brasil: Implantação ao Presente.** In: III Seminário Nacional de Tecnologia da Construção. Proceeding. São Paulo, 1987.

ARAÚJO NETO, G. N. **Influência da argamassa de revestimento na resistência à compressão em prismas de alvenaria resistente de blocos de concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.

ARYANA, S. A. **Statistical analysis of compressive strength of clay brick masonry prisms.** Dissertação de Mestrado. Universidade do Texas, Arlington, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8215: Prismas de blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural - Preparo e ensaio à compressão.** Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 8798: Execução e controle de obras em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto.** Rio de Janeiro, 1985.

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

_____. **NBR10837: Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto.** Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 13276: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13277: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes tetos – Determinação da retenção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1995.

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

_____. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos – Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos e ensaio.** Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 15812-2: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 2: Execução e controle de obras.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, C. S. **Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** Editora Unicamp. Campinas, 2003.

BEALL, C. **Masonry and Concrete for Residential Construction.** McGraw-Hill, 2004.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS-1200: British standards specification for sands for mortar for plain and reinforced brickwork, blockwalling and masonry.** London, 1976.

DUARTE, R. B. **Recomendações para o Projeto e Execução de Edifícios de Alvenaria Estrutural.** ANICER, Porto Alegre, 1999

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos Usando o *Statistica*.** E-papers, Rio de Janeiro, 2003.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARVALHO, J. N.; **Desempenho estrutural de prismas de blocos cerâmicos com diferentes formas e dimensões.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003

CHEEMA, T. S.; KLINGNER, R. E. **Compressive Strength of Concrete Masonry Prism.** American Concrete Institute Structural Journal. January, vol. 83 (no 1):88-97, 1986.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **EN 1196: Design of Masonry Structures – Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures.** Bruxelas, 2005.

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto – Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas.** 1ª edição. McGraw-Hill, São Paulo, 1996.

GARCIA, P. D. **Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicas.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GOMES, I. R. **Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GOMES, N. S. **A resistência das paredes de alvenaria.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1983.

HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Suggested failure criteria for grouted masonry under axial compressive.** American Concrete Institute Journal, 76, nº 10, pp. 1047-1061, 1979.

HENDRY, A. W.; SINHA, B.P.; DAVIES, S. R. **Design of Masonry Structures**. E & FN Spon, Londres, 2004.

KHALIFA, M. A.; MAGZOU, A. E. **Compressive strength of masonry prisms**. In: Proceedings of the Structures Congress XII, ASCE, Nova York, 1994.

LEÃO, G. F. B.; PERDIGÃO, R. S. **Alvenaria estrutural: Influência da espessura da camada de assentamento no sistema bloco-prisma**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Alagoas, 2004.

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

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Déficit Habitacional 2008**. Nota. Brasília, 23 de julho de 2010. Disponível em: www.cidades.gov.br. Acessado em outubro de 2010.

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

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

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5th edition. John Wiley & Sons, New York, 2001.

MORENO JR, A. L., ALBUQUERQUE, C. C. **Influência da Espessura das Juntas da Argamassa de Assentamento no Comportamento à Compressão de Prismas de**

Alvenaria de Blocos Vazados de Concreto. In: Congresso Brasileiro de Concreto (Anais). Recife, 2002.

MOTA, J. A. R. **Influência da junta vertical na resistência à compressão de prismas em alvenaria estrutural de blocos de concreto e blocos de concreto celular autoclavado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

MOTA, J. M. F. **Influência da argamassa de revestimento na resistência à compressão axial em prismas de alvenaria resistente de blocos de concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

PRUDÊNCIO JR, L. R. **Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre a resistência de unidades, prismas e paredes.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1986.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural.** Editora PINI. São Paulo, 2003.

ROMAGNA, R. H. **Estudo da resistência de blocos de concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

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

SABBATINI, F. H. **Alvenaria Estrutural – Materiais, execução da estrutura e controle tecnológico.** Caixa Econômica Federal, Brasília, 2003.

SAHLIN, S. **Structural masonry.** Prentice-Hall, New Jersey, 1971.

SÁNCHEZ, E. **Alvenaria estrutural – Novas tendências técnicas e de mercado.** Interciência, Engenho Novo, RJ, 2002.

SANTOS, M. D. F.; CARVALHO, M; BREMM, L. C.; Silva, G. M. **Desempenho de prismas e paredes construídas com diferentes geometrias de blocos cerâmicos.** In: 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica (Anais). Salvador, 2007.

SARANGAPANI, G; VENKATARANA REDDY, B. V.; JAGADISH, K. S. **Brick-mortar Bond and masonry compressive strength.** In: Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, 2005.

SINHA, B. P. **Model studies related to load bearing brickwork.** Tese de Doutorado. Universidade de Edimburgo, Edimburgo, Reino Unido, 1967.

SOLÓRZANO, M. G. P.; SABBATINI, F. H. **Características e desempenho de juntas de argamassa na alvenaria estrutural de blocos de concreto.** Boletim Técnico. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

STANDARDS AUSTRALIA INTERNATIONAL. **AS 3700: Masonry Structures.** Sidney, 2007.

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