

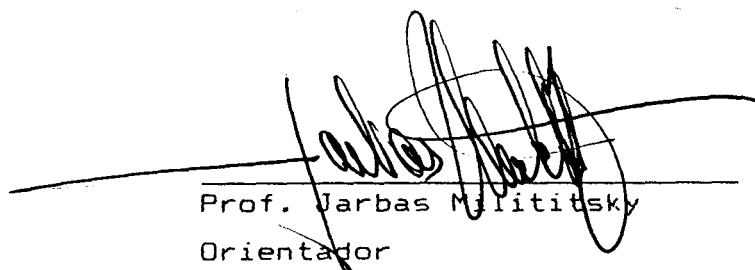
TIJOLOS DE CINZA VOLANTE E CAL - ESTUDO DO DESEMPENHO
QUANTO A RESISTENCIA, ABSORÇÃO, DURABILIDADE E
ADERENCIA

ANA CLARICE FIGUEIREDO DE ANDRADE

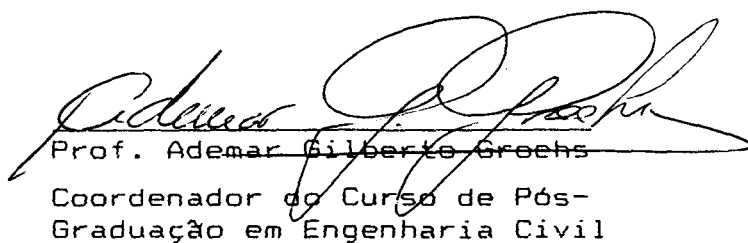
Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre
julho 1991

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.



Prof. Jarbas Milititsky
Orientador



Prof. Ademir Gilberto Groehs
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

- Prof. Jarbas Milititsky (orientador)
Ph. D. pela University of Surrey
- Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (co-orientador)
D.Sc. pela COPPE/UFRJ
- Prof. Sérgio Roberto Maestrini
Ph. D. pela N.C.S.U./USA
- prof. Hélio Adão Greven
Dr. pela Universitaet Hannover

AGRADECIMENTOS

Aos professores Jarbas Milititsky e Jorge Augusto Ceratti pela orientação desta tese.

A Cientec, que forneceu os laboratórios e os recursos materiais e humanos, além de apoio técnico; a toda equipe do Demine com especial atenção aos engenheiros Miguel Boff, Oleg Zwonock, Fradique Chies e todos os laboratoristas. Meus agradecimentos também ao engenheiro Fernando Recena, do laboratório de concreto, pelas orientações fornecidas.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

A todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram com preciosas informações, especialmente a Luiz F. Nanni e José L. Ribeiro, na área de estatística, e Nelton Bonilha, na área de alvenaria.

Aos queridos professores Luiz A. Bressani, Fernando Schnaid e Wai Y. Gehling pela extrema dedicação, competência e amizade demonstradas quando cursei e monitorei a disciplina de mecânica dos solos, despertando em mim o interesse pela área acadêmica, sem o que não teria chegado até aqui.

A toda equipe do NORIE, especialmente aos colegas da turma de 1988, que compartilharam muitos bons e maus momentos, ótimos amigos.

Ao pessoal do Laboratório de modelos e ensaios estruturais (LEME) pelo esforço e carinho.

Aos funcionários da UFRGS pela amabilidade demonstrada durante nosso período de convivência.

A Juliana Z. Bonilha pela organização das referências bibliográficas e pela boa vontade e simpatia.

Ao professor Carlos Formoso pela correção do abstract.

A João Gabriel, grande companheiro de trabalho, pela inestimável ajuda durante todo o período da pesquisa e pela grande amizade.

Aos amigos e parentes que direta ou indiretamente contribuíram para tornar mais amenos os períodos de incerteza, especialmente à minha mãe pelo apoio emocional, material e pela paciência no dia a dia.

A minha mãe.

A memória de meu pai.

SUMARIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE QUADROS.....	xiv
LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS.....	xix
RESUMO	xx
ABSTRACT.....	xxii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 - Histórico do uso da cinza volante e da cal.....	4
2.2 - Origem da cinza volante.....	11
2.3 - Origem da cal.....	17
2.4 - Mecanismos da reação entre a cal e a cinza volante.....	20
3 - PROGRAMA DA PESQUISA.....	23
3.1 - Definição das condições de moldagem dos corpos de prova.....	23
3.2 - Definição dos ensaios e etapas de trabalho.....	26
3.3 - Cronograma da moldagem.....	27
3.4 - Métodos empregados na análise dos resultados.....	31
3.4.1 - Análise estatística básica.....	32
3.4.2 - Determinação do tamanho da amostra.....	32
3.4.3 - Comparação múltipla de médias.....	33
3.4.4 - Regressão não linear.....	34
4 - MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA.....	35
4.1 - Cal.....	35
4.2 - Cinza volante.....	37

4.3 - Agua.....	39
4.4 - Argamassa.....	39
4.4.1 - Cimento.....	40
4.4.2 - Cal.....	40
4.4.3 - Agregado.....	40
5 - CRITÉRIOS GERAIS PARA CONFECÇÃO E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	42
5.1 - Tijolos.....	42
5.1.1 - Preparação da mistura.....	42
5.1.2 - Prensagem da mistura.....	42
5.1.3 - Cura dos tijolos.....	44
5.2 - Argamassa.....	44
5.2.1 - Preparação da argamassa.....	44
5.2.2 - Ensaio de controle.....	45
5.2.2.1 - Consistência.....	45
5.2.2.2 - Resistência à compressão simples (RCS) e resistência à compressão diametral (RCD).....	46
5.3 - Prismas.....	47
6 - DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	49
6.1 - Ensaio de Resistência à compressão simples (RCS).....	49
6.2 - Ensaio de resistência à tração na flexão ou Módulo de ruptura (MR).....	50
6.3 - Ensaio de durabilidade.....	51
6.4 - Ensaio de absorção.....	52
6.5 - Ensaio de resistência à compressão em prismas.....	54
6.6 - Ensaio de resistência de aderência.....	54
7 - RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	57
7.1 - Verificação da resistência à compressão.....	57
7.1.1 - Considerações gerais.....	57
7.1.2 - Programa experimental.....	58
7.1.3 - Primeira etapa.....	59
7.1.3.1 - Apresentação dos resultados.....	59

7.1.3.2 - Análise dos resultados.....	59
7.1.4 - Segunda etapa.....	69
7.1.4.1 - Apresentação dos resultados.....	69
7.1.4.2 - Análise dos resultados.....	70
7.2 - Verificação da durabilidade.....	82
7.2.1 - Apresentação dos resultados.....	82
7.2.2 - Análise dos resultados.....	83
7.3 - Verificação da absorção.....	85
7.3.1 - Considerações gerais.....	85
7.3.2 - Programa experimental.....	86
7.3.3 - Primeira etapa.....	87
7.3.3.1 - Apresentação dos resultados.....	87
7.3.3.2 - Análise dos resultados de sucção.....	89
7.3.3.3 - Análise dos resultados de absorção....	97
7.3.3.4 - Análise dos resultados de absorção máxima.....	103
7.3.4 - Segunda etapa.....	105
7.3.4.1 - Apresentação dos resultados.....	105
7.3.4.2 - Análise dos resultados de sucção.....	107
7.3.4.2.1 - Influência do peso específico aparente seco (γ_d).....	107
7.3.4.2.2 - Influência do teor de umida- de(w).....	109
7.3.4.3 - Análise dos resultados de absorção...111	
7.3.4.3.1 - Influência do peso específico aparente seco (γ_d).....	111
7.3.4.3.2 - Influência do teor de umida- de(w).....	114
7.3.5 - Considerações finais.....	116
7.4 - Verificação da resistência à compressão em prismas.....	118
7.4.1 - Apresentação dos resultados.....	118
7.4.2 - Análise dos resultados.....	120
7.5 - Verificação da aderência.....	131
7.5.1 - Considerações gerais.....	131
7.5.2 - Fatores que afetam a aderência.....	132
7.5.2.1 - Tijolos.....	132
7.5.2.2 - Argamassas.....	133

7.5.2.3 - Mão-de-obra.....	134
7.5.2.4 - Cura.....	135
7.5.3 - Programa experimental.....	135
7.5.3.1 - Métodos de ensaio.....	135
7.5.3.2 - Planejamento do ensaio.....	138
7.5.4 - Apresentação dos resultados.....	138
7.5.5 - Análise dos resultados.....	141
8 - CONCLUSÕES.....	145
9 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 3

- Fig. 3.1 - Curvas de carga resultantes do ensaio Proctor realizado em tijolos de cinza volante e cal para mistura 85 x 15.....25
- Fig. 3.2 - Esquema do desenvolvimento dos ensaios.....28

Capítulo 5

- Fig. 5.1 - Molde utilizado para a produção dos tijolos de cinza volante e cal.....43
- Fig. 5.2 - Procedimento para desmoldagem dos tijolos de cinza volante e cal.....43

Capítulo 6

- Fig. 6.1 - Preparação do tijolo para o ensaio de RCS.....49
- Fig. 6.2 - Equipamento para ensaio de resistência à tração na flexão.....50
- Fig. 6.3 - Equipamento para ensaio de resistência de aderência à tração por arrancamento.....55
- Fig. 6.4 - Mecanismo da ruptura à tração por arrancamento...56

Capítulo 7

- Fig. 7.1 - RCS x tempo para 7 teores de cal.....60
- Fig. 7.2 - RCS x teor de cal para 4 períodos de cura.....61
- Fig. 7.3 - RCS x tempo para 7 teores de cal. Curvas de regressão. Equação ajustada: (3.2).....64
- Fig. 7.4 - RCS x teor de cal para 4 períodos de cura.

	Curvas de regressão. Equações ajustadas:(3.3)* e (3.4)*.....	66
Fig. 7.5	- RCS x processo de cura para 3 misturas submetidas a 7 dias de cura.....	72
Fig. 7.6	- RCS x processo de cura para 3 misturas submetidas a 14 dias de cura.....	72
Fig. 7.7	- RCS x processo de cura para 3 misturas submetidas a 28 dias de cura.....	73
Fig. 7.8	- RCS x tipo de cura para 3 misturas submetidas a 60 dias de cura.....	73
Fig. 7.9	- RCS x tempo para mistura 90x10, sob 3 processos de cura. Curvas de regressão. Equação ajustada: (3.2).....	77
Fig. 7.10	- RCS x tempo para mistura 85x15, sob 3 processos de cura. Curvas de regressão. Equação ajustada: (3.2).....	77
Fig. 7.11	- RCS x tempo para mistura 80x20, sob 3 processos de cura. Curvas de regressão. Equação ajustada: (3.2).....	78
Fig. 7.12	- RCS x tempo para 3 teores de cal curados em lona. Curvas de regressão - Equação ajustada: (3.2).....	78
Fig. 7.13	- RCS x tempo para 3 teores de cal curados em câmara úmida. Curvas de regressão - Equação ajustada: (3.2).....	79
Fig. 7.14	- RCS x tempo para 3 teores de cal curados em câmara de temperatura controlada. Curvas de regressão. Equação ajustada: (3.2).....	79
Fig. 7.15	- Sucção x tempo para 3 teores de cal curados em lona.....	91
Fig. 7.16	- Sucção x tempo para 3 teores de cal curados em câmara úmida.....	91
Fig. 7.17	- Sucção x tempo para 3 teores de cal curados em câmara de temperatura controlada.....	91
Fig. 7.18	- Sucção x teor de cal para 4 idades curados em lona.....	92

Fig. 7.19 - Sucção x teor de cal para 4 idades curados em câmara úmida.....	92
Fig. 7.20 - Sucção x teor de cal para 4 idades curados em câmara de temperatura controlada.....	92
Fig. 7.21 - Sucção x processo de cura para 3 teores de cal submetidos ao período de 7 dias.....	94
Fig. 7.22 - Sucção x processo de cura para 3 teores de cal submetidos ao período de 14 dias.....	94
Fig. 7.23 - Sucção x processo de cura para 3 teores de cal submetidos ao período de 28 dias.....	95
Fig. 7.24 - Sucção x processo de cura para 3 teores de cal submetidos ao período de 60 dias.....	95
Fig. 7.25 - Absorção x tempo para 3 teores de cal curados em lona.....	99
Fig. 7.26 - Absorção x tempo para 3 teores de cal curados em câmara úmida.....	99
Fig. 7.27 - Absorção x tempo para 3 teores de cal curados em câmara de temperatura controlada.....	99
Fig. 7.28 - Absorção x teor de cal para 4 idades curadas em lona.....	100
Fig. 7.29 - Absorção x teor de cal para 4 idades curadas em câmara úmida.....	100
Fig. 7.30 - Absorção x teor de cal para 4 idades curadas em câmara de temperatura controlada.....	100
Fig. 7.31 - Absorção x processo de cura para 3 teores de cal com idade de 7 dias.....	101
Fig. 7.32 - Absorção x processo de cura para 3 teores de cal com idade de 14 dias.....	101
Fig. 7.33 - Absorção x processo de cura para 3 teores de cal com idade de 28 dias.....	101
Fig. 7.34 - Absorção x processo de cura para 3 teores de cal com idade de 60 dias.....	101
Fig. 7.35 - Sucção x peso específico aparente seco para 4	

teores de umidade.....	107
Fig. 7.36 - Sucção x teor de umidade para 5 pesos específicos aparentes secos.....	110
Fig. 7.37 - Absorção x peso específico aparente seco para 4 teores de umidade.....	111
Fig. 7.38 - Absorção x teor de umidade para 5 pesos específicos aparentes secos.....	114
Fig. 7.39 - Aspecto do prisma após ensaio de Resistência à compressão simples.....	123
Fig. 7.40 - Modelo físico internacionalmente aceito para a ruptura dos prismas submetidos à compressão simples.....	123
Fig. 7.41 - Tipos de ensaios de aderência.....	137

LISTA DE QUADROS

Capítulo 2

- 2.1 - Recursos e reservas de carvão no país.....13
- 2.2 - Quantificação dos resíduos por segmento industrial...14
- 2.3 - Requisitos químicos e físicos para a cinza volante...14
- 2.4 - Requisitos químicos e físicos para cal hidratada.....19

Capítulo 3

- 3.1 - Composição das misturas de cinza volante e cal.....23
- 3.2 - Umidade ótima, peso específico aparente seco e carga de moldagem para sete misturas de cinza volante e cal.....26

Capítulo 4

- 4.1 - Resultados da análise química e física da cal dolomítica primor extra.....35
- 4.2 - Resultados da análise química e física da cinza volante de Charqueadas.....38
- 4.3 - Composição granulométrica da areia empregada na pesquisa.....41
- 4.4 - Composições granulométricas recomendadas por norma para areia utilizada em argamassas de assentamento...41

Capítulo 5

- 5.1 - Resultados dos ensaios de controle da argamassa.....47

Capítulo 7

- 7.1 - Resultados de RCS(MPa) e CV(%).....59
- 7.2 - Valores e F para influência do tempo na RCS -
Verificação em 7 misturas.....60
- 7.3 - Valores de F para influência do teor de cal na
RCS - Verificação em 4 idades.....61
- 7.4 - Análise de regressão não linear para a relação
RCS x tempo. Equação ajustada: (3.2).....63
- 7.5 - Análise de regressão não linear para a relação
RCS x teor de cal. Equações ajustadas: (3.3)*
e (3.4)*.....66
- 7.6 - Resistências mínimas exigidas pelas normas.....68
- 7.7 - Valores médios de RCS(MPa) e CV(%) de tijolos de
de cinza volante e cal submetidos a 3 tipos e
4 períodos de cura.....70
- 7.8 - Valores de F para influência do processo de cura
na RCS de 3 teores de cal em 4 idades.....70
- 7.9 - Análise de regressão não linear para a relação
RCS(MPa) x tempo(dias). Equação ajustada: (3.2).....74
- 7.10 - RCS para tijolos de cinza volante e cal curados em
estufa (100°C) por 48 hs - Mistura 85x15.....81
- 7.11 - Resultados de perda de peso corrigido (PPC) de
de tijolos de cinza volante e cal submetidos ao
ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.....82
- 7.12 - Valores médios de sucção(g/194cm²/g) e seus CV(%)
para tijolos de cinza volante e cal submetidos a
3 tipos e 4 períodos de cura.....87
- 7.13 - Valores médios de absorção(%) e seus CV(%) para
tijolos de cinza volante e cal submetidos a 3
tipos e 4 períodos de cura.....88
- 7.14 - Valores médios de absorção máxima(%) e CS de
tijolos de cinza volante e cal submetidos à 3
tipos e 4 períodos de cura.....88
- 7.15 - Valores de F_{calc.} para a influência do tempo na

sucção para 3 teores de cal sob 3 processos de cura.....	90
7.16 - Valores de F_{calc} . para influência do teor de cal na sucção de corpos de prova sob 4 idades e 3 processos de cura.....	93
7.17 - Valores de F_{calc} . para influência do processo de cura na sucção para 3 teores de cal sob 4 idades de cura.....	93
7.18 - Resultados de sucção para corpos de prova com teor de cal 15%, curados por 28 dias em câmara de temperatura controlada.....	96
7.19 - Valores observados de absorção.....	97
7.20 - Valores de F_{calc} . para influência do teor de cal na absorção de corpos de prova submetidos a 4 idades e 3 processos de cura.....	102
7.21 - Valores admissíveis para absorção máxima e CS segundo classificação ITINTEC e ASTM.....	104
7.22 - Valores de sucção e absorção para tijolos produzidos com várias umidades e pesos específicos aparente secos.....	106
7.23 - Valores de F_{calc} . para a influência do peso específico aparente seco na sucção de corpos de prova de 4 diferentes teores de umidade.....	108
7.24 - Comparação de médias(método de Duncan)- Influência do peso específico aparente seco na sucção para 4 umidades.....	108
7.25 - Valores de F para influência do teor de umidade da mistura na sucção de corpos de prova de 5 pesos específicos aparentes secos.....	110
7.26 - Valores de F para a influência do peso específico aparente seco na absorção de corpos de prova de 4 teores de umidade.....	112
7.27 - Comparação de médias (método de Duncan)-Influência do peso específico aparente seco na absorção para 4 umidades.....	112
7.28 - Resultados de absorção para corpos de prova com $\gamma_d = 12.75 \text{ KN/m}^3$ e umidade 30%.....	113

7.29 - Valores de F para influência do teor de umidade da mistura na absorção de corpos de prova com e pesos específicos aparentes secos.....	114
7.30 - Comparação de médias (método de Duncan)-Influência do teor de umidade na absorção para 5 pesos específicos aparentes secos.....	115
7.31 - Valores de RCS(MPa) de prismas e unidades de cinza volante e cal e relação entre os valores médios.....	119
7.32 - Análise estatística básica dos resultados de RCS (MPa) de unidades e prismas - amostra piloto.....	120
7.33 - Análise estatística básica dos resultados de RCS (MPa) de unidades e prismas - amostra definitiva.....	121
7.34 - Comparação dos coeficientes de variação médios entre unidades e prismas de material cerâmico e de cinza volante e cal.....	121
7.35 - Resultados de RCS(MPa), média(MPa) e CV(%) de corpos de prova (tijolos) ensaiados nas condições seco e saturado.....	124
7.36 - Valores do módulo de ruptura(resistência à tração) e RCS para tijolos de cinza volante e cal. Mistura 85 x 15 - idade 14 dias.....	126
7.37 - Efeito de diferentes materiais de junta na resistência à compressão de prismas e relação das resistências prisma/tijolo (HENDRY ³⁷).....	128
7.38 - Valores médios de RCS de tijolos e prismas cerâmicos e de cinza volante e cal.....	129
7.39 - Razões médias de resistência parede/prisma.....	129
7.40 - Resistência de aderência à tração por arrancamento (MPa) - Amostras G ₁ e G ₂	139
7.41 - Análise estatística básica - Grupos G ₁ e G ₂	140
7.42 - Resistência de aderência à tração por arrancamento (MPa) - Amostra definitiva.....	140
7.43 - Análise estatística básica - Amostra definitiva.....	141
7.44 - Resistência de aderência à tração por arrancamento	

(MPa) - Tijolos cerâmicos x tijolos de cinza volante e cal.....	142
7.45 - Resistência de aderência à tração por flexão (MPa)..	142
7.46 - Ensaio de resistência de aderência à tração por arrancamento - Tipos de ruptura observados e percentuais de ocorrência para os grupos G ₁ , G ₂ e definitivo.....	144

LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

- a,b - parâmetros (intersecção, inclinação) da equação ajustada em uma regressão.
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- abs - absorção
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- CP - corpo de prova
- CS - coeficiente de saturação
- CV - coeficiente de variação
- $F_{calc.}$ - valor de F (calculado) sendo F a distribuição de Fisher
- $F_{tab.}$ - valor de F (tabelado) sendo F a distribuição de Fisher
- ITINTEC - Instituto de Investigacion Tecnologica Industrial y de Normas Tecnicas
- MR - módulo de ruptura
- MW - moderate weathering
- n - tamanho (número de elementos) da amostra
- NW - negligible weathering
- r^2 - coeficiente de determinação
- RCD - resistência à compressão diametral
- RCS - resistência à compressão simples
- Se - erro padrão da estimativa
- SW - severe weathering
- T - valor de T (tabelado) para um nível de significância
- Ta - valor de T (calculado) para o parâmetro a (intersecção)
- Tb - valor de T (calculado) para o parâmetro b (inclinação)
- \bar{x} - valor médio de determinado grupo de observações
- w - teor de umidade
- γ_d - peso específico aparente seco

RESUMO

O carvão tem sido utilizado como fonte de energia por vários segmentos industriais, obtendo maior destaque na produção de energia elétrica através das usinas de termoeletricidade.

Os resíduos resultantes da queima do carvão são denominados cinzas e são altamente poluentes, seja quando lançados à atmosfera ou quando colocados em depósitos expostos ao ambiente. Além disso, o custo de armazenagem é bastante elevado.

A utilização de rejeitos industriais para a produção de materiais alternativos tem sido buscada por muitas organizações visando encontrar produtos substitutos mais baratos.

O encarecimento da produção de tijolos cerâmicos, devido ao preço crescente dos combustíveis tem incentivado a procura de materiais alternativos para a construção de alvenarias.

O principal objetivo desta pesquisa é investigar o comportamento geral de tijolos feitos de uma mistura de cinza volante e cal hidratada quanto às principais propriedades exigidas para o emprego em alvenaria, procurando reunir os interesses de utilização de rejeitos industriais e de redução de custos.

Inicialmente foram testadas sete diferentes misturas de cinza volante e cal, buscando determinar um teor que conduzisse a resultados aceitáveis de resistência à compressão simples e durabilidade. Escolhidos três teores, realizaram-se

ensaios de absorção e resistência à compressão simples, utilizando-se três diferentes processos de cura. Um único teor foi então selecionado e testes de absorção foram novamente executados buscando verificar a influência do teor de umidade e do peso específico aparente seco sobre os resultados. Este mesmo teor foi utilizado numa última etapa, onde executaram-se testes de aderência e resistência à compressão simples em prismas.

ABSTRACT

Coal has been used by various industrial sectors as a major source of energy, specially through the production of electricity in thermo-eletric power stations.

The ashes that result from the process of burning coal are highly polluting, both when discharged directly in the atmosphere and when kept in open deposits. Moreover, the cost of maintaining such deposits tends to be considerably high.

The use of industrial waste in the production cheaper alternatives for tradicional construction material has been investigated by several organizations.

Ceramic brick are among a class of construction material whose cost has increased considerably, due to the lising prices of fuel. This has encouraged the search for alternative material for building brick walls.

The main objective of this research work is to investigate the general behavior of bricks made from a mixture of fly ash and hydrated lime. The use of such a mixture has the potential of bringing together the importance of utilizing industrial waste and the necessity of keeping construction costs low.

The experimental work was divided into three main stages. The first stage consisted of carrying out compressive strength and durability tests, in order to find acceptable combinations of fly ash and hydrated lime. In the second stage, three of these combinations were chosen to be submitted to absortion and compressive strength tests, under three

different curing processes. The absorption tests were repeated for one of the combinations, using the water content and the dry density as variables. In the final stage, both the adherency test and the compressive strength test were carried out for one of the mixtures.

1. INTRODUÇÃO

O crescente consumo de energia do mundo moderno tem levado à utilização de todas as fontes energéticas conhecidas.

O carvão, como gerador de energia termoelétrica, é uma destas fontes, assumindo papel importante nos estados do sul do Brasil, especialmente no Rio Grande do Sul que concentra as maiores jazidas.

O carvão mineral pulverizado, ao ser queimado, produz como resíduo a cinza, material poluente que contamina os locais onde se deposita.

A produção gaúcha de cinzas leves e pesadas, no ano de 1989, segundo estimativas da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC^{SP}, foi de aproximadamente 910.000 toneladas. Com a entrada em funcionamento das usinas Jacuí I e Candiota III, que se encontram em fase de construção, esta estimativa passaria a 3.000.000 de toneladas/ano.

O resíduo resultante da queima divide-se em duas frações, cinza de fundo (ou pesada) e cinza volante (ou leve), sendo esta última produzida em maior quantidade.

Atualmente, muitos setores têm estudado o aproveitamento dos rejeitos industriais buscando obter produtos mais vantajosos técnica e economicamente. O ramo da construção civil encontra-se entre eles.

A principal utilização que tem sido dada à cinza volante é como aditivo ao cimento na fabricação de cimento portland pozolânico. Porém, enquanto o uso do carvão como material combustível tem sido crescente, a utilização da cinza

volante na produção de cimento depende da demanda deste. Ainda em 1989, enquanto o consumo estimado de cinza volante em cimenteiras foi de 270.000 toneladas a sua produção estimada foi de 560.000 toneladas²².

A CIENTEC, visando ampliar o aproveitamento dos resíduos do carvão tem realizado estudo tecnológico de misturas para executar bases de pavimento utilizando cinza volante, cal e solo (Projeto de Pesquisa CICASOL)²³.

A presente pesquisa, desenvolvida em conjunto com a CIENTEC, procurou verificar a viabilidade técnica da produção de tijolos moldados com cinza volante e cal para uso na construção civil.

Como a principal utilização dos tijolos está na construção de alvenarias, os resultados obtidos foram comparados aos dos tijolos cerâmicos que são, ainda hoje, o material mais empregado para este fim. Em alguns casos a comparação foi feita com outros materiais, porém em menor escala.

Os tijolos cerâmicos vêm se tornando cada vez mais caros devido ao constante aumento dos combustíveis utilizados no seu processo de queima, o que reforça o interesse pelo estudo de materiais alternativos.

Os objetivos deste trabalho são, portanto, verificar a viabilidade técnica dos tijolos de cinza volante e cal como material alternativo para emprego na construção civil e, através de uma nova utilização encontrada para as cinzas volantes, contribuir para a amenização do problema ambiental causado pelas mesmas.

Acredita-se que este material seja viável economicamente, já que não sofre processo de queima, evitando os gastos com combustíveis, e utiliza como material principal a cinza volante, cujo custo de produção pode ser desconsiderado devido a tratar-se de um rejeito industrial. Estudos mais aprofundados fazem-se necessários para verificação dos custos

de implantação de uma indústria, da possibilidade de adaptação de equipamentos já existentes ou da necessidade de aquisição de novos tipos, dos custos indiretos como o transporte dos materiais e também da adaptação dos métodos de produção à situações mais favoráveis economicamente. Esta pesquisa, no entanto, objetivou verificar apenas a viabilidade técnica do material.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. HISTÓRICO DO USO DA CINZA VOLANTE E DA CAL

A cal tem sido utilizada pela humanidade desde as mais antigas civilizações, tendo participado nas grandes obras que marcaram os períodos históricos, principalmente como ligante dos materiais de construção de suntuosos monumentos. Os romanos, os egípcios, os gregos e os chineses a usaram nas mais variadas aplicações.

Dos tempos proto-históricos ou mesmo pré-históricos data a construção do castelo de Paderne. CASANOVA³⁰ cita uma descrição feita pelo frei Agostinho de Santa Maria: "é muito forte o castelo por serem as suas paredes obradas em 'formigão', coisa tão forte que parece excedia no material às obras de pedra. Deste sistema de construção se serviam os antigos lusitanos, segundo uns por o terem aprendido dos fenícios. O certo é que os antigos escritores referindo-se a este cimento especial, chamam-lhe 'argamassa fenícia' ao qual se referiu Plínio - His.Nat.Lib XXXV, cap XIV - quando escreveu que em as Hispanias e Africa se formavam umas paredes de terra que permaneciam firmes e eternas, apesar dos séculos, dos ventos, dos incêndios e das chuvas". Acredita-se que esta argamassa fenícia fosse uma mistura de solo e cal.

Argilas estabilizadas com cal foram utilizadas na cidade bíblica de Jericó (3000 a.C.) e na muralha da China (séc. III a.C.)³⁰.

Os romanos do século VII a.C., na ilha de Santorim, usaram solo vulcânico para tornar mais resistente à água as argamassas de cal que revestiam as cisternas. Estes solos vulcânicos possuíam material pozolânico. A denominação

"puzzolana" teve origem na cidade italiana de Pozzuoli devido ao fato desta ter se tornado famosa pelo comércio de materiais procedentes do Vesúvio. Em 312 a.C., quando os romanos iniciaram a construção da via Ápia e dos primeiros aquedutos, cinzas vulcânicas foram misturadas à cal viva (CaO) para obtenção de uma argamassa hidráulica que ligasse as pedras utilizadas²⁴.

A cinza vulcânica foi também aproveitada na construção do desembarcadouro de Calígula (séc. I a.C.), do Panteão (27 a.C.) e do Coliseu (80 d.C.), entre outras obras. Na construção do Panteão foi utilizada uma mistura de cal moída com duas a três partes de cinza vulcânica. Foram encontrados agregados na forma de pedaços de rocha, tijolos quebrados, fragmentos de mármore e até pedaços de ferro e bronze. A estrutura do desembarcadouro de Calígula foi encontrada quando das escavações realizadas para a construção do Porto de Pozzuoli em 1950. Grandes seções de concreto foram descobertas intactas, apesar de terem estado submersas por aproximadamente 2000 anos²⁵.

A cal tem sido usada em larga escala até os dias de hoje por ser um dos aglomerantes mais baratos, apesar das tentativas de substituí-la por sais e resinas²⁶.

O uso das pozolanas aumentou no século XX devido à proliferação das termoelétricas no mundo todo. A busca de um produto novo de menor custo, bem como a preocupação com os efeitos poluentes da cinza volante, oriunda da queima do carvão, têm levado vários organismos a estudarem a sua utilização como material de construção.

Datam do final do século XIX e início do século XX os primeiros estudos para a combinação do cimento portland com a pozolana resultando no cimento portland pozolânico²⁴.

A primeira utilização da cinza volante como agente cimentante no concreto ocorreu em 1936, nos Estados Unidos, na construção de alguns quilômetros de parede de retenção ao redor

do lago Michigan, e em 1938 iniciou-se o seu aproveitamento como substituto do cimento na pavimentação⁴⁷.

O uso das cinzas volantes para produção de blocos para alvenaria, segundo SLONAKER⁴¹, parece ter se iniciado por volta dos anos quarenta pois ele encontrou material bibliográfico, daquela época, referindo-se a tijolos de cinza volante que apresentavam fissuras.

Em 1967 reuniram-se nos Estados Unidos alguns estudiosos de vários países para apresentarem o que vinha sendo desenvolvido em termos da utilização das cinzas do carvão. Vários temas foram tratados como por exemplo, especificações, restrições e produção de cinza volante, problemas de mercado, utilização da cinza volante no concreto, na construção de estradas, em blocos de concreto, em tijolos, como agregado leve, na agricultura e experiências realizadas em países como França, Alemanha, Polônia e outros.

Os americanos, estudando tijolos de cinza volante, realizaram testes e obtiveram resultados equivalentes e até mesmo superiores àqueles obtidos com tijolos cerâmicos convencionais. Estes tijolos eram produzidos com uma mistura de 74% de cinza volante, 23% de cinza pesada e 3% de silicato de sódio e submetidos à queima²⁷.

SHAFER²² estudou oito cinzas volantes e oito cinzas pesadas diferentes, buscando minorar os custos e melhorar as propriedades destes tijolos. Analisou os teores utilizados, principalmente do silicato de sódio, que era o componente mais caro da mistura e concluiu que um pequeno acréscimo no teor de cinzas leves melhorava a qualidade dos tijolos e que uma redução no silicato de sódio para 2.5% reduzia o custo sem prejudicar o resultado final.

SNYDER²² comentou as dificuldades encontradas na utilização da cinza volante que, além de ser muito heterogênea, praticamente não possuía especificações e as poucas que existiam eram inadequadas devido à falta de conhecimento sobre o material. A grande variabilidade das cinzas obrigava a

testes constantes cujo custo, às vezes, era maior que o ganho com o novo material. Foi recomendada a criação de depósitos com cinzas adequadamente caracterizadas.

MINNICK⁴³ realizou um estudo detalhado sobre as reações da cal hidratada com a cinza volante. Utilizou cinco cais e oito cinzas volantes diferentes misturadas com areia e submeteu os espécimes a difratometria de raio-X, estudos dimensionais e microscópicos, análise térmica diferencial e reatividade pozolânica.

CAPP e SPENCER²⁷ publicaram um sumário sobre as utilizações que vêm sendo dadas às cinzas volantes. No que tange aos tijolos, além daquelas já comentadas aparecem também misturas de argila com cinza volante, cinza grosseira com cinza volante e areia com cinza volante. O primeiro tipo buscava melhorar a plasticidade de certas argilas, o segundo incrementar a resistência dos tijolos antes da queima e o último produzir um bloco não queimado onde a cinza volante deveria possuir teor de cal para possibilitar pozolanicidade. Os resultados foram satisfatórios, à exceção do terceiro tipo que apresentou resistências mais baixas. Estas, contudo, foram ainda admissíveis para outras finalidades que não o suporte de cargas.

REIDELBACH⁵⁰ fez uma análise das possibilidades de industrialização do tijolo e concluiu que, havendo uma redução de um terço no peso e no custo, em relação aos tijolos de argila, mantendo iguais as outras condições, já haveria vantagem na produção.

SIEFFERT⁵³ queimou blocos numa estação experimental para determinar a possibilidade de um curto ciclo de queima. A conclusão à que chegou foi que os tijolos de cinza volante podem ser queimados num período de três a cinco horas, enquanto que os convencionais de argila levam de trinta a quarenta horas.

SLONAKER, do Coal Research Bureau of West Virginia University publicou uma série de relatórios a respeito da

pesquisa desenvolvida com tijolos de cinza volante. Os teores básicos da mistura foram 72% de cinza volante, 25% de cinza pesada e 3% de silicato de sódio, variando depois conforme o assunto estudado.

O relatório 122^º apresentou o efeito do hidróxido de sódio sobre os sais solúveis em água presentes na cinza volante. Estes prejudicam o produto causando queda na resistência (principalmente nos tijolos ainda não queimados) e aumento de absorção. Foram testados vários teores de hidróxido de sódio sobre diferentes níveis de sais solúveis para encontrar-se a quantidade ótima a ser adicionada à mistura capaz de eliminar os efeitos destes.

Uma temperatura ótima de queima, que levou a um bom produto, com o menor consumo de combustível possível foi determinada e apresentada no relatório 128^º.

No relatório 149^º foi feito um comentário sobre a economia obtida com o tijolo de cinza em relação ao de argila, abrangendo desde a obtenção de matéria prima até o produto final.

SLONAKER^º buscou ainda aumentar a durabilidade dos tijolos com a substituição de parte da cinza volante por uma outra que possuía partículas menores. O resultado foi uma diminuição da absorção. Como a água dentro do tijolo pode congelar e com a expansão de volume causar o rompimento deste, a diminuição da absorção leva a uma maior durabilidade. Também foi utilizada uma cinza de fundo mais leve, mas os resultados não se alteraram com esta troca.

No relatório 153^º foi procurada uma diminuição do peso dos tijolos. A cinza de fundo foi substituída por agregado leve de cinza volante. Houve uma redução na densidade volumétrica sem alterar muito as outras características, ficando todos os corpos de prova acima da classificação tipo MW do sistema unificado de classificação da ASTM. Além disso, melhorou a propriedade de isolamento térmico. O tijolo final

teve um redução de peso de 25% em relação aos blocos equivalentes de argila.

BERETKA e BROWM²⁷ investigaram as várias utilizações da cinza volante fazendo estudos sobre seu uso no cimento, no concreto, como agregados sintéticos, na produção de material leve com incorporação de ar, em estradas e pavimentos e na produção de tijolos e blocos. Segundo estes autores, tijolos de argila misturados com cinza volante ou pesada já eram conhecidos desde duzentos anos e são produzidos comercialmente na Grã-Bretanha, USA e França. Na Austrália produzem-se tijolos de cinza volante e cimento em Queensland. No estudo destes autores testes de resistência foram realizados em duas séries de amostras. A primeira era representada por corpos de prova produzidos com doze cinzas volantes diferentes misturadas com 50% de argila. Na segunda, quantidades crescentes de dois tipos de cinzas volantes (uma de boa e outra de má qualidade) eram adicionadas à argila. Os corpos de prova eram queimados em forno. Os resultados demonstraram que apenas três das doze cinzas experimentadas conduziam a resultados mais favoráveis que o tijolo cerâmico de controle e que as quantidades crescentes de cinza de boa qualidade levavam a um aumento da resistência mecânica enquanto que maiores teores da cinza de má qualidade causavam um decréscimo da mesma.

O Central Building Research Institute of India⁴⁴ tem estudado a produção de materiais mais baratos utilizando solos de diferentes origens misturados com cinza volante. O alto custo da queima dos tijolos vem sendo minimizado com a utilização de resíduos, como por exemplo a casca de arroz, como combustível.

MANZ⁴² relatou um trabalho que foi realizado em 1960 para a Otter Tail Power Company, Fergus Falls Minnesota, e que foi reativado e enfocado nos produtos da Great Plains Gasification Plant in Beulah, North Dakota. O estudo utilizou amostras com teores baseados nos produtos do Coal Research Bureau of West Virginia University, já referidos, e descobriu que para as cinzas testadas os melhores resultados de

resistência eram obtidos quando o silicato de sódio era eliminado. Foi encontrada uma mistura ótima formada de 55% de cinza leve e 45% de cinza pesada, queimada em forno. Num segundo passo foi testada uma cinza volante rica em óxido de cálcio, eliminando a queima dos tijolos. Eles foram simplesmente prensados e secos a 100°C. Suas próprias reações pozolânicas foram responsáveis pelo endurecimento. Os resultados dos dois tipos respeitaram as exigências da ASTM quanto à resistência e absorção. A resistência do grupo submetido à queima ficou bem acima do outro, porém, a economia conseguida foi bastante atraente para a utilização do produto não queimado. A absorção não variou. Painéis de tijolos de ambos os tipos haviam sido construídos e deixados expostos ao meio ambiente por cerca de dezesseis anos. Acima deste período eles apresentaram pequena deterioração.

DAY²¹ realizou ensaios moldando cilindros de cinza volante ou de misturas de cinzas volante e pesada adicionando, separadamente, hidróxido de sódio, carbonato de sódio, silicato de sódio (que são materiais ligantes) ou água pura. Os resultados de resistência em sua maioria atenderam às exigências da ASTM para o tipo SW. Já no ensaio de absorção em água fervente - 5hs, alguns tijolos caíram para a faixa NW. As absorções iniciais foram muito altas. Análises físico-químicas foram realizadas demonstrando as transformações ocorridas durante a queima na estrutura do material. Os valores elevados de absorção foram explicados devido a alta porosidade apresentada pelo produto depois de queimado.

BARADAN²² executou ensaios com amostras de cinza volante misturadas a diferentes teores de cimento portland, cal virgem e cinza de fundo. Os espécimes eram curados a 60°C e 100% de umidade relativa por três horas e então ficavam aguardando ensaio podendo ser manuseados sem perigo. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e flexão foram bons mas os de absorção foram elevados e surgiram algumas eflorescências.

No Brasil, os estudos das misturas de cinza e cal são bem mais recentes e em menor quantidade. A maioria dos trabalhos acha-se relacionada à estabilização de solos para a construção de estradas. Nos estados produtores de carvão, especialmente Santa Catarina e Rio Grande do Sul, tem crescido o interesse pelo aproveitamento das cinzas resultantes da queima do mesmo, principalmente pelas termoelétricas, devido ao fato de agravar-se o problema de armazenamento e poluição ambiental.

SILVA⁵⁴ estudou a estabilização de solos com cinza volante e cal para utilização em pavimentação e produção de tijolos. Os resultados de resistência à compressão dos tijolos foram bons, mas a absorção ficou acima do estabelecido pelas normas.

Na Universidade de Caxias do Sul⁴⁹ foram estudados blocos de concreto celular de média densidade, com adição de cinza volante, usando a tecnologia desenvolvida em países europeus. A cinza utilizada mostrou-se adequada e o produto, em certos aspectos, superior aos seus similares no exterior. Este trabalho que se encontra em sua primeira fase pretende continuar em escala piloto visando a definição de modelos de utilidade e de processos industriais.

2.2. ORIGEM DA CINZA VOLANTE

A cinza é o resíduo originado da queima do carvão pulverizado na câmara de combustão a temperaturas variáveis entre 1000 e 1500°C sendo formada a partir dos componentes não combustíveis do carvão e também de partículas não queimadas devidas à combustão incompleta.

Ao material que se aglomera caindo no fundo da câmara dá-se o nome de cinza de fundo ou cinza pesada. Aos resíduos que, por serem mais leves, são arrastados pelos gases de exaustão chama-se cinza volante ou cinza leve.

Ao flutuar em direção à chaminé, a cinza volante é coletada mecanicamente por ciclones e precipitadores eletrostáticos. Dos coletores, onde já sofre um processo de resfriamento, é retirada por intermédio de parafusos transportadores, até o equipamento pneumático que a conduzirá ao silo de armazenagem⁴⁷.

A cinza volante é um material pozolânico. Segundo a ASTM C 595⁵⁵, pozolana é um material silícico ou sílico-aluminoso que, por si só, apresenta pouco ou nenhum valor cimentante, mas que, na forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, em temperaturas ordinárias, para formar compostos que apresentam propriedades cimentantes.

As cinzas podem ser originadas de outros materiais como por exemplo as cinzas de casca de arroz. A grande quantidade de cinzas produzidas no sul do Brasil é, no entanto, oriunda de termoelétricas. O quadro 2.1 apresentado por MÜLLER⁴⁵ contém as reservas de carvão da região sul e São Paulo e o quadro 2.2, elaborado por SILVA⁵⁵, mostra a produção de cinzas de todas as empresas que consomem carvão no Rio Grande do Sul, dividido por segmento industrial.

As cinzas volantes de diferentes termoelétricas brasileiras são constituídas mineralogicamente por uma fase vítrea principal de natureza sílico-aluminosa e, secundariamente, por mulita, quartzo, hematita e magnetita. Esta segunda fase, de natureza cristalina, é inerte à temperatura ambiente. Na fase vítrea encontram-se os componentes ativos que, a temperaturas normais, reagem com a cal formando fases hidratadas endurecedoras⁴¹.

Os elementos que aparecem em maior quantidade são o óxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). As normas mundiais requerem para a soma destes óxidos um mínimo de 70 a 75% da composição das cinzas⁴⁷.

As partículas que compõe a cinza são pequenas, esféricas, com diâmetro que pode variar de 0.5 a 200 micra, de

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	JAZIDA	CAMADA	RESERVAS (x 10 ⁹ t)			RECURSOS POTENCIAIS	RECURSOS IDENT. TOTAIS (x 10 ⁹ t)
			MED.	IND.	INF.		
SÃO PAULO	CERQUILHO		2,00	1,00	-	5,00	8,00
	BURI		2,50	-	-	-	2,50
	SUB - TOTAL			4,50	1,00	-	5,00
PARANÁ	BARBOSA		0,40	-	-	-	0,40
	IBAITÍ		0,15	-	-	-	0,15
	CARVÃOZINHO		0,20	-	-	-	0,20
	F. DE OLIVEIRA		-	0,14	-	-	0,14
	CAMBUÍ		29,00	16,00	25,00	-	70,00
	SAPOPEMA		42,00	3,00	-	-	45,00
	PELAME		0,28	-	-	-	0,28
	S. APARADO		3,50	3,50	-	-	7,00
	MARTINS		0,65	-	-	-	0,65
	IMBITUVA		-	-	-	0,65	0,65
	RIB. ANTAS		-	-	-	2,00	2,00
	CAMP. DOS PUPOS		2,20	0,80	-	-	3,00
SUB - TOTAL			78,38	23,44	25,00	2,65	129,47
SANTA CATARINA	SUL CATARINENSE	BARRO BRANCO	338,20	387,00	122,20	-	847,40
		IRAPUÁ	10,00	-	-	-	10,00
		PONTE ALTA	-	-	119,00	-	119,00
		BONITO	212,14	488,90	562,36	-	1.263,40
SUB - TOTAL			560,34	875,90	803,56	-	2.239,80
RIO GRANDE DO SUL	CANDIOTA	CANDIOTA, CANDIOTA SUPERIOR E INFERIOR	1.743,00	4.132,00	2.570,00	3.500,00	11.945,00
	CAPANÉ	JERIBA E CAPANEZINHO	-	-	-	1.037,00	1.037,00
	SÃO SEPÉ	SÃO SEPÉ	10,26	2,98	-	-	13,24
	IRUÍ	IRUÍ SUP. E INF.	110,84	416,30	634,84	503,02	1.665,00
	PANTANO GRANDE	S ₂ / S ₃ / I	-	-	-	148,00	148,00
	BUTIÁ - LEÃO	S ₂ / S ₃ / I / I ₂ / I ₃ / I ₄	139,51	237,27	506,37	2.116,85	3.000,00
	SUL DO LEÃO	S ₂ / S ₃ / I	-	-	-	18,00	18,00
	CHARQUEADAS	SB/MB/I ₁ F/I ₂ B/I ₃ F	313,96	682,63	321,95	-	1.318,54
	SANTA RITA	SB/MB/I ₁ F/I ₂ B/I ₃ F	-	-	100,00	-	100,00
	GUAIBA	SB/MB/I ₁ F/I ₂ B/I ₃ F	-	-	200,00	-	200,00
	MORUNGAVA / CHICO LOMA	CL ₂ /CL ₃ /CL ₄ /CL ₆ /CL ₈ .1 CL ₆ .2/M ₁ /M ₂ /M ₄ /M ₆ /M ₈	187,35	359,02	935,36	1.602,27	3.084,00
	SANTA TEREZINHA	ST ₄ /ST ₆ /ST ₆ /ST ₇	114,20	249,12	674,78	3.245,00	4.283,00
	TORRES	B.BR./PA/A/B.SUP.E INF. PRÉ BON.SUP.E INF.	-	-	-	1.802,00	1.802,00
SUB - TOTAL			2.619,12	6.079,32	8.943,20	13.972,14	28.613,78
BRASIL	TOTAL GERAL		3.262,34	6.979,66	6.771,70	13.979,79	30.993,55

QUADRO 2.1 - RECURSOS E RESERVAS DE CARVÃO DO BRASIL

Obs: as reservas acima não devem ser tomadas como lavráveis.
Fonte: DGM/DNPM/CPRM⁴⁵.

Indústrias	carvão comprado e/ou consumido(ton)	cinza volante(ton)	cinza pesada(ton)
Termoelétricas	1.213.533	417.765	148.715
Petroquímicas	531.787	90.822	97.150
Papel/Papelão	229.177	52.667	26.673
Alimentos	129.362	-	68.048
Cimento	118.878	-	-
Siderúrgica	72.766	-	-
Cerâmica	31.179	-	17.433
Fumo	4.847	-	2.481
outros	1.930	-	965
Total	2.333.459	558.254	357.583
Total %	100,00	23,92	15,32

QUADRO 2.2 - Quantificação dos resíduos por segmento industrial

Requisitos químicos	ASTM C618	ASTM C593
óxido de silício (SiO_2)%, mín. óxido de alumínio (Al_2O_3)%, mín. óxido de Ferro (Fe_2O_3)%, mín.	70.0	-
óxido de sódio (Na_2O)%, máx. óxido de enxofre (SO_3)%, máx. Perda ao fogo (950°C)%, máx.	1.5 3.0 6.0	- - -
Requisitos físicos		
Material retido na peneira { 325 30 200 (% máx.)	34.0 - -	- 2.0 30.0
índice de atividade pozolânica - com cimento portland, 28 dias (% mín.) - com cal, 7 dias (KPa)	75 5500	- 4000

QUADRO 2.3 - Requisitos químicos e físicos para cinza volante

cor clara a escura, segundo o conteúdo de carbono⁴⁸.

Associada aos grãos de cinza é comum a ocorrência de carbono amorfo, que é uma substância deletéria⁴¹.

Fatores como o teor de óxidos, finura, superfície específica e perda ao fogo influem na pozolanicidade das cinzas dando-nos uma primeira idéia sobre a qualidade das mesmas⁴¹.

O quadro 2.3 apresenta os requisitos químicos e físicos conforme ASTM C 618⁴⁸, que fornece especificações para cinza volante a ser utilizada no concreto de cimento portland e ASTM C593⁴⁷, que refere-se a cinzas para utilização com cal.

Segundo KIHARA⁴¹, os óxidos de silício, alumínio e ferro intervêm no comportamento pozolânico da cinza por serem os constituintes básicos da fase vítrea, que é a parte ativa na mistura. Assim, quanto maiores forem os seus teores, mais reações irão ocorrer.

A finura é importante porque às menores partículas correspondem as superfícies específicas maiores, que conduzem a maiores pontos de contato entre os diversos elementos reativos. O controle da finura das cinzas pela superfície específica é significativo quando se analisam cinzas de uma mesma termoelétrica, deixando de sê-lo na comparação com as de outras origens, devido às diferenças em massa específica, distribuição e morfologia das partículas e conteúdo de carbono. Em vista da dificuldade de correlacionar-se a atividade pozolânica com a superfície específica é também recomendado o uso da finura obtida por peneiramento.

Citando Brink e Halstead, KIHARA⁴¹ comenta a existência de uma proporção inversa entre o volume do resíduo na peneira de malha 0.044mm e a atividade pozolânica das cinzas.

Ainda o mesmo autor, baseando-se em pesquisas de Scandiuzzi e Andriolo que estudaram misturas de cinza volante e cal do Rio Grande do Sul e Santa Catarina moídas a

granulometrias diferentes, verificou que, com o aumento da finura Blaine de 2962 a 7142 cm^2/g e uma diminuição do resíduo na peneira nº 200 de 61.5 para 3.0%, observava-se um aumento notável da atividade pozolânica com cal (de 3820 para 10540 KPa) e com cimento (de 74 para 140%). A finura adequada às cinzas volantes brasileiras para torná-las mais ativas ficaria entre 5000 e 7000 cm^2/g .

O índice de atividade pozolânica revela a capacidade de combinação da cinza volante com a cal ou o cimento portland para formar materiais cimentantes.

O fator perda ao fogo indica o teor de não queimados, ou seja, material orgânico presente devido à combustão incompleta do carvão. Este material não reage em contato com a cal.

O teor de óxido de enxofre também deve ser determinado porque o mesmo pode interferir nas reações entre a cinza volante e a cal. O processo ocorre da seguinte forma, a adição de cal na mistura traz como consequência imediata a elevação do PH do meio, tornando-o bastante agressivo, propício para solubilizar os íons Ca^{++} , Si^{++++} e Al^{+++} , que em PH normal são insolúveis e que irão reagir entre si³³. Se houver SO_3 em quantidade excessiva, o mesmo pode combinar com a água presente na mistura originando H_2SO_4 que, sendo um ácido vai reduzir a alcalinidade do meio. Além disso, o SO_3 pode também combinar-se com o Ca^{++} formando sulfato e reduzindo, portanto, a quantidade de cálcio capaz de reagir com os silicatos e aluminatos da cinza.

O teor de óxido de sódio (Na_2O), especificado pela norma ASTM C618 é importante quando a cinza for utilizada para a elaboração de concretos que contenham agregados reativos, devendo-se limitar o conteúdo de álcalis. Quanto à utilização da cinza, misturada à cal, para produção de tijolos, não foi encontrada referência sobre o papel exercido por este óxido na mistura.

2.3. ORIGEM DA CAL

A cal é um aglomerante obtido pela calcinação dos calcários (CaCO_3) ou dolomitos (MgCO_3) através de uma reação química de decomposição térmica.

Segundo GUIMARAES²³ o calcário ou dolomito é aquecido à temperatura de dissociação dos carbonatos e nela mantido por um certo tempo, em ambiente onde a remoção do dióxido de carbono seja possível, surgindo então o óxido de cálcio ou óxido de magnésio. Embora o processo químico seja simples, a produção em escala industrial é bem complicada. Podem ocorrer fenômenos de crepitação, causados pela presença de umidade ou matéria orgânica, que podem levar à desintegração da rocha em aquecimento, impedindo a calcinação pela obstrução da passagem de gases. A velocidade da fase de aquecimento e a escolha da temperatura de dissociação também afetam sensivelmente a qualidade da cal obtida. Além destes fatores, a qualidade e o tipo de combustível, a percentagem e a composição dos minerais que acompanham os carbonatos, os vários modelos de fornos, obrigam ao uso de uma sofisticada técnica pela indústria na busca de qualidade.

Para a comparação de resultados alcançados com a utilização de vários tipos de cais deve-se conhecer, a priori, algumas variáveis:

a) tipo de rocha que a produziu quanto a sua cristalinidade, umidade, qualidade, teor de impurezas, frequência de diaclases e a granulometria utilizada.

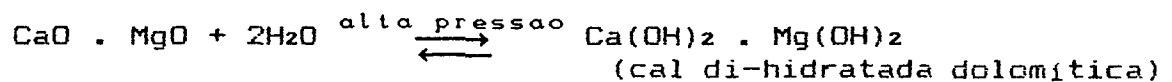
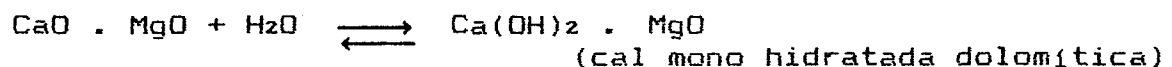
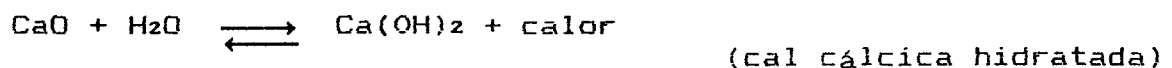
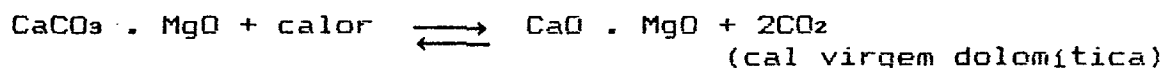
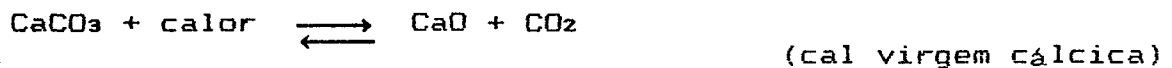
b) tipo de calcinação utilizada, com sua razão de aquecimento, temperatura, duração, tiragem e qualidade do combustível.

c) característica da cal resultante - índices de porosidade, densidade, contração em relação à rocha original, área superficial e tamanho dos cristais, coloração e densidade aparente.

Existem vários tipos de cais, sendo a cal hidratada a mais empregada para a estabilização devido à facilidade de aplicação⁴⁷.

A cal hidratada é definida como o pó obtido pelo tratamento da cal virgem pela água, em quantidade bastante para satisfazer a sua afinidade química nas condições de hidratação. Assim como a cal virgem ela pode ser do tipo cálcica ou dolomítica, sendo que esta pode apresentar-se como cal monohidratada dolomítica, quando hidratada a pressões normais, e cal di-hidratada dolomítica quando o processo ocorre a pressões mais elevadas.

As reações de formação da cal virgem e da cal hidratada são as seguintes:



Segundo algumas normas pesquisadas, as principais determinações a serem realizadas numa cal para verificação de sua qualidade são a composição química e a finura.

O quadro 2.4 apresenta os limites estabelecidos para estes requisitos pelas normas NBR 7175⁴⁴, que estabelece valores para cal hidratada para argamassas, ASTM C821⁴⁷, referente a cal para uso com pozolanas e IRAM 1508³⁸, destinada à cal hidráulica para construção.

A quantidade de óxidos representa o grau de pureza da cal, indicando, conseqüentemente, um maior número de reações possíveis entre esta e a cinza volante.

Os teores de anidrido carbônico e resíduo insolúvel, ao contrário, demonstram o nível de impurezas que a cal pode conter.

Quanto às propriedades físicas, busca-se conhecer a finura da cal. A determinação das dimensões da partícula é difícil e a norma brasileira atém-se apenas ao peneiramento, detectando partículas grandes (maiores de 0.075mm), que são indícios de hidratação incompleta e impurezas minerais²¹. A norma ASTM C821 utiliza a superfície específica Blaine para a determinação da finura. GUNTHER²⁴, no entanto, afirma que o processo utilizado para determinação da mesma (permeabilidade do ar) está cheio de imperfeições quando se trata de medir a finura da cal, por ser um material extremamente fino. O tamanho das partículas é uma característica importante, porque quanto menores forem as dimensões das mesmas, maiores serão suas superfícies específicas, aumentando, portanto, as áreas de ataque no momento das reações, ou seja, mais partículas poderão combinar-se entre si²³.

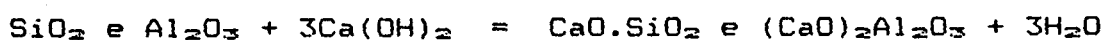
PROPRIEDADES	NORMAS	DETERMINACOES	REQUISITOS
QUÍMICAS	NBR7175	anidrido carbônico (CO ₂) (%) $\left\{ \begin{array}{l} \text{fábrica} \\ \text{depósito} \end{array} \right.$	≤ 5 ≤ 7
		óxidos totais (CaO + MgO) na base de não voláteis(%)	≥ 88
	IRAM1508	resíduo insolúvel (%)	≤ 5
FÍSICAS	NBR 7175	finura-peneiramento (% retido, acumulado) $\left\{ \begin{array}{l} n^{\circ} 30 \\ n^{\circ} 200 \end{array} \right.$	≤ 0.5 ≤ 15
		ASTMC821	superf. espec. Blaine(cm ² /g)

QUADRO 2.4 - Requisitos químicos e físicos para cal hidratada.

2.4. MECANISMOS DA REAÇÃO ENTRE A CAL E A CINZA VOLANTE.

As reações que ocorrem entre a cal e a cinza volante são muito complexas e ainda não foram inteiramente definidas⁴⁷.

Aparentemente a reação crítica ocorre entre o hidróxido de cálcio e os minerais de alumínio e sílica presentes na cinza volante, produzindo os silicatos e aluminatos. A reação química seria aproximadamente a seguinte:



Estudos realizados por Minnick⁴⁸ indicam que o material cimentante principal formado na reação é um membro da família tobermorita, o silicato de cálcio hidratado, seguido do sulfoaluminato de cálcio hidratado ou etringita. Todavia, como grande parte das pozolanas contém quantidades variáveis de sílica, outros compostos envolvendo ferro, alumina e álcalis podem ser formados. Análises de raio-X demonstraram que o hidróxido de cálcio é usado em quantidades significantes nos primeiros estágios da reação (dentro de quatro semanas). Se houver óxido de cálcio presente na cal hidratada ou mesmo na cinza, este material vai hidratar em presença da água e então estará disponível para reação.

Vários são os fatores que influenciam os resultados das reações pozolânicas. Em primeiro lugar vem a qualidade dos materiais. Algumas pesquisas têm sido realizadas no sentido de determinar as características das cinzas de boa qualidade de forma a encontrar graus de pozolanicidade.

KIHARA⁴¹, citando MASSAZA e COSTA observou que a curto prazo a atividade pozolânica está relacionada fundamentalmente à superfície específica e, a longo prazo, ao conteúdo de sílica e alumina reativas. Com o aumento destas cresce a resistência do produto obtido. Cinzas com maior

superfície específica (menores grãos) além de serem mais reativas produzem misturas com maiores densidades.

Os ensaios de atividade pozolânica são realizados em idades curtas (7 e 28 dias), predominando neste período a ação da superfície específica sobre a fase vítrea. As cinzas volantes brasileiras apresentam, de um modo geral, características químicas e mineralógicas adequadas a uma pozolana de boa qualidade, mas a finura é insuficiente. Desta forma o ensaio de pozolanicidade não representaria todo o potencial da cinza ensaiada.

O grau de cristalização das cinzas também influencia nas reações. O desarranjo estrutural implica na presença de átomos que não atingiram posições de mínima energia livre, tornando os materiais instáveis em meio agressivo³³. As cinzas queimadas a temperaturas muito elevadas atingem alta cristalização, o que impede o seu ataque pelo íon cálcio.

Quanto à cal, existem várias marcas no mercado e o teor de óxidos varia de uma para outra. Logicamente, as cals com menor teor de impurezas apresentarão maior reatividade.

A cal virgem, quando utilizada na estabilização de solos, produz misturas mais resistentes que aquelas com adição de cal hidratada, mas devido a periculosidade no manuseio, pela sua causticidade, não é utilizada. Para as cals hidratadas cálcica e dolomítica, o comportamento muda de acordo com o tipo de cinza utilizado. Na maioria dos casos, porém, a dolomítica costuma apresentar maiores resistências a temperaturas normais⁴⁷.

Segundo MINNICK⁴³, as reações são mais efetivas nas misturas de cinza com cal dolomítica porque o óxido de magnésio tem peso molecular menor que o hidróxido de cálcio. Assim para um mesmo peso dos dois materiais mais reações unitárias ocorrem no primeiro, levando a maior cimentação.

As cals são assim classificadas em ordem decrescente de pozolanicidade:

cal dolomítica mono hidratada
cal cálcica hidratada
cal dolomítica di-hidratada

A qualidade da cinza volante, no entanto, exerce muito maior influência nas reações pozolânicas que o tipo de cal utilizado⁴⁴.

NARDI⁴⁷ afirma que além das características dos próprios materiais, a maneira como se procede à estabilização deve ser observada. Os materiais devem ser muito bem misturados para que se atinja a maior uniformidade possível, permitindo um melhor contato entre as substâncias reagentes. A temperatura também interfere no tempo de ocorrência das reações. Quando elevadas aceleram o processo e quando baixas retardam. Acredita-se que abaixo de 7°C as reações inclusive deixem de ocorrer. As reações pozolânicas são de longo prazo, estendendo-se no tempo. A maior parte delas, contudo, parece ser atingida no prazo de um ano.

3. PROGRAMA DA PESQUISA

3.1. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Buscando encontrar um material alternativo para a construção civil, este trabalho pretendeu avaliar a possibilidade de utilização da cinza volante na produção de tijolos para alvenaria.

Estudaram-se misturas compostas por cinza volante, cal e água. Embora economicamente interessem apenas baixos teores de cal, valores mais elevados foram também analisados para proporcionar uma faixa mais ampla de resultados, buscando facilitar o entendimento do efeito de cada variável testada sobre as características finais da mistura. O quadro 3.1 apresenta as sete misturas definidas para o início dos estudos.

Misturas	cal(%)	cinza volante(%)
1	05	95
2	10	90
3	15	85
4	20	80
5	25	75
6	35	65
7	45	55

QUADRO 3.1 - Composição das misturas de cinza volante e cal.

Para determinação da quantidade de água a ser adicionada à mistura foram realizados ensaios do tipo Proctor normal. Este ensaio, realizado segundo a NBR 7182²⁰, indica o teor de água que conduz a um peso específico aparente seco máximo com a aplicação de uma carga padrão.

Este procedimento foi adotado supondo-se que as maiores densidades conduziriam aos melhores resultados para os diferentes testes a que seriam submetidos os tijolos.

Trabalhos^{24, 31, 34} realizados com tijolos cerâmicos ou de misturas com cinza volante têm demonstrado o crescimento da resistência à compressão simples com o aumento da densidade. Porém, os valores ótimos de moldagem fornecidos pelo ensaio Proctor podem não conduzir aos melhores resultados para os diversos ensaios. Testes com corpos de prova moldados sob várias umidades e densidades seriam necessários para comprovar esta hipótese. Neste trabalho, contudo, adotaram-se os valores obtidos nos ensaios Proctor como ponto de partida.

A carga utilizada na compactação dos cilindros, do ensaio proctor, entretanto, não poderia ser aplicada diretamente na moldagem dos tijolos porque os carregamentos eram realizados de formas diferentes; enquanto no ensaio Proctor normal dava-se por sucessivos golpes de soquete, na produção dos tijolos a carga era aplicada continuamente pela prensa. Alguns tijolos foram então moldados para que se observasse a carga necessária à obtenção dos parâmetros desejados.

Partindo dos valores de densidade e umidade determinados pelo ensaio proctor normal, definiram-se mais dois pontos acima e dois pontos abaixo destes, submetendo os tijolos à moldagem. A cada valor do teor de umidade corresponderam cinco valores de densidades. Sabendo-se a área do molde e definindo-se uma altura de 5cm, obtinha-se o volume do tijolo e determinava-se, então, o peso necessário de material para atingir-se a densidade determinada no ensaio proctor normal. As demais densidades eram alcançadas no mesmo corpo de prova por variações na altura. Definidos os valores superiores e inferiores àqueles do proctor calculava-se a altura que o tijolo deveria apresentar. Desta forma, ao atingir-se cada altura relativa às diversas densidades, lia-se através de célula de carga o carregamento necessário a cada caso. Este

procedimento era então repetido para os outros quatro valores de umidade.

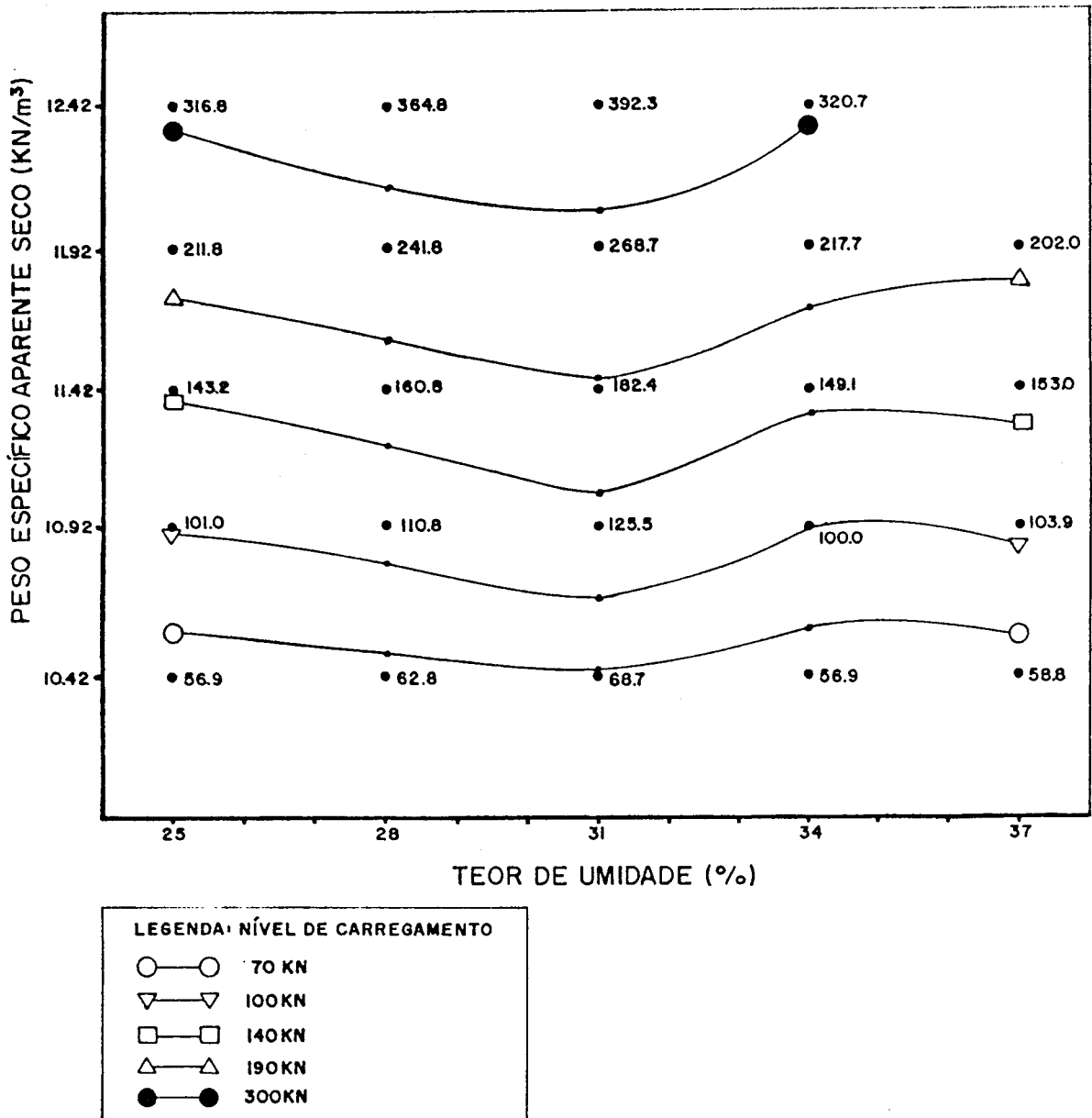


FIGURA 3.1 - Curvas de carga resultantes do ensaio Proctor realizado em tijolos de cinza volante e cal para mistura 85x15.

O conjunto dos resultados permitiu a formação de curvas que indicaram as cargas mínimas necessárias à obtenção de valores de densidade predeterminados. A figura 3.1 representa os resultados relativos à mistura 85x15 como exemplo. Nela observa-se que existe um valor de umidade que

conduz ao maior valor de densidade para cada carga. Definida esta umidade ótima e determinada a densidade que se quer atingir (neste caso indicada pelo proctor normal) obtêm-se a carga necessária.

A diferença de comportamento apresentada pela curva de 202 KN e o fato da curva de 300 KN estar incompleta são devidos às perdas de água ocorridas durante a moldagem quando associam-se altos valores de umidade e densidade.

No quadro abaixo estão resumidos os valores ótimos obtidos para cada mistura.

cal(%)	w(%)	$\gamma_d(\text{KN/m}^3)$	carga(KN)
05	34	10.97	137.3
10	31	11.32	124.5
15	34	11.42	149.1
20	32	11.51	156.9
25	33	11.75	117.7
35	31	12.08	104.9
45	31	12.28	91.2

QUADRO 3.2 - Umidade ótima, peso específico aparente seco e carga de moldagem para sete misturas de cinza volante e cal.

3.2. DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS E ETAPAS DE TRABALHO

Determinados todos os parâmetros necessários iniciou-se a moldagem dos corpos de prova.

Numa primeira etapa foram moldados tijolos para ensaios de resistência à compressão simples e cilindros para ensaios de durabilidade, curados em câmara de temperatura controlada por períodos de 7, 14, 28 e 60 dias.

Analisados os resultados obtidos na primeira etapa, escolheram-se três misturas para prosseguimento dos estudos.

Na segunda etapa realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples e absorção. Dois novos processos de cura foram incluídos no estudo, lona plástica preta e câmara úmida, com a intenção de verificar a influência dos mesmos sobre os resultados.

Após a realização das duas primeiras etapas escolheram-se uma mistura, uma idade e um tipo de cura para os testes posteriores.

Na terceira etapa buscou-se aprofundar o estudo sobre a absorção, variando-se a densidade e o teor de umidade dos tijolos e submetendo-os a novos testes.

Uma última etapa foi dedicada à construção de prismas que foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples e resistência de aderência à tração por arrancamento.

Testes de resistência à tração dos tijolos, resistência à compressão simples em unidades secas e saturadas e caracterização da argamassa foram também realizados nesta etapa servindo como apoio aos resultados encontrados nos demais ensaios.

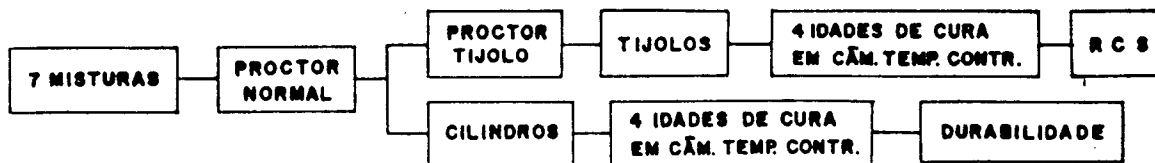
A figura 3.2 apresenta um esquema do desenvolvimento dos trabalhos.

3.3. CRONOGRAMA DA MOLDAGEM

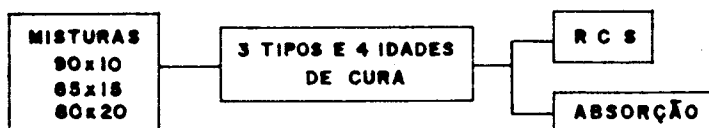
O cronograma da moldagem dos tijolos foi um fator importante na avaliação dos resultados. Uma programação ideal seria aquela em que os tijolos destinados a algum tipo de comparação fossem moldados em um único dia, sofrendo todos o mesmo tipo de influência de fatores não controlados, tais como temperatura e umidade ambiental, mão-de-obra e outros.

Não sendo isto possível e já que cada caso analisado foi representado por três amostras, poder-se-ia moldar um corpo de prova de cada caso num único dia, repetindo o procedimento

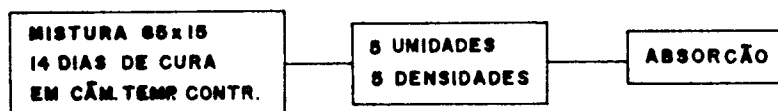
1ª etapa



2ª etapa



3ª etapa



4ª etapa

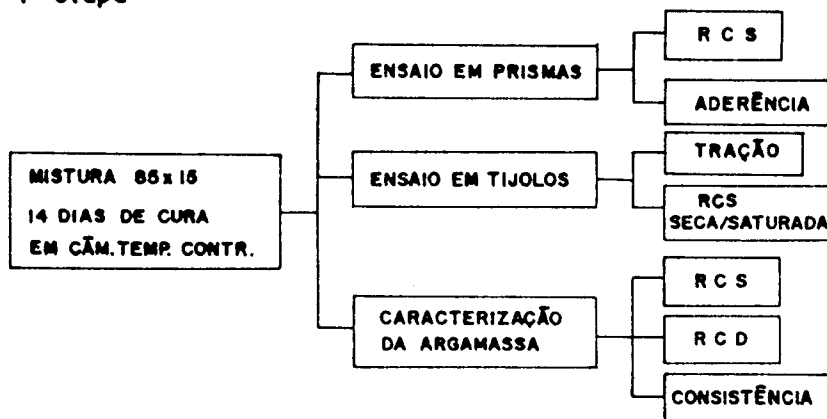


FIGURA 3.2 - Esquema do desenvolvimento dos ensaios

em outros dois dias. Assim, cada caso teria três representações diferentes mas os diversos casos sofreriam os mesmos tipos de influência entre si. No entanto, na maioria das vezes, não foi possível adotar estes procedimentos devido à inexistência de equipamento ou mão-de-obra suficientes e à lentidão causada pela falta de prática no início dos trabalhos.

Optou-se então por planos diferentes de moldagem de acordo com o assunto em estudo.

Durante a preparação dos corpos de prova para definição das cargas de moldagem, aqueles pertencentes a uma mesma mistura eram produzidos num só dia, não havendo, portanto, diferenças entre eles.

Na primeira etapa pretendeu-se definir os teores de cal que seriam viáveis técnica e economicamente. Desta forma, num único dia, moldaram-se amostras de todos os teores destinadas a uma só idade de cura, garantindo-se que nenhum deles fosse afetado de maneira diferente dos outros. Este procedimento foi válido tanto para os tijolos destinados à RCS como para os cilindros preparados para o ensaio de durabilidade.

Ao comparar-se estes resultados com relação ao tempo é possível que alguma variabilidade (erro experimental) seja notada, já que amostras de cada idade foram moldadas em dias diferentes.

Na segunda etapa havia três variáveis em observação, o teor de cal, o tempo e o tipo de cura. O número relativamente grande de corpos de prova não permitia a moldagem de todos num mesmo dia, assim, procurou-se preservar o fator mais importante, excluindo-se o teor de cal que já havia sido selecionado na etapa anterior.

Nesta etapa os corpos de prova destinados aos ensaios de absorção eram colocados em estufa antes dos testes. Se fosse preservado o fator tipo de cura seria necessária a moldagem de tijolos de uma determinada mistura e idade para os

três tipos de cura em um só dia. Desta forma, como todos eram de uma mesma idade, haveria muitos corpos de prova a serem colocados em estufa num mesmo dia e esta não comportava tantas unidades. Por este motivo decidiu-se preservar o fator tempo, moldando-se corpos de prova de uma única mistura destinadas à quatro idades e a um só tipo de cura num mesmo dia.

Como consequência desta escolha, algum erro experimental foi provavelmente imposto aos fatores tipo de cura e teor de cal.

Na moldagem da terceira etapa deu-se preferência à preservação dos resultados de umidade. Assim, corpos de prova de uma determinada densidade para quatro teores de umidade eram moldados em um mesmo dia. Como o número de corpos de prova era pequeno foi possível a moldagem de duas densidades numa mesma data. Esta escolha deveu-se à menor quantidade de informação obtida a respeito da influência da umidade na absorção. Referências à densidade são encontradas com maior frequência na bibliografia e, assim, tentou-se livrar do erro experimental o fator menos conhecido para observar-se mais claramente o seu efeito.

De qualquer forma, para tentar diminuir a influência de fatores não controlados, preparou-se de uma só vez a cinza necessária para todos os corpos de prova desta etapa, diminuindo desta maneira as variabilidades apresentadas pelos materiais.

No trabalho restante, como o número de corpos de prova necessários tornou-se menor, devido à diminuição das variáveis observadas, foi possível a moldagem de todas as unidades destinadas a um determinado ensaio em um único dia. Os prismas que formavam um mesmo grupo também foram construídos em um único período, utilizando sempre argamassa preparada de uma só vez e a mesma mão-de-obra.

3.4. MÉTODOS EMPREGADOS NA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nesta pesquisa não puderam ser comparados a trabalhos anteriores realizados no país com o material cinza volante e cal devido à inexistência dos mesmos. A maior aproximação estabeleceu-se com tijolos de cinza volante, cal e areia.

Pesquisas realizadas no exterior com materiais semelhantes forneceram, na grande maioria dos casos, produtos de qualidade bem superior. A causa provavelmente seja devida às diferenças verificadas entre cinzas originadas de carvões de distintas procedências. Fatores como índice de atividade pozolânica, teor de óxidos, perda ao fogo e outros podem influenciar bastante nos resultados. Além disso, os métodos de produção dos tijolos também foram diversos daqueles utilizados no presente trabalho. Outro fator a ser considerado diz respeito às exigências estabelecidas para aceitação de um produto nos diversos países. As normas para controle de materiais cerâmicos, por exemplo, são muito mais rígidas no exterior que no Brasil.

Desta forma, buscando adaptar-se à realidade nacional quanto a matérias primas disponíveis e, ainda, quanto aos produtos existentes no mercado, procurou-se comparar os resultados a outros materiais utilizados para a construção de alvenarias, ainda que diferentes, e às normas a eles referentes.

Os valores relativos a tijolos cerâmicos foram adotados com maior freqüência por serem os mais utilizados em alvenarias e dos quais possui-se maior conhecimento.

Em alguns casos comparações com tijolos sílico-calcáreos foram também adotadas. Embora estes materiais possuam maior semelhança com os tijolos de cinza volante e cal, o número de estudos a respeito é bem mais reduzido.

Os dados experimentais obtidos nesta pesquisa foram submetidos a análises estatísticas.

3.4.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA BÁSICA

Análise preliminar, realizada através do programa STATBAS⁴⁶, disponível no CPGEC da UFRGS, que verifica a normalidade da distribuição através de métodos analíticos e gráficos, analisa valores extremos através de resíduos normalizados e determina valores básicos como média, desvio padrão e coeficiente de variação. O nível de significância empregado em todos os casos foi $\alpha=0.05$.

De posse dos valores básicos é possível determinar-se o número de amostras necessário para que os resultados de um ensaio sejam confiáveis.

3.4.2. DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA

Ao trabalhar-se com um material novo, não é conhecido o número de corpos de prova necessários à realização de um ensaio. Amostras piloto de tamanhos suficientemente grandes são então realizadas com o objetivo de fornecer o coeficiente de variação do experimento e avaliar a normalidade da distribuição.

Conhecidos estes parâmetros, através da análise estatística básica, podemos, utilizando a equação 3.1, determinar o tamanho necessário da amostra definitiva para um erro considerado aceitável.

$$n = z_{\alpha/2}^2 CV^2 / Er^2 \quad (3.1)$$

onde: $z_{\alpha/2} = 1.96$ é o valor da variável padronizada da função de distribuição normal para um nível de confiança $\alpha=0.05$,

$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100$ é o coeficiente de variação da amostra (S é o desvio padrão e \bar{x} a média observada),

$Er = \frac{(\bar{x} - \mu)}{\mu} \cdot 100$ é o erro relativo à estimativa da mé

dia, onde \bar{x} é a média teórica e μ é a média observada.

Procurou-se trabalhar com erros relativos inferiores a 15% , buscando o menor erro possível dentro das possibilidades de moldagem dos tijolos.

3.4.3. COMPARAÇÃO MULTIPLA DE MÉDIAS

Através da análise de variância, ANOVA, é possível a avaliação dos efeitos de fatores predeterminados sobre a variabilidade observada nos resultados de um determinado experimento.

Este método foi utilizado para verificar a significância do efeito do tempo, do teor de cal e do tipo de cura nos resultados de RCS e absorção e também a significância do efeito do teor de umidade e do peso específico aparente seco na absorção dos tijolos.

Constatada a existência de variação significativa entre os grupos testados, ou seja, havendo efeito do fator avaliado sobre os resultados obtidos, observou-se a necessidade, algumas vezes, da realização de uma comparação múltipla de médias através do método de DUNCAN. Esta análise permite determinar quais as médias que diferem significativamente das outras.

Os testes foram realizados com auxílio do programa computacional COMPVAR⁴⁶, também disponível no CPGEC da UFRGS, o qual possibilita além da comparação de médias e desvios padrões o teste de normalidade com todos os resíduos permitindo examinar valores espúrios com todos os grupos simultaneamente.

3.4.4. REGRESSÃO NÃO LINEAR

Para verificar as relações da resistência com o tempo e com o teor de cal, empregaram-se os seguintes modelos:

$$RCS = \frac{a \times t}{b + t} \quad (3.2), \quad RCS = \frac{a \times x}{b + x} \quad (3.3) \text{ e } RCS = a - b/x \quad (3.4)$$

onde: a e b são parâmetros da regressão,

t é o tempo (dias),

x é o teor de cal(%).

A estimativa dos parâmetros das regressões sobre os dados obtidos na pesquisa experimental foi realizada através do pacote de programas computacionais STATGRAFICS⁴⁴.

4. MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA

4.1. CAL

Utilizou-se a cal hidratada dolomítica, tipo extra, da marca Primor. A preferência por uma cal dolomítica deveu-se ao fato das jazidas gaúchas serem formadas predominantemente por este tipo de cal. Os resultados das análises químicas e físicas realizadas nesta cal encontram-se no quadro abaixo.

DETERMINACOES	RESULTADOS	REQUISITOS
Químicas:		
Óxido de cálcio-CaO(%) [*]	44.72	-
Óxido de magnésio-MgO(%) ^{**}	29.25	-
Soma dos óxidos (base não volátil)	93.49	≥ 88
Perda ao fogo ^{***}	20.88	-
Anidrido carbônico-CO ₂ (%) ^{***}	1.50	≤ 7
Resíduo insolúvel(%) ^{***}	5.73	≤ 5
Físicas:		
Finura-peneiramento [#] { n° 30	0	≤ 0.5
(% retido acumulado) { n° 200	30.7	≤ 15
Superfície espec. Blaine(cm ² /g) ^{##}	16260	≥ 10000
Massa espec. real dos grãos (KN/m ³) ^{###}	24.7	-

Quadro 4.1 - Resultados das análises química e física da cal dolomítica primor extra.

As análises químicas foram realizadas no laboratório de Geoquímica, do instituto de Geociências da UFRGS com a utilização dos métodos de espectrometria de fluorescência de

raios X(*), espectrometria de absorção atômica(**) e gravimetria(***)).

As análises físicas foram realizadas na Cientec, utilizando os métodos das normas brasileiras, NBR 9289¹³(**), NBR 7224¹⁴(***) e NBR 6474¹⁷(****).

Comparando-se os resultados aos requisitos, referentes às normas apresentadas no capítulo 2, verifica-se que:

A soma dos óxidos, 93.49%, foi superior ao valor mínimo requerido pela norma. Deve-se considerar que as especificações referem-se a cais utilizadas na preparação de argamassa. A Cientec, em uma pesquisa sobre estabilização de solos para pavimentação com cinza volante e cal³² definiu um teor mínimo de 65% para a soma dos óxidos. Além disso, as cais brasileiras costumam apresentar características muito variáveis e grande parte delas possuem teor de óxidos bem inferior àquele exigido pela norma³¹.

O valor do anidrido carbônico mostrou-se bem inferior ao máximo admissível, enquanto o resíduo insolúvel foi ligeiramente superior.

Quanto à finura, observa-se que a cal utilizada enquadra-se aos valores da norma no que se refere ao material retido na peneira 30, ficando, porém, muito acima do limite máximo para a peneira 200.

Testes realizados anteriormente pela Cientec³³, em cais da mesma marca, demonstraram que a fração grosseira, retida na peneira 200, é constituída principalmente por fragmentos da rocha original que não entraram em combustão e quartzo e depende tanto do tipo de rocha que lhe deu origem quando do processo de beneficiamento.

O valor da superfície específica Blaine foi elevado. Isto demonstra que embora haja partículas grosseiras, o material predominante possui uma alta superfície específica.

Este valor deve, entretanto, ser tomado com cuidado, conforme já comentado no item 2.3.

Apesar de alguns parâmetros mostrarem-se insatisfatórios com relação às normas, o resultado do teste de atividade pozolânica da mistura cinza volante e cal (ver item 4.2) foi positivo.

Desta forma, embora não cumpra todos os requisitos, a cal utilizada mostrou-se adequada à utilização, juntamente com a cinza volante, para a produção de tijolos.

4.2. CINZA VOLANTE

Foi utilizada uma cinza volante produzida pela termoelétrica de Charqueadas, localizada no município de São Jerônimo - RS.

O material era recebido no estado seco e sofria molhagem prévia para facilitar o manuseio, evitando a formação de poeira. O quadro 4.2 apresenta as propriedades químicas e físicas desta cinza.

As análises químicas foram realizadas pelo laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS(A) através dos métodos de espectrometria de fluorescência de raios X(*), espectrometria de absorção atômica(**), fotometria de chama(***) e gravimetria(****), e pelo laboratório de Corrosão de Metais (LACOR) do Departamento de Materiais da UFRGS(B) através de combustão(**) e potenciometria(**).

Os ensaios de caracterização física efetuaram-se na Cientec utilizando os métodos das normas brasileiras NBR 7181²¹(+), NBR 7224¹⁶(++), NBR 6474¹⁷(+++), e NBR 5751¹⁵(++++).

Comparando-se os resultados aos requisitos, verifica-se que:

DETERMINACOES	RESULTADOS	REQUISITOS	
Químicas:			
A {	Óxido de silício-SiO ₂ (%) *	66.64	} ≥ 70
	Óxido de alumínio-Al ₂ O ₃ (%) *	19.10	
	Óxido de ferro-Fe ₂ O ₃ (%) **	6.37	
	Óxido de magnésio-MgO (%) **	0.46	-
	Óxido de cálcio-CaO (%) *	1.62	-
	Óxido de sódio-Na ₂ O (%) ***	0.23	≤ 1.5
	Perda ao fogo (950 °C) (%) ****	1.50	≤ 6.0
B {	Carbono-C (%) #	0.76	-
	Óxido de enxofre-SO ₃ (%) #	0.09	≤ 3.0
	PH a 25 °C ##	8.08	-
Físicas:			
Finura-peneiramento ⁺ (% retido acumulado)	{ n° 30	0	≤ 2.0
	{ n° 200	12.0	≤ 30.0
	{ n° 325	26.7	≤ 34.0
Superfície espec. Blaine (cm ² /g) ⁺⁺	3850	-	
Massa espec. real dos grãos (KN/m ³) ⁺⁺⁺	22.4	-	
Índice de ativ. pozolânica (KPa) ⁺⁺⁺⁺	- com Ca(OH) ₂ puro aos 7 dias	6990	{ 4000 (C593) 5500 (C618)
	- com cal dolomítica " "	6060	
Granulometria (%) [†] :			
φ < 10 μm	26.0	-	
10 a 20	16.0	-	
20 a 40	21.0	-	
40 a 60	14.5	-	
60 a 80	13.5	-	
80 a 100	3.0	-	
φ > 100	6.0	-	

QUADRO 4.2 - Resultado das análises química e física da cinza volante de Charqueadas.

O teor referente a soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro foi bem superior ao mínimo recomendado pela norma.

O material retido na peneira nº 325 foi inferior ao limite máximo recomendado pela ASTM C618, o mesmo ocorrendo para as peneiras nº 30 e nº 200 com relação à ASTM C593.

A superfície específica Blaine mostrou-se inferior à faixa de valores recomendada por KIHARA⁴¹ como ideal para cinzas volantes brasileiras (vide item 2.4).

O índice de atividade pozolânica foi superior às exigências das normas. Este ensaio foi realizado misturando-se a cinza volante ao hidróxido de cálcio puro e também à cal dolomítica utilizada nesta pesquisa. Os resultados dos dois testes foram bem próximos, indicando ser a cal adotada de boa qualidade quando à pozolanicidade. Deve-se dar atenção ao fato de que a utilização de outro tipo de cal exige a realização de novo teste de pozolanicidade, pois devido a alta variabilidade observada nas cals produzidas no país os resultados podem ser consideravelmente alterados.

O valor da perda ao fogo e os teores de óxido de sódio e enxofre apresentaram-se muito inferiores aos valores definidos pelas normas.

4.3. AGUA

Tanto para molhagem dos corpos de prova e preparo da argamassa como para o enchimento do tanque de submersão foi utilizada água potável.

4.4. ARGAMASSA

Utilizou-se argamassa para a construção de prismas que seriam submetidos a ensaio de resistência à compressão simples e resistência de aderência. Como os resultados destes

testes seriam comparados à valores encontrados por JAWORSKY²⁹ em seu trabalho com tijolos cerâmicos, procurou-se preparar os corpos de prova da maneira que se assemelhassem o máximo possível àqueles.

Não se pretendeu, nesta pesquisa, verificar a influência da argamassa na resistência do prisma e sim comparar a resistência entre prisma e unidade. Por este motivo escolheu-se apenas um tipo de argamassa, cujo traço em peso foi de 1:0.57:6.34 (cimento:cal:areia).

Preferiu-se o uso de uma argamassa mista devido à cal proporcionar uma melhora da plasticidade, trabalhabilidade e retenção de água da argamassa.

Os materiais utilizados na preparação da argamassa são descritos a seguir.

4.4.1. CIMENTO

Utilizou-se o cimento portland pozolânico. A maior superfície específica dos cimentos pozolânicos proporciona argamassas mais retentivas e trabalháveis. Além disso seu endurecimento mais lento permite uma maior capacidade de absorção de pequenas deformações.

4.4.2. CAL

A cal utilizada para o preparo da argamassa foi a mesma utilizada nas misturas para a moldagem dos tijolos e está descrita no item 4.1.

4.4.3. AGREGADO

No preparo da argamassa foi empregada uma areia regular retirada do rio Guaíba. Sua granulometria é

apresentada no quadro 4.3. No quadro 4.4 estão as composições granulométricas recomendadas pela ASTM C144²⁴ e BS 1200²⁸.

Comparando-se os quadros abaixo verifica-se que a areia utilizada cumpre as exigências das normas apresentadas sendo adequada para utilização em argamassas de assentamento.

PENEIRAS abertura (mm)	MATERIAL RETIDO (%)	TOTAL ACUMULADO (%)	
		retido	passante
4.80	0.10	0.10	99.90
2.40	4.34	4.44	95.56
1.20	9.71	14.15	85.85
0.60	23.30	37.45	62.55
0.30	43.30	80.75	19.25
0.15	18.20	98.95	1.05
< 0.15	1.05	100.00	-

QUADRO 4.3 - Composição granulométrica da areia empregada na pesquisa.

PENEIRAS abertura (mm)	PASSANTE ACUMULADO (%)	
	BS 1200	ASTM C144
4.75 (5 para BS 1200)	100	100
2.36	90 a 100	95 a 100
1.18	70 a 100	70 a 100
0.60	40 a 80	40 a 75
0.30	05 a 40	10 a 35
0.15	0 a 10	02 a 15

QUADRO 4.4 - Composições granulométricas recomendadas por norma para areia utilizada em argamassa de assentamento.

5. CRITÉRIOS GERAIS PARA CONFECCÃO E CURA DOS CORPOS DE PROVA

5.1. TIJOLOS

5.1.1. PREPARAÇÃO DA MISTURA

Em primeiro lugar a cinza volante e a cal eram pesadas e misturadas manualmente até perfeita homogeneização. Após, media-se a água e adicionava-se ao material misturando-se novamente. A mistura era então pesada e colocada no molde para prensagem.

5.1.2. PRENSAGEM DA MISTURA

Utilizou-se um molde de aço composto por três partes conforme pode ser visto na figura 5.1 .

A mistura era distribuída dentro do molde (partes 1 e 2) e sobre ela colocava-se a parte 3. O molde era então levado ao pórtico de uma prensa onde recebia uma carga aplicada por um macaco hidráulico. A leitura do carregamento dava-se através de célula de carga.

A carga, definida anteriormente, era aplicada levando o tijolo a uma espessura de 5 cm. Esta altura era sempre conferida servindo também como controle para a densidade atingida.

Para retirar o tijolo era necessário virar o molde de cabeça para baixo e remover-lhe o fundo. Colocava-se um encaixe de madeira sobre o molde emborcado e aplicava-se carga,

comprimindo assim a parte trêz e forçando a saída do tijolo. Este procedimento pode ser visto na figura 5.2 .

Todos os tijolos utilizados na pesquisa apresentaram a mesma área, com 22 cm de comprimento e 10.5 cm de largura. A espessura esteve sujeita a pequena variação, porém, sempre sob controle, nunca apresentando diferenças superiores a 1 mm.

Após a retirada do molde o tijolo era pesado e levado ao ambiente de cura.

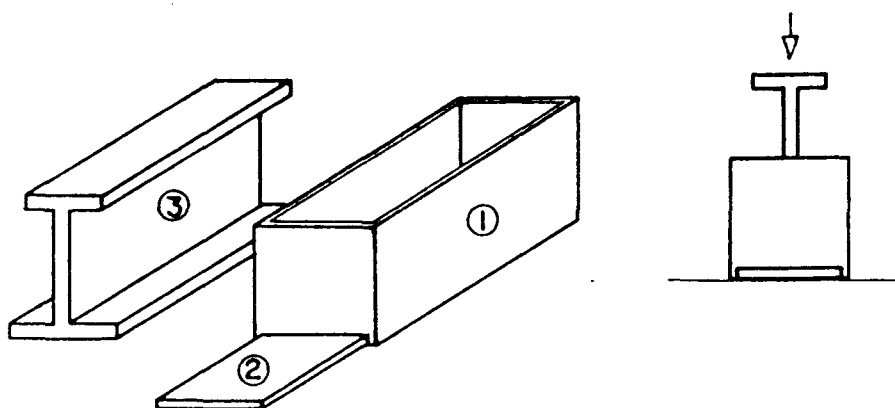


FIGURA 5.1 - Molde utilizado para a produção dos tijolos de cinza volante e cal

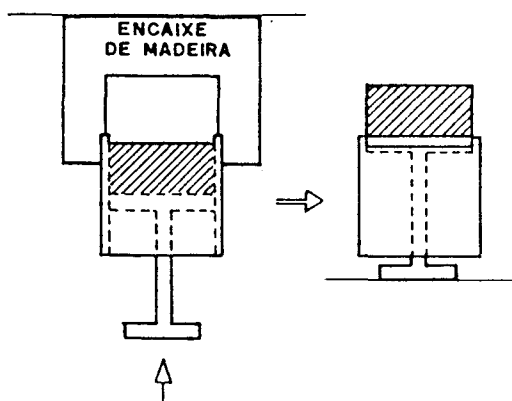


FIGURA 5.2 - Procedimentos para desmoldagem dos tijolos de cinza volante e cal

5.1.3. CURA DOS TIJOLOS

Os corpos de prova foram submetidos a três processos de cura. O primeiro deles, utilizado na maior parte dos trabalhos, ocorria em uma câmara de temperatura controlada a $21 \pm 2^\circ\text{C}$, cuja manutenção era feita através de ar condicionado.

Os corpos de prova sujeitos a este tipo de cura eram colocados em sacos plásticos para evitar a perda de umidade e a carbonatação da cal pelo CO_2 presente no ar.

No segundo processo os tijolos eram levados à câmara úmida sob temperaturas de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%. Não foram usados sacos plásticos pois, segundo WOLF e DAL MOLIN⁴⁴, que estudaram a carbonatação de argamassas e concretos, o fenômeno praticamente deixa de ocorrer em ambientes que apresentem umidades superiores a 90%. Por outro lado, os tijolos foram protegidos da molhagem direta pois o contato com a água nos primeiros dias de idade causava a deterioração dos mesmos.

Os corpos de prova curados através do terceiro processo eram colocados sobre um estrado de madeira, envoltos em lona plástica preta e deixados expostos em ambiente descoberto. Com isto procurou-se fornecer calor, pela radiação solar, e evitar a saída de água, propiciando um ambiente quente e úmido favorável ao desenvolvimento das reações entre cinza volante e cal, e que fosse barato e de fácil realização.

Em qualquer dos processos citados foram utilizados períodos de cura de 7, 14, 28 e 60 dias.

5.2. ARGAMASSA

5.2.1. PREPARAÇÃO DA ARGAMASSA

Inicialmente cal e areia eram pesadas e misturadas a seco, manualmente. Após adicionava-se água em quantidade suficiente para obtenção de uma consistência pastosa e

misturava-se novamente buscando uma boa homogeneização dos materiais. Esta massa era então levada à câmara úmida onde permanecia durante 24 horas.

JAWOROSKY³⁷, citando SABATTINI, explica que este procedimento, denominado descanso, é recomendado porque o hidróxido de cálcio na forma da cal hidratada encontra-se mal cristalizado e é necessário mantê-lo sob condições de alta umidade durante certo tempo, obtendo-se assim um produto bem cristalizado e em condições de desenvolver todo o seu potencial.

Após a retirada da câmara úmida adicionava-se cimento e o restante da água de amassamento e levava-se a mistura à amassadeira. A quantidade de água necessária foi determinada pela experiência do pedreiro, buscando uma boa trabalhabilidade, porém, ensaios de consistência foram realizados como controle. Este procedimento foi adotado por JAWOROSKY em sua pesquisa e, como pretendia-se comparar os resultados, o mesmo foi utilizado no presente estudo visando manter a maior semelhança possível entre as condições impostas aos corpos de prova.

5.2.2. ENSAIOS DE CONTROLE

5.2.2.1. CONSISTENCIA

Este ensaio foi realizado imediatamente após a preparação da argamassa seguindo a NBR 7215¹⁰.

A amostra é colocada dentro de uma forma tronco-cônica, apoiada sobre a mesa de ensaio, em três camadas, recebendo golpes de soquete em número de 15, 10 e 5 na 1ª, 2ª e 3ª camadas, respectivamente. Após o enchimento nivela-se o topo e retira-se a forma. Move-se então a manivela do aparelho, fazendo com que a mesa caia trinta vezes em aproximadamente trinta segundos, o que provocará o abatimento do tronco de cone de argamassa. Após a deformação tomam-se

duas medidas do diâmetro final. A média das duas fornece o índice de consistência da argamassa.

A argamassa utilizada para confecção dos prismas apresentou índice de consistência médio de 310 mm. Embora a norma recomende consistências de 205 a 215 mm não se obteve boa trabalhabilidade com estes valores. Já que não foi possível seguir as recomendações da norma garantiu-se, ao menos, que toda a argamassa utilizada na pesquisa apresentasse aproximadamente a mesma consistência. O fator água/aglomerante médio utilizado foi de 0.77 .

5.2.2.2. RESISTENCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) e RESISTENCIA A COMPRESSÃO DIAMETRAL (RCD)

Estes ensaios foram realizados para que se verificasse a relação entre as resistências do tijolo e da argamassa.

Os ensaios de RCS seguiram a NBR 5739¹⁹ e os de tração por compressão diametral a NBR 7222²². Os corpos de prova foram moldados e curados como recomenda a NBR 7215¹⁸ da ABNT.

Moldaram-se cinco espécimes para cada ensaio em moldes de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A massa foi colocada em quatro camadas, sofrendo trinta golpes moderados do soquete normal cada uma, rasando-se o topo no final.

Os corpos de prova ainda nos moldes foram curados por 24 hs em câmara úmida e, após desmoldados, depositados em tanque com água saturada de cal permanecendo por mais vinte e seis dias. A retirada da água fez-se um dia antes de terminada a cura para que os espécimes secassem e aceitassem o capeamento de enxofre exigido pelo ensaio. O rompimento deu-se aos vinte e oito dias desde a moldagem.

O resultado médio do ensaio de RCS foi de 3.9 MPa enquanto que a resistência média à tração por compressão

diametral foi de 0.312 MPa. O quadro abaixo resume os valores encontrados para a argamassa utilizada na pesquisa.

Argamassa traço 1:0.57:6.34 (cim:cal:areia)		
consistência(mm)	RCS(MPa)	RCD (MPa)
310	3.90	0.312

QUADRO 5.1 - Resultado dos ensaios de controle da argamassa

5.3. PRISMAS

A construção de todos os prismas ensaiados foi realizada por um único pedreiro buscando evitar ao máximo variações no fator mão-de-obra.

Os tijolos, devido à alta sucção apresentada, tiveram que ser molhados antes do assentamento. O tempo ótimo encontrado para imersão dos mesmos foi de um minuto. Este mesmo período foi encontrado por GALLEGOS²⁴ quando estudou o tratamento da sucção de tijolos sílico-calcáreos.

Os prismas foram construídos sobre uma chapa de aço em uma bancada perfeitamente nivelada. As juntas foram de 10 mm controladas por meio de um gabarito tipo régua feito pelo próprio pedreiro.

Utilizou-se um único traço de argamassa em todo o estudo já que não era objetivo do trabalho observar a influência da mesma nos resultados.

O nivelamento e o prumo foram verificados com o uso de um nível de bolha.

Os prismas permaneceram sobre a bancada no primeiro dia para evitar deslocamentos e depois, cobertos com saco plásticos, mantidos no ambiente de laboratório até o 28º dia.

Os tijolos utilizados na construção dos prismas haviam sido curados por quatorze dias possuindo portanto quarenta e dois dias no momento do ensaio.

Os prismas foram capeados com uma camada de 2 a 3 mm de pasta de cimento e areia fina na véspera dos ensaios. Tal procedimento foi realizado para corrigir pequenos desniveis ou imperfeições nas suas superfícies.

6. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

6.1. ENSAIO DE RESISTENCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Este ensaio foi realizado seguindo as indicações da NBR 6460²³. Os corpos de prova destinados ao teste devem ser serrados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão e as duas metades, superpostas através de suas faces maiores, ligadas por uma delgada camada de pasta de cimento e areia fina. A figura 6.1 representa este procedimento.

Como os tijolos de cinza volante e cal possuem a superfície muito lisa, sem irregularidades, cuidou-se para que as faces voltadas ao exterior ficassem paralelas no momento em que fossem ligadas as faces voltadas ao interior. Desta forma evitou-se a necessidade de capeamento indicada na norma.

Após o endurecimento da pasta os corpos de prova devem ser imersos em água por 24 horas. Vencido este período são retirados, secos superficialmente com uma toalha úmida, medidos nas duas faces de trabalho e submetidos à compressão.

O valor da carga máxima observada durante o teste, dividido pela média das áreas das duas faces de trabalho fornece a resistência.

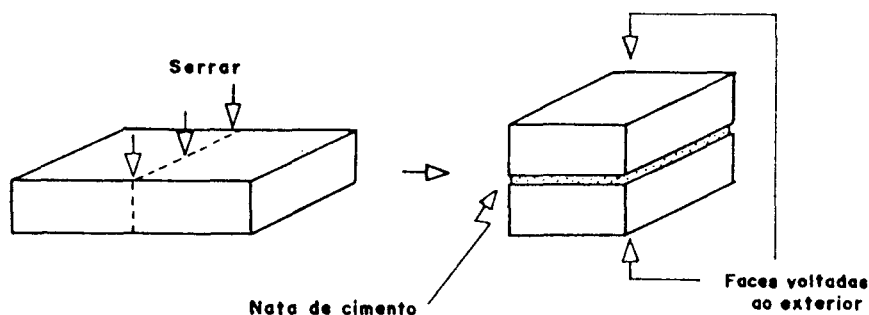


FIGURA 6.1 - Preparação do tijolo para o ensaio de RCS.

6.2. ENSAIO DE RESISTENCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO OU MÓDULO DE RUPTURA (MR)

Os procedimentos para realização dos testes estão indicados na norma americana ASTM C67⁰³.

O tijolo é colocado sobre pontos de apoio separados por uma distância aproximadamente 25.4mm menor do que o comprimento do mesmo. A carga deve ser aplicada exatamente na metade do tijolo e no sentido da sua espessura.

O equipamento utilizado está representado na figura 6.2.

O módulo de ruptura é encontrado pela aplicação da equação 6.1.

$$S = 15Wl/bd^2 \quad (6.1)$$

onde: S é a tensão sobre o espécime no meio do vão (Mpa)

W é a máxima carga indicada pela prensa (KN)

l é a distância entre os suportes (cm)

b é a largura média do espécime (cm)

d é a espessura média do espécime (cm)

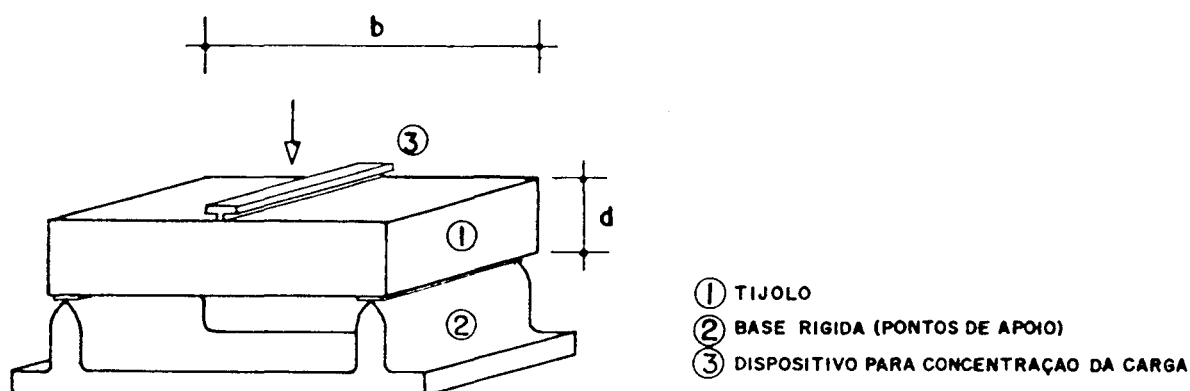


FIGURA 6.2 - Equipamento para ensaio de resistência à tração na flexão.

6.3. ENSAIO DE DURABILIDADE

A realização deste ensaio baseou-se no método SC-3 da ABCP¹¹ para solo-cimento, o qual determina o seguinte procedimento:

Os corpos de prova são moldados em cilindros de um litro, compactados em três camadas sofrendo 25 golpes cada uma, através de um soquete de 22.2N.

Depois de desmoldada a amostra é pesada. Deste peso subtrae-se o percentual de água da mistura obtendo-se o peso seco inicial. Os espécimes são então levados ao ambiente de cura.

Atingido o tempo de cura os corpos de prova são colocados num tanque cheio de água durante cinco horas. Depois disto são secos em estufa por 42 horas e, por fim, submetidos a escovamento pela aplicação de vinte escovadas na superfície lateral e quatro no topo, com uma força de 14.7N.

Os procedimentos citados fazem parte de um ciclo completo. O ensaio de durabilidade compreende 12 ciclos.

Ao final do 12º ciclo secam-se os corpos de prova em estufa até atingirem constância de peso. Depois disto são pesados obtendo-se assim o peso seco final.

Cada tipo de solo costuma reter um percentual de água. Descontando-se este valor do peso seco final, obtem-se o peso seco final corrigido.

A perda de peso corrigida é encontrada com auxílio da equação abaixo e comparada aos valores admissíveis ao tipo de solo que se está estudando.

$$PPc (\%) = \frac{P_{Si} - P_{Sfc}}{P_{Si}} \times 100 \quad (6.2)$$

onde: PPc é a perda de peso corrigida (%)

PSi é o peso seco inicial

PSfc é o peso seco final corrigido

6.4. ENSAIOS DE ABSORÇÃO

As normas brasileiras sobre absorção retringem-se aos tijolos de solo-cimento e blocos de concreto. Por este motivo decidiu-se utilizar a norma americana ASTM C 67⁰³ para tijolos cerâmicos, que é mais completa e detalhada que aquelas.

Pequenas modificações foram feitas visando o reaproveitamento dos corpos de prova. A norma recomenda que o ensaio de absorção em água fria seja realizado com meios tijolos, os quais são reaproveitados no teste de absorção em água fervente. Já o teste de sucção é executado com tijolos inteiros. Como os resultados dos dois primeiros testes são dados em percentual de água absorvida com relação ao peso seco, nada impede que o ensaio seja realizado com unidades inteiras. O fato de reutilizar-se o mesmo corpo de prova para os três ensaios também não altera os resultados, desde que os mesmos sejam realizados na ordem: sucção, absorção em água fria e absorção em água fervente. Desta forma utilizou-se sempre unidades inteiras reaproveitando-as nos três ensaios.

Os tijolos, após completarem seu período de cura, são colocados na estufa, permanecendo nela até atingirem constância de peso (os tijolos de cinza volante e cal consumiram um tempo nunca inferior a 36 hs). Após são colocados para esfriar em local livre de vento e nunca por menos de quatro horas. Depois de frios devem ser medidos e pesados. Procedese, então, ao ensaio de sucção ou absorção inicial.

Os tijolos são colocados individualmente em uma bacia com nível d'água constante, com aproximadamente 3.2 mm da sua espessura submersa, e aí permanecem por 1 min \pm 1 s. Passado este período o tijolo é retirado, seco em sua superfície com uma toalha úmida e pesado. A diferença entre o peso assim encontrado e o peso seco fornece a razão de absorção inicial em gramas.

Como a área do tijolo testado diferia daquela recomendada pela norma, usava-se a seguinte equação de equivalência:

$$X = 194W/LB \quad (6.3)$$

onde: X é o ganho em peso corrigido (g/194cm²/min.),
 W é o ganho real em peso (g),
 L é o comprimento do tijolo (cm),
 B é a largura do tijolo (cm).

O valor 194 cm² que aparece na unidade da sucção refere-se à área padrão do tijolo americano utilizado no ensaio.

Completado o ensaio de sucção submetem-se os mesmos corpos de prova ao ensaio de absorção. Eles são colocados em água fria, onde permanecem por 24 horas. Após são retirados, secos superficialmente e pesados.

O valor percentual de água absorvida é obtido da seguinte equação:

$$ABS(\%) = 100 (W_s - W_d)/W_d \quad (6.4)$$

onde: W_s é o peso saturado (g),
 W_d é o peso seco (g).

Por último realiza-se o ensaio de absorção máxima. Os tijolos são devolvidos à água, a temperaturas entre 15.5 e 30°C, e de maneira que ela circule por todos os lados. A água é aquecida até a fervura, num período de aproximadamente uma hora, e mantida em ebulição durante cinco horas.

Os espécimes, depois de frios, são retirados da água, secos superficialmente e pesados. A equação seguinte fornece o valor de absorção máxima.

$$ABS_{m\acute{a}x}(\%) = 100 (W_b - W_d)/W_d \quad (6.5)$$

onde: W_b é o peso saturado em água fervente (g)
 W_d é o peso seco (g)

6.5. ENSAIO DE RESISTENCIA A COMPRESSAO EM PRISMAS

Os testes realizados em prismas basearam-se na norma americana ASTM E 447¹⁰, onde é recomendada a construção de um mínimo de três prismas, compostos por apenas uma unidade de largura, não contrafiados e com uma razão altura/espessura não menor que dois nem maior que cinco. A razão utilizada nesta pesquisa foi de 2,19.

Os prismas são curados por 28 dias, a menos que se pretenda estudar a influência do tempo ou relacionar os resultados obtidos em outras idades.

Antes da realização do ensaio devem ser tomadas medidas da espessura e comprimento dos prismas em três pontos (centro e quartos) da altura dos mesmos.

O carregamento deve ser aplicado a qualquer velocidade conveniente até a metade da carga esperada máxima. A partir daí utiliza-se uma razão tal que a carga remanescente seja aplicada em um espaço de tempo não menor que um nem maior que dois minutos.

A resistência à compressão é obtida dividindo-se a carga máxima anotada pela área média de cada prisma.

6.6. ENSAIO DE RESISTENCIA DE ADERENCIA

Este ensaio foi realizado seguindo a norma ASTM C 1072¹². Os prismas devem ter largura de uma unidade inteira, não havendo limitações quanto à sua altura e um mínimo de cinco juntas devem ser testadas.

Após 1hora±15min. da execução dos prismas, dois tijolos devem ser colocados em cima da carreira de topo.

O período de cura indicado é de 28 dias mas outras idades podem ser ensaiadas se o efeito do tempo estiver sendo estudado.

O equipamento utilizado para o ensaio pode ser visto na figura 6.3.

O prisma é colocado verticalmente sobre o suporte que é ajustado de forma a deixar apenas a unidade e a junta superiores livres e é preso à fixação inferior através dos parafusos fixadores. Um material leve como poliestireno deve ser colocado entre o fundo do prisma e o suporte.

A fixação superior, que é ligada ao braço de carga, deve ser presa ao tijolo de topo deixando livre apenas a junta de argamassa. A fixação é feita através dos parafusos de ajuste.

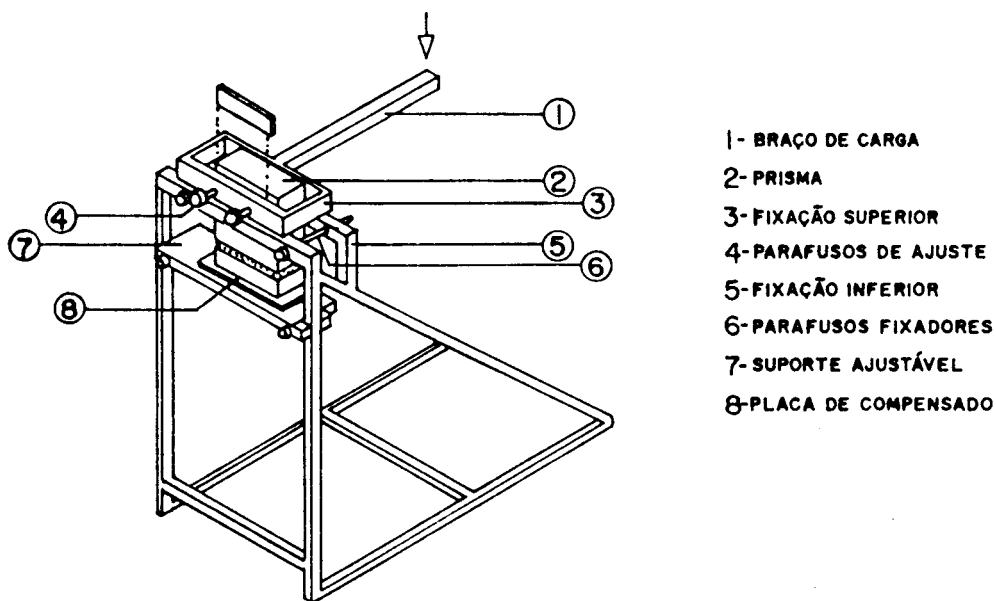
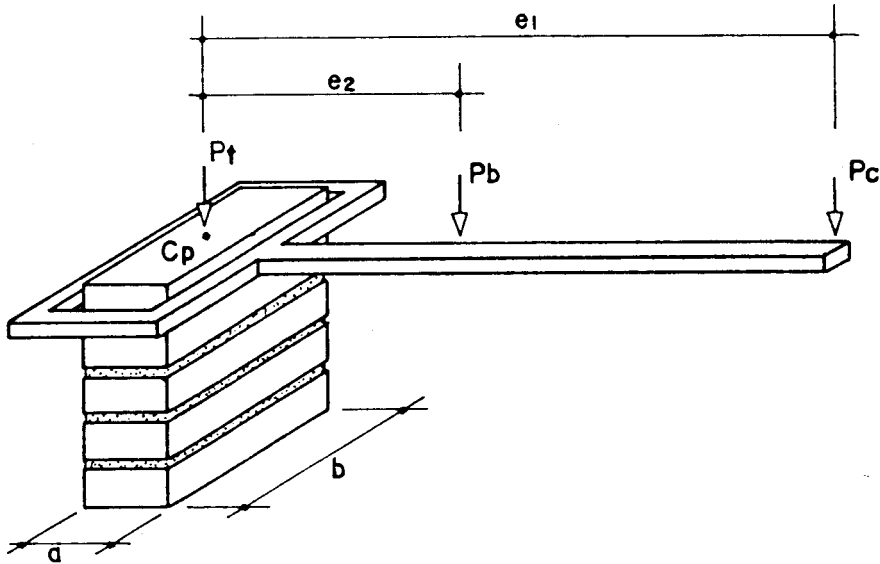


FIGURA 6.3 - Equipamento para ensaio de resistência de aderência à tração por arrancamento.

Aplica-se uma carga axial crescente no extremo do braço, produzindo uma pequena tensão axial e uma grande tensão de flexão no corpo de prova. A ruptura ocorre quando a tensão de tração produzida pelo momento induzido supera a capacidade de aderência da junta.

Após o arrancamento da primeira unidade, eleva-se o suporte ajustável para a realização do teste na segunda junta.

Repete-se este procedimento até que todas as juntas sejam testadas.



$$f_T = \frac{6(P_B \cdot e_2 + P_A \cdot e_1)}{b \cdot a^2} - \frac{P_p + P_B + P_A}{b \cdot a} \quad (6.6)$$

Onde:

f_T é a resistência de aderência,

P_B é o peso próprio do braço,

P_C é a carga aplicada na extremidade do braço,

P_t é o peso próprio do tijolo,

C_p é o centro do prisma,

e_1 é a distância entre o centro do prisma e o ponto de aplicação da carga,

e_2 é a distância entre o centro do prisma e o centróide do braço de carga,

a, b são dimensões do prisma.

FIGURA 6.4 - Mecanismo da ruptura à tração por arrancamento.

Este ensaio fornece uma distribuição de tensão de flexão de todas as juntas do corpo de prova e não somente da mais fraca.

A resistência de aderência é encontrada pela aplicação da teoria linear, equação (6.6). A figura 6.4 facilita o entendimento.

7. RESULTADOS DOS ENSAIOS

7.1. VERIFICAÇÃO DA RESISTENCIA À COMPRESSÃO

7.1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A resistência à compressão é normalmente tomada como a propriedade mais importante na determinação da qualidade dos materiais, sendo este conceito válido também para as alvenarias.

O tijolo é, sem dúvida, o maior responsável pela resistência da alvenaria, contribuindo especialmente com a sua resistência individual e capacidade de absorção inicial (sucção). Seguem-no a qualidade da argamassa e da mão-de-obra, a espessura das juntas e as condições de cura³⁷.

Os índices de resistência à compressão podem ser obtidos de três maneiras. A mais simples e econômica é a determinação da resistência à compressão dos tijolos. Segundo a bibliografia consultada, a resistência de alvenarias de materiais cerâmicos sofre uma grande redução em relação às unidades. Isto foi comprovado por trabalhos que apresentaram resultados de testes de laboratório executados em tijolos, prismas e mini-paredes de material cerâmico^{37,47,51}. Existem tabelas que relacionam as resistências entre unidades e alvenaria mas devem ser utilizadas com cuidado pois foram preparadas através de um número muito grande de ensaios e são válidas apenas para os materiais que foram submetidos aos testes.

A resistência também pode ser determinada através de pequenos prismas. Como no caso anterior é possível relacionar

a resistência dos prismas àquelas das paredes através de tabelas.

Por último pode-se utilizar ensaios em paredes. Esta é a maneira mais precisa de avaliar a resistência à compressão da alvenaria já que os corpos de prova são construídos em escala real.

Neste trabalho deu-se ênfase ao estudo em unidades pois pretendia-se definir suas propriedades, entre elas a resistência, ainda desconhecidas.

Alguns prismas foram moldados para verificação do tipo de relação existente entre as resistências destes e das unidades e os resultados estão apresentados no item 7.4.

Os ensaios em paredes não foram realizados por apresentarem custo elevado, maior dificuldade de execução e fugirem ao escopo desta pesquisa.

7.1.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios de resistência à compressão de unidades foram divididos nas duas seguintes etapas:

1)verificação da resistência à compressão simples de sete diferentes misturas de cinza volante e cal, submetidas a quatro idades e a um único tipo de cura,

2)verificação da resistência à compressão simples de três misturas, escolhidas entre as sete anteriores, submetidas a quatro idades e a três tipos de cura,

Na primeira etapa analisou-se a influência do tempo e do teor de cal na RCS dos tijolos. Buscou-se em primeiro lugar determinar um teor ótimo de cal. Durante a segunda etapa, além destes fatores, estudou-se o efeito do tipo de cura sobre os resultados.

Os valores obtidos foram comparados a outros materiais aplicados na construção de alvenarias.

Os materiais e procedimentos utilizados nos ensaios foram descritos nos capítulos 4, 5 e 6.

7.1.3. PRIMEIRA ETAPA

7.1.3.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram testadas sete misturas curadas a 21°C em câmara de temperatura controlada por 7, 14, 28 e 60 dias.

O ensaio, seguindo a norma NBR 6460²³, encontra-se descrito no capítulo 6.

As misturas utilizadas e os resultados, médias de três valores com seus respectivos coeficientes de variação, encontram-se no quadro 7.1.

MISTURAS CINZA x CAL (%)	TEMPO (dias)							
	07		14		28		60	
	RCS	CV	RCS	CV	RCS	CV	RCS	CV
95 x 05	1.42	3.3	2.35	4.4	2.98	4.8	3.79	7.4
90 x 10	1.67	15.6	2.95	8.8	6.30	1.1	7.11	1.8
85 x 15	2.48	3.9	4.34	4.1	6.90	14.0	10.20	5.6
80 x 20	2.93	4.2	4.77	2.6	7.54	0.0	11.13	4.0
75 x 25	3.06	4.3	5.01	8.4	7.44	3.9	10.98	4.5
65 x 35	3.41	3.0	6.05	5.4	8.31	4.2	11.37	2.3
55 x 45	3.13	9.6	6.32	10.9	9.00	9.5	11.90	6.4

QUADRO 7.1 - Resultados de RCS (MPa) e CV (%)

7.1.3.2. ANALISE DOS RESULTADOS

Através das figuras 7.1 e 7.2 verifica-se facilmente o crescimento da resistência com a idade, que ocorre mais

rapidamente nos primeiros dias, e com a elevação do teor de cal.

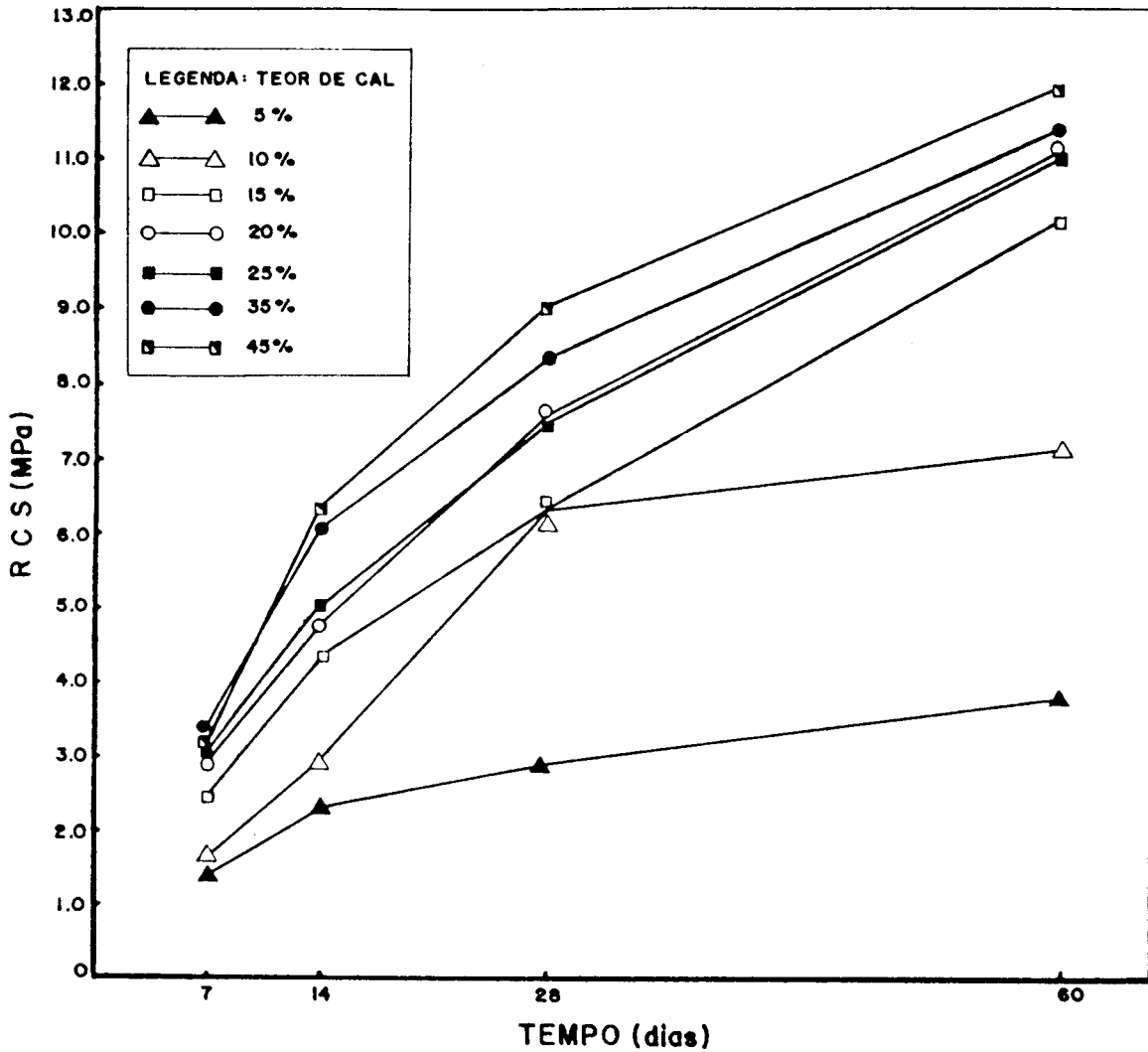


FIGURA 7.1 - RCS x tempo para 7 teores de cal

F	TEOR DE CAL (%)						
	05	10	15	20	25	35	45
CALCULADO	106.43	523.72	93.42	677.52	268.14	444.30	89.01
TABELADO	4.07	4.07	4.35	4.07	4.07	4.07	4.07

QUADRO 7.2 - Valores de F para influência do tempo na RCS - verificação em 7 misturas.

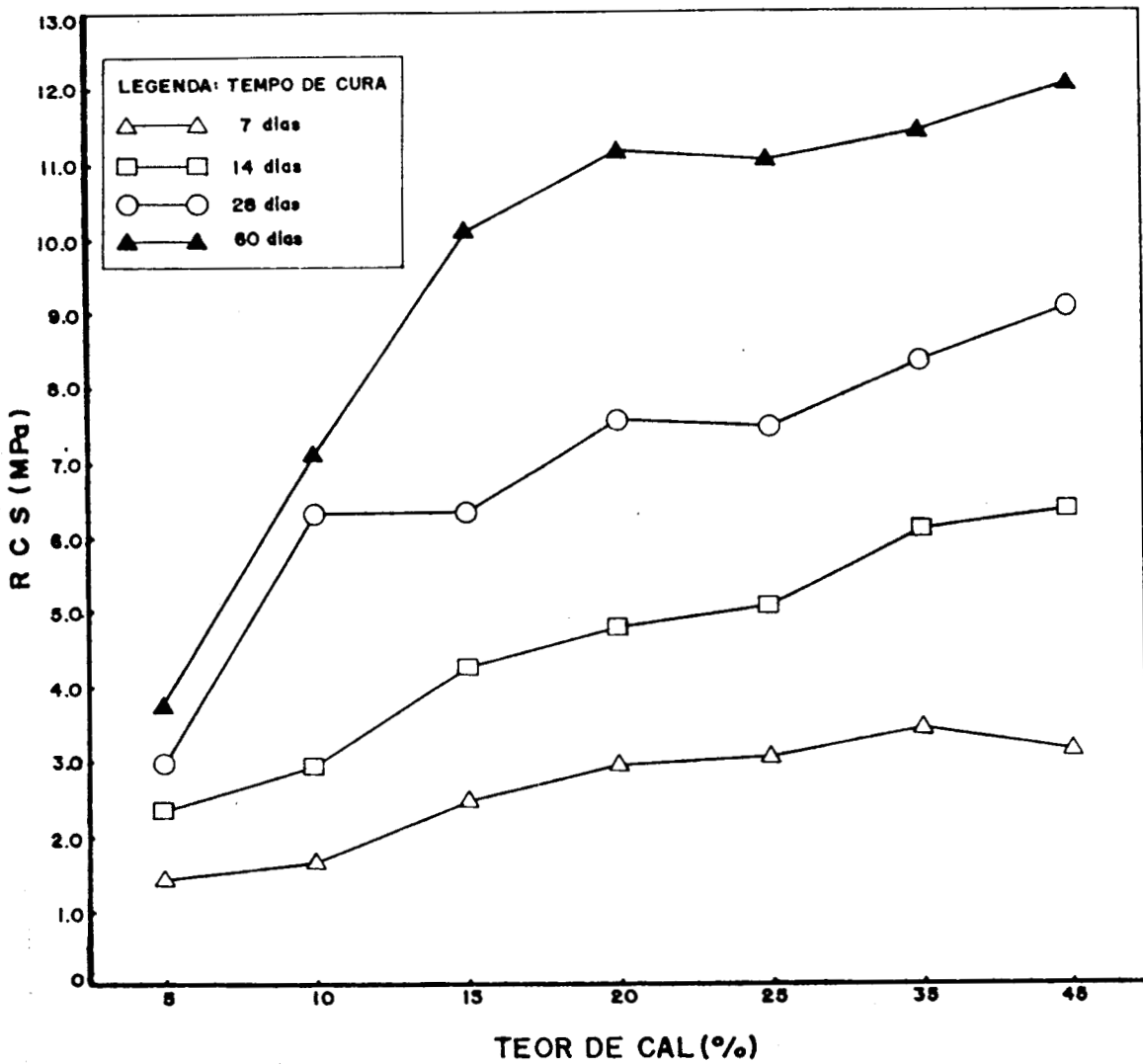


FIGURA 7.2 - RCS x teor de cal para 4 períodos de cura

F	TEMPO (dias)			
	07	14	28	60
CALCULADO	58.07	51.59	47.24	126.15
TABELADO	2.85	2.85	2.85	2.92

QUADRO 7.3 - Valores de F para influência do teor de cal na RCS - verificação em 4 idades.

Utilizou-se o programa Compvar para confirmar a influência destes fatores na resistência à compressão dos tijolos.

Os valores de F, a um nível de significância $\alpha=0.05$, encontrados para testar a hipótese da não existência de efeito destes fatores estão nos quadros 7.2 e 7.3 .

Como F calculado foi maior que F tabelado, existe diferença significativa quando se comparam resistências em várias idades. Isto verificou-se para todos os teores de cal.

O mesmo raciocínio aplica-se ao teste do teor de cal, como F calculado foi maior que F tabelado existe diferença significativa entre as resistências de vários teores qualquer que seja a idade testada.

Pode-se afirmar então que o período de cura e o teor de cal adicionado à mistura têm influência na resistência à compressão do tijolo.

Na tentativa de encontrar modelos capazes de representar o comportamento da resistência à compressão com o tempo e com a alteração do teor de cal submeteram-se os dados à análise pelo pacote de programas computacionais statgraphics através de sua opção de regressão não linear.

Para verificar a evolução da resistência com o tempo testou-se a equação abaixo, válida para o concreto, e que ajustou-se para argamassas e prismas de tijolos cerâmicos em dissertação³⁹ realizada no CPGCE da UFRGS.

$$RCS = \frac{a \times t}{b + t} \quad (3.2)$$

onde: t é o tempo (dias),

a, b são parâmetros da equação ajustada.

O quadro seguinte apresenta os resultados desta análise. A avaliação dos resultados permite concluir a validade da regressão já que os valores do coeficiente de determinação (r^2) foram superiores a 0.94 e todos os parâmetros a e b apresentaram-se significativos a um nível de confiança $\alpha=5\%$ (T_a e T_b calculados foram superiores a $T_{\alpha/2}$ tabelado).

	TEOR DE CAL (%)						
	05	10	15	20	25	35	45
a	4.85	18.88	15.55	16.32	15.35	16.88	23.25
b	16.55	73.42	36.99	32.31	28.38	32.35	44.07
T_a	17.62	2.22	8.31	14.60	11.76	14.45	4.10
T_b	23.98	13.39	25.29	38.80	27.46	32.35	14.86
$T_{\alpha/2}$	2.23	2.23	2.26	2.23	2.23	2.23	2.23
F_{cal}	575.01	179.24	639.55	1505.81	754.12	1046.41	20.91
F_{tab}	4.07	4.07	4.35	4.07	4.07	4.07	4.07
r^2	.9829	.9472	.9846	.9934	.9869	.9905	.9567
se	.2102	.9825	.6592	.2812	.4615	.3603	.0991

QUADRO 7.4 - Análise de regressão não linear. Relação RCS x tempo. Equação ajustada: (3.2)

As curvas obtidas para as sete misturas acham-se representadas na figura 7.3. Através dela pode ser observado o seguinte:

a) à medida que aumenta o tempo de cura dos tijolos cresce a sua resistência, como já notado na figura 7.1;

b) quanto maior o teor de cal, maior a resistência do tijolo, confirmando figura 7.2;

c) a resistência aumenta acentuadamente nas primeiras idades fazendo-se de forma cada vez mais lenta com o passar do tempo;

d) o crescimento da resistência na mistura 95x05 foi bem menos intenso que nas demais;

e) as misturas 80x20 e 75x25 apresentaram resultados muito próximos mas isto provavelmente deveu-se à variabilidade experimental. Por problemas de tempo e disponibilidade de

equipamentos os corpos de prova não puderam ser moldados todos em um mesmo dia. Desta forma introduziu-se, inevitavelmente, alguma variabilidade (erro) nos resultados (vide item 3.3).

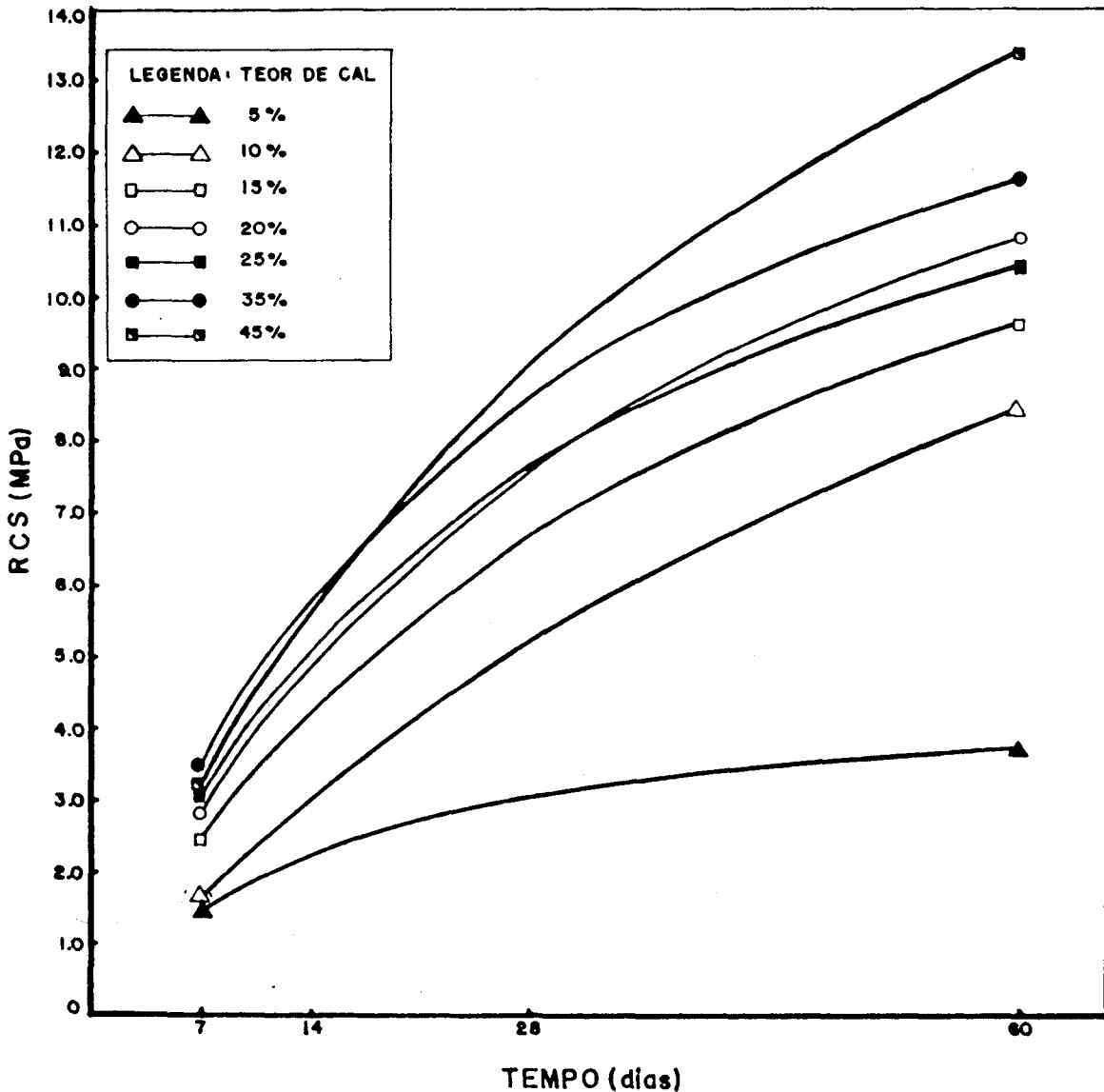


FIGURA 7.3 - RCS x tempo para 7 teores de cal
Curvas de Regressão
Equação ajustada: (3.2)

Dos valores obtidos até então, percebe-se que o tempo é uma variável de extrema importância na resistência dos tijolos.

Segundo NARDI⁴⁷, as reações responsáveis pelo desenvolvimento da resistência ocorrem durante longo período de

tempo e cada vez mais lentamente, realizando-se a maior parte delas, contudo, no prazo de um ano.

As curvas aqui apresentadas são válidas apenas para o período de 7 a 60 dias. Dentro deste prazo, no entanto, os tijolos já terão atingido resistência suficiente para serem empregados na construção de alvenarias.

Na busca de uma curva que representasse a evolução da resistência com o teor de cal foram testados vários tipos de equações.

Da análise numérica e gráfica concluiu-se que os resultados experimentais ajustavam-se melhor às equações seguintes:

$$RCS = \frac{a \cdot x \cdot x}{b + x} \quad (3.3) \qquad RCS = a - b/x \quad (3.4)$$

onde: x é o teor de cal (%),

a, b são parâmetros da equação ajustada.

A equação do tipo 3.3 representou o comportamento da resistência com a variação do teor de cal aos 7 e 14 dias, enquanto que a 3.4 foi utilizada para o período de 28 e 60 dias.

Não foi possível definir uma curva única que representasse o comportamento dos corpos de prova em qualquer idade de cura provavelmente devido ao fato das reações não ocorrerem com velocidade constante ao longo do tempo. Assim, sabendo-se que a maior parte delas desenvolve-se nas primeiras semanas é razoável aceitar que aos sete dias, por exemplo, um grande número de reações esteja ocorrendo não havendo uma diferença muito grande entre dois teores comparados. Porém, com o passar do tempo, o teor mais elevado de cal desenvolverá reações em número maior que aquelas que se realizam no teor mais baixo. Desta forma comparando-se novamente os teores,

digamos aos 28 dias, perceber-se-á uma maior diferença entre eles.

	TEMPO (dias)			
	07 *	14 *	28 #	60 #
a	3.99	7.40	92.72	131.52
b	9.79	11.46	317.67	479.82
Ta	11.54	14.32	25.65	42.86
Tb	10.45	15.18	8.37	13.58
Ta/2	2.09	2.09	2.09	2.09
Fcal	109.28	230.51	184.36	356.10
Ftab	2.79	2.79	2.79	2.79
r2	.8527	.9243	.9070	.9447
Se	.3834	.4473	.6014	.6880

QUADRO 7.5 - Análise de regressão não linear. Relação RCSxTeor de cal. Equações ajustadas: (3.3)* e (3.4)*.

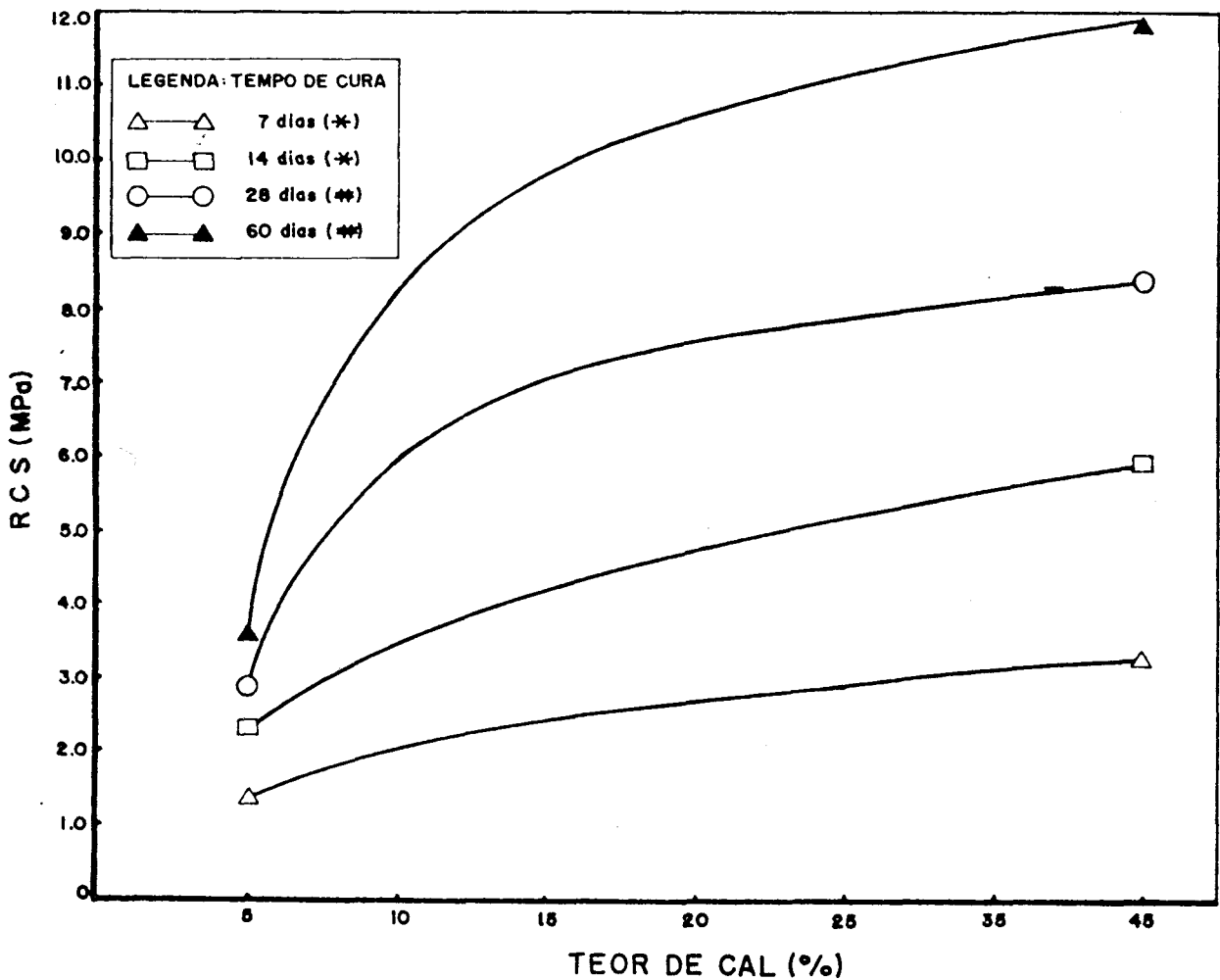


FIGURA 7.4 - RCS x Teor de cal para 4 períodos de cura
Curvas de regressão
Equações ajustadas: (3.1.2)* e (3.1.3)*.

O quadro 7.5 apresenta o resultado do programa statgraphics para as duas curvas.

Verificou-se a validade das regressões, uma vez que os valores dos coeficiente de determinação foram bons e os parâmetros significativos a um nível de confiança de $\alpha=0.05$ (T_a e T_b calculados muito superiores a $T_{\alpha/2}$ tabelado).

As curvas obtidas das equações testadas para quatro períodos de cura acham-se na figura 7.4. Observa-se o seguinte:

a) a resistência cresce com o aumento do teor de cal e com a idade, conforme as figuras 7.1, 7.2 e 7.3 já haviam mostrado;

b) o crescimento da resistência ocorre de forma mais acentuada até o teor 15%. A partir daí ela continua crescendo, porém cada vez mais lentamente, tendendo a tornar-se constante. Este fato é mais visível aos 28 e 60 dias;

c) a influência do teor de cal não aparece de maneira idêntica nas quatro idades. Equações distintas são necessárias para ajustar os resultados obtidos aos 07 ou 14 dias e aos 28 ou 60 dias. A maior distinção entre as curvas ocorre para os teores abaixo dos 15%, reforçando a afirmação do item b.

Desta forma ficou evidenciada a importância da cal na resistência dos tijolos.

As misturas de cinza volante e cal tornam-se resistentes a partir do desenvolvimento de reações entre os silicatos e aluminatos da cinza volante com o hidróxido de cálcio da cal. Como a cinza volante entra em proporção muito maior na mistura existe carência do hidróxido de cálcio e qualquer aumento do mesmo provocará ocorrência de novas reações, conduzindo a maiores resistências.

Os resultados de resistência à compressão simples dos tijolos de cinza volante e cal foram comparados aos valores mínimos exigidos pelas normas NBR 7170²² para tijolos cerâmicos

e NBR 8491²⁴ para tijolos de solo-cimento. Estes valores encontram-se no quadro 7.6.

NORMA	MATERIAL	RESISTENCIA (MPa)
NBR 7170	Tijolo ceramico	classe [A= 1.5 B= 2.5 C= 4.0
NBR 8491	Tijolo de solo-cimento	valor [medio > 2.0 indiv. > 1.7

QUADRO 7.6 - Resistências mínimas exigidas pelas normas.

Da comparação com a NBR 7170 verificou-se que apenas a mistura 95x05 aos 7 dias ficou abaixo do mínimo exigido para a classe A. A partir dos 14 dias todas as misturas, exceto a 95x05 e a 90x10, enquadraram-se na classe C.

Comparando-se os resultados com a NBR 8491 somente os teores 95x05 e 90x10 aos 7 dias ficaram abaixo do valor médio mínimo.

Alguns autores têm comentado que os valores de RCS exigidos pela NBR 7170 são muito inferiores àqueles apresentados pelos tijolos cerâmicos oferecidos no mercado. No entanto, deve-se considerar que mesmo possuindo resistências superiores estes tijolos apresentam um elevado coeficiente de variação que não garante sua qualidade.

Em 1983, ROMAN²¹ realizou um estudo em tijolos coletados em diferentes olarias da grande Porto Alegre e demonstrou ser possível agrupá-los em três níveis distintos de resistências, 3.5, 7.74 e 14.92 MPa. Estes valores mostraram que as resistências de tijolos disponíveis no mercado, na época, eram realmente maiores que aquelas exigidas pela norma. No entanto a variabilidade encontrada entre as várias olarias e até dentro das mesmas foi elevada.

Comparando-se as resistências dos tijolos de cinza volante e cal às resistências encontradas no trabalho citado verifica-se que:

a) aos 7 dias todas as misturas ficaram abaixo do nível mínimo,

b) as misturas 95x05 aos 60 dias, 90x10 a partir dos 28 dias e as demais acima dos 14 dias apresentaram valores que se situaram entre os níveis médio e mínimo,

c) com o crescer da idade as misturas de cinza volante e cal alcançaram o nível médio de resistência e aproximaram-se do nível máximo.

SILVA⁵⁴ realizou estudos em tijolos de cinza volante, cal e areia. Uma mistura composta por 10% de cal, 40% de cinza volante e 50% de areia do rio Guaíba foi submetida a várias pressões de moldagem e três períodos de cura. A resistência máxima encontrada foi de 2.53 Mpa aos 28 dias de cura e 3.48 MPa aos 60 dias. Estes valores ficaram bem abaixo dos resultados obtidos, nas mesmas idades, com os tijolos de cinza volante e cal, considerando-se a mistura 90x10.

7.1.4. SEGUNDA ETAPA

7.1.4.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta etapa reduziu-se para três o número de misturas estudadas. Os menores teores de cal foram selecionados já que um dos objetivos do trabalho era encontrar uma utilização para a cinza volante e esta era o componente de menor custo da mistura.

A mistura 95x05, no entanto, foi retirada do estudo por apresentar uma quantidade de cal excessivamente baixa que conduziu a resistências não satisfatórias.

Os corpos de prova desta etapa foram curados por 7, 14, 28 e 60 dias e utilizaram-se três tipos de cura: câmara de

temperatura controlada, como na primeira etapa, câmara úmida e lona plástica preta. A descrição destes processos encontra-se no capítulo 5.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (média de três valores) acompanhados dos respectivos coeficientes de variação estão no quadro 7.7.

CURA (tipo)	CAL (%)	TEMPO (dias)							
		07		14		28		60	
		RCS	CV	RCS	CV	RCS	CV	RCS	CV
LONA	10	0.92	6.7	1.83	4.3	3.19	2.8	5.60	2.0
	15	1.46	7.4	2.40	3.5	4.97	5.3	5.54	13.9
	20	1.49	3.1	2.93	2.8	5.39	8.2	7.68	10.4
CAM. UMIDA	10	1.22	9.5	2.68	3.4	3.56	2.4	3.81	9.6
	15	2.51	2.3	3.41	8.3	5.68	1.9	6.82	11.8
	20	2.65	4.8	4.43	6.3	6.05	11.3	8.29	7.4
CAM. TEMPER. CONTROL.	10	1.18	7.9	2.31	5.6	3.88	7.6	6.23	1.3
	15	1.93	4.4	3.04	6.5	4.40	4.7	8.09	6.9
	20	1.94	10.5	3.69	7.9	5.79	3.4	7.43	1.4

QUADRO 7.7 - Valores médios de RCS(MPa) e CV (%) de tijolos de cinza volante e cal submetidos à 3 tipos e 4 períodos de cura.

7.1.4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

TEOR DE CAL (%)	TEMPO (dias)			
	07	14	28	60
10	9.26	52.56	10.44	92.30
15	111.28	18.79	30.30	10.22
20	51.38	29.73	1.39	1.73

QUADRO 7.8 - Valores de F calc. para influência do processo de

Os dados obtidos no ensaio foram submetidos à análise estatística pelo programa Compvar. O quadro 7.8 mostra os valores de F calculado, com um nível de significância $\alpha=0.05$, encontrados para testar a hipótese de inexistência de efeito do tipo de cura sobre a resistência.

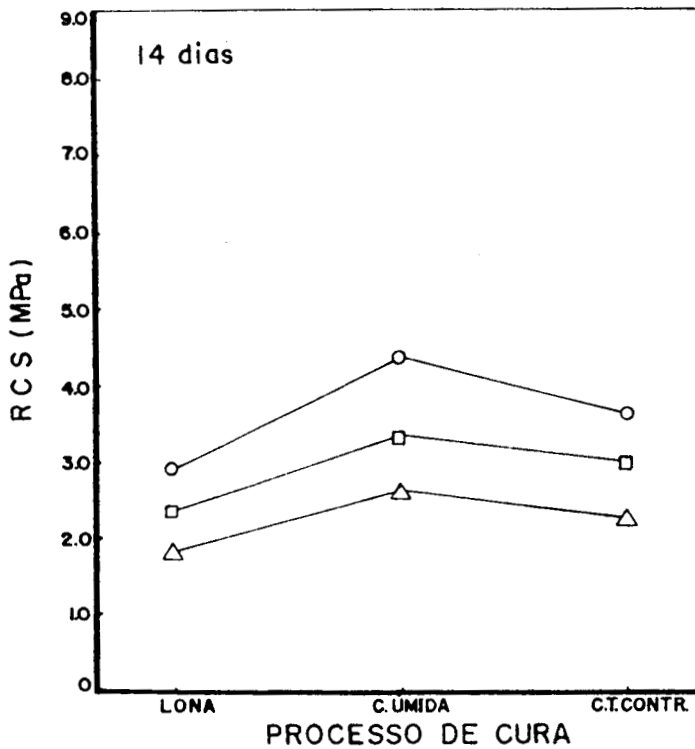
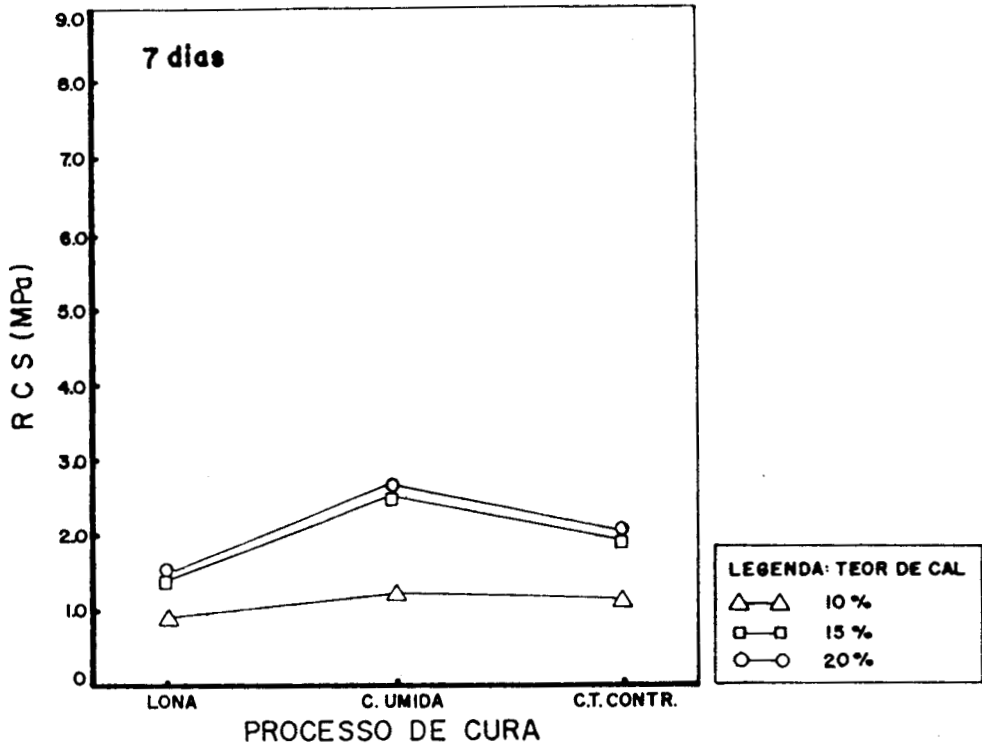
O valor de F tabelado foi o mesmo para todos os casos e igual a 5.14. Os valores de F calculado foram maiores que F tabelado, com excessão do teor 80x20 aos 28 e 60 dias. Assim para os demais casos existe uma diferença significativa entre as médias de resistências obtidas com diferentes curas.

Observando-se as figuras 7.5 a 7.8 percebe-se que aos 7 e 14 dias todas as misturas obtiveram maiores resistências quando submetidas à cura em câmara úmida, ficando a cura em câmara de temperatura controlada em segundo lugar.

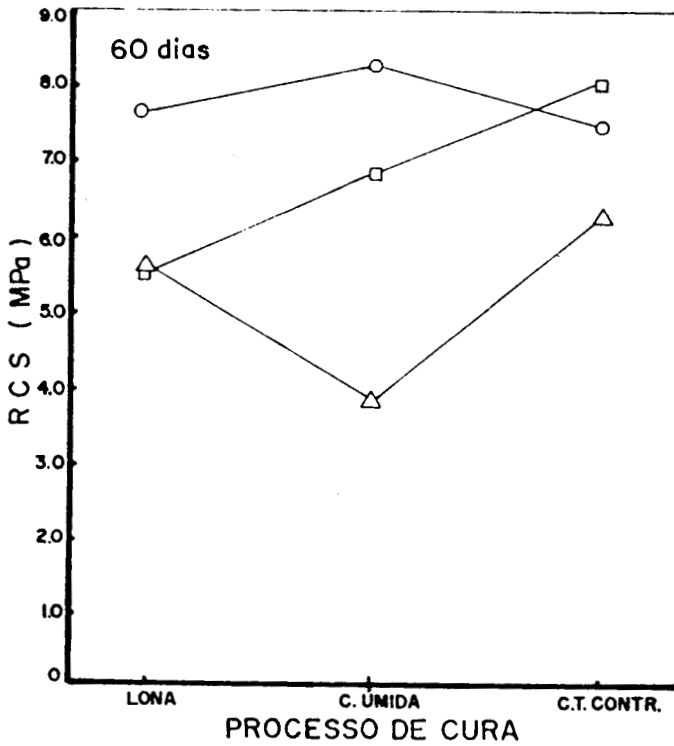
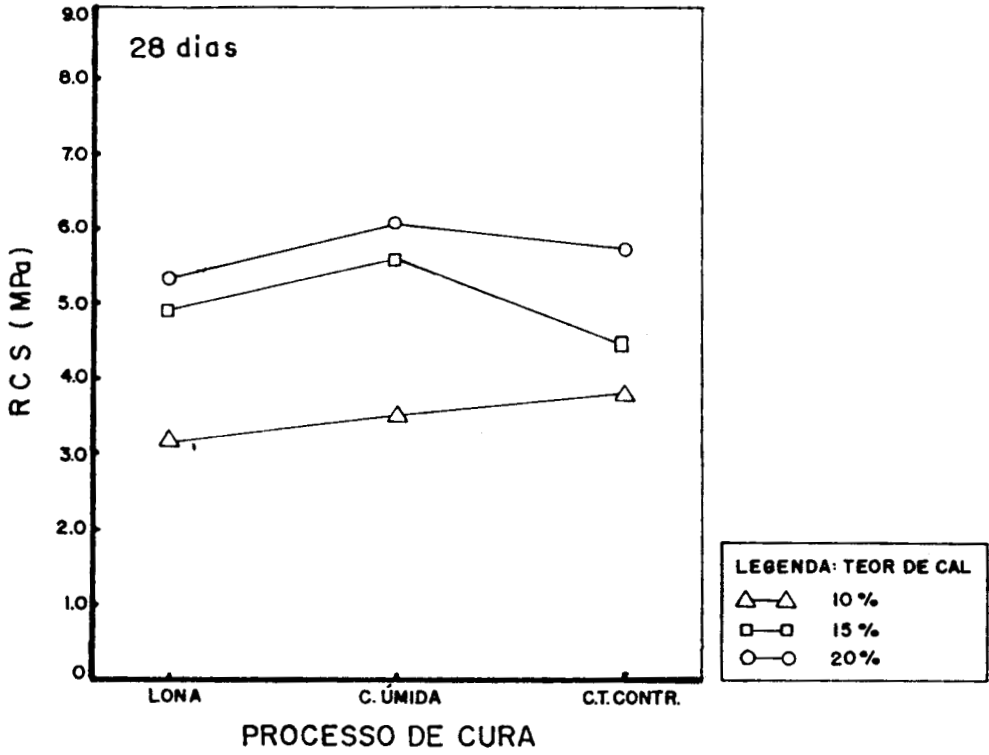
A mistura 80x20 continuou mostrando esta tendência aos 28 e 60 dias, porém, nas outras duas os resultados variaram. Os teores 85x15 aos 60 dias e 90x10 aos 28 e 60 dias obtiveram valores mais altos quando submetidos à câmara de temperatura controlada.

No caso do teor 80x20 aos 28 e 60 dias, o programa Compvar mostrou não haver diferença significativa entre as resistências nos três tipos de cura, porque estas diferenças foram pequenas em relação àquelas observadas nos demais casos.

As resistências obtidas com o processo de lona plástica preta foram as menores na grande maioria dos casos. Os benefícios que se esperava obter com este tipo de cura, criação de um ambiente quente e úmido que acelerasse as reações, provavelmente tenham sido prejudicados devido a sua realização ter se efetuado durante os meses de inverno com pouco sol durante o dia e temperaturas muito baixas à noite. Considerando-se porém, que é um método econômico e prático, seria interessante a repetição do experimento durante uma época de clima mais propício.



FIGURAS 7.5 e 7.6 - R C S x processo de cura para 3 misturas curadas por períodos de 7 e 14 dias, respectivamente.



FIGURAS 7.7 e 7.8 - RCS x Processo de cura para 3 misturas curadas por períodos de 28 e 60 dias, respectivamente.

Devido às variações de comportamento observadas não foi possível afirmar-se que o processo de cura tenha exercido efeito sobre os resultados de RCS, embora tenha-se verificado uma tendência para a obtenção de valores mais elevados com a utilização de câmara úmida. De qualquer forma os três tipos de cura testados proporcionaram o desenvolvimento de resistência aceitável.

Os resultados desta segunda etapa foram também submetidos ao programa statgraphics na tentativa de confirmarem-se as regressões anteriormente encontradas. O quadro seguinte mostra os resultados desta análise com relação ao tempo.

CURA	LONA			CÂM. ÚMIDA			CÂM. TEMP. CONTROLADA			
	CAL (%)	10	15	20	10	15	20	10	15	20
a		19.98	10.75	21.86	7.78	8.05	11.23	16.60	10.02	14.69
b		144.85	44.98	94.90	35.93	16.02	22.60	91.49	30.13	45.56
Ta		2.69	4.73	5.55	3.67	10.51	11.96	3.32	7.91	4.48
Tb		32.09	17.48	43.35	10.85	13.85	22.23	25.01	19.61	16.81
T $\alpha/2$		2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23
Fcal		1030.25	305.70	1878.98	117.69	191.76	494.10	625.86	384.48	282.47
Ftab		4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07
r ²		.9904	.9683	.9947	.9217	.9504	.9802	.9843	.9747	.9658
Se		.1512	.6821	.6422	.6708	.6159	.4523	.2483	.8621	.5664

QUADRO 7.9 - Análise de regressão não linear para relação RCS(MPa) x tempo(dias). Equação ajustada: (3.2)

O coeficiente de determinação (r^2) foi superior a 0.92 e os parâmetros a e b foram todos significativos, já que Ta e Tb calculados foram sempre superiores a T $\alpha/2$ tabelado.

Assim confirmou-se o ajuste da equação 3.2 também para esta segunda etapa. Entretanto, os parâmetros encontrados não coincidiram com aqueles da fase anterior para as mesmas misturas submetidas à cura em câmara de temperatura controlada. Isto ocorreu porque os valores de resistência obtidos na segunda etapa dos ensaios foram inferiores aos da etapa anterior.

Verificou-se então que, embora os coeficientes de variação dos resultados tenham sido pequenos dentro da primeira ou da segunda etapa, a variabilidade encontrada entre elas foi elevada. SNYDER²² admite ser a cinza um material extremamente variável, de tal forma que deveria ser sempre testada antes de sua utilização, pois não existiriam duas cinzas com iguais características.

BERETKA e BROWN²⁷ afirmam também ser a cinza volante um material heterogêneo pois significantes variações nas condições de operação e temperaturas de queima e nos combustíveis utilizados afetam a composição e o tamanho da partícula.

Além da variabilidade deste material, a cal também não apresenta uma qualidade constante, não se conhecendo exatamente os teores de óxidos e impurezas presentes.

Como não foi possível a moldagem de todos os tijolos testados de um mesmo saco de cal ou de um único recebimento de cinza volante é provável que esta tenha sido a causa da variação dos resultados, já que as condições à que estiveram submetidos os corpos de prova foram idênticas nas duas etapas.

Este fato pode ser facilmente visualizado nas figuras 7.9 a 7.11.

Nota-se que, apesar da diferença entre as curvas da primeira e segunda etapa para cura em câmara de temperatura controlada, elas são quase paralelas confirmando-se graficamente que seguem uma mesma equação, onde mudam apenas os parâmetros.

Pode-se observar também que:

a) as curas em lona e câmara de temperatura controlada têm mostrado um paralelismo no decorrer do período de cura, a segunda conduzindo aos valores mais elevados. O resultado observado na figura 7.11 é provavelmente devido à variabilidade

(erro) experimental cujas causas já foram citadas anteriormente;

b) a cura em câmara úmida apresenta uma tendência a fornecer maiores resultados nas primeiras idades, mas reduz sua taxa de crescimento. Enquanto as curvas das outras duas curas mostram uma tendência de continuar crescendo, a curva da câmara úmida já está próxima de horizontalizar-se.

As figura 7.12 a 7.14 apresentam estes mesmos resultados agrupados sob uma nova forma, apenas para ilustrar o comportamento de cada mistura quando submetidas a uma mesma cura. Nelas observa-se claramente o crescimento da resistência com a idade e com o teor de cal, qualquer que seja a cura experimentada.

O comportamento geral leva às seguintes considerações:

a) se for necessária uma cura rápida, ou seja, que não possa consumir muitos dias, os tijolos devem ser submetidos à câmara úmida, já que nesta a taxa de crescimento da resistência é bem elevada às primeiras idades;

b) se o fator tempo não for limitante os outros dois processos de cura são mais indicados, uma vez que em idades mais avançadas fornecem maiores resistências e ainda apresentam a tendência de continuarem crescendo. Os valores obtidos em câmara de temperatura controlada mostraram-se um pouco superiores àqueles obtidos sob lona plástica preta.

Não é possível estabelecer o que irá acontecer depois da retirada dos corpos de prova do ambiente de cura. Assim, por exemplo, se tomarmos dois tijolos da mistura 80x20, um da câmara úmida e outro da câmara de temperatura controlada e deixarmos os mesmos em outro ambiente qualquer, não se pode afirmar que o segundo atingirá valores maiores que o primeiro, como seria esperado se não se alterassem as condições de cura. Uma combinação entre processos de cura talvez proporcionasse melhores resultados. Isto no entanto teria que ser verificado

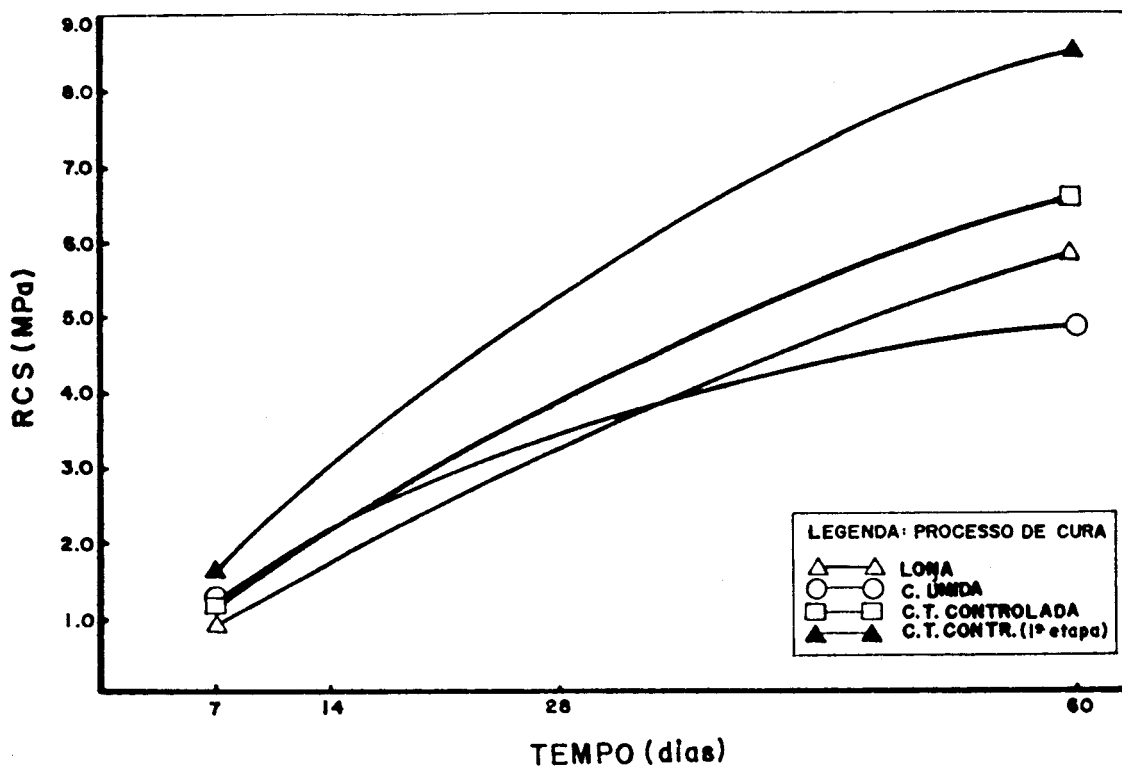


FIGURA 7.9 - RCS x Tempo para mistura 90x10 sob 3 processos de cura. Curvas de Regressão. Equação ajustada: (3.2)

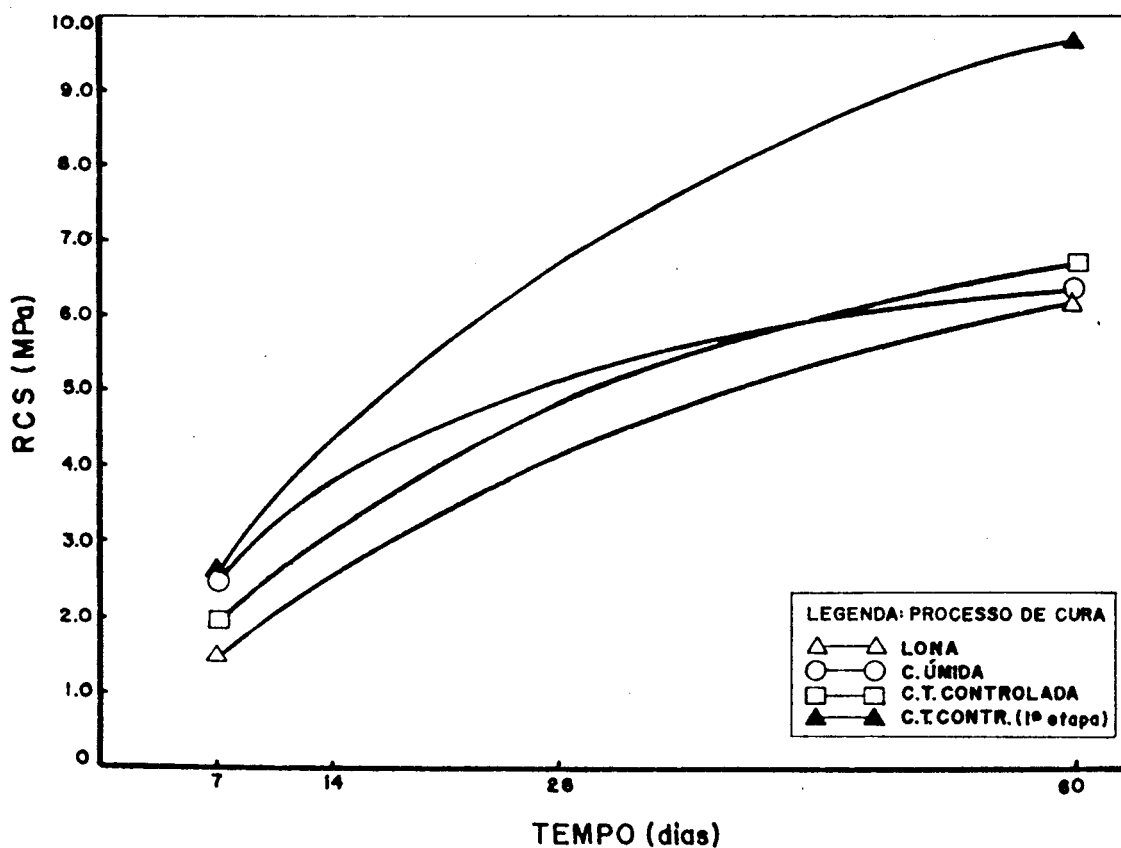


FIGURA 7.10 - RCS x Tempo para mistura 85x15 sob 3 processos de cura. Curvas de Regressão. Equação ajustada: (3.2)

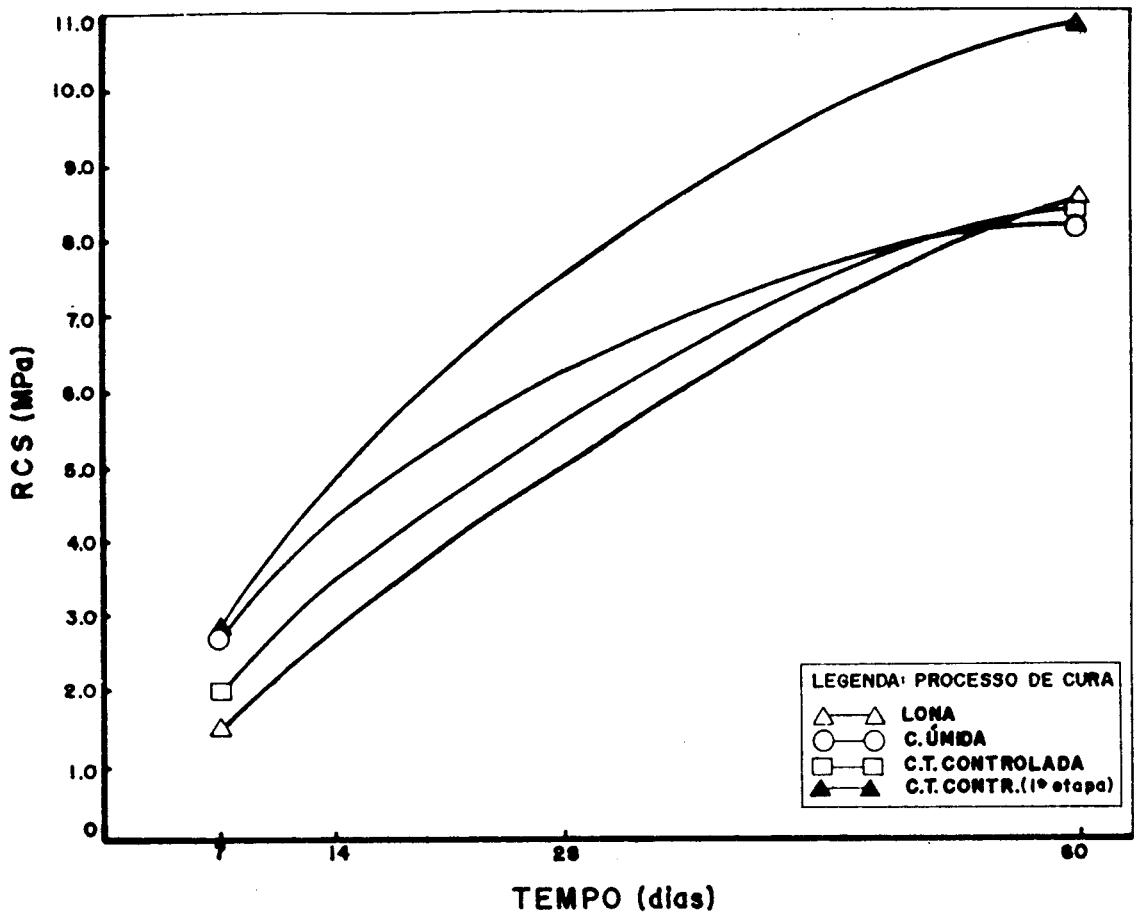


FIGURA 7.11 - RCS x Tempo para mistura 80x20 sob 3 processos de cura. Curvas de Regressão Equação ajustada: (3.2)

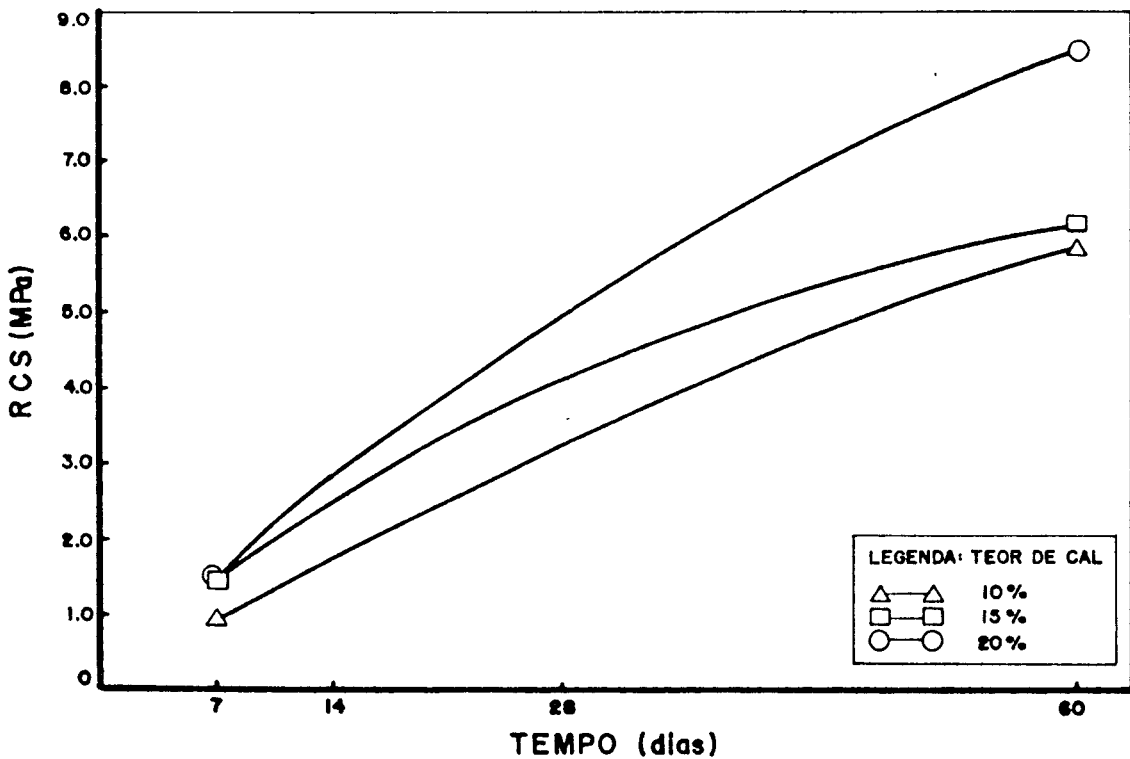


FIGURA 7.12 - RCS x tempo para 3 teores de cal - Cura em lona Curvas de regressão - Equação ajustada: (3.2)

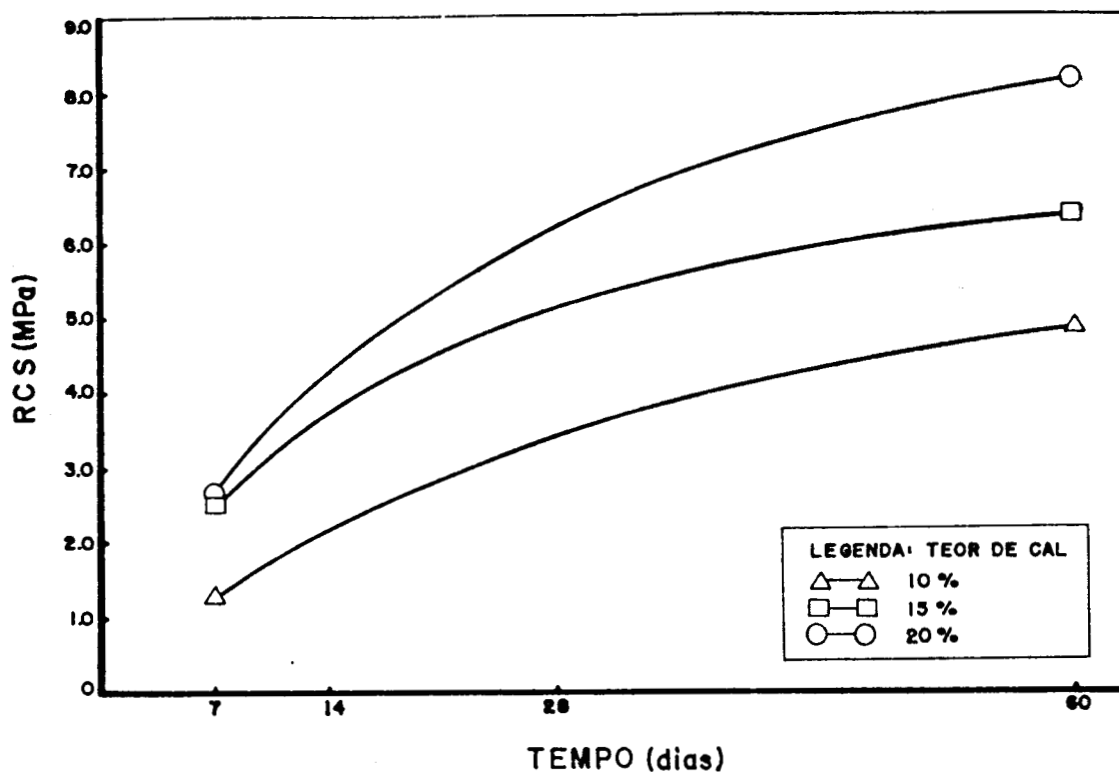


FIGURA 7.13 - RCS x Tempo para 3 teores de cal submetidos à câmara úmida.
Curvas de regressão. Equação ajustada: (3.2)

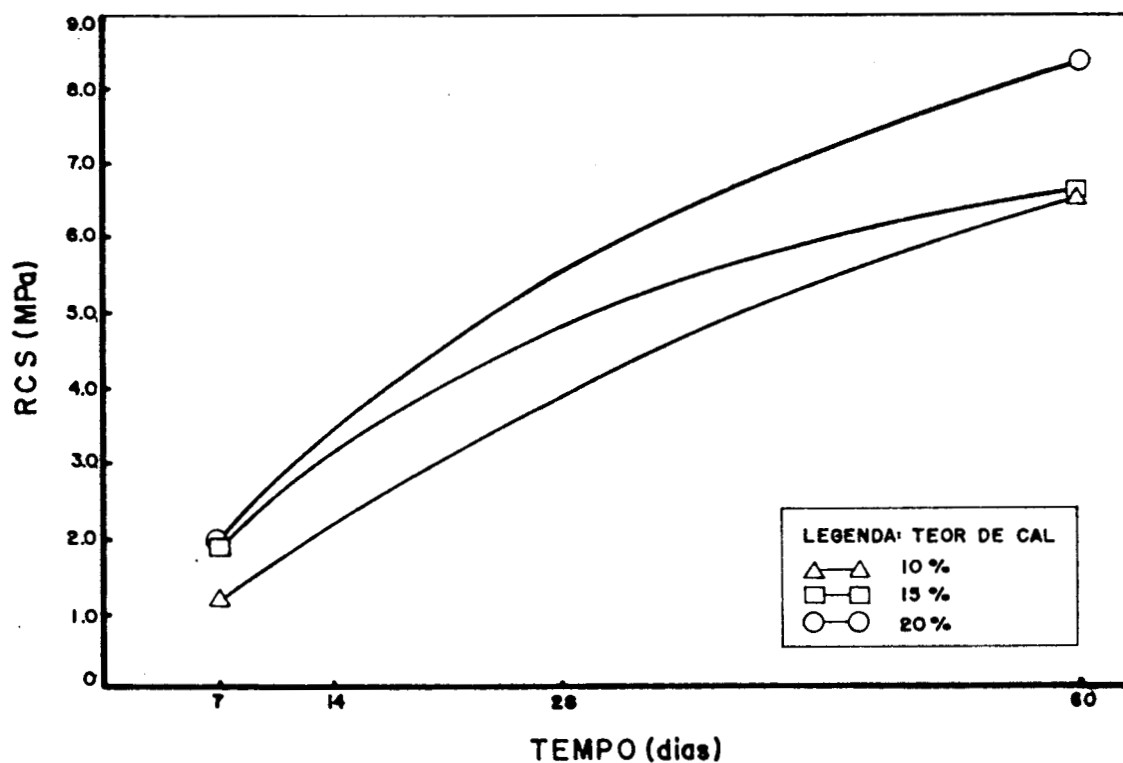


FIGURA 7.14 - RCS x Tempo para 3 teores de cal submetidos à câmara de temperatura controlada.
Curvas de regressão. Equação ajustada: (3.2)

experimentalmente.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria submeter os tijolos a uma cura sem cuidados especiais, expostos ao ambiente do laboratório, para verificar se ocorreria prejuízo da resistência, já que os processos testados não apresentaram grandes diferenças entre si.

A escolha de um processo de cura dependerá então da disponibilidade de instalações e tempo e da finalidade que os tijolos deverão cumprir, contudo, deve-se ressaltar que a partir dos 14 dias todas as misturas atendem aos requisitos das normas.

Segundo alguns autores^{42,53,59} a resistência dos tijolos pode ser aumentada significativamente se eles forem cozidos em fornos, no mesmo processo utilizado para tijolos cerâmicos e em menor tempo, ou ainda, se forem submetidos à autoclave. Estes processos porém implicam maiores custos.

MANZ⁴², utilizando uma cinza rica em CaO, produziu tijolos que não foram queimados, sendo simplesmente submetidos à cura por secagem a 100°C. Estes tijolos, embora tenham apresentado menores resistências que aqueles queimados, ainda ficaram bem acima do valor mínimo exigido.

Para verificar a validade do processo para os tijolos de cinza volante e cal estudados nesta pesquisa, cinco unidades foram moldadas e colocadas em estufa a 100°C até atingirem constância de peso (aproximadamente 48 hs). Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples realizado sobre esta amostra aparecem no quadro 7.10.

Estes valores de resistência foram equivalentes àqueles encontrados para os tijolos curados a temperaturas normais aos 14 dias na primeira etapa e aos 28 dias na segunda etapa.

Esta amostra, embora pequena, fornece uma idéia da sensível melhora que se obtém na resistência à compressão dos tijolos quando os mesmos são submetidos a altas temperaturas.

AMOSTRA	RCS (MPa)
1	4.76
2	5.23
3	5.09
4	4.50
5	4.76

QUADRO 7.10 - RCS para tijolos de cinza volante e cal curados em estufa (100°C) por aproximadamente 48 hs Mistura 85x15.

7.2. VERIFICAÇÃO DA DURABILIDADE

A verificação da durabilidade do material cinza volante e cal foi realizada para que se obtivesse um indicativo da resistência à deterioração deste produto.

Ensaio realizado em mini paredes expostas às condições climáticas reais ou reproduzidas em laboratório seriam dispendiosos em tempo e custo. Por este motivo optou-se pela realização de um método simples e rápido, elaborado para solo-cimento, que consiste em submeter o corpo de prova a ciclos de molhagem e secagem.

7.2.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram moldados corpos de prova representativos de sete misturas, as mesmas utilizadas na primeira etapa dos ensaios de resistência, curados em câmara de temperatura controlada por períodos de 7, 14, 28 e 60 dias. Para cada combinação de variáveis foram testados dois espécimes.

Teor de cal (%)	Tempo (dias)			
	7	14	28	60
05	21.1	10.6	15.5	6.7
10	11.7	6.9	6.1	2.3
15	6.4	3.6	3.0	2.5
20	3.0	1.6	1.0	2.0
25	2.4	2.0	2.4	1.4
35	1.4	1.0	1.8	0.8
45	0.8	0.1	1.0	0.0

QUADRO 7.11 - Resultados de perda de peso corrigida (PPC) de tijolos de cinza volante e cal submetidos ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

O ensaio como descrito no item 6.3 sofreu uma pequena modificação. A secagem dos corpos de prova foi realizada no mesmo ambiente em que foram curados e não em estufa como recomenda a norma. Esta mudança foi efetuada porque a alta

temperatura da estufa poderia acelerar as reações entre a cinza volante e a cal alterando os resultados.

Os valores obtidos no ensaio encontram-se no quadro 7.11.

7.2.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Devido ao fato do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem ter sido idealizado para o material solo-cimento, a cinza volante teve que ser caracterizada como se fosse um solo.

Com limites de liquidez e plasticidade iguais a zero e 90% do material passante na peneira 200 a cinza volante classificou-se como um solo do tipo A4.

A água retida durante o ensaio para este tipo de solo é de aproximadamente 3% e a perda de peso máxima admissível 10%.

Assim observando-se os resultados do quadro 7.11 verifica-se que, com excessão das misturas 95x05 até os 28 dias de idade e da mistura 90x10 aos sete dias, o material cinza volante e cal apresenta desgastes consideravelmente inferiores ao máximo permitido.

A mistura 95x05, como já havia sido demonstrado pelos ensaios de resistência, possui teor de cal muito baixo, o qual é incapaz de propiciar-lhe as condições mínimas de aceitabilidade.

A partir deste ensaio pôde-se observar que a mistura cinza volante e cal apresenta boa durabilidade. No entanto, testes com pequenas paredes ou prismas devem ser realizados, submetendo os mesmos aos vários tipos de agressividade à que poderiam estar expostos e por períodos significativos, sejam em escala real ou acelerada de laboratório.

Manz⁴¹ relatou uma experiência em que tijolos de misturas de cinzas leve e pesada foram utilizados na construção

de painéis que foram expostos por aproximadamente dezesseis anos, apresentando pequena deterioração apenas acima deste período.

7.3. VERIFICAÇÃO DA ABSORÇÃO

7.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O fenômeno da umidade nas edificações é um dos problemas de mais difícil e dispendiosa solução dentro da construção civil, causando o desconforto do usuário e a degradação dos materiais.

As consequências advindas da umidade são várias e podem ser constatadas tanto no próprio componente como na superfície dos revestimentos.

A adesão dos materiais de acabamento como pinturas, papéis de parede e pisos é marcadamente reduzida pela presença de umidade na área de contato com a superfície de base. Além disso muitos materiais de construção são mais fracos quando molhados do que quando secos. Isto é observado com os tijolos cerâmicos³².

A alternância entre molhagem e secagem tem como resultado a diminuição da durabilidade dos materiais, causada por mecanismos como a alteração dimensional dos elementos, corrosão, apodrecimento biológico, lixiviação, eflorescência ou congelamento⁴⁰.

Segundo ELDRIDGE³², a maioria dos materiais de construção porosos aumentam de volume com a absorção de água. No momento da secagem podem ocorrer fissuras devidas à retração. A água pode também prover as condições necessárias para algumas formas de alteração química, como o ataque alcalino sobre os filmes das tintas, e também as condições ideais para o desenvolvimento de fungos.

A resistência térmica dos materiais isolantes pode sofrer um decréscimo devido a acumulação d'água tornando-os mais permeáveis ao calor³⁹.

A passagem da água para o interior da edificação proporciona a formação de bolores criando um ambiente insalubre à permanência do usuário.

A penetração d'água através da alvenaria pode ocorrer por aberturas na forma de poros, fissuras ou juntas, sendo mais comum a ocorrência pela interface tijolo-argamassa⁴⁰.

A utilização de argamassas de revestimento aumenta a resistência da alvenaria à penetração d'água, preenchendo imperfeições da superfície não revestida, mas em muitos casos é insuficiente para tornar a parede estanque.

Através destas considerações pode-se perceber a importância da absorção na avaliação da qualidade do material.

Esta pesquisa dedicou-se unicamente ao estudo da absorção das unidades, já que tinha por objetivo caracterizar o tijolo de cinza volante e cal.

Avaliações sobre a absorção através das juntas e argamassas de revestimento ficam aqui indicadas como sugestão para trabalhos futuros.

A aderência entre tijolo e argamassa foi estudada no item 7.5.

7.3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um primeiro grupo de tijolos, destinados a ensaios de absorção, foi moldado com teores de 10,15 e 20% de cal e submetido à cura em câmara de temperatura controlada por 7, 14, 28 e 60 dias juntamente com aqueles destinados à segunda etapa dos ensaios de RCS.

Os procedimentos adotados na moldagem e cura estão descritos no item 5.1 . Para cada combinação de variáveis foram utilizados três espécimes.

Os ensaios foram executados baseados na norma ASTM C 670³. Segundo ela os tijolos foram submetidos a três testes:

- a) razão de absorção inicial ou sucção,
- b) absorção por submersão em água fria,
- c) absorção máxima por submersão em água fervente.

Os procedimentos adotados estão descritos no item 6.4.

Os resultados obtidos foram comparados àqueles apresentados por outros materiais e buscou-se verificar a influência exercida pelo tempo, teor de cal, e tipo de cura na absorção.

Um segundo grupo, composto apenas pela mistura com teor de cal 15% e submetido à cura em câmara de temperatura controlada durante 14 dias, foi moldado sob variados teores de umidade e pesos específicos aparentes secos, buscando avaliar o efeito destes fatores nos valores de absorção. Cada grupo ensaiado compôs uma etapa de estudos, sendo assim apresentados separadamente.

7.3.3. PRIMEIRA ETAPA

7.3.3.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

CURA (tipo)	CAL (%)	TEMPO (dias)							
		07		14		28		60	
		SUCÇÃO	CV	SUCÇÃO	CV	SUCÇÃO	CV	SUCÇÃO	CV
LONA	10	103.3	12.3	94.9	18.6	86.4	11.9	51.1	40.6
	15	50.3	9.6	46.9	13.5	37.8	9.2	31.1	21.1
	20	44.8	30.6	52.6	51.0	25.9	19.1	27.3	15.0
CAM. UMIDA	10	86.1	13.4	69.3	1.6	77.4	9.3	64.6	2.9
	15	33.6	33.0	35.4	24.4	34.9	25.3	38.7	22.5
	20	12.9	33.6	11.1	7.7	6.9	11.3	7.8	41.7
CAM. TEMPER. CONTROL.	10	92.2	8.2	77.5	10.6	68.8	13.3	57.4	15.0
	15	46.8	3.6	45.2	2.4	32.7	18.9	25.8	22.8
	20	56.6	1.6	36.8	9.0	23.2	0.4	20.6	18.8

QUADRO 7.12 - Valores médios de sucção (g/194cm²/min) e CV(%) de tijolos de cinza volante e cal submetidos a 3 tipos e 4 períodos de cura.

CURA (tipo)	CAL (%)	TEMPO (dias)							
		07		14		28		60	
		ABS.	CV	ABS.	CV	ABS.	CV	ABS.	CV
LONA	10	42.7	0.7	42.3	0.6	43.6	0.7	42.5	1.1
	15	37.8	0.5	38.0	1.1	39.7	1.2	39.3	0.9
	20	36.7	1.6	37.7	1.3	37.6	1.1	37.5	0.7
CAM. UMIDA	10	42.9	0.5	43.2	0.5	42.5	0.1	42.0	0.1
	15	39.7	0.2	39.9	0.7	39.7	0.8	39.8	0.3
	20	38.3	0.4	38.2	0.3	36.2	3.5	40.1	0.6
CAM. TEMPER. CONTROL.	10	43.6	0.2	43.3	0.1	43.2	0.0	48.9	0.1
	15	40.2	0.3	39.5	0.3	39.7	0.7	37.7	1.3
	20	35.5	0.8	37.8	0.7	36.0	0.3	36.3	2.6

QUADRO 7.13 - Valores médios de absorção (%) e CV (%) para tijolos de cinza volante e cal submetidos a 3 tipos e 4 períodos de cura.

CURA (tipo)	CAL (%)	TEMPO (dias)							
		07		14		28		60	
		ABS. MAX.	CS	ABS. MAX.	CS	ABS. MAX.	CS	ABS. MAX.	CS
LONA	10	49.6	0.86	49.4	0.86	50.4	0.86	49.1	0.87
	15	44.9	0.84	45.2	0.84	46.4	0.86	45.7	0.86
	20	43.9	0.84	44.6	0.85	44.3	0.85	43.8	0.86
CAM. UMIDA	10	49.5	0.87	49.7	0.87	48.9	0.87	48.6	0.87
	15	45.9	0.86	44.0	0.87	45.3	0.88	44.8	0.89
	20	44.7	0.86	44.4	0.86	43.2	0.83	44.9	0.89
CAM. TEMPER. CONTROL.	10	50.3	0.87	49.8	0.87	50.0	0.86	49.0	0.87
	15	46.5	0.86	45.9	0.86	46.3	0.86	44.3	0.85
	20	42.4	0.84	43.3	0.87	42.1	0.85	41.1	0.89

QUADRO 7.14 - Valores médios de absorção máxima (%) e CS de tijolos de cinza volante e cal submetidos a 3 tipos e 4 períodos de cura.

Os resultados de sucção, absorção e absorção máxima estão apresentados nos quadros 7.12, 7.13 e 7.14 respectivamente.

O coeficiente de saturação (CS) no último quadro representa a razão absorção/absorção máxima.

7.3.3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SUÇÃO

Como pode ser observado no quadro 7.12 os valores do coeficiente de variação foram muito inconstantes, indo desde 0.4 até 51% . A maioria deles no entanto ficou abaixo dos 25% ainda admissíveis para aceitação da amostra.

O valor máximo definido pela ASTM C62⁰⁴ para valores de sucção é de 30 g/194cm²/min (o valor 194 cm² refere-se à área padrão do tijolo testado pela ASTM). Tijolos que ultrapassem este limite devem ser molhados antes do assentamento.

Os tijolos de cinza volante e cal, com excessão de alguns poucos casos, apresentaram altos valores de sucção necessitando, portanto, deste tratamento.

Os tijolos cerâmicos estudados por JAWOROSKY³⁹ apresentaram valores de sucção da ordem de 80g/200cm²/min para o tijolo tipo T₁ e 34g/200cm²/min para o tijolo tipo T₂, correspondendo a 77.6 e 27.5g/194cm²/min respectivamente.

A exceção dos teores de 10% de cal, os tijolos de cinza volante e cal apresentaram sucção inferior ao tijolo T₁ e alguns deles(mistura 80x20 sob qualquer cura, aos 28 e 60 dias e sob câmara úmida também aos 7 e 14 dias, e a mistura 85x15, sob câmara de temperatura controlada aos 60 dias), inclusive, foram menores que T₂.

As figuras 7.15 a 7.17 representam os valores de sucção em função do tempo mostrando uma tendência à diminuição da mesma com o aumento do período de cura.

Submeteram-se os dados à análise estatística pelo programa compvar para confirmação desta observação. Os resultados aparecem no quadro 7.15.

O valor de F tabelado foi o mesmo para todos os casos e igual a 4.07. Como o valor de F calculado nem sempre foi maior que F tabelado não foi possível a afirmação da influência do tempo na sucção.

TIPO DE CURA	TEOR DE CAL (%)		
	10	15	20
LONA	7.06	7.73	2.16
CÂM. ÚMIDA	5.64	0.16	3.09
CÂM. TEMP. CONT.	9.16	16.56	122.05

QUADRO 7.15 - Valores de F calculado para a influência do tempo na sucção para 3 teores de cal sob 3 processos de cura.

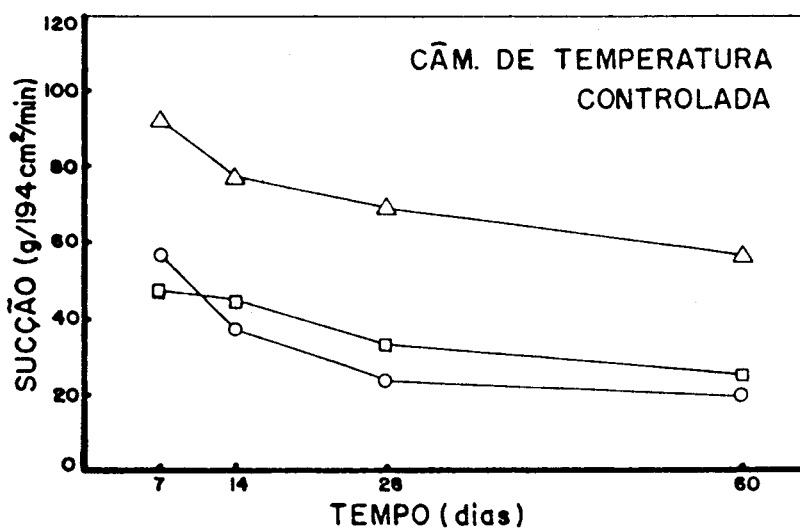
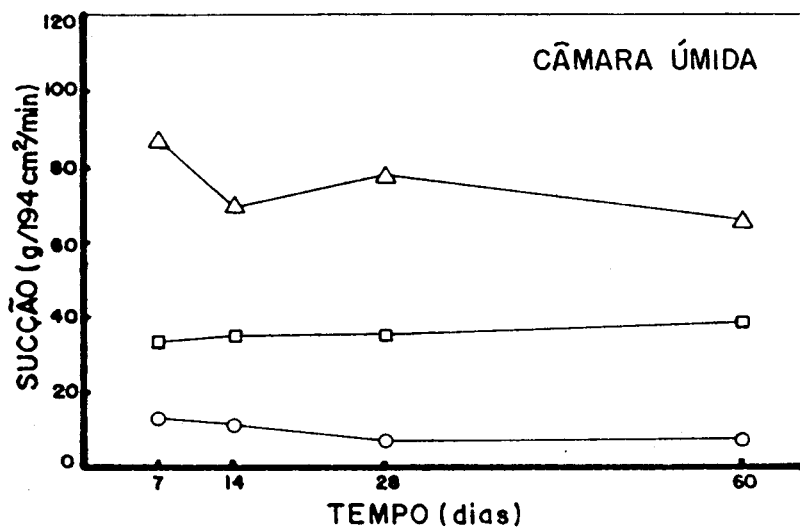
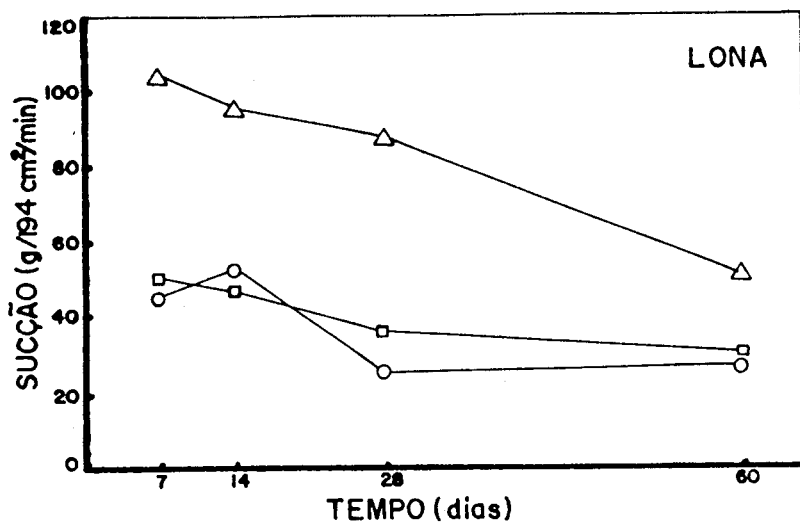
Voltando às figuras, percebem-se comportamentos diferentes para os casos em que não houve esta influência. O teor 20% curado sob lona apresentou sucção crescente entre 7 e 14 dias, decrescente entre 14 e 28 dias e aproximadamente constante no período seguinte. O mesmo teor submetido à câmara úmida apresentou sucção decrescente nos dois primeiros intervalos e aproximadamente constante no último, enquanto que o teor de 15% nesta mesma cura apresentou-se crescente, mesmo que suavemente, em todos os períodos.

Para os demais casos a análise estatística demonstrou haver influência do tempo nos resultados e as representações gráficas mostraram sempre um decréscimo da sucção com a idade. Apenas o teor de 10% em câmara úmida apresentou alternância de comportamento.

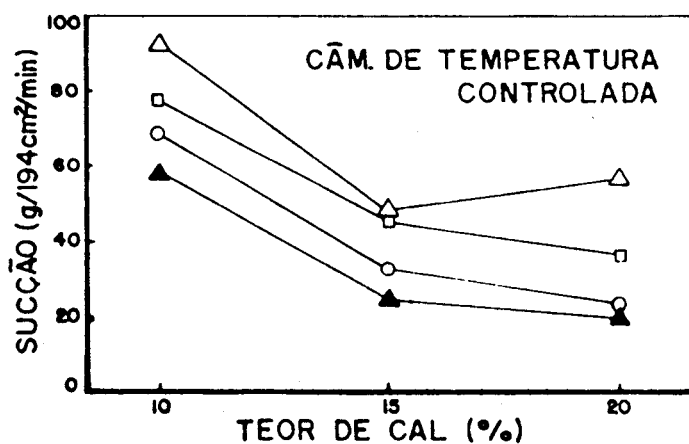
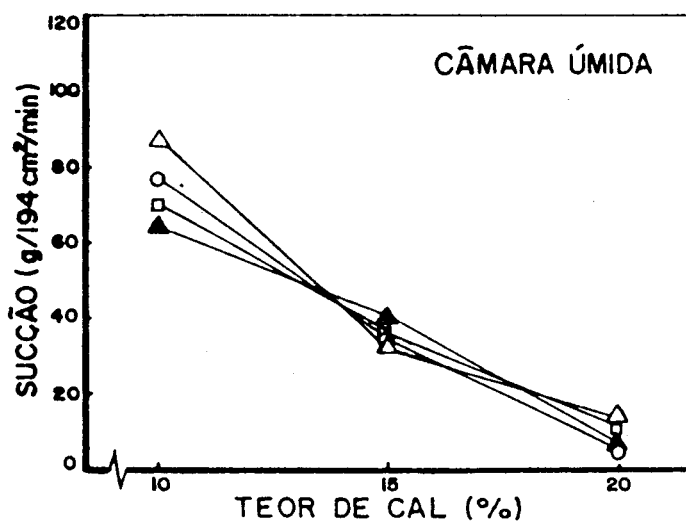
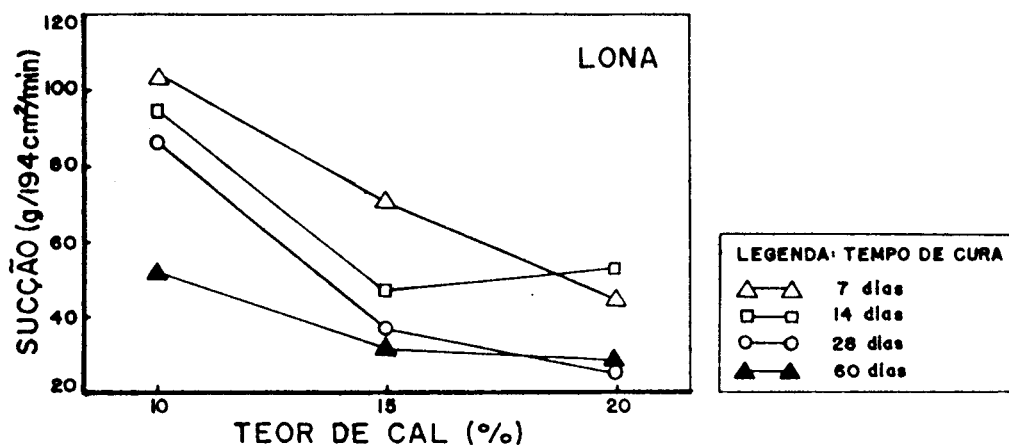
A variação apresentada entre 28 e 60 dias foi bem pequena, com excessão do teor 10% curado em lona. Desta forma, se o tempo realmente exerce influência sobre a sucção, isto provavelmente ocorre de forma considerável dentro do primeiro mês desde a produção do tijolo.

A confirmação destas considerações, no entanto, só seria possível com a realização de novos ensaios com maior número de corpos de prova.

Nas figuras 7.18 a 7.20 estão plotados os valores de sucção em relação ao teor de cal. Nelas percebe-se uma redução da sucção com o acréscimo de cal à mistura. Esta observação fica mais clara e definida entre os teores de 10 e 15%. Estes



FIGURAS 7.15 a 7.17 - Sucção x tempo para 3 teores de cal submetidos à cura em lona, câmara úmida e câmara de temperatura controlada.



FIGURAS 7.18 a 7.20 - Sucção x teor de cal para 4 períodos curados em lona, câmara úmida e câmara de temperatura controlada.

dados também foram submetidos ao programa Compvar.

Os resultados encontram-se no quadro abaixo.

TIPO DE CURA	TEMPO (dias)			
	07	14	28	60
LONA	25.22	6.78	63.61	34.98
CAM. ÚMIDA	46.56	100.53	86.94	80.45
CAM. TEMP. CONT.	56.30	52.43	43.93	0.21

QUADRO 7.16 - Valores de F_{calc} . para influência do teor de cal na sucção de corpos de prova sob 4 idades e 3 processos de cura.

O valor de F tabelado foi o mesmo para todos os casos e igual a 5.14. Como o valor de F calculado foi maior que F tabelado com excessão de apenas um caso, pode-se afirmar que o teor de cal exerce influência sobre os valores de sucção.

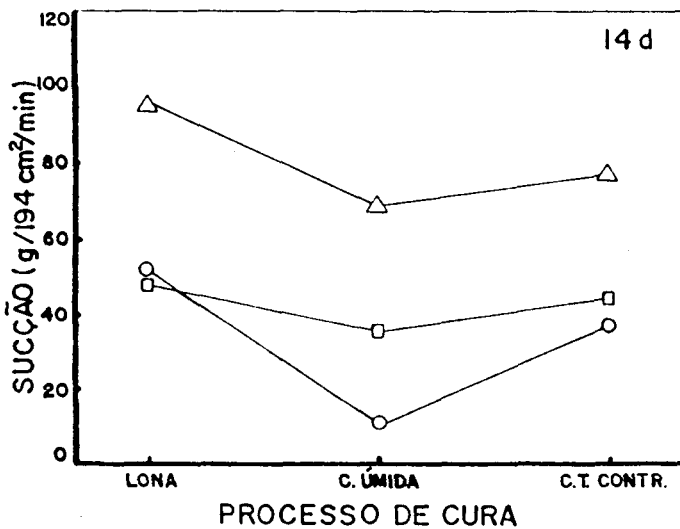
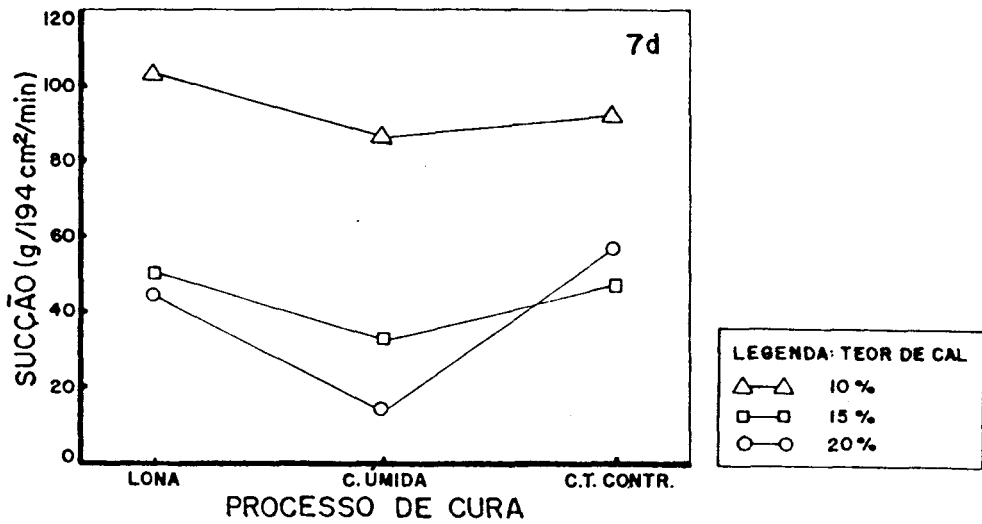
Nas figura 7.21 a 7.24 estão plotados os valores de sucção em função do tipo de cura. Observou-se, para a maioria dos casos, que a cura sob câmara úmida conduziu aos melhores resultados, ou seja, menores valores de sucção. Buscando verificar se as diferenças entre curas eram significativas, fez-se novamente uma análise estatística. Os resultados estão no quadro 7.17. O valor de F tabelado foi o mesmo para todos os casos e igual a 5.14.

TEOR DE CAL (%)	TEMPO (dias)			
	07	14	28	60
10	1.95	4.05	2.87	0.81
15	4.68	2.98	0.47	2.45
20	22.20	5.40	38.07	20.79

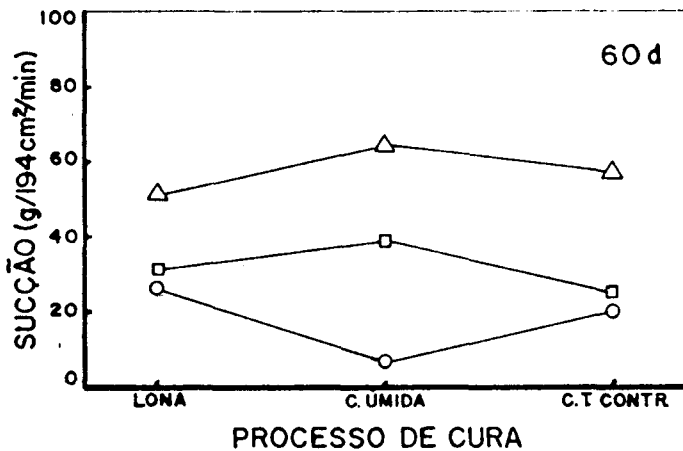
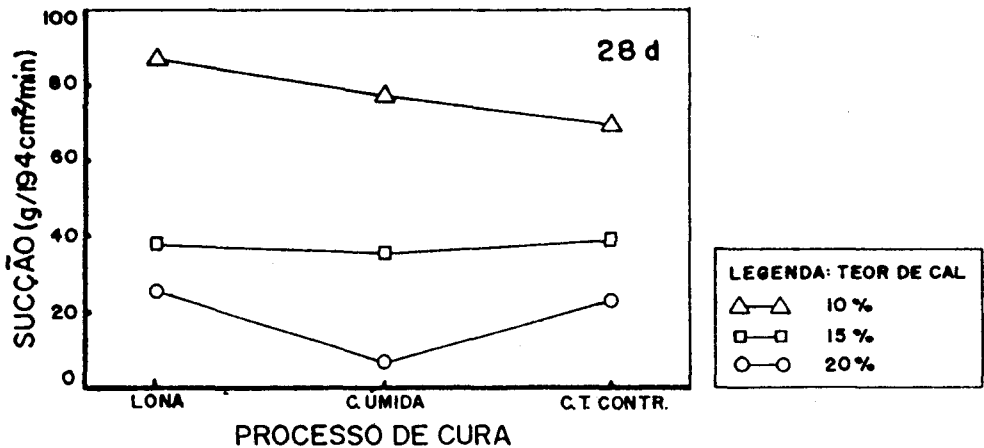
QUADRO 7.17 - Valores de F_{calc} . para influência do processo de cura na sucção para 3 teores de cal sob 4 idades.

Apenas para o teor 20% de cal o valor de $F_{calc.}$ foi maior que $F_{tab.}$, logo para os demais teores não houve diferença significativa entre os resultados obtidos com os três tipos de cura.

Uma comparação múltipla de médias realizada através do método de Duncan mostrou que os valores de sucção referentes ao teor 20% formavam dois grupos, um composto pelas curas em câmara de temperatura controlada e lona e outro formado unicamente pelos valores obtidos em câmara úmida.



FIGURAS 7.21 e 7.22 - Sucção x processo de cura para 3 teores de cal submetidos aos períodos de 7 e 14 dias respectivamente.



FIGURAS 7.23 e 7.24 - Sucção x processo de cura para 3 teores de cal submetidos aos períodos de 28 e 60 dias respectivamente.

Sendo assim, os únicos valores que sofreram alguma alteração devido ao tipo de cura foram aqueles das misturas com 20% de cal e submetidos à cura em câmara úmida. Estes valores ficaram, inclusive, abaixo do valor limite máximo recomendado pela ASTM (30g/194cm²/min) podendo, portanto, ser assentados secos, sem tratamento da sucção.

Novos ensaios poderiam então ser realizados utilizando-se corpos de prova submetidos a este tipo de cura, buscando a confirmação dos resultados. Tal procedimento não foi no entanto adotado porque ao estudar-se a absorção (item 7.3.3.3) verificou-se que a cura em câmara úmida não lhe era favorável e, desta forma, tornava-se inútil o uso de um processos que não beneficiasse as demais propriedades dos tijolos.

Devido ao fato dos resultados do ensaio de sucção terem apresentado valores muito diferentes para o coeficiente de variação de cada caso decidiu-se repeti-lo utilizando uma amostra maior.

Os testes foram realizados em corpos de prova moldados com 15% de cal e curados durante 28 dias em câmara de temperatura controlada.

amostra	sucção(g/104cm ² /min)
1	44.4
2	42.2
3	43.7
4	42.7
5	43.2
6	30.9
7	42.6
8	41.8
9	31.6
10	43.2
11	36.0
12	31.9
13	42.7
14	33.8
15	31.7
\bar{x}	38.8
CV(%)	4.9

QUADRO 7.18 - Resultados de sucção para corpos de prova com teor de cal 15%, curados por 28 dias em câmara de temperatura controlada.

A escolha destes parâmetros, com excessão do periodo de cura, deveu-se ao fato deles terem sido selecionados para o prosseguimento dos estudos de resistência e, como se observará mais adiante, também para os estudos de absorção por submersão.

Os resultados estão apresentados no quadro 7.18. O valor médio encontrado além de apresentar um baixo coeficiente de variação ficou próximo daquele mostrado no quadro 7.12 que era de 32.7 g/194cm²/min.

7.3.3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO

Como observado no quadro 7.13 os coeficientes de variação apresentados foram muito baixos, sendo portanto de boa confiabilidade a amostra, apesar do pequeno número de unidades testados em cada caso.

Assim como não há uma norma brasileira para verificação da absorção de tijolos cerâmicos também não existe um valor padronizado para aceitação ou rejeição dos mesmos.

A norma americana ASTM C 67⁰³, em que se basearam os ensaios, é muito rígida para aplicação ao caso brasileiro, já que serve a um país de clima severo e que possui um controle de qualidade muito maior na fabricação dos produtos cerâmicos. Desta forma foram buscados, na bibliografia consultada, valores aos quais os resultados deste trabalho pudessem ser comparados. Eles encontram-se no quadro 7.19.

ABSORÇÃO				
ASTM C62 ⁰	NBR 8491 ²⁴	SILVA ⁵⁴	JAWOROSKY ³⁹	ROMAN ⁵¹
10	20	23.5 a 32.5	16.3	15.2 a 21.3

QUADRO 7.19 - Valores observados de absorção

Os resultados obtidos por ROMAN e JAWOROSKY referem-se a tijolos cerâmicos. ROMAN trabalhou com uma amostra de olarias da grande Porto Alegre e obteve absorções variando entre os valores tabelados. JAWOROSKY utilizou tijolos provenientes de duas olarias entre aquelas selecionadas por ROMAN. O valor tabelado refere-se ao tijolo do tipo T1 de seu estudo o qual apresentou maiores semelhanças com o tijolo de cinza volante e cal.

Os valores encontrados por SILVA referem-se a tijolos de cinza volante, cal e areia. A NBR 8491 fornece o valor máximo admissível para tijolos de solo-cimento.

Comparando os valores do quadro 7.19 com aqueles do quadro 7.13 observa-se que as absorções do tijolo em estudo foram muito elevadas, ficando acima de qualquer dos valores considerados.

Na busca de menores valores decidiu-se analisar inicialmente de que forma as variáveis introduzidas no ensaio influenciavam os resultados de absorção. Primeiramente verificou-se o efeito do tempo.

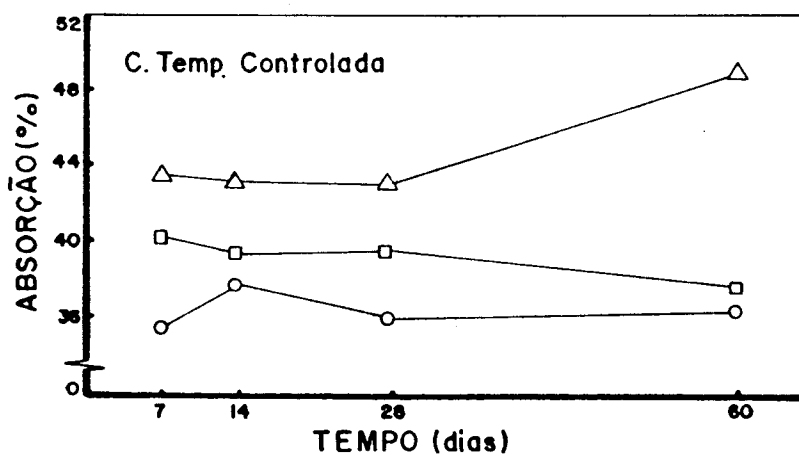
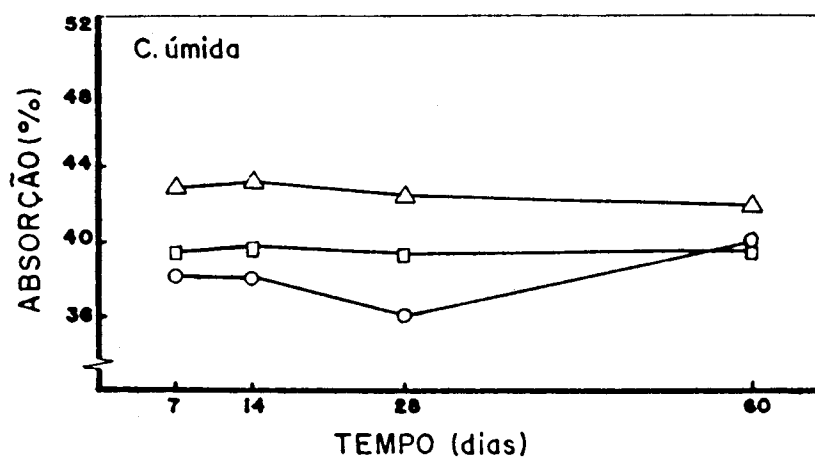
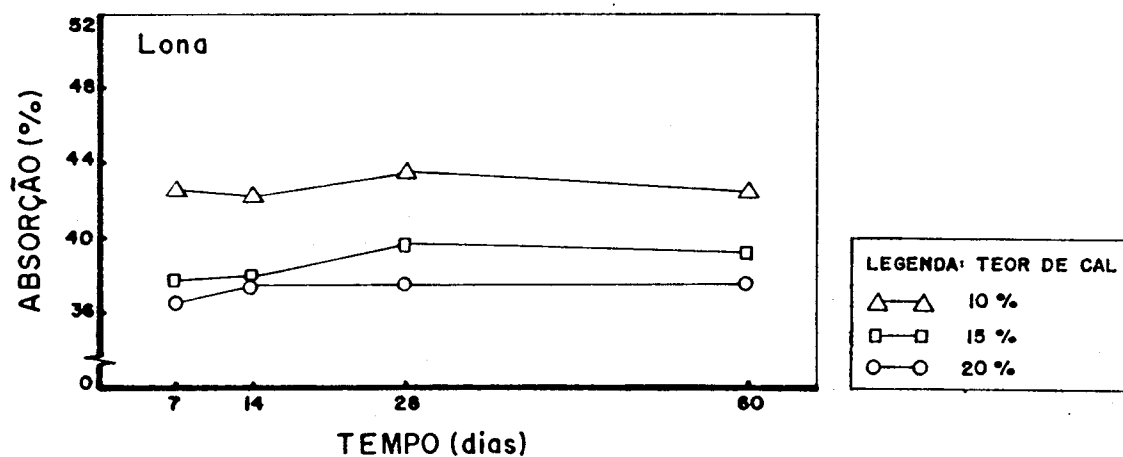
As figuras 7.25 a 7.27 mostram este comportamento para os três tipos de cura utilizados. Nelas observa-se que não há um comportamento padrão entre as misturas e nem mesmo dentro de uma delas.

Na figura 7.25 os valores foram quase constantes no decorrer do tempo para as três misturas. Nas outras duas figuras eles variaram de uma forma mais sensível, porém, ora crescendo ora diminuindo com o aumento da idade.

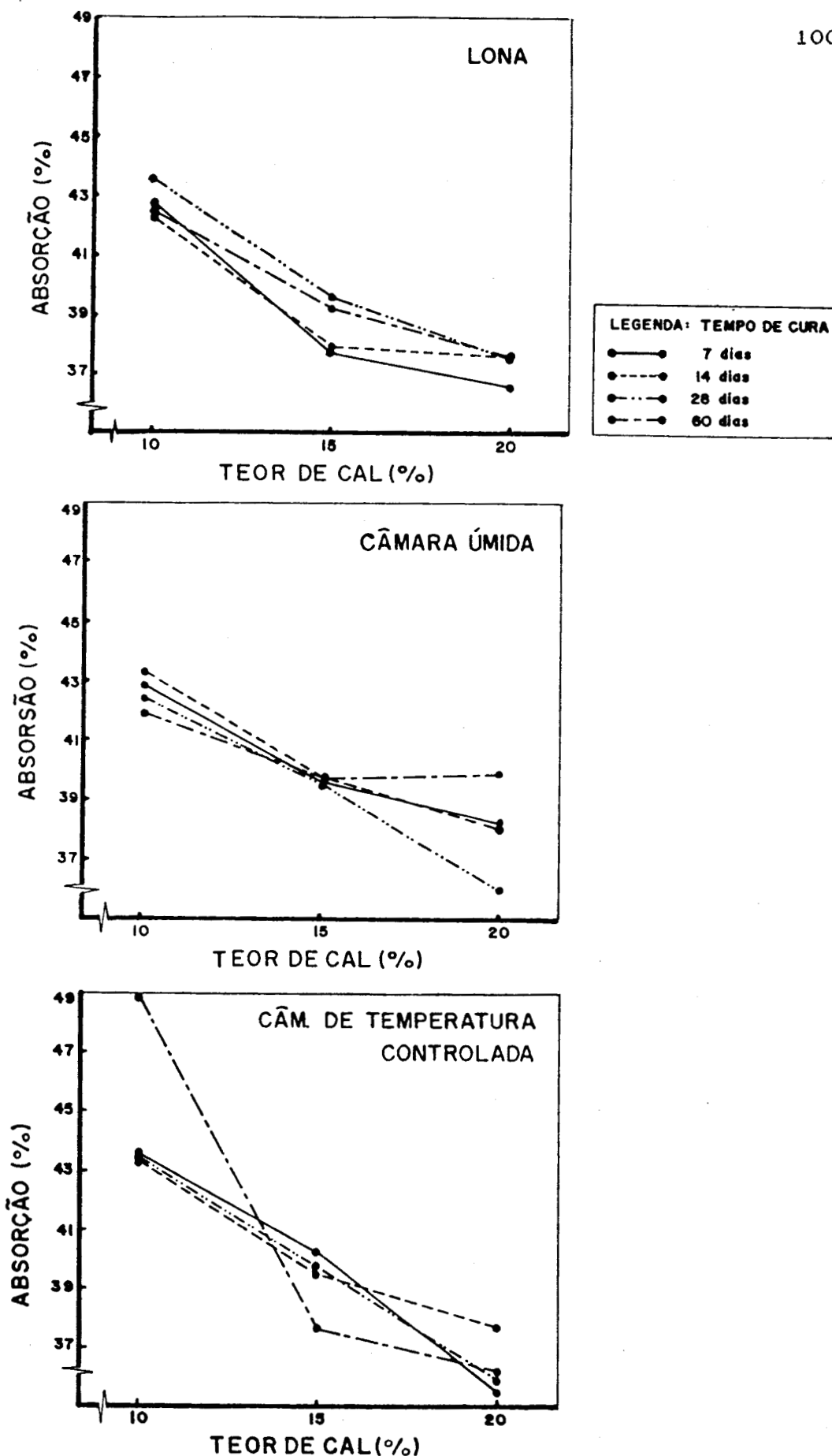
Este comportamento contraditório indica que o tempo não exerce influência sobre a absorção dos tijolos. O mesmo foi constatado com tijolos de cinza volante, cal e areia estudados por SILVA.

A influência do teor de cal na absorção pode ser observada nas figuras 7.28, 7.29 e 7.30. Nelas percebe-se

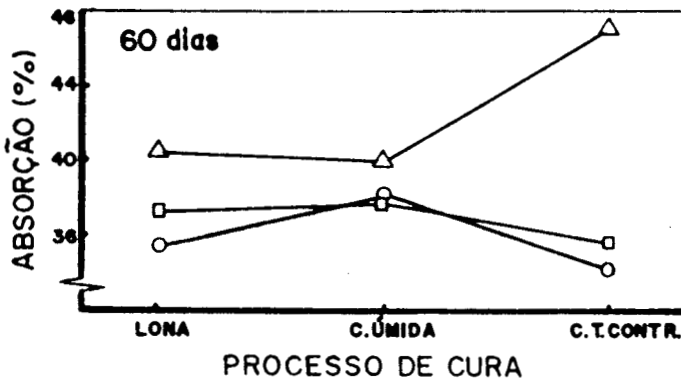
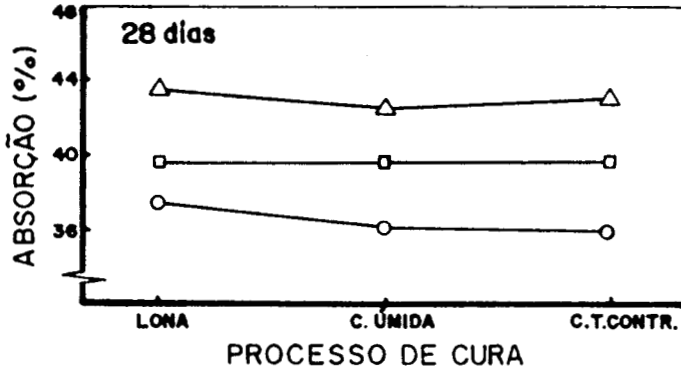
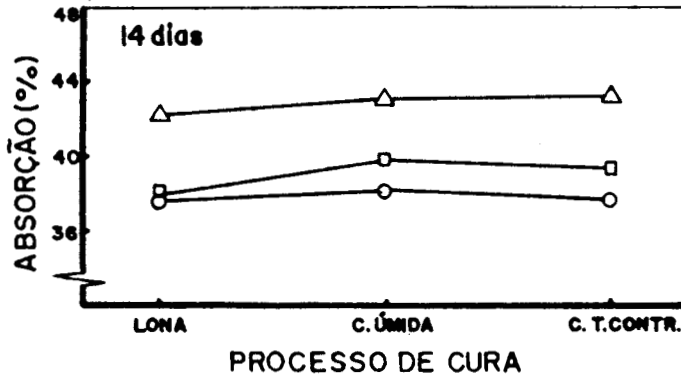
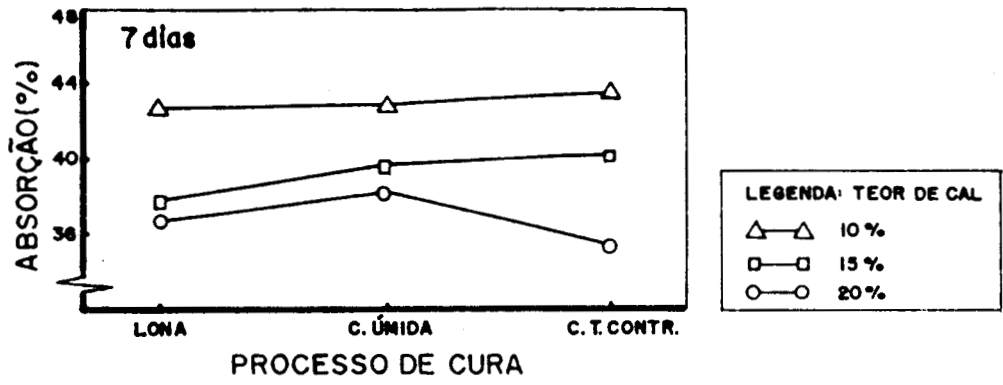
claramente a redução da absorção com o acréscimo do teor de cal.



FIGURAS 7.25 a 7.27 - Absorção x tempo para 3 teores de cal curados em lona, câmara úmida e câmara de temperatura controlada, respectivamente.



FIGURAS 7.28 a 7.30 - Absorção x teor de cal para 4 períodos de cura submetidos à lona, câmara úmida e câmara de temperatura controlada, respectivamente.



FIGURAS 7.31 a 7.34 - Absorção x processo de cura para 3 teores de cal com idades de 7, 14, 28 e 60 dias, respectivamente.

Os resultados dos ensaios foram submetidos ao programa Compvar para confirmação estatística. Os valores encontrados para F com um nível de significância $\alpha=0.05$ testando a hipótese da inexistência de efeito do teor de cal sobre a absorção estão no quadro 7.20.

O valor de F tabelado foi o mesmo para todos os casos e igual a 5.14. Como todos os valores de F calculado foram maiores que F tabelado a hipótese foi rejeitada, ou seja, existe diferença significativa entre os teores analisados.

TIPO DE CURA	TEMPO (dias)			
	07	14	28	60
LONA	196.71	128.99	173.30	144.05
CAM. ÚMIDA	681.86	485.24	53.38	183.05
CAM. TEMP. CONT.	1385.57	851.97	1405.08	233.52

QUADRO 7.20 - Valores de Fcalc. para influência do teor de cal na absorção de corpos de prova submetidos a 4 idades e 3 processos de cura.

Não foi possível determinar uma curva que se ajustasse aos valores obtidos no ensaio, como havia sido realizado na primeira etapa dos ensaios de resistência, porque com apenas três misturas ter-se-ia uma faixa muito restrita da mesma.

Voltando às figuras anteriores verifica-se que na maioria dos casos analisados, principalmente quando curados sob lona plástica preta, a variação da absorção entre os teores 10 e 15% foi maior que a observada entre os teores de 15 e 20% .

Ensaio realizados com teores mais elevados de cal poderiam comprovar uma tendência de horizontalização da curva a partir de um determinado teor. No entanto, ao que parece, isto ocorreria em algum valor ainda muito alto de absorção não compensando o acréscimo nos custos devido à adição de maior quantidade de cal.

Nas figuras 7.31 a 7.34 foram comparados os valores de absorção obtidos em cada um dos três tipos de cura utilizados.

Pode-se observar claramente aos 7, 14 e 28 dias a inexistência de diferença entre os resultados de cada processo. As variações observadas foram pequenas e não houve uma tendência de alguma cura ser melhor que as outras. Aos 60 dias as diferenças acentuaram-se um pouco, porém, o mesmo processo que conduziu aos melhores resultados para uma determinada mistura, levou aos piores valores para outra.

Portanto, em termos de absorção, a única variável que afetou os resultados foi o teor de cal utilizado. Este, no entanto, está limitado a fatores econômicos e, ainda assim, ter-se-ia que estudar valores mais elevados que aqueles utilizados neste estudo para verificar-se até que ponto a adição de cal beneficiaria o tijolo.

7.3.3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO MÁXIMA

A absorção máxima indica a maior quantidade de água capaz de penetrar em um tijolo.

O valor obtido da razão entre absorção e absorção máxima chama-se coeficiente de saturação e indica a quantidade de espaços vazios que não foram preenchidos pela água quando do teste de absorção em água fria. Funciona como um índice da resistência do tijolo ao intemperismo, referindo-se portanto a sua durabilidade. Esta definição tem origem na norma ASTM C62⁹⁴ e considera o congelamento da água dentro das alvenarias nos países frios.

A água absorvida pelo tijolo, ao congelar, aumenta de volume ocupando espaços que antes encontravam-se vazios. Se o coeficiente de saturação for um valor muito próximo de 1.0 indica que não haverá espaços disponíveis capazes de alojar o volume expandido. Desta forma a tendência à expansão da água,

impedida pelo tijolo provocará tensões sobre o mesmo levando-o à ruptura.

Estes valores não são de grande valia para o caso brasileiro, já que problemas de congelamento só ocorrem em raríssimas regiões e não são de grande intensidade. No entanto, como eram de fácil execução e os corpos de prova utilizados eram os mesmos testados à absorção em água fria, estes ensaios foram realizados a título de caracterização do material.

Os resultados obtidos foram comparados aos valores exigidos pela ASTM C62²⁶ e classificação ITINTEC²⁴, apresentados no quadro 7.21.

	CLASSIFICAÇÃO							
	I T I N T E C					ASTM C62 (valores médios)		
	I	II	III	IV	V	SW	MW	NW
abs.máx.(%)	s/lim.	s/lim.	25	22	22	17	22	22
coef.satur.	s/lim.	s/lim.	0.90	0.88	0.88	0.78	0.88	s/lim.

QUADRO 7.21 - Valores admissíveis para absorção máxima e coeficiente de saturação segundo classificação ITINTEC e ASTM

A norma ASTM C 62 não define limites para a classe NW e a ITINTEC procede da mesma forma para os tijolos tipo I e II, além de considerar as duas propriedades como opcionais e não obrigatórias na classificação das unidade.

Comparando-se quanto à resistência, os tijolos de cinza e cal equivalem ao tipo I ou II da ITINTEC e devido a inexistência de problemas climáticos enquadram-se na classe NW da ASTM. Assim não há limites para a absorção máxima e coeficiente de saturação destes tijolos.

Quando comparados à unidades de tipos e classes mais exigentes, eles apresentam absorção máxima muito alta mas coeficiente de saturação dentro dos limites aceitáveis, com exceção da classe SW da ASTM.

Os altos valores apresentados pelos ensaios de absorção são certamente devidos a estrutura porosa apresentada pelo material cinza volante e cal.

DAY³¹ estudando misturas de cinza volante com silicato de sódio obteve elevados valores de absorção quando comparados ao tijolo cerâmico de controle. O material foi então submetido à exame por microscopia eletrônica e fotografias obtidas de superfícies fraturadas demonstraram uma estrutura altamente porosa. Esta observação já era esperada devido à baixa densidade apresentada pelos tijolos (14.71 KN/m³ enquanto que o tijolo controle apresentou 22.56 KN/m³).

Embora o material examinado não contivesse cal, é provável que sua estrutura fosse muito semelhante a da mistura cal e cinza volante, mesmo porque esta última é a fração predominante e as densidades apresentadas também foram baixas.

7.3.4. SEGUNDA ETAPA

A segunda etapa dos ensaios de absorção foi realizada com o objetivo de verificar até que ponto os fatores impostos às misturas utilizadas na primeira etapa (peso específico aparente seco e umidade), influenciaram nos resultados. Estes dois fatores foram determinados quando da realização de ensaios Proctor como descrito no item 3.1 .

7.3.4.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O teor de cal foi a única variável estudada na primeira etapa dos ensaios que demonstrou influenciar nos resultados de absorção. Quanto maior a quantidade de cal adicionada à mistura, menor a absorção apresentada pelos tijolos. Entretanto, nesta etapa dos estudos decidiu-se utilizar a mistura intermediária 85x15. A explicação para esta escolha encontra-se nos seguintes itens:

a) a redução da absorção entre as misturas 90x10 e 85x15 foi mais sensível que aquela observada entre as misturas 85x15 e 80x20,

b) o valor observado para a mistura 80x20 ainda estava muito acima do aceitável e, além disso a mistura 85x15 era mais viável economicamente,

c) a mistura 85x15 já havia sido considerada anteriormente como a mais indicada para o prosseguimento do estudo de outras propriedades.

γ_d (KN/m ³)	umidade(%)	sucção (g/194cm ² /min)	absorção(%)
10.30	29	137.4	45.9
	31	134.7	45.8
	33	122.2	45.6
	34	111.7	47.7
10.79	29	116.3	43.5
	31	92.6	43.1
	33	74.5	40.6
	34	44.9	33.2
11.42	29	54.7	35.4
	31	46.4	33.9
	33	39.1	36.3
	34	41.9	34.7
11.77	29	46.4	35.4
	31	55.3	33.9
	33	42.4	32.5
	34	38.6	36.8
12.26	29	39.7	34.6
	31	35.5	33.9
	33	29.8	33.3
	34	30.4	34.6

QUADRO 7.22 - Valores de sucção e absorção para tijolos produzidos com várias umidades e pesos específicos aparentes secos.

Os tijolos ensaiados na primeira etapa foram moldados com peso específico aparente seco de 11.42 KN/m³ e umidade de 34%. Para a segunda etapa utilizaram-se quatro novos pesos

específicos aparentes secos, sendo dois maiores e dois menores que o anterior, e três novas umidades, todas menores que 34%, já que valores maiores não puderam ser moldados pois ocorria perda d'água no momento de aplicação da carga. Para cada combinação de variáveis foram utilizados três espécimes. Os corpos de prova foram curados em câmara de temperatura controlada durante 14 dias e o teste de absorção máxima não foi realizado nesta etapa. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados no quadro 7.22.

7.3.4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SUCÇÃO

7.3.4.2.1. INFLUÊNCIA DO PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO (γ_d)

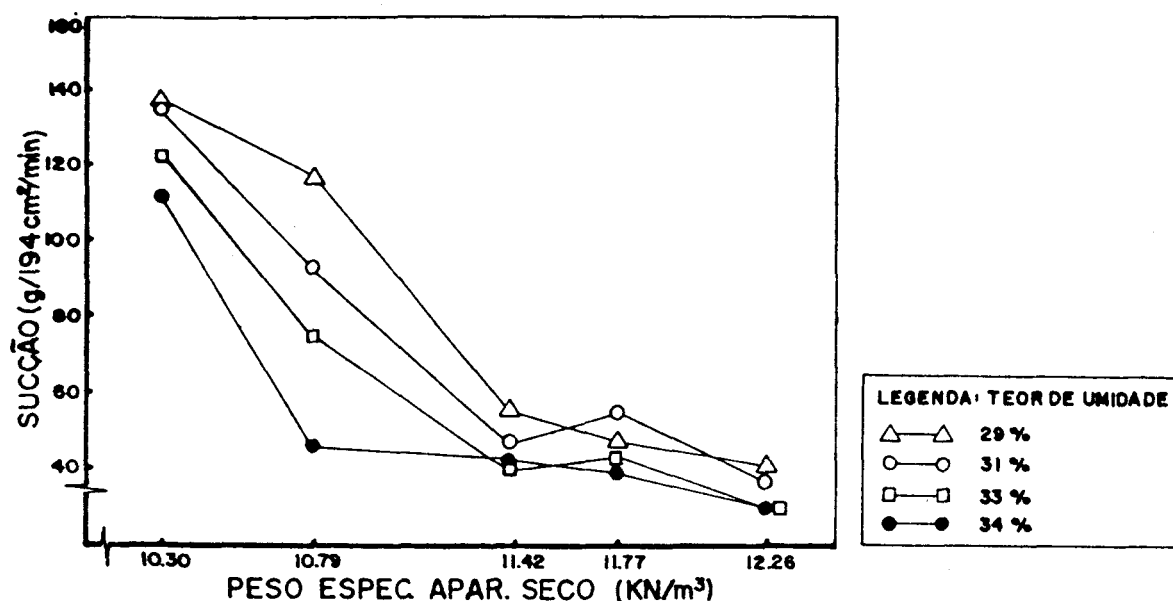


FIGURA 7.35 - Sucção x peso específico aparente seco para 4 teores de umidade.

Na figura 7.35 estão plotados os resultados de sucção em função do peso específico aparente seco para quatro percentuais de umidade. Nela nota-se claramente uma drástica queda da sucção quando o γ_d cresce de 10.30 para 11.42. Para valores maiores de γ_d houve certa divergência entre os resultados das unidades testadas. Os tijolos com umidade de 29 e 34% continuaram apresentando sucções decrescentes, embora

isto tenha ocorrido de forma mais lenta. Para as umidades de 31 e 33%, no entanto, a sucção cresceu quando o γ_d chegou a 11.77 e voltou a cair para o γ_d 12.26.

Estes dados foram submetidos ao programa Compvar para testar a hipótese da não influência do peso específico aparente seco na sucção dos tijolos. Os resultados da análise encontram-se no quadro 7.23.

	UMIDADE (%)			
	29	31	33	34
F calc.	191.62	57.45	127.55	55.24
F tab.	3.48	3.48	3.48	3.48

QUADRO 7.23 - Valores de F para a influência do peso específico aparente seco na sucção de corpos de prova de 4 diferentes teores de umidade.

Como todos os valores de F calculado foram maiores que F tabelado, rejeitou-se a hipótese testada e, portanto, comprovou-se que o γ_d exerceu efeito sobre a sucção.

Uma comparação múltipla de médias pelo método de Duncan foi realizada e está apresentada no quadro 7.24.

UMIDADE (%)	GRUPOS				
29	12.26	11.77	11.42	10.79	10.30
31	12.26	11.77	11.42	10.79	10.30
33	12.26	11.42	11.77	10.79	10.30
34	12.26	11.77	11.42	10.79	10.30

QUADRO 7.24 - Comparação de médias (método de Duncan) Influência do peso específico aparente seco na sucção para 4 umidades.

As médias dos corpos de prova de pesos específicos 10.30 e 10.79, à excessão do caso com teor de umidade de 34%, não formaram grupo com nenhum valor.

Para os demais valores de γ_d pode-se admitir a formação de um grupo único. Como o decréscimo da sucção foi bem menor entre os valores de γ_d 11.42, 11.77 e 12.26 é provável que o valor de sucção torne-se constante a partir de determinado γ_d ou que pelo menos apresente reduções muito pequenas. A confirmação desta hipótese só seria possível com a realização de testes em corpos de prova com maiores γ_d . A moldagem destes, no entanto, exigiria altas cargas na prensagem. O equipamento utilizado neste trabalho não suportava semelhantes esforços e por isso a pesquisa limitou-se aos valores aqui considerados. Além disso não seria interessante o estudo com fatores muito distantes daqueles existentes no mercado. A indústria cerâmica não trabalha com níveis de cargas tão elevados e a implantação de prensas muito potentes poderia ser um desestímulo à produção dos tijolos de cinza volante e cal. Outro fator a ser considerado é que o problema de elevada sucção pode ser resolvido pela simples molhagem do tijolo antes do assentamento. Assim sendo, maiores esforços foram dirigidos na solução de outros problemas.

A utilização de densidades menores que aquela utilizada na primeira etapa do estudo (11.42 KN/m³) conduziu a valores de sucção mais elevados. Para os valores maiores de γ_d , possíveis de serem testados, os resultados não diferiram significativamente entre si. Assim, com a impossibilidade de testar-se valores maiores de γ_d , nenhuma alteração foi indicada nas condições de moldagem dos corpos de prova quanto à densidade.

7.3.4.2.2. INFLUENCIA DO TEOR DE UMIDADE (w)

Na figura 7.36 aparecem os resultados de sucção em função do teor de umidade da mistura para cinco pesos específicos aparentes secos. Nela observa-se que a sucção

tende a diminuir com o aumento do teor de umidade, ocorrendo mais claramente para os valores de γ_d 10.30 e 10.79 KN/m³.

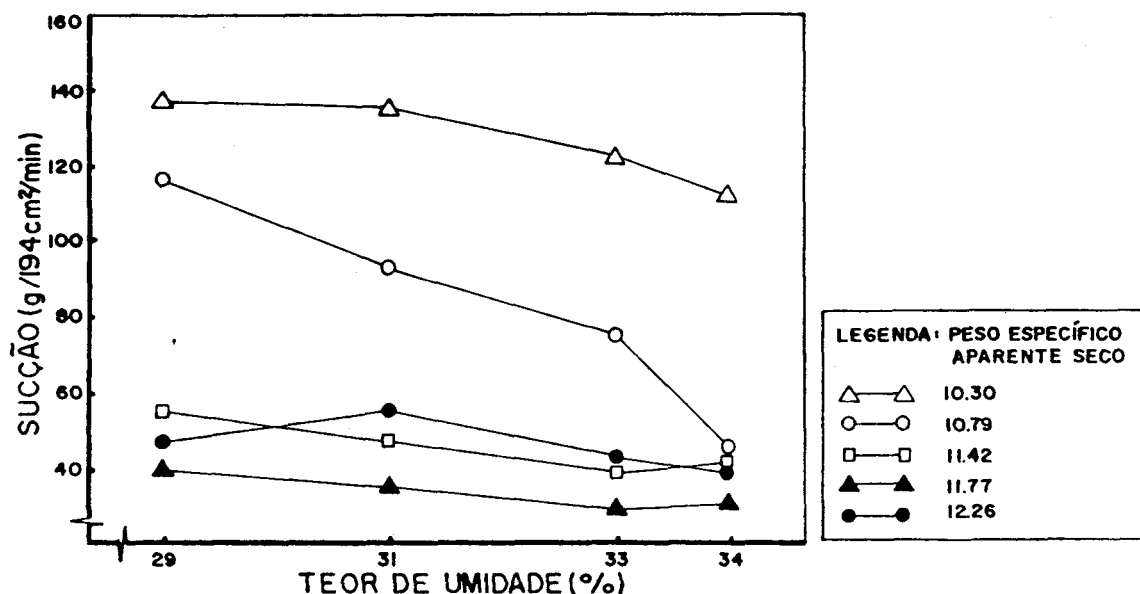


FIGURA 7.36 - Sucção x teor de umidade para 5 pesos específicos aparentes secos.

	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO (KN/m ³)				
	10.30	10.79	11.42	11.77	12.26
F calc.	1.97	43.59	3.17	2.35	2.16
F tab.	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07

QUADRO 7.25 - Valores de F para influência do teor de umidade da mistura na sucção de corpos de prova de 5 pesos específicos aparentes secos.

Os dados do ensaio foram submetidos ao programa Compvar testando-se a hipótese da não influência do teor de umidade da mistura sobre a sucção. Os resultados desta análise encontram-se no quadro 7.25.

Com exceção do γ_d 10.79, F tabelado foi sempre maior que F calculado, assim verificou-se que para a maioria dos valores o teor de umidade da mistura não exerceu influência sobre os resultados de sucção. A aparente redução observada na figura 7.25 não ocorreu, portanto, de forma significativa.

Não foi possível a realização de ensaios com maiores teores de umidade pois, no momento de moldagem, ao aplicar-se a carga, parte da água era expulsa do corpo de prova. Isto prejudicava o desmolde e o tijolo produzido resultava com umidade inferior à da mistura.

Como demonstrou-se que o teor de umidade da mistura não afetou significativamente os resultados de sucção e, conforme apresentado no item anterior, os valores de γ_d entre 11.42 e 12.26 não diferiram significativamente entre si, nenhuma alteração foi indicada nas condições iniciais de moldagem (umidade 34% e γ_d 11.42 KN/m³).

O valor de sucção obtido para tijolos nestas condições na segunda etapa (41.9%) foi equivalente ao da primeira etapa (45.2%). Estes valores embora elevados apenas indicam que o tijolo deve ser molhado antes do assentamento. Porém, como elevadas sucções prejudicam a aderência da alvenaria esta propriedade foi estudada e apresentada no item 7.5 desta dissertação.

7.3.4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO

7.3.4.3.1. INFLUENCIA DO PESO ESPECIFICO APARENTE SECO (γ_d)

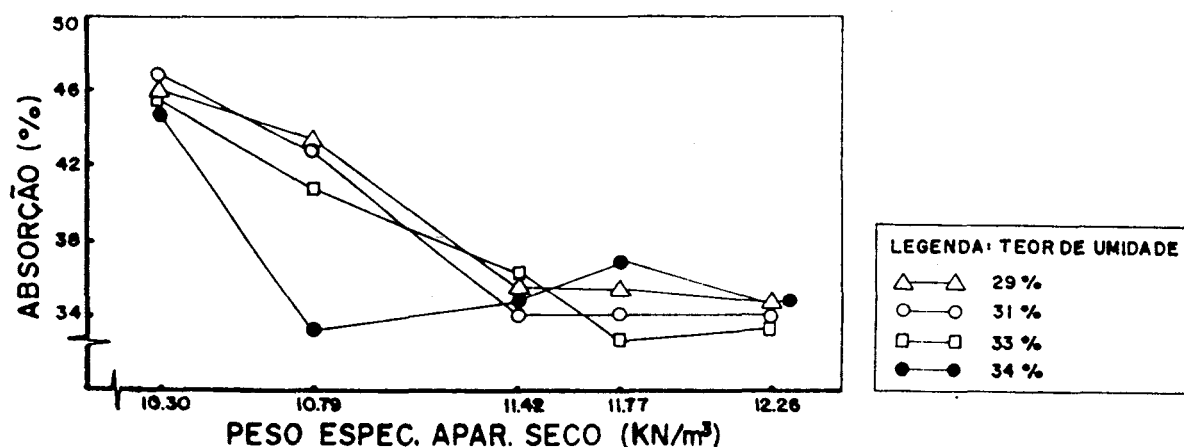


FIGURA 7.37 - Absorção x peso específico aparente seco para 4 teores de umidade.

A figura 7.37 representa os valores de absorção em função do peso específico aparente seco para tijolos produzidos com quatro teores de umidade.

Como notado na figura 7.35, relativa à sucção, os valores de absorção também caíram rapidamente para valores de γ_d entre 10.30 e 11.42 KN/m³. A partir daí nota-se, como antes, um comportamento contraditório entre os corpos de prova.

Submeteram-se os dados à análise estatística pelo programa Compvar visando verificar se o γ_d realmente influenciou nos resultados de absorção. Os resultados estão apresentados no quadro 7.26.

	UMIDADE (%)			
	29	31	33	34
F calc.	26.26	85.47	22.84	69.23
F tab.	3.48	3.48	3.48	3.48

QUADRO 7.26 - Valores de F para a influência do peso específico aparente seco na absorção de corpos de prova de quatro teores de umidade.

Como os valores de F calculado foram sempre maiores que F tabelado existe diferença significativa entre os valores, ou seja, o γ_d exerceu influência sobre os resultados de absorção.

No quadro 7.27 apresentam-se os resultados de uma comparação múltipla de médias utilizando o método de Duncan.

UMIDADE (%)	GRUPOS				
29	12.26	11.77	11.42	10.79	10.30
31	12.26	11.77	11.42	10.79	10.30
33	12.26	11.77	11.42	10.79	10.30
34	11,77	11.42	12.26	10.79	10.30

QUADRO 7.27 - Comparação de médias (método de Duncan) Influência do peso específico aparente seco na absorção para 4 umidades.

Os valores de absorção encontrados para γ_d 10.79 mudam de grupo conforme o teor de umidade testado, enquanto que os resultados referentes ao γ_d 10.30, com exceção da umidade 29%, está sempre sozinho. Os valores de γ_d 12.26, 11.77 e 11.42, ao contrário, estão sempre no mesmo grupo. Assim, embora o γ_d exerça influência sobre os resultados de absorção, na faixa de 11.42 a 12.26 KN/m³ não houve diferenças significativas entre os valores observados.

Apesar das dificuldades apontadas no item anterior a respeito da moldagem de corpos de prova com elevados γ_d , algumas unidades foram produzidas buscando verificar o comportamento dos corpos de prova quando sujeitos a densidades ainda maiores.

O estudo foi iniciado com tijolos de 13.72 KN/m³, porém, no momento da prensagem, verificou-se que o molde não suportaria a carga necessária para atingir tal densidade, limitando-se o γ_d a 12.75 KN/m³.

Foram moldados oito corpos de prova com umidade de 30% e os resultados, como pode ser visto no quadro 7.28, variaram bastante.

Apesar do relativamente alto coeficiente de variação e das dificuldades ocorridas durante o ensaio deve-se observar que até este ponto não se havia encontrado valores individuais de absorção tão pequenos como 20.7% .

AMOSTRA								
	1	2	3	4	5	6	7	8
ABS (%)	27.2	29.0	25.6	22.0	20.7	32.0	32.0	32.2
$\bar{x} = 27.6$	cv = 16.5			DP = 4.551				

QUADRO 7.28 - Resultados de absorção para corpos de prova com γ_d 12.75 KN/m³ e umidade 30%.

Desta forma sugere-se como trabalho futuro, onde se possa dispor de equipamento adequado, a realização de ensaios

de absorção com corpos de prova de elevadas densidades em uma amostra de tamanho satisfatório.

7.3.4.3.2. INFLUENCIA DO TEOR DE UMIDADE (w)

A figura 7.38 apresenta os resultados de absorção em função do teor de umidade da mistura para cinco pesos específicos aparentes secos testados.

O comportamento não foi uniforme para todos os corpos de prova. Variando-se a umidade de 29 para 31% todos eles apresentaram diminuição na sua absorção, porém, quando a umidade passou a 33% os espécimes com γ_d 11.42 mostraram um aumento de absorção. Ao atingir-se 34% de umidade os resultados variaram para cada γ_d .

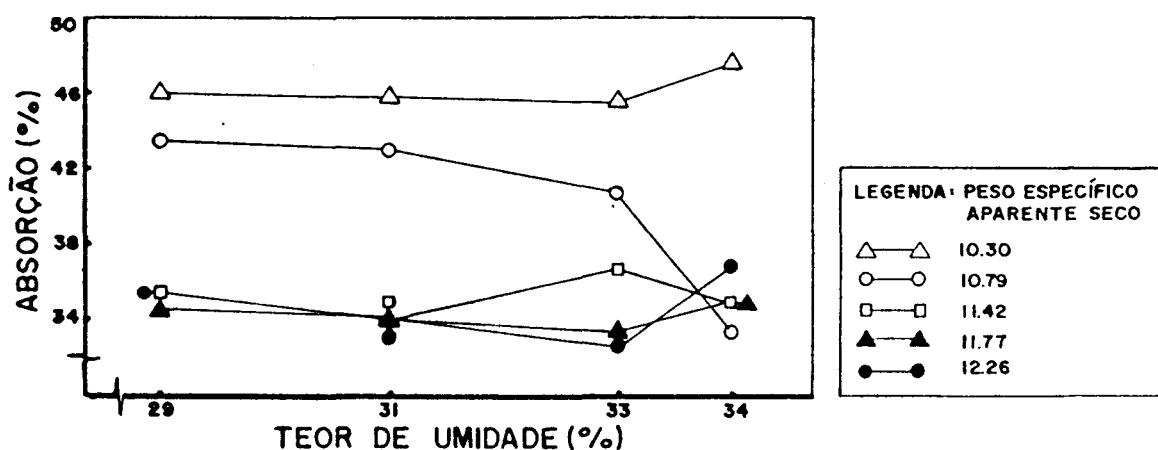


FIGURA 7.38 - Absorção x teor de umidade para 5 pesos específicos aparentes secos.

Estes dados foram então submetidos à análise pelo programa Compvar. Os resultados são apresentados a seguir:

	PESO ESPECIFICO APARENTE SECO (KN/m^3)				
	10.30	10.79	11.42	11.77	12.26
F calc.	37.34	24.44	0.10	0.86	13.84
F tab.	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07

QUADRO 7.29 - Valores de F para a influência do teor de umidade da mistura na absorção de corpos de prova com 5 pesos específicos aparentes secos.

O valor de F calculado foi maior que de F tabelado para os γ_d 10.30, 10.79 e 12.26 KN/m^3 , ocorrendo o contrário com os demais. Assim, à primeira vista, obteve-se dois grupos de resultados, um sofrendo efeito do teor de umidade e outro independente dele. A partir desta constatação poder-se-ia afirmar não haver influência do teor de umidade sobre os valores de absorção. Apesar disto uma comparação múltipla de médias foi realizada nos grupos que demonstraram sofrer influência do teor de umidade. O quadro 7.30 apresenta dos resultados.

$\gamma_d(\text{KN/m}^3)$	GRUPOS
10.30	$\overline{29 \ 31 \ 33} \quad \overline{34}$
10.79	$\overline{29 \ 31 \ 33} \quad \overline{34}$
11.42	não houve influência
11.77	não houve influência
12.26	$\overline{31 \ 33} \quad \overline{29 \ 34}$

QUADRO 7.30 - Comparação de médias (método de Duncan)
Influência do teor de umidade na absorção
para 5 pesos específicos aparentes secos

Analisando-se os grupos encontrados verifica-se que:

a) em dois dos três grupos que não rejeitaram a hipótese da influência da umidade na absorção, os teores 29, 31 e 33% aparecem juntos não havendo portanto diferença significativa entre eles,

b) o teor 34% que forma grupo sozinho corresponde ao maior valor de absorção para γ_d 10.30 e o menor para γ_d 10.79.

A partir destas observações conclui-se que o teor de umidade não exerceu efeito sobre os resultados de absorção. Ensaio com amostras maiores seriam necessários para a confirmação dos resultados, porém, não foram realizados devido

ao fato dos valores de absorção encontrados serem ainda bastante elevados.

7.3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A alta absorção apresentada pelos tijolos de cinza volante e cal tem sido o aspecto mais preocupante deste estudo.

Verificou-se inicialmente, na primeira etapa dos ensaios, que o tempo não exerceu influência sobre a absorção, não havendo portanto expectativas de uma melhora com a idade de cura. O aumento do teor de cal conseguiu reduzir a absorção dos tijolos, não ocorrendo porém de forma suficiente dentro dos teores economicamente viáveis.

Numa segunda etapa decidiu-se alterar as condições de moldagem, variando-se o teor de umidade e o peso específico aparente seco das misturas. Concluiu-se que o primeiro não afetava os resultados de forma significativa e que o segundo, embora exercesse influência, não conduzia a valores satisfatórios para os níveis testados.

Níveis ainda mais elevados de γ_d não puderam ser testados devido à incapacidade do equipamento de moldagem disponível.

Entretanto, como o comportamento do material cinza volante e cal é praticamente desconhecido não se pode afirmar taxativamente que a elevada absorção prejudique o comportamento dos tijolos, pois esta foi considerada alta apenas em comparação com outros materiais disponíveis no mercado.

Ensaio de comportamento de alvenarias submetidas a penetração d'água e estudos de argamassas de revestimento fazem-se necessários para tornar possível alguma afirmação a respeito do seu desempenho. Uma vez verificado que a alta absorção realmente afeta o produto outros estudos seriam necessários.

Podem ser buscados então aditivos que, incorporados à massa da mistura, reduzam os valores de absorção dos tijolos, sem esquecer contudo que estes produtos são, na sua grande maioria de custo elevado.

Uma estabilização granulométrica poderia também ser experimentada, com areia ou outro material, buscando diminuir a porosidade do produto final.

Estes estudos não foram realizados na presente pesquisa devido a sua amplitude e são aqui expostos como sugestão para trabalhos futuros.

Deve-se considerar, ainda, que para uso em paredes internas, que não ficam expostas à ação direta da água, o tijolo de cinza volante e cal não apresenta nenhum inconveniente. O uso destes tijolos (mais leves que os cerâmicos) contribuiria, também, na redução do custo das estruturas portantes das construções.

7.4. VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO EM PRISMAS

O estudo da resistência à compressão em prismas foi realizado visando complementar os dados obtidos com o estudo de unidades e verificar o tipo de relação existente entre os resultados destas duas etapas, servindo de base para pesquisas posteriores.

7.4.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nas etapas anteriores verificou-se o seguinte:

a) a resistência dos tijolos cresceu mais acentuadamente até o teor 15%, realizando-se a uma taxa decrescente para os teores mais elevados,

b) o período de cura de 7 dias não foi suficiente, em todos os casos, para o desenvolvimento de resistências mínimas.

c) o processo de cura em câmara úmida conduziu aos melhores resultados a curto prazo, mas com o decorrer do período os outros tipos de cura foram mais favoráveis. Apesar das diferenças observadas todos eles proporcionaram o desenvolvimento de resistências aceitáveis.

De acordo com estas observações, para a construção dos prismas foram utilizados tijolos com 15% de cal, curados durante 14 dias em câmara de temperatura controlada. A escolha deste processo de cura deveu-se a disponibilidades de laboratório.

Como planejou-se comparar os resultados obtidos com os valores encontrados por JAWOROSKY²⁹ em trabalho realizado com prismas de tijolos cerâmicos, adotou-se a mesma geometria, ou seja, prismas não contrafiados com uma unidade de largura e quatro de altura.

Os testes foram realizados a 28 dias da construção dos prismas e seguiram norma ASTM E447¹⁰.

Os materiais e procedimentos utilizados na construção estão descritos nos capítulos 4 e 5.

Inicialmente construíram-se cinco prismas para formar uma amostra piloto, cujo objetivo seria indicar o número de corpos de prova necessários para os ensaios definitivos. Este número foi considerado viável já que JAWOROSKY testando grupos de quatro prismas obteve coeficientes de variação aceitáveis de 6.1 a 16.4% e esperava-se que os prismas de cinza volante e cal apresentassem menor variabilidade, devido ao pequeno coeficiente de variação observado nos testes com unidades.

Após a obtenção dos resultados construiu-se a amostra definitiva e obtidos e analisados os resultados desta, uma nova série foi ensaiada para a confirmação dos mesmos.

Amostras	n ^o	RCS (MPa)		Relação prisma/unid.
		unidade	prisma	
Amostra piloto	1	9.47	10.10	1.10
	2	9.57	10.10	
	3	8.66	9.72	
	4	9.26	10.36	
	5	8.73	10.15	
Amostra definitiva 01	6	8.31	9.17	1.04
	7	8.65	8.24	
	8	9.00	8.83	
	9	7.80	8.83	
	10	-	9.00	
Amostra definitiva 02	11	9.68	10.14	1.04
	12	8.99	9.25	
	13	10.64	10.36	
	14	9.17	10.19	
	15	9.69	10.06	

QUADRO 7.31 - Valores de RCS(MPa) de prismas e unidades de cinza volante e cal e relação entre os valores médios.

Para cada prisma ensaiado foi testada uma unidade (tijolo) de forma a comparar os resultados de resistência.

Poderiam ter sido utilizados os resultados de resistência de unidades obtidos em etapas anteriores, porém, devido à variabilidade observada entre eles, preferiu-se repetir estes ensaios.

As unidades que compunham os prismas e aquelas ensaiadas isoladamente foram moldadas juntamente e submetidas às mesmas condições de cura.

Os valores obtidos para as três séries ensaiadas estão no quadro 7.31.

7.4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados obtidos da amostra piloto foram submetidos à análise estatística básica. Os resultados estão no quadro abaixo.

	unidades	prismas
tamanho da amostra (n)	5	5
valor médio (MPa)	9.15	10.10
desvio padrão (MPa)	0.3656	0.2311
CV (%)	3.99	2.29
resíduos {distr.normal	sim	sim
{espúrios	não	não

QUADRO 7.32 - Análise estatística básica dos resultados de RCS (MPa) de unidades e prismas - Amostra piloto

O coeficiente de variação apresentado foi bastante baixo. Para uma amostra de tamanho 5, utilizando-se a equação 3.1, verificou-se um erro de apenas 2% nos resultados de RCS dos prismas.

Desta forma o tamanho da amostra piloto foi suficientemente grande podendo ser adotado para as amostras definitivas.

Como o erro encontrado foi muito pequeno decidiu-se aplicar a análise estatística também sobre as amostras definitivas procurando confirmá-lo. O resultado encontra-se no quadro 7.33.

	AMOSTRA 01		AMOSTRA 02	
	Unidade	Prisma	Unidade	Prisma
Tamanho da amostra (n)	04	04	05	04
média (MPa)	8.44	8.81	9.63	10.19
desvio padrão (MPa)	0.5110	0.4050	0.6417	0.1269
coef. de variação (%)	6.06	4.59	6.66	1.25
resíduo	distr. normal	sim	sim	sim
	valores espúrios	não	não	não

QUADRO 7.33 - Análise estatística básica dos resultados de RCS (MPa) de unidades e prismas Amostras definitivas

Aplicando-se novamente a equação 3.1 verificou-se um erro de 4.4% para a amostra 01 e de 1.2% para a amostra 02, confirmando, portanto, a viabilidade do tamanho adotado da amostra.

Os baixos coeficientes de variação observados nos resultados de RCS dos prismas já eram esperados, uma vez que as unidades já haviam apresentado valores bem menores que aqueles encontrados para tijolos cerâmicos.

O quadro seguinte compara os valores dos coeficientes de variação de unidades e prismas cerâmicos e de cinza volante e cal.

	CV(%)	
	cerâmico	cinza vol.e cal
unidade	18.7	7.0
prisma	14.5	2.7

QUADRO 7.34 - Comparação dos coeficientes de variação médios entre unidades e prismas de material cerâmico e de cinza volante e cal

Nos Estados Unidos da América, a dispersão dos resultados do ensaio de prismas submetidos à compressão é medida através do coeficiente de variação. Valores inferiores a 10% são considerados excelentes, entre 10 e 15% bons e 20% é considerado o limite superior de um controle aceitável³⁰.

O tipo de ruptura apresentado pelos prismas foi o de fissuras verticais paralelas ao eixo de carregamento e descolamento superficial de pedaços de tijolos.

A figura 7.39 apresenta o corpo de prova depois de ensaiado.

O modelo físico internacionalmente aceito que explica este tipo de ruptura aparece esquematicamente na figura 7.40.

Com a aplicação da carga de compressão, a argamassa, por ser menos rígida que o tijolo, tende a deformar-se transversalmente. Esta deformação é impedida pelos tijolos ficando a argamassa submetida à compressão triaxial. Os tijolos por sua vez ficam submetidos lateralmente a uma tensão de tração que os leva inicialmente à fissuração e, finalmente, à ruptura.

Quando uma unidade é ensaiada isoladamente, além da tensão de compressão vertical, ela está sujeita a tensões de compressão horizontais. Estas tensões são introduzidas pela restrição imposta pelos pratos da máquina de ensaio à deformação do tijolo.

Esta é a explicação normalmente aceita para o fato das unidades apresentarem resistências superiores àquelas das alvenarias.

Como pôde-se observar no quadro 7.31 este comportamento não foi verificado para os tijolos de cinza volante e cal. Na maioria dos casos os prismas apresentaram resistências superiores à das unidades, ainda que a diferença tenha sido pequena.

Este fato foi verificado inicialmente com a amostra piloto e confirmado pela amostra definitiva 01.



FIGURA 7.39 - Aspecto do prisma após ensaio de RCS.

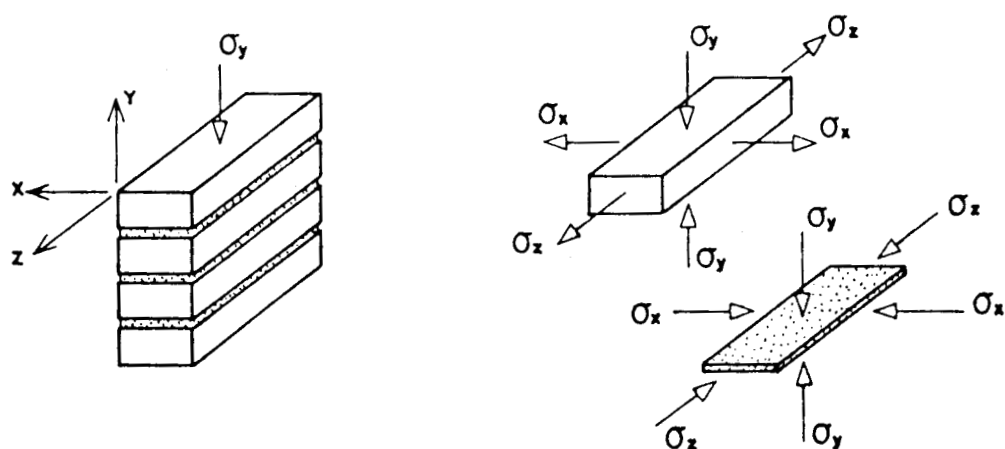


FIGURA 7.40 - Modelo físico internacionalmente aceito para a ruptura dos prismas submetidos à RCS..

Como as condições de ensaio aplicadas aos tijolos de cinza volante e cal foram as mesmas a que foram submetidos os tijolos cerâmicos esperava-se que os resultados fossem compatíveis, ou seja, que ambos os materiais apresentassem prismas com menor resistência que as unidades. Porém, como isto não foi observado, constatou-se que algum outro fator, não considerado e diferente para os dois materiais, deveria estar influenciando os resultados.

Em primeiro lugar foi verificado o efeito da saturação das unidades.

As normas utilizadas recomendavam que os prismas fossem testados secos, enquanto que as unidades deveriam ser submersas em água 24hs antes do ensaio. Este procedimento normalmente é adotado porque as unidades saturadas apresentam resultados inferiores àqueles obtidos de amostras secas.

Se a redução da resistência de uma unidade seca para outra saturada ocorresse de forma drástica para o material cinza volante e cal, ou seja, a sua resistência fosse substancialmente alterada pela presença d'água poder-se-ia encontrar aí a explicação para os prismas, ensaiados secos, apresentarem resistências ligeiramente superiores às unidades saturadas.

Realizou-se então um pequeno ensaio buscando comparar a RCS de unidades secas e saturadas. Os resultados encontram-se no quadro 7.35.

	RCS (MPa)	
	seco	saturado
1	4.15	3.63
2	3.98	3.55
3	4.49	3.72
4	3.72	3.29
5	4.15	3.37
\bar{x} (MPa)	4.10	3.51
CV (%)	6.93	5.11

QUADRO 7.35 - Resultados de RCS, valores médios e CV de tijolos ensaiados nas condições seco e saturado.

A diferença encontrada para as duas condições testadas foi em média de 16.8% .

No caso dos tijolos cerâmicos estudados por JAWOROSKY, as unidades (tijolos tipo T₁) apresentaram resistências 50% superiores aos prismas confeccionados com as mesmas e argamassa tipo C. Os prismas de cinza volante e cal, ao contrário, mostraram resistências de 4 a 10% maiores que as das unidades.

Considerando-se que as unidades fossem ensaiadas secas, haveria uma inversão nos resultados ficando estas com resistências 6.8 a 12.8 maiores que aquelas dos prismas. Estas diferenças, no entanto, seriam ainda muito pequenas e distantes do valor verificado para os tijolos cerâmicos.

O efeito da saturação foi então descartado como responsável pela menor resistência apresentada pelas unidades.

Outro fator considerado foi a baixa variabilidade apresentada pelos resultados de RCS do material cinza volante e cal. Supôs-se que esta característica resultasse de uma estrutura interna provavelmente mais regular que a dos materiais cerâmicos, especialmente devido ao fato de não sofrer processo agressivo de transformação como é o caso da queima para os tijolos cerâmicos.

A resistência das unidades cerâmicas apresenta alta variabilidade, desta forma a resistência do prisma fica condicionada àquela da unidade mais fraca, por outro lado, se as resistências de todas as unidades forem equivalentes, como no caso do material cinza volante e cal, o prisma romperia provavelmente com uma carga mais próxima da resistência média das mesmas. Porém, como explicado anteriormente, os prismas normalmente atingem a ruína pelo desenvolvimento de fissuras paralelas ao eixo de carregamento, resultantes de tensões de tração causadas pela restrição imposta pelos tijolos à deformação da argamassa. Desta forma decidiu-se verificar se a resistência à tração dos tijolos também apresentava pequena variabilidade.

Com este objetivo moldaram-se quinze tijolos, submetendo-se dez deles a ensaio de tração e os restantes à RCS. Os resultados aparecem no quadro 7.36.

CP	Módulo de ruptura(MPa)	RCS(MPa)
01	0.43	5,45
02	0.47	5.71
03	0.43	5.53
04	0.39	5.62
05	0.32	5.79
06	0.28	-
07	0.47	-
08	0.39	-
09	0.39	-
10	0.50	-
\bar{x} (MPa)	0.41	5.62
CV(%)	15.96	2.42

QUADRO 7.36 - Valores de MR e RCS para tijolos de cinza volante e cal. Mistura 85x15 - Idade 14 dias

Os valores médios encontrados por JAWOROSKY ao estudar o tijolo cerâmico tipo T₁ para RCS, módulo de ruptura e seu coeficiente de variação foram, respectivamente, 10.6, 1.3 e 29.7.

Observa-se então, que o coeficiente de variação apresentado pelos tijolos de cinza volante e cal para o ensaio de tração foi praticamente a metade daquele verificado com os tijolos cerâmicos. A maior constância destes resultados poderia levar então a menores reduções na resistência à compressão simples dos prismas. Contudo, deve-se considerar também que os valores de resistência à tração foram baixos e o valor do coeficiente, embora menor, foi ainda considerável e bem superior àquele apresentado pelo ensaio de RCS (2.42%). Além disso, a relação entre as resistências tração/compressão foi de 0.07 enquanto que para os tijolos cerâmicos ela era de 0.12.

Neste momento, uma nova série de prismas foi produzida para uma confirmação definitiva do comportamento

destes em relação às unidades. Os valores estão no quadro 7.31 (amostra definitiva 02) com avaliação estatística no quadro 7.33.

Como pode-se observar os resultados coincidiram com aqueles das amostras piloto e definitiva 01.

Confirmado este comportamento voltou-se novamente à procura de uma explicação para o fenômeno.

Uma vez que os resultados de resistência à tração foram baixos e ainda apresentaram uma variabilidade considerável, uma outra explicação para o retardamento do aparecimento de fissuras, fazendo com que o prisma suportasse maiores cargas, seria o decréscimo das tensões de tração atuantes lateralmente sobre os tijolos.

A deformação da argamassa é impedida pelos tijolos porque as deformações características dos dois materiais são muito diferentes. Se o tijolo acompanhasse a expansão da argamassa, ou seja, fosse tão "elástico" quanto ela não surgiriam tensões de tração sobre o mesmo.

Assim, se os tijolos de cinza volante e cal possuísem uma deformação característica mais aproximada à da argamassa que os tijolos cerâmicos, maiores cargas de compressão seriam necessárias para causar tensões de tração capazes de levá-los à ruptura.

HENDRY²⁷ apresenta resultados de uma pesquisa realizada variando o material de ligação entre os tijolos desde borracha até aço. Os resultados são mostrados no quadro 7.37.

No caso da junta de borracha os tijolos romperam como consequência da tensão de tração induzida pela deformação da mesma. O aço por outro lado, teve o efeito de restringir a deformação lateral dos tijolos induzindo um estado de compressão triaxial. A ruptura neste caso deu-se por esmagamento como em um típico teste de compressão em material frágil.

MATERIAL DA JUNTA	RESISTENCIA A COMPRESSAO (MPa)	RAZAO DE RESISTENCIA
aço	56.48	1.40
compensado	46.39	1.15
papelão duro	43.89	1.09
polietileno	16.99	0.42
borracha com fibras	11.71	0.29
borracha macia	6.99	0.17
sem material de junta	37.20	0.93
argamassa(1:1/4:3)	14.00	0.35

QUADRO 7.37 - Efeito de diferentes materiais de junta na resistência à compressão de prismas e relação das resistências prisma/tijolo(HENDRY³⁷).

Observando-se os dados verifica-se que a utilização de materiais mais rígidos que a argamassa para preenchimento das juntas causa um crescimento na resistência à compressão. Isto ocorre porque as tensões de tração que seriam causadas por estes materiais desaparecem (se eles forem mais rígidos que os tijolos) ou pelo menos reduzem de intensidade.

Para verificar se os tijolos de cinza volante e cal apresentam realmente menor rigidez que os tijolos cerâmicos seriam necessários ensaios para definir o módulo de deformação e coeficiente de poisson dos dois materiais e da argamassa.

Estes ensaios por serem de custo elevado e de execução relativamente complexa ficam aqui indicados como sugestão para trabalhos futuros.

A comprovação desta hipótese é de grande importância para a compreensão do comportamento dos tijolos estudados nesta pesquisa. Se as resistências dos prismas mantêm-se iguais às das unidades isto significa que, ainda que os tijolos cerâmicos apresentem resistências maiores, os prismas com eles construídos podem conduzir a valores menores que aqueles confeccionados com tijolos de cinzas volante e cal.

O quadro 7.38 apresenta uma comparação entre valores médios de resistência à compressão simples de tijolos e prismas

de cinza volante e cal e aqueles obtidos por JAWOROSKY utilizando unidade tipo T1 e argamassa tipo C.

R C S (MPa)		
Material	unidade	prisma
cerâmica	10.06	6.92
cinza volante e cal	9.03	9.50

QUADRO 7.38 - Valores médios de RCS de tijolos e prismas cerâmicos e de cinza volante e cal.

Não se pode, contudo, afirmar a partir disto que também para as paredes o mesmo comportamento seja válido. Outros fatores são considerados no estudo do seu processo de ruptura. A resistência de uma parede será influenciada pela excentricidade de carregamento e pela razão de esbeltez que dependem da geometria da construção, da relativa rigidez das paredes e pisos, da natureza das juntas entre eles e da distribuição de cargas³⁷.

WEST⁴⁵ ao estudar blocos sílico-calcáreos obteve resultados aproximadamente iguais para paredes e prismas. Ele, contudo, considerou impraticável no momento o uso da resistência de prismas para predizer a resistência das paredes. Os dados da sua pesquisa encontram-se no quadro seguinte:

Tipo de argamassa e traço	parede/prisma		n
	média	faixa	
X = 1:0.25:3	1.22	1.14 - 1.30	5
Y = 1:1:6	1.07	0.67 - 1.64	13
Z = 1:2:9	1.06	0.77 - 1.19	4
Total	1.10	-	22

QUADRO 7.39 - Razões médias de resistência parede/prisma

Como pode-se observar os resultados mais consistentes foram aqueles encontrados para a argamassa tipo X onde as paredes apareceram com resistências até 30% maiores que as dos prismas. Para as outras argamassas o comportamento variou,

apresentando resistências maiores ou menores que os prismas conforme o corpo de prova testado.

SUTHERLAND⁴³ pesquisando blocos de concreto encontrou relação média entre paredes e blocos de 0.8 . Os valores variaram na faixa de 0.65 a 1.1 podendo portanto a parede, em alguns casos, apresentar resistências maiores que os blocos.

Qualquer afirmação a respeito do comportamento de paredes, entretanto, só poderá ser feita mediante a realização de ensaios em corpos de prova de tamanho real. Antes disto, contudo, faz-se necessário um estudo mais amplo com prismas buscando uma maior compreensão do assunto numa escala de mais fácil realização em laboratório.

7.5. VERIFICAÇÃO DA ADERENCIA

7.5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A resistência à compressão tem sido considerada por muito tempo como a principal característica capaz de determinar a qualidade dos materiais. Na alvenaria tem-se adotado também o mesmo conceito, entretanto, de nada valeriam altos valores de resistência à compressão se a alvenaria não mantivesse a sua integridade.

Segundo GALLEGOS³⁴ esta integridade depende da resistência à tração da alvenaria, que por sua vez é dependente da intensidade, extensão e durabilidade da aderência entre a argamassa e o tijolo.

Conclui-se então que a resistência à compressão da alvenaria está diretamente ligada à aderência entre argamassa e unidades sendo esta uma propriedade extremamente importante.

A aderência é um fenômeno essencialmente mecânico que se processa basicamente por ação do encunhamento, em uma superfície porosa e irregular, de precipitados intra-capilares oriundos da pasta de argamassa. Quando a argamassa fresca é colocada sobre uma superfície absorvente, parte da água de amassamento (que contém os componentes aglomerantes dissolvidos ou em estado coloidal) é succionada pela base penetrando pelos poros e canais. No interior destes produzem-se fenômenos de precipitação dos géis silicáceos do cimento ou do hidróxido de cálcio da cal. Estes precipitados formados nos poros (cristais de etringita) exercem, após a cura, uma ação de ancoragem na base³⁵.

A aderência deriva da conjunção de três propriedades da interface argamassa-substrato:

- a) resistência de aderência à tração
- b) resistência de aderência ao cisalhamento

c) extensão de aderência (que corresponde à razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida).

7.5.2. FATORES QUE AFETAM A ADERENCIA

7.5.2.1. TIJOLOS

A principal contribuição do tijolo na aderência está ligada ao valor de sucção apresentado pelo mesmo, ou seja, sua velocidade inicial de absorção de água. Se este valor for elevado o tijolo procurará suprir sua avidez por água retirando-a da argamassa de assentamento causando seu endurecimento precoce e prejudicando a hidratação do cimento. Além disto, quando do assentamento da próxima fiada, a argamassa não apresentará mais a trabalhabilidade necessária à acomodação dos tijolos.

A norma ASTM 62/87³⁴ limita a sucção em 30 g/194cm²/min. Para a ITINTEC³⁴ este limite é de 25 g/200cm²/min.

Acima do limite considerado os tijolos devem ser molhados antes de assentados. O tempo de molhagem é bastante importante pois um tijolo excessivamente úmido praticamente não absorverá água da argamassa, assim as substâncias solúveis do cimento não terão como penetrar nos poros do tijolo e não ocorrerá a ligação entre os dois componentes da alvenaria.

GALLEGOS³⁴ concluiu que o tempo ideal de molhagem dos tijolos cerâmicos foi em torno de dez minutos e dos sílico-calcáreos aproximadamente um minuto. As unidades devem ser assentadas sem água superficial presente.

Outro fator que afeta a aderência é a condição da superfície dos tijolos. A presença de partículas soltas ou de algum tipo de sujeira pode afetar a extensão da aderência já que, obstruindo os poros dos tijolos em alguns pontos, funcionam como um terceiro componente evitando o contato direto

entre tijolo e argamassa. Tijolos com superfícies mais ásperas tendem a desenvolver aderências mais elevadas que aqueles cujas superfícies são lisas. Isto provavelmente deve-se ao fato de haver um maior travamento da argamassa nas irregularidades apresentadas.

7.5.2.2. ARGAMASSAS

Uma argamassa possibilita boa aderência quando oferece uma base uniforme e adaptável às unidades de alvenaria e não permite que estas retirem-lhe água de forma excessiva. Assim as principais propriedades de uma argamassa no estado plástico são a trabalhabilidade e a retentividade.

Uma argamassa de boa trabalhabilidade é aquela que permite ao pedreiro assentar corretamente o tijolo e preencher facilmente suas juntas de forma que a penetração da massa ocorra em todos os interstícios da unidade, garantindo a extensão da aderência. A trabalhabilidade resulta principalmente das propriedades de plasticidade, fluidez e coesão. Estas vão depender das relações água-aglomerante e aglomerante-agregado, da qualidade dos aglomerantes e do tipo de aditivo, quando utilizado.

A retentividade é a capacidade da argamassa de manter sua trabalhabilidade durante o processo de assentamento, resistindo à retirada de água pela unidade. Apenas a água em excesso deve ser cedida ao tijolo, caso contrário a hidratação do cimento será incompleta e a camada de argamassa endurecerá e deformará impossibilitando o assentamento da fiada seguinte.

JAWOROSKY³⁹, citando VALDEHITA, afirma que a retenção de água está intimamente ligada com a tensão superficial da pasta. As argamassas de aglomerantes com alto grau de finura apresentam maior retentividade.

Existe um consenso entre normas técnicas e pesquisadores de que as argamassas mistas de cimento e cal são as mais adequadas à alvenaria estrutural. A cal melhora a

aderência e aumenta a durabilidade e a capacidade de absorver deformações das argamassas endurecidas³⁹.

As duas últimas propriedades são explicadas devido ao fato do cimento tender a contrair-se durante o processo de hidratação, enquanto a cal tende a endurecer lentamente, mantendo as argamassas "elásticas" e curando as fissuras de maneira autógena quando da carbonatação³⁴.

7.5.2.3. MAO-DE-OBRA

Este é também um fator relevante para a obtenção de uma boa aderência na alvenaria. A mão-de-obra é a responsável direta pela qualidade do tratamento dado às unidades, à argamassa e à execução da alvenaria tais como:

- tratamento da sucção das unidades,
- assentamento e movimentação das mesmas,
- trabalhabilidade da argamassa,
- ritmo das construções.

O tempo ideal de molhagem dos tijolos deve ser verificado e controlado de maneira que todas as unidades sejam submetidas ao mesmo tratamento da sucção.

O assentamento deve ser executado sobre camadas pouco extensas de argamassa, evitando a secagem por evaporação.

As juntas devem ser de aproximadamente 9 mm. Valores maiores diminuem a resistência da alvenaria, enquanto valores menores podem comprometer a aderência pois quanto menor a quantidade de massa entre os tijolos menos água excedente haverá para satisfazer a sua capacidade de sucção. O total preenchimento e o bom acabamento das juntas garantem a extensão da aderência.

A maior causa de penetração de água em paredes ocorre devido a falhas entre a unidade e a argamassa. Esta superfície

de contato, para os tijolos cerâmicos, representa 20% da superfície exposta da alvenaria⁴⁰.

Isto demonstra que a aderência não é responsável apenas pela resistência da alvenaria mas também pela sua estanqueidade.

A remoção das unidades já assentadas ou a sua movimentação para realinhamento prejudicam seriamente a aderência da alvenaria. No primeiro caso destrói-se definitivamente a aderência e no segundo a extensão da superfície de contato³⁴. O limite de tempo no qual os tijolos podem ser movimentados sem alteração da aderência é maior para tijolos de baixa sucção e argamassas de alta retentividade³⁷.

O ritmo de construção também pode afetar a resistência de aderência. Sendo muito rápido ocorrem maiores pressões de contato entre as unidades e a argamassa relativamente fresca, o que poderia aumentar a aderência. Por outro lado prejuízos poderiam ocorrer por deformações excessivas devidas à secagem³⁴.

7.5.2.4. CURA

As condições a que fica submetida a alvenaria tem grande importância na qualidade da aderência. A temperatura, umidade e exposição ao sol e aos ventos estão relacionados à retirada de água da argamassa através da evaporação.

Entretanto, nem sempre é possível o controle destes fatores em obra.

7.5.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

7.5.3.1. MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios de resistência de aderência não são normalizados no Brasil e poucos deles o são a nível

internacional. Da mesma forma não há um valor padrão para aceitação ou não dos resultados.

No caso dos tijolos de cinza volante e cal não existem também experimentos anteriores. Desta forma resolveu-se comparar os resultados da resistência de aderência dos mesmos à valores encontrados para tijolos cerâmicos.

JAWOROSKY³⁹ realizou recentemente uma série de experimentos com tijolos cerâmicos e alguns deles foram reproduzidos neste trabalho, da forma mais aproximada possível, com tijolos de cinza volante e cal visando a comparação dos resultados.

Na sua pesquisa é apresentada uma revisão sobre os métodos de ensaios para avaliação da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento, sendo três deles escolhidos para a realização dos testes. Para a verificação da resistência de aderência ao cisalhamento foi utilizado o método de corte direto(a) enquanto que para a tração foram escolhidos os métodos de tração por flexão(b) e tração por arrancamento(c). Um esquema destes ensaios pode ser visto na figura 7.41.

Para a realização do ensaio de corte direto uma carga horizontal constante P é imposta ao corpo de prova enquanto aplica-se, na unidade central, uma carga vertical crescente até a falha.

No experimento com tijolos cerâmicos foram utilizados três níveis de pressões horizontais, testando-se oito corpos de prova para cada uma. Como cada corpo de prova era formado por três tijolos, um total de setenta e dois deles foram necessários.

O ensaio de tração por flexão utilizou vigas construídas com 10 tijolos. Testaram-se 5 vigas e cada uma forneceu apenas um resultado que representou sempre a resistência da junta mais fraca do corpo de prova. Após a realização do ensaio as juntas remanescentes foram aproveitadas submetendo-as à tração por arrancamento.

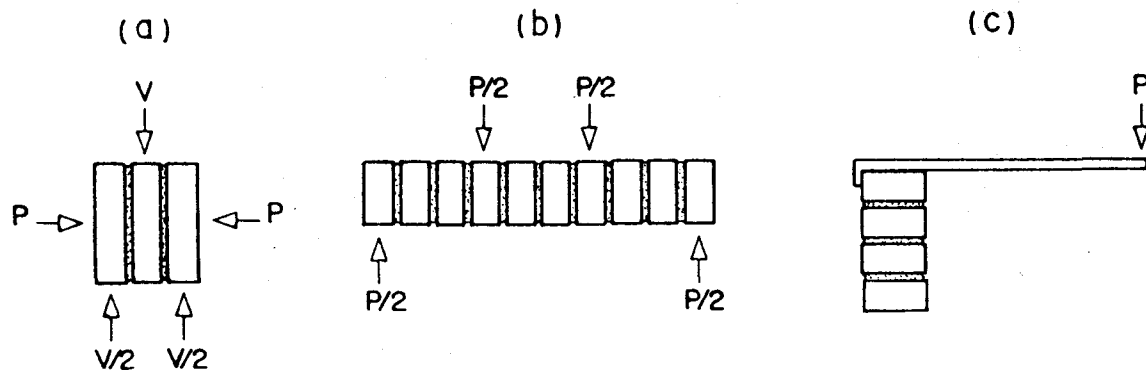


FIGURA 7.41 - Tipos de ensaios de aderência

Os corpos de prova para o teste de arrancamento foram prismas compostos de quatro tijolos. A norma não define a altura dos prismas.

Alguns autores afirmam haver influência da geometria dos prismas sobre os resultados de aderência. As juntas de prismas compostos por um maior número de unidades apresentariam maiores resistências de aderência por estarem sujeitas a uma pressão adicional exercida pelo pedreiro quando do assentamento.

JAWOROSKY, analisando resultados experimentais próprios, concluiu não haver tendência de crescimento ou diminuição da resistência de aderência das juntas conforme sua posição no prisma.

As unidades foram arrancadas uma a uma, obtendo-se o resultado de três juntas. Para cada caso analisado (tipos de argamassa e tijolo) foram utilizados quatro prismas sendo necessárias, portanto, 16 unidades.

Na realização dos ensaios de aderência dos tijolos de cinza volante e cal teve-se que optar por um único tipo de teste. Isto deveu-se principalmente à dificuldade na obtenção de um número grande de tijolos e ao curto espaço de tempo que se dispunha para a execução dos ensaios.

JAWOROSKY concluiu em sua dissertação a vantagem do ensaio de tração por arrancamento sobre o de tração por flexão, já que o segundo mostrou custos superiores e um número pequeno de resultados que, além disso, não representavam a média do comportamento e sim valores mínimos. Verificou também, através da comparação de médias, que as resistências obtidas pelos dois ensaios não diferiam significativamente.

O ensaio de corte direto representou a aderência da alvenaria apenas para as tensões horizontais utilizadas e foi, entre os três, o que necessitou o maior número de unidades.

Desta forma decidiu-se utilizar o ensaio de resistência de aderência à tração por arrancamento. Este método está descrito no item 6.6.

7.5.3.2. PLANEJAMENTO DO ENSAIO

Não era conhecido a princípio o número de corpos de prova necessários para a obtenção de resultados confiáveis. Foi preparada então uma amostra piloto com o objetivo de verificar o coeficiente de variação apresentado pelos resultados deste ensaio e a partir dele, admitido um erro aceitável (<15%), determinar o número mínimo de corpos de prova a serem testados.

JAWOROSKY utilizou quatro prismas de quatro unidades, resultando em doze juntas testadas para cada combinação de variáveis (tipo de unidade e de argamassa).

Decidiu-se confeccionar quatro prismas de cinco unidades, já que foi demonstrado que a geometria do prisma não afetava os resultados, e pelo desconhecimento do material preferiu-se aumentar o número da amostra. Assim foram testadas dezesseis juntas. Este procedimento foi repetido num segundo grupo.

Os resultados obtidos das amostras piloto indicaram o tamanho necessário para a amostra definitiva e a mesma foi preparada e ensaiada.

Foi utilizado apenas um tipo de argamassa já que não se pretendeu verificar a influência desta na resistência, mas apenas a posição ocupada pelos tijolos de cinza volante e cal, quanto à aderência, em relação aos tijolos cerâmicos.

Os materiais utilizados e os procedimentos adotados na confecção dos corpos de prova estão relacionados nos itens 5.2 e 5.3 .

7.5.4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados obtidos nos ensaios de aderência realizados nos dois grupos da amostra piloto (G_1 e G_2) encontram-se no quadro 7.40. As juntas foram numeradas de cima para baixo quanto a sua posição no prisma. Assim o número 01 equivale à junta superior.

O tamanho das amostras sofreu redução devido a perdas de corpos de prova havidas durante os ensaios. A fixação ao equipamento exige muito cuidado, pois qualquer imperfeição transmite esforços para as unidades que não estão sendo testadas podendo, inclusive, rompê-las.

GRUPO	PRISMA	JUNTA				MÉDIA DO PRISMA
		1	2	3	4	
G_1	P ₁	-	-	0.300	0.280	0.290
	P ₂	0.427	0.471	0.329	0.340	0.392
	P ₃	0.379	0.295	0.254	0.411	0.335
	P ₄	0.226	0.515	0.311	0.479	0.383
G_2	P ₆	0.298	0.301	0.306	0.217	0.281
	P ₇	0.270	0.207	-	0.330	0.269
	P ₈	0.353	0.445	0.526	0.495	0.455
	P ₉	0.431	0.454	0.404	0.411	0.433

QUADRO 7.40 - Resistência de aderência à tração por arrancamento (MPa) - Amostras G_1 e G_2

	GRUPO	
	01	02
Tamanho da amostra (n)	14	15
média (MPa)	0.3584	0.3632
desvio padrão (MPa)	0.0899	0.0970
coef. de variação (%)	25.09	26.98
resíduos {		
distr. normal	sim	sim
valores espúrios	não	não

QUADRO 7.41 - Análise estatística básica - Grupos G_1 e G_2

PRISMA	JUNTA				MÉDIA DO PRISMA
	1	2	3	4	
P ₁	0.392	0.473	0.598	0.576	0.510
P ₂	0.384	0.590	0.533	-	0.502
P ₃	0.456	0.667	0.509	0.593	0.556
P ₄	-	0.707	0.588	-	0.648
P ₅	0.667	0.757	0.778	0.323	0.631
P ₆	0.520	0.573	0.633	0.590	0.579
P ₇	0.611	0.607	0.435	-	0.551
P ₈	-	0.788	0.491	0.489	0.589
P ₉	0.631	0.473	0.813	-	0.639

QUADRO 7.42 - Resistência de aderência à tração por arrancamento (MPa) - Amostra definitiva

Os resultados foram submetidos a uma análise estatística básica apresentada no quadro 7.41 com a finalidade de determinar o tamanho da amostra definitiva.

Tomando-se a média dos coeficientes de variação e admitindo-se um erro de 10%, encontrou-se, através da equação 3.1, que a amostra deveria conter 26 juntas. Para um erro de 5% seriam necessárias 53 juntas, sendo este número muito elevado. Decidiu-se trabalhar então com um erro de 6%, construindo-se nove prismas, obtendo-se 36 juntas.

Os resultados desta amostra definitiva estão no quadro 7.42.

7.5.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante a execução dos ensaios sobre a amostra definitiva seis valores foram perdidos, trabalhando-se então com um erro de 6.65%.

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística básica, apresentada no quadro 7.43.

GRUPO DEFINITIVO		
Tamanho da amostra (n)	30	
média (MPa)	0.5748	
desvio padrão (MPa)	0.1221	
coef. de variação (%)	21.25	
resíduos {	distr. normal	sim
	valores espúrios	não

QUADRO 7.43 - Análise estatística básica - amostra definitiva

O coeficiente de variação observado, 21.3%, ficou bem próximo dos valores encontrados por Jaworosky que mantiveram-se em torno dos 20%. Este valor é considerado elevado, porém, a simplicidade do equipamento, a facilidade de execução do ensaio e do preparo dos corpos de prova e a obtenção de valores de resistência para cada uma das juntas do prisma, viabilizam este ensaio para uso na determinação da aderência de elementos de alvenaria.

No quadro 7.44 foram comparados valores de resistência de aderência à tração por arrancamento de tijolos cerâmicos e de cinza volante e cal.

Observa-se inicialmente uma diferença considerável entre os valores de aderência da amostra piloto e da amostra definitiva. No capítulo que trata da RCS também foi notada uma variação entre os resultados de tijolos moldados em diferentes épocas. A causa provável seria a variabilidade dos materiais que compunham a mistura (cinza volante e cal).

Tipo do tijolo	Resistência média (MPa)
cerâmico T ₁	0.446
cerâmico T ₂	0.948
cinza volante e cal(piloto)	0.355
cinza volante e cal(defin.)	0.578

QUADRO 7.44 - Resistência de aderência à tração por arrancamento (MPa) - Tijolos cerâmicos x tijolos de cinza volante e cal.

No caso dos ensaios de aderência, além da variação apresentada pelos tijolos, pode ter ocorrido alguma alteração na argamassa ou nas condições de cura dos prismas(por exemplo temperatura). A mão-de-obra também pode ter sido responsável pelos mais baixos resultados das amostras piloto devido à falta de prática no início dos trabalhos.

Comparando-se os resultados da amostra definitiva e dos tijolos cerâmicos nota-se que os tijolos de cinza volante e cal possuem uma resistência de aderência situada entre aquelas dos tijolos T₁ e T₂, estando mais próximas do primeiro.

GALLEGOS³⁴ realizou estudos de aderência submetendo tijolos cerâmicos e sílico-calcáreos a ensaios de tração por flexão em vigas de alvenaria e obteve os resultados mostrados no quadro 7.45.

Tijolos sílico-calcáreos	0.275
Tijolos cerâmicos	0.539

QUADRO 7.45 - Resistência de aderência à tração por flexão(MPa)

JAWOROSKY³⁹ confrontou resultados de aderência à tração por flexão e por arrancamento obtidos em seu trabalho e observou não haver diferença significativa entre eles.

A partir desta consideração compararam-se os resultados de tração por flexão encontrados por Gallegos com os os resultados de tração por arrancamento dos tijolos de cinza volante e cal.

Os tijolos sílico-calcáreos apresentaram resistências de aderência menores que a metade daquela apresentada pelos tijolos de cinza volante e cal da amostra definitiva, apesar dos dois tipos de tijolos possuírem composição semelhante. Além disso a superfície dos primeiros apresentou-se lisa após a execução do teste demonstrando uma fraca ligação entre tijolo e argamassa. A superfície dos tijolos de cinza volante e cal, ao contrário, apresentou-se rugosa devido à presença de restos de argamassa que não "descolaram" dos mesmos.

Comparando-se os resultados com tijolos cerâmicos observaram-se valores equivalentes.

É possível que a constatação da inexistência de diferença significativa entre os resultados de aderência do teste de flexão e de arrancamento não seja válida para os tijolos sílico calcáreos. Neste caso a comparação entre estes e os tijolos de cinza volante e cal não seria possível. De qualquer forma a observação do aspecto da superfície dos tijolos após o descolamento é adequada.

Embora os valores encontrados por GALLEGOS para os tijolos cerâmicos fossem menores que aqueles encontrados por JAWOROSKY, para o tijolo T₂, as unidades ensaiadas pertenciam ao tipo V, que é a classe mais elevada da classificação ITINTEC.





Quanto ao tipo de ruptura apresentado pelos corpos de prova ocorreram várias formas sendo a mais comum a separação entre a unidade e a face superior da camada de argamassa.

Nos tijolos cerâmicos estudados por JAWOROSKY também foi observado este predomínio, explicado como segue:

"a argamassa colocada sobre o tijolo inferior perde parte da água que é succionada por este juntamente com precipitados de cimento que formarão os cristais intracapilares responsáveis pela aderência. Quando a unidade superior é colocada sobre a argamassa, esta já se encontra mais seca não sendo capaz de fornecer a mesma quantidade de pasta, resultando numa interface mais fraca".

No quadro 7.46 são apresentados todos os tipos de ruptura observados durante os ensaios com seus percentuais de ocorrência.

No estudo de JAWOROSKY o descolamento da face superior da camada de argamassa apareceu em 46% dos casos, enquanto para os tijolos de cinza volante e cal este valor variou de 57.2 a 70%. Nota-se um crescimento deste percentual desde o grupo G_1 até o grupo definitivo, isto provavelmente seja devido a dificuldades de adaptação dos corpos de prova ao equipamento, no início dos trabalhos, propiciando o surgimento de esforços diferenciados. A medida que cresceu a experiência na execução dos ensaios, os resultados tornaram-se mais uniformes.

TIPO DE RUPTURA						OUTROS
DESCRIÇÃO		INTERFACE SUPERIOR	INTERFACE INFERIOR	MEIO DA ARGAMASSA	MISTA	—
OCORRÊNCIA (%)	G_1	57.2	7.5	14.3	7.0	14.0
	G_2	66.6	6.7	20.0	—	6.7
	Def.	70.0	3.3	3.3	23.4	0

QUADRO 7.46 - Ensaio de resistência de aderência à tração por arrancamento - tipos de ruptura e percentuais de ocorrência para os grupos G_1 , G_2 e definitivo.

8. CONCLUSÕES

A produção de cinzas volantes no Rio Grande do Sul em 1989 foi estimada em 560000 toneladas, enquanto que seu consumo como adição ao cimento na fabricação de cimento pozolânico foi de 270000 toneladas. Com a entrada em funcionamento no Estado de duas novas termoelétricas, esta situação tende a agravar-se.

Neste trabalho, o aproveitamento da cinza volante misturada com cal, para produção de tijolos, foi experimentada buscando verificar sua viabilidade técnica. Sete diferentes combinações dos dois materiais foram inicialmente ensaiadas, reduzindo-se o estudo a três destes teores e na fase final a um único teor definido como o mais apropriado entre várias características testadas.

As conclusões a que se chegou foram as seguintes:

8.1. Um total de 192 corpos de prova (3 para cada combinação de variáveis), submetidos a ensaios de RCS, demonstraram que a resistência dos tijolos de cinza volante e cal foi superior às exigências das normas brasileiras. Uma análise estatística mostrou que estes valores são, ainda, crescentes com o aumento do teor de cal e com o tempo. Estes espécimes foram submetidos a três processos de cura. As unidades sujeitas à câmara úmida apresentaram resistências maiores nas primeiras idades, porém, para períodos posteriores, as curas em lona plástica preta e câmara de temperatura controlada foram as mais indicadas.

8.2. Com exceção dos teores de cal 05% e 10% (7 dias), o material cinza volante e cal foi aprovado no teste de durabilidade por molhagem e secagem. Os desgastes apresentados

foram de 31 a 100% menores que o máximo admissível por norma (10%). Esta conclusão baseou-se no estudo de 56 corpos de prova (2 para cada combinação de variáveis).

8.3. Os testes de absorção foram realizados utilizando normalização americana, devido à inexistência de norma brasileira sobre o assunto. Os valores encontrados para sucção e absorção basearam-se no teste de 108 unidades para cada ensaio (3 para cada combinação de variáveis) e foram cerca de 3 a 4 vezes maiores que o limite máximo previsto pela ASTM (10%). Segundo análise estatística, o tempo e o processo de cura não exerceram efeito sobre os resultados, ao contrário do teor de cal. Outros 60 tijolos ensaiados, demonstraram que o peso específico aparente seco influencia os resultados enquanto que o teor de umidade não o faz de maneira significativa. Os tijolos testados com as densidades e o teor de cal mais elevados demonstraram, contudo, valores de absorção ainda muito superiores ao limite máximo estabelecido pela norma. Ainda assim, o uso destes tijolos em paredes internas não apresentaria nenhuma inconveniência. Estas considerações foram desenvolvidas baseando-se apenas na comparação com material cerâmico.

8.4. Baseado nos resultados de RCS, durabilidade e absorção, o teor 15% de cal e o período de 14 dias foram definidos como as condições ótimas para a produção dos tijolos entre aquelas testadas neste trabalho. Valores menores foram insuficientes para obtenção de resultados que atendessem as normas e valores maiores causariam acréscimo no custo básico, por ser a cal o componente mais caro da mistura e prolongados períodos de cura exigirem maiores áreas de armazenamento. Os tijolos produzidos nesta condições apresentaram em média resistência entre 3.4 e 4.3 MPa (que continuará crescendo com a idade), desgaste de 3.6%, sucção de 45g e absorção de 39.5% .

8.5. Seguindo norma americana, o ensaio de quinze prismas de cinza volante e cal demonstrou que a resistência à compressão dos mesmos foi de 4 a 10% superior a das unidades, ao contrário

do que se observa com o material cerâmico, onde os prismas são cerca de 30% menos resistentes que os tijolos. Desta forma, mesmo que uma unidade cerâmica possua resistência maior que uma unidade de cinza volante e cal, prismas construídos com as últimas poderão apresentar maior resistência. Não se pode prever, entretanto, nesta fase do trabalho, se as paredes também apresentarão maiores resistências que as unidades ou prismas ou se sofrerão redução como ocorre com a alvenaria de material cerâmico.

8.6. O ensaio de aderência seguiu norma americana. Este tipo de ensaio é normalizado em apenas em poucos países, entre os quais não se encontra o Brasil. Não existem padrões para aceitação dos resultados, assim os valores obtidos nesta pesquisa foram comparados à outros ensaios realizados na UFRGS a partir de tijolos cerâmicos. Cinquenta e nove juntas foram testadas. Da comparação verificou-se que os dois materiais apresentaram resistências de aderência equivalentes, em torno de 0.450 MPa. As superfícies de descolamento apresentaram-se rugosas na grande maioria dos casos, indicando uma boa ligação entre a unidade e a argamassa.

8.7. Através da análise dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa concluiu-se que os tijolos de cinza volante e cal são viáveis à utilização na construção de alvenarias. Os maiores problemas foram observados com relação às propriedades de absorção e, portanto, uma maior concentração de estudos nesta área deveria ser realizada em pesquisas futuras.

9. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

9.1. Os valores de densidade e umidade utilizados na moldagem dos tijolos foram definidos a partir de ensaios do tipo Proctor normal. Estes valores foram tomados como ponto de partida. Ensaios com corpos de prova moldados sob outras condições de densidade e umidade devem ser realizados buscando verificar se os primeiros valores conduzem ao melhor desempenho do produto ou definindo novos parâmetros de moldagem que conduzam a melhores resultados.

9.2. Utilizaram-se três processos de cura durante a pesquisa e, na maioria dos casos, os resultados obtidos demonstraram não diferir de maneira significativa. Assim, seria interessante verificar o tipo de resultado obtido deixando-se os corpos de prova expostos ao ar de laboratório sem nenhuma espécie de tratamento. Se os resultados não se alterarem, poderia ser indicada uma cura em galpões, a nível industrial, sem cuidados especiais. A cura em lona plástica preta deveria ser repetida sob os meses de verão para verificar se haveria uma melhora significativa nos resultados já que entre os processos executados seria a mais barata e de mais fácil execução.

9.3. Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem forneceram resultados aceitáveis. Seria necessário, no entanto, verificar a durabilidade de prismas (mini paredes) sob efeito das intempéries, expostas ao meio ou sob condições artificiais em laboratório.

9.4. Os valores de absorção foram elevados quando comparados a resultados obtidos com tijolos cerâmicos. Para verificar se estes valores realmente afetam o desempenho do material seriam necessários ensaios que verificassem o comportamento do mesmo quando sujeito à ação de umidades.

9.5. Comprovada a ação nociva da umidade sobre os tijolos de cinza volante e cal, devem ser aprofundados os estudos com relação à absorção buscando aditivos impermeabilizantes, estabilização granulométrica com areia ou outro material, argamassas de revestimento, verificar a passagem de água através da interface argamassa/unidade, tentar aumentar a densidade das misturas e outras alternativas.

9.6. Os resultados dos ensaios de RCS em prismas apresentaram valores que contrariam o normalmente encontrado com outros materiais. A geometria utilizada foi aquela recomendada por norma ASTM. Outras geometrias deveriam ser ensaiadas confirmando-se ou não os resultados.

9.7. Determinar o módulo de deformação e coeficiente de Poisson para o tijolo de cinza volante e cal, a argamassa de assentamento e o tijolo cerâmico, e comparar estes resultados entre si, verificando a influência da deformação característica dos materiais sobre os resultados de resistência apresentados pelos prismas em relação às unidades. De uma vez que os prismas de cinza volante e cal apresentaram as maiores resistências, torna-se importante conhecer o comportamento de paredes. Contudo, um maior número de ensaios com prismas seria indicado inicialmente, buscando obter um maior conhecimento do assunto, já que os ensaios de paredes em escala real são caros e de difícil execução.

9.8. No estudo de aderência seria conveniente testar-se prismas de diversas alturas pois alguns autores afirmam que esta variável afeta os resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGOPYAN, V. A cal na engenharia civil. In: REUNIAO ABERTA DA INDUSTRIA DA CAL, 5,1985, São Paulo. O USO DA CAL NA ENGENHARIA CIVIL. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1985. p.27-36.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Method measurement masonry flexural bond strenght: C1072. Philadelphia, Pa., 1986.
3. _____. Standard methods of sampling and testing brick and structural clay tile: C67. Philadelphia, Pa., 1983.
4. _____. Standard specification for aggregate for masonry mortar: C144. Philadelphia, Pa., 1984. 2p.
5. _____. Standard specification for blended hydraulic cements: C595. Philadelphia, Pa., 1986.
6. _____. Standard specification for building brick (solid masonry units made from clay or shale): C62. Philadelphia, Pa., 1987. 4p.
7. _____. Standard specification for fly ash and other pozzolans for use with lime: C593. Philadelphia, Pa., 1985. 6p.
8. _____. Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete: C618. Philadelphia, Pa., 1985. 4p.

9. _____. Standard specification for lime for use with pozzolans: C821. Philadelphia, Pa., 1978(84). 2p.
10. _____. Standard test methods for compressive strenght of masonry prisms: E447. Philadelphia. Pa., 1984. 5p.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Dosagem das misturas de solo-cimento; normas de dosagem e métodos de ensaio. 3.ed.rev. São Paulo, 1986. 57p. (ET. 35)
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassas e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1983. 2p.
13. _____. Cal hidratada para argamassas. Determinação da finura - Método de ensaio: NBR 9289. São Paulo, 1985. 2p.
14. _____. Cal hidratada para argamassas - Especificação: NBR 7175. São Paulo, 1986. 4p.
15. _____. Cimentos. Método de determinação da atividade pozolânica em pozolanas: NBR 5751. Rio de Janeiro, 1977. 1p.
16. _____. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da área específica: NBR 7224. São Paulo, 1984. 10p.
17. _____. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica: NBR 6474. São Paulo, 1984. 4p.
18. _____. Ensaio de cimento portland: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1985.

19. _____. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1980.
20. _____. Ensaio normal de compactação de solos: NBR 7182. Rio de Janeiro, 1986.
21. _____. Solo - Análise granulométrica - método de ensaio: NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
22. _____. Tijolo maciço cerâmico para alvenaria: NBR 7170. Rio de Janeiro, 1983. 6p.
23. _____. Tijolo maciço cerâmico para alvenaria e verificação de resistência à compressão; método de ensaio: NBR 6460. Rio de Janeiro, 1983. 3p.
24. _____. Tijolo maciço de solo-cimento; especificação: NBR 8491. Rio de Janeiro, 1984. 4p.
25. BARADAN, B. Fly ash-cement based structural materials. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v.9, n.4, p.225-228, Nov.1987.
26. BAREMBERG, E.J. Lime-fly ash-aggregate mixtures. In: SYMPOSIUM ON FLY ASH UTILIZATION, 1967, Pittsburg. Proceedings... Washington: Department of the Interior, Bureau of Mines, 1967. p 111-134.
27. BERETKA, J., BROWN, T. The utilization of fly ash in building. Journal of the Australian Ceramic Society, v.13, n.2, p.24-30, Nov.1977.
28. BRITISH STANDARD INSTITUTION. Sands for mortar for plain and reinforced brickwork, block walling and masonry: BS 1200. London, 1976.

29. CAPP, J.P., SPENCER, J.D. Fly ash utilization; a summary of application and technology. Washington, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1970.
30. CASANOVA, F.J. Estabilização de Solos. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1988. Notas de aula.
31. DAY, R.L. et al. Engineering and microstructural studies of western - canadian fly ash bricks. Materials Research Society Symposium, v.65, p.47-57, 1986.
32. ELDRIDGE, H.J. Common Defects in buildings. London: Her Majesty's Stationery Office, 1976. 486p.
33. FUNDAÇÃO DE CIENCIA E TECNOLOGIA (CIENTEC). Projeto de pesquisa Cicasol: pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal. Relatório final. Porto Alegre, 1984. 295p.
34. GALLEGOS VARGAS, H. Curso de alvenaria estrutural. Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1988. 251p. (Caderno de Engenharia, 25)
35. GUIMARAES, J.E.P. Estabilização de solos, nova e importante aplicação da cal, seus conceitos e suas vantagens. São Paulo: Associação Brasileira de Produtores de Cal, 1971.
36. GUNTHER. A calcinação do calcáreo e a qualidade da cal resultante. Tradução do original em alemão, publicado no Toindustrie - Zeitung und Keramische Rundschau, v.77, n. 9/10, Mai 1953.
37. HENDRY, A.W. Structural brickwork. Hong Kong: Macmillan, 1981.

38. INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACION DE MATERIALES. Cal hidratada de origen natural, hidratada, en polvo, para construcción: IRAM 1508. Buenos Aires, 1963(72). 30p.
39. JAWOROSKY, H.C. Estudio experimental em alvenaria estrutural: resistência à compressão e resistência de aderência. Porto Alegre: CPGEC, 1990. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
40. KAZMIERCZAK, C. de S. Desempenho de alvenarias de materiais cerâmicos à penetração de água da chuva: uma análise de fatores condicionantes. Porto Alegre, CPGEC, 1989. 127p. Dissertação(Mestrado em Engenharia) Escola de Engenharia, UFRGS.
41. KIHARA, Y. O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1983. Tese de Doutorado.
42. MANZ, O.E. Utilization of by-products from Western coal combustion in the manufacture of mineral wool and other ceramic materials. Cement and Concrete Research, v.14, p.513-20, 1984.
43. MINNICK, L.J. Reactions of hydrated lime with pulverized coal fly ash. In: SYMPOSIUM ON FLY ASH UTILIZATION, 1967, Pittsburgh. Proceedings... Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1967. p. 287-315.
44. MOHAN, D., DE, P.L., RAI, M. New building materials. Housing Science, v.3, n.6, p.431-436, 1979.
45. MÜLLER, A.A.(Coord.) Perfil Analítico do carvão. 2.ed. Porto Alegre: DNPM, 1987. 140p.(Boletim,6).

46. NANNI, L.F. **Análise estatística de dados com uso de técnicas computacionais.** Porto Alegre: CPGECC/UFRGS, 1986. 177p. (Caderno Técnico, 30).
47. NARDI, J.V. **Introdução à estabilização de solos com cinza volante e cal.** Florianópolis: Divisão de Tecnologia do Departamento de Estradas de Rodagem, 1979.
48. PIAZZA, J.L. et al. **Estudo da utilização da cinza do carvão para produção de materiais construtivos.** Caxias do Sul: Instituto de Administração e Tecnologia, Fundação Universidade Caxias do Sul, 1980. Relatório final da primeira fase.
49. PRUDENCIO Jr., L.R. **Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre a resistência de unidades, prismas e paredes.** Porto Alegre: CPGECC, 1986. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
50. REIDELBACH Jr., J.A. **An industrial evaluation of fly ash bricks.** In: SYMPOSIUM ON FLY ASH UTILIZATION, 1970, Pittsburgh. **Proceedings...** Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1970. p. 193-200.
51. ROMAN, H.R. **Determinação das características físicas e análise estatística da capacidade resistente de tijolos cerâmicos maciços.** Porto Alegre: CPGECC, 1983. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
52. SHAFER Jr., H.E. et al. **Status report on bricks from fly ash.** In: SYMPOSIUM ON FLY ASH UTILIZATION, 1967, Pittsburgh. **Proceedings...** Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1967. p. 195-203.
53. SIEFFERT, P.L. **Test firing on fly ash brick on a short time cycle.** In: SYMPOSIUM ON FLY ASH UTILIZATION, 1970,

Pittsburgh. Proceedings... Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1970. p. 327-330.

54. SILVA, M.A.M. da. Efeito da estabilização de solos mediante a adição de cal e cinza volante, visando a sua utilização em construção civil e em pavimentação. Porto Alegre: CPGEC, 1982. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS.
55. SILVA, N.I.W. da, ZWONOCK, O., ROCHA, P.V. de H. Levantamento das cinzas geradas na queima do carvão mineral no estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVAO, 2, 1989, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: CECAR/UFRGS, 1989. v.1, p.661-80.
56. SLONAKER, J.F. A study of the effect of sodium hydroxide upon water soluble salts in fly ash brick. Morgantown: West Virginia University, 1976. (Report, 122).
57. _____. A study of effect of firing conditions upon fly ash structural products. Morgantown: West Virginia University, 1976. (Report, 128).
58. _____. A new method for increasing the durability of fly ash structural products. Morgantown: West Virginia University, 1977. (Report, 141).
59. _____. The role of fly ash brick manufacturing in energy conservation. Morgantown: West Virginia University, 1977. (Report, 149).
60. _____. Lightweight fly ash brick. Morgantown: West Virginia University, 1978. (Report, 153).
61. _____. An overview of the West Virginia University Department of energy fly ash brick process. Morgantown: West Virginia University, 1978. (report, 163).

62. SNYDER, J. Fly ash: specifications, limitations, and restrictions. In: SYMPOSIUM ON FLY ASH UTILIZATION, 1967, Pittsburgh. Proceedings... Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1967. p. 37-45.
63. SUTHERLAND, R.M.J. Brick and block masonry in engineering. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, pt.1, v.70, p.31-63, Feb.1981.
64. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Lime-fly ash - stabilized bases and subbases. Washington, 1976. Cap.2: Materials, p. 4-9.
65. WEST, H.W.H., HODGKINSON, H.R., BEECH, D.G. et al. The compressive strength of calcium silicate brick walls under axial loading. In: MEETING OF THE BUILDING MATERIAL SECTION OF THE BRITISH CERAMIC SOCIETY, 1977, London. Load-bearing brickwork. London: British Ceramic Society, 1978. p. 19-46.
66. WOLF, J., DAL MOLIN, D. Carbonatação de argamassas e concretos - fatores intervenientes. In: SIMPOSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES - PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO, 1989, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p. 118-133.