

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA E
CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA DE
UNIDADES, PRISMAS E PAREDES

LUIZ ROBERTO PRUDÊNCIO JR.

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

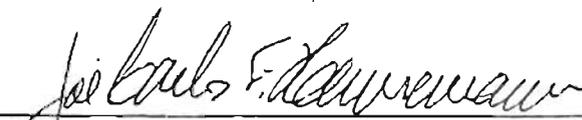
Porto Alegre

Outubro de 1986

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.



Prof. Luis Fernando Nanni
Orientador



Prof. José Carlos Ferraz Hennemann
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

Luis Fernando Nanni (Orientador)
M.Sc. pela Princeton University

Nelson Fernandes Bonilha
M.Sc. pelo CPGEC/UFRGS

Ronaldo Bastos Duarte
M.Sc. pelo CPGEC/UFRGS

Vahan Agopyan
Ph.D. pela University of London

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Luis Fernando Nanni, pela orientação, incentivo, ensinamentos e participação efetiva durante a realização deste trabalho.

- Aos colegas do curso, pela consideração, amizade, colaboração e estímulo que tornaram menos difíceis os anos dispendidos na realização do curso e da dissertação.

- Ao Prof. José Carlos Ferraz Hennemann, coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo apoio e interesse na resolução dos problemas inerentes a este trabalho.

- À Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Departamento de Engenharia Civil, pela liberação das minhas atividades docentes para a realização do curso de pós-graduação.

- À Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, especialmente ao Departamento de Engenharia Estrutural, pelo apoio técnico na realização da parte experimental do trabalho.

- Ao coordenador do projeto Alvenaria Cerâmica Portante, Ronaldo Bastos Duarte, por ter permitido a minha participação no referido projeto e por ter aprovado a realização, sem restrições, de todo o programa experimental proposto.

- Aos funcionários da CIENTEC, por terem proporcionado um ambiente de amizade e companheirismo durante o período de nossa convivência.

- Aos engenheiros Fernando Henrique Sabbatini e Nelson dos Santos Gomes pelas sugestões e indicação de bibliografia.

- Ao Sindicato das Indústrias Cerâmicas e Olarias do Rio Grande do Sul, pelo interesse demonstrado e pelo apoio oferecido quando do contato com as olarias para a obtenção dos

tijolos utilizados nos experimentos.

- Às cerâmicas Esteio, Pauluzzi, Ritter e Stella e à olaria João Luis Daudt, pela doação dos tijolos utilizados.
- À Construtora Sultepa, por ter fornecido a mão-de-obra para a execução das alvenarias destinadas aos ensaios.
- Ao pedreiro Luis Carlos da Silva pelo empenho, boa vontade e critério demonstrados na construção dos corpos-de-prova.
- À empresa Dagoberto F. de Barcellos, pelo fornecimento da cal hidratada utilizada na confecção da argamassa.
- À Juliana Zart Bonilha, pela eficiência na realização das correções e apresentação das referências bibliográficas.
- À Liliani Gaeversen Mazzali, pelo empenho e correção com que realizou a datilografia do trabalho.
- À minha tia, Prof.^a Aurora Goulart, por ter feito a revisão da parte escrita da dissertação.
- À minha família, cujo estímulo foi fundamental para a realização do trabalho.
- Aos meus pais, por terem me apoiado, principalmente nos momentos mais difíceis vividos durante a realização do curso.
- À minha esposa Regina, pelo carinho e compreensão e por ter assumido, praticamente sozinha, os compromissos familiares e, principalmente, os cuidados de nossa filha.

À minha esposa Regina e
minha filha Ana Paula

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE FOTOS.....	xv
LISTA DE TABELAS.....	xvi
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
DEFINIÇÕES.....	xxi
INTRODUÇÃO.....	1
1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ALVENARIA ESTRUTURAL.....	4
1.1. Histórico e Evolução.....	4
1.2. A Alvenaria Estrutural no Brasil.....	6
2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA.....	9
2.1. Formas de Determinação.....	9
2.2. Procedimentos Especificados pelas Principais Normas.....	12
2.2.1. Normas Estrangeiras.....	12
2.2.2. Norma Brasileira.....	13
3. A UTILIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE PRISMAS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA.....	15
3.1. Considerações Gerais.....	15
3.2. Fatores que Influenciam a Resistência dos Prismas.....	16
3.2.1. Geometria (Razão Altura-Espessura).....	16
3.2.2. Capeamento.....	20

3.2.3.	Mão-de-Obra.....	21
3.2.4.	Velocidade.....	22
3.2.5.	Padrão de Assentamento das Unidades.....	22
3.2.6.	Idade.....	23
3.2.7.	Condições de Cura.....	24
4.	ENSAIOS REALIZADOS.....	27
4.1.	Caracterização dos Materiais Empregados.....	27
4.1.1.	Unidades.....	27
4.1.1.1.	Definição.....	27
4.1.1.2.	Seleção das Amostras.....	27
4.1.1.3.	Dimensões.....	28
4.1.1.4.	Absorção.....	30
4.1.1.5.	Densidade.....	31
4.1.1.6.	Resistência à Compressão.....	32
4.1.2.	Argamassa.....	35
4.1.2.1.	Definição.....	35
4.1.2.2.	Seleção da Argamassa.....	36
4.1.2.3.	Materiais Constituintes.....	38
4.1.2.3.1.	Cimento.....	38
4.1.2.3.2.	Cal hidratada.....	39
4.1.2.3.3.	Areia.....	41
4.1.2.4.	Resistência à Compressão e Consistência.....	42
4.2.	Prismas.....	43
4.2.1.	Geometria e Padrão de Assentamento.....	43
4.2.2.	Número de Corpos-de-Prova.....	44
4.2.3.	Confecção.....	46
4.2.3.1.	Preparação da argamassa.....	46
4.2.3.2.	Assentamento das unidades e capeamento.....	46
4.2.4.	Tempo e Condições de Cura.....	48
4.2.5.	Resistência à Compressão.....	48
4.3.	Paredes.....	51
4.3.1.	Número de Corpos-de-Prova.....	51
4.3.2.	Geometria e Padrão de Assentamento.....	52
4.3.3.	Confecção e Capeamento.....	53

4.3.4. Tempo e Condições de Cura.....	55
4.3.5. Resistência à Compressão.....	55
5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	60
5.1. Resistência à Compressão dos Tijolos.....	60
5.2. Comparação de Médias e Componentes de Variação dos Diferentes Tipos de Prismas Utilizados.....	64
5.3. Correlação entre a Resistência de Prismas e Resistência Média dos Tijolos.....	70
5.4. Correlação entre Coeficientes de Variação de Prismas C e Tijolos.....	79
5.5. Correlação entre a Resistência de Paredes e Resistência Média dos Tijolos.....	83
5.6. Correlação entre a Resistência de Paredes e Resistência Média dos Prismas.....	88
CONCLUSÕES.....	96
SUGESTÕES PARA OUTRAS PESQUISAS RELACIONADAS COM O TEMA....	99
ANEXO	
1. CONCEITOS E PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS.....	101
1.1. Conceitos Estatísticos Básicos.....	101
1.2. Métodos Analíticos para a Verificação da Nor- malidade de uma Amostra.....	104
1.2.1. Prova de Kolmogorov-Smirnov.....	104
1.2.2. Prova de Wilk-Shapiro.....	104
1.3. Comparação Múltipla de Médias.....	105
1.3.1. Considerações Iniciais.....	105
1.3.2. Desenvolvimento Analítico.....	105
1.3.3. Comparação das Médias das Resistências à Compressão dos Diferentes Tipos de Tijolos Utilizados.....	109
1.4. Regressão Linear.....	111
1.4.1. Modelo.....	111
1.4.2. Cálculo dos Parâmetros.....	111

1.4.3. Verificação da Significância da Relação.....	112
1.4.4. Previsões de Valores de Y.....	114
1.5. Programas Computacionais Utilizados.....	114
1.5.1. Programa STATBAS.....	115
1.5.2. Programa COMPVAR.....	115
1.5.3. Programa REGSIMPLES.....	116
1.5.4. Programa NONLINWOOD.....	117

ANEXO

II. FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA O CÁLCULO DA RESISTENCIA A COMPRESSÃO DA ALVENARIA.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - curtose
- a, a' - coeficiente linear da reta
- Abs - absorção
- B - resultado do teste de Bartlett
- b - coeficiente angular da reta
- b' - largura do prisma
- C.V. - coeficiente de variação
- C.V.I. - coeficiente de variação da previsão de um valor individual de y
- C.V.M. - coeficiente de variação da previsão de um valor médio de y
- D - densidade do tijolo
- DM - resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov
- $D_{\alpha}(n)$ - valor tabelado (verificação da normalidade de uma distribuição pelo teste de Kolmogorov-Smirnov)
- dag - massa específica da água
- ER - erro relativo ou margem de incerteza admitida quando da estimativa do valor da média da população
- ERI - erro da previsão de um valor individual de y
- ERM - erro da previsão de um valor médio de y
- F - distribuição F
- f'_m - resistência média à compressão da alvenaria (ou resistência básica)
- $\overline{f'_m}$ - resistência admissível à compressão da alvenaria (resistência de projeto)

g_1	- coeficiente de assimetria
g_2	- coeficiente de curtose
H_0, H_1	- hipóteses a serem testadas
h	- altura do prisma
K	- número de grupos (ou blocos)
M	- massa do tijolo seco ao ar
MQ	- média quadrática
MQD	- média quadrática dentro dos blocos
MQE	- média quadrática entre blocos
M_s	- massa do tijolo seco em estufa
M_u	- massa do tijolo saturado
N	- distribuição normal
n	- tamanho da amostra
n_h	- média harmônica
P_u	- carga máxima no ensaio de compressão
Pr, p	- probabilidade
r	- coeficiente de correlação
r^2	- coeficiente de determinação
r_j	valor fornecido pela tabela de Studentized Range
S	- desvio-padrão de uma amostra
SQD	- soma dos quadrados dos desvios dentro dos blocos
SQE	- soma dos quadrados dos desvios entre os blocos
SQT	- soma dos quadrados dos desvios com respeito à média total
T_i	- resíduo padronizado
t	- espessura do prisma
t_a	- índice que mede a significância do valor do coeficiente linear da reta

t_b	- índice que mede a significância da inclinação da reta
$t_\alpha(n)$	- valor tabelado (verificação da significância de uma variável em estudo (Distribuição de Student))
V	- volume do tijolo
W	- valor tabelado (verificação da normalidade de uma distribuição pelo teste de Wilk-Shapiro)
w	- resultado do teste de Wilk-Shapiro
\bar{X}	- média de uma amostra
X_i	- i-ésimo valor de uma amostra
x	- variável independente que representa uma grandeza física
y	- variável dependente que representa uma grandeza física
Z_α	- valor da abcissa de uma distribuição normal num nível α de probabilidade
α	- nível de confiabilidade
α_j	- efeito do grupo j na média geral μ
$\Delta_{\text{máx}}$	- diferença entre o valor médio e o valor que mais se afasta deste, em uma amostra
ϵ_{ij}	- erro aleatório
μ	- média de uma população
σ	- desvio-padrão da população
σ_a	- desvio-padrão da intersecção de uma reta com o eixo y
σ_b	- desvio-padrão da inclinação de uma reta
σ_e	- desvio-padrão da estimativa
χ^2	- distribuição qui-quadrada

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Representação gráfica de fórmulas para o cálculo da resistência à compressão da alvenaria. Argamassa de resistência à compressão de 5,5 MPa.....	10
3.1 - Variação na resistência média dos prismas em função da esbeltez (a resistência para $h/t = 5$ foi tomada como 1.0) - Alvenaria de tijolos cerâmicos.....	19
3.2 - Variação na resistência média dos prismas em função da esbeltez (a resistência para $h/t = 5$ foi tomada como 1.0) - Alvenaria de blocos de concreto.....	19
5.1 - Relação entre a resistência à compressão de prismas A e tijolos.....	74
5.2 - Relação entre a resistência à compressão de prismas B e tijolos.....	75
5.3 - Relação entre a resistência à compressão de prismas C e tijolos.....	76
5.4 - Relação entre a resistência à compressão de prismas C* e tijolos.....	78
5.5 - Relação entre os coeficientes de variação das resistências à compressão dos prismas C* e tijolos. Tamanho mínimo de uma amostra de prismas como função da mesma variável (x).....	84
5.6 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e tijolos.....	87

5.7 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas A.....	91
5.8 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas B.....	92
5.9 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas C.....	93
5.10 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas C*.....	95

LISTA DE FOTOS

4.1 - Modo de ruptura típico apresentado pelos corpos-de-prova de tijolos ensaiados.....	35
4.2 - Tipos de prismas utilizados na pesquisa.....	44
4.3 - Confecção dos prismas tipo B.....	47
4.4 - Ensaio de ruptura de um prisma tipo C.....	49
4.5 - Modo de ruptura típico apresentado pelos prismas ensaiados.....	49
4.6 - Vista geral do ensaio de compressão de uma parede.....	53
4.7 - Confecção de uma parede para o ensaio de resistência à compressão.....	54
4.8 - Detalhe do pórtico de reação e equipamento utilizado no rompimento das paredes.....	56
4.9 - Flambagem de um corpo-de-prova de parede.....	57
4.10 - Colapso de um corpo-de-prova de parede (ruptura por flambagem).....	58
4.11 - Ensaio de parede. Fissuras verticais originadas por esforços de tração (mecanismo típico de ruptura das alvenarias).....	58

LISTA DE TABELAS

3.1 - Fatores de conversão propostos por diferentes normas	18
3.2 - Comparação entre os fatores de conversão de diversas normas divididos por uma constante de correção e valores propostos por Krefeld.....	18
3.3 - Exigências de normas para os ensaios de prismas à compressão.....	25
4.1 - Dimensões nominais dos tijolos maciços cerâmicos segundo NBR-7170.....	29
4.2 - Dimensões dos tijolos utilizados nos experimentos.....	29
4.3 - Absorção total de água das unidades.....	31
4.4 - Densidade dos tijolos empregados.....	32
4.5 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos tijolos segundo a NBR-6460.....	33
4.6 - Resistência mínima à compressão dos tijolos em função das categorias (NBR-7170/83).....	34
4.7 - Variação nas propriedades de uma argamassa com a alteração da composição relativa de cimento e cal.....	37
4.8 - Características químicas e físicas da cal utilizada.....	40

4.9 - Comparação da granulometria da areia utilizada com aquelas recomendadas pela BS-1200 e ASTM C-144.....	42
4.10 - Resistência à compressão e consistência da argamassa utilizada nos experimentos.....	43
4.11 - Resistência à compressão dos prismas (MPa).....	50
4.12 - Resistência à compressão das paredes (MPa).....	59
5.1 - Análise estatística básica - Programa STATBAS....	62
5.2 - Comparação de médias e variâncias - Programa COMPVAR.....	67
5.3 - Resistência à compressão dos prismas C^* (MPa).....	69
5.4 - Correlação entre a resistência de prismas e tijolos: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.....	71
5.5 - Correlação entre a resistência de prismas C^* e tijolos: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.....	73
5.6 - Correlação entre a resistência de prismas C^* e tijolos: Parâmetros da regressão não-linear fornecidos pelo programa NONLINWOOD.....	79
5.7 - Coeficientes de variação dos prismas C^* x coeficientes de variação dos tijolos.....	80
5.8 - Correlação entre coeficientes de variação de prismas C^* e tijolos. Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.....	81

5.9 - Correlação entre resistência de paredes e tijolos: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.....	86
5.10 - Correlação entre resistência de paredes e prismas: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.....	90
5.11 - Correlação entre resistência de paredes e prismas C#: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.....	94
1.1 - Análise de variância (ANOVA) da comparação das resistências dos diferentes tipos de tijolos utilizados.....	110

RESUMO

O presente trabalho tem como tema central o estudo da resistência à compressão de unidades, prismas e paredes e suas inter-relações.

Apresenta, inicialmente, uma abordagem ao desenvolvimento da alvenaria estrutural tanto a nível mundial quanto a nível de Brasil.

Contém um estudo das formas de determinação da resistência à compressão da alvenaria em que foram enfatizados os ensaios de prismas.

Discute-se, a nível teórico, os fatores que afetam a resistência à compressão dos prismas.

No programa experimental desenvolvido, foi pesquisada a influência da razão de esbeltez (h/t) e do padrão-de-assentamento na resistência dos prismas de alvenaria.

Procedeu-se a um estudo estatístico das correlações entre resistências à compressão de tijolos, prismas e paredes.

Em toda a pesquisa executada, foram utilizados apenas tijolos cerâmicos maciços produzidos na Região da Grande Porto Alegre e um só tipo de argamassa de assentamento, de traço, em volume, de 1:1:6 (cimento:cal hidratada:areia).

ABSTRACT

In this work, the author studies the compressive strength of bricks, prisms, walls and their relationships.

The work starts with a review of the historical developments of structural brickwork around the world as well as in Brazil.

It contains a description of the ways used to define the compressive strength of brickwork with especial emphasis on prism tests.

The factors that affect the compressive strength of prisms were reviewed and analyzed.

The influence of the slenderness ratio and the bond pattern on the strength of brickwork prisms were researched using laboratory tests.

A statistical analysis of the correlations between the compressive strength of bricks, prisms, and walls was performed.

During the research, only solid ceramic bricks produced in the metropolitan region of Porto Alegre were used as well as only one kind of mortar, with mix proportions by volume of portland cement : hydrated lime : sand of 1 : 1 : 6.

DEFINIÇÕES

• Alvenaria estrutural: alvenaria projetada para resistir esforços solicitantes.

• Alvenaria estrutural armada: alvenaria estrutural dotada de reforços (barras de aço) para resistir esforços de tração, ou para aumentar sua resistência a outros tipos de esforços (compressão, cisalhamento).

• Argamassa: mistura de um ou mais aglomerantes com agregado miúdo e água.

• Excentricidade: é a distância entre a direção de eixo axial de um elemento (parede) e a direção da resultante da carga aplicada.

• Graute: mistura de aglomerante, agregado (só miúdo ou miúdo + pedrisco) e água.

• Padrão-de-assentamento: forma geométrica da disposição das unidades na alvenaria que compõe.

• Traço: proporção relativa entre os materiais constituintes de uma argamassa.

• Unidade: constituinte básico da alvenaria (tijolo ou bloco).

INTRODUÇÃO

Nos últimos cem anos tem havido um predomínio quase que absoluto da utilização do aço e do concreto armado na execução das estruturas das edificações. Esta situação pode ser explicada pelo alto grau de desenvolvimento atingido tanto no dimensionamento quanto no conhecimento das propriedades dos referidos materiais.

O mesmo, entretanto, não ocorreu com a técnica de construção em alvenaria estrutural. Esta técnica construtiva, que muito foi empregada de forma empírica até o início deste século, esteve praticamente relegada nas universidades e instituições de pesquisa até os anos 50. Nesta ocasião começaram, notadamente na Europa, estudos visando o domínio do conhecimento das propriedades estruturais da alvenaria.

Atualmente muitos países, como é o caso da Inglaterra, já dispõem de normalização bastante consistente sobre o assunto que tem permitido aos seus engenheiros projetar estruturas em alvenaria de uma forma tão racional quanto aquelas concebidas em aço ou concreto armado.

No Brasil, infelizmente, a situação é bastante distinta. Além da falta de conhecimento das características dos materiais produzidos no país existe uma carência na formação profissional dos engenheiros civis neste campo do conhecimento.

Apesar disto, a alvenaria estrutural vem sendo utilizada em muitas regiões do país, como é o caso de Porto Alegre, de uma maneira ainda empírica, revelando um certo desconhecimento quanto à segurança destas estruturas. Isto tem levado, em alguns casos, ao aumento do custo pelo desperdício de materiais e em outros, o que é mais grave, a acidentes que geraram o colapso de parte ou da totalidade das edificações.

Mais recentemente tem aparecido algumas tentativas no sentido de reverter tal panorama. Alguns trabalhos foram desenvolvidos em São Paulo pelo IPT e pela Escola Politécnica da USP.

No Rio Grande do Sul, no ano de 1984, foi implantada, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, a disciplina Alvenaria Estrutural. Paralelamente, na CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia) foi criado um programa de pesquisas intitulado "Alvenaria Cerâmica Portante" com o objetivo geral de estudar o comportamento estrutural das alvenarias construídas com tijolos fabricados na Região da Grande Porto Alegre.

Visando uma unificação de esforços a nível regional foi firmado em 1985 um convênio UFRGS-CIENTEC para a realização de um trabalho conjunto na área, a fim de se aproveitar as potencialidades das duas instituições. Desta forma surgiu a oportunidade para a realização do presente trabalho.

Sendo a resistência à compressão a principal propriedade estrutural das alvenarias, decidiu-se orientar a pesquisa para este tema.

No corpo do trabalho aparece primeiramente uma síntese sobre a evolução da alvenaria estrutural bem como da sua introdução e aplicação no Brasil. Em seguida foram abordadas as principais formas de determinação da resistência à compressão das alvenarias enfatizando-se a utilização do método dos prismas. Após esta parte inicial, procedeu-se a uma descrição detalhada do programa de ensaios desenvolvido. Este teve como meta principal investigar a possibilidade de adoção do ensaio de prismas para a determinação da resistência à compressão das alvenarias.

Por fim, é feito um estudo estatístico dos resultados obtidos.

Dentre os objetivos específicos almejados na execução da pesquisa pode-se destacar:

a) verificação da viabilidade do emprego dos tijolos maciços produzidos na região da Grande Porto Alegre para Alvenaria Estrutural;

b) comparação entre a resistência à compressão obtida no ensaio de diferentes tipos de prismas;

c) estudo da correlação entre a resistência à compressão de unidades, prismas e paredes.

Com isto, acredita-se que se consiga atingir o objetivo principal do trabalho que é o de servir de ponto de apoio para inúmeras outras pesquisas que são necessárias e certamente serão feitas, para que a alvenaria estrutural atinja no Brasil o lugar de destaque em que se encontra em outros países.

I. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A ALVENARIA ESTRUTURAL

1.1. Histórico e Evolução

A arte de construir tem acompanhado o homem desde os primórdios de sua cultura e sua evolução tem se baseado num processo de tentativa e erro. Este processo, lento e gradual, foi o responsável pelo aprendizado de muitas técnicas que ainda hoje são empregadas com bastante sucesso. Uma destas técnicas é a construção em alvenaria.

As primeiras construções em alvenaria de tijolos de argila são bastante antigas. No ano 10000 a.c., as construções assírias e persas eram de tijolos queimados ao sol. Estes mesmos povos já utilizavam os tijolos queimados em fornos no ano 3000 a.c.^{32*}. Desde então, inúmeras obras de grande importância têm aparecido ao longo dos séculos e a técnica continua sendo largamente empregada até os dias de hoje.

A alvenaria como estrutura-suporte de edifícios de grande altura também não é recente. As grandes catedrais dos séculos XII a XVII, que se conservam até os dias de hoje, são um bom exemplo⁴⁷.

Porém, todas as estruturas concebidas em alvenaria até o início deste século foram dimensionadas empiricamente, baseadas em experiências anteriores ou na intuição de projetistas e construtores⁴⁷. Com isto, os edifícios construídos possuíam espessas paredes e havia um grande desperdício de material, o que obviamente os tornavam onerosos. Um exemplo clássico deste fato é o Monadnock Building, um edifício de 16 andares construído em Chicago em 1891. Para proporcionar

* Os números indicam a ordem de chamada das referências bibliográficas listadas no final do trabalho.

uma estabilidade lateral ao edifício contra a ação dos ventos. o seu projetista concebeu uma estrutura extremamente robusta. As paredes, na base, possuíam uma espessura de $1,8m^{50}$.

As primeiras pesquisas experimentais sistemáticas em alvenaria de tijolos que se tem notícia foram aquelas executadas no Watertown Arsenal em Massachusetts (E.U.A) na década de 1880. Até esta data, os trabalhos feitos restringiam-se aos ensaios de tijolos individuais e tipos de argamassas⁴¹.

Com o surgimento do aço e do concreto armado em fins do século passado e posteriormente do concreto protendido, o uso da alvenaria estrutural foi relegado a segundo plano. Grande quantidade de estudos teóricos e experimentais foram realizados com estes novos materiais e novas técnicas de construção foram desenvolvidas. Isto produziu uma verdadeira revolução na arte de construir no século XX³². O baixo custo energético do aço e do cimento aliado às possibilidades de um maior arrojo nas formas das edificações projetadas propiciaram esta mudança. Isto não significa que não tenha havido um desenvolvimento técnico e um prosseguimento nas pesquisas em alvenaria estrutural.

Nos Estados Unidos, com o estabelecimento de laboratórios de resistência dos materiais em várias escolas de engenharia, no início deste século, máquinas de testes de grande capacidade tornaram-se mais disponíveis. Conseqüentemente, algumas destas escolas iniciaram alguns programas de testes em alvenaria⁴¹.

Em 1923, o sub-secretário do governo da Índia, A. Brebner, publicou um trabalho descrevendo uma série de extensivos testes que tiveram a duração de dois anos. Este trabalho também continha uma teoria racional de projeto e foi considerado o verdadeiro início da alvenaria armada⁵⁰.

Na Inglaterra, em 1948, foi elaborada a primeira norma consistente para o cálculo de alvenaria de tijolos³².

A partir da década de 50, com a aplicação dos princípios estruturais aos projetos em alvenaria portante, a téc-

nica volta a ser adotada para certos tipos de edifícios¹⁶.

Atualmente a utilização da alvenaria estrutural, armada ou não armada, está amplamente difundida em muitos países como a Inglaterra, França, Estados Unidos, Canadá e Austrália. Estes países já possuem uma normalização a respeito do assunto no que tange ao cálculo e a procedimentos construtivos. "Cumpre ressaltar que todas estas normas são o resultado de longos anos de trabalho experimental. Os principais laboratórios europeus e norte-americanos dedicam-se a anos ao estudo da alvenaria"¹³².

O Brasil, infelizmente, ainda não se encontra no nível de desenvolvimento já alcançado por estes países. Isto talvez se deva ao fato de que a alvenaria estrutural armada tenha sido introduzida no Brasil somente em 1967 antecedendo em 10 anos o emprego da alvenaria estrutural não armada¹⁷. A falta de pesquisas no Brasil é uma das maiores dificuldades para a elaboração de Normas Técnicas sobre o assunto³².

1.2. A Alvenaria Estrutural no Brasil

Desde a sua introdução até os dias de hoje, a alvenaria estrutural tem-se mostrado uma técnica bastante viável em nosso país. Um exemplo marcante desta afirmação foi a construção do Conjunto Habitacional de Itaquera no estado de São Paulo em 1978. Neste conjunto, pela primeira vez, utilizou-se simultaneamente vários processos construtivos com o objetivo de comparar custos e prazos de execução. "A experiência mostrou que a alvenaria estrutural se adequou melhor àquelas premissas básicas. Como resultado prático desta experiência, constata-se hoje que, naquele estado, existe um quase que absoluto predomínio dos processos que empregam a alvenaria estrutural na construção de edifícios de 4 a 5 pavimentos e um rigoroso fracasso dos outros processos construtivos desde então empregados"⁴⁷.

O sucesso econômico da alvenaria estrutural tem sido alcançado não só pela racionalização estrutural, mas também porque é possível que as paredes que constituem a estrutura da

edificação, desempenhem várias outras funções simultaneamente, tais como sub-divisão de espaços, isolamento térmico e acústico, proteção ao fogo e às condições climáticas³⁶. Além disso, esta técnica não exige grandes inversões de capital por parte das empresas construtoras³⁶.

Apesar de todas estas vantagens, "ainda faltam estudos de laboratório no Brasil (e mesmo no exterior) que sirvam de base para a normalização das construções de tijolos e blocos cerâmicos ou de concreto"³².

No nosso país, as primeiras pesquisas sobre alvenaria ocorreram na década de 30 e concentraram-se nos elementos cerâmicos.

Em 1931, o Instituto de Engenharia de São Paulo designou uma comissão especial para elaborar uma tentativa de especificação dos tijolos comuns de fabricação manual ou mecânica. Como decorrência dos estudos realizados pela comissão, surgiram, na década de 40, as primeiras especificações e métodos de ensaio dos tijolos de barro cozido no Brasil³². Como estas normas se originaram de um estudo particular e não foram revisadas ao longo do tempo, se encontravam desatualizadas tanto no que diz respeito às dimensões quanto às características mecânicas exigidas para tais componentes.

Em março de 1982 a Comissão de Estudos de Tijolos de Barro Cozido, constituída pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), se reuniu pela primeira vez com o objetivo de revisar as normas existentes. Após um ano de atividade a comissão encaminhou à ABNT os textos finais das novas normas¹.

Mesmo assim os valores apresentados para a resistência mínima à compressão dos tijolos maciços enquadrados nas categorias propostas pela NBR-7170-1983¹⁹ continuaram muito aquém das possibilidades do material cerâmico produzido no nosso país. Até mesmo os tijolos classificados como classe C pela ABNT podem não ter uma resistência suficiente para serem utilizados em alvenaria estrutural.

Nas pesquisas mais recentes sobre alvenaria estrutural

ral nota-se uma predominância nos estudos envolvendo os blocos de concreto. As publicações a respeito do assunto disponíveis no Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) em dezembro de 1984 já eram em número de 12 .

Bastante limitadas têm sido as pesquisas sobre alvenaria de elementos sílico-calcários, onde aparecem os trabalhos de SABBATINI⁴⁷ e SANTOS⁴⁹.

Da mesma forma, no que se refere aos elementos cerâmicos, poucos trabalhos têm sido publicados. Destacam-se os trabalhos de GOMES³² sobre alvenaria de blocos cerâmicos produzidos em São Paulo e de ROMAN⁴⁶ sobre tijolos maciços fabricados na região da Grande Porto Alegre.

Além disso, constata-se haver uma injustificada inexistência de pesquisas tecnológicas no Brasil sobre as argamasas mistas destinadas ao assentamento da alvenaria que são, por isso, consideradas como um material não técnico e de emprego absolutamente empírico⁵⁷.

Tudo isto nos diz que se abre um campo bastante amplo de pesquisas e estudos experimentais em nosso país no sentido de se preencher esta lacuna do conhecimento técnico.

2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA

2.1. Formas de Determinação

A alvenaria, ao desempenhar a função de estrutura de uma edificação, se encontra submetida a um conjunto diverso de solicitações. Devido a este fato, muitos pesquisadores têm estudado, ao longo dos últimos cem anos, o seu comportamento frente a esforços de compressão, flexão, cisalhamento, etc.

"Como as estruturas de alvenaria estão primariamente solicitadas à compressão, tem havido uma natural concentração de interesse neste tipo de solicitação"³⁶.

Atualmente, para a determinação desta propriedade estrutural, existem várias formas que podem ser agrupadas segundo três categorias^{37, 52}:

- A) Ensaio de materiais
- B) Ensaio de pequenos espécimes de alvenaria
- C) Ensaio em elementos completos de alvenaria

À categoria A, pertencem os ensaios de unidades (tijolos e blocos) e argamassas. Através dos resultados destes ensaios e com o auxílio de tabelas existentes em normas pode-se estimar a resistência à compressão das alvenarias. A norma inglesa BS-5628⁴⁵, por exemplo, apresenta uma tabela deste tipo. Cabe lembrar que esta tabela foi concebida através de extensos programas de ensaios e sua validade provavelmente se limita aos materiais e as condições de ensaio que nortearam sua elaboração.

Uma outra maneira, dentro ainda desta categoria, é lançar mão de fórmulas empíricas desenvolvidas para este fim. SAHLIN⁴⁸ apresenta 13 destas fórmulas. Para que se tenha uma idéia da discrepância dos resultados atingidos por diferentes pesquisadores basta observar o gráfico da figura 2.1.

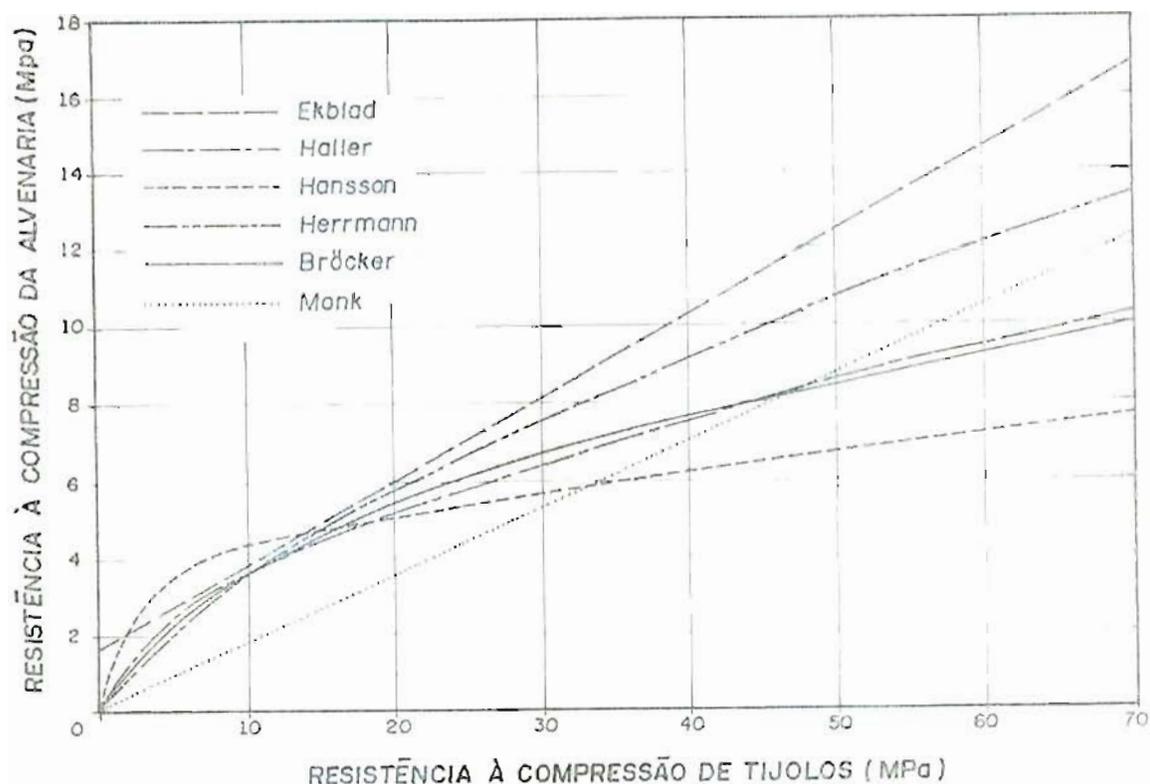


FIGURA 2.1 - Representação gráfica de fórmulas para o cálculo da resistência à compressão da alvenaria*. Argamassa de resistência à compressão igual a 5,5 MPa.

Nota-se claramente que a adoção de uma delas para determinar-se a resistência à compressão da alvenaria, seria, no mínimo, uma medida bastante arriscada.

Além disto, existem posições antagônicas a este tipo de procedimento. BROWN²⁶ afirma que "é prática questionável estimar a resistência da alvenaria através do resultado de ensaios padronizados de resistência à compressão de tijolos. Um tipo de tijolo pode apresentar uma maior resistência à compressão que outro, mas a resistência de prismas confeccionados com ambos pode apresentar resultados opostos com relativa magnitude". Evidentemente tal assertiva deve ser encarada com restrições já que o autor se baseou apenas num caso observado em seus experimentos utilizando os procedimentos de ensaio de apenas uma norma (ASTM-C-67-66).

* As fórmulas citadas estão apresentadas no Anexo II

À categoria B pertencem os ensaios de prismas. Prismas são pequenos espécimes, confeccionados com os mesmos materiais que as alvenarias as quais pretendem representar. Este tipo de ensaio produz melhores resultados comparando-se com os da categoria A, já que o mecanismo de ruptura que apresentam os prismas, quando submetidos à compressão, é o mesmo que o das paredes em escala normal. Entretanto, sua utilização pressupõe o conhecimento da correlação entre a sua resistência e a de paredes executadas com os mesmos materiais.

Por fim temos os ensaios da categoria C. Nesta, estão incluídos os ensaios de elementos em escala real (paredes, pilares, etc.). São os ensaios que produzem os resultados mais confiáveis.

A escolha da forma mais adequada de realizar o ensaio fica dependente de alguns critérios. O primeiro deles é a finalidade do ensaio. Entre outras, pode-se destacar:

- Determinação da resistência de projeto.
- Controle de qualidade da obra.
- Pesquisas laboratoriais.

Além disso, deve ser levado em conta:

- A disponibilidade de equipamentos para realização dos ensaios.
- Exigências quanto à precisão dos resultados.
- O custo relacionado com o objetivo do ensaio.

Considerando todas estas restrições, as normas sobre alvenaria estrutural têm padronizado as formas de ensaio de acordo com a realidade de cada país onde foram redigidas.

No item 2.2 está uma descrição sucinta sobre as formas de ensaio preconizadas pelas principais normas em todo o mundo.

2.2. Procedimentos Especificados pelas Principais Normas

2.2.1. Normas Estrangeiras

A norma Inglesa BS-5628²⁵, como já foi citado anteriormente, fornece tabelas onde o valor da resistência à compressão da alvenaria (f'_m) é determinado diretamente em função da resistência do tijolo utilizado e do traço de argamassa escolhido. Esta mesma norma prevê que, no caso do projetista de-
sejar utilizar um tipo de unidade ou argamassa não especificados no seu texto, deverá solicitar ensaios de paredes de dimensões mínimas de 1,20 x 2,60m para a determinação da capacidade portante da alvenaria obtida com a combinação destes materiais.

Na Bélgica, o "Centre Scientifique e Technique de la Construction" (CSTC), estabelece que o procedimento para a determinação de f'_m depende do valor da tensão de projeto (\bar{f}'_m) a ser adotada. Se o projetista trabalhar com valores inferiores a 1,2 MPa, os materiais a serem empregados para a confecção das alvenarias podem ser escolhidos através de tabelas existentes na Norma⁴². Se os valores de \bar{f}'_m estiverem entre 1,2 e 2,0 MPa a sua determinação será através de ensaio de prismas. Se os valores destas tensões ultrapassarem 2,0 MPa deverão ser ensaiadas paredes com alturas iguais àquela prevista no projeto.

MAURENBRECHER⁴⁰ cita que "um número crescente de códigos permitem os testes com prismas para determinar a resistência à compressão das alvenarias como uma alternativa ao uso de valores tabelados, baseados na resistência da unidade e tipo de argamassa e, em alguns casos, onde os valores tabelados não são permitidos.

O código australiano exige que no caso de edifícios com mais de oito pavimentos, as resistências de projeto estejam baseadas em ensaios de prismas.

O código do CIB (Conseil international du batiment pour la recherche l'etude et la documentation) recomenda o

uso de prismas quando \bar{f}'_m excede a 1,8 MPa, além de especificar testes de paredes quando esta tensão for superior a 3 MPa. Estes últimos valores não são definitivos e podem ser modificados se a resistência do prisma for muito maior do que a requerida.

Alguns códigos, tais como o russo, não contêm exigências específicas para a obtenção das tensões de projeto experimentalmente apesar de que o uso de valores experimentais seja permitido.

O código suíço exige que os ensaios preliminares de unidades e de paredes sejam feitos por um laboratório independente para qualificar um certo tipo de unidade como padrão, de alta ou altíssima qualidade. Após esta classificação, nenhum ensaio posterior é exigido mas o fabricante deve garantir o seu produto. Se o fabricante realizar ensaios três vezes ao ano, um baixo coeficiente de segurança será permitido (4 ao invés de 5). Paredes curtas e de altura de projeto são testadas tanto com carga centrada quanto excêntrica no limite do núcleo central (2 espécimes para cada caso).

Os códigos holandês, espanhol e mexicano usam os ensaios de prismas para obter tensões de projeto quando não existem valores experimentais prévios mas os prismas não são utilizados para o controle de qualidade. Ao invés disso, tais quais os códigos britânico e suíço, o controle de qualidade é geralmente feito sobre as unidades e as argamassas.

Os códigos americano e o atual código canadense especificam ou recomendam prismas para o controle de qualidade, se as tensões de projeto forem baseadas em ensaios de prismas, enquanto que o código australiano os exigem para todos os casos¹⁴.

2.2.2. Norma Brasileira

No Brasil existe apenas um projeto de norma da ABNT (2:3.04-012-set-1984)¹⁸ para regulamentar a determinação da resistência à compressão das alvenarias. O mesmo prevê a exe-

cução de ensaios de paredes de dimensões mínimas de 1,20 x 2,60 metros.

Como a introdução da alvenaria estrutural no país é bastante recente, os estudos de laboratório até agora executados com os nossos materiais são ainda bastante insipientes. Aliado à carência de profissionais na área, existe o problema da falta de laboratórios devidamente equipados para a execução de ensaios de grande porte, a não ser nos grandes centros; Porto Alegre, por exemplo, só a partir de 1985 é que passou a dispor de laboratório capaz de realizar ensaios de paredes com altura em verdadeira escala (CIENTEC).

Além disso, a estrutura das empresas produtoras de materiais utilizados para a confecção das alvenarias, que seriam as principais interessadas em ensaios e programas de pesquisa na área, é bastante distinta daquela dos países mais desenvolvidos. No Canadá, uma pesquisa realizada em 1972 mostrou que a produção total de tijolos cerâmicos daquele país estava sendo realizada em apenas 34 fábricas, metade das quais situada em Ontário⁴⁵. Para caracterizar-se a realidade brasileira pode-se citar o exemplo da região da Grande Porto Alegre onde existiam em 1983, 232 olarias abastecendo o mercado local⁴⁶. Na maioria eram empresas de pequeno porte e que utilizavam processos de produção praticamente artesanais.

Todo este panorama nos mostra que a indústria brasileira, a nível regional, ligada à produção de materiais, com raríssimas exceções, não teria condições de patrocinar extensos programas de ensaios como os que foram desenvolvidos na Inglaterra afim de promover a utilização adequada de seus produtos.

Cabe, então, aos centros de pesquisa do país a busca de formas de ensaio mais compatíveis com a nossa realidade que propiciem resultados com confiabilidade comparável a dos países mais desenvolvidos na área.

3. A UTILIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE PRISMAS PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA

3.1. Considerações Gerais

Os ensaios de prismas têm sido empregados em muitos países para a determinação da resistência à compressão da alvenaria. MAURENBRECHER⁴⁰ afirma que, na maioria das vezes, este tipo de ensaio conduz à obtenção de valores mais precisos e a tensões admissíveis maiores que os valores oriundos de tabelas porque estas tendem a ser mais conservadoras para permitir variações nas unidades, argamassas e técnica construtiva. Além da obtenção das resistências de projeto podem ser empregados para o controle de qualidade em obra. O mesmo autor preconiza que, para reduzir custos, prismas padronizados de dimensões reduzidas poderiam ser especificados mas, para poder-se utilizar os resultados com confiança, estes precisariam ser correlacionados com os resultados de ensaios de paredes com altura em verdadeira escala.

Uma outra grande vantagem que existe na adoção deste tipo de ensaio é a de permitir a utilização de uma diversidade de materiais sem que seja preciso estabelecer uma padronização rígida de suas características a nível nacional.

Entretanto, uma especial atenção deve ser dada aos procedimentos de ensaio já que estes podem afetar sensivelmente os valores das tensões obtidas nos testes.

A seguir será feita uma discussão sobre fatores que, segundo a maioria dos autores, têm influência nos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos prismas.

3.2. Fatores que Influenciam a Resistência dos Prismas

3.2.1. Geometria (Razão Altura-Espessura)

Prismas são normalmente ensaiados entre pratos de aço de uma prensa os quais são muito mais rígidos que a alvenaria. Por isso, estes pratos restringem por fricção a expansão lateral de suas extremidades. Esta ação prejudica a forma de ruptura normal do prisma (tração das unidades segundo planos paralelos à aplicação da carga), aumentando a carga necessária para rompê-lo. Com o aumento da razão altura/espessura (h/t) este confinamento passa a ter uma influência cada vez menor nas resistências obtidas nos ensaios. A partir de certos valores de h/t este aumento não mais produz diferenças significativas nos resultados. Esta estabilização normalmente ocorre para valores de h/t entre 3 e 5 mas isto também depende do material usado no capeamento³⁹. No caso de prismas de blocos vazados de concreto, menores valores de h/t são mais adequados provavelmente porque a esbeltez das paredes e septos dos blocos é mais importante do que a esbeltez do prisma. Por outro lado, prismas cheios com "graute" necessitam de um maior h/t para refletir a interação entre bloco e enchimento³⁹.

Alguns autores afirmam que a estabilização da resistência dos prismas ocorre quando estes possuem, pelo menos, 4 fiadas para o caso dos prismas de espessura igual à largura da unidade (prismas de frontal). Este mínimo de 4 fiadas é recomendado tanto para tijolos quanto para blocos³¹.

HEGEMIER³⁵, baseado em dados experimentais oriundos de ensaios de corpos-de-prova construídos com unidades serradas, postula que a resistência dos prismas é primariamente uma função do número de juntas horizontais e não da relação h/t . Por exemplo, prismas confeccionados com unidades serradas com 2 juntas e $h/t = 2$ apresentaram resistências semelhantes a espécimes confeccionados com os mesmos materiais, 2 juntas e $h/t = 3$ (os ensaios foram realizados com blocos de concreto).

Muitas vezes, por limitações dos equipamentos, não se consegue ensaiar prismas com esbeltez dentro da faixa ideal. Neste caso, os resultados obtidos precisam ser modificados pela aplicação de um fator de redução (ou conversão)²⁷.

KREFELD³⁰ foi o primeiro pesquisador a sugerir valores para estes fatores de conversão.

Posteriormente, muitas normas sobre alvenaria estrutural passaram também a apresentar tabelas de valores com a mesma finalidade (tabela 3.1).

Mais recentemente, alguns pesquisadores têm questionado não só a adequação destes valores mas também a sua própria origem. Num trabalho realizado na Nova Zelândia³¹, foi apresentada uma tabela comparando os valores recomendados por diversas normas com aqueles propostos por KREFELD. Concluiu-se que, se cada grupo de fatores fosse dividido por uma constante apropriada, os valores assim gerados se igualariam aos de KREFELD, o que sugere uma origem comum (ver tabela 3.2).

Como o próprio KREFELD no seu trabalho fez questão de salientar as limitações do seu estudo, já que utilizou apenas um tipo de tijolo e argamassa, conclui-se que estes fatores apresentados nas normas são de validade questionável.

Os valores experimentais encontrados por MAURENBRECHER³⁹ demonstraram que, para os materiais ensaiados, os fatores de conversão apresentados na Norma Canadense são inadequados. Neste estudo foram comparados ensaios de prismas com diferentes relações h/t com os valores tabelados na Norma.

A figura 3.1 mostra que, enquanto a norma prevê que um prisma de tijolos de razão altura-espessura igual a 2 seria 1,36 vezes mais resistente do que um prisma de razão igual a 5, os resultados dos ensaios sugerem que esta diferença está na ordem de 10%.

TABELA 3.1 - Fatores de conversão propostos por diferentes normas.

Fonte	h/t						
	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
New Zealand Standard	0,87	1,00	1,11	1,20	1,34	1,43	1,50
Australian Standard	-	0,85	0,93	1,00	1,10	1,16	1,16
Canadian Code (Blocos de concreto)	0,86	1,00	1,11	1,20	-	-	-
Canadian Code (Tijolos)	-	0,63	0,69	0,74	0,83	0,86	-
Uniform Building Code (EUA)	0,86	1,00	1,11	1,20	-	-	-
National Bureau of Standards (EUA)	0,86	1,00	1,11	1,20	-	-	-
Structural Clay Prods. Inst. (EUA)	-	0,63	0,69	0,74	0,83	0,86	-

TABELA 3.2 - Comparação entre os fatores de conversão de diversas normas divididos por uma constante de correção e valores propostos por KREFELD.

Origem	Const. de correção	h/t						
		1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
Krefeld	-	0,59	0,67	0,75	0,80	0,89	0,96	1,00
New Zealand Standard	1,50	0,58	0,67	0,74	0,80	0,89	0,95	1,00
Australian Standard	1,25	-	0,68	0,74	0,80	0,88	0,93	0,93
Canadian Code (Blocos de concreto)	1,50	0,57	0,67	0,74	0,80	-	-	-
Canadian Code (Tijolos)	0,93	-	0,68	0,74	0,80	0,89	0,93	-
Uniform Building Code (EUA)	1,50	0,57	0,67	0,74	0,80	-	-	-
National Bureau of Standards (EUA)	1,50	0,57	0,67	0,74	0,80	-	-	-
Structural Clay Prods. Inst. (EUA)	0,93	-	0,68	0,74	0,80	0,89	0,93	-

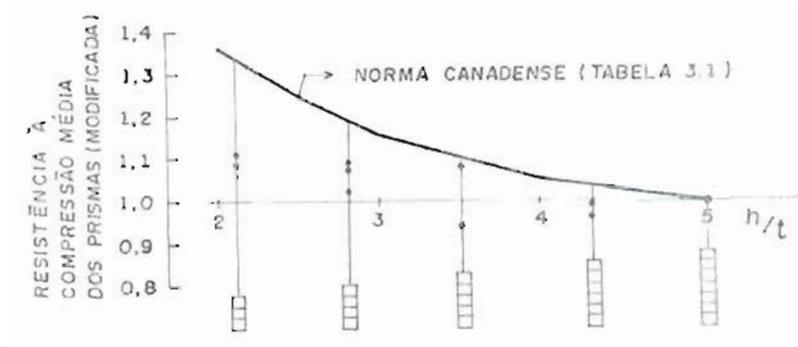


FIGURA 3.1 - Variação na resistência média dos prismas em função da esbelteza (a resistência para $h/t = 5$ foi tomada como 1.0) - Alvenaria de tijolos cerâmicos.

No caso de prismas de blocos, a situação é parecida (figura 3.2). A norma estima que um prisma de $h/t = 2$ é 1,19 vezes mais resistente do que um outro de mesma relação igual a 3. Analisando visualmente os valores experimentais plotados no gráfico, referentes às citadas relações, conclui-se que são da mesma ordem de grandeza.

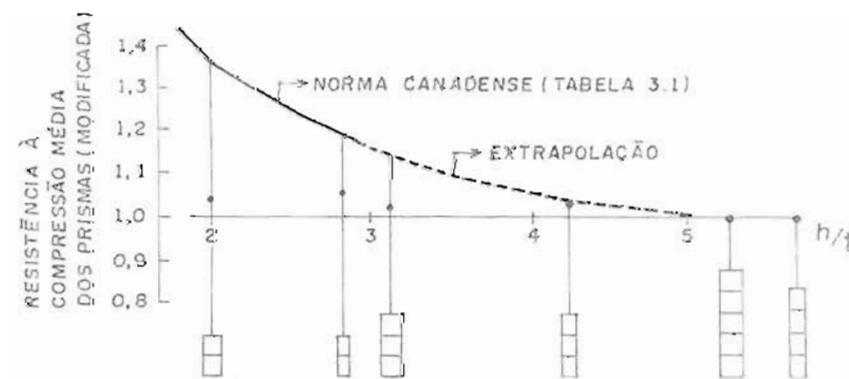


FIGURA 3.2 - Variação da resistência média dos prismas em função da esbelteza (a resistência para $h/t = 5$ foi tomada como 1.0) - Alvenaria de blocos de concreto.

Uma observação mais aprofundada sobre esta distorção nos leva a concluir que, no caso de alvenaria de tijolos, se fosse ensaiado um prisma curto ($h/t = 2$) para a determinação da resistência de projeto e seu resultado fosse convertido utilizando os valores da norma canadense (ver tabela 3.1), certamente se estaria subestimando a capacidade portante desta alvenaria.

Uma situação oposta pode ocorrer no caso de prismas de blocos. Se fosse utilizado um prisma de $h/t = 3$, os resultados obtidos poderiam ser majorados pela aplicação do fator de conversão (ver tabela 3.1). Este procedimento leva a uma superestimação da capacidade portante o que é, certamente, contra a segurança.

3.2.2. Capecamento

O material interposto entre o prisma e os pratos da prensa com a função de assegurar uma distribuição uniforme de carga pode também afetar os resultados obtidos nos ensaios.

Os capecamentos mais comuns (tabela 3.3) geram resultados semelhantes desde que as superfícies de carregamento sejam perfeitamente horizontais e os prismas possuam um h/t adequado⁴⁰. Materiais tipo borracha não são recomendados pois induzem a um rompimento prematuro⁴⁰. Alguns pesquisadores têm utilizado chapas de fibras (fiberboards) ou compensados (plywood), os quais possuem a vantagem de facilitar a operação do capecamento e, desta forma, agilizam os ensaios. Todavia, prismas que possuam superfícies irregulares ainda continuam necessitando de capecamento com pastas ou argamassa. Em comparação com capecamento com pasta, as chapas de fibra originam resultados ligeiramente inferiores. ROBERTS, citado por MAURENBRECHER³⁹, fez esta comparação para prismas de 2 blocos de concreto e chegou a relação de 0,90. Nas pesquisas realizadas pelo próprio MAURENBRECHER esta relação situou-se entre 0,92 e 0,99⁴⁰.

Algumas tentativas têm sido feitas no sentido de se conseguir um capeamento com características de deformação lateral (coeficiente de Poisson) semelhantes ao da alvenaria. Desta forma se viabilizaria o uso de prismas mais curtos. Contudo estes materiais se restringiriam a tipos particulares de alvenaria.

3.2.3. Mão-de-Obra

Os prismas devem ser construídos por um pedreiro profissional ao invés de, por exemplo, técnicos de laboratório, para tentar assegurar que a mão-de-obra seja, tanto quanto possível, semelhante àquela esperada nos canteiros de obra supervisionados. Exemplificando: muitos pedreiros têm o hábito de fazer um sulco na argamassa para facilitar o assentamento das unidades. Este procedimento provoca uma redução significativa na resistência das alvenarias erigidas com elementos sólidos⁴⁰.

Num programa de pesquisas realizado no Canadá³⁹ foi feita esta comparação. Um pedreiro e um laboratorista utilizando um gabarito construíram, simultaneamente, prismas de 7 tijolos inteiros superpostos, utilizando a mesma argamassa. A relação entre os resultados médios obtidos pelo pedreiro e pelo técnico foi de 0,92 e 0,66 para tijolos prensados e extrudados, respectivamente. Concluiu-se que a mão-de-obra é um importante fator para a alvenaria confeccionada com tijolos de alta resistência e tijolos extrudados, fato este causado, provavelmente por juntas não totalmente preenchidas. Como os tijolos prensados possuíam grandes perfurações no centro, esta falta de argamassa ao longo do centro da junta pode não ter sido tão crítica.

Os resultados obtidos nesta pesquisa se contrapõe, de certa forma, aos valores citados por MONK⁴¹ que concluiu que a mão-de-obra influi de uma maneira mais acentuada na resistência das alvenarias construídas com unidades de baixa resistência.

3.2.4. Velocidade de Carregamento

Algumas normas que regulamentam os ensaios de compressão de prismas apresentam valores geralmente distintos para velocidades de aplicação de carga (tabela 3.3).

A forma de controlar a carga no momento do ensaio pode causar diferenças nos resultados obtidos. Por exemplo, algumas normas recomendam que a velocidade de carregamento não seja alterada quando próxima da ruptura, mesmo quando o incremento da tensão esteja caindo. Este procedimento aproxima-se de uma taxa de deformação constante ao invés de uma taxa de tensão constante e tende a gerar resultados mais baixos⁵⁰.

Nas pesquisas realizadas por MAURENBRECHER⁵¹ prismas de 4 fiadas foram testados para descobrir se uma baixa velocidade de carregamento afetaria a resistência final. Foram ensaiados prismas confeccionados com dois tipos diferentes de tijolos. Parte dos corpos-de-prova foram testados a taxas de carregamento de 9,5 e 7,5 MPa/min respectivamente para aqueles construídos com tijolos extrudados e prensados. Os demais prismas foram testados às mesmas velocidades de carregamento até 80% da resistência estimada. Neste ponto, esta taxa foi reduzida para 0,3 MPa/min até a ruptura. As relações entre as resistências obtidas no segundo e primeiro casos foram de 0,93 para os prismas de tijolos prensados e 0,96 para os de tijolos extrudados.

A RILEM⁵² propõe que a velocidade de aplicação de carga seja uma função da resistência final dos prismas a serem ensaiados.

Esta velocidade varia de 0,6 MPa/min até 3,6 MPa/min.

3.2.5. Padrão de Assentamento das Unidades

Existe uma polêmica bastante grande quanto à influência do padrão de assentamento das unidades na resistência de prismas de espessura igual a da unidade.

ALLEN, citado por GRIMM³³, afirma que não existe uma diferença significativa entre a resistência dos prismas construídos com juntas verticais alternadas (contrafiados) e aqueles não contrafiados.

AMRHEIN³ afirma que a construção de prismas contrafiados não é recomendável porque a existência de juntas verticais nos topos provoca o aparecimento prematuro das trincas e levam o prisma a uma ruptura precoce. Apesar de que nas paredes também existam juntas verticais de topo, alega que este efeito desapareceria devido ao confinamento natural das unidades dentro desta.

Nas pesquisas realizadas por MAURENBRECHER³⁹ foram confeccionadas por um pedreiro duas séries de prismas de 7 fiadas: uma constituída por 7 tijolos superpostos e outra com juntas verticais alternadas e com um comprimento de $1\frac{1}{2}$ tijolos. Esta última, apresentou resultados mais baixos (87 e 94% da resistência da primeira série, para os dois tipos de tijolos testados).

3.2.6. Idade

A idade padrão dos ensaios é de 28 dias mas este é um valor meramente convencional com origem provável nos ensaios de concreto. Em certos casos, períodos de tempo mais curtos podem ser mais convenientes, especialmente se os prismas forem usados para controle de qualidade. Tanto o código de projeto canadense quanto a ASTM E 447⁴ permitem ensaios aos 7 dias desde que a relação de resistências a 7 e 28 dias seja determinada. Alternativamente, esta relação pode ser tomada como 0,9.

Em experimentos realizados no Canadá³⁹ obteve-se valores de 0,81 a 0,90 para esta relação o que indica que a adoção do valor 0,9 na ausência de ensaios pode ser contra a segurança.

3.2.7. Condições de Cura

Os prismas são normalmente curados ao ar (tabela 3.3). Os códigos geralmente especificam umidades na faixa de 30 a 70%, acima da 90% ou combinações dos dois casos (ex.: cura inicial sob polietileno ($h > 90\%$) por 3 ou 7 dias). A RILEM⁵² recomenda que os prismas sejam curados sob polietileno durante os 28 dias.

JAMES, citado por MAURENBRECHER⁴⁰, ensaiou paredes e prismas de espessura igual à da unidade, curados à sombra, coberto por polietileno e descobertos expostos ao sol. Verificou que os espécimes do segundo caso apresentaram uma resistência inferior ao primeiro em aproximadamente 10%.

Altas quantidades de umidade nos elementos, especialmente blocos de concreto, podem reduzir a resistência da alvenaria. Em alguns experimentos foram encontradas reduções em até 15%, quando blocos secos ao ar foram saturados em água⁴⁰.

Por isso, os prismas são normalmente testados secos ao ar mesmo que eles possam ser inicialmente curados em umidades elevadas. Contudo, se a alvenaria, na obra, estiver sujeita a ambientes muito úmidos, esta redução deve ser levada em conta.

TABELA 3.3 - Exigências de Normas para os Ensaios de Prismas à Compressão

	Espanha MV 201 (1) *	Holanda NEN 3853	CIB Draft	Austrália AS 1640, (1)	Nova Zelândia	México 403	Canadá		Estados Unidos	
							S 304 (12)	A 369.1	NCMA (18)	ASTM E 447 Método B (20)
h	--	≥ 700 mm	≥ 5 fiadas	4 fiadas	≥ 5 (8) fiadas	≥ 3 fiadas	≥ 380 mm	≥ 300 mm	≥ 400 mm	≥ 380 mm
h/t	= 2 (< 2)	--	3-5	≥ 2	--	2-5 (10)	1,5-5 (13)	1,4-10	1,5-3 (19)	≥ 2
t	1 tijolo	-- (3)	igual a ca parede	espessura do tijolo	igual a da parede	--	igual a ca parede	igual a da parede	igual a ca parede	igual a ca parede
b'	comprimento do tijolo	-- (3)	≥ 2 unidades	comprimento do tijolo	--	--	--	≥ compr. da unidade (14) ≥ 190mm (15)	--	--
b'/t	= 1	≥ 1	≥ 1	--	≥ 1	--	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1
C	Nº de dias	28	28 (4)	28	28 (5)	28	28 (9)	≤ 28	28 (9)	28 (9)
U	Temp. OC	--	20	20	≥ 10 (6)		24±8	20±10	24±5	24±8
A	Umidade %	≥ 90 (2)	50-70	60	≥ 90 (7)		30-70	≥ 90 (16) e 30-70	30-70	30-70
Capreamen- to	Argamassa	--	--	Argamassa + compensado 4mm		(11)	Enxofre ou pasta de gesso	Chapa de fibra (17)	Enxofre ou pasta de gesso	Enxofre ou pasta de gesso
Taxa de carregam. MPa/min	--	2,4	3	14-28	10-20	(11)				
Duração do teste (min)	--	≥ 3	≥ 1	--			Pu/2 - Pu 1-2	1Pu/2 - Pu 1-2	Pu/2 - Pu 1-2	Pu/2 - Pu 1-2
h = altura t = espessura b' = comprimento Pu = carga máxima										
Obs.: *ver notas da tabela 3.3										

Notas da tabela 3.3

- (1) Alvenaria de tijolos.
- (2) Prisma coberto por uma manta úmida.
- (3) $b \times t > 0,04 \text{ m}^2$.
- (4) Até 10 semanas se uma argamassa de cimento-cal for usada.
- (5) Provavelmente será reduzido para 7 dias na próxima revisão do código.
- (6) Temperaturas mais baixas são permitidas mas o período de cura é então prolongado.
- (7) Prisma coberto por uma membrana a prova de vapor.
- (8) Um menor número é permitido desde que isto não afete a resistência.
- (9) Ensaio aos 7 dias são permitidos se a relação com a resistência aos 28 dias for estabelecida.
- (10) 4 é o padrão; outras razões exigem fatores de correção.
- (11) Igual ao dos corpos de prova cilíndricos de concreto.
- (12) Exigências em conformidade com a ASTM E 447.
- (13) Alvenaria de tijolos: 2 a 5 (5 é o padrão; outros valores requerem fatores de correção).
Alvenaria de blocos: 1,5 a 3 (2 é o padrão; outros valores exigem fatores de correção).
- (14) Unidades vazadas.
- (15) Unidades sólidas ou preenchidas (c/ graute).
- (16) 90 apenas para os primeiros 7 dias.
- (17) Argamassa, gesso ou enxofre, são usados em adição as chapas de fibras se os prismas não possuírem superfícies planas.
- (18) Alvenaria de blocos de concreto.
- (19) 2 é o padrão; outras razões h/t exigem fatores de correção.
- (20) BIA Tech Note 39-A "Ensaio para Alvenaria de Tijolos: Determinação das tensões admissíveis de projeto" recomenda que os prismas devam ser construídos conforme a ASTM E 447 - método B.

4. ENSAIOS REALIZADOS

4.1. Caracterização dos Materiais Empregados

4.1.1. Unidades

4.1.1.1. Definição

As unidades empregadas nos ensaios foram tijolos cerâmicos maciços provenientes de olarias distintas, todas situadas na região da Grande Porto Alegre.

A opção de trabalhar-se com tijolos maciços está fundamentada em uma série de motivos:

1) Dar continuidade a pesquisas anteriores realizadas na UFRGS com este material.

2) A grande potencialidade que a região possui para produzir material de qualidade compatível com as exigências da alvenaria estrutural demonstrada nestas pesquisas.

3) A larga utilização regional dos tijolos maciços em construções de edifícios de até 4 pavimentos.

4) A larga utilização do tijolo maciço cerâmico em países onde a alvenaria estrutural já está bastante difundida. Estes são os casos da Inglaterra⁵¹ e do Canadá⁶¹.

4.1.1.2. Seleção das Amostras

O critério de escolha das amostras foi o da resistência à compressão das unidades pois, para alvenaria estrutural, tijolos de pouca resistência não são recomendados. A norma Inglesa BS 3921²⁴, por exemplo, proíbe a utilização, em alvenaria estrutural, de tijolos com resistência média inferior a 5,2 MPa, obtida no ensaio por ela padronizado.

Outra condicionante nesta escolha era que os tijolos de diferentes procedências apresentassem resistências médias que cobrissem um intervalo que fosse o mais amplo possível. Isto facilitaria um posterior estudo estatístico das correlações entre tijolos, prismas e paredes.

Sendo assim, a seleção das amostras foi realizada baseando-se em informações coletadas junto a um pesquisador da UFRGS que havia realizado um estudo prévio da resistência dos tijolos maciços produzidos na Grande Porto Alegre.

Contactou-se, então, as olarias indicadas. Coletadas as amostras, realizou-se o ensaio de resistência à compressão com a finalidade de avaliar a adequação destas aos propósitos do trabalho.

A tabela 4.5 mostra os resultados obtidos nos ensaios.

4.1.1.3. Dimensões

Foram medidos 30 tijolos de cada tipo segundo as três direções ortogonais. Na tabela 4.2 encontram-se condensados os valores obtidos nas medições.

A norma NBR-7170¹⁹ fixa um procedimento para a determinação das dimensões dos tijolos maciços cerâmicos para alvenaria. Devem ser medidos 24 tijolos, colocados lado a lado segundo a dimensão a ser determinada, através de uma trena metálica, com uma aproximação de 2 mm. Se, por alguma razão, for impraticável medir os 24 tijolos dispostos em uma fila, a amostra pode ser dividida em 2 filas de 12 ou 3 filas de 8 que devem ser medidas separadamente. Deve-se, posteriormente, somar os valores obtidos em qualquer dos casos e dividir este resultado por 24 para se obter a dimensão real dos tijolos.

Na tabela 4.1 estão reproduzidos os valores das dimensões nominais que devem possuir os tijolos maciços produzidos no país, segundo a referida norma.

TABELA 4.1 - Dimensões nominais dos tijolos maciços cerâmicos segundo NBR-7170¹⁹.

Comprimento	Largura	Altura
190	90	57
190	90	90

A tolerância de fabricação máxima admitida é de 3 mm, para mais ou para menos, nas três dimensões.

No presente trabalho não foi utilizada a norma NBR-7170¹⁹ porque não se obteria a dispersão dos valores medidos em relação a média e, por conseguinte, não poderia ser verificado se a variação das medidas está dentro da tolerância anteriormente citada.

TABELA 4.2 - Dimensões dos tijolos utilizados nos experimentos.

Olaria nº	Comprimento			Largura			Altura		
	Média (mm)	C.V. %	Δ máx. (mm)	Média (mm)	C.V. %	Δ máx. (mm)	Média (mm)	C.V. %	Δ máx. (mm)
1	227,3	0,81	4,0	106,4	0,91	2,1	55,6	1,37	1,3
2	218,0	1,51	7,3	108,0	1,80	4,2	49,1	2,83	2,5
3	239,2	0,62	3,3	115,9	1,09	3,9	56,1	2,92	4,3
4	224,2	0,50	3,0	111,5	0,60	2,6	54,0	1,14	1,3
5	224,3	1,26	6,3	110,1	1,81	4,0	53,4	1,94	2,1

Os valores apresentados na tabela 4.2 nos mostram que nenhum dos tipos de tijolos ensaiados se enquadram nas prescrições da norma.

4.1.1.4. Absorção

Como não existe, no Brasil, uma normalização para este tipo de ensaio, utilizou-se um procedimento semelhante ao prescrito na Norma Americana ASTM C-67/83³.

De cada lote de tijolos, foram retiradas 5 unidades para comporem as amostras de ensaio. Este número foi adotado por ser o recomendado pela norma americana. Como nos ensaios realizados por ROMAN^{4,6} a absorção de água de 11 amostras de tijolos maciços fabricados na região da Grande Porto Alegre apresentaram uma baixa variabilidade (C.V. máximo = 8,4%), acredita-se que o número utilizado é adequado.

O procedimento de ensaio adotado foi o seguinte:

a) Após uma prévia limpeza para eliminação das partículas soltas, os tijolos foram colocados em uma estufa à temperatura de 110°C e lá permaneceram por 24 horas.

b) Logo depois de retirados da estufa, foram pesados para a determinação da massa seca (Ms).

c) Após esfriarem foram mergulhados em água durante um período de 24 horas.

d) Depois de serem retirados da água, os tijolos tiveram suas superfícies enxugadas por um pano e a seguir foram pesados (Mu).

O valor da absorção foi calculado pela seguinte expressão:

$$Abs = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (4.1.1.4.1)$$

onde:

Abs = absorção (%)

Mu = massa do tijolo saturado (kg)

Ms = massa do tijolo seco (kg)

A tabela 4.3 apresenta a síntese dos valores encontrados.

TABELA 4.3 - Absorção total de água das unidades.

Olaria n°	Absorção média (%)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
1	13,48	0,58	4,3
2	14,91	0,30	2,0
3	17,94	0,31	1,75
4	14,69	1,22	8,34
5	11,09	1,11	10,01

4.1.1.5. Densidade

A determinação precisa da densidade de materiais sólidos porosos, tais como os cerâmicos, exige processos especiais como, por exemplo, o que utiliza a balança hidrostática. No entanto, não existe norma brasileira que regule este tipo de ensaio para tijolos.

Como, neste trabalho, o objetivo da determinação da densidade foi apenas de caracterizar-se o material estudado, adotou-se procedimentos bastante simplificados para a obtenção dos valores da tabela 4.4.

a) Com o auxílio de um paquímetro, mediu-se 5 tijolos de cada procedência, secos ao ar. Os corpos-de-prova foram medidos em suas 3 dimensões, 2 vezes em cada dimensão, tomando-se como pontos de medida os terços extremos das peças. Com as dimensões médias, determinou-se o volume dos corpos-de-prova (V).

b) Após medidos, os tijolos foram pesados.

A densidade foi obtida através da relação

$$D = \frac{M}{V \cdot \text{dag}} \quad (4.1.1.5.1)$$

onde:

D = densidade do tijolo
 M = massa do tijolo seco ao ar (kg)
 V = volume do tijolo (M^3)
 d_{ag} = massa específica da água (kg/M^3)

TABELA 4.4 - Densidade dos tijolos empregados.

Olaria nº	Densidade média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
1	1,856	0,015	0,8
2	1,655	0,067	4,0
3	1,654	0,051	3,1
4	1,834	0,036	2,0
5	1,906	0,031	1,7

4.1.1.6. Resistência à Compressão

De cada lote de tijolos, separou-se aleatoriamente 15 unidades para o ensaio de resistência à compressão. O número de corpos-de-prova foi estipulado baseando-se nos coeficientes de variação obtidos nos ensaios executados por ROMAN⁴⁶.

Os procedimentos de ensaio obedeceram às prescrições da NBR 6460²⁰.

Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 4.5.

É interessante comparar-se os resultados da tabela 4.5 com as exigências da norma NBR-7170/83¹⁹ contidas na tabela 4.6.

TABELA 4.5 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão dos tijolos segundo a NBR-6460^{2º}.

Resistência à compressão dos tijolos (MPa)					
Nº do C.P.	Procedência das amostras				
	1	2	3	4	5
1	46,5	13,6	16,9	33,4	39,9
2	73,8	16,6	16,7	37,5	44,3
3	93,3	12,4	16,6	28,9	77,7
4	67,0	14,7	18,4	30,1	45,9
5	91,2	16,9	21,2	24,8	38,1
6	79,1	24,3*	19,0	34,0	61,3
7	63,1	12,1	15,6	38,0	42,5
8	65,5	16,2	19,6	33,0	31,7
9	52,1	19,5	20,2	36,1	78,1
10	69,0	15,3	17,4	29,4	35,4
11	62,6	16,1	15,4	30,7	41,8
12	62,5	18,2	20,2	32,4	54,9
13	65,8	13,7	22,6	32,7	47,6
14	96,6	13,7	19,2	31,7	35,8
15	60,3	15,4	13,6	29,9	46,3
\bar{X}	69,9	15,3	18,2	32,2	48,1
S	14,6	2,13	2,43	3,47	14,2
C.V.	20,8%	13,9%	13,4%	10,8%	29,6%
X_{\min}	46,5	12,1	13,6	24,8	31,7
Obs.	O valor com "*" foi considerado espúrio (ver Anexo 1.1) e, portanto, não foi utilizado no cálculo de \bar{X} e S.				
	Os ensaios foram realizados pelo laboratório de materiais de construção da CIENTEC.				

TABELA 4.6 - Resistência mínima à compressão dos tijolos em função das categorias (NBR-7170/83¹⁹).

Categoria	Resistência à compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,0

A referida norma, além de fixar exigências bastante tífmidas quanto à resistência a compressão, trata somente de valores mínimos individuais da amostra ensaiada. Isto, no parecer do autor, é um retrocesso em relação à antiga norma a qual substituiu, a EB-19R/43²¹, que fixava limites mínimos tanto para os valores médios quanto para os individuais.

Outro ponto a ser observado é com respeito ao modo de ruptura típico que apresentaram os corpos-de-prova ensaiados (foto 4.1). Nota-se claramente que o rompimento se deu por tração na direção perpendicular à de aplicação da carga, contrariando as expectativas de que rompesse por cisalhamento devido à restrição imposta pelos pratos da prensa.

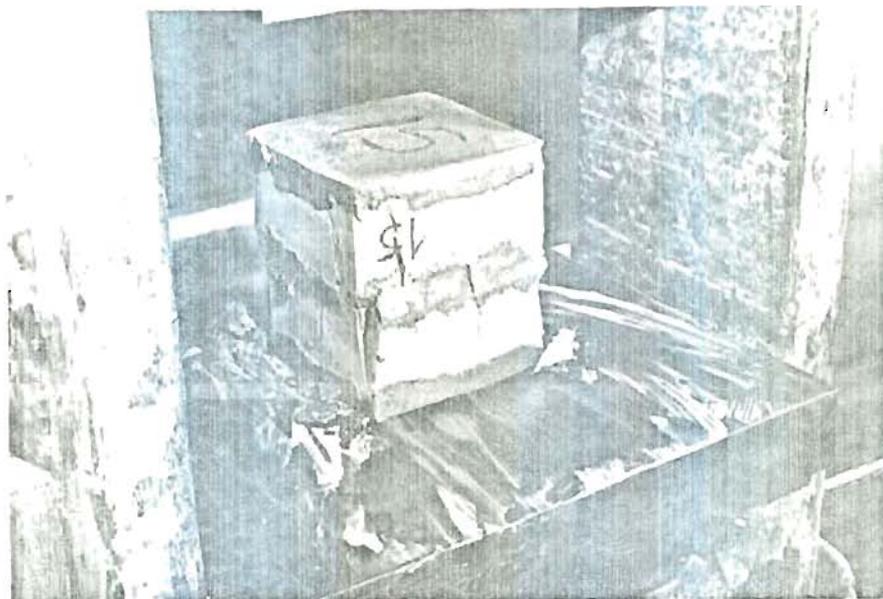


FOTO 4.1 - Modo de ruptura típico apresentado pelos corpos-de-prova de tijolos ensaiados.

4.1.2. Argamassa

4.1.2.1. Definição

Como foi ressaltado anteriormente, o presente trabalho não tem condições e nem a pretensão de estudar todas as combinações de elementos e argamassas possíveis. Devido a isto, limitou-se apenas à utilização de um único traço de argamassa. A argamassa padrão escolhida para a pesquisa foi uma mistura de cimento, cal hidratada, areia e água nas seguintes proporções em peso:

1 (cimento)
 0,5 (cal hidratada)
 6,67 (areia)
 1,38 (água)

Este traço corresponde a aproximadamente um traço em volume de:

1 (cimento)
 1 (cal hidratada)

6 (areia)
1,38 (água)

Para que esta limitação não prejudicasse de modo decisivo os objetivos do trabalho, a seleção da argamassa padrão foi precedida de um profundo estudo da bibliografia disponível sobre o assunto. Deste estudo foram retirados os principais conceitos os quais serão discutidos no item 4.1.2.2. para melhor poder justificar esta escolha.

4.1.2.2. Seleção da Argamassa

Os tipos de argamassa utilizados no assentamento de unidades nas alvenarias são misturas à base de cal, cimento, cimento com aditivos, cimentos de alvenaria, cal e cimento (mistas). Dentre estas, as mais adequadas para o emprego em alvenaria estrutural são as argamassas mistas de cal e cimento⁴⁷. Devido a isto, todas as normas que tratam do assunto trazem recomendações de traços e especificações para este tipo de argamassa.

É consenso entre estas normas, a proporção em volume entre aglomerante e agregado das argamassas mistas:

1 (cimento + cal) : 3 (areia)

Com esta proporção, a quantidade de pasta formada é suficiente para preencher os vazios do agregado além de produzir uma fina camada que envolve suas partículas de modo a conferir uma trabalhabilidade adequada à mistura.

A proporção entre cimento e cal é variável e as propriedades da mistura estão estreitamente ligadas a ela.

Na tabela 4.7, proposta por SABBATINI⁴⁷, pode-se avaliar qualitativamente as mudanças nas propriedades de uma argamassa com a alteração da composição relativa de cimento e cal.

TABELA 4.7 - Variação nas propriedades de uma argamassa com a alteração da composição relativa de cimento e cal.

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

Obs.: Estados: (E) endurecido
(F) recém-fabricado

O quadro apresentado mostra claramente que não existe uma argamassa ideal que possua todas as propriedades otimizadas simultaneamente.

No processo de escolha da argamassa o fator determinante são as condições de solicitação e exposição a que as alvenarias estarão sujeitas.

As composições em que os dois aglomerantes aparecem em quantidades aproximadamente iguais podem produzir argamassas que desenvolvam uma grande variedade de propriedades em níveis satisfatórios. Isto explica a larga utilização das argamassas de traço 1:1:6 (cimento, cal, areia) .

Outras publicações^{22,27,30,47} recomendam o uso do mesmo traço de argamassa para as alvenarias sujeitas a condições "normais" (não extremas) de solicitação e exposição.

Evidentemente que este traço padrão só tem sentido quando os materiais constituintes também possuem suas características normalizadas.

No caso do Brasil existem normas que regulam as características do cimento¹³ e da cal hidratada¹¹. Contudo apenas as normas referentes ao cimento são efetivamente respeitadas. SABBATINI⁴⁷ cita que, em ensaios realizados no IPT - ABPC verificou-se que, em geral, as cales hidratadas comercializadas não atendem às especificações da EB-153 quanto ao teor de óxidos totais, máximo teor de magnésio livre, finura e plasticidade.

Contudo, resolveu-se utilizar como traço padrão aquele citado no item 4.1.2.1. porque apresentaria, de qualquer forma, propriedades semelhantes às das argamassas de igual traço, padronizadas em outros países.

Além disso, fez-se um estudo preliminar da trabalhabilidade e resistência da argamassa obtida na mistura dos materiais disponíveis para a execução do trabalho, o qual confirmou a adequação do traço escolhido.

4.1.2.3. Materiais Constituintes

4.1.2.3.1. Cimento

O cimento utilizado na mistura foi um cimento Portland Pozolânico Poz 320.

Apesar dos cimentos Portland comum estarem disponíveis no mercado, optou-se por este tipo por ser o único pro-

duzido no Estado do Rio Grande do Sul e por ter a presente pesquisa o objetivo de empregar apenas materiais fabricados na região.

Do ponto de vista técnico, a escolha oferece certas vantagens. Os cimentos que apresentam maior superfície específica têm potencial para tornar as argamassas mais trabalháveis e com maior retenção de água. Os cimentos de endurecimento mais lento podem produzir argamassas mais resilientes (com maior capacidade de absorver pequenas deformações). Como o cimento Pozolânico apresenta estas duas características pode vir a compor argamassas com propriedades otimizadas⁴⁷.

4.1.2.3.2. Cal hidratada

Como foi citado no item 4.1.2.2 as cales hidratadas produzidas no país não têm apresentado níveis de qualidade já atingidos por outros materiais tais como o cimento Portland.

Apesar de existirem normas brasileiras que estabelecem critérios de aceitação das cales hidratadas, estas, de uma maneira geral, não são respeitadas.

Por tudo isto, a escolha da marca da cal que iria compor a argamassa padrão foi baseada em informações do próprio corpo técnico da CIENTEC que havia realizado ensaios prévios de algumas das cales produzidas no Rio Grande do Sul.

Devido à incerteza quanto à manutenção das propriedades da cal adquirida, em relação àquela ensaiada meses antes, decidiu-se realizar novamente todos os ensaios.

A tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos em confrontação com os limites mínimos fixados pelas normas brasileiras.

TABELA 4.8 - Características químicas e físicas da cal utilizada.

	Norma utilizada no ensaio	Característica		Resultado do ensaio	Limites estabelecidos Projeto de Norma 18:05.10-001 ¹¹	
					Cal	
					Tipo E	Tipo C
Químicas	NBR-6473 ¹²	Perda ao fogo (1000°C)		20%		
		Óxido de cálcio (CaO)		42,8%		
		Óxido de magnésio (MgO)		28,3%		
		Anidrido sulfúrico (SO ₃)		< 0,1%		
		Anidrido carbônico (CO ₂)		6,1%	≤ 7%	≤ 7%
		Óxidos não hidratados (em CaO)		31,2%	≤ 10%	Não exigido
		Óxidos totais, na base de não voláteis (CaO + MgO)		88,9%	≥ 88%	≥ 88%
Físicas	18:05.11-001 ⁸	Finura % retida acumulada	Peneira 0,6mm	1,86%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
			Peneira 0,015mm	19,23%	≤ 15%	≤ 15%
	18:05.11-002 ⁷	Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias	Ausência de cavidades ou protuberâncias	
	18:05.11-004 ¹⁰	Retenção de água		77%	≥ 80%	≥ 80%
	18:05.11-003 ⁹	Plasticidade		134%	≥ 110%	≥ 110%
	18:05.11-005 ⁵	Incorporação de areia		2,75%	≥ 2,5%	≥ 2,5%
	NBR-7224 ¹⁶	Superfície específica Blaine		1643 m ² /kg		
	NBR-6474 ¹⁴	Massa específica		2,56 kg/dm ³		
Observação		Os ensaios foram realizados pelo laboratório de materiais de construção da CIENTEC				

4.1.2.3.3. Areia

A areia utilizada na confecção da argamassa padrão foi uma areia classificada comercialmente como média.

O tipo de areia empregado pode exercer uma influência considerável na qualidade final de uma argamassa. Tanto assim que as normas estrangeiras que tratam de alvenaria estrutural estabelecem certas exigências notadamente quanto à granulometria das areias a serem utilizadas na confecção das argamassas de assentamento. A granulometria da areia dentro de certos limites pode produzir uma densa massa de agregado, exigindo uma quantidade mínima de aglomerante para uma dada resistência. Ao mesmo tempo, deformação lenta e retração são minimizadas e o custo da argamassa é reduzido⁴⁸.

A tabela 4.9 apresenta o resultado da análise granulométrica da areia empregada na pesquisa em confronto com as exigências das normas Inglesa (BS-1200) e Americana (ASTM-C-144⁴⁷).

A norma Americana traz limitações complementares: a areia não pode ter mais de 50% de grãos retidos entre 2 peneiras consecutivas e nem mais de 25% entre as peneiras de abertura de 0,3 e 0,15 mm.

SAHLIN⁴⁸ recomenda que o módulo de finura da areia deve estar no intervalo de 1,6 a 2,5 e o diâmetro máximo da partícula não deve exceder a 1/3 ou 1/2 da espessura da junta.

Como pode ser observado na tabela 4.8 a seguir, a areia escolhida cumpriu praticamente todos os requisitos exigidos pelo autor e normas supracitadas.

TABELA 4.9 - Comparação da granulometria da areia utilizada com aquelas recomendadas pela BS-1200 e ASTM-C-144¹⁷.

Análise granulométrica da areia utilizada (NBR-7217 ¹⁵)				Composições granulométricas recomendadas	
Abertura nominal das peneiras (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem retida acumulada	Porcentagem passante	Porcentagem passante (em peso) nas peneiras	
				BS-1200	ASTM-C-144
4,8	0	0	100,00	100	100
2,4	0	0	100,00	90 a 100	95 a 100
1,2	13,13	13,13	86,87	70 a 100	70 a 100
0,6	30,24	43,37	56,63	40 a 80	40 a 75
0,3	41,33	84,70	15,30	5 a 40	10 a 35
0,15	14,79	99,49	0,51	0 a 40	2 a 15
F	0,51	100,00	0		
Diâmetro máximo		2,4 mm			
Módulo de finura		2,41			

4.1.2.4. Resistência à Compressão e Consistência

Estes ensaios seguiram as determinações da NBR-7215¹⁷ da ABNT - Ensaio de Cimento Portland - por não existir normas específicas para argamassas mistas no Brasil. Outro motivo para adotar-se este procedimento de ensaio é o de estabelecer uma comparatividade com os resultados obtidos por outros autores brasileiros^{32, 46} que também optaram pela adoção desta forma de ensaio.

A argamassa utilizada nos ensaios foi produzida nas mesmas condições daquela utilizada na confecção dos prismas e paredes (ver item 4.2.3.1) e, a seguir, levada para o laboratório para a moldagem dos corpos-de-prova e determinação da

consistência.

Os resultados obtidos encontram-se reproduzidos na tabela 4.10.

TABELA 4.10 - Resistência à compressão e consistência da argamassa utilizada nos experimentos.

Resistência à compressão da argamassa					
Idade	Nº de c.ps	Resistência média (MPa)	Desvio-padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Desvio máximo (MPa)
3	6	2,49	0,0647	2,60	0,08
7	6	3,23	0,0547	1,69	0,08
28	6	5,39	0,240	4,46	0,31
Consistência da argamassa, no "flow table" (mm)				267	

4.2. Prismas

4.2.1. Geometria e Padrão de Assentamento

Devido à falta de consenso entre os pesquisadores quanto a real influência da geometria e padrão de assentamento na resistência à compressão dos prismas, decidiu-se ensaiar espécimes de diferentes tipos (foto 4.2).

Na escolha das geometrias, o critério adotado foi o de padronizar o número de fiadas devido à existência de uma heterogeneidade nas dimensões das unidades provenientes de diferentes olarias (ver tabela 4.1). Optou-se por utilizar prismas de 4, 5 e 7 fiadas. Os de menor altura, porque geravam uma relação altura-espessura (h/t) de 2 a 3, que se encontra dentro das faixas permitidas pela maioria das Normas Estrangeiras (ver tabela 3.3).



FOTO 4.2 - Tipos de prismas utilizados na pesquisa.

Os espécimes de 7 fiadas foram testados por apresentarem uma relação h/l próximo de 5, valor considerado como o mais aconselhável para prismas de tijolos além de um comprimento de 2 tijolos que é o mínimo recomendado pela RILEM⁵².

Quanto ao padrão de assentamento decidiu-se trabalhar com prismas contrafiados e não-contrafiados. Com os primeiros, porque são recomendados pela quase totalidade de autores e normas. Os não-contrafiados (prisma C) foram também testados pela simplicidade da confecção e por serem recomendados pela ASTM E 447-A⁴ para estudos de laboratório.

O objetivo principal de se trabalhar com diferentes tipos de prismas foi o de se obter subsídios para poder escolher qual seria o mais adequado para o estudo das correlações com as paredes em verdadeira escala.

4.2.2. Número de Corpos-de-Prova

A proposta original da pesquisa era de que fossem confeccionados 10 prismas de cada tipo (A, B e C) para cada lote de tijolos disponível.

Em função de certas limitações de ordem laboratorial, este número acabou sendo variável. De qualquer forma, situou-se na faixa de 6 a 8 corpos-de-prova.

Para efeito de controle, foi adotada a seguinte notação para identificar cada corpo-de-prova construído:

Identificação do Prisma $\rightarrow n P_j$

onde:

n = nº da olaria de onde provieram os tijolos
(de 1 a 5)

P = tipo do prisma (A, B ou C)

j = nº do corpo de prova (de 1 a 8)

Para que fosse evitada a influência de certos fatores como mão-de-obra (melhoria da qualidade com o tempo) e condições climáticas nos resultados da resistência dos prismas, decidiu-se aleatorizar a ordem de confecção dos mesmos. Como regra geral procurou-se seguir uma certa ordem sintetizada na seguinte expressão:

$$Pr_i = (j_1^8 (n_1^5 (P_A^C))) \quad (4.2.2.1)$$

onde:

Pr_i = i-ésimo prisma confeccionado

A seqüência de variação é dos parênteses internos para os externos

Sendo assim, os prismas foram confeccionados na seguinte ordem:

$1A_1, 1B_1, 1C_1, 2A_1, 2B_1, 2C_1, \dots, 4A_8, 4B_8, 4C_8,$
 $5A_8, 5B_8, 5C_8.$

Cabe aqui ressaltar que, por motivos que serão analisados no item 5.2, foram construídos posteriormente mais 5 séries de 10 prismas, apenas do tipo C, com cada tipo de tijolo disponível.

4.2.3. Confecção

4.2.3.1. Preparação da Argamassa

Em função do traço adotado, os materiais eram pesados e misturados numa betoneira intermitente de eixo vertical e cuba móvel (em contracorrente). Os materiais eram primeiramente misturados a seco e logo após se adicionava a água. O tempo de mistura, contado a partir da adição da água, era de, no mínimo, 3 minutos.

A quantidade de argamassa produzida era calculada de tal forma que pudesse ser consumida num prazo máximo de 2 a 3 horas para evitar-se a perda da trabalhabilidade.

4.2.3.2. Assentamento das Unidades e Capeamento

Os prismas foram construídos em mesas perfeitamente niveladas, sobre uma chapa de aço.

Antes da construção dos prismas, as unidades eram submersas em água por um certo período de tempo para que, no momento em que entrassem em contato com a argamassa de assentamento, não lhe retirasse por sucção uma quantidade excessiva da água de amassamento.

Devido às imperfeições existentes na superfície dos tijolos utilizados, os corpos-de-prova foram capeados com uma camada de cimento e areia fina (traço em volume de aproximadamente 1 de cimento e 2 de areia).

O capeamento da face inferior era feito simultaneamente com a construção de cada prisma. Sobre a superfície da chapa metálica, previamente untada com óleo mineral para facilitar a remoção posterior do prisma, espalhava-se uma fina camada de argamassa de capeamento. Sobre ela era assentada a primeira fiada de tijolos. A partir daí, o método de construção variou em função do tipo do prisma.

Os prismas A e C tiveram uma execução bastante simples em função das suas formas. A cada assentamento de uma

nova fiada, procedia-se o nivelamento da superfície superior com o auxílio de um nível de bolha. Com o mesmo instrumento, controlava-se o prumo das faces verticais (laterais e de topo).

A espessura das juntas inicialmente foi controlada com o auxílio de uma régua graduada. Mas, devido à dificuldade de se manter uma junta perfeitamente uniforme causada por imperfeições das unidades, este controle passou a ser visual. Com isto, a espessura das juntas variaram dentro de uma faixa de 10 ± 3 mm.

No caso dos prismas tipo B, a execução foi controlada por um gabarito especialmente projetado para esta finalidade (foto 4.3).

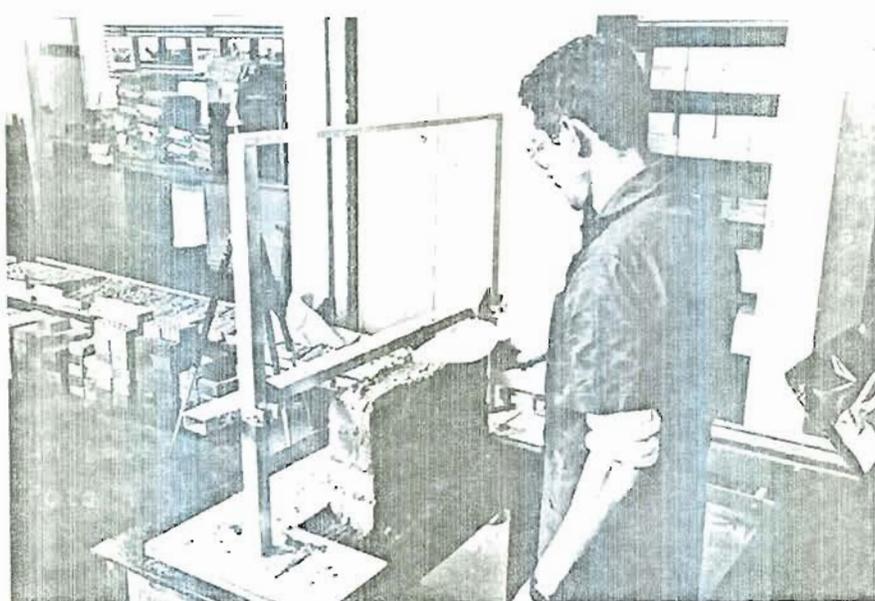


FOTO 4.3 - Confeção dos prismas tipo B.

O gabarito controlava simultaneamente o prumo dos dois topos, de uma face lateral além do nível da superfície de cada nova fiada assentada, e espessura de junta.

O tempo de construção de um prisma girava em torno de 15 minutos para os tipos A e C e 30 minutos para o tipo B.

O capeamento da face superior era feito quando a argamassa de assentamento das unidades já tinha atingido resistência que permitisse o manuseio dos corpos-de-prova com certa segurança (aproximadamente 1 semana). Para o nivelamento do capeamento foram usadas, como guias, duas régua presas com grampos metálicos justapostas à última fiada do prisma. A argamassa era então espalhada e nivelada. O acabamento final era feito com uma placa de vidro para proporcionar uma superfície perfeitamente lisa.

4.2.4. Tempo e Condições de Cura

Os corpos-de-prova foram curados no laboratório sob sacos de polietileno, de modo a evitar a perda de umidade. O tempo de cura foi de 28 dias.

4.2.5. Resistência à Compressão

Devido a não existência no laboratório de uma prensa única com capacidade e sensibilidade para romper todos os prismas confeccionados, foi necessário utilizar mais de um equipamento no ensaio dos corpos-de-prova.

Utilizou-se uma prensa hidráulica de comando elétrico com capacidade de 60 toneladas e subdivisões de 600 kgf para romper os prismas de menor resistência (foto 4.4).

Para os demais, foi usada uma prensa de comando manual com capacidade de 200 toneladas cujo manômetro possuía uma escala com 45 subdivisões.

A velocidade de carregamento foi controlada dentro de uma faixa de 0,5 a 1 tonelada/s.

A tabela 4.11 apresenta os valores das resistências dos prismas ensaiados.

O mecanismo típico de ruptura dos corpos-de-prova ensaiados (tração em planos paralelos à direção de aplicação de carga) pode ser visualizado na foto 4.5.

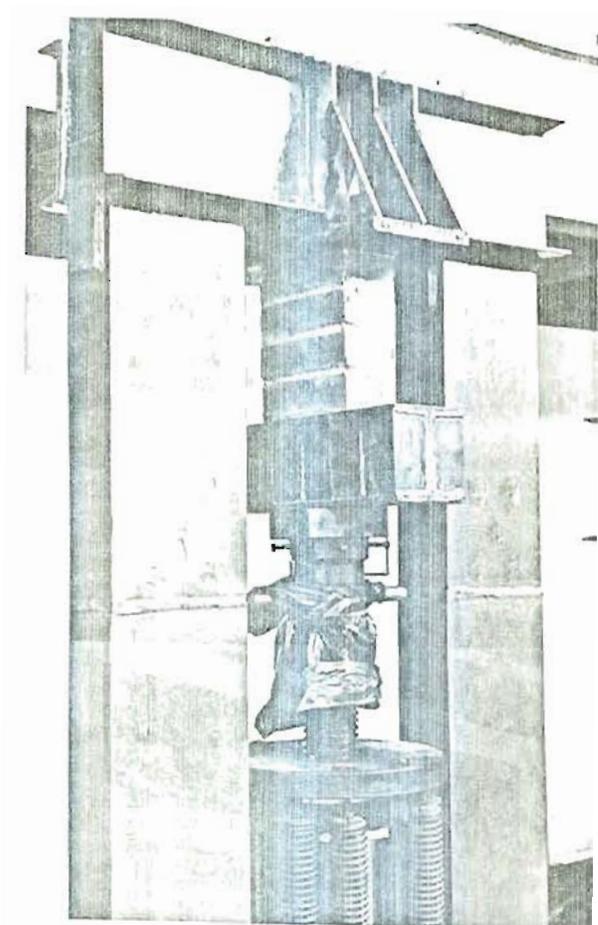


FOTO 4.4 - Ensaio de ruptura de um prisma tipo C.

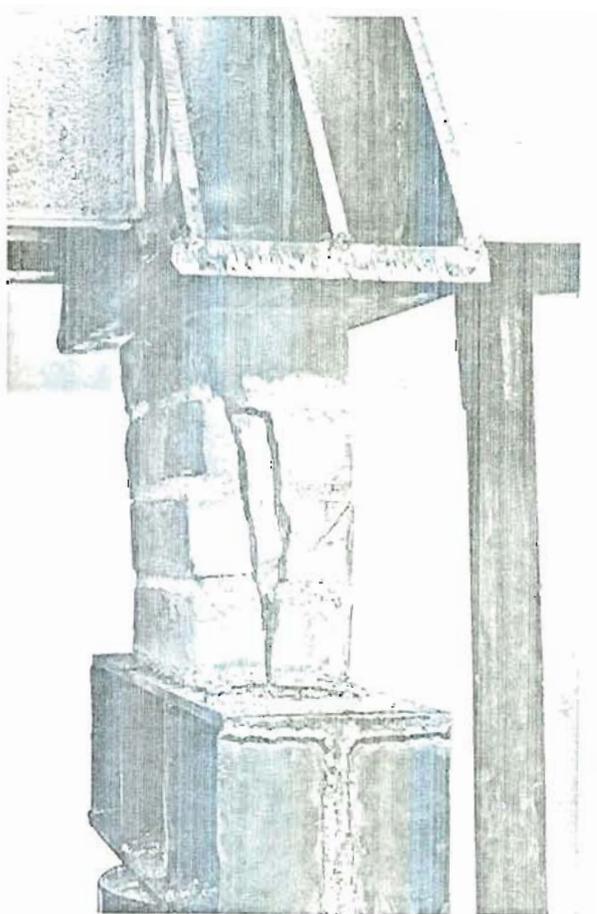


FOTO 4.5 - Modo de ruptura típico apresentado pelos prismas ensaiados.

TABELA 4.11 - Resistência à compressão dos prismas (MPa).

c.p. n.º	Procedência das amostras														
	1			2			3			4			5		
	Tipo			Tipo			Tipo			Tipo			Tipo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
h/t média	3,1	4,3	2,5	2,7	3,8	2,2	2,9	4,0	2,3	2,9	4,0	2,3	2,9	4,0	2,3
1	20,11	17,50	22,25	7,27	6,95	6,98	8,38	8,72	6,61	18,30	19,81	12,68	22,60	13,47	19,96
2	18,78	21,29	24,04	6,19	7,07	7,91	6,88	9,18	9,56	13,98	16,35	18,01	14,55	13,40	16,20
3	17,63	18,67	17,95	6,29	7,31	10,10	9,55	8,16	10,57	16,00	17,25	16,57	15,36	24,43	22,19
4	21,35	25,27	24,67	6,14	8,37	10,11	10,58	7,83	6,88	23,55	16,71	15,91	17,38	18,87	23,54
5	22,60	18,84	16,68	7,69	7,20	6,54	8,98	7,65	7,88	16,67	19,65	19,46	19,63	19,09	21,87
6	26,04	21,65	27,71	10,49	7,90	6,76	9,88	7,89	10,81	23,89	13,76	17,04	14,61	20,67	22,35
7	19,02	22,27	21,67				11,00			19,22	16,71	14,41		19,44	
8	24,11	18,27	20,58							13,49		13,48		19,02	
\bar{x}	21,21	20,47	21,94	7,35	7,47	8,09	9,32	8,24	8,72	18,14	17,18	15,95	17,36	18,55	21,02
s	2,89	2,62	3,60	1,67	0,55	1,63	1,40	0,59	1,85	3,95	2,08	2,31	3,22	3,64	2,63
c.v.	13,62%	12,78%	16,41%	22,71%	7,39%	20,12%	15,00%	7,20%	21,17%	21,77%	12,08%	14,48%	18,59%	19,63%	12,51%

4.3. Paredes

4.3.1. Número de Corpos-de-Prova

Em função do tipo de equipamento existente no laboratório para o rompimento de paredes, que será melhor detalhado no item 4.3.5, a execução de um programa de ensaios que utilizasse todos os tipos de tijolos disponíveis seria extremamente prolongada. Esta morosidade estaria também ligada ao fato de os corpos-de-prova serem indelocáveis, ou seja, precisarem ser construídos no local onde posteriormente seriam ensaiados. Esta limitação, aliada ao fato de que todos os prismas e paredes seriam construídos por um mesmo pedreiro, fez com que se restringisse o número de paredes a serem construídas.

Decidiu-se, então, ensaiar paredes confeccionadas apenas com os tijolos cujas resistências à compressão diferissem significativamente. Através de um teste estatístico de comparação de médias, concluiu-se que as resistências dos tijolos 2 e 3 não apresentavam uma diferença significativa (ver item 1.3.3 do Anexo). Devido a isto e, em função do número de unidades existentes em cada lote, os tijolos escolhidos foram os do tipo 1, 3, 4 e 5. Com cada um destes, foram construídas 3 paredes perfazendo um total de 12 corpos-de-prova, número esse considerado como suficiente para o estudo estatístico das correlações com prismas e tijolos.

A ordem de construção das paredes não obedeceu a nenhuma seqüência lógica que pudesse ser expressa por uma função matemática. Apenas teve-se a preocupação de aleatorizar, dentro do possível, esta ordem para que os resultados obtidos não sofressem a influência sistemática de certos fatores como clima e especialização da mão-de-obra.

4.3.2. Geometria e Padrão de Assentamento

A maioria das normas estrangeiras que regulamentam os ensaios de compressão de paredes, tais como a BS-5628²⁵ e a ASTM E 72-74a² como também o Projeto de Norma Brasileira 2:03-04-012¹⁰ estabelecem que os corpos-de-prova devem possuir o padrão de assentamento igual àquele que será utilizado na edificação projetada e dimensões mínimas de 1,20m de largura por 2,60m de altura.

Nos ensaios realizados procurou-se seguir estas prescrições dentro dos limites impostos pelos equipamentos disponíveis.

Sendo assim, fixou-se que as paredes construídas com os tijolos de mais baixa resistência (tipos 3 e 4) teriam suas fiadas constituídas por 5 tijolos. Com isto, a medida da largura ficou variável em função do tipo de tijolo utilizado, situando-se em torno de 1,20m.

As paredes confeccionadas com os tijolos de maior resistência (tipos 1 e 5) não puderam ter a mesma largura devido à capacidade de carga do equipamento (150t). Adotou-se, então, uma largura equivalente a 3 1/2 tijolos para o tipo 5 e 3 tijolos para o tipo 1, o que correspondeu, em média a 82 e 70 cm, respectivamente.

Apesar de ser este valor menor do que aquele sugerido pelas normas supracitadas, acredita-se que os resultados obtidos nos ensaios não ficaram prejudicados, baseando-se em considerações feitas nestas próprias normas. A BS-5628²⁵ por exemplo, cita que elementos de alvenaria que possuam uma relação largura/espessura inferiores a 4 devem ser calculados como pilares. A partir deste valor, estes elementos passam a ser considerados paredes em termos de comportamento estrutural. Já que as paredes citadas ficaram com uma relação largura/espessura de aproximadamente 7 a 8, supõe-se que os valores de resistência determinados (ver tabela 4.12) são perfeitamente aceitáveis.

4.3.3. Confecção e Capeamento

Na confecção dos corpos-de-prova, tanto o traço quanto os cuidados na produção da argamassa de assentamento, foram os mesmos que os descritos nos itens 4.1.3.1 e 4.2.3.1.

Todas as paredes ensaiadas foram construídas sobre bases metálicas suficientemente rígidas, apoiadas na viga inferior de um pórtico de reação segundo direções ortogonais ao seu eixo (foto 4.6).

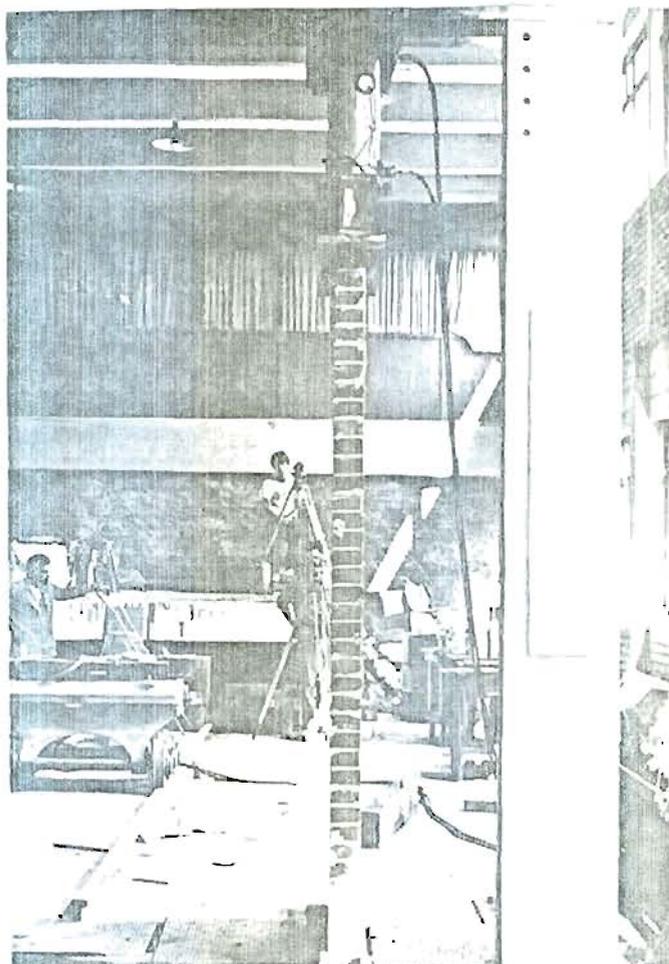


FOTO 4.6 - Vista geral do ensaio de compressão de uma parede.

A construção de cada corpo-de-prova era iniciada com o espalhamento de uma argamassa de cimento e areia, de mesma composição que aquela utilizada no capeamento dos prismas (ver item 4.2.3.2), sobre uma das bases metálicas. A seguir, era assentada a primeira fiada de tal forma que ficasse perfei

tamente centrada em relação ao eixo do pórtico. Os tijolos, a exemplo dos prismas, eram molhados previamente.

Com o auxílio de sargentos eram fixadas duas régua de madeira nas abas inferiores dos perfis da viga superior do pórtico de onde partiam linhas de controle do prumo das faces laterais e de topo da parede (foto 4.7). O ajuste da verticalidade das linhas era feito com o auxílio de um fio-de-prumo.

Na construção de cada nova fiada primeiramente eram assentados os tijolos de extremidade. Ao assentá-los, era observada a espessura da junta (aproximadamente 1 cm) e a sua tangência às linhas de prumo. A horizontalidade da fiada era verificada apoiando-se uma régua de alumínio sobre estas unidades e, sobre ela, um nível de bolha. Esta verificação era feita normalmente a cada 5 fiadas. Já para o seu alinhamento era utilizado um dispositivo composto de duas pequenas cantoneiras de madeira unidas por um fio de nylon. A foto 4.7 mostra este dispositivo em utilização.

Devido à grande instabilidade das paredes, notadamente no seu período de construção, a confecção era dividida em etapas. Outro fator que contribuiu para esta divisão foi a deformação excessiva que ocorria nas juntas inferiores quando eram assentadas sucessivamente um grande número de fiadas. Fixou-se em 3 o número de etapas. O intervalo entre elas era de aproximadamente 4 horas (manhã para a tarde) ou 16 horas (tarde para a manhã seguinte).

Após a confecção, executava-se o capeamento da face superior. O procedimento e argamassa utilizados neste processo foram os mesmos adotados para os prismas (ver item 4.2.3.2).



FOTO 4.7 - Confeção de uma parede para o ensaio de resistência à compressão.

4.3.4. Tempo e Condições de Cura

Os corpos-de-prova foram curados ao ar no laboratório por um período de 28 dias contados a partir da data de término da construção, ficando, desta forma, sujeitos às variações higrotérmicas do ambiente.

4.3.5. Resistência à Compressão

O equipamento utilizado para romper as paredes pode ser visto na foto 4.8.

Sobre a parede era colocado um perfil metálico de grande rigidez para que a carga imposta pelo macaco se distribuisse uniformemente por toda a superfície.

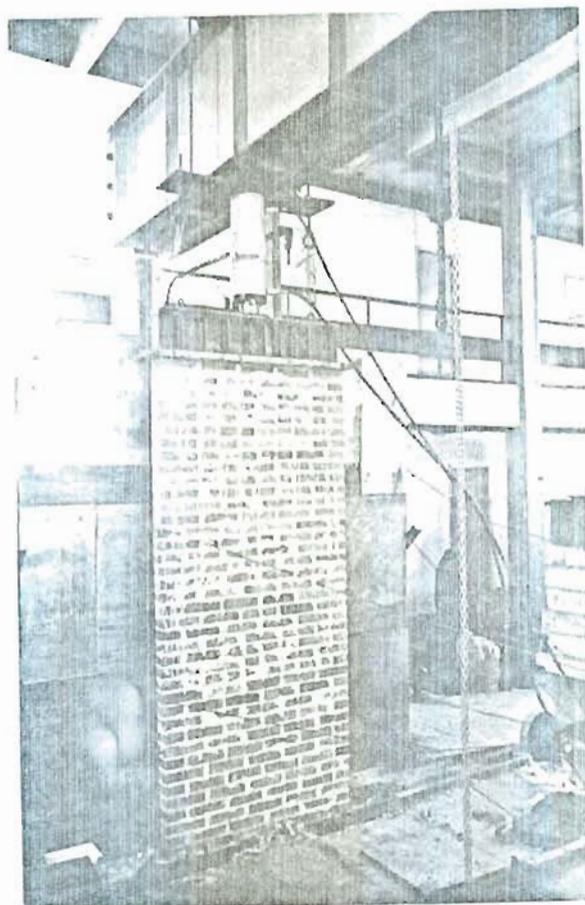


FOTO 4.8 - Detalhe do p ó rtico de rea c o ~ e equipamento utilizado no rompimento das paredes.

O macaco que foi utilizado nos ensaios possui uma capacidade de 150 toneladas, que tamb e m e a carga m a xima admiss i vel pelo p ó rtico de rea c o ~ . O seu acionamento e manual e o valor da carga aplicada controlado pela leitura da press ~ o de o leo num man o metro. Cada subdivis ~ o do man o metro corresponde a uma varia c o de carga em torno de 4 toneladas.

Por meio de um teodolito era controlada a loca c o tanto do perfil quanto do macaco para que ficasse eliminada uma poss i vel excentricidade inicial da carga atuante. Era tamb e m usado para verificar de uma forma mais precisa o prumo da parede a ser ensaiada. Com o mesmo equipamento e com o aux i lio de r e guas graduadas, colocadas nos pontos central e superior de uma das faces de topo da parede, eram controlados os seus deslocamentos horizontais. A aplica c o de carga era feita em est a gios. Cada um destes correspondia a aproximadamente

1/10 da carga de ruptura estimada e a sua duração de 1 a 2 minutos.

Devido ao alto risco de acidentes e de danificação dos aparelhos quando da ruptura das paredes, estabeleceu-se que seria considerado encerrado o ensaio quando houvesse uma queda acentuada na pressão do óleo ou quando as deflexões laterais aumentassem muito rapidamente sem que houvesse um acréscimo da carga aplicada.

Algumas das paredes foram levadas à ruptura. As fotos 4.9 e 4.10 mostram uma delas. Nota-se claramente que ocorreu um deslocamento considerável do topo da parede e o posterior colapso por flambagem.

Na foto 4.11 está retratado um corpo-de-prova cujo ensaio foi interrompido antes da ruptura. Pode-se observar fissuras verticais originadas por esforços de tração que representam o mecanismo típico de ruptura das alvenarias.

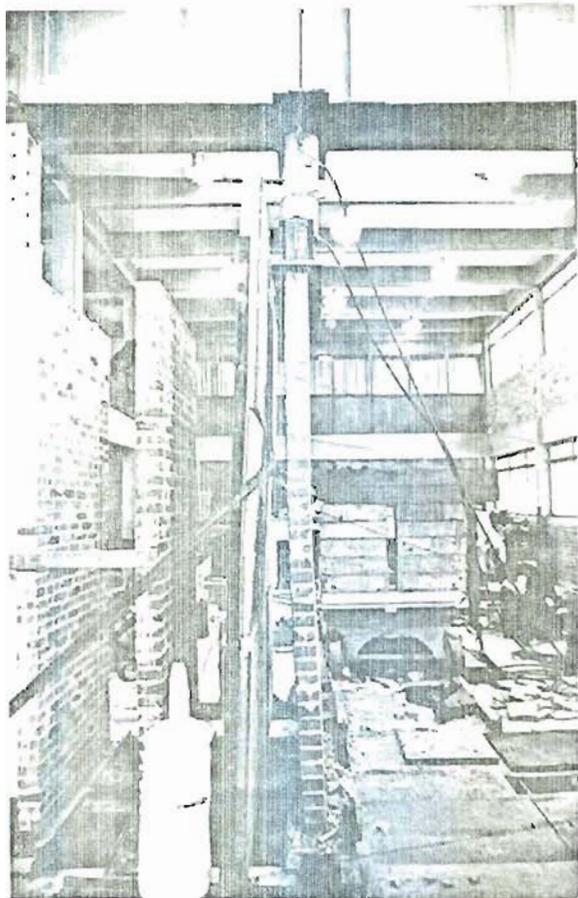


FOTO 4.9 - Flambagem de um corpo-de-prova de parede.

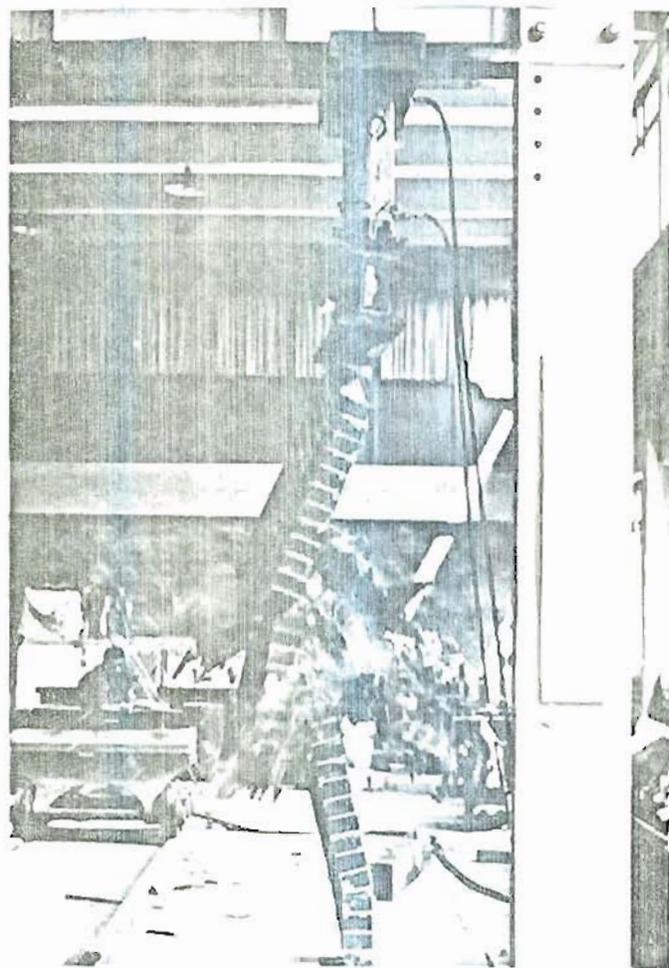


FOTO 4.10 - Colapso de um corpo-de-prova de parede (ruptura por flambagem).

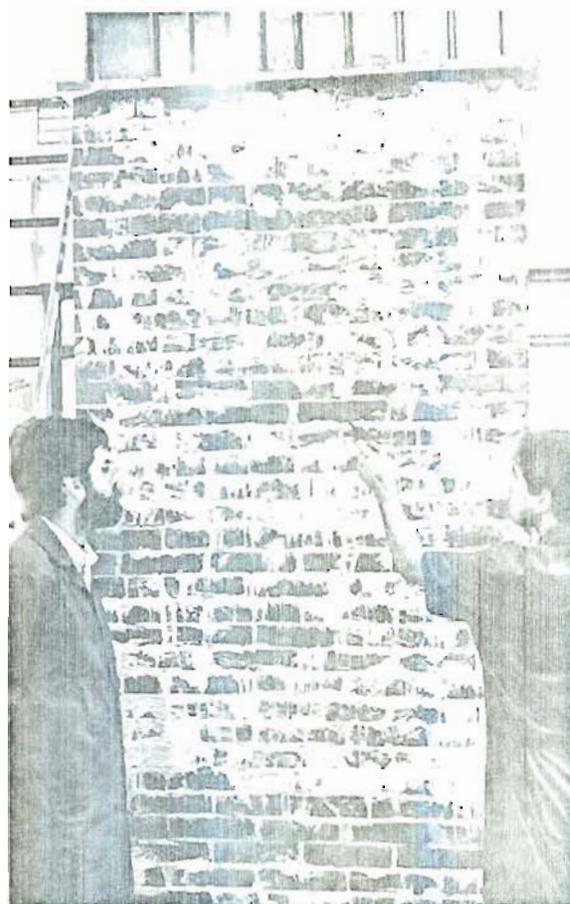


FOTO 4.11 - Ensaio de parede. Fissuras verticais originadas por esforços de tração (mecanismo típico de ruptura das alvenarias).

A tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

TABELA 4.12 - Resistência à compressão das paredes (MPa).

Corpo de prova nº	Procedência dos tijolos			
	1	3	4	5
1	12,21	5,66	7,67	12,71
2	12,98	4,84	6,53	12,22
3	11,97	4,53	7,96	11,81
\bar{X}	12,40	5,01	7,39	12,25
S	0,53	0,58	0,76	0,45
C.V.%	4,26	11,65	10,23	3,68

5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com o objetivo de melhor avaliar os resultados obtidos nos ensaios, bem como aqueles originados dos estudos de comparação de médias e regressões, foram utilizados procedimentos estatísticos.

O nível de significância empregado em todas as análises realizadas foi de 95%.

5.1. Resistência à Compressão dos Tijolos

Os resultados obtidos com o uso do Programa Computacional STATBAS (ver Anexo 1.5.1) para a análise das resistências dos cinco tipos de tijolos utilizados estão reproduzidos na tabela 5.1.

Para uma melhor compreensão do significado dos valores apresentados nesta tabela, fêz-se uma breve descrição dos parâmetros que a integram:

<u>Coluna</u>	<u>Descrição</u>
1	Designação da olaria
2	Tamanho da amostra
3	Resistência à compressão média, em MPa
4	Desvio-padrão, em MPa
5	Coefficiente de variação, em %
6-7	Coefficiente de assimetria. A tabela fornece, além do valor calculado, a probabilidade de que não exista uma assimetria significativa na distribuição

<u>Coluna</u>	<u>Descrição</u>
8-9	Coefficiente de curtose. É apresentado o valor do coeficiente e a probabilidade de que a distribuição não possua, nem uma altura acentuada ou um achatamento significativo.
10	Valor mínimo observado, em MPa.
11	Valor máximo observado, em MPa.
12-13	Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov. A tabela fornece o valor calculado da distância máxima DM e a probabilidade $Pr(D > DM)$. Se esta probabilidade é menor que 0,05 a hipótese da normalidade é rejeitada. Notar que o valor máximo da <u>do</u> pela tabela é 0,20, isto é, se $Pr(D > DM) \geq 0,20$, o valor de DM pode ser considerado significativamente pequeno e a hipótese da normalidade não pode ser rejeitada.
14-15	Resultado do teste de Wilk-Shapiro. A tabela fornece o valor calculado de $w.s$ e a probabilidade $Pr(w < w.s)$. Se esta probabilidade for inferior a 0.05, a hipótese de normalidade deve ser rejeitada. Notar, também, que o valor máximo dado pela tabela é 0,50 que é um valor que já indica uma probabilidade bastante grande de que não se pode rejeitar a hipótese de normalidade.
16	Valor extremo espúrio. Indica se um dos valores extremos da amostra deveria ser rejeitado sob a hipótese que a distribuição analisada seja normal.

TABELA 5.1 - Análise estatística básica - Programa STATBAS

Tijolos - Resistência à compressão															
Olaria	Parâmetros										Teste de normalidade				Valor extremo espúrio
	N	\bar{X}	S	C.V.	Assimetria		Curtose		Valor mínimo	Valor máximo	K-S		W-S		
					g_1	p	A	p			DM	p	w.s	p	
1	15	69,89	14,57	20,84	0,5035	> 0.05	0,8291	> 0.05	46,50	96,60	0,1911	0,11	0,9271	0,235	Não
2	14*	15,31	2,126	13,88	0,2642	> 0.05	0,8465	> 0.05	12,10	19,50	0,1333	> 0,20	0,9771	> 0,500	Não
3	15	18,17	2,433	13,39	-0,039	> 0.05	0,8814	> 0.05	13,60	22,60	0,996	> 0,20	0,9871	> 0,500	Não
4	15	32,17	3,466	10,77	-0,108	> 0.05	0,8124	> 0.05	24,80	38,00	0,1058	> 0,20	0,9663	> 0,500	Não
5	15	48,09	14,24	29,62	1,120	< 0.05	0,7990	> 0.05	31,70	78,10	0,2470	0,02	0,8499	0,02	Não
Observação		* O número de amostras ensaiadas da olaria 2 foi 15. Fazendo-se um teste para a eliminação de valor extremo espúrio, um valor foi rejeitado (ver tabela 4.4). Posteriormente rodou-se o programa STATBAS sem o referido valor.													

Os resultados mostrados na tabela 5.1 revelam que:

a) Existe uma grande variabilidade entre as médias e os desvios-padrões das amostras.

b) As amostras referentes às olarias 1, 2, 3 e 4 não apresentaram assimetria ou curtose significativa.

c) A amostra referente à olaria 5 apresentou uma distribuição ligeiramente assimétrica à direita, não possuindo uma curtose significativa.

d) Os testes de normalidade indicam que a hipótese de que as distribuições sejam normais deve ser rejeitada apenas para o caso da olaria 5.

Apesar de a amostra referente à olaria 5 ter sido rejeitada nos testes de normalidade, isto não significa que não se possa utilizar a distribuição normal numa análise estatística de suas médias. Existe um importante teorema chamado de "limite central" que, de forma muito simplificada, diz que "qualquer que seja a distribuição da amostra X , com uma única condição de que a variância seja finita, a média \bar{X} de uma amostra aleatória de tamanho n tende a uma distribuição normal quando n tende ao infinito"

Desta maneira, quando n é suficientemente grande:

$$\bar{X} \sim N(\mu, \sigma/\sqrt{n})$$

O símbolo \sim indicando "aproximadamente".

Na prática n é considerado suficientemente grande quando maior que 30. Para algumas distribuições de X , como a retangular, ou a uniforme, a amostra com $n=10$ é suficiente para ser considerada grande. A exceção seria o caso de distribuições muito assimétricas para as quais a convergência é lenta.

Em conclusão, pode-se afirmar que a distribuição normal poderia ser utilizada na análise das resistências médias e desvios-padrões de todas as amostras estudadas.

5.2. Comparação de Médias e Componentes de Variação dos Diferentes Tipos de Prismas Utilizados

Para verificar a existência de uma diferença significativa entre as resistências obtidas nos ensaios dos diferentes tipos de prismas estudados, as médias e os desvios-padrões foram analisados utilizando-se o modelo indicado no Anexo 1.3 e o programa computacional COMPMVAR.

Como foram construídos 3 tipos de prismas para cada tipo de tijolo disponível, foram feitas, individualmente, 5 comparações. Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 5.2.

Para um melhor entendimento do significado dos valores fornecidos pela tabela 5.2, fez-se uma breve descrição dos parâmetros que a integram.

<u>Coluna</u>	<u>Descrição</u>
1	Tipo de tijolo com que foram construídos os prismas
2	Tipo do prisma
3	Tamanho da amostra
4	Resistência à compressão média, em MPa
5	Desvio-padrão, em MPa
6	Coefficiente de variação, em %
7-8	Resultado do teste de Bartlett. A tabela fornece o valor calculado de B e o valor de χ^2 com K-1 graus de liberdade, onde K é o número de médias comparadas, e a um nível de significância de 0.05 ($\chi^2_{0.05}(2)$). Se $B < \chi^2_{0.05}(2)$, diz-se que não existe diferença significativa entre os desvios-padrões dos grupos analisados. Se $B > \chi^2_{0.05}(2)$, a hipótese deve ser rejeitada.

<u>Coluna</u>	<u>Descrição</u>
9-10-11-12	Resultados fornecidos pela tabela ANOVA do programa COMPVAR. Estão apresentados os valores das médias quadráticas entre grupos e dentro dos grupos. O valor calculado de F e o correspondente a um nível de significância de 5% ($F_{0,05}$) são também fornecidos. Se $F < F_{0,05}$, conclui-se que não existe uma diferença significativa entre as médias analisadas. O oposto conduz a uma rejeição desta hipótese (ver Anexo 1.3).
13-14-15	Componentes de variância. São dados os valores das variâncias entre grupos, dentro dos grupos e total.
16-17-18	Análise de resíduos. São apresentados os valores de DM do teste de Kolmogorov-Smirnov e da probabilidade p de que não se possa rejeitar a hipótese de normalidade da distribuição originada da combinação dos resíduos. Também é fornecido o resultado de uma inspeção visual que é feita para verificar se a dispersão dos resíduos com relação a cada média é aproximadamente constante. Valor extremo espúrio. É dado se existe ou não um valor extremo espúrio (ver Anexo 1.1).

19

Os resultados mostrados na tabela 5.2 revelam que:

- a) Para todos os casos analisados não foi encontrada uma diferença significativa entre os desvios-padrões.

b) O valor de F, para as cinco situações analisadas, esteve abaixo do valor de $F_{0.05}$ o que indica que não existe uma diferença significativa entre as médias.

c) A parcela correspondente à variância entre grupos foi bastante pequena em relação à variância total inclusive sendo desprezível para os casos 1 e 2.

d) A hipótese de que a distribuição dos resíduos agrupados seja normal não pode ser rejeitada.

Em síntese, pode-se afirmar, com bastante confiança, que não existe uma diferença significativa entre as resistências à compressão fornecidas por qualquer um dos tipos de prismas utilizados.

Esta afirmativa está, de certa forma, respaldada nos resultados obtidos por MAURENBRECHER³⁹ no Canadá. Lá, foram executados, entre outros, estudos comparativos entre as resistências de prismas com diferentes alturas e padrões de assentamento. O referido autor concluiu que a influência da razão altura-espessura na resistência dos prismas é pouco significativa e que os fatores de correção (ver item 3.2.1) não são necessários em muitos casos. Afirma também que prismas mais curtos deveriam ser padronizados (no Canadá, o prisma-padrão tem um $h/t = 5$ para o caso de alvenaria de tijolos).

Quanto ao padrão-de-assentamento, concluiu que os prismas contrafiados são ligeiramente menos resistentes que os não-contrafiados.

A sua análise e conclusões foram baseadas em resultados da resistência de diversos tipos de prismas construídos com apenas 2 tipos de tijolos (um com resistência média de 33 MPa e outro de 114 MPa).

Utilizando a mesma metodologia empregada no presente trabalho, analisou-se os dados obtidos por MAURENBRECHER. Verificou-se que não havia uma diferença significativa entre a resistência de prismas com relações h/t variando de 2,8 a 5,0.

TABELA 5.2 - Comparação de médias e variâncias - Programa COMPAR.

Prismas - Resistência à compressão																		
Tipo do tijolo	Tipo do prisma	Parâmetros				Homogeneidade das variâncias		ANOVA				Componentes da variância			Análise de resíduos			Valores espúrios
		n	\bar{X}	S	C.V.	B	$\chi^2_{0.05}$	MQ	MQ	F		Entre	Dentro	Total	Norm. (K - S)		Res. x \bar{x}_i	
								Entre	Dentro	Calculado	F _{0.05}				DM	p		
1	A	8	21,21	2,889	13,6	0,7761	5,991	4,3439	9,3849	0,46	3,47	0,0000	9,3849	9,3849	0,0980	> 0,20	O.K.	Não
	B	8	20,47	2,616	12,8													
	C	8	21,94	3,601	16,4													
2	A	6	7,345	1,668	22,7	5,787	5,991	0,89561	1,9328	0,46	3,68	0,0000	1,9328	1,9328	0,1882	0,09	O.K.	Não
	B	6	7,467	0,5520	7,4													
	C	6	8,067	1,646	20,4													
3	A	7	9,321	1,398	15,0	5,465	5,991	1,9169	1,9080	1,00	3,63	0,0014	1,9080	1,9094	0,0899	> 0,20	O.K.	Não
	B	6	8,238	0,5931	7,2													
	C	6	8,718	1,846	21,2													
4	A	8	18,14	3,950	21,8	3,3978	5,991	9,6591	8,6172	1,12	3,49	0,1362	8,6172	8,7533	0,0937	> 0,20	O.K.	Não
	B	7	17,18	2,076	12,1													
	C	8	15,95	2,309	14,5													
5	A	6	17,36	3,227	18,6	0,5931	5,991	21,114	10,554	2,00	3,59	1,6000	10,5541	12,1541	0,1531	> 0,20	O.K.	Não
	B	8	18,55	3,641	19,6													
	C	6	21,02	2,629	12,5													

Quanto à influência do padrão de assentamento, constatou-se que, para prismas construídos com os tijolos de mais alta resistência, não havia uma diferença significativa entre as resistências observadas. Entretanto, para os prismas confeccionados com o outro tipo de tijolo, a probabilidade de que não se possa rejeitar a hipótese levantada é muito pequena.

Em função das conclusões extraídas das análises realizadas, resolveu-se confeccionar uma nova série de prismas, somente do tipo C, de uma forma muito mais controlada e criteriosa que as anteriores, valendo-se da especialização e aprendizagem adquirida pela mão-de-obra. Além disso, decidiu-se ensaiar todos os prismas num só tipo de prensa (a mesma utilizada para romper os tijolos) para que o estudo das correlações com as resistências de tijolos e paredes não ficasse prejudicado por uma possível influência dos diversos tipos de equipamentos até então utilizados (ver item 4.2.5).

Os resultados destes ensaios encontram-se sintetizados na tabela 5.3. Estes novos prismas foram denominados "Prismas C*".

TABELA 5.3 - Resistência à compressão dos prismas C* (MPa).

Nº do C.P.	h/t médio	Tipo de tijolo				
		1	2	3	4	5
		2,5	2,2	2,3	2,3	2,3
1		27,57	11,03	13,08	21,65	26,47
2		24,45	11,46	12,71	20,40	30,99
3		29,40	11,03	12,66	19,95	25,11
4		27,66	10,35	13,02	20,93	23,66
5		36,13	11,20	12,15	21,68	19,01
6		31,65	9,23	9,88	21,46	37,43
7		35,96	12,08	12,33	23,34	27,15
8		30,34	9,86	10,53	17,46*	29,72
9		33,11	10,97	12,79	21,57	28,77
10		32,41	9,41	12,64	23,05	29,95
\bar{X}		30,87	10,66	12,18	21,56	27,83
S		3,75	0,92	1,09	1,104	4,90
C.V.		12,14	8,66	8,93	5,12	17,61
Obs.:		* O valor com "*" foi considerado espúrio (ver Anexo 1.1), e, portanto, não foi utilizado no cálculo de \bar{X} e S.				

5.3. Correlação entre a Resistência de Prismas e Resistência Média dos Tijolos

Com o objetivo de se estabelecer uma função matemática entre as variáveis em questão, foram plotados os valores da resistência à compressão dos prismas (y) em função da resistência média dos tijolos (x). Baseando-se no aspecto visual das disposições de tais pontos, foi escolhida a equação teórica da curva de ajustamento:

$$y = a \cdot x^b \quad (5.3.1)$$

Definida a equação, utilizou-se o programa REGSIMPLES (ver Anexo 1.5.3) para a determinação dos coeficientes "a" e "b" bem como para a análise de vários outros parâmetros por ele fornecidos.

Os resultados referentes às correlações das resistências dos prismas A, B e C estão sintetizados na tabela 5.4.

Os resultados referentes ao Prisma C* estão na tabela 5.5. Resolveu-se analisar em separado os dados referentes ao prisma C* por terem sido gerados em ensaios executados posteriormente aos prismas A, B e C e em condições especiais (ver item 5.2).

As curvas ajustadas, e as curvas que delimitam os intervalos de confiança para a previsão de valores médios e individuais estão representadas nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Fazendo-se uma análise dos valores apresentados na tabela 5.4 conclui-se que:

a) Existe uma relação bastante significativa entre as variáveis em questão, para qualquer um dos tipos de prisma empregados ($t_b > t_{.025} (n-2)$).

TABELA 5.4 - Correlação entre a resistência de prismas e tijolos.

Equação proposta:	Equação transformada:		
$y = a x^b$	$\ln (y) = a' + b x \ln (x)$ $a' = \ln a$		
Parâmetros	Tipo do prisma		
	A	B	C
Nº de pontos: (n)	35	33	34
Intersecção com o eixo y: (a')	0,28908	0,20871	0,15724
Inclinação: (b)	0,67173	0,68583	0,71472
Desvio-padrão da estimativa: (σ_e)	0,22826	0,19247	0,19518
Desvio-padrão da inclinação: (σ_b)	0,06782	0,05795	0,05876
Desvio-padrão da intersecção: (σ_a)	0,23839	0,20519	0,20795
Índice t para b: (tb)	9,92485	11,83529	12,16289
$t_{.025} (n-2)$	1,960	1,960	1,960
Índice t para a: (ta)	1,21263	1,017156	0,75010
Coefficiente de correlação: (r)	0,86548	0,90487	0,90673
Limite inferior de confiança: 95%	0,74795	0,81462	0,81999
Limite superior de confiança: 95%	0,93039	0,95234	0,95276
Coefficiente de (r^2) Determinação %	74,90546	81,87920	82,21590
Prova de Kolmogorov-Smirnov: (DM)	0,0883	0,1059	0,1560
$D_{.05} (n)$	0,150	0,154	0,152
Prova de Wilk-Shapiro: (w)	0,9542	0,9565	0,9624
Probabilidade p ($w \leq W$)	0,153	0,201	0,271
Valores espúrios	Não	Não	Não
Coef. de variação médio da previsão - (valor médio) %	2,09	1,84	1,80
Coef. de variação médio da previsão - (valor individual) %	9,14	7,80	7,76

b) Os coeficientes de correlação, para as três colunas, se aproximam de "1" e os intervalos de confiança para a estimativa de r são bastante pequenos, o que reforça a afirmativa a.

c) As provas de Kolmogorov-Smirnov e Wilk-Shapiro indicam que a distribuição dos pontos em torno da curva ajustada tende a ser normal, para os três casos.

d) Os coeficientes de variação médios para a previsão tanto de um valor médio quanto de um valor individual são baixos (aproximadamente 2% para valores médios e 8% para valores individuais).

e) A configuração das curvas encontradas para os prismas A, B e C são bastante semelhantes o que confirma as conclusões extraídas do item 5.2 quanto a não existência de uma diferença significativa entre às resistências fornecidas pelos tipos de prismas estudados.

Existe teste estatístico de comparação de linhas de regressão disponível na bibliografia^{28, 34}. Não foi empregado no presente trabalho por se achar que o tipo de comparação feita foi suficiente para que se alcançasse os objetivos propostos.

Analisando-se os valores apresentados na tabela 5.5, tem-se que:

a) A equação ajustada seria:

$$y = 1,50286 \cdot x^{0,73211} \quad (5.3.2)$$

b) Existe uma relação muito significativa entre as variáveis em estudo, já que $t_b \gg t_{.025} (n-2)$ e r se aproxima bastante de 1.

c) A hipótese de normalidade da distribuição dos pontos em relação à curva ajustada não pode ser rejeitada.

TABELA 5.5 - Correlação entre a resistência de prismas C* e tijolos: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES

Parâmetros	Equação proposta: $y = a x^b$
	Equação transformada: $\ln(y) = a' + b \ln(x)$ $a' = \ln a$
Nº de pontos: (n)	49
Intersecção com o eixo y: (a')	0,40737
Inclinação: (b)	0,73211
Desvio-padrão da estimativa: (σ_e)	0,14104
Desvio-padrão da inclinação: (σ_b)	0,03486
Desvio-padrão da intersecção: (σ_a)	0,12171
Índice t para b: (t_b)	21,00183
$t_{.025} (n-2)$	1,960
Índice t para a: (t_a)	3,34691
Coefficiente de correlação: (r)	0,95063
Limite inferior de confiança: 95%	0,913675
Limite superior de confiança: 95%	0,97200
Coefficiente de determinação: (r^2) - %	90,37037
Prova de Kolmogorov-Smirnov (DM)	0,1183
$D_{.05} (n)$	0,1265
Prova de Wilk-Shapiro: (w)	0,9700
Probabilidade p ($w \leq W$)	0,225
Valores espúrios	Não
Coefficiente de variação médio da previsão - (valor médio) %	0,98
Coef. de variação médio da previsão - (valor individual) %	5,02

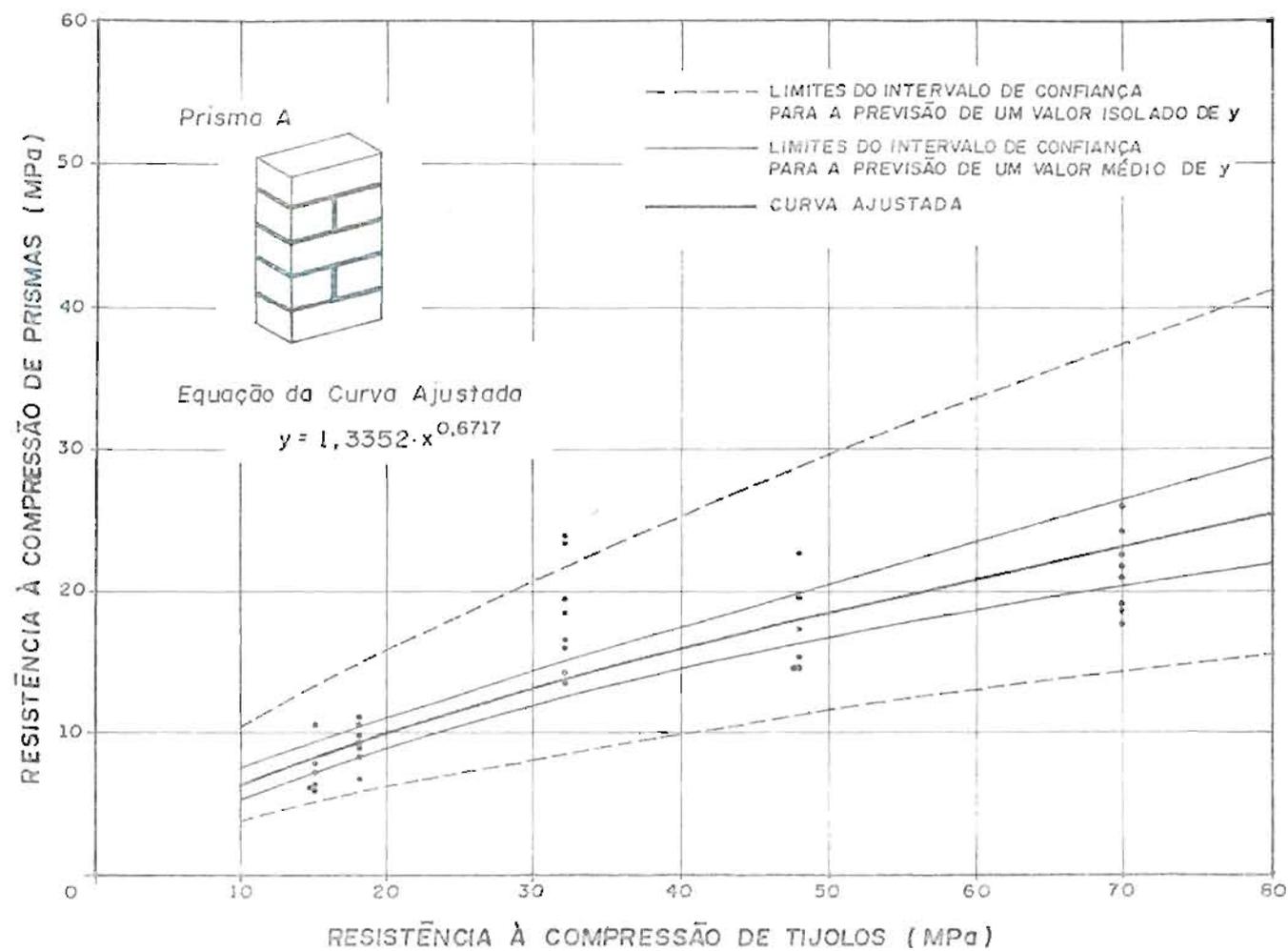


FIGURA 5.1 - Relação entre a resistência à compressão de prismas "A" e tijolos.

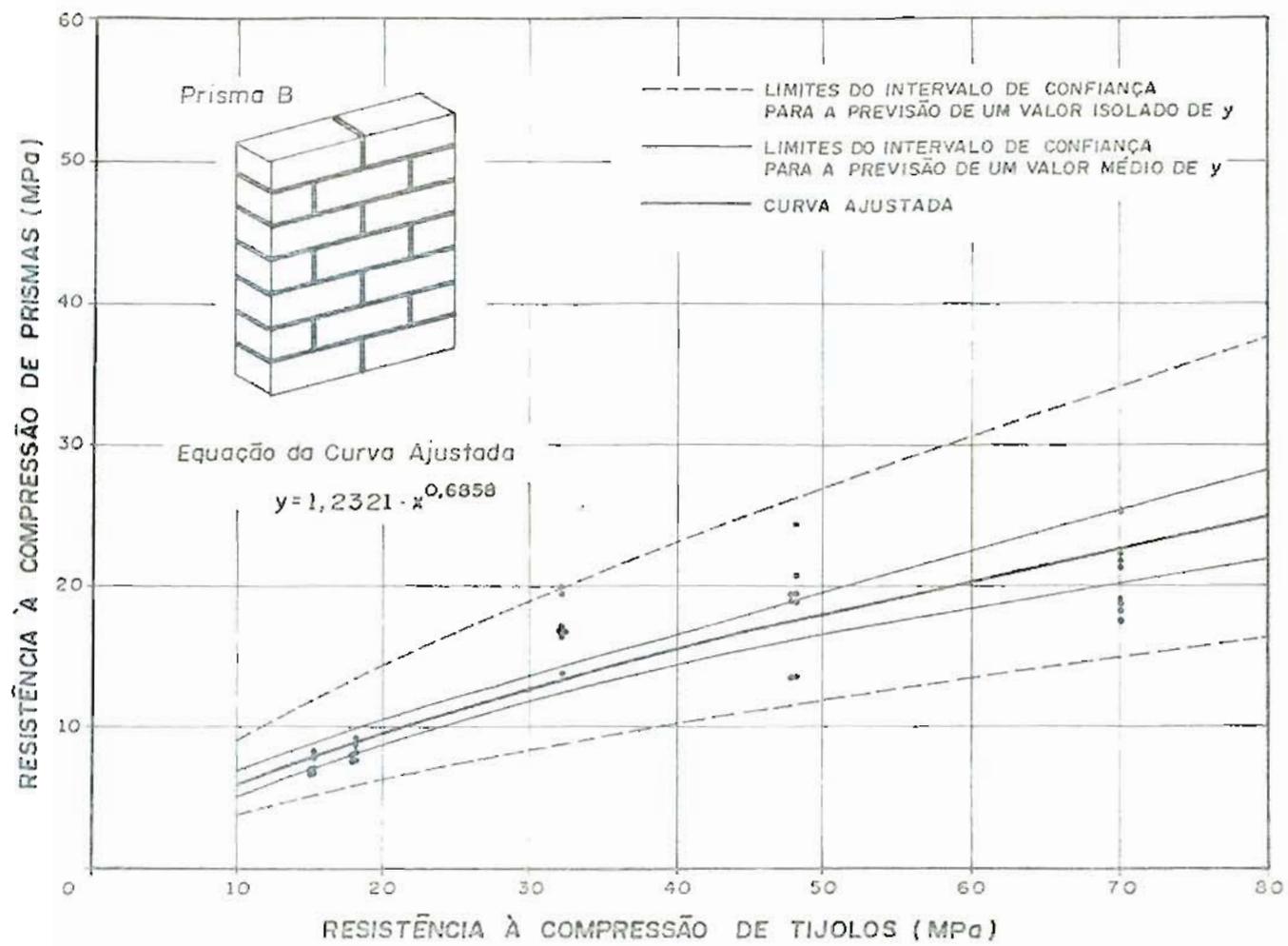


FIGURA 5.2 - Relação entre a resistência à compressão de prismas "B" e tijolos.

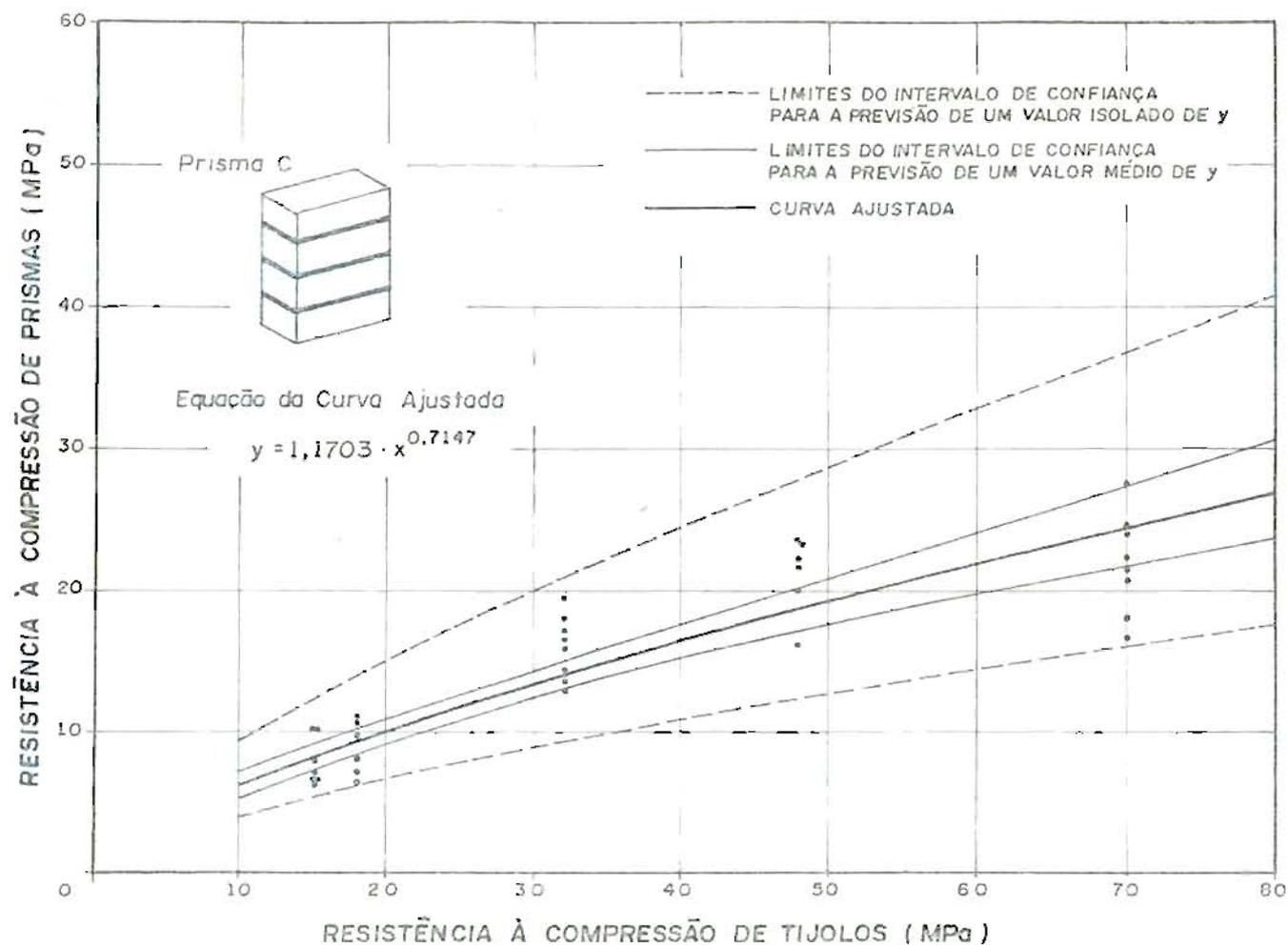


FIGURA 5.3 - Relação entre a resistência à compressão de prismas "C" e tijolos.

d) Os coeficientes de variação médios para as previsões de valores médios e individuais são bastante baixos (respectivamente 0,98 e 5,02%) o que demonstra uma boa precisão para estas previsões.

e) Os valores dos parâmetros a e b da curva diferenciaram-se de modo considerável daqueles observados para as curvas referentes aos prismas A, B e C. Isto demonstra a grande influência que a qualidade da mão-de-obra e o tipo de equipamento utilizado podem exercer nos resultados dos ensaios.

Fazendo-se um paralelo com o ensaio de corpos-de-prova de concreto, onde os procedimentos de ensaio são bastante rígidos e controlados, poder-se-ia concluir que a curva obtida para o prisma C* seria a mais indicada. Entretanto, esta afirmação só teria sentido se o tipo de equipamento utilizado para a ruptura dos corpos-de-prova desta série fosse o padronizado por uma norma específica sobre o assunto. Contudo, esta norma ainda não existe no Brasil.

Um outro tipo de equação também foi utilizada para a ajustagem dos pontos.

$$y = b_{(1)} (1 - e^{-b_{(2)} x}) \quad (5.3.3)$$

Para a determinação de $b_{(1)}$ e $b_{(2)}$ foi utilizado o programa computacional NONLINWOOD especialmente desenvolvido para o estudo de regressões não-lineares.

O programa, ainda em fase de implantação, não calcula todos os parâmetros fornecidos pelo programa REGSIMPLES. A tabela 5.6 apresenta os parâmetros calculados:

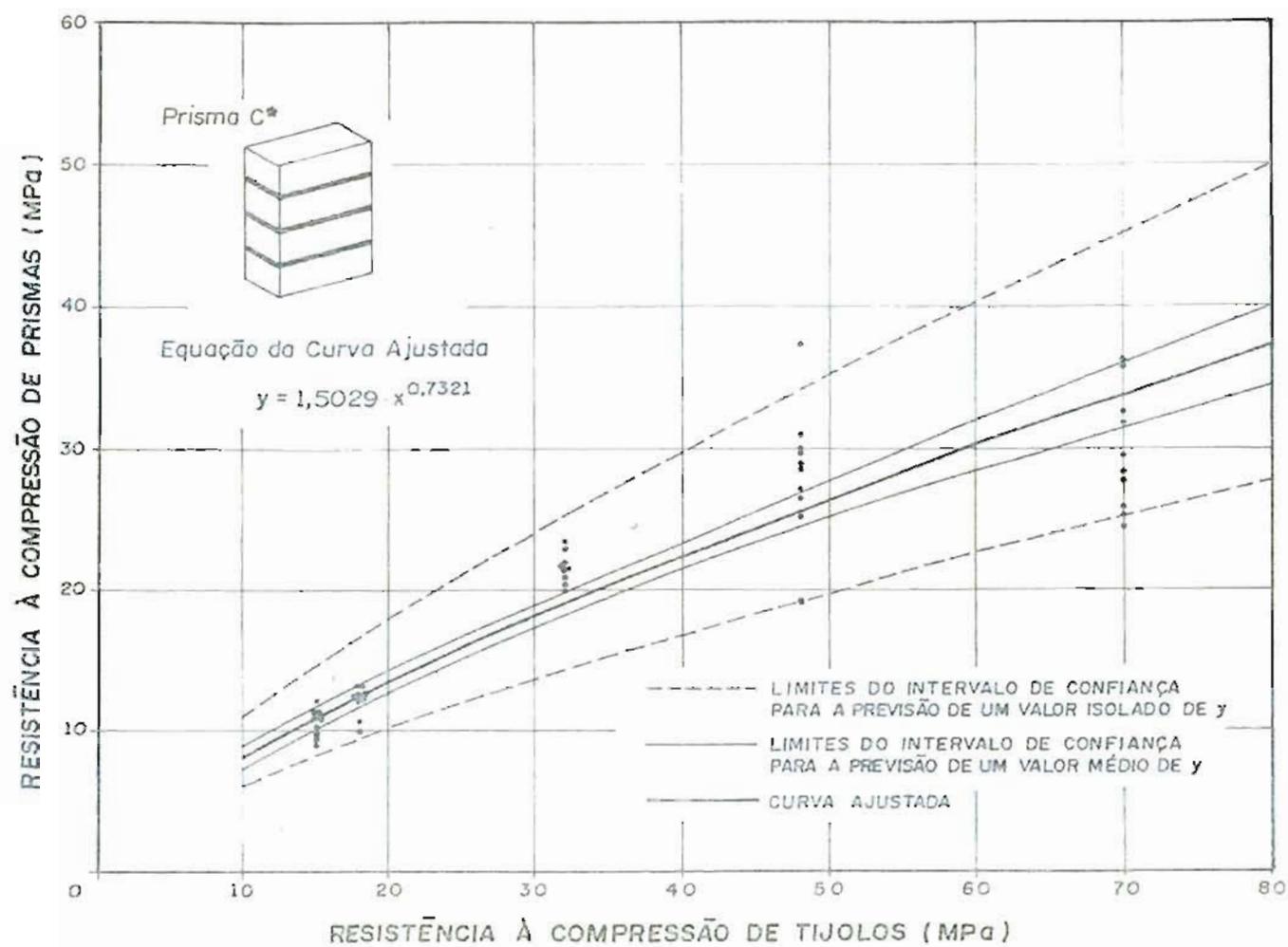


FIGURA 5.4 - Relação entre a resistência à compressão do Prisma C* e tijolos

TABELA 5.6 - Correlação entre a resistência de Prismas C* e tijolos: Parâmetros da regressão não-linear fornecidos pelo programa NONLINWOOD.

Índice da variável	Valor dos coeficientes $b(i)$	Desvio-padrão dos coeficientes $b(i)$	Índice t para $b(i)$ $t_{b(i)}$	Limites do intervalo de confiança para a previsão de $b(i)$ - 95% -	
				Valor inferior	Valor superior
1	40,9147	3,30	12,4	34,3	47,6
2	0,0214997	0,00299	7,2	0,0155	0,0275

Como mostram os resultados da tabela 5.6, a relação encontrada é igualmente adequada para correlacionar as duas variáveis em estudo já que os valores de $t_{b(1)}$ e $t_{b(2)}$ são muito maiores que $t_{.025}(n-2) = 1,960$.

Então, a nova equação ajustada seria:

$$y = 40,9147 (1 - e^{-0,0214997 x}) \quad (5.3.4)$$

Como o programa NONLINWOOD não fornece os erros de previsão de um valor médio e de um valor individual, não foram determinados os correspondentes intervalos de confiança. Devido a isto, não foi feita uma representação gráfica da relação encontrada.

Entretanto, para o intervalo de x abrangido pelos pontos em estudo (15 a 70 MPa) os valores calculados de y pelas expressões 5.3.2 e 5.3.4 não diferem consideravelmente (a diferença é inferior a 8% para qualquer x do intervalo).

5.4. Correlação entre Coeficientes de Variação de Prismas C* e Tijolos

Através da análise de outros trabalhos experimentais^{39,46} pode-se constatar que os coeficientes de variação da resistência à compressão de prismas é menor do que o dos

tijolos com que são confeccionados.

Procurou-se, no presente trabalho, determinar se havia uma relação significativa entre as duas variáveis mencionadas. Para o estudo foram utilizados os resultados dos ensaios dos prismas C* pelos motivos já mencionados no item 5.2. A tabela 5.7 apresenta estes valores.

TABELA 5.7 - Coeficientes de variação dos prismas C* x Coeficiente de variação dos tijolos.

Variável	Procedência	Coeficiente de variação (%)				
		1	2	3	4	5
x	Tijolos	20,84	13,88	13,39	10,77	29,62
y	Prismas	12,14	8,66	8,93	5,12	17,61

Plotados os pontos num gráfico (figura 5.5), notou-se que a sua disposição sugeria uma relação linear.

Utilizando a expressão geral de uma reta

$$y = a + b x \quad (5.4.1)$$

foram determinados os parâmetros da regressão linear utilizando-se o programa REGSIMPLES. Os resultados obtidos estão na tabela 5.8.

A análise dos valores da tabela 5.8 revelou que:

a) Apesar do pequeno número de pontos disponíveis, a relação entre as variáveis é bastante significativa ($t_b > t_{.025} (n-2)$ e r é próximo de 1).

b) Os coeficientes de variação médios para a previsão de valores médios e individuais de y são baixos (6,19% e 15,29%, respectivamente).

TABELA 5.8 - Correlação entre coeficientes de variação de prismas C* e tijolos: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.

Parâmetros	Equação proposta: $y = a + b x$
Nº de pontos: (n)	5
Intersecção com o eixo y: (a)	-0,21121
Inclinação: (b)	0,60470
Desvio-padrão da estimativa: (σ_e)	0,963617
Desvio-padrão da inclinação: (σ_b)	0,06311
Desvio-padrão da intersecção: (σ_a)	1,19729
Índice t para b: (t_b)	9,58174
$t_{.025}$ (n-2)	3,182
Índice t para a: (t_a)	-0,17641
Coefficiente de correlação: (r)	0,98405
Limite inferior de confiança: 95%	0,77224
Limite superior de confiança: 95%	0,99899
Coefficiente de determinação: (r^2) - %	96,83577
Prova de Kolmogorov-Smirnov (DM)	0,1973
$D_{.05}$ (n)	0,337
Prova de Wilk-Shapiro: (w)	0,9772
Probabilidade: p ($w \leq W$)	> 0,500
Valores espúrios	Não
Coef. de variação médio da previsão (valor médio) - %	6,19
Coef. de variação médio da previsão (valor individual) - %	15,29

A expressão matemática da reta ajustada foi:

$$y = -0,21121 + 0,60470 x \quad (5.4.2)$$

A representação gráfica da reta de ajustamento e dos intervalos de confiança das previsões de y estão na figura 5.5.

A utilidade da relação encontrada reside na possibilidade de se poder estimar o coeficiente de variação dos prismas e, por conseguinte, o número de prismas que deve ser ensaiado para que os parâmetros amostrais reflitam, dentro de uma confiabilidade pré-estabelecida, os parâmetros da população em estudo.

O tamanho de uma amostra, que deve ser adotado num experimento, é dado pela expressão:

$$n = Z_{\alpha/2}^2 \cdot \frac{CV^2}{ER^2} \quad (5.4.3)$$

onde:

- n = tamanho da amostra
- $Z_{\alpha/2}$ = nível de confiabilidade estipulado
- CV = coeficiente de variação dos dados
- ER = margem de incerteza admitida

Tomando-se $\alpha/2 = 0.05$ ($Z_{\alpha/2} = 1,96$) e um $ER = 0,1$ tem-se que:

$$n = 384,16 CV^2 \quad (5.4.4)$$

Então, de posse do valor do coeficiente de variação dos tijolos pode-se estimar o coeficiente de variação dos prismas e, com o auxílio da expressão 5.4.4, determinar o número de prismas (mínimo) que deve compor uma amostra. Através do gráfico da figura 5.5 pode-se encontrar o valor de n .

Contudo, o valor de n dado pela expressão 5.4.2 supõe um $Z_{\alpha/2} = 1,96$. Se o valor de n resulta pequeno ($n < 30$) ele deve ser ajustado usando o valor de t da distri-

buição de Student. Por exemplo, se CV dos tijolos for igual a 10%, n resulta igual a 4. Usando o valor de $t_{.025}$ com 3 graus de liberdade ao invés de $Z_{\alpha/2}$ na expressão 5.4.3 o valor de n calculado passa para 10. Neste intervalo (de 4 a 10) deve ser procurado o valor de n para o qual:

$$\frac{n}{[t_{.025}(n-1)]^2} = \frac{CV^2}{ER^2} \quad (5.4.5)$$

no exemplo citado, n é igual a 7.

Deve ser ressaltado que tanto o gráfico da figura 5.5 quanto a expressão 5.4.4 foram concebidos a partir dos materiais utilizados na pesquisa (tijolos e um só tipo de argamassa) e, portanto, sua validade fica restrita a estes até que outros estudos confirmem (ou não) a relação encontrada.

5.5. Correlação entre a Resistência de Paredes e Resistência Média dos Tijolos

Colocados os pontos num gráfico (figura 5.6) notou-se haver uma tendência similar àquela encontrada na relação entre resistência dos prismas e tijolos. Por isto, resolveu-se empregar o mesmo tipo de equação para a ajustagem:

$$y = a x^b \quad (5.5.1)$$

Calculando-se os parâmetros da regressão através do programa REGSIMPLES, chegou-se aos resultados fornecidos pela tabela 5.9.

A representação gráfica da relação obtida encontra-se na figura 5.6.

A análise dos valores da tabela 5.9 revelou que:

a) A relação entre as variáveis em estudo é significativa ($t_b > t_{.025}(n-2)$ e r aproxima-se de 1).

b) A distribuição dos pontos em torno da curva ajustada tende a ser normal.

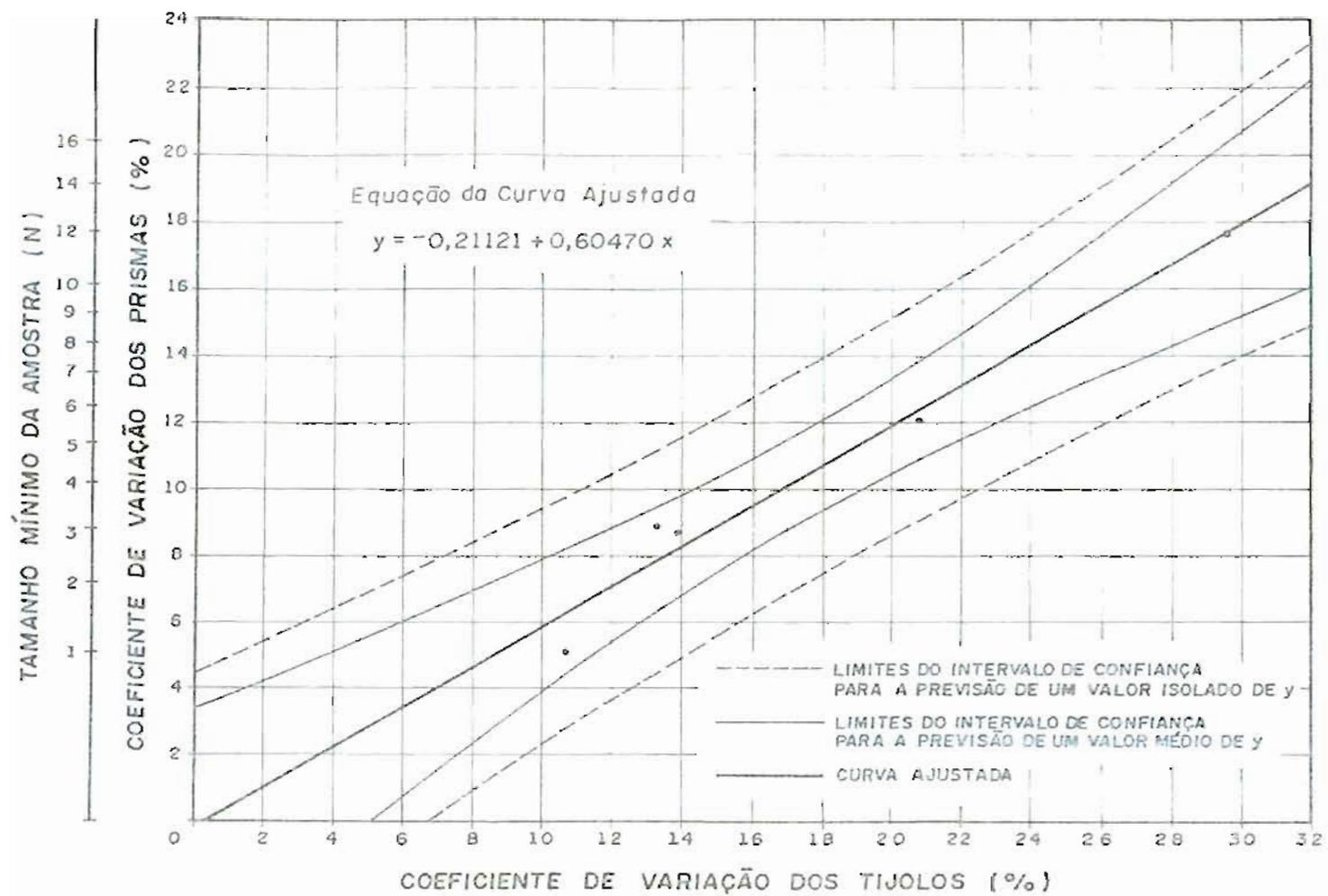


FIGURA 5.5 - Relação entre os coeficientes de variação das resistências à compressão dos prismas C* e tijolos. Tamanho mínimo de uma amostra de prismas como função da mesma variável (x).

c) Os coeficientes de variação médios e valores individuais de y são pequenos (respectivamente 2,55 e 6,82%).

A curva ajustada resultou na seguinte expressão:

$$y = 0,60297 \cdot x^{0,73476} \quad (5.5.2)$$

É importante notar que os expoentes das expressões 5.3.2 e 5.5.2 são praticamente iguais o que sugere que a relação entre a resistência à compressão dos prismas C^* e paredes é linear.

TABELA 5.9 - Correlação entre resistência de paredes e tijolos: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES

Parâmetros	Equação proposta: $y = a \cdot x^b$
	Equação transformada: $\text{Ln}(y) = a' + b \text{Ln}(x)$ $a' = \text{Ln } a$
Nº de pontos: (n)	12
Intersecção com o eixo y: (a')	-0,50588
Inclinação: (b)	0,73476
Desvio-padrão da estimativa: (σ_e)	0,13168
Desvio-padrão da inclinação: (σ_b)	0,07611
Desvio-padrão da intersecção: (σ_a)	0,27834
Índice t para b: (t_b)	9,65375
$t_{.025}(n-2)$	2,228
Índice t para a: (t_a)	-1,81748
Coefficiente de correlação: (r)	0,950314
Limite inferior de confiança: 95%	0,827979
Limite superior de confiança: 95%	0,98630
Coefficiente de correlação: (r^2) - %	90,30960
Prova de Kolmogorov-Smirnov: (DM)	0,1422
$D_{.05}(n)$	0,242
Prova de Wilk-Shapiro: (w)	0,9513
Probabilidade: $p(w \leq W)$	> 0,500
Valores espúrios	Não
Coef. de variação médio da previsão (valor médio) - %	2,55
Coef. de variação médio da previsão (valor individual) - %	6,82

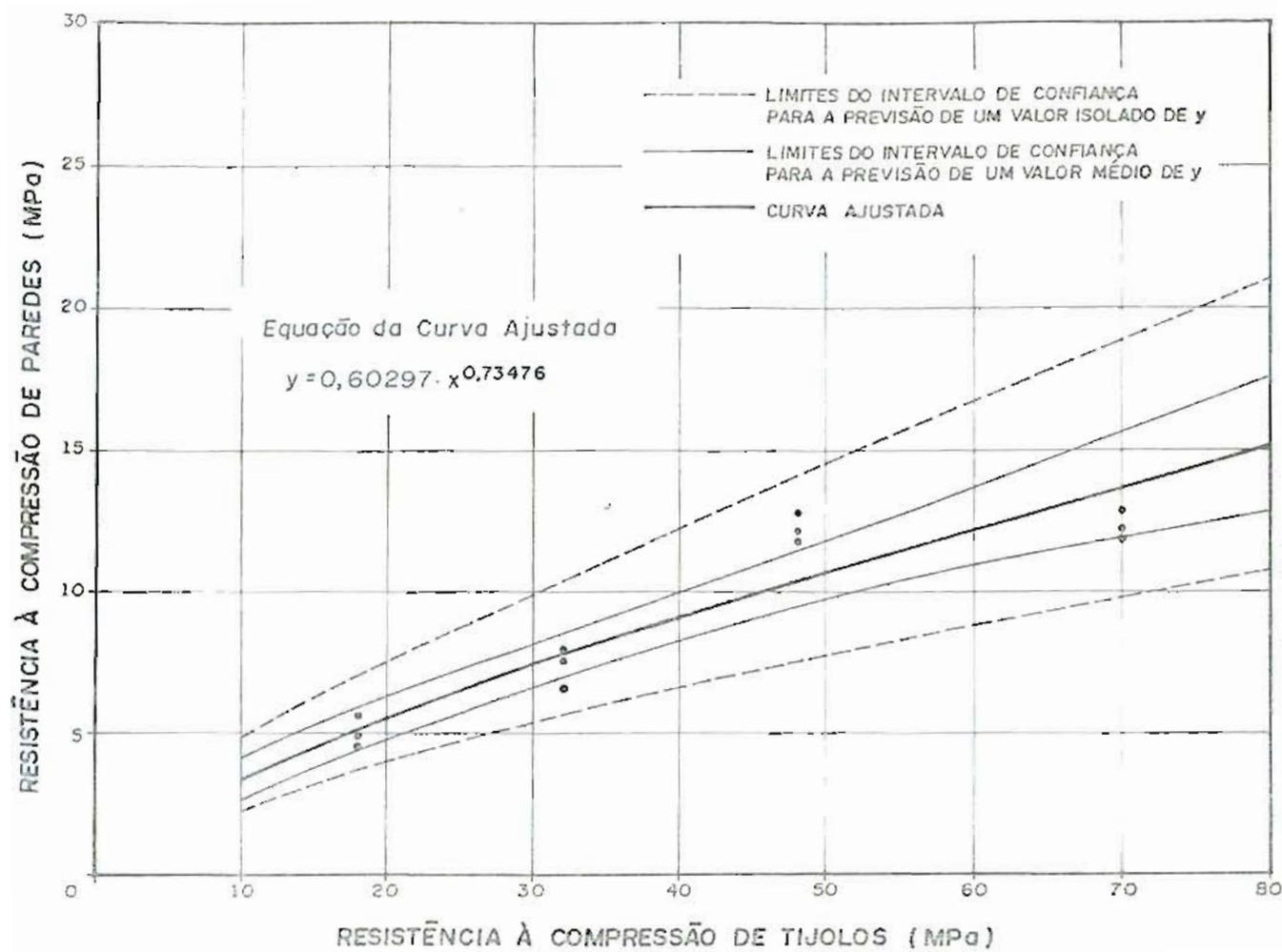


FIGURA 5.6 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e tijolos.

5.6. Correlação entre a Resistência de Paredes e Resistência Média dos Prismas

Para manter a mesma metodologia empregada no estudo da correlação entre resistência à compressão de prismas e tijolos (item 5.3), resolveu-se analisar, em separado, o prisma C*.

Através das conclusões extraídas do item 5.5 e da própria disposição dos pontos quando plotados em gráficos (figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10) escolheu-se a equação de uma reta para a ajustagem:

$$y = a + bx \quad (5.6.1)$$

Os parâmetros da ajustagem das retas encontram-se nas tabelas 5.10 e 5.11 e a representação gráfica das relações nas figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

Através da análise dos valores da tabela 5.10 conclui-se que:

a) As relações entre as variáveis são significativas para os três casos (prismas A, B e C) principalmente para o prisma C. Coeficiente de correlação só se aproxima de 1 para este caso.

b) O intervalo de confiança para a estimativa de r , para os prismas A e B, é muito amplo.

c) A distribuição dos pontos em torno da reta ajustada tende a ser normal para os três casos.

d) Os coeficientes de variação médios para a previsão de valores médios e individuais de y são relativamente altos com exceção daqueles referentes aos prismas C.

Com respeito à análise dos valores da tabela 5.11 referente ao prisma C* encontrou-se que:

a) A relação entre as variáveis em questão é bastante significativa ($t_b > t_{0,25} (n-2)$ e r aproxima-se de 1).

b) O intervalo de confiança para a estimativa de r é pequeno.

c) A distribuição dos pontos em torno da reta ajustada tende a ser normal.

d) Os coeficientes de variação médios para a previsão de valores médios e individuais são baixos, resultando que os erros esperados nas previsões são pequenos.

Analisando-se em conjunto os resultados encontrados para os prismas A, B, C e C* pode-se concluir que os resultados da relação - resistência à compressão de paredes versus resistência à compressão de prismas, para os primeiros três tipos, ficaram em torno de 0,6 e para o último tipo, aproximadamente 0,4. Esta diferença demonstra a grande influência que o tipo de equipamento utilizado e a qualidade da mão-de-obra empregada exerceram sobre os resultados dos ensaios.

Os valores obtidos no último caso são mais recomendáveis pelos motivos expostos no item 5.2. Além disso, esta relação gera resultados mais conservadores (a favor da segurança).

Deve ser novamente lembrado que as expressões encontradas referem-se apenas aos materiais em estudo até que novas pesquisas confirmem (ou não) os resultados obtidos.

TABELA 5.10 - Correlação entre resistência de paredes e prismas: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.

Equação proposta:	$y = a + bx$		
Parâmetros	Tipo do prisma		
	A	B	C
Nº de pontos: (n)	12	12	12
Intersecção com o eixo y: (a)	-0,31299	-0,32356	-0,65589
Inclinação: (b)	0,57977	0,59473	0,58633
Desvio-padrão da estimativa: (σ_e)	2,13961	1,73687	0,99731
Desvio-padrão da inclinação: (σ_b)	0,14063	0,10687	0,05485
Desvio-padrão da intersecção: (σ_a)	2,40213	1,79319	0,97109
Índice t para b: (t_b)	4,12279	5,56498	10,68912
$t_{.025}$ (n-2)	2,228	2,228	2,228
Índice t para a: (t_a)	-0,13030	-0,18044	-0,67542
Coefficiente de correlação: (r)	0,79347	0,86943	0,95892
Limite inferior de confiança: 95%	0,40314	0,58984	0,85620
Limite superior de confiança: 95%	0,93953	0,96289	0,98871
Coefficiente de determinação: (r^2) - %	62,95938	75,59133	91,95219
Prova de Kolmogorov-Smirnov: (DM)	0,1467	0,2392	0,1674
$D_{.05}$ (n)	0,242	0,242	0,242
Prova de Wilk-Shapiro: (w)	0,9701	0,8904	0,9293
Probabilidade: p ($w \leq W$)	> 0,500	0,119	0,347
Valores espúrios	Não	Não	Não
Coef. de variação médio da previsão (valor médio) - %	10,93	9,41	5,44
Coef. de variação médio da previsão (valor individual) - %	28,06	23,67	13,81

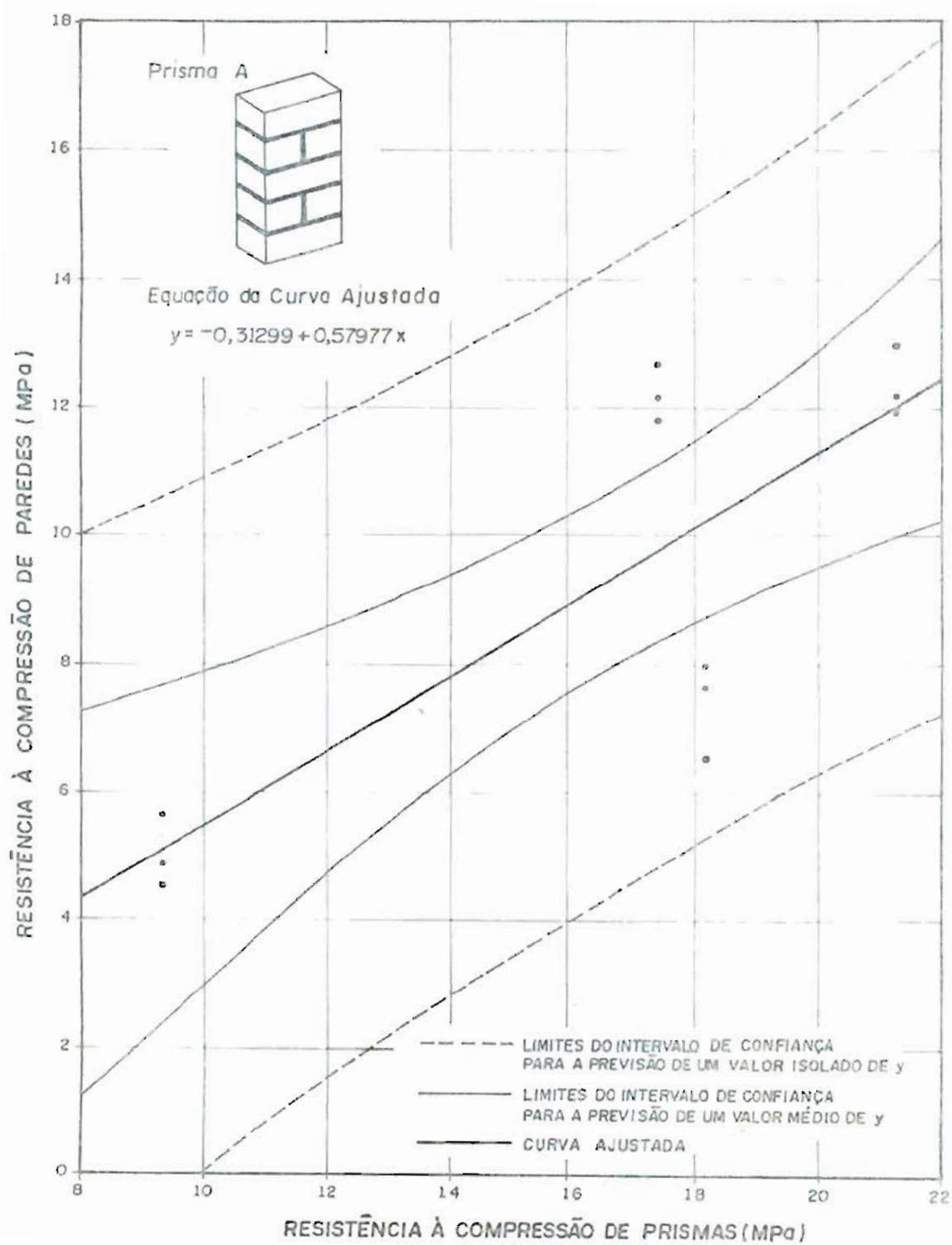


FIGURA 5.7 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas "A".

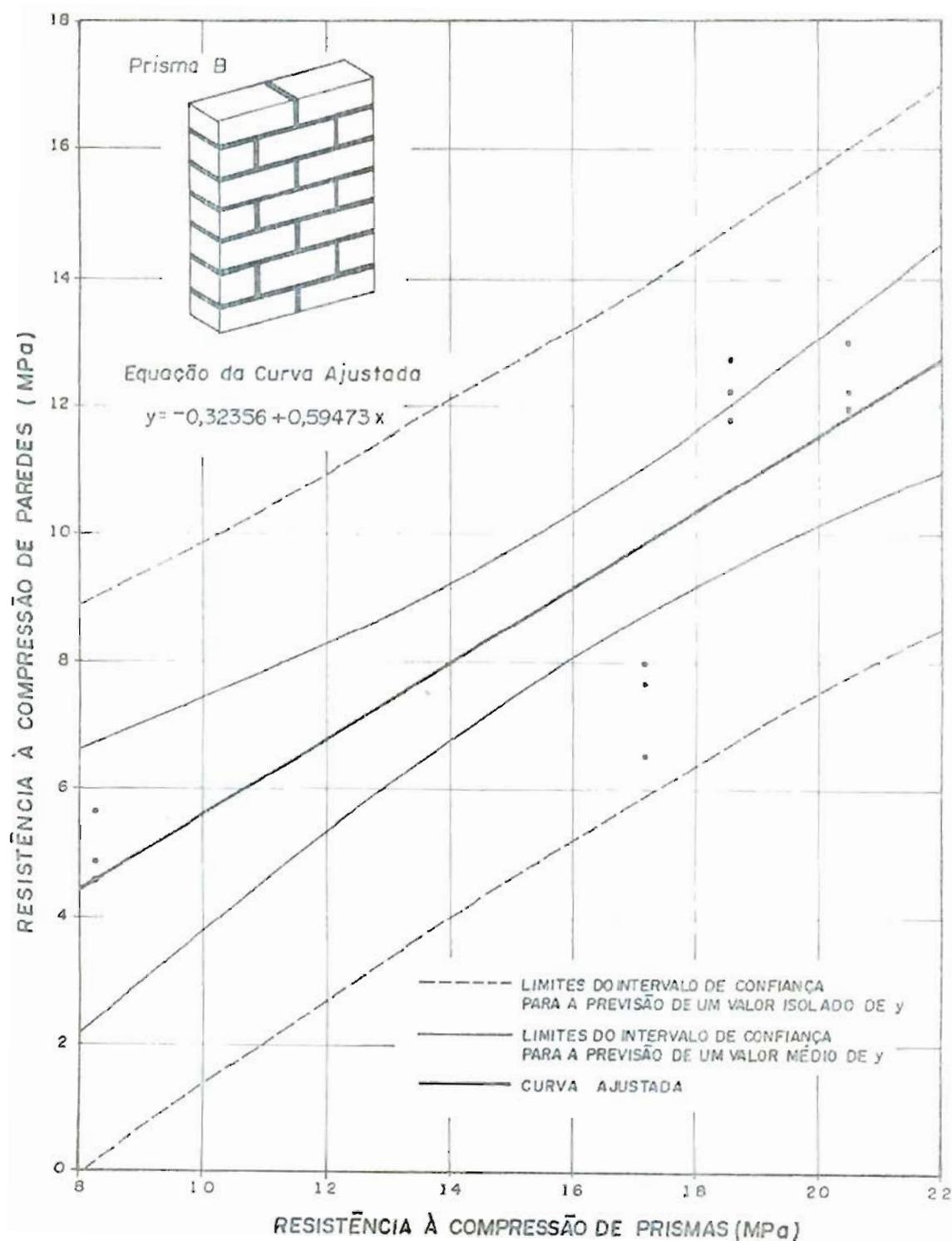


FIGURA 5.8 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas "B".

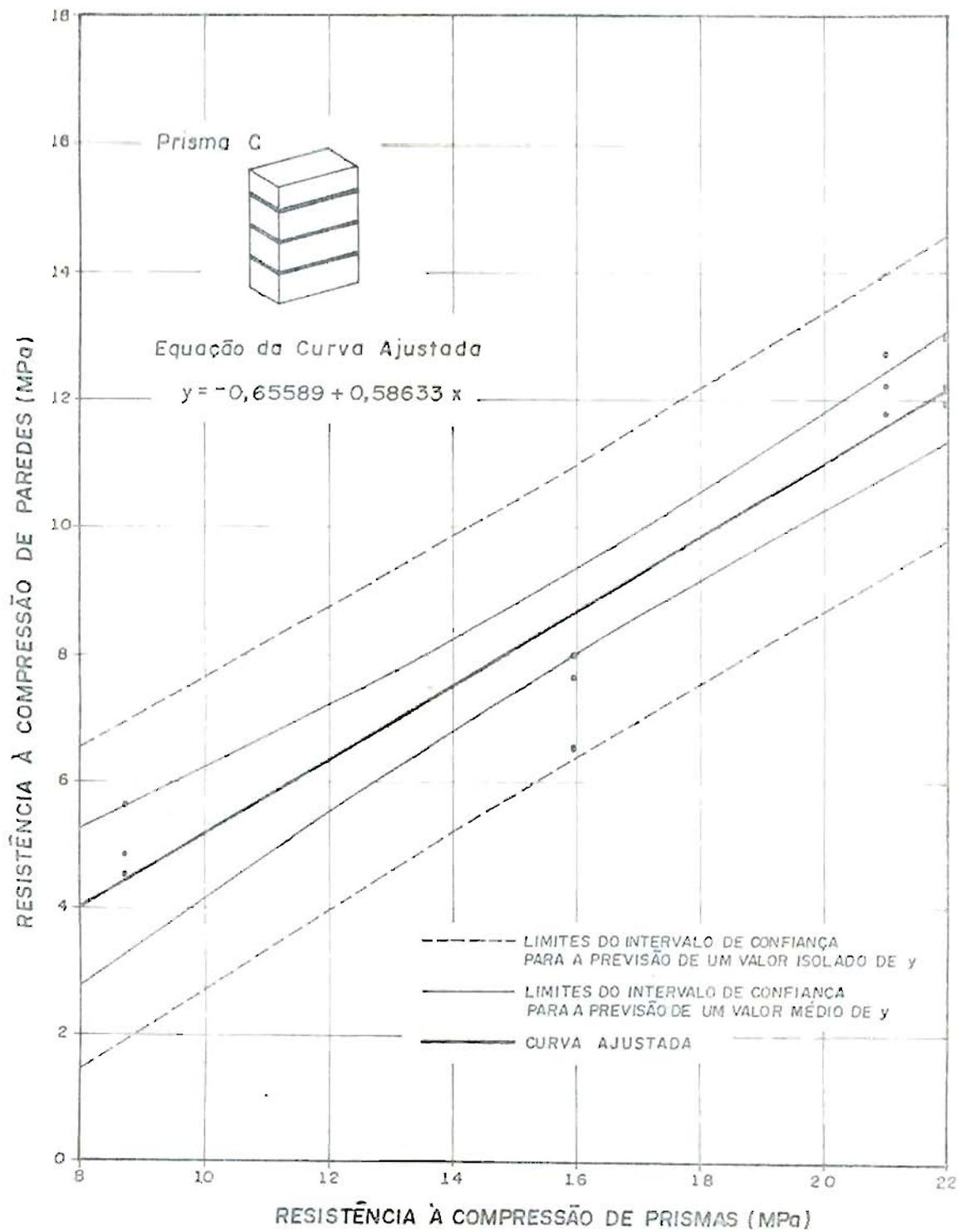


FIGURA 5.9 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas "C".

TABELA 5.11 - Correlação entre resistência de paredes e prismas C*: Parâmetros da regressão linear fornecidos pelo programa REGSIMPLES.

Parâmetros	Equação proposta: $y = a + bx$
Nº de pontos: (n)	12
Intersecção com o eixo y: (a)	-0,66170
Inclinação: (b)	0,42922
Desvio-padrão da estimativa: (σ_e)	1,03170
Desvio-padrão da inclinação: (σ_b)	0,04667
Desvio-padrão da intersecção: (σ_a)	1,00793
Índice t para b: (t_b)	10,30111
$t_{.025}$ (n-2)	2,228
Índice t para a: (t_a)	-0,65649
Coefficiente de correlação: (r)	0,95597
Limite inferior de confiança: 95%	0,84646
Limite superior de confiança: 95%	0,98789
Coefficiente de determinação: (r^2) - %	91,38769
Prova de Kolmogorov-Smirnov: (DM)	0,1047
D _{.05} (n)	0,242
Prova de Wilk-Shapiro: (w)	0,9662
Probabilidade: p ($w \leq W$)	> 0,500
Valores espúrios	Não
Coef. de variação médio da previsão (valor médio) - %	5,53
Coef. de variação médio da previsão (valor individual) - %	14,16

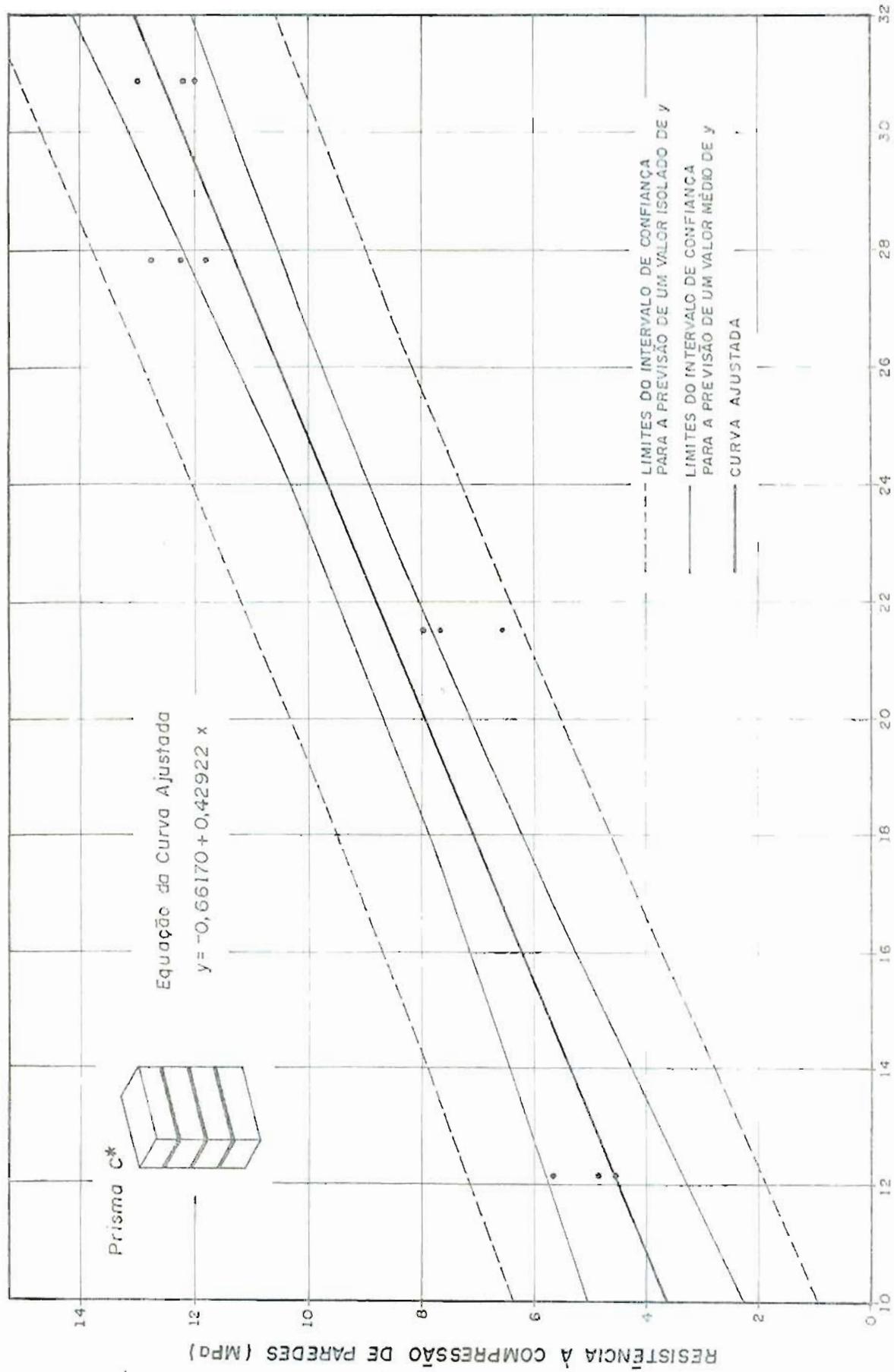


FIGURA 5.10 - Relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas C*.

CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos nos experimentos pode-se confirmar a boa qualidade dos tijolos maciços cerâmicos fabricados na região da Grande Porto Alegre e a sua viabilidade para a utilização em estruturas de alvenaria. Entretanto, estes tijolos apresentaram, com relação às suas resistências, coeficientes de variação muito variáveis e, em certos casos, bastante elevados (tijolos tipo 1 e 5). Isto, no parecer do autor, é consequência direta dos processos de produção empregados na região. A má distribuição de calor nos fornos de cozimento é a principal responsável por esta variação na resistência.

Outro ponto a ser lembrado é a falta de padronização das dimensões dos tijolos. Isto torna evidente que a normalização a respeito do assunto não é cumprida. Nenhum dos tipos de unidades utilizados na pesquisa se enquadraram nas prescrições da NBR-7170¹⁹. Deve também ser ressaltado que a referida norma apresenta critérios muito mais rígidos com relação à aparência do que às propriedades físicas dos tijolos.

A revisão bibliográfica apresentada, mostrou a grande importância que vêm sendo dada ao estudo dos ensaios de prismas em todo o mundo. Contudo, muitos estudos são ainda necessários.

Constatou-se, também, que a falta de padronização de equipamentos e procedimentos de ensaio tem levado à obtenção de resultados discrepantes e não comparáveis, impossibilitando um intercâmbio mais efetivo de experiências entre as instituições que realizam pesquisas sobre alvenaria estrutural.

Quanto aos resultados obtidos na análise dos valores observados nos experimentos, conclui-se que as relações encontradas são bastante relevantes.

A relação entre a resistência à compressão de paredes e prismas é linear e o intervalo de confiança para as previsões é relativamente pequeno.

As relações entre prismas e tijolos e paredes e tijolos é não-linear. O incremento na resistência dos prismas e paredes é cada vez menor, quanto maior for a resistência das unidades, para uma dada argamassa.

Não foi encontrada uma diferença significativa entre as resistências à compressão obtidas a partir dos três diferentes tipos de prismas adotados nos experimentos. Isto mostra a inadequabilidade dos fatores de correção propostos por algumas normas anteriormente citadas (tabela 3.1).

Com relação aos aspectos técnicos da execução dos ensaios, deve ser novamente lembrada a grande influência que o tipo de equipamento utilizado e a qualidade da mão-de-obra podem exercer na resistência dos prismas. Um reflexo disto é a diferença encontrada nas relações resistência à compressão de prismas versus resistência a compressão de tijolos para os prismas A, B e C e C*. Os primeiros, por terem sido confeccionados em uma seqüência aleatorizada, em um intervalo de tempo reduzido, não permitiram uma especialização da mão-de-obra, inicialmente destreinada para este tipo de tarefa. Já a construção dos corpos-de-prova C* foi feita em condições muito melhores e isto pode justificar, em parte, a diferença observada. Além disso os prismas A, B e C tiveram que ser rompidos em diferentes equipamentos, alguns deles adaptados especialmente para este fim enquanto que os da série C* foram rompidos em uma prensa com uma vinculação das placas de distribuição de carga consideravelmente melhor.

Nos ensaios de paredes, verificou-se o aparecimento de uma excentricidade no carregamento quando as cargas aplicadas chegavam a níveis próximos da ruptura. Este problema ocorreu principalmente nos primeiros ensaios e foi praticamente sanado no decorrer do programa experimental.

Um ponto que deve ser enfatizado é que, quando se iniciou a pesquisa, tanto os equipamentos de ruptura dos pris-

mas quanto das paredes ainda não se encontravam em condições para que se pudesse realizar os ensaios. Tiveram que ser adaptados e os projetos destas modificações foram feitos durante a fase inicial da pesquisa pelo autor conjuntamente com o corpo técnico da CIENTEC ligado ao projeto Alvenaria Cerâmica Portante.

Frente às dificuldades encontradas e às limitações de tempo e recursos para a execução da pesquisa, acredita-se que o trabalho tenha cumprido seus objetivos e que os resultados encontrados serão de grande valia para os pesquisadores que no futuro queiram dar prosseguimento aos estudos nesta área.

SUGESTÕES PARA OUTRAS PESQUISAS RELACIONADAS COM O TEMA

Durante a execução do presente trabalho, constatou-se haver uma grande carência de pesquisas sobre Alvenaria Estrutural em nosso país. Verifica-se, como consequência direta, a impossibilidade de se estabelecer uma normalização mais adequada sobre o assunto que tenha por base estudos realizados com materiais e mão-de-obra nacionais.

Para mudar, pelo menos em parte, tal situação, são aqui apresentadas algumas sugestões de temas de pesquisa na área:

- Estudo similar ao que foi desenvolvido no presente trabalho sobre blocos cerâmicos e de concreto.
- Resistência ao cisalhamento da alvenaria.
- Argamassas de assentamento (composições, traços, aditivos).
- Coeficientes de segurança para estruturas de alvenaria compatíveis com a nossa realidade.
- Correlação entre a resistência à compressão de prismas e paredes quando do emprego de outros tipos de argamassa.
- Utilização de tijolos maciços furados (principalmente o de 21 furos) para alvenaria estrutural.
- Comparação de custos de edificações em concreto armado e em alvenaria estrutural (modelo matemático que possa prever diferenças regionais e conjunturais).
- Evolução da resistência à compressão da alvenaria com o tempo (notadamente para pequenas idades).
- Módulo de elasticidade da alvenaria e sua correlação com a resistência a compressão de prismas.

- Reestudo da NBR-7170/83, adaptando-a a valores mais compatíveis com a realidade nacional e prevendo o emprego de critérios estatísticos para a classificação das amostras.

ANEXO

1. CONCEITOS E PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS

Para apresentar de uma forma mais detalhada os conceitos e procedimentos estatísticos utilizados no presente trabalho, foi redigido este anexo que fornece as bases estatísticas dos resultados obtidos no capítulo 5.

Todos os conceitos e tabelas apresentados foram extraídos de uma publicação de NANNI⁴³.

1.1. Conceitos Estatísticos Básicos

Sejam X_1, X_2, \dots, X_n , os n valores obtidos em uma amostra aleatória em um experimento.

• Média (\bar{X}): É o quociente do somatório de n valores por n .

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1.1.1)$$

• Desvio-padrão (S): É definido como a raiz quadrada da média da soma dos quadrados dos desvios $(X_i - \bar{X})$.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (1.1.2)$$

Note-se que esta média se obtém pela divisão por $n-1$ pois existem, na verdade, somente $n-1$ quadrados de desvios que são independentes. Isto ocorre devido ao fato de que a média \bar{X} impõe uma restrição linear às n observações independentes da amostra.

Em geral, se diz que a soma dos quadrados em (1.1.2) tem $n-1$ graus de liberdade.

- Grau de liberdade (G.L.): É o valor da diferença entre o número de observações independentes e o número de restrições lineares.
- Coeficiente de variação (C.V.): É o resultado da razão entre o desvio-padrão e a média de uma amostra, multiplicado por 100, já que é expresso em porcentagem.

$$C.V. = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (1.1.3)$$

O valor de C.V. indica a dispersão dos dados de uma amostra. Numa distribuição normal, 68,27% dos valores estão compreendidos no intervalo entre $\bar{X}-S$ e $\bar{X}+S$

- Coeficiente de assimetria (g_1): É a média da soma dos cubos dos desvios dividida pelo desvio-padrão na terceira potência. O resultado obtido deve ainda ser dividido por um fator de correção igual a $((n-1)/n)^{1/2}$ para relacionar o valor de S ao tamanho n da amostra.

$$g_1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^3/n}{[(\frac{n-1}{n})^{1/2} \cdot S]^3} \quad (1.1.4)$$

O valor de g_1 deve ser comparado com $\gamma_{1-\alpha}(n)$ tabelado em função de n e do nível de significância.

Quando g_1 é significativamente positivo ($\geq \gamma_{1-\alpha}(n)$) a distribuição é assimétrica à direita. Se $g_1 < -\gamma_{1-\alpha}(n)$ a distribuição é assimétrica para a esquerda.

- Coeficiente de achatamento ou curtose (g_2): É a média da soma dos desvios elevados à quarta potência dividida pelo desvio-padrão à mesma potência. O resultado também deve ser corrigido, dividindo-se pelo fator de correção.

$$g_2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^4/n}{[(\frac{n-1}{n})^{1/2} \cdot S]^4} \quad (1.1.5)$$

Se $g_2 < 3$, se diz que a distribuição tende a ser aplainada, com altura pequena e colas grandes. Se $g_2 > 3$, a distribuição tende a ser muito alta no meio. Para que se possa considerar o valor de g_2 , como significativo para uma análise, o tamanho da amostra deve ser grande ($n > 50$).

Existe uma outra medida de curtose dada por:

$$A = \frac{1}{n} \sum [x_i - \bar{x}]^4 / S^4 \quad (1.1.6)$$

o qual está tabelado para amostras pequenas. Para uma distribuição normal, $A = 0,7979$. O valor de A calculado deve ser comparado com um intervalo definido em função de n e do nível de confiabilidade (α). Se A for menor que o limite inferior do intervalo, diz-se que a distribuição tende a ser muito elevada no centro e, se for maior que o limite superior, a distribuição é dita achatada.

- Valor extremo espúrio: Há casos em que existe um valor isolado na amostra que poderia ser descartado na hipótese da distribuição de dados ser normal. A existência de um valor extremo de X_i ($X(1)$ ou $X(n)$) espúrio pode ser verificada, calculando-se $T_1 = (\bar{X} - X(1))/S$ e $T_n = (X(n) - \bar{X})/S$ e comparando com o valor de T para uma distribuição normal, tabelado em função do número de observações n e do nível de significância α .

Se T_1 ou T_n forem maiores do que os valores tabelados, $X(1)$ ou $X(n)$ podem ser considerados espúrios. Neste caso, os valores de \bar{X} e S deveriam ser recalculados. Se houver dois ou mais valores de X_i tais que $[(X_i - \bar{X})/S] > T$, deve-se estudar as características da distribuição dos valores de X . É muito provável que a distribuição não seja normal e, neste caso, tais valores de X_i podem pertencer à nova distribuição não devendo ser eliminados.

1.2. Métodos Analíticos para a Verificação da Normalidade de uma Amostra

1.2.1. Prova de Kolmogorov-Smirnov

Esta prova consiste na comparação das frequências acumuladas observadas com as calculadas pela distribuição normal. Determina-se a máxima distância (DM) entre estas frequências acumuladas. Se esta distância for maior que o valor de $D_{\alpha}(n)$ tabelado, a hipótese da normalidade será rejeitada.

A prova vale somente para distribuições de variáveis contínuas embora, na prática, também seja utilizada para variáveis discretas.

Os valores de $D_{\alpha}(n)$ tabelados estão baseados numa distribuição normal com parâmetros $\mu = \bar{X}$ e $\sigma = S$ calculados da amostra.

1.2.2. Prova de Wilk-Shapiro

Esta prova está baseada na comparação de duas medidas da variabilidade dos dados; uma obtida dos dados observados, $S^2 = \frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X})^2$, a qual é o quadrado do numerador do desvio-padrão, e outra dada pela fórmula:

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} [X(n-i+1) - X(i)] \quad (1.2.1.1)$$

onde:

$X(i)$: valor ordenado de x

a_{n-i+1} : valor esperado da $(n-i+1)$ -ésima ordem estatística de uma distribuição normal de média zero e desvio-padrão 1.

$k = n/2$ se n é par ou

$k = (n-1)/2$ se n é ímpar

Assim, o valor de w é dado por:

$$w = b^2/S^2 \quad (1.2.1.2)$$

o qual é comparado com um valor $W_\alpha(n)$, para um nível de probabilidade α e um tamanho de amostra n . Se o valor observado de w é menor que $W_\alpha(n)$, a hipótese de normalidade é rejeitada.

Esta prova, através de procedimentos de simulação para diferentes tamanhos da amostra, demonstrou ser mais poderosa que os outros métodos de exatidão de ajuste, especialmente para amostras pequenas. Os autores indicam que este método pode ser utilizado para valores de $n > 6$.

1.3. Comparação Múltipla de Médias

1.3.1. Considerações Iniciais

Quando é feita uma comparação entre médias de amostras deve-se ter sempre presente o fato de que nelas está imbutido um erro por se tratar de variáveis aleatórias. Então, concluir-se apenas sobre o valor absoluto destas médias, é um procedimento errôneo.

O mais correto é, quando desta comparação, levar-se em conta a variabilidade dos dados que geraram cada média, e estabelecer níveis de confiabilidade para poder concluir se existe ou não uma diferença significativa entre os valores médios em questão.

A seguir está descrito um procedimento analítico para resolver tal problema.

1.3.2. Desenvolvimento Analítico

Seja K o número de grupos (blocos) de dados e n_i o número de valores em cada um destes blocos:

Blocos:	1	2	...	K	
	X_{11}	X_{12}		X_{1K}	
	X_{21}	X_{22}		X_{2K}	
	\vdots	\vdots		\vdots	
	$X_{n_1 1}$	$X_{n_2 2}$		$X_{n_K K}$	
Nº de dados:	n_1	n_2		n_K	N
Médias:	\bar{X}_1	\bar{X}_2		\bar{X}_K	\bar{X}

onde X_{ij} , a i -ésima observação do bloco j , pode ser escrito na forma:

$$X_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij} \quad (1.3.2.1)$$

α_j : é o efeito do grupo j na média geral μ

ε_{ij} : é um erro aleatório

$$\varepsilon_{ij} \rightarrow N(0, \sigma) \quad (1.3.2.2)$$

Há duas maneiras de se proceder à análise de variância (ANOVA) para o caso de um fator com K níveis:

Modelo 1 - níveis aleatórios, com os efeitos α_j descritos por uma distribuição normal $\alpha_j \rightarrow N(0, \sigma_\alpha)$ a qual se supõe independente da distribuição do erro ε_{ij} .

Modelo 2 - níveis fixos, onde os efeitos α_j são fixos, positivos ou negativos, tais que:

$$\sum_{j=1}^K \alpha_j = 0 \quad (1.3.2.3)$$

Um exemplo de aplicação do modelo 1 seria o caso da análise da resistência de K sacos de cimento, eleitos aleatoriamente de um tipo de produção. Já o modelo 2 poderia ser usado na análise da resistência de K tipos de tijolos produzidos por uma olaria proveniente de K fornos distintos.

O desvio entre x_{ij} e \bar{x} pode ser escrito na forma:

$$(x_{ij} - \bar{x}) = (x_{ij} - \bar{x}_j) + (\bar{x}_j - \bar{x}) \quad (1.3.2.4)$$

Elevando-se ao quadrado ambos os lados da expressão (1.3.2.4) e somando-se estes quadrados para todos os índices ij tem-se:

$$\sum_{ij} (x_{ij} - \bar{x})^2 = \sum_{ij} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 + \sum_j n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (1.3.2.5)$$

ou, simplificando-se a notação

$$SQT = SQD + SQE \quad (1.3.2.6)$$

SQT: representa a soma total dos quadrados dos desvios das observações com respeito à média total

SQD: representa a soma dos quadrados dos desvios dentro dos blocos

SQE: representa a soma dos quadrados dos desvios entre os blocos.

Os graus de liberdade destas somas são:

$$(n-1) = (n-K) + (K-1) \quad (1.3.2.7)$$

já que SQE está baseada em n observações havendo K restrições (médias dos blocos) e SQD está baseada em K médias havendo uma restrição (média total).

Dividindo-se os valores de SQD e SQE pelos seus respectivos graus de liberdade tem-se as médias quadradas:

$$MQD = SQD/(n-K) \quad (1.3.2.8)$$

$$MQE = SQE/(K-1) \quad (1.3.2.9)$$

Estas médias quadráticas têm distribuições independentes do tipo qui-quadrado. Então pode-se usar a distribuição F para testar a hipótese de que não existe diferenças significativas entre os blocos.

No caso de blocos aleatórios a hipótese a ser verificada é:

$$H_0 : \sigma_\alpha = 0 \quad (1.3.2.10)$$

com uma alternativa

$$H_1 : \sigma_\alpha \neq 0 \quad (1.3.2.11)$$

Para o caso de blocos fixos:

$$H_0 : \alpha_j = 0 \quad (1.3.2.12)$$

com $j = 1, \dots, K$

com uma alternativa

$$H_1 : \alpha_j \neq 0 \quad (1.3.2.13)$$

para algum j

Para comprovar as hipóteses levantadas, calcula-se o valor de F

$$F = \text{MQE}/\text{MQD} \quad (1.3.2.14)$$

e compara-se este valor com $F_\alpha(k-1, n-k)$ tabelado. Se $F > F_\alpha$, se rejeita H_0 e conclui-se que a variação entre os blocos é significativamente maior que a variação dentro dos blocos, ou seja, a hipótese de não existir diferença significativa entre as K médias em estudo deve ser rejeitada.

Isto ocorrendo, para o caso de níveis fixos, é preciso fazer uma análise posterior para identificar, dentro do conjunto de médias, qual ou quais diferem significativamente.

Para isto, pode ser utilizado o Método de DUNCAN, cujo procedimento pode assim ser sintetizado:

- a) Ordena-se as médias (ordem crescente).
- b) Determina-se o desvio-padrão destas médias.

- calcula-se S:
$$S = \sqrt{MQD} \quad (1.3.2.15)$$

- calcula-se $S\bar{X}$:
$$S\bar{X} = S/\sqrt{n_h} \quad (1.3.2.16)$$

Como n pode variar coluna a coluna, usa-se a média harmônica n_h :

$$n_h = \frac{1}{\frac{\sum 1/n_i}{K}} \quad (1.3.2.17)$$

c) Utilizando-se a tabela "Studentized range" procura-se os valores de $r_j \Rightarrow j = 2, K$ que são função do número de médias (K) e dos graus de liberdade de MQD (tabela V).

d) Multiplica-se os valores de r_j pelo valor de $S\bar{X}$ para obter-se os valores de R_j .

e) Compara-se os valores de R_j com as diferenças entre as médias ordenadas.

$$\bar{X}_{j+1} - \bar{X}_j \quad \text{compara-se com } R_2 \quad (j = 1, K-1)$$

$$\bar{X}_{j+2} - \bar{X}_j \quad \text{compara-se com } R_3 \quad (j = 1, K-2)$$

e assim sucessivamente.

Se as diferenças entre as médias forem maiores que os respectivos valores de R_j , se conclui que estas médias diferem significativamente.

1.3.3. Comparação das Médias das Resistências à Compressão dos Diferentes Tipos de Tijolos Utilizados

A tabela de análise de variância fornecida pelo programa COMPVAR apresentou:

TABELA 1.1 - Análise de variância (ANOVA) da comparação das resistências, dos diferentes tipos de tijolos utilizados.

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Valores de F
Entre os grupos	30323.	4	7580,8	85,48
Dentro dos grupos	6119,4	69	88,686	
TOTAL	36443,0	73	499,21	

$$\text{Como } F \gg F_{.05} (4,69) = 2,52$$

Conclui-se que existe diferença significativa entre as médias.

- Ordenando-se as médias tem-se:

$\bar{X}.1$	$\bar{X}.2$	$\bar{X}.3$	$\bar{X}.4$	$\bar{X}.5$
15,314	18,173	32,173	48,087	69,893

- Estimativa de $\sigma(S)$

$$s = \sqrt{MQD} = \sqrt{88,689} = 9,4175$$

- Desvio-padrão das médias ($S\bar{X}$)

$$S\bar{X} = s / \sqrt{n_h} \rightarrow S\bar{X} = 2,449$$

$$n_h = \frac{1}{\frac{\sum 1/n_i}{K}} = 14,789$$

- Valores de r_j

$N-K$ \ K	2	3	4	5
69	2,825	3,390	3,730	3,970

- Valores de R_j

N-K	K				
		2	3	4	5
		6,918	8,302	9,135	9,723

- Agrupamento de médias

$$\bar{X}_{.2} - \bar{X}_{.1} = 2,859 < 6,918$$

Portanto, $\bar{X}_{.1}$ e $\bar{X}_{.2}$ não diferem significativamente.

1.4. Regressão Linear

1.4.1. Modelo

O modelo de regressão linear entre duas variáveis y e x pode ser escrito na forma

$$y = \alpha + \beta x + \epsilon \quad (1.4.1.1)$$

onde α e β são parâmetros a serem avaliados usando-se uma amostra aleatória de n valores $(Y_i, X_i; i = 1, \dots, n)$ e ϵ é um erro amostral que se supõe ter uma distribuição normal com média = 0 e desvio padrão σ_ϵ constante. Esta suposição é geralmente escrita na forma

$$\epsilon \rightarrow N(0, \sigma_\epsilon) \quad (1.4.1.2)$$

O valor de σ_ϵ , conhecido como "erro padrão de estimativa", deve ser constante com respeito à variável X .

1.4.2. Cálculo dos Parâmetros

Utilizar-se-ã as letras a e b para as estimativas amostrais de α e β , respectivamente. Usando-se o método dos mínimos quadrados, estima-se a e b pelo valor mínimo de

$$s = \sum (Y_i - a - bX_i)^2 \quad (1.4.2.1)$$

Pode-se demonstrar que:

$$b = \sum Y_i (X_i - \bar{X}) / \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (1.4.2.2)$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{X}$$

O modelo ajustado é, então:

$$y = a + bx + \epsilon \quad (1.4.2.3)$$

Para os cálculos numéricos, usam-se as expressões

$$S_{xx} = \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2/n \quad (1.4.2.4)$$

$$S_{yy} = \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2/n \quad (1.4.2.5)$$

$$S_{xy} = \sum X_i \cdot Y_i - (\sum X_i) \cdot (\sum Y_i)/n \quad (1.4.2.6)$$

através das quais são determinados:

$$b = S_{xy} / S_{xx} \quad (1.4.2.7)$$

$$a = \sum Y_i/n - b \sum X_i/n \quad (1.4.2.8)$$

$$Se = \sqrt{\frac{S_{yy} - b S_{xy}}{n - 2}} \quad (1.4.2.9)$$

1.4.3. Verificação da Significância da Relação

Ao utilizar-se uma regressão linear para a modelagem da relação entre duas variáveis x e y , é esperado que a relação entre elas seja significativa, isto é, que a inclinação b seja significativamente diferente de zero. Para esta verificação, usa-se a distribuição de Student.

Pode-se demonstrar que se os erros ϵ têm uma distribuição normal, $\epsilon \rightarrow N(0, \sigma_\epsilon)$, o parâmetro b tem também uma distribuição normal com média igual a β e um desvio-padrão σ_b ($b \rightarrow N(\beta, \sigma_b)$) onde o desvio-padrão de b é estimado por:

$$s_b = s_e / \sqrt{S_{xx}} \quad (1.4.3.1)$$

Então, para testar se $\beta=0$, calcula-se

$$[t_b] = [b] / s_b \quad (1.4.3.2)$$

O valor de $[t_b]$ deve ser comparado com o valor de t da distribuição de Student, $t_{\alpha/2} (n-2)$, com um nível de significância α e $n-2$ graus de liberdade.

$$[t_b] > t_{\alpha/2} (n-2) \quad (1.4.3.3)$$

Conclui-se que a relação entre as variáveis x e y é significativa.

Alternativamente, pode-se testar se o coeficiente de correlação r é significativamente diferente de zero, onde

$$r = S_{xy} / \sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}} \quad (1.4.3.4)$$

Usando-se a distribuição de Student que para a variável r tem a forma equivalente:

$$t = r \sqrt{n-2} / (1 - r^2) \quad (1.4.3.5)$$

O mesmo tipo de comparação feita para $[t_b]$ deve ser usada neste caso para verificar-se a significância da relação.

O quadrado de r , r^2 , é conhecido com o coeficiente de determinação. Este indica a estimativa da proporção da variância de y que pode ser atribuída à sua regressão linear com a variável x .

1.4.4. Previsões de Valores de Y

O modelo ajustado é normalmente usado para fazer previsões de y para certos valores de $x = X_0$. O erro destas previsões depende do erro de ajustagem (erro padrão de estimativa) e da distância do valor X_0 à média \bar{X} dos valores usados na amostragem. Tem-se que:

$$ERI = Se \left(1 + 1/n + (X_0 - \bar{X})^2 / S_{xx} \right)^{1/2} \quad (1.4.4.1)$$

$$ERM = Se \left(1/n + (X_0 - \bar{X})^2 / S_{xx} \right)^{1/2} \quad (1.4.4.2)$$

onde:

ERI: é o erro de previsão de um valor individual de y

ERM: é o erro de previsão de um valor médio de y .

Os coeficientes de variação das previsões são:

$$CVI = [ERI / (a + b X_0)] \cdot 100 \quad (1.4.4.3)$$

$$CVM = [ERM / (a + b X_0)] \cdot 100 \quad (1.4.4.4)$$

Se a ajustagem é boa, é de se esperar que o valor de CV seja pequeno ($CV \leq 15\%$).

Se o $CV > 25\%$ pode-se concluir que a ajustagem é duvidosa.

Deve ser notado que os erros de previsões aumentam com a desviação de X_0 com respeito à média \bar{X} e diminuem com um aumento de S_{xx} . Isto significa que, quanto maior o campo de variação dos dados amostrais de x , menores serão os erros nas previsões de y para um dado valor de X_0 .

1.5. Programas Computacionais Utilizados

Para a análise dos dados obtidos nos experimentos foram utilizados alguns programas computacionais disponíveis no Centro de Processamento de Dados da UFRGS. Para dar uma

idêia da potencialidade de tais programas, fez-se uma síntese do conteúdo dos mesmos, principalmente do que diz respeito a resultados fornecidos. Uma descrição mais detalhada de tais programas pode ser encontrada em uma publicação⁴⁴ escrita especialmente para este fim.

1.5.1. Programa STATBAS

Este programa fornece o valor de parâmetros estatísticos básicos bem como os resultados de testes gráficos e analíticos para a verificação da normalidade da amostra ensaiada.

Especificamente, este programa fornece:

- Tamanho da amostra (n).
- Valor mínimo.
- Mediana.
- Valor máximo.
- Média (\bar{X}).
- Variância (S^2).
- Desvio-padrão (S).
- Coeficiente de variação (C.V.).
- Coeficiente de assimetria (g_1).
- Coeficiente de achatamento (g_2 e A).
- Histograma da distribuição dos dados.
- Gráfico de frequências acumuladas.
- Gráfico do papel de probabilidade.
- Resultado da prova qui-quadrado.
- Resultado da prova de Kolmogorov-Smirnov.
- Resultado da prova de Wilk-Shapiro, quando $n \leq 50$.

1.5.2. Programa COMPVAR

É utilizado no estudo de comparação de médias e variâncias. Fornece:

- Valores ordenados de X_{ij} para cada grupo ou bloco.
- Médias e desvios-padrões para cada grupo.

- Resíduos $R_{ij} = X_{ij} - \bar{X}$ para cada grupo, os quais são usados para a prova de normalidade dos valores de X_{ij} .
- Resultados da prova de Bartlett para a comparação das variâncias dentro dos grupos.
- Tabela de ANOVA com os valores das somas dos quadrados dos desvios (SQD), graus de liberdade (G.D.L.), médias quadradas (MQD e MQE) e valor de F.
- Determinação dos componentes de variância.
- Análise gráfica dos resíduos padronizados no papel de probabilidade.
- Representação gráfica dos resíduos padronizados versus as médias \bar{X}_j dos K grupos.
- Resultado dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Wilk-Shapiro.

1.5.3. Programa REGSIMPLES

É utilizado para fazer uma análise de regressão simples de uma função linear da forma $y = a + bx$ ou de uma função não linear que pode ser transformada na forma acima.

Produz os seguintes resultados:

- Listagem dos dados de entrada (x_i e y_i).
- Cálculo de a , b , S_e , S_a e S_b .
- Prova da significância de a e b , usando $\alpha=0.05$.
- Resíduos $(y_i - \bar{y}_i)/S_e$ em ordem crescente.
- Valores de $(i-1/2)/n$ para usar no papel de probabilidade.
- Previsão dos valores médios e individuais de y e seus C.V. para todos os valores de x .
- Coeficiente de correlação r .
- Intervalo de confiança de r , usando $\alpha=0.05$.
- Gráfico das observações e dos valores estimados.
- Gráfico dos resíduos no papel de probabilidade.
- Teste de normalidade dos resíduos (Kolmogorov-Smirnov e Wilk-Shapiro).

1.5.4. Programa NONLINWOOD

É utilizado para regressões de funções não-lineares. Exige que sejam fornecidos a expressão genérica bem como os valores iniciais para as constantes a serem determinadas (é um programa iterativo). Produz os seguintes resultados:

- Valores dos coeficientes da expressão ($b(i)$).
- Valores de t para a prova de significância das variáveis $b(i)$, usando $\alpha=0,05$.
- Intervalo de confiança para as variáveis $b(i)$ com uma confiabilidade de 95%.

II. FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA

EKBLAD:

$$f'_m = \left(12 + \frac{K_s}{6,5} \cdot \frac{\sqrt{K_m}}{\sqrt{h} + 12,7} \right) \cdot h_s$$

(para argamassas mistas de cimento e cal)

HALLER:

$$f'_m = (\sqrt{1 + 0,15 K_s} - 1) (8 + 0,057 K_m)$$

HANSSON:

$$f'_m = 2 \sqrt{K_s} + 3 \sqrt{K_m}$$

HERRMANN:

$$f'_m = 0,45 \sqrt[3]{K_m K_s^2}$$

BRÜCKER:

$$f'_m = \sqrt[3]{K_m} \cdot \sqrt{K_s}$$

MONK:

$$f'_m = 0,177 K_s$$

(para argamassas mistas de cimento e cal com traço
1 : 1 : 6)

Onde:

- f'_m = resistência à compressão da alvenaria em kgf/cm^2
- K_m = resistência da argamassa em kgf/cm^2
- K_s = resistência dos tijolos em kgf/cm^2
- h_s = altura do tijolo em cm
- h = altura da parede em cm

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABIKO, A.K. A influência do formato de blocos cerâmicos em sua resistência mecânica. Cerâmica, São Paulo, 30(170):61-4, fev. 1984.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard method of conducting strength tests of panels for building construction: E 72-74a. In: _____. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, Pa., 1976. Part 18, p.625-46.
3. _____. Standard methods of sampling and testing brick and clay tile: C 67-83. In: _____. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, Pa., 1985. v.04.05, p.49-59.
4. _____. Standard test method for compressive strength of masonry prisms: E-447. In: _____. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, Pa., 1982. Part 18, p.1081-4.
5. AMRHEIN, J.E. Reinforced masonry engineering handbook; clay and concrete masonry. 3.ed. Los Angeles, Masonry Institute of America, 1978.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cal hidratada para argamassas - determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômero de Voss; método de ensaio: projeto 18:05.11-005. Rio de Janeiro, 1984.
7. _____. Cal hidratada para argamassas - determinação da estabilidade; método de ensaio: projeto 18:05.11-002. Rio de Janeiro, 1984.
8. _____. Cal hidratada para argamassas - determinação da finura; método de ensaio: projeto 18:05.11-001. Rio de Janeiro, 1984.
9. _____. Cal hidratada para argamassas - determinação da plasticidade; método de ensaio: projeto 18:05.11-003. Rio de Janeiro, 1984.

10. _____. Cal hidratada para argamassas - determinação da retenção de água; método de ensaio: projeto 18:05.11-004. Rio de Janeiro, 1984.
11. _____. Cal hidratada para argamassas; especificação: projeto 18:05.10-001. Rio de Janeiro, 1984.
12. _____. Cal virgem e cal hidratada - análise química; método de ensaio: NBR 6473. Rio de Janeiro, 1980.
13. _____. Cimento Portland comum - especificação: NBR 5732. Rio de Janeiro, 1982.
14. _____. Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica; método de ensaio: NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.
15. _____. Determinação da composição granulométrica dos agregados; método de ensaio: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1982.
16. _____. Determinação da finura de cimento Portland mediante emprego do aparelho de permeabilidade ao ar; método de ensaio: NBR 7224. Rio de Janeiro, 1982.
17. _____. Ensaio de cimento Portland: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1982.
18. _____. Paredes de alvenaria estrutural - ensaio à compressão simples; método de ensaio: projeto 2:03.04-012. Rio de Janeiro, 1984.
19. _____. Tijolo maciço cerâmico para alvenaria: NBR 7170. Rio de Janeiro, 1983.
20. _____. Tijolo maciço cerâmico para alvenaria e verificação da resistência à compressão; método de ensaio: NBR 6460. Rio de Janeiro, 1983.
21. _____. Tijolos maciços de barro cozido para alvenaria: EBI9R. Rio de Janeiro, 1943.
22. BRICK INSTITUTE OF AMERICA. Mortar brick masonry: selection and controls. McLean, Va., 1976. 4p. (Technical notes on brick construction, 8B).
23. _____. Recommended practice for engineered brick masonry. McLean, Va., 1969. 337p.

24. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. British standard specification for clay bricks and blocks: BS 3921. London, 1974.
25. _____. Code of practice for structural use of masonry - unreinforced masonry: BS 5628. London, 1978. Part I.
26. BROWN, R.H. Prediction of brick masonry prism strength from reduced constraint brick tests. In: SYMPOSIUM ON MASONRY, PAST AND PRESENT, Washington, June 1974. Philadelphia, ASTM, 1975. p.171-94. (ASTM special technical publication, 589).
27. BUILDING RESEARCH STATION. Mortars for jointing. Garston, 1965. (Digest, 58).
28. CONSUL, P.C. & JAIN, G.C. A generalization of the Poisson distribution. Technometrics, Richmond, v.15, n.4, Feb. 1969.
29. CURTIN, W.G. et alii. Structural masonry designer's manual. London, Granada, 1982. 498p.
30. DAVISON, J.I. Masonry mortar. Ottawa, National Research Council of Canada, 1974. (Canadian Building Digest, 163).
31. FOSTER, P.K. & BRIDGEMAN, D.O. Prism tests for the design and control of brick masonry. Lower Hutt, New Zealand Pottery and Ceramics Research Association, 1973. (Technical report, 22).
32. GOMES, N.S. A resistência das paredes de alvenaria. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1974. 191p. Diss. maestr.
33. GRIMM, C.T. Strength and related properties of brick masonry. Journal of the Structural Division, New York, ASCE, 101(1):217-32, Jan. 1975.
34. HALD, A. Statistical theory with engineering applications. New York, John Wiley, 1952.
35. HEGEMIER, G.A. et alii. Prism tests for the compressive strength of concrete masonry. La Jolla, Cal., National Science Foundation, 1977.

36. HENDRY, A.W. Structural brickwork. London, MacMillan, 1981. 209p.
37. _____. Testing methods for masonry, joints and structural units. Trabalho apresentado no 3º International Symposium on Wall Structures, Warsaw, June 1984. 10p.
38. KREFELD, W.J. The effect of shape of specimen on the apparent compressive strength of brick masonry. ASTM Proceedings, Philadelphia, 38(1):363-9, 1938.
39. MAURENBRECHER, A.H.P. Effect of test procedures on compressive strength of masonry prisms. In: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 2., Ottawa, 1980. Proceedings ... Ottawa, Carleton University, 1980. p.119-31.
40. _____. Use of the prism test to determine compressive strength of masonry. In: NORTH AMERICAN MASONRY CONFERENCE, Boulder, Colo., 1978. Proceedings ... s.l.p., The Masonry Society, 1978.
41. MONK Jr., C.B. A historical survey and analysis of the compressive strength of brick masonry. Geneva, Ill., Structural Clay Products Research Foundation, 1967. 19p. (Research report, 12).
42. MOTTEU, H. et alii. Étude des maçonneries portantes. Bruxelles, Centre Scientifique et Technique de la Construction, 1970. 39p. (Compte rendu de recherche, 12).
43. NANNI, L.F. Análise estatística de dados com uso de técnicas computacionais. Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1986. (Caderno técnico, 30).
44. _____. Programas computacionais para processamento estatístico de dados. Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1983. (Caderno técnico, 40).
45. RITCHIE, T. Bricks. Ottawa, Canadian Building Digest, Division of Building Research, National Council of Canada, 1974.

46. ROMAN, H.R. Determinação das características físicas e análise estatística da capacidade resistente de tijolos cerâmicos maciços. Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1983. 102p. Diss. maestr.
47. SABBATINI, F.H. O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984. 298p. Diss. maestr.
48. SAHLIN, S. Structural masonry. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1971. 289p.
49. SANTOS, J.C.P. dos. Viabilidade técnica da produção de blocos sílico-calcários na região de Santa Maria - RS. Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1984. Diss. maestr.
50. SCHNEIDER, R.R. & DICKEY, W.L. Reinforced masonry design. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1980. 619p.
51. SUTHERLAND, R.J.M. Brick and block masonry in engineering. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, 70(pt. 1): 31-63, Feb. 1981.
52. WESCHE, K. & ILANTZIS, A. Recommandations générales pour les méthodes d'essais des murs porteurs. Matériaux et Constructions, Paris, 13(78):432-44, nov./dec. 1980.