UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Arquitetura e Urbanismo

**FABRICAÇÃO DE TIJOLOS MODULARES DE SOLO-CIMENTO POR
PRENSAGEM MANUAL COM E SEM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

Fernando Mazzeo Grande

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Arquitetura.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi Liborio

São Carlos
2003

Dedico este trabalho a minha esposa Érica, fonte maior da minha inspiração e minha companheira. Obrigado pelo estímulo e dedicação para que este sonho se realizasse.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus.

Ao Prof. Dr. Jefferson Liborio, por todos os seus atos como orientador e amigo, procurando sempre ser fonte de motivação e incentivo à dedicação ao trabalho.

À empresa SAHARA, em especial ao Sr. Francisco Aguilar, por ceder os equipamentos necessários à fabricação do tijolo modular, sem os quais não seria possível a realização desta pesquisa.

A todos os professores, funcionários e técnicos do Departamento de Arquitetura, SAP, LCC, SET, Laboratório de Engenharia de Estruturas, Laboratório do Departamento de Geotecnia, Laboratório de Engenharia de Transportes que sempre estiveram à disposição e muitas vezes ultrapassaram suas obrigações para me ajudar.

À Prof.^a Rosana Maria Caram de Assis pela atenção e dedicação em resolver meus problemas.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos e que possibilitou minha total dedicação a esse trabalho.

A todos os colegas do LMABC, LCC, SET e Laboratório de Geotecnia, por toda a amizade, respeito e colaboração que marcaram para sempre em minha vida esse período com boas lembranças e eterna gratidão.

Em especial aos colegas George Oda, que sempre esteve disponível para esclarecer minhas dúvidas e pensar os tijolos e Fábio Fonseca, grande companheiro e que esteve por perto nos momentos de apuro.

A toda minha família que sempre vibrou com as minhas conquistas. É realmente uma Grande família.

À minha irmã Márcia, que me acompanhou de perto nesses anos, obrigado pelo incentivo, pelos conselhos e pelo exemplo que você sempre foi para mim.

Finalmente aos meus pais, Maria e Fábio, responsáveis por tudo que sou, exemplos maiores de dedicação ao trabalho e que nunca pouparam esforços para possibilitar a realização dos meus estudos.

Muito obrigado a todos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUÇÃO	1
1. SOLOS	4
1.1. ORIGEM DO SOLO	4
1.2. PROPRIEDADES DOS SOLOS	7
1.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS SOLOS	8
1.4. A ESTRUTURA DO SOLO	11
1.5. COMPACTAÇÃO DO SOLO	12
2. CIMENTO PORTLAND	13
2.1. ADIÇÕES MINERAIS EM COMPOSTOS À BASE DE CIMENTO PORTLAND ...	18
2.2. SÍLICA ATIVA	19
3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	25
4. SOLO-CIMENTO	27
4.1. FATORES QUE CONDICIONAM A QUALIDADE DA MISTURA DO SOLO-CIMENTO	28
4.2. REAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO-CIMENTO E SUAS IMPLICAÇÕES NA QUALIDADE DO MATERIAL	31
4.3. MÉTODOS DE DOSAGEM DA MISTURA DE SOLO-CIMENTO	33
5. O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	36
5.1. HISTÓRICO	36
5.2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS	38
5.3. TIJOLO DE SOLO-CIMENTO	39
6. MATERIAIS E MÉTODOS	44
6.1. SOLO	44

6.2. CIMENTO PORTLAND	47
6.3. SÍLICA ATIVA	48
6.4. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS	48
6.5. ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS	49
6.5.1. Ensaios Preliminares	49
6.5.2. Ensaios Definitivos	49
6.6. PRODUÇÃO DE TIJOLOS PRENSADOS	51
6.7. ENSAIOS EM TIJOLOS	52
6.8. EXECUÇÃO E ENSAIO DE PAINEL DE PAREDE	54
7. EXPERIMENTAÇÃO	55
7.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - ENSAIOS PRELIMINARES EM CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS	55
7.1.1. Misturas de Solo-Cimento (MSC)	55
7.1.2. Misturas de Solo-Cimento-Sílica (MSCSi)	56
7.2. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	57
7.3. PRODUÇÃO EXPERIMENTAL DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO E SOLO-CIMENTO-SÍLICA	58
7.3.1. Resultados de ensaios nos lotes L1 e L2	60
7.4. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE NA MISTURA COMPACTADA	67
7.5. PRODUÇÃO DE TIJOLOS PARA A EXECUÇÃO DE PAINÉIS DE ALVENARIA	70
7.5.1. Resultados de ensaios no lote L3	72
7.6. EXECUÇÃO DE PAINÉIS DE ALVENARIA	74
7.6.1. Resultados de ensaios nos painéis, tijolos, prismas e argamassa de assentamento	81
7.7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	90
7.7.1. Ensaios em corpos-de-prova cilíndricos de MSC e MSCSi	90
7.7.2. Os tijolos produzidos	91
7.7.3. A adição de sílica ativa e a utilização de outros materiais na tecnologia do solo-cimento	93
7.7.4. Resultados de ensaios em paredes e prismas	94
8. CONCLUSÃO	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXO A - Guia para classificação do solo e produção de tijolos de solo-cimento	

modular	116
ANEXO B - Detalhes construtivos de edificações realizadas com o sistema	
construtivo modular	133
ANEXO C - Gráficos tensão-deformação das paredes	144
ANEXO D - Resultados de ensaios em corpos-de-prova cilíndricos, tijolos, prismas e argamassa de assentamento.....	148

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Estrutura do solo	04
FIGURA 2.1 - Microscopia de pasta de cimento Portland, relação $a/c=0,5$	20
FIGURA 2.2 - Microestrutura da zona de interface entre matriz de cimento e agregado....	21
FIGURA 2.3 - Microestrutura da zona de interface entre matriz de cimento e agregado com adição de sílica.	21
FIGURA 2.4 - Comparação da difusão de cloretos em pastas de cimento Portland.....	22
FIGURA 2.5 - Resistividade em função do teor de sílica ativa.	22
FIGURA 2.6 - Idealização do funcionamento de um agregado sob carregamento ocasionado por uma deficiência da zona de interface e melhoria dessa região pela adição de sílica ativa.	23
FIGURA 2.7 - Reação entre a sílica oriunda da fabricação de ligas Fe-Si ou silício metálico e Ca(OH)_2 em misturas de igual proporção de materiais.....	24
FIGURA 2.8 - Reação entre a sílica oriunda da fabricação de ligas Fe-Si ou silício metálico e Ca(OH)_2 em misturas na proporção 1:2.....	24
FIGURA 6.1 - Curva granulométrica do solo. Resultado do ensaio de análise granulométrica conjunta – NBR 6502/95.....	46
FIGURA 6.2 - Prensa manual SAHARA para fabricação de tijolos de solo-cimento	51
FIGURA 6.3 - Triturador JAG-5000	52
FIGURA 7.1 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento	61
FIGURA 7.2 - Evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento-sílica	62
FIGURA 7.3 - Comparação da evolução da resistência à compressão entre os tijolos L1A e L2A	62
FIGURA 7.4 - Comparação da evolução da resistência à compressão entre os tijolos L1B e L2B.....	63
FIGURA 7.5 - Comparação da evolução da resistência à compressão entre os tijolos L1C e L2C.....	63
FIGURA 7.6 - Betoneira de eixo vertical utilizada para a homogeneização da mistura.....	70
FIGURA 7.7 - Início da fabricação. Abertura do compartimento de moldagem.....	70

FIGURA 7.8 - Molde preenchido com a mistura. Nota-se que o mecanismo de abastecimento permite rasar o molde	71
FIGURA 7.9 - Vista da máquina no momento do preenchimento do molde	71
FIGURA 7.10 - Prensagem. Início do curso da alavanca	71
FIGURA 7.11 - Prensagem. Início do curso da alavanca	71
FIGURA 7.12 - Fim do curso da alavanca. Ponto de máxima compactação da mistura	71
FIGURA 7.13 - Retorno da alavanca, abertura do molde e retirada do tijolo	72
FIGURA 7.14 - Manuseio e desmoldagem do tijolo produzido	72
FIGURA 7.15 - Vista geral da produção e estocagem dos tijolos	72
FIGURA 7.16 - Vista geral da produção e estocagem dos tijolos	72
FIGURA 7.17 - Início da execução dos painéis. Nota-se que a primeira fiada foi assentada sobre argamassa de cimento e areia para regularização da superfície	75
FIGURA 7.18 - Método de adição do PVA diluído na água de amassamento	75
FIGURA 7.19 - Detalhe da aplicação da argamassa com a utilização de bisnaga	75
FIGURA 7.20 - Detalhe do filete de argamassa na superfície do tijolo	75
FIGURA 7.21 - Assentamento	76
FIGURA 7.22 - Detalhe da espessura da junta de argamassa e friso dos tijolos	76
FIGURA 7.23 - Execução de prismas compostos por dois tijolos	76
FIGURA 7.24 - Prismas compostos por três tijolos	76
FIGURA 7.25 - Vista geral dos corpos-de-prova de prismas e argamassa	76
FIGURA 7.26 - Execução dos painéis	76
FIGURA 7.27 - Visão da prumada	77
FIGURA 7.28 - Etapa final da execução dos painéis	77
FIGURA 7.29 - Elevação do painel terminado	77
FIGURA 7.30 - Esquema da instrumentação das paredes	78
FIGURA 7.31 - Vista geral das paredes e do pórtico de reação	79
FIGURA 7.32 - Detalhe da viga de distribuição, macacos e viga de reação	79
FIGURA 7.33 - Detalhes: viga de distribuição, macacos e da célula de carga	79
FIGURA 7.34 - Detalhe do capeamento e da fixação da cantoneira no topo do painel	79
FIGURA 7.35 - Transdutor da base	80
FIGURA 7.36 - Transdutor do topo	80
FIGURA 7.37 - Transdutores (relógios comparadores) da face da parede	80
FIGURA 7.38 - Detalhe da ruptura do topo da parede 1	82
FIGURA 7.39 - Detalhe da ruptura e da propagação de fissuras do topo da parede 1	82

FIGURA 7.40 - Gráfico tensão/deformação com base na média das leituras dos transdutores (1, 2, 3 e 4) e (5 e 6) da parede 1	83
FIGURA 7.41 - Gráfico tensão/deformação com base na leitura do transdutor 7 da parede 1	83
FIGURA 7.42 - Ruptura e configuração das fissuras na face da parede 2	84
FIGURA 7.43 - Ruptura e configuração das fissuras na contraface da parede 2	84
FIGURA 7.44 - Gráfico tensão/deformação com base na média das leituras dos transdutores (1, 2, 3 e 4) e (5 e 6) da parede 2	84
FIGURA 7.45 - Gráfico tensão/deformação com base na leitura do transdutor 7 da parede 2	85
FIGURA 7.46 - Ruptura e configuração das fissuras na face da parede 3	85
FIGURA 7.47 - Ruptura e configuração das fissuras na contraface da parede 3	85
FIGURA 7.48 - Gráfico tensão/deformação com base na média das leituras dos transdutores (1, 2, 3 e 4) e (5 e 6) da parede 3	86
FIGURA 7.49 - Gráfico tensão/deformação com base na leitura do transdutor 7 da parede 3	86
FIGURA 7.50 - Ruptura de prisma assentado com argamassa. Nota-se a formação do tronco de cone e propagação vertical da fissura.....	89
FIGURA 7.51 - Ruptura de prisma assentado a seco. Observou-se o destacamento das faces do tijolo central do prisma	89
FIGURA 7.52 - Ensaio de prisma assentado a seco. Nota-se o destacamento da face do tijolo	89
FIGURA 7.53 - Ruptura de prisma assentado a seco.....	89
FIGURA 7.54 - Representação de fissuras típicas da alvenaria causada por sobrecarga vertical uniformemente distribuída	95

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - Composição e propriedades mecânicas da caulinita, montmorillonita e quartzo.....	10
TABELA 1.2 - Características dos argilo-minerais	11
TABELA 2.1 - Faixas aproximadas da proporção dos principais componentes de uma amostra de cimento.....	14
TABELA 2.2 - Tipo e composição de cimento Portland	17
TABELA 2.3 - Produção nacional de cimento.....	17
TABELA 5.1 - Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado.....	41
TABELA 5.2 - Critérios para a seleção de solos.....	42
TABELA 5.3 - Limites especificados para controle de qualidade de tijolos de solo-cimento	43
TABELA 6.1 - Critérios de seleção de solos para a fabricação de componentes de alvenaria	44
TABELA 6.2 - Resultados dos ensaios de caracterização do solo.....	46
TABELA 6.3 - Caracterização dos cimentos Portland utilizados.	47
TABELA 6.4 - Caracterização da sílica ativa	48
TABELA 6.5 - Programação de ensaios indicando a quantidade de tijolos para cada ensaio em determinadas idades	53
TABELA 7.1 - Resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento (MSC) aos 7 dias de idade.....	56
TABELA 7.2 - Resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento-sílica (MSCSi) aos 7 dias de idade.....	56
TABELA 7.3 - Determinação de umidade ótima de compactação e densidade máxima aparente para MSC	57
TABELA 7.4 - Determinação de umidade ótima de compactação e densidade máxima aparente para MSCSi.....	57
TABELA 7.5 - Denominação de lotes para MSC	59
TABELA 7.6 - Denominação de lote para MSCSi	59
TABELA 7.7 - Evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento (L1)	60

TABELA 7.8 - Coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão	60
TABELA 7.9 - Evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento-sílica ...	61
TABELA 7.10 - Coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão	61
TABELA 7.11 - Evolução da absorção de água em tijolos de solo-cimento	65
TABELA 7.12 - Evolução da absorção de água em tijolos de solo-cimento-sílica	65
TABELA 7.13 - Comparação entre a evolução de resistência mecânica e a absorção de água em tijolos de solo-cimento e solo-cimento-sílica.....	65
TABELA 7.14 - Ensaio de durabilidade em tijolos de solo-cimento	66
TABELA 7.15 - Ensaio de durabilidade em tijolos de solo-cimento-sílica	66
TABELA 7.16 - Ensaio de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento. Comparação entre umidade ótima e umidade de operação.....	68
TABELA 7.17 - Ensaio de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento-sílica. Comparação entre umidade ótima e umidade de operação.....	69
TABELA 7.18 - Absorção de água em misturas MSC e MSCSi na umidade ótima de compactação e na umidade de 5% e a diferença percentual entre tais determinações	69
TABELA 7.19 - Programação de ensaios dos tijolos produzidos para a execução de painéis de parede, indicando a quantidade de tijolos para cada ensaio em diversas idades	72
TABELA 7.20 - Resultados de ensaios em L3 (MSC 1:7)	73
TABELA 7.21 - Comparação de resultados de ensaios em L1B e L3 (MSC 1:7)	73
TABELA 7.22 - Resultados do ensaio de compressão simples em paredes	81
TABELA 7.23 - Resultados de ensaio de resistência à compressão de prismas e argamassa de assentamento.	87
TABELA 7.24 - Coeficiente de variação (C.V.) dos resultados de ensaio de resistência à compressão de prismas e argamassa de assentamento	88
TABELA 7.25 - Comparação dos valores de resistência à compressão das paredes e dos prismas em relação à resistência dos tijolos.....	89
TABELA 7.26 - Resistência à compressão de tijolos dos lotes L1 e L2 em idades avançadas (próximas de 1 ano).....	92
TABELA 7.27 - Progressão da resistência à compressão e condição de utilização do tijolo após a moldagem em função da idade e do tipo de cimento.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl.	- Relação água/aglomerante (kg/kg)
a/c.	- Relação água/cimento (kg/kg)
a/mist.	- Relação água/mistura (kg/kg)
ABCI	- Associação Brasileira de Construção Industrializada
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
C.T.C.	- Capacidade de Troca de Cátion (ou Catiônica)
C.V.	- Coeficiente de Variação
C ₂ S	- Silicato dicálcico ou belita
C ₃ A	- Aluminato tricálcico
C ₃ S	- Silicato tricálcico ou alita
C ₄ AF	- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita
CBR	- California Bearing Ratio
CEPED	- Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia
CH	- Hidróxido de Cálcio
C-S-H	- Silicato de Cálcio Hidratado
D.P.	- Desvio Padrão
IP	- Índice de Plasticidade
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Estado de São Paulo
LL	- Limite de Liquidez
LP	- Limite de Plasticidade
MSC	- Mistura de Solo-Cimento
MSCSi	- Mistura de Solo-Cimento-Sílica
SA	- Sílica Ativa
SF	- Sílica ativa de Ferro-Silício

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	- Densidade máxima da mistura compactada
δ	- Encurtamento
#	- Malha de peneira
μm	- micrômetro
E	- Módulo de elasticidade
f_{am}	- Resistência à compressão (MPa) da argamassa de assentamento – valores médios
f_{b7}	- Resistência à compressão (MPa) de tijolos – valores médios (o índice numérico indica a idade dos tijolos em dias)
f_{pa}	- Resistência à compressão (MPa) de paredes
f_{pm}	- Resistência à compressão (MPa) de prismas – valores médios
f_{sc7}	- Resistência à compressão (MPa) de corpos-de-prova cilíndricos de misturas – valores médios (o índice numérico indica a idade do corpo-de-prova em dias)
h	- Teor de umidade
NP	- Não Plástico

RESUMO

GRANDE, F. M. (2003). *Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa*. São Carlos, 2003. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Neste trabalho, por meio de uma metodologia experimental foram analisados vários aspectos de tijolos modulares compostos por misturas binárias e ternárias de solo-cimento e solo-cimento-sílica produzidos em prensa manual modelo SAHARA, com a finalidade de se obter parâmetros e diretrizes que visam um melhor desempenho do material. Realizaram-se ensaios em corpos-de-prova cilíndricos de maneira acessória no decorrer do trabalho, o que resultou no suporte para fundamentação de diversas avaliações sobre as composições de traços utilizados na fabricação dos tijolos. Foram executados painéis de parede com o objetivo de verificar o comportamento da alvenaria em relação à resistência à compressão e à deformabilidade das paredes, possibilitando correlações com os resultados dos ensaios de prismas, tijolos e argamassa de assentamento. As contribuições da pesquisa permitem relacionar a tecnologia da fabricação de tijolos de solo-cimento com o contexto de construção sustentável e o aproveitamento de resíduos industriais, além de sistematizar informações para a elaboração de um projeto tecnológico com os tijolos modulares.

Palavras-chave: solo-cimento; sílica ativa; tijolos modulares; alvenaria.

ABSTRACT

GRANDE, F. M. (2003). *Production of soil-cement modular bricks by manual pressing with and without silica fume addition*. São Carlos, 2003. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In this work, several aspects of modular bricks composed by binary and ternary mixtures of soil-cement and soil-cement-silica, produced by manual press model SAHARA, were analyzed by means of an experimental methodology, with the purpose of obtaining parameters and guidelines to aim a better performance of the material. During the work, tests in cylindrical samples were executed in an accessory way, what resulted in the support for theoretical basement of several evaluations about the compositions of proportions used in brick's production. Wall panels were constructed with the objective of verifying the masonry's behavior in relation to the compressive strength and wall's strain, promoting correlation with the test's results in prisms, bricks and mortar. The research's contributions allow to relate the technology of the production of soil-cement bricks with the context of sustainable construction and the use of industrial residues in the production of construction materials, besides systematizing information for the elaboration of a technological project with the modular bricks.

Keywords: soil-cement; silica fume; modular bricks; masonry.

INTRODUÇÃO

O tema dessa pesquisa trata da fabricação e análise de tijolos produzidos por misturas binárias e ternárias de solo-cimento e solo-cimento-sílica com a finalidade de se obter um material de elevado desempenho, ou seja, com melhores propriedades de resistência mecânica e maior durabilidade, avaliado por parâmetros como permeabilidade, absorção de água, perda de massa por ciclos de imersão e secagem, resistência à compressão (de tijolos, prismas etc.) e que parte de elementos constituídos com o emprego de técnicas viáveis e já existentes no mercado, com vistas à transferência de tecnologia.

Além da questão do material, encontra-se, num contexto mais amplo, o setor da construção civil como um fator que justifica a pesquisa. A busca de novas soluções construtivas, o emprego viável de novas ferramentas, a reciclagem de resíduos, o déficit habitacional, o desenvolvimento sustentável e a eliminação do desperdício no canteiro de obras através da racionalização de materiais e mão-de-obra são desafios a serem encarados por pesquisadores, engenheiros, arquitetos e a própria sociedade.

Esse contexto faz com que novos materiais, ou ainda, materiais de elevado desempenho, e sistemas construtivos mais eficientes sejam os principais objetivos na tentativa de estabelecer uma relação saudável entre baixo custo e qualidade de nossas obras sem desprezar a cultura, a realidade de consumo e os limites da mão-de-obra.

O solo é um material apropriado para as mais diversas aplicações em construções devido à sua abundância, facilidade de obtenção e de manuseio e baixo custo, permitindo um amplo emprego em soluções arquitetônicas relatadas ao longo de nossa história.

A prova da eficiência desses materiais é que existem construções feitas com materiais derivados do solo (desde às fundações até as estruturas em paredes portantes) que datam de vários séculos e estão resistindo às intempéries, preservando a estabilidade estrutural.

Concomitantemente, o uso da alvenaria como sistema construtivo tem forte expressividade cultural, sendo que o tijolo pode ser considerado o componente pré-moldado mais antigo e também o mais empregado pelo homem na construção civil.

A evolução dos blocos de barro secos ao sol (adobe), considerada até os componentes obtidos a partir da queima de argilas fazendo surgir tijolos e blocos cerâmicos com diversas tipologias, permite afirmar que as alvenarias derivadas do solo têm forte presença na cultura construtiva.

Desse modo, o uso dos tijolos de solo-cimento produzidos por meio de prensas manuais, com aplicações de técnicas simples e soluções viáveis, está em conformidade com os objetivos acima mencionados, porque permite o desenvolvimento de componentes de sistemas construtivos com as seguintes vantagens:

- controle de perdas (a alvenaria modular minimiza o desperdício);
- disponibilidade de abastecimento;
- baixo custo em comparação às alvenarias convencionais;
- durabilidade e segurança estrutural;
- funcionalidade de seus equipamentos, permitindo uma operação direta no canteiro de obras, independentemente de sua localidade;
- eficiência construtiva devido ao sistema modular, pelo qual os tijolos são somente encaixados ou assentados com pouca quantidade de argamassa. Além disso, os tijolos podem ser produzidos com furos internos que permitem a passagem de tubulações sem a necessidade de cortes ou quebras;
- facilidade de manuseio devido aos encaixes que agilizam a execução da alvenaria;
- baixa agressividade ao meio ambiente, pois dispensa a queima;
- economia de transporte quando produzido no próprio local da obra.

Apesar dos pontos positivos destacados, no Brasil, o interesse pelo solo-cimento na construção de habitações (como componente de alvenaria) foi desaparecendo na proporção que outros materiais, na maioria dos casos mais industrializados, surgiam no mercado. Assim sendo, sua utilização é mais expressiva em obras de pavimentação (cerca de 90% das bases de nossas rodovias são de solo-cimento compactado), reforços e melhorias de solos e, finalmente, em barragens e contenções.

Portanto, estudar e compreender essa tecnologia, com os resultados voltados a apresentar alternativas na composição e fabricação do material poderá apontar tendências e mudanças no cenário da construção civil brasileira rumo à adoção de técnicas de construção sustentáveis.

OBJETIVOS

Tendo como base todos os fatores acima expostos, os objetivos da pesquisa foram traçados em linhas gerais e específicas, conforme apresentam-se a seguir:

OBJETIVOS GERAIS

- Estudar as características dos materiais tijolo de solo-cimento e de solo-cimento-sílica produzidos em prensa manual modelo SAHARA, submetendo-os a avaliações de desempenho na execução de alvenarias.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar, por meio de uma estratégia metodológica experimental, os materiais a serem empregados na confecção de tijolos pré-fabricados em solo-cimento e solo-cimento-sílica e suas respectivas proporções;
- Avaliar o comportamento mecânico de misturas binárias e ternárias de solo-cimento e solo-cimento-sílica ativa, em corpos-de-prova cilíndricos de maneira acessória;
- Produzir tijolos de solo-cimento e solo-cimento-sílica ativa;
- Avaliar as características mecânicas dos tijolos produzidos;
- Submeter os tijolos produzidos a ensaios de durabilidade e absorção de água;
- Testar o desempenho mecânico dos tijolos em alvenarias estruturais (painéis de parede) através de ensaios de compressão simples;
- Relacionar a tecnologia da fabricação de tijolos de solo-cimento com o contexto de construção sustentável e aproveitamento de resíduos industriais;
- Sistematizar informações para a elaboração de um projeto tecnológico com os tijolos modulares.

1. SOLOS

Segundo PINTO¹ (1998), os solos podem ser definidos por um conjunto de partículas sólidas provenientes da desagregação de rochas por ações físicas e químicas, com água (ou outro líquido) e ar, ou ainda ambos, em seus espaços intermediários. Configura-se assim, de acordo com BLÜCHER (1951), uma estrutura porosa, sendo que as partículas, de maneira geral, se encontram livres para se deslocarem. O comportamento dos solos depende dessa movimentação das partículas sólidas entre si, o que altera as porcentagens em volume das suas fases constituintes (sólidos, ar e água) e isto faz com que o solo se afaste dos sólidos idealizados na Mecânica dos Sólidos Deformáveis, na qual se fundamenta a Mecânica das Estruturas considerada na Engenharia Civil.

A figura 1.1 ilustra a estrutura do solo:

FIGURA 1.1 – Estrutura do solo.

1.1. ORIGEM DO SOLO

Explicou-se, anteriormente, que o solo é formado pela desagregação de rochas. Rochas são agregados de minerais e, conforme acrescentam AZAMBUJA (1979). TERZAGHI & PECK (1961), esse agregado de minerais está ligado por intensas forças

¹ Autor e data constituem a referência avaliada e relacionada nas Referências Bibliográficas.

coesivas e permanentes. Por sua vez, mineral é todo elemento químico que atende às seguintes características:

- é constituinte da crosta terrestre;
- seu processo de formação é natural e inorgânico;
- sua composição química e suas propriedades físicas são bem definidas ou dentro de limites definidos;
- sua estrutura atômica ou molecular é organizada;
- apresenta formação externa poliédrica, em condições especiais de formação.

Os minerais constituintes das rochas podem ser essenciais, que predominam e definem a rocha ou, acessórios, que ocorrem em menor porcentagem.

As rochas são classificadas em três grupos quanto a sua formação:

- rochas ígneas ou magmáticas;
- rochas sedimentares;
- rochas metamórficas.

A formação dos solos, conforme CYTRYN (1957) é causada por fatores como agentes atmosféricos, água, variações de temperatura e decomposições químicas, que continuamente atacam a superfície terrestre. Esses agentes transformam as rochas em solo. AZAMBUJA (1979) denomina intemperismo todo o conjunto de processos de desagregação de rochas, mesmo assim, há subdivisões nesse conceito que permitem aprofundar o conhecimento sobre a origem dos solos. Dessa maneira, o intemperismo físico pode ser entendido como aquele que não altera a constituição química dos minerais da rocha de origem, enquanto que o intemperismo químico é aquele que ocorre por substâncias orgânicas e/ou inorgânicas dissolvidas na água proveniente das precipitações e infiltrações, sendo que os radicais mais comuns dessas soluções são: 1) entre os ácidos: os cloretos, os sulfatos e os carbonatos e 2) entre os básicos: os íons alcalinos e alcalino-terrosos.

Ainda quanto à questão do intemperismo, ressalta-se que, em regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil, o intemperismo químico predomina em relação ao intemperismo físico, visto que há nessas regiões grande ocorrência de precipitação, fato que contribui para a realização da decomposição química. Esse fenômeno é relatado por NOGAMI & VILLIBOR² apud PARENTE (2002) que enfatiza as características peculiares dos solos tropicais.

² NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1983). *Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos e a pavimentação*. In: 18º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Porto Alegre.

Segundo TERZAGHI & PECK (1961) se os produtos da rocha alterada permanecem no local onde se deu a desagregação, eles constituem o solo residual, se não, constituem o solo transportado, independentemente do agente que realizou esse transporte.

TORRENTE & SAGÜÉS (1968) e AZAMBUJA (1979) afirmam que o perfil completo do intemperismo constitui camadas ou perfis na crosta terrestre denominadas HORIZONTES A, B e C, mas HOUBEN e GUILLAUD³ apud SILVA (2001) descrevem esse corte da seguinte forma:

- O HORIZONTE A (solo superficial) é subdividido em:
 - A0 – caracteriza-se por ser uma camada orgânica;
 - A1 – uma mistura de materiais orgânicos (em concentrações inferiores a 30%) e minerais;
 - A2 – camada resultante da eluviação, pobre em materiais orgânicos, apresentando argila e óxido de ferro geralmente separados;
 - A3 – resultante da eluviação e iluviação, onde se começa a concentração de colóides;
- O HORIZONTE B (subsolo) é subdividido em:
 - B1 – camada ferrosa que contém materiais orgânicos e óxidos de ferro e de alumínio;
 - B2 – camada com acúmulo de argila e óxidos ferrosos;
 - B3 – faixa de transição com o horizonte C
- O HORIZONTE C é o material de origem residual;
- Finalmente, o HORIZONTE chamado R, de “rock”, é a rocha-mãe propriamente dita.

O conhecimento do perfil do solo e de sua subdivisão em horizontes permite algumas observações relevantes no uso prático do solo-cimento, quanto ao emprego dos solos provenientes desses perfis.

O HORIZONTE A, conforme AZAMBUJA (1979), possui, em geral, pequena espessura, algo em torno de 20cm e 30cm e sua cor é cinza-escura. Pode ocorrer, no perfil de intemperismo de arenito, camadas de espessuras de até 2m. Nesse horizonte podem existir celulose e húmus. A celulose é inerte, porém o húmus é um ácido orgânico que tem grande afinidade química com a cal livre (CaO) liberada na hidratação do cimento e, mesmo em baixas concentrações, pode afetar a resistência do material. Em alguns casos, quando não há mais alternativas, é recomendável adicionar cal nos solos do HORIZONTE A antes da

³ HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. (1994) *Earth construction: a comprehensive guide*. IT publications, p.362

adição do cimento, porém esse procedimento envolve outras variáveis como o teor de cal necessário e o custo dessa operação.

Os solos do HORIZONTE B são, em geral, argilosos com predominância da caulinita, uma vez que esse horizonte se forma em ambientes de boa drenagem. São solos de difícil pulverização (destorroamento) e isso é um grande problema na homogeneização da mistura do solo-cimento.

No HORIZONTE C os solos são arenosos e de fácil pulverização, o que indica preferência em emprego em solo-cimento. Mesmo assim, devido à sua composição mineralógica de origem, que pode conter partículas friáveis, há a necessidade de um estudo de dosagem antes da utilização.

1.2. PROPRIEDADES DOS SOLOS

Conforme CYTRYN (1957), o solo é insolúvel em água, ou seja, quando imerso forma uma suspensão. As partículas sólidas, porém, apresentam diferentes diâmetros, fato que acarreta comportamento heterogêneo na velocidade de sedimentação desses sólidos na suspensão. A relação entre diâmetro da partícula e velocidade de sedimentação foi estudada por Stokes em 1845 e estudos posteriores comprovaram que a sua Lei era aplicável apenas para partículas com diâmetro abaixo de 0,2 mm.

TERZAGHI & PECK (1961) mencionam que “...a superfície de cada partícula possui cargas, em geral, eletricamente negativas e, assim, se a água é pura, duas partículas não ficam em contato porque têm cargas iguais que se repelem mutuamente. Diz-se que a amostra está no estado de *dispersão completa*. Com o tempo, as partículas maiores sedimentam e formam um depósito em que as forças de repulsão e gravidade estão em equilíbrio. As partículas mais finas permanecem em suspensão. Se uma gota da suspensão é examinada ao microscópio, vê-se que as partículas se locomovem com um movimento desordenado chamado *movimento Browniano*. Cada partícula segue um caminho em ziguezague mas não colide com as demais.”(TERZAGHI & PECK, 1961, p. 16).

Essa percepção foi fundamental para todos os relatos subseqüentes que trataram da classificação dos solos e do entendimento do comportamento macroscópico pela análise microscópica das propriedades das frações finas do solo. Obviamente, muitas dessas propriedades são fundamentais para se entender o fenômeno da estabilização do solo com cimento Portland.

O solo pode ser subdividido em frações de acordo com o tamanho e a forma de seus constituintes. Vários órgãos e diversos pesquisadores, pode-se citar *BUREAU OF*

CHEMISTRY OF SOILS – U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, U.S. BUREAU OF PUBLIC ROADS e *MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY*, expostos por CYTRYN (1957) e por TERZAGHI & PECK (1961), estabeleceram limites máximos e mínimos para o tamanho das partículas constituintes do solo.

De modo geral, todas as classificações de solo realizadas através de análise granulométrica, adotam a peneira de abertura 0,074mm como sendo o limite entre areia e siltes, porém, qualquer sistema de classificação depende não só da granulometria, pois as propriedades físicas das frações finas são devidas à muitos outros fatores.

As frações grossas do solo, como as areias, são formadas principalmente por grãos de quartzo de forma arredondada, ou angulares. São agregados não coesivos de fragmentos de rochas ou minerais constituídos de partículas de até 4,8 mm.

Nas frações finas ou muito finas de um solo, segundo TERZAGHI & PECK (1961), qualquer grão consiste, em geral, de um só mineral. Essas frações, conforme exposto acima, são originadas pelo intemperismo químico. São partículas friáveis, frequentemente de forma achatada, angular, lamelar ou em agulhas. CYTRYN (1957) afirma, inclusive, que o conceito de diâmetro não é totalmente aplicável neste caso.

Os solos finos podem se subdividir em dois grandes grupos: SILTES, que apresentam pouca ou nenhuma plasticidade, com tamanhos de grãos compreendidos entre 0,002 mm e 0,074 mm; e ARGILAS, definidas por um agregado de partículas microscópicas (grãos menores que 0,002 mm), contendo sílica em sua forma coloidal e óxidos de fórmula geral R_2O_3 .

Portanto, é extremamente importante estabelecer critérios múltiplos para uma adequada classificação dos solos, levando-se em conta o “diâmetro” da partícula e propriedades físicas⁴ com base no propósito da sua utilização.

1.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS SOLOS

O comportamento mecânico de um solo depende da granulometria, ou seja, da distribuição e configuração dos diversos tamanhos de partículas constituintes do solo.

No entanto, segundo AZAMBUJA (1979) e SABBAG (1980), solos com partículas da mesma forma e com estrutura semelhante podem apresentar comportamentos diferentes devido à composição mineralógica.

⁴ Uma exposição detalhada sobre os diversos sistemas de classificação de solos pode ser encontrada em BLÜCHER (1951) p. 81-106

Pedregulhos e areias fornecem ao solos atrito interno. São grãos constituídos por minerais resistentes ao intemperismo, em geral, o quartzo (SiO_2 cristalina) é o mais comum. É fato que solos arenosos necessitam de menores teores de cimento para a sua estabilização, pois apresentam melhor comportamento mecânico.

Os principais minerais que compõem a fração fina (argilosa) do solo são chamados de argilo-minerais, que são, fundamentalmente, silicatos hidratados de alumínio. Estes, por sua vez, apresentam plasticidade, capacidade de permuta de cátions e dimensões inferiores a $2\mu\text{m}$ e podem ser subdivididos em três grupos principais: caulinitas, ilitas e montmorillonitas.

Basta entender que, devido à sua estrutura iônica, a caulinita é menos susceptível a variações de volume por absorção de água e possui menor capacidade de troca catiônica que as ilitas e, por fim, as montmorillonitas são as mais instáveis⁵.

SILVA (1991) explica que as variações de volume por absorção de água estão diretamente ligadas aos Limites de Consistência (limites de Atterberg) do solo, que são empregados para se descrever os estados físicos do solo: o Limite de Liquidez (LL) é caracterizado pela quantidade de água que, adicionada ao solo, é capaz de causar perda de coesão de suas partículas; o Limite de Plasticidade (LP) é caracterizado pelo momento em que, se retirada gradativamente a umidade do solo, este passa do estado plástico (moldável) para o estado semi-sólido (não moldável); finalmente, Índice de Plasticidade (IP) é o intervalo de umidade que torna o solo plástico, obtido pela diferença entre LL e LP.

Define-se Capacidade de Troca Catiônica (C.T.C.) como a capacidade dos argilo-minerais, devido à carga negativa dos íons adsorvidos em sua superfície, de atrair e trocar cátions com o meio aquoso, influenciando poderosamente as propriedades físico-químicas e tecnológicas do material, no qual provoca, ainda, uma alteração no sistema argila-água do solo, pois, “...as forças de interação entre as partículas são alteradas e a natureza da água adsorvida pode também ser modificada” (SABBAG, 1980, p.15). A principal influência dessa propriedade no solo-cimento é que os argilo-minerais podem trocar cátions cálcio provenientes dos produtos de hidratação do cimento, acarretando em fenômenos como a

⁵ Em AZAMBUJA (1979), SABBAG (1980), SANTOS (1975), INGLES & METCALF (1972) e HACHICH et al. (1998) esse assunto é abordado de maneira mais detalhada, demonstrando de forma esquemática as unidades estruturais moleculares dos argilo-minerais, o que proporciona um melhor esclarecimento sobre a plasticidade, variação de volume e instabilidade química.

floculação, que alteram a curva granulométrica do solo e conferem produtos hidratados mais estáveis⁶.

A ordem de substituição dos cátions, dependendo de sua concentração na água do solo é a seguinte: $\text{Na} < \text{K} < \text{H} < \text{Mg} < \text{Ca}$.

A origem e ocorrência desses argilo-minerais dependem das condições ambientais (clima e fatores como drenagem e escoamento das águas no solo) e a sua influência no solo-cimento é, de fato, determinante, pois as argilas montmorillonitas mesmo em baixas concentrações são capazes de causar reações expansivas na pasta de cimento, que ocasionam desagregações no compósito.

Na tabela 1.1 são apresentadas outras propriedades dos argilo-minerais e a comparação com a partícula de quartzo da areia:

TABELA 1.1 – Composição e propriedades mecânicas da caulinita, montmorillonita e quartzo. Fonte BELL (1996).

	Caulinita	Montmorillonita	Quartzo
1. Composição Química			
SiO ₂	47,0%	60,4%	99,19%
Al ₂ O ₃	38,3%	19,2%	0,2%
Álcalis (K ₂ O, Na ₂ O)	0,8%	1,1%	-
Fe ₂ O ₃	0,5%	1,7%	0,01%
TiO ₂	-	-	0,04%
CaO	-	1,9%	0,07%
MgO	-	5,6%	-
Perda de ignescência	13,3%	8,4%	0,35%
PH a 10% de sólidos	5,0 ± 0,5	8,6 ± 0,5	5,8 ± 0,3
C.T.C. (meq/100g)	2-16	80 – 120	-
2. Propriedades Físicas			
Distribuição granulométrica			
0,06mm – 0,002mm	6%	24%	32%
Menor que 0,002mm	94%	76%	68%
Massa específica (g/cm ³)	2,57	2,63	2,65
Limite de liquidez	75	114	52
Limite de plasticidade	42	67	38
Índice de plasticidade	33	47	14
Atividade	0,35	0,47	0,27
Tensão de compressão (kPa)*	350	127	318
Módulo de elasticidade	35	26	24
Teor de umidade ótima (%)	29,5	200,0	28,5
Densidade máxima seca (Mg/m ³)	1,40	1,29	1,41
CBR	1	9	1

* No teor de umidade ótima.

⁶ GUIMARÃES (1998), KUBO (1986) e VIOLANI (1987) explicam melhor o fenômeno da floculação com maior ênfase nas estabilizações de solos argilosos com a cal.

Na tabela 1.2 são apresentadas resumidamente as características principais dos argilo-minerais, conforme AZAMBUJA (1979) e SABBAG (1980):

TABELA 1.2 - Características dos argilo-minerais.

argilo-mineral	C.T.C. (meq/100g)*	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
Caulinita	3 a 15	65%	36%	29%
Ilita	10 a 40	-	-	-
Montmorillonita	80 a 150	170% a 475%	47% a 50%	428%

*A capacidade de troca de cátion (C.T.C.) é expressa em miliequivalente por 100g de solo, obtido pelo consumo por titulação de azul de metileno em solução.

1.4. A ESTRUTURA DO SOLO

Conceituou-se inicialmente que o solo é composto por partículas sólidas, líquidos e gases. A parte sólida, insolúvel em água, constitui-se de minerais e material orgânico, e esses minerais são subdivididos em dois grandes grupos: os inertes, ou fração grossa, e os argilo-minerais, que são ativos quimicamente e conferem plasticidade e coesão ao solo.

Falta, portanto, uma melhor definição sobre a ocupação dos vazios existentes entre as partículas. CYTRYN (1957) enfatiza a dificuldade de se estabelecer uma fronteira precisa entre os diferentes tipos de água do solo. Genericamente, classifica-se a água da seguinte maneira, conforme FARIA (1990) e SABBAG (1980):

- água interpartículas, água livre, água capilar, ou ainda água dos poros é a que envolve as partículas e é eliminada à temperatura ambiente;
- água absorvida, água de combinação é a mais próxima à superfície dos minerais;
- água adsorvida é a que está presente em finas camadas presas à superfície do mineral por meio de forças de atração;
- água estrutural, água de constituição, ou água de hidroxilas é a que faz parte do retículo cristalino de alguns argilo-minerais. Não pode ser removida, exceto por elevadas temperaturas (500°C a 600°C), quando o composto recebe a denominação de “meta”.

A compreensão sobre a relevância da água na configuração da estrutura do solo permite equacionar incidências patológicas bastante características do solo-cimento, como por exemplo, o surgimento de fissuras devido à retração por secagem.

1.5. COMPACTAÇÃO DO SOLO

“A compactação do solo é o processo pelo qual as suas partículas são forçadas a agruparem-se mais estreitamente, através da redução nos vazios de ar, geralmente por meios mecânicos.”(BLÜCHER, 1951, p.191)

Em 1933, R. Proctor publicou uma série de artigos sobre métodos de controle de compactação. Seus estudos enunciaram um dos mais importantes princípios da Mecânica dos solos, ou seja, que a densidade de um solo compactado é função do teor de umidade no momento de sua compactação. Proctor percebeu que, para uma energia de compactação constante, ao se adicionar água ao solo, sua densidade aparente aumentava até um certo ponto, chamado *umidade ótima*. Ao acrescentar teores de umidade acima do ótimo, a densidade torna a reduzir, pois o excesso de água absorve parte da energia de compactação e a redistribui ao sistema, afastando as partículas sólidas.

Na verdade, o teor ótimo promove uma lubrificação das partículas, facilitando, quando se imprime uma energia de compactação, o preenchimento de todos os vazios possíveis.

Entende-se, portanto, que solos com maiores quantidades de finos, quando compactados, demandam maiores teores de água para atingirem a umidade ótima devido à maior área superficial⁷ do solo.

ROCHA (1996), SILVA, M. (2001) e LINS (1994) afirmam que essa nova configuração do solo após a compactação afeta significativamente as características mecânicas e, conseqüentemente, a porosidade e a permeabilidade do material.

Há diversas outras propriedades dos solos, porém, para o entendimento desse trabalho e nessa fase inicial de conceituações, foram concentrados apenas os principais pontos: distribuição granulométrica, composição mineralógica, estrutura do solo e compactação. Outras propriedades serão relatadas no momento oportuno, ao longo do texto.

⁷ A área superficial de um solo é a medida de toda a superfície de cada partícula de uma porção de solo. Tal propriedade é expressa em unidades de área por unidade de peso. Por exemplo, CYTRYN (1957) coloca que as areias apresentam área superficial variando de 45 a 65m²/kg e que as argilas podem apresentar 4.500 a 6.500m²/kg.

2. CIMENTO PORTLAND

A palavra cimento é derivada da palavra latina *caementum*, que os romanos denominavam a mistura de cal com terra pozolana (cinzas vulcânicas das ilhas gregas de Santorim e da região de Pozzuoli, próximo a Nápoles), resultando em uma massa aglomerante utilizada em obras de alvenaria, pontes e aquedutos.

Conforme BUGALHO (2000), coube ao inglês Joseph Aspdin, em 1824, patentear o cimento Portland – ligante hidráulico que possuía aspecto e cor semelhantes às rochas calcárias da ilha de Portland. Aquele produto, no entanto, tinha características bem distintas do cimento conhecido atualmente, resultante de uma série de pesquisas e implementação tecnológica.

Enfim, o cimento é tecnicamente definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso (para regular o tempo de início de hidratação ou o tempo inicial de “pega”) e outras substâncias que determinam o tipo de cimento. O clínquer é o resultado da mistura de calcário, argilas e, em menor proporção, minério de ferro submetida a um processo chamado clinquerização.

NEVILLE (1997) relata o processo de fabricação do cimento Portland que consiste, de maneira sucinta, em moer a matéria-prima, misturá-la em determinadas proporções e submetê-la à queima em forno rotativo a elevadas temperaturas. O produto obtido na queima é o clínquer que é finamente moído. Para controlar a pega e o endurecimento, é acrescentado o gesso. Esse material pode receber outras adições posteriormente, como a escória de alto forno, as cinzas volantes, as sílicas ativas, etc.

O clínquer, quando reduzido a pó, tem composição química específica e propriedades físicas de cimento, contendo basicamente uma série de compostos anidros, dos quais os principais são:

- Silicato tricálcico, ou alita (C_3S);
- Silicato dicálcico, ou belita (C_2S);
- Aluminato tricálcico (C_3A);
- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita (C_4AF).

METHA & MONTEIRO (1994) destacam a composição potencial em faixas aproximadas dos componentes básicos do cimento Portland, como se observa na tabela 2.1:

TABELA 2.1 - Faixas aproximadas da proporção dos principais componentes de uma amostra de cimento.

COMPONENTE	PROPORÇÃO (%)
C ₃ S	35% a 65%
C ₂ S	10% a 40%
C ₃ A	0% a 15%
C ₄ AF	5% a 15%

O conhecimento dos produtos formados pela hidratação do cimento, bem como dos diversos fatores (calor liberado e velocidade) que constituem essa reação, é de grande importância para o uso prático do cimento Portland. De fato, por se tratar de um componente do solo-cimento, é preciso compreender algumas características tecnológicas desse material. As propriedades dos componentes principais do cimento em hidratação são as seguintes:

- C₃A – reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação; propicia pouco desenvolvimento de resistência e forte retração;
- C₃S – responsável pelo desenvolvimento de resistência nas idades iniciais e propicia alto desprendimento de calor, libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio (CH);
- C₂S – proporciona o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas com baixa liberação de calor, produz cerca de 18% em massa de CH;
- C₄AF – desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque por sulfatos.

O processo de hidratação do cimento é bastante complexo e representado por várias reações químicas simultâneas e que interferem umas nas outras. É fato ainda que o comportamento da hidratação (velocidade, distribuição e formação dos produtos hidratados) é função do tamanho dos grãos do cimento (área específica), temperatura, quantidade de água disponível e procedimentos de mistura.

Conforme MEHTA & MONTEIRO (1994), as quatro principais fases sólidas presentes na pasta de cimento são as seguintes:

- a fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produzido pela hidratação do C₃S e do C₂S. Constitui, em geral, de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta e é

responsável pela resistência mecânica e, conseqüentemente, da durabilidade da matriz de concretos e argamassas;

- a fase hidróxido de cálcio (CH), também liberado na hidratação do C_3S e C_2S , representando de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta, porém, sua presença tem efeitos desfavoráveis à durabilidade, devido à sua solubilidade;
- os sulfoaluminatos de cálcio, resultantes da hidratação do C_3A e do C_4AF na presença do sulfato de cálcio (gipsita) ou gesso. Ocupa de 15% a 20% do referido volume e tem papel menor na estrutura/propriedade;
- grãos de clínquer não hidratado.

No solo-cimento, assim como em concretos e argamassas, a natureza do cimento deve ser considerada para a proposta de desenvolvimento de pesquisas que visam melhorar o desempenho desse material. Sabe-se que diferentes composições do cimento conduzem a comportamentos distintos da mistura de solo-cimento, principalmente nos que se referem à fissuração por retração. SABBAG (1980) afirma que:

- a retração do solo-cimento diminui com o aumento do C_3S na composição do cimento. L'HERMITE (1960) explica que os cimentos com elevada saturação de cal contém sempre uma quantidade expressiva de cal livre e esta, quando hidratada, provoca expansões que reduzem a retração do material;
- a retração aumenta com teores mais elevados de C_3A , de acordo com as análises de YNZENGA (1967);
- VERBECK & HELMUTH⁸ apud SABBAG (1980) demonstram que existe uma porcentagem ótima de gesso para um dado clínquer para a qual a retração por secagem aos sete dias de idade é mínima. Esse teor ótimo de gesso é função do conteúdo de C_3A , de álcalis ou da finura do cimento;
- a retração aumenta com o aumento da área específica do cimento;
- o processo de hidratação característico dos diversos tipos de cimentos é responsável pela ocorrência de fissuras causadas, segundo GEORGE (1968), por uma auto-secagem.

Diversas pesquisas demostram evolução acerca da composição de cimentos e suas implicações na estabilização de solos. MILLER & AZAD (2000), por exemplo, estudaram a influência de cimento Portland de alto forno como estabilizadores de solos e notaram incrementos de resistência mecânica à compressão e reduções do índice de plasticidade em

⁸ VERBECK, H. C.; HELMUTH, R. H. (1968). *Structures and physical properties of cement paste*. In: 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE CHEMISTRY OF CEMENT. Tokyo. Vol. 3. p.1-32.

solos argilosos, o que comprova a eficiência e o potencial de utilização de alternativas tecnológicas na composição de cimentos.

ABIKO (1987) trata da tecnologia do solo-cimento por uma ótica da conservação de energia, reaproveitamento de resíduos sólidos e desenvolvimento sustentável por meio de adoção de tecnologia apropriada, contribuindo para uma discussão bastante atual sobre a questão do consumo energético para a fabricação do cimento e o desperdício mapeado de casca de arroz e também de entulho cerâmico de construção, provando que esses resíduos, devido à capacidade de desenvolver reações pozolânicas, têm potencial para transformarem-se em subprodutos para a produção de cimentos alternativos.

KANIRAJ & HAVANAGI (1999) estudaram o desenvolvimento da resistência mecânica, pela incorporação de cinzas volantes na estabilização de solos com cimento visando à produção de tijolos e outros materiais de construção e concluíram que existe uma determinada proporção entre teor de cimento e teor de cinza volante, nos casos analisados, que propicia melhor desempenho mecânico à mistura e que dentre os dois, o teor de cimento tem maior influência nas características do compósito. Segundo os autores, anualmente são produzidas 80 milhões de toneladas de cinzas volantes na Índia e somente 5% são aproveitados como material de construção.

Nessa mesma conduta, ADESANYA (1996) conduziu pesquisas para determinar o efeito da adição de cinzas da espiga de milho como fator de redução de custos em produtos à base de cimento, inclusive na estabilização de solos lateríticos. Segundo o autor, devido à pozolanicidade desse resíduo, há, em determinadas proporções de substituição ao cimento Portland comum, ganhos de resistência mecânica, diminuição de condutividade térmica e de absorção de água.

No Brasil, são produzidos cinco tipos de cimento Portland, além do cimento branco, que possuem a seguinte nomenclatura:

- CP I – cimento Portland comum;
- CP I-S – cimento Portland comum com adição;
- CP II-E – cimento Portland composto com escória de alto forno;
- CP II-F – cimento Portland composto com fíler (calcário);
- CP II-Z – cimento Portland composto com pozolana;
- CP III – cimento Portland de alto forno;
- CP IV – cimento Portland pozolânico;
- CP V-ARI – cimento Portland de alta resistência inicial.

Além desses tipos, existem os cimentos Portland resistentes aos sulfatos, no caso, a nomenclatura acima exposta é acrescida da sigla RS, para identificação na embalagem do produto.

A tabela 2.2 apresenta as especificações dos tipos de cimento Portland e a tabela 2.3 indica a quantidade produzida de cada tipo e sua participação percentual no mercado brasileiro.

TABELA 2.2 – Tipo e composição de cimento Portland.

Fonte: Itambé – Cimento e Concreto apud BUGALHO (2000)

TIPO DE CIMENTO PORTLAND	CLASSE DE RESISTÊNCIA (MPa)	COMPOSIÇÃO (%)				NORMA BRASILEIRA
		Clínquer + gesso	Escória alto forno	Pozolana	Materiais. Carbonáticos	
CP I	25; 32	100	-	-	-	NBR 5732
CP I – S	40	95-99	1-5	1-5	1-5	
CP II – E	32	56-94	6-34	-	0-10	NBR 11578
CP II – Z	32	76-94	-	6-14	0-10	
CP II – F	32 - 40	90-94	-	-	6-10	
CP III	25 – 32 - 40	25-65	35-70	-	0-5	NBR 5735
CP IV	25 - 32	45-85	-	15-50	0-5	NBR 5736
CP V – ARI		95-100	-	-	0-5	NBR 5733

TABELA 2.3 – Produção nacional de cimento

Fonte: Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento – SNIC, 1996 apud BUGALHO (2000)

TIPO DE CIMENTO	QUANTIDADE PRODUZIDA (t)	PARTICIPAÇÃO (%)
CP I	1.111.649	3,21
CP II	26.674.053	77,10
CP III	3.479.331	10,06
CP IV	2.463.879	7,12
CP V	836.657	2,42
Branco	31.481	0,09

Ressalta-se que a preocupação com o alto consumo energético durante o processo de fabricação do cimento, aliada aos avanços de pesquisas científicas que visam implementação de qualidades tecnológicas, motivou a introdução de escórias e materiais pozolânicos nas composições do cimento Portland. Hoje, a maior parcela do mercado é ocupada por cimento Portland composto.

A compreensão dos tipos de cimento e suas propriedades tecnológicas, aliada ao correto entendimento das variáveis que constituem os solos, significa ampliar as possibilidades de desenvolvimento do solo-cimento, na busca de um material de elevado desempenho.

2.1. ADIÇÕES MINERAIS EM COMPOSTOS À BASE DE CIMENTO PORTLAND

Segundo ALMEIDA (1996), exige-se cada vez mais da tecnologia dos concretos a característica da durabilidade. Estendendo esse conceito, AÏTCIN (2000a) afirma que o desenvolvimento da ciência dos materiais de construção é o fator de maior impacto dentro da engenharia civil, maior mesmo que os avanços alcançados pelos sistemas informatizados.

Em conseqüência desse desenvolvimento, pesquisas introduziram no elenco de matérias-primas dos concretos e argamassas as adições minerais e os aditivos químicos. DODSON⁹ apud AÏTCIN (2000b) afirma que há quatro tipos de aditivos e/ou adições, quando consideradas as suas ações dentro dos compósitos à base de cimento Portland:

- aqueles que dispersam melhor as partículas de cimento;
- os que modificam a cinética da hidratação;
- os que reagem com um dos subprodutos das reações de hidratação;
- aqueles que possuem apenas uma ação física.

As adições minerais são conhecidas desde remotas eras. Conforme GUIMARÃES (1997) e ALMEIDA (1996), etruscos, egípcios e romanos construíram muitas de suas obras com esses materiais, chamados pozolânicos, adicionados à cal. Pode-se citar, como exemplo de minerais pozolânicos naturais, as cinzas vulcânicas, diatomito, “chert” opalino, calcedônia, e argila calcinada.

Um material pozolânico é aquele que contém sílica na sua forma ativa ou amorfa (SiO₂). Conforme SILVA (2000), a pozolanicidade é função da característica amorfa, da granulometria e da área específica. A reação pozolânica consiste na combinação das partículas de sílica com o hidróxido de cálcio (CH) liberado na hidratação do cimento,

⁹ DODSON, V.H. (1990). *Concrete admixtures*. New York. Van Nostrand-Reinhold.

resultando em silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que como já foi dito, é o principal responsável pela resistência mecânica e durabilidade da matriz de cimento.

Recentemente, o uso de minerais naturais é bastante restrito por conta da escassez causada pela exploração indiscriminada de jazidas minerais. Diante disso, pesquisadores identificaram características pozolânicas em vários materiais, sendo que a maioria é rejeito industrial poluente. Como exemplo apresentam-se: as sílicas oriundas da fabricação de ligas ferro silício ou silício metálico; a sílica extraída da casca do arroz; as cinzas volantes; a escória de alto forno; a escória de aciaria; as cinzas da casca do arroz, do bagaço de cana-de-açúcar e da espiga de milho; o pó de resíduos cerâmicos dentre outros.

2.2. SÍLICA ATIVA

A sílica ativa, segundo ALMEIDA (1996), é um subproduto da indústria do ferrossilício, material altamente poluente, com características de extrema finura e grande leveza.

BENTUR & COHEN (1987), PAULON (1996), LIBORIO, MELO & SILVA (1998) e AİTCIN (2000b) concordam que os avanços das pesquisas sobre a microestrutura de concretos e argamassas são de suma importância para a produção de materiais de elevado desempenho.

Diante disso, observou-se que a zona de transição (ou interface) entre as partículas de agregado e a matriz de cimento é a mais fraca do compósito e que as adições de materiais pozolânicos diminuem a espessura dessa interface, isso porque na zona de interface entre um agregado e a pasta de cimento há a formação de uma grande quantidade de hidróxido de cálcio, que é o material mais frágil dos produtos da hidratação do cimento. LIBORIO (2002) acrescenta que nessa região existem também poros, contendo água e ar e que essa configuração, dependendo da forma do agregado, leva o material, quando comprimido, à ruptura sem que sua capacidade de resistência seja atingida.

FIGURA 2.1 – Microscopia de pasta de cimento Portland, relação $a/c=0,5$.

- 1) estrutura fibrosa C-S-H,
- 2) $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- 3) poro capilar.

Fonte: MORANVILLE-REGOURD (1992).

A sílica ativa possui duas formas de atuação na matriz de cimento:

- **FÍSICA**, como filer (ou de preenchimento de vazios), essa ação ocorre por conta da elevada área específica, ocupando espaços disponíveis entre os grãos de cimento. Esse efeito colabora para aumentar a coesão e a compacidade da pasta e diminuir a zona de interface agregado-pasta;

DETWILER & MEHTA¹⁰ apud LIBORIO (2002) verificaram o efeito microfíler com partículas de carbono em misturas de cimento com substituição de 10% em massa e verificaram iguais resistências das misturas de controle para as idades de 7 dias e 28 dias. De maneira análoga, GOLDMAN & BENTUR¹¹ apud LIBORIO (2002) compartilham da idéia de que o efeito microfíler de qualquer pó muito fino provém benefícios ao concreto, por conta do preenchimento de vazios e do melhor empacotamento entre as partículas.

- **QUÍMICA**, promovendo a clássica reação pozolânica que se dá pela transformação do frágil CH (hidróxido de cálcio) em C-S-H (silicato de cálcio hidratado), produto muito resistente e responsável pela aderência. Um importante detalhe é que o C-S-H produzido pelo efeito pozolânico é de melhor qualidade que aquele produzido pela simples hidratação do cimento Portland.

BENTUR & COHEN (1987) pesquisaram o efeito da sílica ativa na microestrutura da zona de interface de argamassas com cimento Portland e verificaram a efetiva melhoria daquela região pela reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e a sílica ativa. Observa-

¹⁰ DETWILER R.J; MEHTA P.K. (1989). *Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete*. ACI Mats. J. 86, pp. 609-614.

¹¹ GOLDMAN A.; BENTUR A. (1993). *Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength*. In: Cement and Concrete Research. July, Vol. 23, n.4, pp 962-972.

se, nas figuras 2.2 e 2.3, a diferença entre as zonas de interface matriz / agregado e o aspecto da compacidade da matriz em compósitos com e sem a adição de sílica.

FIGURA 2.2 – Microestrutura da zona de interface entre matriz de cimento e agregado. Fonte: BENTUR & COHEN (1987).

FIGURA 2.3 – Microestrutura da zona de interface entre matriz de cimento e agregado com adição de sílica. Fonte: BENTUR & COHEN (1987).

A adição de sílica ativa em concretos e argamassas bem dosados, traz conseqüências benéficas em diversas propriedades. Por exemplo: aumento da resistência mecânica à compressão e tração, redução da fluência, melhoria da resistência à abrasão, menor permeabilidade, menor profundidade de carbonatação, maior resistência ao ataque por sulfatos e cloretos.

Há várias considerações sobre o teor ideal de adição de sílica em compósitos à base de cimento Portland. Estudos realizados por MONTEIRO (1995) concluíram que 5% de sílica provocam uma redução de 57% da espessura da zona de transição aos 30 dias. ISAIA (1995), estudou a redução de pH provocada pela adição de materiais pozolânicos e seus efeitos com relação à despassivação da armadura em concreto armado e concluiu que, para substituições de até 20% em massa de cimento por microssílica, o pH registra valores acima de 12. A profundidade de carbonatação também é afetada com a adição de sílica. CARETTE & MALHOTRA¹² apud PAULON (1996) observaram que a adição de 10% de sílica, em concretos com relação a/c de 0,40, provocou um aumento na profundidade carbonatada em longas idades, porém, esse mesmo teor de adição provocou um aumento da resistividade elétrica do concreto para taxas capazes de prevenir a corrosão de armaduras mesmo

¹² CARETTE, G. G.; MALHOTRA, U. M. (1993). *Mechanical properties, durability and drying shrinkage of Portland cement concrete incorporating silica fume*. In: Cement and Concrete Aggregates. V.1, n.5, p.3-1B.

despassivadas. RASHEEDUZZAFAR¹³ apud PAULON (1996) estudou a ação da sílica sobre a expansão do concreto devido à reação álcali-agregado e constatou que o teor de 10% em substituição ao cimento foi o mais eficiente, comparado com teores de 20% de sílica e cimentos com escória de alto forno.

LIBORIO (2002) expõe os seguintes resultados sobre os teores de adição de sílica ativa em relação à difusão de cloretos e à resistividade elétrica:

FIGURA 2.4 – Comparação da difusão de cloretos em pastas de cimento Portland.

Obs.: sem adições, com 10% de cinzas volantes e 5% e 10% de sílica ativa.

FIGURA 2.5 – Resistividade em função do teor de sílica ativa.

LIBORIO (2002) descreve a somatória das ações da sílica ativa em concretos e argamassas da seguinte forma:

“...o comportamento mecânico do agregado na estrutura de concreto, dependendo de sua forma e disposição no interior da argamassa, poderá ser similar ao de uma viga simplesmente apoiada, e com determinado carregamento, poderá ser rompido facilmente por flexão ou cisalhamento (...). Com a introdução da sílica ativa, ocorre a diminuição desse

¹³ RASHEEDUZZAFAR, S. E. H. (1991). *Cement and concrete composites*. Vol. 13, n.3.

fenômeno, comportando-se o agregado como uma viga contínua com apoios muito próximos um do outro, aumentando assim a resistência do sistema (...)” (LIBORIO, 2002, p.16)

A figura 2.6 ilustra os conceitos descritos acima:

FIGURA 2.6 – Idealização do funcionamento de um agregado sob carregamento ocasionado por uma deficiência da zona de interface e melhoria dessa região pela adição de sílica ativa. Fonte: LIBORIO (2002).

O Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento (LMABC) do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, através dos trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa CEDMATE (Concreto de Elevado Desempenho, Materiais e Tecnologia), possui vasto acervo em estudos que envolvem a adição sílica ativa em tratamento e reparo de estruturas de concreto, ensaios de durabilidade, análise de carbonatação, aderência de argamassa em substratos de concreto, cura térmica a vapor entre outros.

Os gráficos abaixo fazem parte do banco de dados do LMABC e ilustram o consumo de hidróxido de cálcio (CH) pela sílica de ferro-silício em pastas de cimento em função da idade, apresentando um roteiro da ação química da sílica, por meio do desenvolvimento de reações pozolânicas.

FIGURA 2.7 – Reação entre a sílica oriunda da fabricação de ligas Fe-Si ou silício metálico e Ca(OH)_2 em misturas de igual proporção de materiais.

Fonte: Banco de dados LMABC

FIGURA 2.8 - Reação entre a sílica oriunda da fabricação de ligas Fe-Si ou silício metálico e Ca(OH)_2 em misturas na proporção 1:2.

Fonte: Banco de dados LMABC

Por essas razões, justifica-se o interesse de observar os efeitos da adição de sílica no solo-cimento para a produção de componentes de alvenaria, visto que a utilização da alvenaria aparente requer do material uma dupla função: estrutural e estética. A durabilidade do componente de alvenaria, no caso o tijolo, é de fundamental importância para que os requisitos de projeto, nesse caso, sejam atendidos.

3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

É preciso notar que o emprego do solo como material de construção deve ser realizado com critério, pois podem ocorrer alguns problemas devido às propriedades desse material, que são muito complexas e heterogêneas, como foi anteriormente exposto.

Conforme INGLES & METCALF (1972), os princípios que regem a estabilização dos solos tendem a conferir ao produto final melhor estabilidade dimensional, aumento de resistência mecânica para patamares definidos pela utilização, diminuição da permeabilidade, controle da fissuração por retração por secagem, resistência à erosão e abrasão superficial e, conseqüentemente, aumento da durabilidade do material. SILVA (2001) acrescenta que todo processo de estabilização modifica as propriedades do sistema solo-água-ar e conclui que a estabilização pode ser direcionada para apenas duas características do solo: a textura (grau de finura do solo) e a estrutura.

De fato, a estabilização, de qualquer forma, promove:

- a redução do volume dos vazios, o que influencia sobre a porosidade;
- o preenchimento dos vazios que não podem ser eliminados por completo, alterando as características de permeabilidade do solo;
- a melhoria da aderência entre os grãos, conferindo maior compacidade, ou densidade, ao solo, influenciando diretamente na resistência mecânica.

ABIKO (1983) relata que, desde as eras mais remotas, o homem utilizou diversas técnicas para conferir melhor comportamento ao solo, tornando-o mais resistente ao intemperismo. Cita-se o emprego de asfalto, cal, palha e diversas outras fibras vegetais, urina e excremento de gado, melaço, goma arábica, gordura de baleia e resinas diversas.

HOUBEN & GUILLAUD (1994) e INGLES & METCALF (1972) concordam que são três os principais métodos de estabilização do solo:

- estabilização mecânica;
- estabilização física;
- estabilização química.

A estabilização mecânica consiste em compactar o solo por meio de uma ação (aplicação de uma energia) mecânica. Os resultados desse método afetam a densidade, a resistência mecânica, a compressibilidade, a permeabilidade e a porosidade.

A estabilização física atua diretamente sobre a textura do solo, ou seja, adicionam-se frações de grãos de diferentes granulometrias e, portanto, otimizam-se as proporções entre areia, silte e argila, fato que causa um melhor empacotamento dos grãos. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP (1960) divulgou que a composição granulométrica é determinante na estabilização do solo com cimento, pois traça parâmetros que correlacionam teor de cimento e, obviamente, viabilidade econômica da sua aplicação. FULLER¹⁴ apud BLÜCHER (1951), descreveu os procedimentos para compor a curva granulométrica ideal de um agregado.

Ocorre estabilização química “quando outros materiais são adicionados ao solo, modificando suas propriedades ou por reação físico-química entre os grãos e o material, ou criando uma matriz que aglutina e cobre os grãos.” (SILVA, 2001, p.104). Neste âmbito, é oportuno comentar que os materiais mais utilizados para esse tipo de estabilização são: cimento Portland, cal, betume e fibras.

A opção, conforme GUIMARÃES (1998), pelo tipo adequado de estabilização é influenciada por uma série de fatores como: viabilidade econômica, finalidade da obra, características dos materiais e as propriedades do solo que se deseja corrigir ou adequar.

¹⁴ FULLER, W. B. & THOMPSON, S. E (1907). *The law of proportioning concrete*. Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs.

4. SOLO-CIMENTO

Solo-cimento é o material obtido pela mistura íntima de solo, cimento Portland e água. Segundo ENTEICHE¹⁵ apud MERCADO (1990), trata-se de um processo físico-químico de estabilização, no qual as conseqüências decorrem de uma estruturação resultante da reorientação das partículas sólidas do solo com a deposição de substâncias cimentantes nos contatos intergranulares, alterando, portanto, a quantidade relativa de cada uma das três fases – sólidos, água e ar – que constituem o solo.

Esse material foi empregado pela primeira vez em 1915 nos EUA, segundo ABIKO (1983) pelo Engenheiro Bert Reno, que pavimentou uma rua com uma mistura de conchas marinhas, areia de praia e cimento Portland, porém, só em 1935, a *Portland Cement Association* (PCA) iniciou pesquisas e estudos sobre essa tecnologia.

Desde então, o solo-cimento tem sido empregado principalmente na pavimentação. No entanto, ROCHA (1996) relata que são conhecidas utilizações em camadas de fundações e base para pavimentos rígidos e flexíveis de estradas e aeroportos; valetas de drenagem; revestimentos de canais, diques, reservatórios e barragens de terra; estabilização e proteção superficial de taludes; fundações de edifícios; muros de arrimo e, finalmente, em alvenarias de tijolos e blocos prensados ou painéis de paredes monolíticas para construção de moradias.

Com o início dos anos 1960, o solo-cimento passou a ser estudado e aplicado com maior abrangência no mundo todo. No Brasil, segundo MERCADO (1990) a partir da década de 1970 o solo-cimento tornou-se objeto de intensas pesquisas principalmente da ABCP, do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia (CEPED) e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Mais adiante será apresentada uma abordagem histórica do material e seu emprego na execução de alvenarias.

A adição de cimento ao solo permite obter um material com as seguintes vantagens:

- a absorção e a perda de umidade do material não causam variações volumétricas consideráveis;
- o material não se deteriora quando submerso na água;

¹⁵ ENTEICHE, A. A. (1963). *Suelo-cemento, su aplicacion en la edificacion*. Bogotá. CINVA.

- há aumento da resistência à compressão;
- em consequência de uma menor permeabilidade, é mais durável.

4.1. FATORES QUE CONDICIONAM A QUALIDADE DA MISTURA DO SOLO-CIMENTO

BLÜCHER (1951) destaca que os principais fatores que afetam a qualidade do solo-cimento são: o tipo de solo, o teor de cimento, o método de mistura e a compactação. O autor ainda ressalta que, desses fatores, o solo exerce maior influência e, se este for inadequado, pouco se poderá fazer para obter um produto satisfatório.

MERCADO (1990) acrescenta que o solo, além de ser o elemento de carga, pode determinar, de acordo com a sua composição, se a estabilização com cimento é economicamente viável, ou ainda indicar facilidades no manuseio e procedimentos de mistura (peneiramento, homogeneização, moldagem e desmoldagem) para fins de construções de alvenarias.

A *HIGHWAY RESEARCH BOARD OF AMERICA* (HRB) (1961) estabelece limites de distribuição granulométricas para os solos que podem ser estabilizados economicamente com cimento. Destaca-se que a porcentagem máxima de fração fina do solo deve ser de 50%.

BLÜCHER (1951) relata também, que o teor de matéria orgânica presente no solo deve ser bem baixo e considera que o limite máximo seguro é de 2%, apesar de existirem casos bem sucedidos de estabilização com solos contendo até 5% de matéria orgânica e experiências insatisfatórias com solos contendo 0,5%. Tais observações levaram CATTON¹⁶ apud ROCHA (1996) a afirmar que não existia correlação entre teor de cimento e matéria orgânica.

Posteriormente, CLARE (1954), CLARE & FARRAR (1956) e INGLES & METCALF (1972) sustentaram que o teor de matéria orgânica exerce influência na qualidade do solo-cimento devido à presença de açúcares e ácido húmico e que íons cálcio provenientes dos tipos de cimento empregados na mistura podem neutralizar os efeitos nocivos da presença de matéria orgânica proporcionando um melhor equilíbrio do pH da mistura.

A composição química do solo também é importante, pois como foi visto anteriormente, os solos são formados por intemperismos, e nesse processo, a água, ao infiltrar-se no solo, dissolve substâncias orgânicas e inorgânicas. Portanto, a presença de sais

¹⁶ CATTON, M. D. (1940). *Research on the physical relations of soil-cement mixtures*. Proc. of the Highway Research Board, Washington, Bulletin 20, p.821-855.

solúveis (por exemplo, sulfatos) provenientes da hidrólise, mecanismo responsável pela decomposição química dos minerais das rochas, pode causar reações expansivas na pasta de cimento, caso descrito por SHERWOOD¹⁷ apud INGLES & METCALF (1972).

Autores como CERATTI et al. (1983), MOURA (1987), PARENTE (2002), ROCHA (1996) e SILVA (1991), após realizarem diversas seqüências de ensaios, com diversos tipos de solos, concordam que o aumento do teor de cimento resulta em aumento da resistência à compressão e, conseqüentemente, da durabilidade, independente do tipo de solo. Porém, INGLES & METCALF (1972), PITTA (1982) e SABBAG (1980) alertam que se o teor de cimento for muito elevado e as condições de cura forem inadequadas, é provável que ocorram fissuras no material causadas pela retração por secagem.

Em analogia à tecnologia dos concretos, convém afirmar que a cura é de fundamental importância para a qualidade do solo-cimento. CERATTI et al. e POÇO¹⁸ apud ROCHA (1996) avaliaram os efeitos dos processos e dos tempos de cura na resistência mecânica do solo-cimento.

Quanto aos métodos de mistura, existe uma série de parâmetros e variáveis que precisam ser bem esclarecidos. BLÜCHER (1951) relata que as misturas efetuadas em laboratório têm resistências mais elevadas e maior durabilidade que as misturas similares efetuadas no campo – para obras de pavimentação. De acordo com a eficiência dos equipamentos e as condições ambientais do local onde se realiza a mistura, a resistência à compressão do material pode diminuir em até 50%.

BAKER (1954) e GRIMER (1957) afirmam que há uma relação entre resistência mecânica e homogeneização da mistura de solo-cimento. FELT¹⁹ apud ROCHA (1996) determinou que, quanto maior o tempo de mistura, menor a resistência mecânica.

ABCP (1985), CEPED (1978) e CRATERRE (1979) determinam que os procedimentos de mistura de solo-cimento para a produção de tijolos, blocos ou painéis de parede, devem ser:

- preparação do solo (destorroamento, pulverização e peneiramento);
- preparação da mistura (homogeneização seca e homogeneização da umidade);
- moldagem (uso efetivo).

¹⁷ SHERWOOD, P. T. (1962). *Effect of sulfates on cement and lime-stabilized soils*. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. bulletin 353. Washington D.C. p.98-107.

¹⁸ POÇO, R. C. E. (1991). *Cura acelerada do solo-cimento pelos métodos da água em ebulição e da estufa a 100°C*. In: 25ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, São Paulo, 1991. Anais. São Paulo, p.813-836, out.

¹⁹ FELT, E. J. (1955). *Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures*. Portland Cement Association, p.138-162.

A compactação adequada, por sua vez, é essencial para a obtenção de um solo-cimento satisfatório. Para compreender melhor esse parâmetro, é preciso saber da influência do teor de umidade na compactação, pois somente uma boa compactação pode garantir que o material atinja um determinado peso específico, ou densidade aparente, que lhe confira resistência mecânica apropriada para um determinado fim.

A umidade ótima para a compactação, como vimos anteriormente, é função do tipo de solo para uma energia considerada constante. BLÜCHER (1951) afirma que o conceito de relação água / cimento, como é aplicado no concreto, é de pequeno valor na estabilização do solo-cimento. POÇO & BONASSI²⁰ apud ROCHA (1996) e MINKE²¹ apud SILVA (2001) comprovam que a resistência à compressão é diretamente proporcional ao grau de compactação da mistura e isso independe do teor de cimento.

SILVEIRA (1966) afirma que uma redução de apenas 5% na massa específica seca do solo-cimento, proporciona decréscimos da ordem de 15% na resistência mecânica para o mesmo teor de cimento, porém, ressalta que solos arenosos alcançam maiores resistências quando a umidade da mistura está pouco abaixo da umidade ótima, contudo, a durabilidade do material é afetada.

De maneira análoga, STANTON et al.²² Apud BLÜCHER (1951) relata que uma diminuição de 5% da massa do material compactado provoca um decréscimo superior equivalente ao decréscimo causado pela redução de 10% a 15% no teor de cimento.

A umidade necessária para a hidratação do cimento, pode ser satisfatoriamente suprida pela umidade ótima de compactação. No entanto, deve-se enfatizar a importância da homogeneização desta através do solo, de maneira que todo o cimento possa entrar em contato com umidade suficiente.

²⁰ POÇO, R.C.E. & BONASSI, R. (1988). *A importância de parâmetros de compactação em obras de solo-cimento*. In: 23º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Florianópolis. Anais. Florianópolis, p.145-170, out.

²¹ MINKE, G. (1998). *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*. Southhampton, ill. Graph. 210p.

²² STANTON, T. E., HVEEN, F. N. & BEATTY, J. L. (1943). *Progress report on California experience with cement-treated bases*. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. bulletin 17 (2). Washington D.C. p.92-96.

4.2. REAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO-CIMENTO E SUAS IMPLICAÇÕES NA QUALIDADE DO MATERIAL

ABIKO (1987) expõe dois processos para explicar as reações que ocorrem no mecanismo de interação entre o solo e o cimento:

- o processo primário é constituído basicamente dos produtos das reações de hidratação do cimento Portland, ou seja, silicatos e aluminatos hidratados;
- o processo secundário se deve às reações entre os argilo-minerais existentes no solo e a cal (hidróxido de cálcio) liberada na hidratação do cimento.

MOURA²³ apud PARENTE (2002) descreve que a cimentação nos solos granulares (arenosos) é similar a que ocorre no concreto, porém, como já foi dito, a pasta de cimento atua apenas nos pontos de contato dos grãos; já os solos finos apresentam substâncias quimicamente menos estáveis (argilo-minerais) que reagem com o cimento.

HANDY²⁴ apud SABBAG (1980) descreve que ocorre na interface gel – grão de solo uma combinação de ligações mecânicas com as superfícies minerais, que apresentam rugosidade, somada às ligações químicas dessa interface, pois na fração fina, a rugosidade das partículas é menor e a área superficial exposta à cimentação é infinitamente maior.

Quando ocorre a formação da fase CH, os íons de cálcio encontram-se disponíveis na mistura e estes se associam à superfície dos argilo-minerais que possuem capacidade de troca de cátion.

Instantes após a adição de cimento em solos argilosos, percebem-se mudanças nas propriedades do conjunto, como as alterações dos Limites de Atterberg e formação de material com aspecto granular, fato que facilita a pulverização do solo para a devida homogeneização da mistura. Tais fenômenos se devem à floculação promovida pelos íons cálcio, que atraem as partículas de argilo-minerais mantendo-as agrupadas por meio de fracas ligações químicas. BELL & COULTHARD²⁵ apud BELL (1996) afirmam que todos os tipos de argilo-minerais reagem com a cal livre, porém seus efeitos são mais significantes nas montmorillonitas, que são mais reativas.

²³ MOURA, P. R. M. (1987). *Estudo comparativo do comportamento do solo-cimento feito com um solo laterítico e um solo saprolítico*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – EPUSP.

²⁴ HANDY, R. L. (1958). *Cementation of soil minerals with Portland cement or alkalis*. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. Bulletin 198, Washington, DC, p.55-64.

²⁵ BELL, F. G. & COULTHARD, J. M. (1990). *Stabilization of clay soils with lime*. Mun. Engr., 7: 125-140

O fenômeno da floculação influencia na capacidade de aglomeração do cimento segundo PINTO²⁶ apud SABBAG (1980).

Além da floculação, que é um fenômeno instantâneo, ocorre que “a cal hidratada provoca acentuada elevação da alcalinidade do solo (medida pelo pH), tornando instáveis alguns de seus constituintes. Pode ocorrer, então, o ataque parcial ao silício e ao alumínio dos minerais do solo e a combinação desses íons com o cálcio, formando compostos estáveis nessas condições, tais como silicatos e aluminatos hidratados de cálcio.” (GUIMARÃES, 1998, p.124).

Essa descrição se refere às reações pozolânicas, nas quais a cal, com a presença de água, e em contato com a sílica e a alumina, produz compostos estáveis e com propriedades ligantes. HERZOG & MITCHEL (1963) investigaram, por meio da difração de raios-x, que o solo não poderia ser classificado como um material quimicamente inerte, pois os resultados das análises apontavam um consumo gradativo do hidróxido de cálcio na presença de argilo-minerais.

BELL (1996) afirma que tais reações pozolânicas são dependentes do tempo transcorrido, conferindo ganho de resistência mecânica por longos períodos. INGLES (1987) relata que cura intensa e altas temperaturas promovem reações pozolânicas e significantes desenvolvimentos da resistência mecânica. EADES & GRIM²⁷ apud BELL (1996) analisaram que em temperaturas maiores que 21°C, a alcalinidade pode inclusive atacar a sílica (proveniente do quartzo) da fração granular do solo, acelerando ainda mais as reações pozolânicas.

A carbonatação, combinação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente no ar atmosférico e que tende a produzir carbonato de cálcio, é outro fenômeno químico responsável pelo processo de estabilização. Embora de origem diferente da floculação e da reação pozolânica, também tem a característica de ação imediata e está, normalmente, restrita à superfície exposta da mistura, ou da peça moldada. GUIMARÃES (1998) e SABBAG (1980) concordam que a formação do carbonato de cálcio resulta em cimentações que acentuam a estabilidade da peça moldada, porém não desempenha papel fundamental nas características do solo-cimento.

²⁶ PINTO, C.S. (1977). *Estudo das propriedades estabilizadoras do cimento Portland e da cal hidratada*. São Paulo, IPT, pub. n. 687.

²⁷ EADES, J. L. & GRIM, R. E. (1960). *Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization*. High. Res. Board, bull. 262, Washington, DC, 51-63.

MOURA (1987) e LUCENA²⁸ et al. apud ROCHA (1996), realizaram pesquisas envolvendo solos lateríticos e concluíram que, devido à natureza puramente química da interação argila-cimento, faz-se necessário o conhecimento dos tipos de cimento.

A compreensão desses fenômenos microscópicos é de fundamental importância para se conduzir pesquisas envolvendo adições complementares à tecnologia do solo-cimento, como por exemplo, o uso de agregados originados de entulhos e material reciclado, tipos de cimentos, outros materiais pozolânicos (entre eles a sílica ativa, escórias de alto forno, cinzas volantes) e aditivos químicos.

4.3. MÉTODOS DE DOSAGEM DA MISTURA DE SOLO-CIMENTO

Segundo ABCP (1980), a dosagem do solo-cimento consiste em uma sequência de ensaios seguida de uma interpretação por meio de critérios estabelecidos na experiência. O resultado de um estudo de dosagem seria a fixação de três quesitos básicos, a saber:

- o teor de cimento a ser adicionado ao solo;
- a umidade a ser incorporada na mistura;
- a massa específica desejada.

Desses três, o teor de cimento é o objetivo maior do método de dosagem, visto que a umidade e a massa específica passam a ser critérios de controle da mistura depois de fixados os seus valores.

Os métodos de dosagem da ABCP, de acordo com FERRAZ et al. (2001) são baseados na experiência da PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA (1946) e consiste em dois métodos (normas):

- a) NORMA GERAL, que se aplica a qualquer tipo de solo, excetuando-se os orgânicos. O seu critério de dosagem é baseado na perda de massa de corpos-de-prova submetidos a 12 ciclos de ensaio de durabilidade por molhagem e secagem;
- b) NORMA SIMPLIFICADA, que é aplicável a solos de textura predominantemente granular, ou seja, solos com no máximo 50% de material com diâmetro inferior a 0,05 mm (fração silte e argila) e no máximo 20% de material com diâmetro inferior a 0,005 mm (fração argila). O seu critério de

²⁸ LUCENA, F. B. et al. (1986). *Estudos dos solos lateríticos: propriedades de solos lateríticos estabilizados com cimento*. In: 21ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Salvador, Anais. Salvador, p.160-175, set.

dosagem baseia-se na resistência à compressão simples da mistura, após um período de sete dias de cura.

Em 1990, a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) apresentou uma norma para as misturas de solo-cimento, em sua quase totalidade semelhante à Norma Simplificada da ABCP, sob o título “NBR 1336 Solo-Cimento — Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento”.

Em resumo, o teor de cimento adequado se baseia em análises de comportamentos de corpos-de-prova com diversos teores ensaiados, diferindo entre si em 2%. As simplificações e alterações nesse método surgiram exatamente pela comprovação de milhares de experimentos realizados, proporcionando economia de tempo na tomada de decisões sobre a composição ideal a ser efetivamente empregada em um caso específico.

Há necessidade, no entanto, de elaboração de novas pesquisas na tentativa de simplificar ainda mais a metodologia de dosagem. Nesse contexto, vale ressaltar um método baseado na interação elétrica entre as partículas de cimento e de argila contidas no solo, denominado “Método Físico-Químico de Dosagem”, que foi proposto pelo *CENTRAL ROAD RESEARCH INSTITUTE OF INDIA*. Segundo CHADDA²⁹ apud FERRAZ et al. (2001), em uma mistura de solo-cimento, as partículas de cimento estão eletricamente carregadas, o que causa uma interação elétrica entre as partículas argilosas e as do cimento em hidratação.

As alterações físico-químicas produzidas a partir dessa interação resultam na variação volumétrica da mistura de solo-cimento. Assim, com base nessas variações volumétricas ocorridas durante esse processo, pode-se determinar o teor de cimento que leva a uma mistura estável.

A concentração de cimento que produz a máxima variação volumétrica na suspensão de solo-cimento é o mínimo teor de cimento requerido para a estabilização do solo em questão, sendo que adições do estabilizante acima deste limite de saturação, provocam aumentos na resistência mecânica das amostras compactadas, mas não induzem reações físico-químicas com as partículas do solo.

Observa-se que tal método de dosagem está em conformidade com as conclusões sobre estudos das reações químicas no solo-cimento, expostas no item anterior.

²⁹ CHADDA, L. R. (1971). *A rapid method of assessing the cement requirement for the stabilization of soils*. Indian Concret Journal, 45 (7): 298-314.

CASANOVA & CERATTI³⁰ apud FERRAZ et al. (2001) divulgou esse método de dosagem testando-o com argilominerais puros, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e solos sesquióxidos e caulíníticos.

FERRAZ et al. (2001) realizaram um estudo comparativo entre os métodos de dosagem empregando algumas amostras de solos e concluíram que os teores de cimento obtidos pelo emprego da Norma Geral, são sempre superiores aos indicados pelos demais métodos, uma vez que seu critério de dosagem se baseia na durabilidade das misturas. Por sua vez, o método físico-químico, apresentou teores sempre inferiores àqueles obtidos pelos outros métodos.

Ressalta-se que, o método de dosagem, por mais rigoroso que seja, não implicará necessariamente na obtenção de uma mistura de boa qualidade, uma vez que para isso devem ser observados outros fatores intervenientes, tais como: teor de umidade da mistura, operações de mistura e de compactação, tempo e condições de cura.

Para o solo-cimento destinado à moldagem de tijolos, blocos ou paredes monolíticas para a construção de alvenaria, a dosagem está condicionada a obedecer a especificações de valores mínimos de resistência à compressão e absorção de água, prescritos por norma.

³⁰ CASANOVA, F. J. & CERATTI, J. A. (1986). *The assessment of requirement of oxissoils by a phisical-chemical method*. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8, Proceedings... s.1., EMBRAPA, p. 243-256.

5. O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

5.1. HISTÓRICO

CYTRYN (1957), afirma que a construção com terra foi a primeira solução encontrada pelo homem primitivo para a construção de abrigos eficientes contra o meio ambiente hostil, em locais que apresentavam dificuldades de manuseio de pedras e madeira.

CUNHA (1978) acrescenta que o desenvolvimento da técnica de construção com terra foi o início de uma nova vida, até então fixada nas proximidades de uma caverna qualquer. Há evidências arqueológicas de que a construção com blocos de terra seco ao sol já eram comuns no final do período Neolítico.

“O adobe, na forma de blocos secos ao sol, era bem conhecido na antiguidade. Os filhos de Israel faziam tijolos de barro para os egípcios no tempo de Moisés. (...). acredita-se que as primeiras casas de Siolk, um oásis no Iran, foram feitas de terra na forma de adobe monolítico cru, antes do ano 4.000 a.C.” (CUNHA, 1978, p. 1)

“Pouco a pouco, o homem aprendia que, com certos tipos de barro poderia fazer construções melhores do que com outros e que alguns duravam por toda a vida. (...). No Egito, melhorava o adobe adicionando a palha e o bambu (...). Na Babilônia e na Assíria, introduzia o asfalto natural, dando ao adobe primitivo uma melhor resistência ao intemperismo.” (CUNHA, 1978, p. 3)

CYTRYN (1957) relata descobertas arqueológicas de diversas localidades da China (incluindo a Grande Muralha), Índia, Síria, Palestina, Pérsia, Egito, Grécia e, finalmente, Roma, cujos métodos de construção com solos foram disseminados por vastas extensões da Europa, onde hoje localizam-se a França, a Alemanha e a Inglaterra.

Vale ressaltar ainda dois fatos históricos interessantes. Os romanos, de acordo com anotações de Plinius e Vitruvio, em 600 a.C. já dominavam o uso da cal e de pozolanas na estabilização de solos. Fato consolidado nas construções da “Cloaca Máxima” e da famosa “Via Apia”, estrada que, segundo GUIMARÃES (1998), estendia-se por quase 300 Km e que, em alguns poucos trechos existentes atualmente, após 2.300 anos de utilização, ainda apresenta condições de tráfego.

No continente Americano, há vários vestígios da utilização de métodos construtivos com solos nos Estados Unidos, México e também na América do Sul (Peru).

Segundo DETHIER³¹ apud SILVA (2001) as primeiras notícias de pesquisas sobre a construção com terra ocorreram no final do séc. XVIII.

O desenvolvimento científico do uso do solo (e também do solo estabilizado) em habitações ocorreu, segundo MERRIL³² apud CUNHA (1978), a partir de 1806, quando S. W. Johnson escreveu um tratado sobre a construção de terra compactada ou paredes monolíticas (*pisé*) para construções rurais. Posteriormente, na Inglaterra, no período pós primeira guerra, a construção com solo compactado foi amplamente divulgada como alternativa frente à escassez de recursos energéticos e materiais de construção.

Nos Estados Unidos, PATTY³³ apud MERRIL (1947) publica uma série de trabalhos voltados para a construção de terra compactada, devido ao sucesso da experiência inglesa referida acima. Os trabalhos de Patty originaram as pesquisas de HUBBELL (1941) que estudou as propriedades estruturais e térmicas de painéis de paredes de solo e solo-cimento compactados.

Desde então, diversos órgãos de pesquisa, arquitetos e engenheiros defendem a causa do uso da terra como material de construção de habitações, principalmente a partir da década de 70, quando começavam a ser discutidas as questões relativas ao impacto ambiental causado pela indústria da construção civil.

Dentre os órgãos internacionais de pesquisa, destaca-se o CRATerre, com sede em Genoble, na França. No Brasil, algumas entidades ligadas ao estudo dessa tecnologia são:

- ABCTerra – Associação Brasileira dos Construtores em Terra;
- CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Bahia;
- ABMTENC – Associação Brasileira de Materiais e Tecnologias não Convencionais;
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

³¹ DETHIER, J. (1993). *Arquiteturas de terra ou o futuro de uma tradição milenar*. Europa Terceiro Mundo. Estados Unidos. 10ed. Lisboa: Litografia Tejo.

³² MERRIL, A. F. (1947). *Casas de tierra apisonada y suelo-cemento*. Windsor. Buenos Aires.

³³ Leia mais em:

PATTY, R. L. (1936). *Rammed earth for farm buildings*. AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION, bull. 277, South Dakota. (revised 1945)

PATTY, R. L. (1936). *The relation of colloids in soil to its favorable use in pisé or rammed earth walls*. AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION, bull. 298, South Dakota.

PATTY, R. L. (1940). *Paints and Plasters for rammed earth walls*. AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION, bull. 336, South Dakota.

A experiência brasileira sobre a construção com terra é bastante ampla. De acordo com CUNHA (1978), os primeiros artigos sobre o assunto foram publicados em 1880, porém, tais textos não apresentavam dados científicos.

No Brasil, a utilização do solo-cimento foi intensificada a partir de 1940, quando a ABCP já dispunha de um método de dosagem para o emprego em obras de pavimentação inspirado nos moldes da experiência da PCA Americana.

Na mesma década, a ABCP³⁴ apud MERCADO (1990) já dispunha de experiência no uso do solo-cimento em paredes monolíticas. Segundo THOMAZ (1979), em 1948, construiu-se em Manaus o Hospital Adriano Jorge, com área de 10.800 m², com paredes monolíticas, uma obra marcante desse sistema construtivo, que mesmo depois de muito tempo de seu término, apresentava desempenho aprovado frente ao clima tropical.

Várias obras de habitação social foram decorrentes do sucesso do emprego dessa tecnologia, sensibilizando programas governamentais e órgãos de pesquisa que visavam à transferência de tecnologia, conforme ABCP (1985) e CEPED (1978a) (1978b).

LOPES³⁵ apud SILVA (2001) relata, por outro lado, que as construções com terra costumam ser associadas à pobreza, devido ao seu emprego em programas sociais. O surgimento de materiais de construção industrializados também contribuiu para que essa tecnologia alternativa ficasse à margem do mercado financeiro da habitação.

Felizmente, algumas iniciativas estão sendo retomadas, consequência de pesquisas, aprofundamento técnico de arquitetos e engenheiros e experiências bem sucedidas, assim como as crescentes preocupações ambientais que estão atraindo investimentos em construções de solo estabilizado, segundo SILVA (2001) e MONTORO & SAWAYA (2002).

5.2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Conforme CUNHA (1978), os principais métodos construtivos com solos são:

- **Adobes:** os tijolos de adobe são feitos por meio da moldagem de barro úmido (com alta plasticidade) em fôrmas. Após a moldagem, retiram-se as fôrmas e os tijolos são secos ao sol. O sistema construtivo é bastante simples e conhecido

³⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (1948). *Casas de parede de solo-cimento*. Boletim nº 54. São Paulo. ABCP.

³⁵ LOPES, W. G. (1998). *Taipa de mão no Brasil: levantamento e análise de construções*. São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado). SAP – EESC - USP.

(alvenaria) e, quando os tijolos são bem feitos, conseguem-se paredes com boa resistência.

- **Pisé, Taipa de Pilão, Terra Apiloadada ou Paredes Monolíticas:** o princípio básico desse método é a construção de paredes “in situ” comprimindo o solo dentro de fôrmas móveis em camadas sucessivas. Emprega-se, neste caso, solo arenoso na umidade ótima de compactação e origina-se, dependendo das condições das fôrmas, painéis de parede com acabamento refinado. MERRIL (1947) e CYTRYN (1957) descrevem detalhadamente o sistema construtivo desde o projeto das fôrmas até o acabamento das paredes.
- **Taipa de mão:** esse sistema consiste em preencher com barro úmido uma trama de madeira que estrutura o painel de parede. Foi introduzido no Brasil pelos portugueses e atualmente já existem propostas de racionalização do sistema com o emprego de painéis pré-fabricados SILVA (2001).
- **Bolas:** sistema bastante rudimentar com exemplares na África Ocidental, segundo CUNHA (1978). Consiste em empilhar bolas achatadas de barro formando a parede.
- **Leivas:** variação do adobe. Consiste em cortar o solo superficial em blocos (denominados leivas) e empilhá-los em camadas sucessivas sem argamassa.
- **Tijolos prensados:** para a moldagem desse tijolo, é usado um dispositivo mecânico submetendo o material a pressões bastante elevadas. Utilizam-se, de preferência, solos arenosos estabilizados com cimento. Também são produzidos blocos com dimensões idênticas aos de concreto.

5.3. TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

A fabricação de componentes de alvenaria de solo estabilizado tem sua evolução devido ao CENTRO INTERAMERICANO DE VIVIENDA Y PLANEJAMIENTO – CINVA (1961) com a criação da “Prensa Cinva-Ram”. Trata-se de uma prensa manual para a produção de tijolos de solo-cimento compactados. No Brasil, os tijolos de solo-cimento compactados foram pesquisados principalmente pelo IPT (1977a, 1977b, 1978).

Desde então, vários fabricantes desenvolveram prensas manuais e hidráulicas para a fabricação de diversos tipos de tijolos e blocos de solo-cimento compactado. Segundo FARIA (1990) e VIOLANI (1987), poucos daqueles fabricantes conseguiram permanecer no mercado, pois se constatou um abandono dessa tecnologia devido a um preconceito em relação ao material.

De fato, o processo de estabilização compreende uma gama de variáveis bastante complexa e requer conhecimento e controle tecnológico eficiente para a geração de um produto de qualidade.

É consenso que as qualidades do produto do solo estabilizado dependem primordialmente da matéria-prima, ou seja, do solo. FARIA (1990) expõe que mesmo após a estabilização, é comum a ocorrência de uma série de patologias, por exemplo:

- variações volumétricas por reações da água com aditivos, retrações e aparecimento de fissuras;
- degradação do material devido à presença de sais solúveis em água, de matéria orgânica, de materiais expansivos ou partículas friáveis (feldspatos e micas);
- propriedades heterogêneas na série produzida devido à descontinuidade das características da matéria-prima.

Com relação ao componente tijolo, convém destacar as diferenças entre o tijolo de barro cozido (ou cerâmico) e o tijolo de solo estabilizado.

Segundo VAN VLACK (1973), nos produtos cerâmicos, o esqueleto dos grãos minerais formados durante a queima é o responsável pelas propriedades mecânicas. Dessa forma, o material resultante é leve, resistente e poroso. O tijolo de barro cozido, no processo de queima (ou sinterização) tem a área específica das partículas reduzida, causando redução do volume aparente e aumento da resistência mecânica. O resultado de diversos fenômenos físicos que ocorrem durante a queima é consequência da aproximação e contato das partículas, reduzindo a porosidade.

A qualidade do tijolo de solo-cimento prensado é função do empacotamento dos grãos do solo depois de compactado. O material resultante tem baixa porosidade e alta densidade. O equipamento utilizado para a moldagem do tijolo desempenha papel fundamental, pois ele condiciona a taxa de compactação do material e as características produtivas em si, conforme avaliações de FARIA (1990).

FERRAZ JUNIOR (1995) comparou as características de diversas prensas existentes no mercado, a tabela 5.1 apresenta um resumo desse estudo.

TABELA 5.1 – Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado.

TIPO DE PRENSA		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO (MPa)	TAXA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO ³⁶	PRODUÇÃO (tijolos/dia)
Manual	Mecânica	1,5 – 2,0	1,38	300 a 1.200
	Hidráulica	2,0 – 10,0	1,65	2.000 a 2.800
Motorizada	Mecânica	4,0 – 24,0	>1,65	1.600 a 12.000
	Hidráulica	>20,0	>2,00	-

A ABCP (1988) indica que o processo de moldagem possibilita manter a regularidade dimensional das faces dos tijolos, implicando em menor consumo de argamassa de assentamento e de revestimento, isso se houver necessidade, pois a moldagem permite obter um design diferenciado dos tijolos, possibilitando modulações e encaixes que podem reduzir a zero o consumo da argamassa de assentamento, conforme ASSIS (1995).

Segundo CARVALHO & POROCA³⁷ apud CARNEIRO (2001) as paredes construídas com tijolos de solo-cimento prensados têm comportamento térmico e durabilidade equivalentes às construídas com tijolos ou blocos cerâmicos. Além disso, os tijolos de solo-cimento podem ser utilizados em alvenaria de vedação ou estrutural, desde que atendam as resistências estabelecidas nos critérios de projeto, que devem ser os mesmos aplicados aos materiais de alvenaria convencional, bem como devem seguir as indicações de cuidados e manutenção do material.

CARNEIRO et al. (2001) ressaltam outra vantagem dos tijolos de solo estabilizado: a possibilidade de incorporar outros materiais na sua fabricação, como por exemplo agregados produzidos com entulho reciclado e rejeitos industriais (sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto fornos, finos de serrarias e outros). Além disso, por não ser necessária a queima do tijolo, há uma expressiva redução do consumo de energia e, por consequência, de danos ambientais para a sua fabricação.

Além disso, NEVES (1989) destaca que o tijolo de solo-cimento, produzido por sistemas manuais ou automatizados, constitui um elemento de viabilidade comprovada em diversos programas habitacionais realizados tanto por mutirão, como por administração direta, fato que demonstra a transferência de tecnologia pela fácil assimilação dos operadores

³⁶ A taxa de compactação corresponde à relação entre os volumes da mistura no estado solto e em estado compactado, sendo diretamente proporcional à energia de compactação.

³⁷ CARVALHO, A. R. O.; POROCA, J. S. (1995). *Como fazer e usar tijolos prensados de solo estabilizado*. Brasília. IBICT. 38p.

dos equipamentos e também da mão-de-obra já familiarizada com o sistema construtivo de alvenaria.

O processo de fabricação do tijolo de solo-cimento prensado corresponde às seguintes etapas:

- **preparação do solo:** que consiste em destorroar e peneirar o solo seco;
- **preparo da mistura:** adiciona-se o cimento ao solo preparado e realiza-se uma mistura com os materiais secos. Após a homogeneização adiciona-se água e mistura-se novamente o material até uniformizar a umidade no solo;
- **moldagem dos tijolos;**
- **cura e armazenamento:** após 6 horas de moldados e durante os 7 primeiros dias, os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens.

A ABCP (1988) recomenda que a quantidade da mistura deve ser dimensionada para a produção de tijolos durante 1 hora de funcionamento da prensa.

Segundo a NBR 10832 e a NBR 10833, os solos adequados para a fabricação de componentes de alvenaria são os que possuem as seguintes características apresentadas na tabela 5.2

TABELA 5.2 – Critérios para a seleção de solos.

CARACTERÍSTICA	REQUISITOS (%)
% passando na peneira ABNT 4,8mm (n.º 4)	100
% passando na peneira ABNT 0,075mm (n.º 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

Em termos de dosagem, ABCP (1988) recomenda moldar tijolos com proporções, em volume, de cimento e solo de 1:10, 1:12 e 1:14. A escolha do “traço adequado” deve ser a que apresentar menor consumo de cimento e atender aos critérios de resistência à compressão e absorção de água estabelecidos na NBR 8491 e demonstrados na tabela 5.3.

TABELA 5.3 – Limites especificados para controle de qualidade de tijolos de solo-cimento.

CARACTERÍSTICA	N.º de AMOSTRA	EXIGÊNCIA NBR 8491	
Variação dimensional	-	$\pm 3 \text{ mm}$	
Resistência à compressão	10	Valor médio	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
		Valor individual	$\geq 1,7 \text{ MPa}$
Absorção de água	3	Valor médio	$\leq 20\%$
		Valor individual	$\leq 22\%$

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, destacando-se os resultados dos ensaios de caracterização dos mesmos. Apresentam-se, também, a escolha das composições dos traços analisados, os métodos de ensaio, os equipamentos utilizados e a programação realizada.

No laboratório, num primeiro momento, foram analisados os materiais que iriam constituir os tijolos.

6.1. SOLO

O primeiro passo foi a escolha da matéria-prima adequada para a fabricação dos tijolos de solo-cimento. O critério para a escolha do solo foi baseado nos preceitos das normas ABNT NBR 10832 e NBR 10833, cujos requisitos são apresentados na tabela abaixo:

TABELA 6.1 – Critérios de seleção de solos para a fabricação de componentes de alvenaria.

CARACTERÍSTICA	REQUISITOS (%)
% de solo que passa na peneira ABNT 4,8mm (n.º 4)	100
% de solo passa na peneira ABNT 0,075mm (n.º 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

O local escolhido para a extração da amostra de solo foi a propriedade da MINERAÇÃO ITAPORANGA LTDA, localizada no Km 154 da Rodovia SP 215 (São Carlos - Ribeirão Bonito).

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização da amostra de solo, conforme prescrições de materiais e métodos das normas citadas:

1) granulometria por peneiramento e sedimentação NBR 6502 - esse ensaio determina a curva de distribuição granulométrica do solo.

2) determinação da massa específica NBR 6508 – ensaio que tem por finalidade determinar a massa específica dos grãos do solo, definido como sendo a relação de massa dos sólidos em um certo volume.

3) determinação do Limite de Liquidez (NBR 6459) e do Limite de Plasticidade (NBR 7180) - esses dois ensaios caracterizam o solo quanto aos índices básicos representativos da plasticidade.

4) determinação da Capacidade de Troca de Cátion (C.T.C.) - esse ensaio tem por finalidade determinar a capacidade que o solo tem de absorver íons por meio do consumo, medido na titulação, de solução de azul de metileno em água destilada com concentração de 1,5g/l; quanto maior o volume gasto na titulação, maior é a superfície específica do solo, ou seja, mais finos são as suas partículas, e maior é a reatividade química do solo, o que interessa particularmente quanto ao potencial do solo em operar reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento.

O resultado obtido é expresso em miliequivalente por 100g de solo (meq/100g solo). Utilizou-se o método de ensaio descrito por PEJON³⁸ (1992).

No caso do solo em estudo, constatou-se um baixo valor de C.T.C, pois trata-se de um solo predominantemente arenoso.

5) cálculo da Superfície Específica do solo – utiliza-se a leitura do volume de solução de azul de metileno gasto na titulação do ensaio de CTC para a determinação da superfície específica do solo, conforme PEJON (1992).

6) determinação de pH do solo - esse ensaio é de fundamental importância para o reconhecimento de patologias que podem surgir no compósito de solo-cimento, pois solos ácidos apresentam dificuldades em se estabilizar com cimentos.

O pH do solo no seu estado natural é determinado por medição de solução eletrolítica de água destilada com aproximadamente 50g de solo em estudo, pré-peneirado na peneira #10 (ABNT) submetida à agitação de 30min e posterior repouso de 20min. O método de ensaio seguiu os preceitos descritos por CAMARGO et al. (1986);

Foram obtidos os seguintes resultados dos ensaios de caracterização do solo:

³⁸ O método apresentado por PEJON (1992), fundamentou-se nas descrições de LAN (1977, 1980) e BEAULIEU (1979).

TABELA 6.2 – Resultados dos ensaios de caracterização do solo.

Características físicas	Norma ABNT	Valor
Massa específica (g/cm ³)	6508	2,72
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	7251	1,38
Limite de Liquidez (%)	6459	NP
Limite de Plasticidade (%)	7180	NP
Material que passa # 4,8mm (%)	6502	100
Material que passa # 0,075mm (%)	6502	10
C.T.C. (meq/100g de solo)	-	1,122
Superfície específica (m ² /g)	-	8,78
pH a 25°C	-	5,52

Graficamente, a composição granulométrica do solo apresenta a seguinte configuração:

FIGURA 6.1 – Curva granulométrica do solo. Resultado do ensaio de análise granulométrica conjunta – NBR 6502/95.

6.2. CIMENTO PORTLAND

No decorrer da pesquisa, foram utilizados dois tipos de cimento Portland. A escolha do tipo de cimento foi determinada pelos seguintes critérios: no caso do CP II E 32 os aspectos que definiram a sua utilização foram a disponibilidade do material na região de São Carlos e a característica de desenvolvimento de resistência mais lento e, portanto, que poderia ser avaliado em várias idades nos tijolos produzidos; já a adoção do CP V ARI Plus está relacionada com a característica tecnológica do mesmo, ou seja, apesar de não ser um cimento ambientalmente correto e aparentemente descontextualizado da discussão sobre o uso de materiais sustentáveis, sua utilização é justificada pelo interesse de se observar o comportamento de tijolos compostos com cimentos com maior saturação de cal, já que a alcalinidade pode atacar a fração argilosa do solo e promover a formação de silicatos e aluminatos hidratados, possibilitando maior compacidade do material. Quanto ao seu emprego em ensaios acessórios, este é justificado pela rapidez de ganho de resistência proporcionada pelo CP V. Não interessava, portanto, nos casos em que se usou esse tipo de cimento, a observação da evolução da resistência, mas sim a resistência final após um curto período de tempo.

A tabela 6.3 indica os resultados das análises dos cimentos Portland utilizados:

TABELA 6.3 – Caracterização dos cimentos Portland utilizados.

Composição do cimento	CP V ARI PLUS *	CP II – E 32 **
Proporções (%/m. de cimento)		
Clínquer	90,6	67,8
Escória	-	19,56
Sulfato de Cálcio	6,0	2,75
Calcário	3,4	9,89
Finura Blaine (cm²/g)		
NBR 7224	4.650	3840
Composição Potencial (%)		
C ₃ S	56,7	42,67
C ₂ S	11,7	12,43
C ₃ A	8,1	5,43
C ₄ AF	9,5	7,36

Tempo de pega da pasta de cimento – NBR 11581 – MB 3434		
Temperatura (°C)	25	25
Rel. a/c (MB 3433)	0,29	0,32
Início de pega (min)	116	154
Fim de pega (min)	256	226
Massa específica (g/cm³) NBR 6474	3,1	3,1
* Fonte: Holcim Brasil S.A.		
** Fonte: Companhia de Cimento Ribeirão Grande		

6.3. SÍLICA ATIVA

A sílica ativa utilizada na pesquisa é comercializada pela Empresa Microsílica - Tecnologia e Comércio Ltda. As características químicas e físicas desse material são apresentadas na tabela 6.4.

TABELA 6.4 – Caracterização da sílica ativa.

Fonte: Microsílica Tecnologia e Comércio Ltda.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
SiO ₂	94,3
Al ₂ O ₃	0,09
Fe ₂ O ₃	0,10
CaO	0,30
MgO	0,43
K ₂ O	0,83
Na ₂ O	0,27
PF	3,14
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Massa específica (g/cm ³) – NBR 6474	2,1
Superfície específica BET (m ² /kg)	18.000

6.4. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

Avaliaram-se, numa segunda etapa, as características das misturas de solo-cimento e solo-cimento-sílica, obtidas através de dosagens determinadas para a produção dos tijolos de

acordo com os traços inicialmente sugeridos no Manual técnico da Empresa SAHARA – TECNOLOGIA, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. Estipulou-se que os traços, medidos em massa, a serem estudados seriam três. Adotou-se uma referência (traço 1:10) e variações para a análise de um traço rico em cimento (1:7) e outro pobre (1:13).

A realização dos traços com a adição de sílica – em substituição de 10% da massa de cimento (consideradas as correções das massas específicas) – permitiu uma comparação direta entre as composições ternárias e binárias.

6.5. ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS

O estudo experimental que determinou a avaliação do comportamento mecânico das misturas foi dividido em duas fases de ensaios: preliminares e definitivos.

6.5.1. ENSAIOS PRELIMINARES

Nos traços anteriormente descritos, adotou-se um teor de umidade próximo ao teor ótimo e este manteve-se fixo para todas as composições. Foram realizados os seguintes ensaios:

- 1) Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova de cilíndricos (NBR 12024) - foram moldados corpos-de-prova de misturas de solo-cimento (denominadas MSC) e solo-cimento-sílica (MSCSi), utilizando-se materiais e métodos especificados na referida norma;
- 2) Ensaios de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos (NBR 12025) - foram moldados 6 corpos-de-prova de cada traço com cimento CP V ARI Plus e após um período de 7 dias de cura realizou-se o ensaio de compressão simples.

6.5.2. ENSAIOS DEFINITIVOS

Os ensaios definitivos em misturas MSC e MSCSi deram suporte para as avaliações de desempenho dos tijolos produzidos, permitindo correlacionar as características da mistura compactada com a eficiência da prensa manual utilizada na moldagem dos tijolos. Foram realizados os seguintes ensaios:

- 1) Ensaio de Compactação - Proctor normal (NBR 7182) e Solo-Cimento - Ensaio de Compactação (NBR 12023).

A finalidade desse ensaio é determinar a curva de compactação e a massa específica do solo-cimento em função da umidade da amostra da mistura de solo cimento. Tal curva serve para indicar o teor de umidade ótima para a compactação da mistura, quando submetida a uma energia constante.

Adiciona-se água à mistura, num teor reconhecidamente menor que a umidade ótima e, após realizar-se a homogeneização do material, procede-se ao ensaio de compactação através da moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de acordo com materiais e métodos da NBR 12024. No caso, o teor de umidade inicial foi de 6% em relação à massa da mistura seca, os demais teores usados para a continuidade do ensaio foram 8%, 10%, 12% e 14% totalizando cinco determinações para cada traço em estudo.

Esse ensaio foi realizado em amostras de solo-cimento e solo-cimento-sílica. No caso das misturas MSCSi, a sílica foi adicionada juntamente com a água do teor de umidade inicial, ou seja, 6%;

2) Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova de cilíndricos (NBR 12024) - foram moldados corpos-de-prova de misturas de solo-cimento e solo-cimento-sílica, utilizando-se materiais e métodos especificados na referida norma;

3) Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos (NBR 12025);

4) Determinação de absorção de água (NBR 13555).

Após a produção dos tijolos, esses ensaios foram novamente realizados, de maneira acessória, com a finalidade de se comparar a influência da umidade de compactação na resistência mecânica da mistura, pois a prensa de fabricação dos tijolos, devido à configuração de seus dispositivos e do mecanismo de desmoldagem dos tijolos, opera em umidade inferior à umidade ótima aferida no ensaio de Proctor.

A repetição do ensaio com corpos-de-prova permitiu comparar resistência mecânica e absorção de água nas misturas de solo-cimento e solo-cimento-sílica sob os efeitos da redução e/ou do aumento da relação água/cimento e, conseqüentemente, da massa específica aparente da mistura compactada. Tais constatações são relevantes, pois apontam fatores determinantes para o desenvolvimento de equipamentos que possam operar com teores adequados de umidade e menores consumos de cimento para uma resistência desejada.

Foram moldados 10 corpos-de-prova de cada traço, sendo que 7 foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão e os 3 restantes destinados ao ensaio de absorção de água. Utilizou-se cimento CP V ARI Plus e os corpos-de-prova foram ensaiados aos 7 dias de idade.

6.6. PRODUÇÃO DE TIJOLOS PRENSADOS

As etapas que sucederam à determinação da umidade ideal para a moldagem dos tijolos (aferida na prática em ensaios acessórios, que estão expostos no capítulo 7. Item 7.3), foram a produção e os ensaios dos tijolos de solo-cimento e solo-cimento-sílica. Definiram-se 2 “LOTES” de tijolos, sendo que o primeiro (L1) foi composto por traços de solo-cimento e o segundo (L2) por traços de solo-cimento-sílica.

A Empresa SAHARA – IND. E COM. DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA disponibilizou, em termos de empréstimo, a prensa para a produção dos tijolos de dimensões 10cm x 20cm x 5cm (largura x comprimento x espessura) e encaixes que permitem, apesar das dimensões não normatizadas, a amarração direta entre os componentes na execução da alvenaria.

A produção de tijolos de solo-cimento com e sem adição de sílica, utilizando a prensa manual ocorreu de acordo com os procedimentos (materiais e métodos) descritos na NBR 10832 e iniciou-se, efetivamente, em janeiro de 2002. As figuras 6.2 e 6.3 demonstram os equipamentos utilizados:

FIGURA 6.2 – Prensa manual SAHARA para fabricação de tijolos de solo-cimento.

- **Tipo:** modular 10cm x 20cm;
Produz tijolos de encaixes universais de solo-cimento vazados, com 10cm de largura, 20cm de comprimento, 5cm de espessura e furos internos de 5cm, indicados para edificações de alvenaria em geral.
- **Massa:** aproximadamente 80kg;
- **Capacidade de Produção:** 250 a 300tijolos/hora;
- **Peças por m2 de parede:** 100 tijolos somente encaixados ou aproximadamente 90 tijolos assentados com um pequeno filete de argamassa;
- **Acessórios:** acompanha a máquina dispositivos para a produção de ½ tijolo, indicado para acabamentos de portas e janelas; e canaletas, para a execução de vergas e cintas de amarração.
- **Tensão de Compactação:** 2,0MPa a 3,0MPa, segundo o fabricante.

FIGURA 6.3 – Triturador JAG-5000.

- **Tipo:** Triturador JAG-5000.
Máquina destinada a destorroar a mistura de solo-cimento, proporcionando uma melhor homogeneização da umidade.
- **Massa:** aproximadamente 100kg
- **Dispositivos:** motor de 2HP e lâmina de trituração.

A utilização deste tipo de prensa dialoga com um dos objetivos desse trabalho, pois pode proporcionar, por meio de técnicas simples e soluções viáveis, o desenvolvimento de materiais e sistemas de construção sustentáveis com componentes fabricados no local da obra. É, portanto, uma grande ferramenta na realização de programas habitacionais de autogestão e auto-construção.

Nessa fase, utilizou-se o cimento CP II E 32 e os tijolos permaneceram em cura úmida durante todo o período de avaliação.

6.7. ENSAIOS EM TIJOLOS

A rotina de ensaios para a caracterização dos tijolos foi definida pelos seguintes procedimentos:

- ensaio de determinação da resistência à compressão e da absorção de água dos tijolos de solo-cimento, com e sem sílica, avaliando-os de acordo com as especificações de materiais e métodos das normas ABNT NBR 8492 e NBR 8491;
- ensaios de durabilidade, que consistem em medir a perda de massa e a resistência à compressão de tijolos após serem submetidos a seis ciclos de molhagem (imersão em água por 24 horas) e secagem (em estufa a 70°C por 24 horas) com base na NBR 13554;

Os tijolos produzidos foram submetidos aos ensaios descritos para a determinação de suas características de acordo com a programação indicada na tabela 6.5.

TABELA 6.5 – Programação de ensaios indicando a quantidade de tijolos para cada ensaio em determinadas idades.

ENSAIO	PROCEDIMENTO	IDADES DOS TIJOLOS (dias)	N.º DE TIJOLOS A CADA ENSAIO P/ LOTE
Verificação dimensional	Medida individual	7	10
Resistência à compressão	NBR 8492	3, 7, 14, 28, 63, 91 e 120	6 (total 42)
Absorção de água	NBR 8492	7, 28, 91	3 (total 9)
Durabilidade	NBR 13554*	91 (início)	5

*ensaio modificado: realizado em tijolos e sem escovação. Considera-se que as solicitações de abrasão superficial em paredes de alvenaria são menos severas que as previstas em outros usos do solo-cimento (estradas, por exemplo).

De acordo com a programação exposta, os ensaios de resistência à compressão em tijolos foram realizados, para amostras de cada um dos lotes descritos acima, nas seguintes idades: 3, 7, 14, 28, 63, 91 e 120 dias após a moldagem. Por meio dessa estratégia, avaliou-se o ganho de resistência ao longo da idade, compararam-se os desempenhos dos traços diretamente, ou seja, traços MSC entre si e entre e os traços MSCSi, e foram analisados os limites de resistência para utilização dos tijolos impostos pela norma NBR 8491.

Os ensaios de absorção de água foram realizados em três idades: 7, 28 e 91 dias. A finalidade desse procedimento foi avaliar a relação entre o ganho de resistência e a diminuição da absorção. Justifica-se a escolha dessas duas primeiras idades pelos seguintes motivos: a idade mínima segundo a NBR 8492 para o ensaio dos tijolos é de 7 dias e, finalmente, a idade recomendada para o uso em obras é de 28 dias.

Na complementação das avaliações dessa pesquisa, utilizaram-se como bibliografia adicional de apoio as seguintes normas:

- NBR 12254 – “Execução de sub-base ou base de solo-cimento”;
- NBR 10835 – “Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - forma e dimensões”;
- NBR 10833 – “Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica”;
- NBR 12253 – “Dosagem para emprego como camada de pavimento”;
- NBR 13553 – “Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural”;
- NBR 10836 – “Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - determinação da resistência à compressão e da absorção d'água”;
- NBR 10834 – “Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural”;

- ABCP (1980). *Dosagem das misturas de solo-cimento - normas de dosagem e métodos de ensaios*.

6.8. EXECUÇÃO E ENSAIO DE PAINEL DE PAREDE

Foram executadas três paredes com dimensões de 1,20m x 2,40m x 0,10m (largura x altura x espessura) em escala 1:1, a fim de se comprovar a eficiência do material, submetendo a estrutura de alvenaria a uma prova de carga por meio do seguinte método:

- execução de painéis de paredes de alvenaria estrutural e realização de ensaio à compressão simples (NBR 8949).

Essa norma define o método de ensaio de paredes estruturais submetidas à compressão simples, construídas com blocos de concreto, blocos cerâmicos ou tijolos. Ainda conforme esse método, foram preparados e ensaiados tijolos, prismas e a argamassa de assentamento.

Os resultados obtidos indicaram parâmetros de resistência e deformabilidade das paredes, possibilitando correlações com os resultados dos ensaios de prismas, tijolos e argamassa.

A composição de traço dos tijolos que constituíram os painéis foi escolhida dentre aquelas anteriormente analisadas e corresponde a que apresentou melhor desempenho nas avaliações. Produziram-se cerca de 1.200 tijolos e o cimento utilizado foi o CP V ARI Plus.

A execução desse ensaio exigiu consulta às seguintes normas e publicações de apoio:

- NBR 5738 – “Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – método de ensaio”;
- NBR 7215 – “Ensaio de cimento Portland – método de ensaio”;
- NBR 8215 – “Prismas de blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – preparo e ensaio à compressão – método de ensaio”;
- NBR 8798 – “Execução e controle de obras em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto - procedimento”;

A realização desses ensaios permitiu estabelecer conclusões sobre as diversas etapas desenvolvidas durante a pesquisa envolvendo a tecnologia da composição do material (misturas), aplicação (tijolos), interferências na tecnologia (equipamento) e execução (alvenarias), de modo a atingir uma análise completa e interdisciplinar (composição química, comportamento estrutural, produção e uso como componente de um sistema construtivo) desse material.

7. EXPERIMENTAÇÃO

7.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - ENSAIOS PRELIMINARES EM CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS

Inicialmente realizaram-se ensaios acessórios de resistência à compressão simples medida em corpos-de-prova de diâmetro de 50mm e altura de 100mm e que tiveram a finalidade de uma primeira análise do comportamento das misturas de solo-cimento. Os traços (em massa) adotados, originaram-se das recomendações da empresa SAHARA para a fabricação de tijolos comuns e tijolos aparentes, respectivamente 1:10 e 1:7. O traço 1:10 foi adotado como referência e, para se obter parâmetros comparativos, adicionou-se um traço “pobre” 1:13.

7.1.1. MISTURAS DE SOLO-CIMENTO (MSC)

A montagem dessa experimentação seguiu os procedimentos, materiais e métodos especificados na NBR 12024 – *Solo-cimento, moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos*. Utilizou-se o método “A” da referida norma, indicado para solos com 100% de partículas de tamanho inferior a 4,8mm.

A umidade de compactação para os ensaios exploratórios foi fixada em 10% em relação à massa da mistura de solo-cimento. A amostra de solo foi inicialmente secada ao ar, peneirada e destorroada. Depois de pesados os materiais, misturaram-se primeiramente o solo e o cimento CP V ARI Plus até a homogeneização do material. Finalmente, adicionou-se a água e se realizou a mistura mecanicamente em argamassadeira.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado após 7 dias da moldagem, sendo que os corpos-de-prova ficaram sob cura úmida durante o referido intervalo. Os resultados expressos na tabela 7.1 se referem à média de 5 corpos-de-prova.

TABELA 7.1 - Resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento (MSC) aos 7 dias de idade.

MISTURAS DE SOLO-CIMENTO (MSC)						
TRAÇO 1:m	RELAÇÃO a/agl. (kg/kg)	RELAÇÃO a/mist. (kg/kg)	TEOR DE CIMENTO (%)	f_{sc7} (MPa)	DESVIO PADRÃO	C.V. (%)
1:10	1,10	0,10	10,0	9,0	0,35	3,90
1:7	0,80	0,10	14,3	13,8	0,40	2,90
1:13	1,40	0,10	7,7	7,7	0,32	4,15

7.1.2. MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-SÍLICA (MSCSi)

Após a determinação dos traços, procurou-se variar seus componentes em busca de resultados que pudessem mostrar o comportamento desse material quando submetido a adições de sílica ativa.

O procedimento (materiais e métodos) de ensaio foi semelhante ao anteriormente descrito, com a diferença da adição de sílica ativa em solução, com parte da água de amassamento da mistura.

Convém dizer que a adição de sílica ativa foi determinada pela substituição de 10% da massa de cimento, com as devidas correções, considerando-se as massas específicas dos dois materiais, para que o volume de cimento e sílica fosse igual ao que anteriormente era ocupado somente por cimento. Foram ensaiados os seguintes traços:

TABELA 7.2 - Resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de Misturas de Solo-Cimento-Sílica (MSCSi) aos 7 dias de idade.

MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-SÍLICA (MSCSi)							
TRAÇO 1:m	RELAÇÃO a/agl. (kg/kg)	RELAÇÃO a/mist. (kg/kg)	CIMENTO (%)	SÍLICA (%) Subst. cimento	f_{sc7} (MPa)	DESVIO PADRÃO O	C.V. (%)
1:10	1,21	0,10	9,0	10%	6,9	0,30	4,35
1:7	0,88	0,10	12,9	10%	10,5	0,51	4,86
1:13	1,55	0,10	7,0	10%	6,6	0,47	7,12

7.2. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

A finalidade desse ensaio é determinar a curva de compactação e a massa específica da mistura de solo cimento em função da umidade da amostra. Tal curva indica o teor de umidade ótima para a compactação da mistura, quando submetida a uma energia constante.

O ensaio teve procedimento de acordo com materiais e métodos descritos na NBR 7182, NBR 12023 e na NBR 12024. No caso, adotou-se o teor de umidade inicial de 6% em relação à massa da mistura seca, os demais teores usados para a continuidade foram 8%, 10%, 12% e 14% totalizando cinco determinações.

Esse ensaio foi realizado para as misturas de solo-cimento (MSC) e solo-cimento-sílica (MSCSi). Convém comentar que, no caso das misturas MSCSi, a sílica também aqui foi adicionada juntamente com a água do teor de umidade inicial, ou seja, 6%.

Os seguintes resultados foram observados nesses ensaios:

TABELA 7.3 - Determinação de umidade (h) ótima de compactação e densidade máxima aparente para MSC.

MISTURAS DE SOLO-CIMENTO (MSC)		
TRAÇO (1: m)	$\rho_{\text{máx}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$h_{\text{ótima}} \text{ (\%)}$
1:10	2,23	10,3
1:7	2,25	10,1
1:13	2,21	10,5

TABELA 7.4 - Determinação de umidade (h) ótima de compactação e densidade máxima aparente para MSCSi.

MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-SÍLICA (MSCSi)		
TRAÇO (1: m)	$\rho_{\text{máx}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$h_{\text{ótima}} \text{ (\%)}$
1:10	2,23	10,2
1:7	2,25	9,5
1:13	2,21	10,6

7.3. PRODUÇÃO EXPERIMENTAL DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO E SOLO-CIMENTO-SÍLICA

A produção experimental de tijolos de solo-cimento, com o equipamento disponibilizado, constituiu a etapa seguinte da pesquisa. Os parâmetros de avaliação dos tijolos foram: resistência mecânica, padrões dimensionais, absorção de água e durabilidade.

O procedimento de produção dos tijolos seguiu os preceitos das normas citadas no capítulo de materiais e métodos.

Primeiramente, o solo é seco ao ar até que a umidade permaneça próxima a zero. Após a secagem, o solo é destorroado em peneiras e armazenado.

Para os tijolos de solo-cimento, após a pesagem dos materiais, misturam-se primeiramente o solo e o cimento em argamassadeira até a completa homogeneização e, só então, adiciona-se água à mistura. Depois de algum tempo, a mistura está pronta para ser utilizada na fabricação dos tijolos, sendo que o tempo máximo para utilização após a adição de água é de 1 hora.

Para os tijolos de solo-cimento-sílica, o único diferencial é a sílica ser adicionada juntamente com a água de amassamento. O restante do procedimento é igual aos adotados na fabricação dos tijolos de solo-cimento convencionais.

A primeira constatação feita nos ensaios acessórios de moldagem de tijolos de solo-cimento determinou que, em função do equipamento utilizado, o teor de umidade da mistura necessário para a obtenção de uma boa qualidade dos tijolos é inferior ao teor de umidade ótima para a compactação conforme o ensaio de Proctor. Por exemplo, nas tentativas de se moldar tijolos de misturas de solo-cimento (MSC) com traço em massa de 1:10 e umidade fixada em 10,3%, conforme resultado obtido no ensaio de compactação, os tijolos, embora apresentassem boa condição na moldagem, não permitiam sua manipulação durante a sua retirada do compartimento de moldagem porque destorroavam facilmente.

Para a determinação da umidade ideal para a desmoldagem, prepararam-se misturas com diferentes teores de água em intervalos de 1% a partir de $h = 3\%$ e verificou-se com qual teor o equipamento apresentava uma maior facilidade e eficiência na produção, medida através da quantidade de material, calculada para produzir um certo número de tijolos, e da apuração de qual teor de água na mistura apresentava menor desperdício na confecção do tijolo.

O controle de umidade é determinante na qualidade de materiais à base de solo-cimento. No laboratório, esse controle é relativamente simples, pois o solo encontra-se seco e as condições de trabalho e armazenamento dos materiais garantem a continuidade das

características da matéria-prima do tijolo. No campo, esse controle deve ser sistematicamente realizado a cada dosagem do material antes de se realizar a mistura. Os procedimentos para esse controle, especificamente para as condições de canteiro de obras, encontram-se no ANEXO A.

O resultado dessas determinações fixou o novo teor de umidade de 5% em relação à massa da mistura. Esse valor foi adotado para todos os traços, pois houve pouca variação entre eles.

Assim sendo, o planejamento da pesquisa previa a produção de tijolos nos seguintes traços:

TABELA 7.5 - Denominação de lotes para MSC.

MISTURA DE SOLO-CIMENTO (MSC) – LOTE 1 (L1)	
TRAÇO (1:m)	NOME DO LOTE
1:10	L1A
1:7	L1B
1:12	L1C

TABELA 7.6 - Denominação de lote para MSCSi.

MISTURA DE SOLO-CIMENTO-SÍLICA (MSCSi) – LOTE 2 (L2)	
TRAÇO (1:m)	NOME DO LOTE
1:10	L2A
1:7	L2B
1:12	L2C

O traço de 1:13 anteriormente analisado através de corpos-de-prova cilíndricos foi descartado e substituído pelo traço 1:12, pois, devido à constituição granulométrica bastante arenosa do solo e do baixo teor de cimento do traço, o material não obteve coesão suficiente para ser desmoldado, mas como o intuito da pesquisa era analisar um traço médio, um rico e um pobre em termos de adição de cimento, o traço de 1:12 satisfaz essa proposta. No ANEXO A, são dadas recomendações de traço e de análise prática sobre a aceitação ou não de uma dosagem para a fabricação de tijolos.

Os ensaios realizados nos tijolos foram: determinação da resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Com a finalidade de se observar o comportamento do material ao longo do tempo, adotou-se a seguinte rotina:

Os ensaios de resistência à compressão em tijolos foram realizados, para amostras de cada um dos lotes descritos acima, nas seguintes idades: 3, 7, 14, 28, 63, 91 e 120 dias após a moldagem. Com isso, avaliou-se o ganho de resistência ao longo da idade e compararam-se os desempenhos dos traços diretamente, ou seja, traços MSC entre si e, do mesmo modo, os traços MSCSi. Vale ressaltar que o cimento utilizado para a moldagem dos tijolos foi do tipo CP II E 32.

7.3.1. RESULTADOS DE ENSAIOS NOS LOTES L1 E L2

Os resultados obtidos para os tijolos do LOTE 1, foram os seguintes:

TABELA 7.7 – Evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento (L1).

LOTE	TRAÇO (1:m)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO- f_b (MPa) - NBR 8492						
		f_{b3}	f_{b7}	f_{b14}	f_{b28}	f_{b63}	f_{b91}	f_{b120}
L1A	1:10	1,38	1,78	1,90	2,83	3,37	3,39	3,48
L1B	1:7	1,79	2,31	3,81	4,22	5,55	5,62	5,65
L1C	1:12	0,89	0,97	1,75	2,24	2,92	2,93	2,92

TABELA 7.8 – Coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão.

LOTE	TRAÇO (1:m)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C.V.) DOS VALORES DE f_b (%)						
		f_{b3}	f_{b7}	f_{b14}	f_{b28}	f_{b63}	f_{b91}	f_{b120}
L1A	1:10	10,8	10,7	12,1	13,7	8,5	6,4	3,7
L1B	1:7	8,4	23,3	4,8	6,0	7,1	4,7	3,5
L1C	1:12	9,0	12,2	5,6	5,2	15,2	3,9	1,6

Graficamente pode-se traçar a seguinte representação para os dados acima:

FIGURA 7.1 – Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento.

Da mesma forma, os resultados dos tijolos de solo-cimento-sílica, do LOTE 2 estão apresentados a seguir:

TABELA 7.9 – Evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento-sílica.

LOTE	TRAÇO (1:m)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO- f_b (MPa) - NBR 8492						
		f_{b3}	f_{b7}	f_{b14}	f_{b28}	f_{b63}	f_{b91}	f_{b120}
L2A	1:10	1,45	1,89	1,82	2,39	3,12	3,34	3,70
L2B	1:7	1,84	2,39	2,38	2,78	3,76	3,90	4,19
L2C	1:12	1,01	1,20	1,48	1,85	2,40	2,57	2,82

TABELA 7.10 – Coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão.

LOTE	TRAÇO (1:m)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (C.V.) DOS VALORES DE f_b (%)						
		f_{b3}	f_{b7}	f_{b14}	f_{b28}	f_{b63}	f_{b91}	f_{b120}
L2A	1:10	4,9	12,9	5,2	11,3	1,4	4,3	3,9
L2B	1:7	5,4	8,2	8,3	12,5	6,2	2,0	8,6
L2C	1:12	3,4	2,5	3,8	5,4	7,4	8,2	12,6

Graficamente, a representação dos resultados é a seguinte:

FIGURA 7.2 – Evolução da resistência à compressão em tijolos de solo-cimento-sílica.

Os resultados expostos podem ser analisados também numa comparação direta entre traços solo-cimento e solo-cimento-sílica. Essa análise permite a observação dos diferentes comportamentos da evolução da resistência mecânica ao longo do tempo.

FIGURA 7.3 – Comparação da evolução da resistência à compressão entre os tijolos L1A e L2A.

FIGURA 7.4 – Comparação da evolução da resistência à compressão entre os tijolos L1B e L2B.

FIGURA 7.5 – Comparação da evolução da resistência à compressão entre os tijolos L1C e L2C.

Analisando os resultados apresentados anteriormente pode-se chegar às seguintes considerações:

O teor de cimento é determinante em relação ao aumento da resistência mecânica dos tijolos ensaiados. Observa-se, de acordo com os gráficos expostos que, quanto maior o teor de cimento, maior a resistência à compressão, independentemente da adição ou não de sílica e conseqüentemente, menor a sua absorção de água.

Para os tijolos L1 (MSC), observa-se que apenas o traço 1:7 satisfaz a condição de utilização após a idade de 7 dias, pois responde ao limite mínimo imposto pela NBR 8491. Isso não significa que tijolos produzidos no traço 1:10 não podem ser utilizados em construções, apenas fica restrito o uso desses tijolos antes de 21 dias, no mínimo, pois a resistência característica aos 28 dias já se aproxima de 3,0MPa.

Outro fato interessante a ser observado nos gráficos acima é o aumento significativo da resistência do tijolo produzido com traço MSC 1:7 no período de 7 a 14 dias, evoluindo de uma média de 2,31MPa aos 7 dias, para uma média de 3,81MPa aos 14 dias, ou seja, um aumento de cerca de 65%. Depois desse período, verifica-se um aumento continuado da resistência, porém mais lento e tendendo a uma estabilização aos 63 dias de idade.

O traço MSC 1:12, como era de se esperar, apresentou desempenho inferior aos demais em relação à resistência mecânica. As exigências da norma NBR 8491, somente possibilitariam o uso desse tijolo em idades próximas aos 28 dias, ou então, para utilizá-lo em idades menores, deve-se fazer uso de cimentos CP V ARI. Mesmo assim, é importante salientar que esses resultados foram obtidos em condições de laboratório, ou seja, a cura dos tijolos é controlada em câmara úmida, portanto, quando em condições de armazenamento em canteiros de obra (exposto ao ar), certamente a resistência à compressão tende a ser menor devido à perda de água do material por evaporação.

Como se pode observar nos gráficos comparativos, há uma diferença na resistência à compressão a favor dos traços que contém apenas solo e cimento nas primeiras idades, justificada pelo fato da adição de sílica ser realizada em substituição à massa de cimento, por exemplo, o traço MSCSi 1:10 tem teor de cimento em relação à massa de solo igual a 9%, enquanto que o traço MSC 1:10 tem esse teor fixado em 10%.

Contudo, constata-se que a velocidade de reação dos aglomerantes com o solo é bem mais lenta nos tijolos moldados com sílica. Esse fato é facilmente observado quando se analisa a inclinação da linha do gráfico.

Nos tijolos L2A e L2C, a resistência mecânica em idades avançadas se igualou às alcançadas nos tijolos L1A e L1C. No caso específico da comparação entre L1A e L2A, o segundo chegou a superar o primeiro. A explicação desse fato está relacionada com a sinergia das duas adições (escória e sílica) aliada a um maior teor de água disponível para a hidratação do cimento e conseqüentemente, maior formação de CH.

Os ensaios de absorção de água foram realizados nas seguintes idades: 7, 28 e 91 dias. A finalidade desse procedimento foi avaliar a relação entre ganho de resistência e absorção.

TABELA 7.11 – Evolução da absorção de água em tijolos de solo-cimento

LOTE	TRAÇO (1:m)	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) - NBR 8492		
		<i>1ª determinação</i>	<i>2ª determinação</i>	<i>3ª determinação</i>
		(7dias)	(28dias)	(91dias)
L1A	1:10	14,7	13,3	11,9
L1B	1:7	12,4	11,0	10,4
L1C	1:12	15,9	14,0	13,1

TABELA 7.12 – Evolução da absorção de água em tijolos de solo-cimento-sílica.

LOTE	TRAÇO (1:m)	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) - NBR 8492		
		<i>1ª determinação</i>	<i>2ª determinação</i>	<i>3ª determinação</i>
		(7dias)	(28dias)	(91dias)
L2A	1:10	13,9	13,8	12,9
L2B	1:7	13,6	12,5	11,3
L2C	1:12	13,1	12,7	11,6

TABELA 7.13 – Comparação entre a evolução da resistência mecânica e a absorção de água em tijolos de solo-cimento e solo-cimento-sílica.

LOTES	Período: 7 a 28 dias.		Período: 28 a 91 dias.	
	RESISTÊNCIA (%)	ABSORÇÃO (%)	RESISTÊNCIA (%)	ABSORÇÃO (%)
L1A (MSC 1:10)	+59,0	-10,5	+19,8	-11,8
L1B (MSC 1:7)	+82,7	-12,7	+33,2	-5,7
L1C (MSC 1:12)	+130,9	-13,5	+30,8	-6,9
L2A (MSCSi 1:10)	+26,5	-0,7	+39,7	-7,0
L2B (MSCSi 1:7)	+16,3	-8,8	+40,0	-10,6
L2C (MSCSi 1:12)	+54,2	-3,1	+38,9	-9,5

Quanto à absorção de água, com base nos valores médios obtidos nessas determinações, todos os traços moldados ficaram abaixo dos limites indicados na NBR 8491.

Observa-se que a adição de sílica nas composições dos traços proporcionou uma menor absorção de água aos 7 dias, com exceção do traço MSCSi 1:7, que tem sua determinação cerca de 12% maior que o traço MSC 1:7.

Todos os traços apresentaram uma relação proporcional entre ganho de resistência e diminuição de absorção de água.

Nota-se que nos lotes L1 (A, B e C), há um comportamento linear entre a evolução da resistência e a absorção, o que não ocorre nos tijolos de L2 (A, B e C), pois o tijolo do lote L2A teve um aumento de resistência da ordem de 26% e um decréscimo de absorção quase inexpressivo, enquanto que os de L2B, apesar do aumento de resistência de apenas 16,3% tiveram uma diminuição de absorção de quase 9%.

Os ensaios de durabilidade por meio de determinação de perda de massa após ciclos de molhagem e secagem apresentaram os seguintes resultados:

TABELA 7.14 – Ensaio de durabilidade em tijolos de solo-cimento

LOTE	TRAÇO	DURABILIDADE - NBR 13554				
		<i>Perda de massa (%)</i>	<i>f_{b120} (MPa)</i>	<i>C.V. (%)</i>	<i>f_{b120} (MPa) Controle*</i>	<i>C.V. (%)</i>
L1A	1:10	-1,2	3,30	7,11	3,48	3,07
L1B	1:7	-0,5	5,52	8,93	5,65	3,45
L1C	1:12	-1,7	2,71	12,98	2,92	1,60

* A resistência de controle é aquela dada por amostras do mesmo lote, em condições de cura e que não foram submetidas ao ensaio de durabilidade.

TABELA 7.15 - Ensaio de durabilidade em tijolos de solo-cimento-sílica.

LOTE	TRAÇO	DURABILIDADE - NBR 13554				
		<i>Perda de massa (%)</i>	<i>f_{b120} (MPa)</i>	<i>C.V. (%)</i>	<i>f_{b120} (MPa) Controle*</i>	<i>C.V. (%)</i>
L2A	1:10	-0,1	3,90	0,98	3,70	3,89
L2B	1:7	+0,06	5,02	2,44	4,19	8,55
L2C	1:12	+0,02	3,00	3,02	2,82	12,62

Conforme a ABCP (1980), a perda de massa de tijolos de solo-cimento, depois de submetidos aos ciclos de imersão e secagem, não deve ser superior a 10%. Constatou-se, portanto, que todos os traços foram aprovados em relação a esse limite.

Nos tijolos de solo-cimento (L1), a resistência à compressão daqueles submetidos aos ciclos de imersão e secagem é inferior quando comparada com tijolos do mesmo lote e da mesma idade que não foram submetidos ao ensaio de durabilidade. Além disso, todos os tijolos ensaiados quanto à durabilidade apresentaram perda de massa ao longo da realização dos ciclos.

Nos tijolos de solo-cimento-sílica (L2), a resistência à compressão dos tijolos que foram submetidos aos ciclos de imersão e secagem é maior que os tijolos L2 de controle na idade de 120 dias. Esse efeito também foi observado por CARNEIRO et al. (2001), que utilizou agregado reciclado na composição de tijolos de solo-cimento. Tal agregado, assim como a sílica, apresenta características pozolânicas e o autor supõe que o processo de imersão e secagem, em tijolos compostos com esse tipo de adição, acarreta melhoria e modificações no processo de hidratação, aumentando a resistência mecânica dos tijolos.

7.4. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE NA MISTURA COMPACTADA

Após a produção dos tijolos, foram novamente realizados ensaios acessórios em corpos-de-prova cilíndricos, com a finalidade de se comparar a influência da umidade de compactação na resistência mecânica da mistura.

Observa-se, por exemplo que, na MSC 1:10, com 10,3% de umidade (umidade ótima), o compósito alcança uma massa específica na ordem de $2,23\text{g/cm}^3$, enquanto que com 5% de umidade esse valor é menor que $2,00\text{g/cm}^3$, já que com 6% de umidade apresenta massa específica de $2,03\text{g/cm}^3$.

O resultado do ensaio permitiu comparar resistência mecânica e absorção de água nas misturas de solo-cimento e solo-cimento-sílica utilizadas para a fabricação de tijolos sob os efeitos da redução e/ou do aumento da relação água/cimento e, conseqüentemente, da influência da massa específica da mistura compactada nos parâmetros analisados.

Tais constatações são relevantes, pois apontam fatores determinantes para o desenvolvimento de equipamentos que possam operar com teores adequados de umidade e menores consumos de cimento para uma resistência mecânica desejada.

Foram moldados 10 corpos-de-prova de cada traço, sendo que 7 foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão e os 3 restantes foram destinados ao ensaio de

absorção de água. O cimento utilizado foi do tipo CP V ARI Plus e os ensaios foram realizados na idade de 7 dias. Cabe ressaltar que a mudança do tipo de cimento não provocou alterações significativas no teor de umidade ótima de compactação aferida no ensaio de Proctor.

TABELA 7.16 - Ensaio de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento Comparação entre umidade ótima e umidade de operação.

TRAÇO (1:m)	MSC UMIDADE ÓTIMA				MSC UMIDADE 5%			
	MASSA	ρ	f_{sc7}	C.V.	MASSA	ρ	f_{sc7}	C.V.
	(g)	(g/cm ³)	(MPa)	(f_{sc7}) (%)	(g)	(g/cm ³)	(MPa)	(f_{sc7}) (%)
1:10	445,2	2,22	9,8	3,26	389,6	1,95	5,0	8,56
1:7	446,4	2,23	14,9	2,80	391,2	1,95	6,0	6,82
1:12	444,6	2,21	7,4	5,80	387,1	1,94	4,8	11,17

Nota-se que em todos os traços MSC, a redução do teor de umidade e, conseqüentemente, da massa específica do corpos-de-prova, proporcionou uma perda significativa da resistência à compressão do material.

Nos traços com menor consumo de cimento (1:10 e 1:12), essa redução é cerca de 25% em relação aos traços na umidade ótima de compactação. Contudo, no traço 1:7, a perda da resistência é da ordem de 65%, acarretando em resistências comparáveis às obtidas com traços de menor consumo de cimento. Ao que tudo indica, no traço 1:7, a umidade reduzida foi insuficiente para hidratar grande parte do cimento presente no material, ou seja, há partículas de cimento parcialmente hidratadas atuando simplesmente como agregado na mistura.

Cabe observar que a resistência do corpo-de-prova cilíndrico é maior – para um mesmo traço - que a resistência do tijolo produzido. O próprio processo de moldagem e compactação, que no caso é realizado em três camadas sucessivas e com a aplicação de uma energia constante e bastante uniforme, é o fator que garante melhor resultado.

Os resultados para as MSCSi foram semelhantes aos das MSC. Vale observar que para os traços 1:10 e 1:12 na umidade ótima de compactação, as resistências alcançadas pelas MSCSi foram menores (de 20% a 25%) que as MSC de mesmo traço.

Entretanto, os traços 1:7 MSC e MSCSi têm, praticamente, a mesma resistência, apesar do menor teor de cimento presente em MSCSi, o que confirma que a resistência atingida é função do empacotamento dos grãos e que a adição de sílica não promove, nesse

momento, incrementos na resistência mecânica. Os resultados das MSCSi estão representados na seguinte tabela:

TABELA 7.17 - Ensaio de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos de misturas de solo-cimento-sílica. Comparação entre umidade ótima e umidade de operação.

TRAÇO (1:m)	MSCSi UMIDADE ÓTIMA				MSCSi UMIDADE 5%			
	MASSA	ρ	f_{sc7}	C.V.	MASSA	ρ	f_{sc7}	C.V.
	(g)	(g/cm ³)	(MPa)	(f_{sc7}) (%)	(g)	(g/cm ³)	(MPa)	(f_{sc7}) (%)
1:10	441,4	2,22	7,7	3,53	387,8	1,94	4,9	6,73
1:7	446,0	2,24	14,8	3,63	381,7	1,91	5,9	5,52
1:12	442,0	2,21	6,3	7,26	381,5	1,91	4,5	12,95

A tabela 7.18 demonstra os resultados de absorção de água para as misturas analisadas:

TABELA 7.18 - Absorção de água em misturas MSC e MSCSi na umidade ótima de compactação e na umidade de 5% e a diferença percentual entre tais determinações.

MISTURA	TRAÇO (1:m)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) – Valores médios.		
		UMIDADE ÓTIMA (h)	UMIDADE 5% (h ₅)	DIFERENÇA
				PERCENTUAL (%)*
MSC	1:10	7,6	11,8	55,2
	1:7	7,0	10,2	45,7
	1:12	8,1	12,4	53,1
MSCSi	1:10	7,9	10,5	32,9
	1:7	6,4	11,3	76,5
	1:12	8,2	11,8	43,9

* a diferença percentual é dada por: $[(h_5-h) / h] \times 100$.

Assim como para a resistência à compressão, os valores de absorção de água para misturas na umidade ótima são menores, independentemente do traço.

7.5. PRODUÇÃO DE TIJOLOS PARA A EXECUÇÃO DE PAINÉIS DE ALVENARIA

A etapa seguinte do trabalho foi a produção de tijolos para a execução e ensaios de painéis de parede de alvenaria estrutural. Escolheu-se, entre os traços estudados, aquele que comprovou ter o melhor desempenho mecânico, portanto tijolos L1B – MSC 1:7.

O método de produção dos tijolos sofreu uma modificação bastante expressiva em relação ao anteriormente descrito, devido ao uso do TRITURADOR JAG-5000. A mistura de solo-cimento foi preparada da mesma forma que os procedimentos anteriores, porém, quando já homogeneizada com a água de amassamento, esta foi pulverizada pelo triturador. A utilização desse equipamento permitiu aumentar em 1,5% o teor de umidade ideal para a desmoldagem do tijolo, pois quando se pulveriza a mistura, torna-se possível uniformizar ainda mais a distribuição da umidade na mistura.

Esses novos tijolos foram produzidos com cimento CP V ARI Plus. A adoção de um cimento mais fino e com propriedades tecnológicas pertinentes (maior proporção de clínquer) contribuiu para a melhoria do comportamento mecânico dos tijolos.

Foram produzidos cerca de 1.200 tijolos, e esse novo lote teve a denominação LOTE 3 (L3). Parte desses tijolos compuseram três painéis de parede com dimensões de 1,20m x 2,40m, de acordo com as especificações da NBR 8949. A outra parte foi submetida a ensaios complementares de prismas compostos por dois e três tijolos com diferentes técnicas de assentamento.

As figuras abaixo demostram o processo de fabricação dos tijolos:

FIGURA 7.6 - Betoneira de eixo vertical utilizada para a homogeneização da mistura.

FIGURA 7.7 - Início da fabricação. Abertura do compartimento de moldagem.

FIGURA 7.8 - Molde preenchido com a mistura. Nota-se que o mecanismo de abastecimento permite rasar o molde.

FIGURA 7.9 - Vista da máquina no momento do preenchimento do molde.

FIGURAS 7.10 e 7.11 – Prensagem. Início do curso da alavanca.

FIGURA 7.12 - Fim do curso da alavanca. Ponto de máxima compactação da mistura.

FIGURA 7.13 – Retorno da alavanca, abertura do molde e retirada do tijolo.

FIGURA 7.14 - Manuseio e desmoldagem do tijolo produzido.

FIGURAS 7.15 e 7.16: Vista geral da produção e estocagem dos tijolos.

7.5.1. RESULTADOS DE ENSAIOS NO LOTE L3

Os novos tijolos produzidos foram submetidos aos seguintes ensaios:

TABELA 7.19 – Programação de ensaios dos tijolos produzidos para a execução de painéis de parede, indicando a quantidade de tijolos em cada ensaio em diversas idades.

ENSAIO	PROCEDIMENTO	IDADES DOS TIJOLOS (dias)	N.º DE TIJOLOS A CADA ENSAIO
Verificação dimensional	Medida individual	7	10
Resistência à compressão	NBR 8492	7 e 28	6 (total 12)
Absorção de água	NBR 8492	7 e 28	3 (total 6)

Os seguintes resultados foram observados e estão apresentados na Tabela 7.20:

TABELA 7.20 – Resultados de ensaios em L3 (MSC 1:7).

LOTE	TRAÇO (1:m)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - f_b (MPa) - NBR 8492			
		f_{b7}	C.V. (%)	f_{b28}	C.V. (%)
L3	1:7	5,25	2,2	6,91	5,2
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) - NBR 8492					
		1. ^a determinação (7dias) - média		2. ^a determinação (28dias) - média	
L3	1:7	10,3		8,9	

Nota-se que os resultados foram significativamente melhores que os obtidos anteriormente, devido à adoção do novo método de mistura (utilização do TRITURADOR JAG 5000) alterando-se o teor de umidade de 5% para 6,5%. Para uma melhor visualização, pode-se avaliar a seguinte tabela:

TABELA 7.21 – Comparação de resultados de ensaios em L1B e L3 (MSC 1:7).

LOTE	MSC TRAÇO (1:m)	UMIDADE (%)	TIPO DE CIMENTO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) NBR 8492	
				f_{b7}	f_{b28}
L1B	1:7	5	CP II E	2,31	4,22
L3	1:7	6,5	CP V ARI	5,25	6,91
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) – NBR 8492					
				1. ^a determinação (7dias)	2. ^a determinação (28dias)
L1B	1:7	5	CP II E	12,4	11,0
L3	1:7	6,5	CP V ARI	10,3	8,9

Mesmo quando comparados os valores das resistências e da absorção de tijolos L1B em idade mais avançada, os resultados são inferiores aos obtidos com L3 aos 28dias. Por exemplo, a média de resistência à compressão de L1B aos 91dias é de 5,62MPa e a absorção

de água é de 10,4%, enquanto que L3 aos 28 dias já apresenta 6,91MPa de resistência (valor cerca de 23% maior) e absorção de 8,9% (resultado 15% menor).

7.6. EXECUÇÃO DE PAINÉIS DE ALVENARIA

Executaram-se três painéis de alvenaria, compostos com tijolos do lote L3 com a finalidade de avaliar o comportamento estrutural das paredes submetidas à compressão axial. Na mesma ocasião, foram preparados tijolos, prismas compostos por dois e três tijolos (assentados com argamassa e também a seco) e corpos-de-prova cilíndricos da argamassa de assentamento. Os procedimentos adotados estão descritos na NBR 8949/85 – *Paredes de alvenaria estrutural. Ensaio à compressão simples*.

As paredes foram construídas no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Estruturas e protegidas da incidência direta da luz solar e de ventos, permanecendo dentro das condições de umidade e temperatura estabelecidas pela NBR 8949. Fez-se uso de fio de prumo, régua e nível para garantir a boa verticalidade dos painéis. Os tijolos foram assentados em amarração, sem grauteamento nem uso de cintas de amarração. As dimensões das paredes foram de 1,20m x 2,40m x 0,10m (largura x altura x espessura).

Os tijolos modulares analisados podem ser assentados a seco, ou seja, pela simples justaposição dos mesmos devido aos encaixes que permitem a amarração direta entre os componentes. Contudo, TANGO (1990) afirma que tal assentamento pode acarretar algumas implicações relacionadas à precisão dimensional e à perfeição dos encaixes, que diminuem o desempenho da alvenaria. O uso da argamassa de assentamento nesses tijolos é executado pela deposição de um filete de cola bastante fluída, aplicada com uma bisonha na superfície dos tijolos, sendo que a espessura da junta de assentamento é função do diâmetro máximo do agregado (algo em torno de 1mm) e que se faz necessária a adição de adesivos para garantir a aderência entre os tijolos e a argamassa.

A argamassa, além de unir os tijolos, quando devidamente aplicada, garante uma melhor transmissão dos esforços e regularização das imperfeições dimensionais dos encaixes dos tijolos. Portanto, é recomendável a utilização da argamassa de assentamento.

Na confecção das paredes utilizou-se uma argamassa composta por cimento Portland, cola branca PVA e solo peneirado (o mesmo solo empregado nos tijolos porém constituído pela fração que passa na peneira ABNT # 16 ou 1,3mm). O traço foi obtido pela observação de parâmetros nas propriedades nos estados fresco e endurecido, embora não existam normas para a determinação do traço da argamassa de assentamento nas condições

específicas dos tijolos estudados. Adotou-se um traço em massa 1:0,25:3 (cimento:PVA:solo) que satisfaz as condições determinadas na norma da *American Society for Testing and Materials* ASTM – C270-82 (*Mortar for Unit Masonry*), quanto à composição e proporção volumétrica entre agregados e aglomerantes.

Em seguida, verificou-se o teor de água necessário na argamassa utilizando-se materiais e métodos especificados na norma ABNT NBR 7215 através da mesa de consistência. O abatimento necessário para a boa trabalhabilidade e aplicação com a bisnaga foi de aproximadamente 280mm e, para tanto, a relação água/cimento foi aferida em 0,70kg/kg, parâmetro que também se enquadra nas recomendações de ABCI (1990) e FIORITO (1994), que estipulam um teor máximo de 0,80kg/kg.

As figuras à seguir demonstram a execução dos painéis:

FIGURA 7.17 – Início da execução dos painéis. Nota-se que a primeira fiada foi assentada sobre argamassa de cimento e areia para regularização da superfície.

FIGURA 7.18 – Método de adição do PVA diluído na água de amassamento.

FIGURA 7.19 – Detalhe da aplicação da argamassa com a utilização de bisnaga.

FIGURA 7.20 – Detalhe do filete de argamassa na superfície do tijolo.

FIGURA 7.21 – Assentamento.

FIGURA 7.22 – Detalhe da espessura da junta de argamassa e friso dos tijolos.

FIGURA 7.23 – Execução de prismas compostos por dois tijolos.

FIGURA 7.24 – Prismas compostos por três tijolos.

FIGURA 7.25 – Vista geral dos corpos-de-prova de prismas e argamassa.

FIGURA 7.26 – Execução dos painéis.

FIGURA 7.27 – Visão da prumada.

FIGURA 7.28 – Etapa final da execução dos painéis.

FIGURA 7.29 – Elevação do painel terminado.

Observou-se, durante a execução das paredes, um baixo consumo de argamassa e uma boa produtividade da mão-de-obra. Foram produzidos aproximadamente 5kg de argamassa por “massada” e o seu rendimento foi de aproximadamente $0,84\text{m}^2$ (consumo de $5,95\text{kg}/\text{m}^2$). Os painéis, que totalizaram $8,7\text{m}^2$, foram construídos em 8 horas de trabalho, o que resultou na produção de aproximadamente $1,1\text{m}^2/\text{hora}$ de trabalho.

Comparando tais dados com a execução de uma alvenaria de tijolos de barro cozido à vista, com um traço de argamassa de assentamento em volume de 1:2:8 (cimento, cal e areia), o consumo aproximado de argamassa é de $43,4\text{kg}/\text{m}^2$ e a produtividade é de

aproximadamente $0,5\text{m}^2/\text{hora}$ de trabalho, conforme ABCI (1990) e ABCP (sd), o que comprova a maior produtividade da alvenaria de tijolos modulares.

Depois do término da execução das paredes, realizou-se o capeamento dos topos dos painéis com argamassa de cimento e areia traço 1:3 (em massa), com espessura de 1,5cm, para regularizar e nivelar a superfície em contato com a viga de distribuição, garantindo uma boa disseminação dos esforços no momento da aplicação de carga.

A instrumentação das paredes seguiu as orientações da NBR 8949, porém com algumas modificações que visavam coletar mais dados para as análises dos resultados, permitindo uma melhor visualização da deformabilidade das paredes quando carregadas. A figura abaixo demonstra esquematicamente a disposição e a quantidade de transdutores utilizados.

FIGURA 7.30 – Esquema da instrumentação das paredes.

Os transdutores 1, 2, 3 e 4 medem a deformação no centro da parede, já os transdutores 5 e 6 medem a deformação de toda a extensão da altura da parede (com os

descontos devido ao posicionamento das cantoneiras) e, por fim, o transdutor 7 mede o deslocamento horizontal do topo do painel, aferindo movimentações devido à excentricidade e imperfeições de prumo durante a aplicação do carregamento.

As figuras abaixo demonstram com maiores detalhes a instrumentação do ensaio:

FIGURA 7.31 – Vista geral das paredes e do pórtico de reação.

FIGURA 7.32 – Detalhe da viga de distribuição, macacos e viga de reação.

FIGURA 7.33 – Detalhes: viga de distribuição, macacos e da célula de carga.

FIGURA 7.34 – Detalhe do capeamento e da fixação da cantoneira no topo do painel.

FIGURA 7.35 – Transdutor da base.

FIGURA 7.36 – Transdutor do topo.

FIGURA 7.37 – Transdutores (relógios comparadores) da face da parede.

Utilizou-se o sistema de aquisição de dados SYSTEM 5000 conectado aos transdutores e às células de carga. As leituras foram gravadas em intervalos sucessivos em função da estabilização do carregamento aplicado. Antes da aplicação de carga até a ruptura, foram realizadas duas descargas durante o ensaio (descarregamentos na mesma velocidade e condições de aplicação do carregamento), para o acomodamento da parede. Essas descargas, segundo a NBR 8949 devem ser realizadas quando o carregamento estiver em valores próximos a 50% da carga de ruptura provável.

7.6.1. RESULTADOS DE ENSAIOS NOS PAINÉIS, TIJOLOS, PRISMAS E ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Os ensaios dos tijolos, prismas e argamassa foram realizados no mesmo dia dos ensaios das respectivas paredes. A ruptura das paredes e os demais ensaios ocorreram aos 47, 48 e 55 dias após a execução dos painéis, sendo que, durante esse período, os prismas permaneceram no local e nas mesmas condições dos painéis de parede e os corpos-de-prova da argamassa foram submetidos a cura úmida.

Os seguintes resultados foram obtidos:

TABELA 7.22 – Resultados do ensaio de compressão simples em paredes

PAREDE	Idade (dias)	CARGA DE RUPTURA (kN)	TENSÃO PAREDE f_{pa} (MPa)	1ª descarga (kN)	2ª descarga (kN)	δ * (mm)	E** (GPa)
1	55	222	1,9	120	140	0,09	4,82
2	47	329,7	2,7	140	140	0,14	7,04
3	48	364,6	3,0	120	140	0,24	6,74
MÉDIA		305,5	2,5	-	-	0,16	6,2

* O encurtamento refere-se à média dos transdutores 1, 2, 3, 4, 5 e 6

** O módulo de elasticidade foi calculado pela média dos transdutores (1, 2, 3 e 4) e (5 e 6) de acordo com a metodologia sugerida pelo *American Concrete Institute – ACI [Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-92/ASCE 5-92/TMS 402-92)]*.

O resultado de resistência à compressão da PAREDE 1 foi muito diferente dos resultados das duas paredes restantes e não pode ser considerado como representativo, pois alguns danos ocorreram no sistema de aquisição de dados que não permitiram o controle de velocidade de aplicação de carga para uma leitura adequada do carregamento, fato que acarretou no rompimento precoce do topo do painel.

Observou-se uma boa distribuição de esforços nas paredes, fato que foi comprovado pela simetria das fissuras da face e da contraface dos painéis. Antes da ruptura não houve ocorrência de fissuras nem destacamentos ou esfrelamentos dos tijolos. O sistema de aplicação de carga e o capeamento se mostraram eficientes na transmissão dos esforços.

A deformação das paredes foi muito pequena e a ruptura dos painéis foi frágil. São necessárias mais avaliações para comprovar a influência da rigidez da argamassa de

assentamento no comportamento estrutural da parede, mesmo nas condições específicas desses tijolos, em que a junta é milimétrica.

É importante salientar também que não foram executadas cintas de amarração e não se fez uso de grauteamento. Tais medidas podem contribuir para uma melhor distribuição de esforços e permitir um comportamento mais elástico da parede, mas é preciso realizar mais experimentações antes de se afirmar tais benefícios.

As figuras a seguir demonstram o modo de ruptura das paredes e os gráficos de tensão/deformação obtido pelas leituras dos transdutores:

FIGURA 7.38 (acima) – Detalhe da ruptura do topo da parede 1.

FIGURA 7.39 (ao lado) – Detalhe da ruptura e da propagação de fissuras do topo da parede 1.

FIGURA 7.40 – Gráfico tensão/deformação com base na média das leituras dos transdutores (1, 2, 3 e 4) e (5 e 6) da parede 1.

FIGURA 7.41 – Gráfico tensão/deformação com base na leitura do transdutor 7 da parede 1.

FIGURA 7.42 – Ruptura e configuração das fissuras na face da parede 2.

FIGURA 7.43 – Ruptura e configuração das fissuras na contraface da parede 2.

Comentário: As fissuras da face e da contraface são simétricas o que confirma a boa distribuição dos esforços.

FIGURA 7.44 – Gráfico tensão/deformação com base na média das leituras dos transdutores (1, 2, 3 e 4) e (5 e 6) da parede

2.

FIGURA 7.45 – Gráfico tensão/deformação com base na leitura do transdutor 7 da parede 2.

FIGURA 7.46 – Ruptura e configuração das fissuras na face da parede 3.

FIGURA 7.47 – Ruptura e configuração das fissuras na contraface da parede 3.

FIGURA 7.48 – Gráfico tensão/deformação com base na média das leituras dos transdutores (1, 2, 3 e 4) e (5 e 6) da parede 3.

FIGURA 7.49 – Gráfico tensão/deformação com base na leitura do transdutor 7 da parede 3.

Os resultados obtidos demonstram, por meio da análise comparativa dos gráficos das leituras dos transdutores 7 das paredes, que a parede 3 sofreu menores efeitos devido à

excentricidade do carregamento originada pela imperfeição de prumo e que, sendo assim, suportou maior carga.

As imperfeições de prumo, a disposição adequada da argamassa de assentamento, a mão-de-obra e o próprio contato entre as faces dos tijolos propiciam uma gama de variáveis que necessitam de um melhor equacionamento, pois tais fatores contribuem para um deslocamento de centro de gravidade do painel e, conseqüentemente, uma concentração de tensões em determinados trechos da parede.

Contudo, os resultados foram satisfatórios, principalmente das paredes 2 e 3, nas quais verificou-se a configuração simétrica das fissuras da face e da contraface das paredes, confirmando uma boa distribuição do carregamento e o sucesso dos procedimentos adotados.

O comportamento das paredes 2 e 3, apesar do modo de ruptura e a ocorrência de fissuras diferentes, foram bastante semelhantes em termos de resistência à compressão e deformabilidade.

No ANEXO C os gráficos tensão/deformação das paredes são apresentados de maneira mais completa, onde são incluídas as linhas de tendência e as respectivas equações que as representam.

Os resultados dos corpos-de-prova de prismas compostos por dois e três tijolos (assentados com argamassa ou somente encaixados) e da argamassa de assentamento são expostos na tabela 7.23:

TABELA 7.23 – Resultados de ensaio de resistência à compressão de prismas e argamassa de assentamento.

PAREDE	Idade (dias)	TENSÃO	PRISMAS ASSENTADOS		C.P. A.*	PRISMAS ASSENTADOS A		
		PAREDE	COM ARGAMASSA			SECO		
		f_{pa}	f_{pm} (MPa)	f_{pm} (MPa)		f_{am}	f_{pm} (MPa)	f_{pm} (MPa)
		(MPa)	2 tijolos	3 tijolos		(MPa)	2 tijolos	3 tijolos
1	55	1,9	8,0	6,0	14,7	5,6	4,2	
2	47	2,7	7,2	6,2	15,4	5,6	4,5	
3	48	3,0	7,9	6,3	16,0	5,4	4,3	

* C.P.A. refere-se aos corpos-de-prova cilíndricos da argamassa de assentamento;

- a nomenclatura *m* refere-se ao valor médio das determinações obtidas.

TABELA 7.24 – Coeficiente de variação (C.V.) dos resultados de ensaio de resistência à compressão de prismas e argamassa de assentamento.

PAREDE	Idade (dias)	TENSÃO PAREDE <i>f_{pa}</i> (MPa)	PRISMAS ASSENTADOS COM ARGAMASSA		C.P. A. <i>C.V.</i> (<i>f_{am}</i>)(%)	PRISMAS ASSENTADOS A SECO	
			<i>C.V. (f_p) (%)</i>			<i>C.V. (f_p) (%)</i>	
			<i>2 tijolos</i>	<i>3 tijolos</i>		<i>2 tijolos</i>	<i>3 tijolos</i>
1	55	1,9	11,8	4,7	6,6	7,7	9,2
2	47	2,7	12,3	7,3	2,8	8,9	7,3
3	48	3,0	16,8	3,9	4,7	7,5	7,5

Nota-se que, em comparação à resistência à compressão dos tijolos, os valores de resistência dos prismas compostos por dois tijolos assentados com argamassa são bastante próximos, enquanto que os prismas de dois tijolos assentados a seco possuem resistência significativamente inferior (redução de 30%). Da mesma forma, os prismas de três tijolos assentados com argamassa tem maior resistência (também em torno de 30%) em comparação aos prismas de três tijolos somente encaixados.

Esses resultados confirmam que a presença da argamassa, mesmo nessa minúscula espessura, realmente contribui para um melhor desempenho estrutural da parede, distribuindo de maneira eficiente os esforços durante o carregamento.

Quanto ao comportamento dos prismas quando carregados, a presença da argamassa também distingue o modo de ruptura dos corpos-de-prova. Nos prismas compostos por tijolos somente encaixados, as fissuras começam a surgir quando o implemento de carga se encontra entre 25% e 30% da carga de ruptura, sendo que quando o carregamento se aproxima de 50% a 60% do limite máximo, há o destacamento e esfarelamento das faces dos tijolos.

Nos prismas assentados com argamassa, as fissuras começam a surgir quando a carga aplicada está bastante próxima à da ruptura e não há, de maneira geral, esfarelamento nem destacamento das faces dos tijolos no decorrer do carregamento.

Essas observações são explicadas pelas milimétricas diferenças dimensionais dos encaixes dos tijolos e da rugosidade da superfície com pequenas imperfeições que provocam concentrações de tensões durante a aplicação da carga.

As figuras abaixo demonstram os modos de ruptura típicos em prismas com e sem argamassa.

FIGURA 7.50 – Ruptura de prisma assentado com argamassa. Nota-se a formação do tronco de cone e propagação vertical da fissura.

FIGURA 7.51 – Ruptura de prisma assentado a seco. Observou-se o destacamento das faces do tijolo central do prisma.

FIGURA 7.52 – Ensaio de prisma assentado a seco. Nota-se o destacamento da face do tijolo.

FIGURA 7.53 – Ruptura de prisma assentado a seco.

Consideradas as tensões de ruptura da parede dos prismas compostos por dois e três tijolos e dos tijolos, pode-se traçar o seguinte quadro:

TABELA 7.25 – Comparação dos valores de resistência à compressão das paredes e dos prismas em relação à resistência dos tijolos.

TIJOLOS f_{b119m} (MPa) (ref.)	PAREDE	TENSÃO PAREDE f_{pa} (MPa)		f_{pm} (MPa) PRISMAS ASSENTADOS COM ARGAMASSA				f_{pm} (MPa) PRISMAS ASSENTADOS A SECO			
		f_{pa} f_{pa}/f_{bm}		2 tijolos		3 tijolos		2 tijolos		3 tijolos	
				f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}	f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}	f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}	f_{pm}	f_{pm}/f_{bm}
8,3	1	1,9	0,23	8,0	0,96	6,0	0,72	5,6	0,67	4,2	0,51
	2	2,7	0,33	7,2	0,87	6,2	0,74	5,6	0,67	4,5	0,54
	3	3,0	0,36	7,9	0,95	6,3	0,76	5,4	0,65	4,3	0,52

Calculou-se a eficiência da parede e dos prismas em comparação a resistência à compressão do tijolo (referência): $e = f / f_{b119m}$

A comparação dos valores de resistência à compressão da tabela acima comprova fatos importantes na elaboração de projetos com tijolos modulares 10 x 20:

1º) O efeito do confinamento causado pela relação altura/espessura do corpo-de-prova, quando carregado no prato da prensa, interfere na interpretação do resultado de resistência de prismas. Assim, como foi observado, o prisma de dois tijolos tem uma resistência à compressão bastante próxima a do tijolo e não é recomendada para efeito de cálculo, pois apresenta relação altura/espessura =1;

2º) O melhor método de determinação da capacidade portante da alvenaria de tijolos modulares é através do ensaio de resistência à compressão de paredes. A utilização de parâmetros baseados simplesmente em ensaios em tijolos não é amplamente confiável, apesar de existirem sugestões de correlações entre tais resultados, conforme CARNEIRO (1968), GARCIA (2000) e TANGO (1990);

3º) Os resultados da eficiência da parede em relação ao tijolo se assemelham aos resultados expostos por GARCIA (2000), mas que se referem à paredes de blocos cerâmicos estruturais. De maneira geral, a eficiência da parede de blocos cerâmicos (f_{pa} / f_b) é em torno de 0,35.

4º) A existência de argamassa de assentamento exerce grande influência na resistência dos prismas e consequentemente da parede.

7.7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos permitem algumas análises

7.7.1. ENSAIOS EM CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE MSC E MSCSI

Os ensaios em corpos-de-prova cilíndricos permitem um bom suporte para a escolha da composição de traço e das variáveis que cercam a natureza do compósito, ou seja, teor de cimento e a influência do teor de umidade. Por meio dos ensaios de compactação, resistência à compressão e absorção de água em misturas, viabilizaram-se análises sobre a interferência do equipamento de produção dos tijolos. Algumas observações devem ser consideradas:

- quanto maior o teor de cimento, maior a resistência à compressão;
- para um mesmo teor de cimento, o teor de umidade exerce grande influência no comportamento mecânico da mistura e qualquer variação da umidade em direção ao teor ótimo, mesmo que pequena, traz conseqüências muito favoráveis em termos de resistência mecânica, absorção de água e durabilidade;

- o ensaio de compactação, além de aferir a umidade ótima, pode auxiliar na eventual composição granulométrica de solos para promover uma estabilização física (melhor empacotamento dos grãos compactados), pois possibilita medir a densidade da mistura compactada. Esse caso se aplica quando o solo disponível for muito argiloso, por exemplo, e for necessária a adição de areia.
- os métodos de dosagem visam determinar o teor de cimento, mas o controle tecnológico do material deve ser realizado pela fixação de um teor de umidade adequado para a utilização.

7.7.2. OS TIJOLOS PRODUZIDOS

Os tijolos produzidos propiciaram observações interessantes quando avaliadas diante dos parâmetros estabelecidos na NBR 8491 e NBR 8492. É preciso deixar claro que não existe norma específica para o tijolo modular. Diante das avaliações de resistência à compressão, utilizando-se o cimento CP II E 32 (mais disponível no mercado nacional), somente os traços L1B e L2B possibilitam a utilização aos sete dias de idade.

Mesmo assim, analisando-se a evolução da resistência à compressão dos tijolos ao longo de tempo, verificou-se que a resistência aos sete dias apresenta-se em um patamar inicial no processo de hidratação do cimento, visto que nos lotes L1 (MSC) a estabilidade da resistência do tijolo começou a ocorrer aos 63 dias de idade, mas aos 28 dias a resistência à compressão já se encontrava próxima de 75% da alcançada aos 120 dias.

Nos lotes L2 (MSCSi) esse comportamento também foi observado, porém ainda aos 120 dias a resistência à compressão era ascendente e isso está demonstrado na análise gráfica da evolução da resistência da FIGURA 7.2. Tudo indica que a adição de sílica alterou a cinética das reações de hidratação do cimento, o que impossibilita comparações com os tijolos do lote L1 em mesmas idades. Por exemplo, aos 28 dias, os valores de resistência à compressão desses tijolos encontram-se próximos de 65% da resistência alcançada aos 120 dias, que ainda crescia.

Tais constatações fizeram surgir a curiosidade de se fazer ensaios em idades ainda mais avançadas e que foram possíveis devido ao excedente de tijolos moldados. Foram realizados ensaios de resistência à compressão em tijolos dos lotes L1 e L2 e os resultados estão demonstrados na tabela 7.26:

TABELA 7.26 – Resistência à compressão de tijolos dos lotes L1 e L2 em idades avançadas (próximas de 1 ano).

LOTE	TRAÇO (1:m)	Nº DE AMOSTRAS	f_{bm} (MPa) NBR 8492	GANHO DE RESISTÊNCIA (%)*	
L1A	1:10	6	f_{b120}	3,48	9,1
		3	f_{b361}	3,80	
L1B	1:7	6	f_{b120}	5,65	10,6
		2	f_{b357}	6,25	
L1C	1:12	6	f_{b120}	2,92	-
		Nc	-	-	
L2A	1:10	6	f_{b120}	3,70	27,5
		3	f_{b354}	4,72	
L2B	1:7	6	f_{b120}	4,19	30,0
		3	f_{b353}	5,45	
L2C	1:12	6	f_{b120}	2,82	26,6
		2	f_{b349}	3,57	
* o ganho de resistência no período é dado por f_b / f_{b120}					

Esses resultados confirmam que a presença da sílica ativa é benéfica na constituição do solo-cimento e, conforme se observou, sua ação foi mais eficaz nos lotes L2A e L2C, onde havia mais água disponível na mistura. A resistência à compressão dos tijolos pertencentes a esses lotes superou os lotes L1A e L1C, apesar de conterem 10% a menos de cimento na sua composição.

O cimento CP V ARI Plus, por conter maior teor de clínquer, e consequentemente maior liberação de hidróxido de cálcio, possui ótimo potencial de utilização na tecnologia da fabricação do tijolo de solo-cimento. Como foi exposto na revisão bibliográfica, a utilização de cimentos com elevada saturação de cal, além de neutralizar os efeitos nocivos da presença de matéria orgânica, pode promover um ambiente químico instável e alcalino (pH elevado) na interface dos grãos de solo com a pasta de cimento e acarretar, aliada a outros fatores como disponibilidade de água e altas temperaturas, o ataque à sílica e à alumina da fração argilosa do solo, formando silicatos e aluminatos estáveis e de grande contribuição para o ganho de resistência do material. Essas reações ocorrem por longos períodos e a utilização desse tipo de cimento pode ser benéfica em solos argilosos.

A utilização do cimento CP V ARI Plus no lote L3 possibilitou algumas alterações no que diz respeito à condição de manuseio, transporte e utilização do tijolo, conforme ilustra a tabela abaixo:

TABELA 7.27 – Progressão da resistência à compressão e condição de utilização do tijolo após a moldagem em função da idade e do tipo de cimento.

PROGRESSÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO APÓS A MOLDAGEM				
TIPO DE CIMENTO	IDADE (DIAS)	% DE RESISTÊNCIA ADQUIRIDA*	CONDIÇÃO DO TIJOLO	IDADE (DIAS) DE INÍCIO DE ESTABILIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA.
CP II E 32	7	45%	TRANSPORTE	63
	28	75%	UTILIZAÇÃO	
CP V ARI	3	45%	TRANSPORTE	28
	7	63%	UTILIZAÇÃO	
	28	83%	UTILIZAÇÃO	

* Valores aproximados dos tijolos dos lotes L1(A, B e C) e L3 estimados em relação à resistência à compressão na idade de 120dias.

7.7.3. A ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA E A UTILIZAÇÃO DE OUTROS MATERIAIS NA TECNOLOGIA DO SOLO-CIMENTO

Os resultados apontam que a adição de sílica foi favorável, promovendo resistências mecânicas muito boas e superando em alguns casos a resistência dos tijolos compostos apenas por solo e cimento. Vale ressaltar que a adição de sílica foi feita em substituição de 10% em massa do cimento, fato que evidencia a ação desse material na constituição no solo-cimento.

Outra observação importante pode ser extraída do ensaio de durabilidade. Os tijolos L2 (MSCSi) não apresentaram perda de massa e sofreram mudanças na cinética da hidratação do cimento durante o procedimento de secagem (em estufa a 70°C) e imersão em ciclos de 24 horas, proporcionando acréscimos consideráveis em suas resistências à compressão. Esse fenômeno também foi observado por CARNEIRO et al. (2001), analisando os resultados do ensaio de durabilidade em tijolos de solo-cimento-RCD (Resíduo de

Construção e Demolição), e também por MALHOTRA & TEHRI (1995) que submeteram tijolos compostos com solo arenoso-cal hidratada-escória de alto forno à diversos procedimentos de cura e concluíram que o processo de imersão e secagem, mesmo em longas idades, pode promover uma nova configuração de instabilidade química com a formação de hidróxido de cálcio e que a presença de materiais pozolânicos pode reagir continuamente com esse produto, formando silicatos de cálcio hidratado.

O fato do material apresentar bons resultados de durabilidade quando exposto à variações bruscas e contínuas de temperatura e umidade possibilita extrapolar a utilização comum e atender a outros requisitos de projeto. Do ponto de vista do usuário, a adição de sílica ativa, obviamente realizada com critério técnico de dosagem, pode garantir um produto altamente durável e que apresenta evolução de resistência por um longo período.

Dessa forma, é muito pertinente o desenvolvimento de pesquisas sobre a incorporação de materiais pozolânicos originados dos mais diversos meios (agro-industrial ou reciclagem) na composição de tijolos de solo-cimento. Pode-se citar: cinzas volantes; escória de alto forno; cinzas da casca do arroz, do bagaço de cana-de-açúcar e da palha do milho; resíduos cerâmicos e RCD.

7.7.4. RESULTADOS DE ENSAIOS EM PAREDES E PRISMAS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão em paredes e prismas colaboraram para uma melhor análise do material e permitiram uma conclusão mais ampla da aplicação prática do mesmo, através da análise do desempenho estrutural de paredes, da presença de argamassa de assentamento em prismas compostos de dois e três tijolos e da produtividade e consumo de materiais na execução da alvenaria.

Demonstrou-se que a presença da argamassa de assentamento exerce grande influência na resistência de prismas e que os tijolos modulares permitem o assentamento a seco, somente encaixado, porém, nesse caso, a capacidade de suporte da alvenaria diminui.

Mesmo assim, a aplicação da argamassa de assentamento não traz muita complicação em relação ao limite de qualidade (especialização) da mão-de-obra que irá executar a alvenaria, facilitando e simplificando o processo produtivo da edificação e isso é interessante quando se pretende promover autogestão e auto-construção em programas habitacionais. Várias iniciativas têm utilizado os tijolos modulares assim produzidos em gestões de mutirão, o que comprova a facilidade de transferência de tecnologia. Como exemplo, cita-se o Projeto Cajuru da Prefeitura de Sacramento - MG, exposto com mais detalhes no ANEXO B.

Do ponto de vista estrutural, as paredes tiveram um bom comportamento e em geral apresentaram eficiência em torno de 0,35 em relação à resistência dos tijolos. GARCIA (2000) expõe experimentos realizados em paredes de blocos cerâmicos estruturais e também chegou a resultados de eficiência próximos de 0,35. Nos tijolos de solo-cimento, o diferencial ocorre quando se compara a resistência do prisma com a do tijolo, o que caracteriza um alto valor de eficiência devido à relação altura/espessura do prisma.

Outros pontos observados foram o modo de ruptura frágil e a pouca deformabilidade da parede quando comprimida. SOUZA (1993), BARBOSA & GHAVAMI (1995) e MATTONE & PASSERO(1993) também constataram, em ensaios de compressão simples de painéis de paredes de tijolos de solo-cimento de encaixe tipo macho-fêmea, que não ocorreu, durante o carregamento, a propagação de fissuras e o modo de ruptura é frágil devido ao comportamento bastante rígido da alvenaria.

As configurações das fissuras após a ruptura das paredes apresentaram semelhanças com as descrições de THOMAZ (1989) sobre os tipos característicos de fissuras em trechos contínuos de alvenaria solicitadas por sobrecarga uniformemente distribuídas. Segundo o autor, as trincas podem ser verticais ou horizontais conforme a figura abaixo:

FIGURA 7.54 – Representação de fissuras típicas da alvenaria causada por sobrecarga vertical uniformemente distribuída.

Fonte: THOMAZ (1989).

As trincas verticais são mais comuns, conforme o autor, e são provenientes da deformação transversal da argamassa de assentamento sob a ação da tensão de compressão, ou de flexão localizada do componente de alvenaria.

Outras pesquisas sobre a argamassa de assentamento para tijolos e blocos assentados por meio de encaixes devem ser realizadas no intuito de desenvolver uma argamassa flexível

e que possa absorver mais e distribuir melhor as tensões de carregamento, mesmo em pequenas espessuras.

8. CONCLUSÃO

Conforme a exposição inicial deste trabalho, os objetivos desta pesquisa centraram-se em análises de desempenho do material tijolo de solo-cimento modular com e sem adição de sílica ativa fabricado por prensagem manual, sua relação com questões críticas acerca da sustentabilidade na construção civil e as variáveis que garantem o controle tecnológico e a transferência de tecnologia, permitindo ao usuário uma orientação científica e prática sobre o comportamento do material, desde a sua composição até o emprego como sistema construtivo.

As avaliações de desempenho do material foram obtidas por meio de uma metodologia baseada em procedimentos de ensaios em laboratório, fundamentados em normas técnicas e recomendações práticas e que se mostraram eficientes para o desenvolvimento de análises e orientações que devem ser consideradas em novas pesquisas que tenham como objeto de estudo o tijolo modular de solo-cimento.

Há de se destacar que os resultados obtidos permitem uma série de considerações, dentre as quais merece destaque a importância do controle de umidade na qualidade da mistura de solo-cimento e, conseqüentemente, em qualquer componente resultante dessa matéria-prima. Foi demonstrado que o teor de umidade é tão importante quanto a porcentagem de cimento que deve ser adotada para que se alcancem características de resistência à compressão e absorção de água para um determinado patamar de utilização. Observou-se, também que a adição de sílica na composição de traços para a fabricação de tijolos é benéfica, apesar de ocorrer uma mudança bastante significativa da evolução da resistência devido a alterações na cinética das reações entre os constituintes da mistura.

Tais observações foram possíveis devido à adoção de uma estratégia metodológica que possibilitou o acompanhamento da evolução da resistência mecânica dos tijolos ao longo do tempo, o que permitiu avaliações desde pequenas idades até idades avançadas (quase um ano depois da moldagem dos tijolos). Pode-se dizer que a adoção dessa metodologia, por si só, configurou um resultado interessante de ser visualizado.

Com a finalidade de se encerrar um ciclo de avaliações sobre o tijolo modular, paredes em escala 1:1 foram executadas e submetidas a ensaios de compressão. Dessa forma,

foi possível traçar parâmetros interdisciplinares de avaliações que envolveram conceitos da química, da geologia, da mecânica dos solos, da engenharia de estruturas e da arquitetura.

Assim sendo, as principais conclusões são:

a) com relação aos estudos de traços realizados, constatou-se que, num primeiro instante, a porcentagem de cimento adicionada ao solo é fator determinante da resistência à compressão, absorção e durabilidade do solo-cimento, fato que foi observado tanto em corpos-de-prova cilíndricos de misturas, quanto em tijolos moldados;

b) a verificação de que os dispositivos do equipamento de produção dos tijolos (prensa manual) não permitiam a utilização da mistura no teor ótimo de umidade de compactação fez surgir a necessidade de se quantificar essa interferência que afeta a qualidade da mistura;

c) a realização de ensaios acessórios, em corpos-de-prova cilíndricos foi essencial para as análises sobre a influência do teor de umidade ótimo no desempenho do solo-cimento compactado. Os resultados de tais ensaios permitem afirmar que o conceito de relação água/cimento, embora seja importante, pouco influencia na dosagem de traço de solo-cimento compactado. O teor de umidade assume papel de importância igual ou até superior ao teor de cimento, pois se constatou que, para um mesmo traço, com teor de água menor que o ótimo, os resultados apontaram que parte do cimento se comporta como material inerte;

d) por conta dessa constatação, é recomendável a pulverização da mistura antes da prensagem. Esse procedimento provoca uma melhor homogeneização da água na mistura, permitindo aumentar o teor de umidade para a fabricação de tijolos. Qualquer aumento de umidade em direção ao teor ótimo proporciona uma melhoria significativa em termos de resistência mecânica, absorção e durabilidade dos tijolos.

e) por essas razões, a dosagem de traço deve ser realizada em massa, pois a dosagem em volume, apesar de usual, não propicia um controle real desse parâmetro.

f) a adição de sílica ativa na composição da mistura é benéfica. Do ponto de vista do usuário, a incorporação da sílica, desde que bem dosada e aliada à outros fatores de controle tecnológico, é uma garantia de que o material melhora suas características ao longo do tempo.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão permitem afirmar que a cinética da hidratação do cimento é modificada com a adição de sílica. Nos ensaios de durabilidade por ciclos de imersão e secagem que se iniciaram em idades de 91 dias verificou-se que os tijolos que continham sílica tiveram uma aceleração na reação pozolânica em relação aos de mesmo traço que permaneceram em câmara úmida. O material se

comportou muito bem numa simulação de variações bruscas e contínuas de umidade e temperatura e esse fato permite extrapolar a utilização comum desses tijolos para atender a outros requisitos de projeto.

g) os tijolos produzidos foram aprovados em relação aos requisitos de resistência e absorção de água das normas técnicas disponíveis, apesar de tais normas não serem específicas para tijolos modulares.

h) o tipo de cimento determina as condições do tijolo depois de moldados. Em condições ideais de cura, tijolos produzidos com CP II E 32 devem ser utilizados aos 28 dias de idade, pois constatou-se que a “estabilização” da resistência à compressão dos tijolos produzidos com esse tipo de cimento se inicia aos 63 dias de idade. Em contrapartida, o emprego do CP V ARI permite a utilização aos 7 dias de idade. É preciso, porém que se avalie o custo/benefício da adoção desse cimento para cada caso.

i) os resultados de ensaios de resistência à compressão de paredes e prismas demonstraram que a presença do filete de argamassa de assentamento na alvenaria de tijolos modulares exerce grande influência no desempenho mecânico da parede. Constatou-se em ensaios de prismas, que aqueles que foram assentados com argamassa possuem uma maior eficiência em termos de resistência (comparadas à do tijolo) e que a ruptura ocorreu próxima à tensão limite do material, enquanto que prismas assentados a seco começaram a trincar e se fragmentar no início do carregamento e suportaram menores cargas, devido a uma concentração de tensões.

j) são necessárias mais experimentações sobre a composição da argamassa, pois é possível que argamassas mais flexíveis absorvam melhor as tensões do carregamento e consequentemente confirmem melhores resultados em ensaios de prismas e paredes.

k) quanto à produtividade da alvenaria, observou-se que o emprego do tijolo modular propicia um melhor rendimento de mão-de-obra e material em comparação à utilização de tijolos cerâmicos à vista. A aplicação da argamassa é bastante simples e a regularidade das dimensões dos tijolos proporcionam rapidez na execução e precisão de nível e prumo.

l) o emprego e o desenvolvimento da tecnologia dos tijolos de solo-cimento modulares está em conformidade com um dos maiores desafios impostos a pesquisadores, profissionais e sociedade: a diminuição de impactos ambientais das atividades do setor da construção civil.

Pesquisadores afirmam que nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações. Essa relação é evidente, pois qualquer atividade humana necessita de um ambiente construído adequado para a sua operação e os produtos da construção civil são sempre de grandes proporções.

O conceito de desenvolvimento sustentável implica numa reformulação da visão de impacto ambiental das atividades humanas, passando a incorporar todos os impactos das atividades de produção e de consumo, desde a extração, processamento industrial, transporte e destino dos resíduos de produção e de consumo. A AGENDA 21 (1998), afirma que o desenvolvimento sustentável não apenas demanda a preservação de recursos naturais, mas também uma maior equidade no acesso aos benefícios do desenvolvimento, conceito que abrange importantes conseqüências sociais.

Algumas estatísticas demonstram que o setor da construção civil responde por 40% da energia utilizada mundialmente a cada ano e que 80% desse valor são consumidos no beneficiamento, produção e transporte dos materiais e que 30% das emissões que provocam aquecimento global têm origem no setor.

Conforme cita o INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION – CIB (1999), as ações destinadas à redução do impacto ambiental da construção civil deverão considerar os seguintes aspectos:

- ✓ organizacionais e de gestão;
- ✓ design de componentes e de edifícios, incluindo aspectos relativos à reciclabilidade;
- ✓ conservação de recursos naturais;
- ✓ desenvolvimento urbano;
- ✓ outros impactos relacionados ao setor;
- ✓ aspectos sociais, culturais e econômicos.

Dessa forma, o desenvolvimento de materiais de construção de melhor desempenho exercem papel fundamental dentro dessas ações. Essas diretrizes gerais devem ser manifestadas em preocupações técnicas específicas, por exemplo o aumento da durabilidade de uma edificação, expresso em termos de vida útil. A especificação de materiais, de acordo com o contexto acima exposto, deve deixar de ser feita apenas por critérios estéticos e estar condicionada a diferentes questões como contaminação do ar interno, durabilidade no ambiente a que estão expostos, deposição e possibilidade de reciclagem.

m) a fabricação de tijolos modulares de solo-cimento está em sintonia com tais diretrizes, pois demanda menor consumo energético na extração de matéria-prima; dispensa a queima na sua fabricação; elimina a necessidade de transporte, pois os tijolos podem ser produzidos no local onde serão utilizados. Além disso, os desperdícios no canteiro de obra são mínimos, devido ao sistema construtivo modular; segundo alguns pesquisadores, o tijolo de solo-cimento possui bom desempenho termo-acústico (equivalente aos tijolos cerâmicos),

conforme verificado na literatura e, finalmente, o material permite incorporar resíduos industriais na sua composição, desde que essa alternativa, antes do uso efetivo, seja amplamente avaliada principalmente por critérios de durabilidade, pois as características desse novo componente (acidez, por exemplo) podem influenciar negativamente na sinergia de reações entre o solo e o cimento.

Enfim, inserida no contexto de sustentabilidade na construção civil, a fabricação de tijolos modulares de solo-cimento prensados contribui para uma discussão sobre os processos produtivos de novos materiais de construção em busca de benefícios frente aos requisitos de projeto e às necessidades do usuário.

SUGESTÕES PARA O PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

Sem dúvida, a utilização de solo-cimento compactado para fabricação de tijolos modulares constitui-se em um tema que merece ser explorado e que permite diversas abordagens interessantes, como as sugeridas a seguir:

- avaliar a influência do tipo de solo em busca de outros resultados em termos de resistência à compressão, absorção e durabilidade;
- analisar a influência dos outros tipos de cimento Portland na estabilização de solos;
- estudar a incorporação de outros materiais pozolânicos como as cinzas volantes e a sílica da casca do arroz na composição de traço das misturas;
- compor traços utilizando agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) e outros resíduos industriais avaliando-os em ensaios de durabilidade;
- averiguar os benefícios da utilização de aditivos químicos que melhor dispersam as partículas da mistura;
- estudar a evolução das propriedades mecânicas de tijolos em diferentes condições de cura e armazenamento;
- projetar e testar outros equipamentos para produção de tijolos e que adotem outros métodos de adensamento, como por exemplo a vibro-compactação;
- elaborar análises estruturais de ligações de paredes em amarração direta e indireta;
- avaliar a influência da flexibilidade da argamassa no desempenho de paredes e prismas;

- estudar a influência da ausência da junta vertical de assentamento em paredes solicitadas por tensões de cisalhamento;
- sugerir e avaliar detalhes construtivos em pontos críticos da alvenaria, por exemplo nas aberturas de portas e janelas, quando submetida à esforços compressão e flexo-compressão;
- avaliar o desenvolvimento da microestrutura do sistema solo-cimento em função da dispersão de materiais que compõem essa mistura e suas interfaces.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIKO, A. K. (1983). *Solo-cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas*. In: Construção São Paulo n.1863. Pini - SP.
- ABIKO, A. K. (1987). *Estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza da casca de arroz e de resíduos cerâmicos*. Tese de Doutorado São Paulo: EPUSP.
- ADESANYA, D. A. (1996). *Evaluation of blended cement mortar, concrete and stabilized earth made from ordinary Portland cement and corn cob ash*. In: Construction and Building Materials, v.10, nº 6. Great Britain. Elsevier Science. p. 451-456.
- AGENDA 21. (1998). *Conferência das Nações Unidas sobre ambiente e desenvolvimento urbano..* Brasília, DF. Subsecretaria de Edições Técnicas do Senado Federal.
- AÏTCIN, P. C. (2000a). *Concreto de elevado desempenho*. São Paulo. Pini.
- AÏTCIN, P. C. (2000b). *Cement of yesterday and today. Concrete of tomorrow*. In: Cement and Concrete Research, nº 30. Elsevier Science. p. 1349-1359.
- ALMEIDA, I. R. (1996). *Superplastificantes, microsilica e durabilidade dos concretos*. In: Técnica, nº 24, set/out. 1996. São Paulo. Pini. p. 30-33.
- AMES, J. A.; CUTCLIFFE, W. E. (1983). *Construction Materials: Cement and cement raw materials*. In: LEFOND, Stanley J. Industrial Minerals and Rocks. 5.ed. New York: Society of Mining Engineers, p.133-159.
- ASSIS, J. B. S. de. (1995). *Bloco intertravado de solo-cimento "tijolito"*. In: WORKSHOP ARQUITETURA DE TERRA. São Paulo. Anais. NUTAU-FAUUSP. p.149-162.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (sd). *Mãos à obra. Dicas importantes para você construir ou reformar a sua casa*. São Paulo. ABCP.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (1948). *Casas de parede de solo-cimento*. Boletim nº 54. São Paulo. ABCP.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (1960). *Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento*. São Paulo. ABCP.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (1973). *Controle e fiscalização de obras de solo-cimento*. Publicações ABCP, São Paulo.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (1980) *Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio*. Publicações ABCP, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (1985). *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*. Publicações ABCP, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. (1988). *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais: prática recomendada*. Publicações ABCP, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA (ABCI). (1990). *Manual técnico de alvenaria*. ABCI/PROJETO. São Paulo.
- AZAMBUJA, M. A. (1979). *Geologia aplicada a solo-cimento*. Publicações ABCP, São Paulo.
- BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. (1995). *Desenvolvimentos estruturais usando blocos de barro reforçados com fibras vegetais*. DTCC-UFPB / DEC-PUC-Rio. Relatório de Cooperação Internacional CNPq-CNRS.
- BAKER, C. N. (1954). *Strength of soil-cement as a function of degree of mixing*. Highway Research Board, Washington, Bulletin 98, p.33-52.
- BEAULIEU, J. (1979). *Identification geotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au moyen du bleu de méthylène*. Paris. Thèse de doctorat de 3.^o cycle. Université de Paris-Sud Orsay. 133p.
- BELL, F. G. (1996). *Lime stabilization of clay minerals and soils*. In: Engineering Geology 42. Elsevier Science.
- BELL, F. G. & COULTHARD, J. M. (1990). *Stabilization of clay soils with lime*. Mun. Engr., 7: 125-140.
- BENTUR, A.; COHEN, M. D. (1987). *Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in portland cement mortars*. In: Journal American Ceramic Society, Vol. 70 (10), pp. 738-43.
- BLÜCHER, E. (1951). *Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários – volume I*. São Paulo, Blücher.
- BUGALHO, A. (2000) *Competitividade das indústrias de cimento do Brasil e da América do Norte*. In: Estudos Econômicos da Construção. Vol. 4. N.º 1 (7). São Paulo: SindusCon-SP.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. (1986). *Determinação do pH em H₂O e em solução de KCl 1N*. In: Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas. Boletim Técnico do Instituto Agrônomo, n.º 106.
- CARETTE, G. G.; MALHOTRA, U. M. (1993). Mechanical properties, durability and drying shrinkage of Portland cement concrete incorporating silica fume. In: Cement and Concrete Aggregates. V.1, n.5, p.3-1B.

- CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. & CASSA, J. C. S. (2001) *Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. EDUFBA; Caixa Econômica Federal, Salvador.
- CARNEIRO, F. L. L. (1968) *Norma para cálculo e execução de alvenaria armada ou parcialmente armada*. (anteprojeto). Rio de Janeiro, CE-02:03.04. ABNT.
- CARVALHO, A. R. O.; POROCA, J. S. (1995). *Como fazer e usar tijolos prensados de solo estabilizado*. Brasília. IBICT. 38p.
- CASANOVA, F. J. & CERATTI, J. A. (1986). *The assessment of requirement of oxissols by a physic-chemical method*. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8, Proceedings... s.l., EMBRAPA, p. 243-256.
- CATTON, M. D. (1940). *Research on the physical relations of soil-cement mixtures*. Proc. of the Highway Research Board, Washington, Bulletin 20, p.821-855.
- CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CEPED). (1978a). *Manual prático de construção com solo-cimento*. Camaçari. BNH / CEPED.
- CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CEPED). (1978b). *Solo-cimento na habitação popular: relatório final do Projeto Tecnologias Alternativas para Habitações de Baixo Custo – fase 2*. Camaçari. BNH / URBIS / CEPED.
- CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (CEPED). (1989). *Avaliação de edificações com paredes monolíticas, tijolos e blocos de solo-cimento (relatório final)*. Camaçari.
- CENTRO INTERAMERICANO DE VIVIENDA Y PLANEJAMENTO (CINVA). (1961). *Guia de auto-construcción*. Bogotá. CINVA.
- CERATTI, J. A. P.; MEDINA, J. (1983). *Estudo de solos estabilizados com cimento sob ação de cargas repetidas e estáticas*. In: 18ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Porto Alegre. Anais. v.1.
- CHADDA, L. R. (1971). *A rapid method of assessing the cement requeriment for the stabilization of soils*. Indian Concrete Journal, 45 (7): 298-314.
- CLARE, K. E. (1954). *The effect of organic matter on the setting of the soil cement mixtures*. Journal of Applied Chemistry. London, v.4, n25, p. 625-630.
- CLARE, K. E.; FARRAR, D. M. (1956). *The use of cement of different fineness on soil-cement mixtures*. Concrete Magazine Research. London, p. 137-144, nov.
- CRATERRE. (1979). *Construire en terre*. França. Alternative et Paralleles.
- CUNHA, U. V. L. (1978). *Terra-cimento: contribuição para o estudo da casa de baixo custo*. São Carlos. EESC-USP (Dissertação de Mestrado).
- CYTRYN, S. (1957). *Soil construction: its principles and aplicacion for housing*. State of Israel – Ministry of Labor – House Division. The Weizmann Science Press of Israel. Jerusalem.

- DETHIER, J. (1993). *Arquiteturas de terra ou o futuro de uma tradição milenar*. Europa Terceiro Mundo. Estados Unidos. 10ed. Lisboa: Litografia Tejo.
- DETWILER R.J; MEHTA P.K. (1989). *Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete*. ACI Mats. J. 86, pp. 609-614.
- DODSON, V.H. (1990). *Concrete admixtures*. New York. Van Nostrand-Reinhold.
- EADES, J. L. & GRIM, R. E. (1960). *Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization*. High. Res. Board, bull. 262, Washington, DC, 51-63.
- ENTEICHE, A. A. (1963). *Suelo-cemento, su aplicacion en la edificacion*. Bogotá. CINVA.
- FARIA, J. R. G. (1990). *Unidade de produção de tijolos de solo estabilizado*. Dissertação de Mestrado, EESC – USP, São Carlos.
- FELT, E. J. (1955). *Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures*. Portland Cement Association, p.138-162.
- FERRAZ JUNIOR, F. de A. C. (1995). *Equipamentos modernos para a produção de tijolos de terra prensada*. In: WORKSHOP ARQUITETURA DE TERRA. São Paulo. Anais. NUTAU-FAUUSP. p.163-179.
- FERRAZ, R. L.; BELICANTA, A.; GUTIERREZ, N. H. M. (2001). *Estudo comparativo de alguns métodos de dosagem de misturas de solo-cimento*. In: ENTECA 2000. Maringa. Anais.
- FIORITO, A. J. S. I. (1994). *Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução*. São Paulo. Pini.
- FULLER, W. B. & THOMPSON, S. E (1907). *The law of proportioning concrete*. Transport American Society of Civil. Engineers.
- GARCIA, P. D. (2000). *Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais*, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos (Dissertação de Mestrado).
- GEORGE, K. P. (1968). *Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures*. In: HIGHWAY RESEARCH RECORD n° 255. Washington D.C. p. 42-58.
- GOMES, N. S. (1983). *A resistência das paredes de alvenaria*. Escola de Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo (Dissertação de Mestrado).
- GOLDMAN A.; BENTUR A. (1993). *Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength*. In: Cement and Concrete Research. July, Vol. 23, n.4, pp 962-972.
- GUIMARÃES, J. E. P. (1998). *A cal – fundamentos e aplicações na construção civil*. São Paulo, Pini.
- GRIMER, F. J. (1957). *The effect of pulverization on the ornlity of clay cement*. Proc. of the Fourth International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering, London.

- HACHICH, W. et al. (1998) *Fundações: teoria e prática*. São Paulo, Pini, 2ed.
- HANDY, R. L. (1958). *Cementation of soil minerals with Portland cement or alkalis*. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. Bulletin 198, Washington, DC, p.55-64.
- HARIMA, E. (1997). *Estabilização da fase β e obtenção da fase α da cristobalita a partir da casca de arroz queimada*. Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos (Dissertação de Mestrado).
- HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. (1963). *Reactions accompanying stabilization of clay with cement*. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. Bulletin 36, Washington, DC, p.146 - 170.
- HIBBEN, T. (1936). *Rammed earth construction*. Architectural Record. Vol. 80, nº 4, p.323-324.
- HIBBEN, T. (1940). *Rammed earth construction*. U. S. Government Printing Office. Technical Information Circular nº 16. Washington, D.C.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (HRB). (1961). *Soil stabilization with Portland cement*. Bulletin 292, Washington, D. C.
- HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. (1994) *Earth construction: a comprehensive guide*. IT publications, p.362.
- HUBBELL, E. (1941). *Rammed earth and soil cement construction*. Kansas. Haskel Institute. Lawrence.
- HUBBELL, E. (1943). *Earth brick construction*. Kansas. U.S. Office of Indian Affairs, Educational Division.
- INGLES, O. G. & METCALF, J.B. (1972). *Soil stabilization: principles and practice*. Butterworths, Sydney – Melbourne – Brisbane.
- INGLES, O. G. (1987). *Soil stabilization*. In: F. G. Bell (Editor) Ground Engineer's Reference Book – chapter 38. London. Butterworths. p. 38/1 – 38/26.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1977a). *Casa evolutiva em mutirão concentrado em blocos de solo-cimento: fase I-aplicação do solo-cimento à habitação*. São Paulo. Relatório 9795. IPT.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1977b). *Casa evolutiva em mutirão concentrado com tijolos de solo-cimento: fase I-aplicação do solo-cimento à habitação*. São Paulo. Relatório 10.641. IPT.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1978). *Implementação técnica de tijolos de solo-cimento através da máquina automática TOR-HPT-30*. São Paulo. Relatório 11.273. IPT.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). (1980). *Utilização de blocos de solo-cimento na construção de habitações*. São Paulo. Relatório 14.120. IPT.

- INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION – CIB. (1999). *agenda 21 on sustainable construction*. Rotterdam. CIB Report Publication 237. CIB
- ISAIA, G. C. (1995). *Efeito de misturas binárias e terciárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão das armaduras*. São Paulo. Tese (Doutorado). Escola Politécnica. EPUSP.
- KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. G. (1999). *Compressive Strength of cement stabilized fly ash – soil mixtures*. In: Cement and Concrete Research n° 29. Elsevier Science.
- KUBO, S. L. (1986). *O solo-cal: suas aplicações em tijolos sem queima – uma pesquisa que se abre*. Escola de Engenharia de São Carlos (Dissertação de Mestrado)
- LAN, T. N. (1977). *Un nouvel essai d'identification des sols: l'essai au bleu de méthylène*. Paris. Bulletin Liaison Labo, n.º 88. p. 136-137.
- LAN, T. N. (1980). *L'essai au bleu de méthylène. Un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats*. Paris. Bulletin Liaison Labo, n.º 107. p. 130-135.
- L'HERMITE, R. G. (1960). *Volume changes in concrete*. In: 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. Washington, D.C. vol 2. p.659-699.
- LIBORIO, J.B.L.; MELO, A.B.; SILVA, I.J. (1998) *A influência do teor de adição e do tipo de sílica ativa nas propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland*. In.: 42º Congresso Brasileiro de Cerâmica Y 4º Ibero Americano Ceramica, vidrios y refractários. Poços de Caldas.
- LIBORIO, J. B. L. (2002). *Avanços tecnológicos dos concretos estruturais nos últimos 30 anos*. In: IBRACON 30 ANOS (CD-Room). São Paulo. Ibracon.
- LINS, A. H. P. (1994). *Comportamento tensão-deformação-resistência dos solos compactados não saturados*. In: 21ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Salvador. Anais. p.160-175, set.
- LOPES, W. G. (1998). *Taipa de mão no Brasil: levantamento e análise de construções*. São Carlos, SP. Dissertação (Mestrado). SAP – EESC - USP.
- LUCENA, F. B. et al. (1986). *Estudos dos solos lateríticos: propriedades de solos lateríticos estabilizados com cimento*. In: 21ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Salvador, Anais. Salvador, p.160-175, set.
- MALHOTRA, S. K.; TEHRI, S. P. (1995). *Development of bricks from granulated blast furnace slag*. In: Construction and Building Materials Vol. 10 n. 3. Great Britain. Elsevier Science. p.89-97.
- MATTONE, R.; PASSERO, G. (1993). *La terra rinforzata com fibre vegetali: caratteristiche meccaniche, tecnologie costruttive, durabilità*. Itália. Working Paper n.63. Politecnico di Torino.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. (1994). *Concreto: estruturas, propriedades e materiais*. Pini, São Paulo.

- MELO, A. B. (2000). *Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos estruturais de cimento Portland*, Escola de Engenharia de São Carlos – SAP, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais (Tese de Doutorado).
- MERCADO, M. C. (1990). *Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – FAU USP.
- MERRIL, A. F. (1947). *Casas de tierra apisonada y suelo-cemento*. Windsor, Buenos Aires,.
- MILLER, G. A.; AZAD, S. (2000). *Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust*. In: Construction and Building Materials nº 14. Elsevier Science. p.89-97.
- MINKE, G. (1998). *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*. Southampton, Ill. Graph. 210p.
- MONTEIRO, P. J. M. (1995). *Microstructure of concrete: its influence on the mechanical properties*. Tese de Doutorado da Universidade de Berkeley.
- MONTORO, P.; SAWAYA, S. B. (2002). *Arquitetura com terra: uma porta para o futuro*. In: Revista CREA-SP, ano II, nº 5. São Paulo. CREA-SP. p. 8-10.
- MORANVILLE-REGOURD, F. (1992). *Microstructure of high performance concrete*. In: High Performance Concrete: from material to structure. (1992). Ed. Yves Malier. London. E&FNSpon.
- MORIATY, J. P.; SWARE, T. I.; THERKILDTSEN, O. K. (1975). *Soil cement for low cost housing*. In: Building Research and Practice. May / June 1975.
- MOURA, P. R. M. (1987). *Estudo comparativo do comportamento do solo-cimento feito com um solo laterítico e um solo saprolítico*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – EPUSP.
- NEVES, C. M. M. (1987). *Habitação e saneamento com materiais alternativos*. In: SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA A HABITAÇÃO E SANEAMENTO. Olinda. Anais. MHU / PNUD. p. 273-282.
- NEVES, C. M. M. (1989). *Tijolos de solo-cimento*. In: DEZ ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA HABITAÇÃO. Brasília. Anais. MINTER / PNUD. p. 141-166.
- NEVILLE, A. M. (1997). *Propriedades do concreto*. Pini, São Paulo.
- NGOWI, A. B. (1997). *Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana*. In: Construction and Buildings Materials v.II. Britain. Elsevier Science.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1983). *Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos e a pavimentação*. In: 18º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Porto Alegre.

- PARENTE, E. B. (2002). *Avaliação do comportamento mecânico das misturas de solo-cimento e fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC USP.
- PATTY, R. L. (1936). *Rammed earth for farm buildings*. AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION, bull. 277, South Dakota. (revised 1945).
- PATTY, R. L. (1936). *The relation of colloids in soil to its favorable use in pisé or rammed earth walls*. AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION, bull. 298, South Dakota.
- PATTY, R. L. (1940). *Paints and Plasters for rammed earth walls*. AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION, bull. 336, South Dakota.
- PAULON, V.A. (1996). *Interface entre pasta de cimento e agregado: a influência na durabilidade dos concretos*. In: *Téchne*, nº 25. nov/dez. 1996. São Paulo. Pini.
- PAULON, V. A. (1991). *Estudo da microestrutura de zona de transição entre pasta de cimento e agregado*. São Paulo. Tese (Doutorado). Escola Politécnica. EPUSP.
- PEJON, O. J. (1992). *Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba (escala 1: 100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos*. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos.
- PINTO, C. S. (1998). *Propriedades dos solos*, In: *Fundações: teoria e prática* / Waldemar Hachich ... [et al.] São Paulo, Pini.
- PINTO, C.S. (1977). *Estudo das propriedades estabilizadoras do cimento Portland e da cal hidratada*. São Paulo, IPT, pub. n. 687.
- PITTA, M. R. (1982). *Retração do solo-cimento*. In: 17^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Brasília. Anais. Brasília, p.11-i67.
- POÇO, R. C. E. (1991). *Cura acelerada do solo-cimento pelos métodos da água em ebulição e da estufa a 100°C*. In: 25^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, São Paulo, 1991. Anais. São Paulo, p.813-836, out.
- POÇO, R.C.E. & BONASSI, R. (1988). *A importância de parâmetros de compactação em obras de solo-cimento*. In: 23^o REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Florianópolis. Anais. Florianópolis, p.145-170, out.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. (1945). *Specifications for soil-cement road and street construction*. In: Soil-cement Bureau nº SCB 12. Chicago, III. Portland Cement Association.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. (1946). *Soil-cement mixtures laboratory handbook*. Chicago, III. Portland Cement Association.
- RASHEEDUZZAFAR, S. E. H. (1991). *Cement and concrete composites*. Vol. 13, n.3.
- ROCHA, A. F. (1996). *Estudo experimental sobre misturas de solo-cimento para a região de Campo Novo dos Parecis, MT*. Dissertação Mestrado. EESC USP, São Carlos.

- RODRIGUES, M. G. M. *Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo-cimento*. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1992. 193p (Dissertação de mestrado).
- SABBAG, P. Y. (1980). *Solo cimento: o estudo da retração e suas implicações*. Dissertação de Mestrado São Paulo: Escola Politécnica.
- SANTOS, P. S. (1975). *Tecnologia de argilas aplicada à argila brasileira*. Edgard Blücher/Ed. Usp, São Paulo.
- SHERWOOD, P. T. (1962). *Effect of sulfates on cement and lime-stabilized soils*. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. bulletin 353. Washington D.C. p.98-107.
- SILVA, I. J. (2000). *Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho com adição de sílica ativa: propriedades mecânicas, durabilidade e características da microestrutura*. Escola de Engenharia de São Carlos – SAP, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais (Tese de Doutorado).
- SILVA, M. S. (2001). *A terra crua como alternativa sustentável para a produção de habitação social*. Escola de Engenharia de São Carlos (Dissertação de Mestrado) – Universidade de São Paulo.
- SILVA, S.A.M. (1991). *Estudo da compressão simples em corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-serragem*. Dissertação de Mestrado São Carlos: EESC - USP.
- SILVEIRA, A. (1966). *Estabilização de solos com cimento – síntese de notas de aula*. EESC – USP. Publicação 128, p.1-44.
- SOUZA, S. M. T. (1993). *Tijolos de terra crua reforçada com fibras vegetais*. Dissertação de Mestrado. Campina Grande. DEC-UFPb.
- STANTON, T. E., HVEEN, F. N. & BEATTY, J. L. (1943). *Progress report on California experience with cement-treated bases*. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. bulletin 17 (2). Washington D.C. p.92-96.
- TANGO, C. E. S. (1990) *Materiais: tecnologia e controle*. In: Manual Técnico de Alvenaria, São Paulo. ABCI.
- TAUIL, C. A.; RACCA, C. L. (1981). *Alvenaria armada – série racionalização na construção. Vol I. PROJETO*, São Paulo.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1961). *Mecânica dos solos na prática da engenharia*. Rio de Janeiro, Sedegra,.
- THOMAZ, C. A. (1979). *Paredes monolíticas de solo-cimento: Hospital Adriano Jorge*. São Paulo, Publicações ABCP.
- THOMAZ, C. A. (1982). *Dosagens de solo-cimento em traços de um saco de cimento*. São Paulo. Publicações ABCP.
- THOMAZ, E. (1989). *Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação*. São Paulo. Pini / EPUSP / IPT.

- TORRENTE, M. & SAGÜÉS, L. (1968). *Estabilizacion de suelos: suelo/cemento*. ETA, Barcelona.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. SERVIÇO DE BIBLIOTECA. (1996). *Diretrizes para a elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. São Carlos. 2.ed. rev. e ampl. SVBIBL.
- VAN VLACK, L. H. (1973) *Propriedades dos materiais cerâmicos*. São Paulo. EDUSP/Edgard Blucher.
- VARGAS, M. (1967). *Curso de solo-cimento: Identificação e classificação dos solos*. Publicações ABCP, São Paulo.
- VERBECK, H. C.; HELMUTH, R. H. (1968). *Structures and physical properties of cement paste*. In: 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE CHEMISTRY OF CEMENT. Tokio. Vol. 3. p.1-32.
- VIOLANI, M. A. F. (1987). *Estabilização do latossolo roxo para a produção de tijolos – a experiência de Londrina*. Escola de Engenharia de São Carlos (Dissertação de Mestrado).
- YNZENGA, J. I. M. (1967). *Retracción de morteros y hormigones*. Madrid. Inst. Eduardo Torroja. (pub 260)

Normas Técnicas (em ordem numérica)

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1980). *NBR 5734 – Peneiras para ensaios com tela metálica. Especificação..* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 5738 – Confecção e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Método de ensaio..* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 6459 – Solo: determinação do limite de liquidez. Método de ensaio..* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 6467 – Agregados: determinação do inchamento do agregado miúdo. Método de ensaio..* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 6474 – Cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995). *NBR 6502 – Rochas e Solos: terminologia..* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 6508 – Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm: determinação da massa específica. Método de ensaio..* Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 7180 – Solo: determinação do limite de plasticidade. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 7181 – Solo: análise granulométrica. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1982). *NBR 7182 – Solo: ensaio de compactação. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 7215 – Ensaio de cimento Portland. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 7216 – Amostragem de agregados. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 7217 – Agregado: determinação da composição granulométrica. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1982). *NBR 7251 – Agregado em estado solto: determinação da massa unitária. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1983). *NBR 8215 – Prismas de blocos vazados de concreto para alvenaria estrutural: preparo e ensaio a compressão. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *NBR 8491 – Tijolo maciço de solo-cimento: especificação.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1982). *NBR 8492 – Tijolos maciços de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1985). *NBR 8798 – Execução e controle de obras de alvenaria estrutural de blocos de concreto. Procedimento.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1985). *NBR 8949 – Paredes de alvenaria estrutural: ensaio à compressão simples. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9776 – Agregados: determinação da massa específica em agregado miúdo por meio do frasco de Chapman. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 9777 – Agregados: determinação da absorção de água em agregados miúdos. Método de ensaio.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10004 – Resíduos sólidos: classificação.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10005 – Lixiviação de resíduos: procedimento.* Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10006 – Solubilização de resíduos: procedimento*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). *NBR 10007 – Amostragem de resíduos: procedimento*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1989). *NBR 10832 – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual: procedimento*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1989). *NBR 10833 – Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica: procedimento*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1994). *NBR 10834 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: especificação*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1994). *NBR 10835 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: forma e dimensões: padronização*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1994). *NBR 10836 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991). *NBR 11581 – Cimento Portland: determinação dos tempos de pega. Método de ensaio (MB 3433 e MB 3434)*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 12023 – Solo-cimento: ensaio de compactação. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 12024 – Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 12025 – Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 12253 – Solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento. Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). *NBR 12254 – Execução de sub-base ou base de solo-cimento*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1990). *NBR 13346 – Dosagem de misturas solo-cimento para emprego em pavimentação*.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996). *NBR 13553 – Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996). *NBR 13554 – Solo-cimento: durabilidade por molhagem e secagem. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996). *NBR 13555 – Solo-cimento: determinação da absorção de água. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. (1982). *ASTM-C 270/82 – Mortar for unit masonry*. EUA. ASTM.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. (1992). *Building Code Requirements for Masonry Structures*. ACI 530-92/ASCE 5-92/TMS 402-92.

ANEXO A

GUIA PARA CLASSIFICAÇÃO DO SOLO E PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO MODULAR

Com o objetivo de facilitar o acesso à tecnologia dos tijolos de solo-cimento modular, este anexo visa apresentar, de modo simples e resumido, testes de classificação do solo e o método de produção de tijolos de solo-cimento, utilizando como exemplo uma prensa manual, para fins de orientação, da empresa SAHARA. Ressalta-se que para outros fabricantes de equipamentos, poderá ser adotada orientação semelhante.

Antes da realização dos testes de classificação do solo, propriamente, é preciso obter a matéria prima e, para tanto, é importante ter o cuidado de extrair um solo livre de matéria orgânica. É recomendável retirar o solo de uma profundidade maior que 50cm (conforme ilustram as Figuras 1 e 2) e, mesmo assim, convém verificar se esse solo está realmente livre de matéria orgânica.

Esse cuidado é importante porque o solo com presença de matéria orgânica, sofre ação do meio pela alcalinidade elevada e tem alterada sua estabilização como matéria prima, comprometendo a qualidade do tijolo modular.

Figura 1 – Perfil do solo, existência de matéria orgânica.
Fonte: SAHARA (2001)

Figura 2 – Extração do solo.
Fonte: SAHARA (2001)

Além dos cuidados para obter um solo livre de matéria orgânica, é necessário verificar as propriedades do solo.

Propriedades Fundamentais do Solo

Para o propósito fixado neste anexo, estabelecer parâmetros práticos e simples para a produção de tijolos, é importante analisar pelo menos três propriedades fundamentais do solo, que são as seguintes: granulometria, plasticidade e coesão.

Granulometria: refere-se ao tamanho das partículas contidas no solo, classificadas comumente em cinco frações: pedra, cascalho, areia, silte (ou limo) e argila.

O procedimento mais usual para verificar a granulometria do solo é o peneiramento, que mede as partículas maiores (pedregulho, cascalho e areia). Para peneirar o solo que será utilizado na produção dos tijolos de solo-cimento, convém utilizar uma peneira inclinada com malha de 4 a 6 mm (conforme indicado nas Figuras 3 e 4), que retém as partículas de pedregulho e cascalho, deixando passar as partículas de areia, silte e argila.

Figura 3 – Peneira inclinada- medidas.
Fonte: SAHARA (2001)

Figura 4 – Procedimento de peneiramento.
Fonte: SAHARA (2001)

Depois de peneirado, o solo deve ser classificado quanto ao teor de areia e argila, pois o consumo de cimento depende da quantidade de tais partículas presentes no solo.

Figura 5 - Consumo de cimento em função da natureza das partículas presentes no solo.
Fonte: SAHARA (2001)

Para verificar o teor de areia e argila do solo já peneirado, realiza-se o teste de sedimentação, que separa as partículas em camadas.

Teste de Sedimentação – Procedimentos:

- em um recipiente de vidro, transparente e de fundo chato, com capacidade de 1 litro, preencher $\frac{1}{4}$ do recipiente com a amostra do solo e $\frac{3}{4}$ com água;
- adicionar uma colher (sopa) de sal marinho;
- deixar a mistura descansar até o solo ficar saturado;
- chacoalhar vigorosamente o recipiente e deixar a mistura decantar por uma hora;
- chacoalhar novamente e deixar decantar por mais 45 minutos.

Resultado:

Depois deste período é possível identificar as diferentes camadas: no fundo do recipiente ficam depositados os grãos maiores (areia), sobre a areia forma-se uma camada de silte e, sobre este deposita-se a argila. Na superfície ficam os materiais orgânicos (se houver).

Figura 6 – Teste de sedimentação.
Fonte: HOUBEN e GUILLAUD (1994)

É a partir da análise granulométrica que se define a “textura” do solo. Conforme SILVA (2001), a textura é arenosa se possuir mais de 85% de frações de areia; argilosa se apresentar mais de 35% de argila; e barrenta (ou franca) se tiver as três frações (areia, silte e argila) em quantidades equilibradas. A figura abaixo apresenta um diagrama para determinar a textura do solo.

Figura 7 – Diagrama para determinação da textura do solo.
Fonte: SILVA (2001) baseado em LEPSCH (1979).

Plasticidade: propriedade do solo de ser moldável. A plasticidade depende da granulometria e da água. Exemplo: os solos argilosos são mais plásticos e, portanto, consomem mais água que os solos arenosos. Para verificar a plasticidade do solo podem-se realizar dois testes: Teste de Retenção de Água e Teste de Consistência.

Teste de Retenção de Água – Procedimentos:

- modelar uma bola de solo umedecido de 2 a 3cm de diâmetro;
- adicionar água à bola até que os grãos fiquem unidos, mas não grudem nos dedos;
- alisar a bola levemente e segurá-la na palma da mão;
- abrir e fechar a mão várias vezes até a água venha à superfície da bola.

Resultados:

Reação rápida (5 ou 6 movimentos): solo arenoso;

Reação lenta (20 a 30 movimentos): solo medianamente plástico;

Sem reação (a água não aparece e a bola mantém aparência brilhante): solo argiloso

Figura 8 – Teste de retenção de água.

Fonte: HOUBEN e GUILLAUD (1994)

Teste de Consistência – Procedimentos

- Modelar uma bola de solo úmido de 2 a 3 cm de diâmetro;
- Rolar esta bola sobre uma superfície plana até conseguir moldar um filete de 3mm;
- Se na 1.^a tentativa o filete se romper antes de alcançar 3mm, o solo está muito seco (adicione água e repita o procedimento);

Resultados:

Se o filete for moldado com facilidade, e com bastante água, o solo é argiloso;

Se o filete for moldado com média facilidade, e com pouca água, o solo contém argila em baixa proporção;

Se o filete não puder ser moldado, o solo é arenoso.

Figura 9 – Teste de consistência.

Fonte: HOUBEN e GUILLAUD (1994)

Coesão: propriedade do solo de resistir a esforços de tração e compressão. A coesão está relacionada ao teor de argila e é determinada pelo Testes de Adesão, Rigidez e Coesão.

Teste de Adesão – Procedimentos:

- Modelar uma bola de solo úmido de 2 a 3 cm de diâmetro;
- Cortar ao meio com uma faca ou espátula (alguns autores usam um cordão).

Resultados:

Se o solo for cortado com dificuldade, o solo é muito argiloso;

Se o solo for cortado sem grande dificuldade, a proporção de argila é moderada;

Se o solo for facilmente cortado, o solo é arenoso.

Figura 9 – Teste de adesão.

Fonte: HOUBEN e GUILLAUD (1994)

Teste de Rigidez – Procedimentos:

- Moldar uma porção de solo em formato de uma moeda com aproximadamente 1cm de espessura;
- Deixar secar completamente;
- Pressionar a “moeda” entre os dedos indicador e polegar, tentando quebrá-la.

Resultados:

Dificuldade para quebrar a “moeda” e quebra com estalo em poucas partes – solo argiloso.

Média dificuldade para quebrar a “moeda” – solo com proporção equilibrada de silte, areia e argila.

Facilidade para quebrar a “moeda” e reduzi-la a pó – solo arenoso.

Figura 10 (ao lado) – Teste de rigidez.

Fonte: HOUBEN e GUILLAUD (1994)

Teste de Coesão – Procedimentos:

- Moldar um cilindro com aproximadamente 1,5cm de diâmetro e no máximo 30cm de comprimento;

- Achatá-lo sobre uma superfície plana até formar uma fita com aproximadamente 5cm de largura;
- Deixar secar à sombra;
- Colocar a fita próxima à borda de uma superfície plana e deslocar a fita para fora dessa superfície até que a fita se rompa pelo seu próprio peso. Observar a dimensão do pedaço que se desprende.

Resultados:

Se a dimensão do pedaço for maior que 15cm – solo argiloso.

Se a dimensão do pedaço for de 5 a 15cm – solo bem graduado.

Se a dimensão do pedaço for menor que 5cm – solo arenoso.

Figura 11 – Teste de Coesão.

Fonte: OLAERTE e GUZMAN (1993) Apud SILVA (2001)

Teste de Retração – Teste complementar que permite conhecer o tipo de argila (inerte ou ativa) e o quanto esta é capaz de absorver água. Procedimentos:

- Preencher totalmente uma caixa de dimensões 60cm x 4cm x 4cm (comp. x larg. x prof.) com uma mistura bastante umedecida do solo anteriormente analisado;
- Prensar o solo, principalmente nas quinas, e rasar a superfície da caixa com uma espátula;
- Deixar o solo na caixa secando ao sol por três dias;
- Depois desse período, empurrar a massa seca para um lado da caixa e medir o encurtamento do volume do solo.

Resultados:

Se não houver variação do volume – solo arenoso.

Se surgirem poucas fissuras e uma pequena variação de volume – solo com argila pouco ativa (média absorção de água).

Se surgirem várias fissuras e uma considerável variação de volume (com destacamento das laterais) – solo com argila ativa (grande absorção de água).

Figura 12 – Teste de retração.

Fonte: SILVA (2001)

Observações: O teste de retração é importante para determinar a qualidade do solo a ser utilizado na produção dos tijolos de solo-cimento, uma vez que a presença de argila ativa pode comprometer o tijolo após a secagem com o surgimento de fissuras e partículas desagregadas.

Caso o solo analisado apresente resultados adversos nos diversos testes, faz-se necessário corrigi-lo e homogeneizá-lo com adição de areia lavada (em caso de solo muito argiloso), argila (em caso de solo muito arenoso), ou outros materiais (fibras, cal, outros tipos de finos) e, após essa correção, convém realizar novamente os testes para caracterizar essa nova mistura. Contudo, essa medida restringe-se devido a fatores econômicos e tecnológicos.

RECOMENDAÇÕES PARA A PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO PRENSADOS MANUALMENTE.

Os ensaios propostos no item anterior apresentam parâmetros de avaliações bastante práticos e rudimentares para a classificação do solo. A próxima etapa é a produção de tijolos de solo-cimento e antes disso, é preciso definir duas variáveis de grande importância: o teor

de cimento e quais os procedimentos que devem ser adotados para se ter controle tecnológico da mistura e do tijolo produzido.

O teor de cimento é obtido por uma metodologia de dosagem. Os resultados dessa metodologia devem ser avaliados pela resistência à compressão e absorção de água do tijolo.

O controle tecnológico é de fundamental importância tanto na fase de elaboração da mistura como na fase de estocagem e cura dos tijolos moldados, porque é o controle que irá garantir a qualidade do produto final.

As dosagens recomendadas pelos fabricantes de prensas são realizadas em volume, por exemplo medidas em “baldes” ou “latas”. Apesar da prática de dosagem em volume ser comum e de certa facilidade, ela somente será correta se forem realizadas outras análises, como a determinação da massa específica, inchamento, massa unitária sob diversos graus de compactação, etc. Assim, o ideal para um efetivo controle tecnológico da mistura é que a dosagem do traço seja realizada em massa (kg), com determinação e correção de umidade da matéria prima.

A explicação dessa recomendação é que o cimento e o solo têm massas diferentes e o solo contém umidade natural e não uniformemente distribuída no lote que será utilizado; por isso, nem sempre as medidas em latas terão o mesmo peso e corre-se o risco de se produzir tijolos com variações muito expressivas de resistência à compressão. A mão-de-obra e as condições de armazenamento do solo também interferem na dosagem de traços em volume.

O controle tecnológico do tijolo, mesmo que bastante simples, é a melhor garantia de qualidade para o fabricante e o usuário desse material. Dessa forma, quando se compara o custo de uma balança (com capacidade de 20kg e precisão de 10g) com o custo total da obra, verifica-se que o investimento é muito barato, praticamente irrisório, mas os benefícios são incalculáveis.

Em geral, a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) recomenda que a dosagem de cimento, para a fabricação de tijolos prensados, se inicie em 10% em relação à massa de solo. A partir dessa determinação, deve-se realizar pelo menos mais duas dosagens (uma mais rica em cimento e outra mais pobre) em intervalos de 2% a 3% da dosagem inicial. O quadro abaixo demonstra um exemplo de dosagem.

DOSAGEM INICIAL PARA DETERMINAÇÃO DE TRAÇO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO PRENSADOS				
EM MASSA 1 : m (cimento : solo)				
TRAÇOS POBRES		TRAÇO DE REFERÊNCIA	TRAÇOS RICOS	
1:14	1:12	1:10	1:8	1:7
% de cimento em relação ao solo				
7%	8%	10%	12,5%	14,5%

Para se dosar com uma certa precisão os materiais em massa, deve-se descontar a umidade contida no solo que será utilizado. No canteiro de obras, uma maneira bastante simples e rápida de se fazer isso é através do uso de uma chapa (ou frigideira), um fogareiro, uma espátula e uma balança com precisão de 10g. Deve-se coletar uma amostra do solo e depositá-la na chapa. Pesar (chapa + solo úmido). Colocar a chapa sobre o fogareiro e esquentá-la até secar completamente o solo, revolvendo-o com a espátula. Pesar (chapa + solo seco). A diferença entre as duas pesagens é a umidade contida no solo e que deve ser descontada toda vez que se for preparar a mistura de solo-cimento. Por exemplo:

Peso (solo úmido + chapa) = 2kg;

Peso (solo seco + chapa) = 1,8kg;

Umidade contida no solo = 0,2kg (200g) ou 10%

Na realidade, nessas condições, quando se pesar 15kg de solo em uma lata, apenas 13,5kg é solo e o restante (1,5kg) é água. É por essa razão que a dosagem em volume não é interessante do ponto de vista do controle tecnológico.

A medição de umidade na amostra de solo deve ser realizada constantemente, ainda mais quando as condições de armazenamento do solo não são muito adequadas, por exemplo ao ar livre. É recomendável separar a quantidade que será imediatamente utilizada, homogeneizar a umidade e só depois fazer a medição.

A mistura de solo-cimento deve ser realizada de forma bastante criteriosa e consiste nos seguintes procedimentos:

- destorroamento e peneiramento do solo;
- adição de cimento;
- homogeneização da mistura a seco;
- adição de água;
- homogeneização da mistura úmida.

Não se deve demorar muito no procedimento e a quantidade de mistura deve ser consumida no máximo em uma hora após a adição da água. Essas recomendações são devidas à perda de umidade por evaporação que compromete a resistência do tijolo. De maneira geral, o volume de solo para se produzir tijolos durante 1 hora é aproximadamente 2,5 carriolas bem cheias.

Quanto à adição de água, esse é um o parâmetro que deve ser bem esclarecido pois é o principal fator de controle da mistura. Pode-se dizer que a determinação correta da quantidade de água necessária para o melhor desempenho (a melhor compactação) da mistura é tão importante, ou até mais, quanto o teor de cimento.

É fundamental que se saiba o conceito de umidade ótima de compactação:

Umidade ótima é o teor de umidade que possibilita a maior compactação do material, por meio da aproximação das partículas de solo e preenchimento dos vazios. A umidade ótima pode ser estimada pelo seguinte método prático:

Figura 13 – Observação prática da umidade ótima de compactação.

Fonte: SAHARA (2001)

O problema nesse teste é a imprecisão, pois existe um intervalo bastante significativo de umidade que se comporta da maneira ilustrada acima. Por exemplo, no solo utilizado na pesquisa da dissertação, esse comportamento é observado desde 4,5% até 10% de umidade (que é a umidade ótima para o traço 1:10).

Outro fator relevante é que a umidade ótima de compactação depende da constituição granulométrica do solo, ou seja, solos arenosos consomem menos água até

atingir o teor ótimo do que os solos argilosos. É difícil, portanto estabelecer um teor de água que sirva para todos os casos.

Já a observação da umidade não ideal é bastante eficaz e está ilustrada na figura 14.

Figura 14 – Observação da umidade da mistura.

Fonte: SAHARA (2001)

Recomenda-se, para a determinação de umidade ideal, o seguinte procedimento:

- pesar os materiais do traço em estudo para uma determinada quantia de tijolos (por ex. 7 tijolos);
- determinar a umidade natural do solo (umidade inicial);
- adicionar cimento e homogeneizar a mistura a seco;
- realizar o teste das figuras 13 e 14. Se a mistura estiver muito seca, adicionar água em pequena porcentagem (1% em relação à massa da mistura) e homogeneizar novamente até que ela se comporte como a ilustração da figura 13;
- produzir tijolos com essa mistura e verificar o seguinte:
 - a) se foi possível produzir a quantidade desejada (7 tijolos) com facilidade;
 - b) se houve muita perda de material por destorroamento na desmoldagem do tijolo;
 - c) se o tijolo quando desmoldado esfarelar e soltar partículas de suas faces (especialmente nas quinas).

Se não foi possível produzir os tijolos (por ex. só foram desmoldados 3 tijolos), se houve desperdício e destorroamento. A umidade foi insuficiente;

- destorroar a mistura (reaproveitada) e adicionar mais água em intervalos de 1%;
- repetir os procedimentos até se obter a produtividade almejada com facilidade;
- adotar o teor de umidade máximo que permita a maior produtividade da prensa.

Exemplo prático do que foi recomendado:

Dosagem de traço 1:10 (cimento : solo) e determinação do teor ótimo de umidade:

1) Determinação da umidade natural do solo:

Peso (solo úmido) = 10kg;

Peso (solo seco) = 9,5kg;

Umidade contida no solo = 0,5kg (300g) ou 5,0%

2) Adição de cimento – traço em massa 1:10

cimento = 950g
 solo = 9,5kg
 água = 500g

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa da mistura (m)} = 950 + 9500 = 10450\text{g} \end{array} \right.$$

umidade inicial da mistura = 4,8% (500 / m)

homogeneizar bem a mistura

3) Realizar teste de umidade de compactação:

Resultado: é semelhante à figura 13.

4) Regular a máquina e produzir tijolos:

Resultado: produziu poucos tijolos, há desperdício, o tijolo está visivelmente muito seco, esfarelado.

5) recolher a mistura, destorroá-la e adicionar mais 1% de água (em relação à m).

cimento = 950g
 solo = 9,5kg
 água = 605g (500g + 105g)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa da mistura (m)} = 950 + 9500 = 10450\text{g} \end{array} \right.$$

umidade da mistura = 5,8% (605 / m)

homogeneizar bem a mistura

6) Regular a máquina e produzir tijolos:

Resultado: produziu os tijolos, não há desperdício, o tijolo está visivelmente aceitável.

7) recolher a mistura, destorroá-la e adicionar mais 1% de água (em relação à m).

cimento = 950g
 solo = 9,5kg
 água = 710g (605g + 105g)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa da mistura (m)} = 950 + 9500 = 10450\text{g} \end{array} \right.$$

umidade da mistura = 6,8% (710 / m)

homogeneizar bem a mistura

8) Regular a máquina e produzir tijolos:

Resultado: produziu os tijolos, não há desperdício, o tijolo está visivelmente aceitável. Nota-se que o tijolo parece mais compacto do que o anterior, com as faces menos porosas.

9) recolher a mistura, destorroá-la e adicionar mais 1% de água (em relação à m).

cimento = 950g
 solo = 9,5kg
 água = 815g (710g + 105g)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa da mistura (m)} = 950 + 9500 = 10450\text{g} \end{array} \right.$$

umidade da mistura = 7,8% (815 / m)

homogeneizar bem a mistura

10) Regular a máquina e produzir tijolos:

Resultado: produziu os tijolos, mas há um pouco de desperdício (destorroamento em pedaços grandes na hora de desmoldar), o tijolo está com aspecto molhado na face. Nota-se que o tijolo apesar de compacto não tem muita resistência no manuseio. **Excesso de umidade.**

Nesse caso, o teor mais adequado para a produção de tijolos é de 6,8%. Se for o caso, deve-se testar teores intermediários de umidade (0,5%), ou ainda rever o método de mistura. Como foi comprovada na dissertação, a utilização do triturador JAG – 5000 na homogeneização da mistura úmida provoca uma pulverização do solo e uma distribuição mais eficiente da umidade na mistura, o que pode aumentar o teor de umidade, melhorando ainda mais a qualidade do tijolo.

O tipo do solo pode, por si só, condicionar uma dosagem. É pouco provável que se consiga moldar tijolos modulares (furados) com um solo demasiadamente arenoso em traço pobre de cimento (exemplo 1:14). É preciso avaliar se o tijolo produzido é visualmente satisfatório, com arestas e cantos bem definidos e rígidos, sem esfarelamentos.

Após determinados os teores de umidade adequados para cada dosagem de traço, moldar no mínimo 20 tijolos de todos os traços, identificá-los, e submetê-los aos ensaios de resistência à compressão e absorção de água em um laboratório de materiais de construção civil. Os resultados vão determinar quais dosagens são apropriadas para a utilização, pois há limites estabelecidos em normas técnicas que concedem os requisitos mínimos para a aprovação do material. Por exemplo:

Limites especificados para controle de qualidade de tijolos de solo-cimento.			
CARACTERÍSTICA	N.º de AMOSTRA	EXIGÊNCIA NBR 8491	
Variação dimensional	-	± 3 mm	
Resistência à compressão	10	Valor médio	$\geq 2,0$ MPa
		Valor individual	$\geq 1,7$ MPa
Absorção de água	3	Valor médio	$\leq 20\%$
		Valor individual	$\leq 22\%$

O tipo de cimento utilizado também influencia na qualidade da mistura, e consequentemente, do tijolo de solo-cimento. A principal interferência do tipo de cimento está na questão do tempo de utilização do tijolo depois de moldado. Por exemplo:

PROGRESSÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO APÓS A MOLDAGEM				
TIPO DE CIMENTO	IDADE (DIAS)	% DE RESISTÊNCIA ADQUIRIDA*	CONDIÇÃO DO TIJOLO	IDADE (DIAS) DE INÍCIO DE ESTABILIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA.
CP II E 32	7	45%	TRANSPORTE	63
	28	75%	UTILIZAÇÃO	
CP V ARI	3	45%	TRANSPORTE	28
	7	63%	UTILIZAÇÃO	
	28	83%	UTILIZAÇÃO	

Cimentos do tipo CP V podem ser preferenciais em solos argilosos (+ de 30% de argila), contudo, deve haver um enorme cuidado em relação à cura do material.

Determinado o traço que será efetivamente utilizado, após os ensaios dos tijolos em laboratório, o controle tecnológico também deve ser realizado na produção e na pós-produção dos tijolos.

Na produção, pode-se sugerir os seguintes procedimentos:

- Conhecer bem os dispositivos da prensa;
- Realizar manutenção constante (lubrificação do compartimento de moldagem e dos dispositivos da alavanca, limpeza das formas, desmontagem e lavagem completa da prensa após um período de produção);
- Proteger a mistura que será utilizada da incidência direta da luz solar e de ventos;
- Empilhar os tijolos da conforme as figuras 15 e 16;
- Não permitir a secagem dos tijolos moldados, cobrindo-os com um plástico e borrifando água sobre a pilha de hora em hora.

Figura 15 – Produção de tijolos. A máquina deve movimentar-se para perto das pilhas de tijolos, diminuindo o percurso entre a desmoldagem e o empilhamento.

Fonte: SAHARA (2001)

* Valores estimados em relação à resistência à compressão de tijolos na idade de 120 dias.

Figura 16 – Esquema da seqüência adequada do empilhamento.

Fonte: SAHARA (2001)

A cura dos tijolos é o principal fator de controle de pós-produção dos tijolos e que determinará o sucesso de todos os procedimentos anteriormente adotados. A cura significa impedir que a umidade saia do tijolo por evaporação. Como foi demonstrado no quadro sobre a progressão da resistência do tijolo de solo-cimento após a moldagem, o ganho de resistência é um processo lento e que depende da água disponível na mistura, principalmente no caso da utilização do cimento CP II E 32. A perda de água significa interromper esse processo, prejudicando a qualidade do tijolo na idade de utilização.

Figura 17 – Fatores que causam a evaporação da água dos tijolos e conseqüente perda de resistência.

Fonte: SAHARA (2001)

Recomenda-se um período de cura mínimo de 7 dias, porém, quanto maior for esse período, melhor será a qualidade do material. No dia da moldagem dos tijolos, as pilhas devem ser curadas de hora em hora com o auxílio de um borrifador, pois os tijolos ainda não endureceram suficientemente para suportarem o impacto de um esguicho de água. No 2º dia em diante, as pilhas podem ser irrigadas com água à vontade, de preferência três vezes ao dia e devem ser cobertas com uma lona, para evitar a perda de água.

Na verdade, o que se demonstrou nesse anexo foi como proceder para a fabricação de um tijolo de solo-cimento com controle de qualidade. Foram cercadas algumas variáveis de fundamental importância para o sucesso do empreendimento. O solo, a dosagem e o controle tecnológico do tijolo.

Contudo, outras variáveis devem ser consideradas no processo de produção:

- o operador da prensa, por exemplo, tem muita influência sobre o abastecimento do compartimento de moldagem, força no braço da alavanca etc...;
- as condições de trabalho, armazenamento de matéria-prima e estocagem de tijolos do local;
- o conhecimento das regulagens (que definem o padrão das dimensões dos tijolos) e a correta manutenção do equipamento durante a produção (que permite a manutenção das regulagens e a produtividade).

A adição de outros materiais na tecnologia do solo-cimento, como por exemplo, escória de alto forno, sílica ativa, cinzas volantes, composições de cimentos alternativos e agregados reciclados de entulho de resíduo de construção e demolição (RCD) devem ser analisadas com bastante critério técnico. Nesse caso, é fundamental o suporte de profissionais e de um laboratório para que orientações adequadas e precisas cheguem ao canteiro de obras de maneira exequível e segura.

A adição de sílica, por exemplo, necessita de procedimentos bem definidos e cuidadosos, pois se trata de um pó muito fino e leve e que se for inalado pode provocar doenças cancerígenas.

Em contrapartida, foi comprovado no trabalho da dissertação que a adição de sílica (que é um rejeito industrial) e de outros materiais pozolânicos pode contribuir para a melhoria da qualidade do tijolo.

Um exemplo interessante de ser explorado é a hipótese de se obter com facilidade e abundância, agregado reciclado de entulho (RCD). Vários municípios possuem usinas de reciclagem de entulho, fornecendo-o britado numa granulometria grossa ou fina. Pode acontecer de ser economicamente viável a utilização parcial ou até mesmo total desse entulho na fabricação de tijolos prensados.

Há uma série de preconceitos sobre a utilização de entulho reciclado na construção civil, mas o que se observa é a falta de conhecimento sobre a potencialidade de tais materiais. **Contudo, para tijolos de solo-cimento que utilizem tais materiais é imprescindível que se façam testes de durabilidade e abrasão que comprovem que os resíduos não podem se desprender facilmente para o ambiente onde estão sendo utilizados.**

No tijolo de solo-cimento, por exemplo, a resistência é função, em primeiro, do empacotamento dos grãos de solo quando compactados (granulometria) e, em segundo, dos teores de cimento e de umidade. Se, numa dosagem de solo-cimento-RCD, os parâmetros de resistência à compressão, absorção de água e durabilidade forem atendidos, o material poderá apresentar potencial de utilização.

Enfim, por mais que se tente descrever os procedimentos para se produzir um tijolo de solo-cimento de qualidade, é preciso sempre o acompanhamento de técnicos especializados para orientar e garantir o controle tecnológico do material.

ANEXO B

DETALHES CONSTRUTIVOS DE EDIFICAÇÕES REALIZADAS COM O SISTEMA CONSTRUTIVO MODULAR

Conforme apresentado no ANEXO A, os tijolos modulares requerem certos cuidados desde a seleção de um solo adequado para a produção de uma mistura de solo-cimento de qualidade, até o controle das condições de preparação da mistura, dos processos de moldagem e desmoldagem e do empilhamento dos tijolos para garantir suas características de resistência e durabilidade.

Nesta segunda parte dos anexos, serão apresentados alguns detalhes construtivos que distinguem o sistema construtivo modular dos sistemas convencionais em construção civil.

As principais vantagens que os tijolos modulares, produzidos com controle tecnológico, apresentam em relação aos tijolos comuns são:

- texturas e medidas regulares, o que evita o desperdício de material para correções de imperfeições, além de proporcionar um bom acabamento à vista;
- seu sistema de encaixe auxilia a orientação no assentamento, evitando que a parede fique fora do prumo, e mantendo juntas regulares que evitam o surgimento de trincas e fissuras;
- o seu emprego reduz o peso da construção, pois necessita de uma menor quantidade de material para assentamento e revestimento;
- reduz o tempo para execução da obra, o que gera economia, principalmente com mão de obra;
- ajuda a manter o canteiro de obras mais limpo e organizado;
- seus furos, além de promoverem conforto termo-acústico, também formam condutores para as redes hidráulica e elétrica, evitando a quebra de paredes, além de permitirem o embutimento fácil e rápido das colunas de sustentação;
- é também um tijolo ecológico, pois não provoca desmatamento e não lança resíduos de queima no ar, como ocorre nas tradicionais olarias.

Além das vantagens destacadas desse sistema construtivo modular, é necessário conhecer outros importantes detalhes construtivos:

- Para o assentamento dos tijolos modulares basta um filete de cola branca, argamassa própria ou massa de solo-cimento (com as seguintes proporções: 1kg de cimento; ½kg de cola branca e 6kg de solo). A exceção acontece somente na primeira fiada, que deve ser assentada sobre argamassa convencional de cimento e areia, traço 1:3 sobre o baldrame, permitindo a regularização da superfície.

Figura 1 – Detalhe da aplicação do filete de argamassa.
Fonte: SAHARA (2001)

- Para a instalação elétrica, pode-se optar pelo uso dos furos nos módulos em vez de conduítes e caixa para tomadas e interruptores.

Figura 2 – Detalhe das instalações elétricas.
Fonte: SAHARA (2001)

- Para as instalações hidráulicas, a facilidade é a mesma, não é necessária a quebra de paredes.

Figura 3 – Detalhes das instalações hidráulicas.

Fonte: SAHARA (2001)

- Nesse sistema construtivo modular, é possível embutir as colunas nas paredes. Para isso, é importante que as barras de ferro que irão compor a estrutura da coluna estejam fundidas no alicerce ou no radier antes das paredes serem erguidas.

Figura 4 – Detalhe das barras de ferro fundidas no alicerce.

Fonte: SAHARA (2001)

- O preenchimento dos furos com argamassa ou concreto tem duas finalidades: reforçar a estrutura e promover uma melhor amarração das paredes. A necessidade, a quantidade e a localização dessas “colunas” devem ser calculadas em projeto. Se elas existirem, é preciso encher as colunas de sustentação a cada meio metro de altura. A amarração das paredes deve ser feita com grampos, encaixados em pequenos sulcos cavados nos tijolos. Ou ainda de forma direta, pela simples amarração do tijolo. O mesmo procedimento deve ser repetido a cada meio metro para proporcionar resistência à construção.

Figura 5 – Detalhes do preenchimento das colunas e das amarrações com os grampos.
Fonte: SAHARA (2001)

- Amarração de encontro de paredes

Figura 6 – Detalhes das amarrações de encontro de paredes.
Fonte: SAHARA (2001)

A amarração de encontro de paredes pode ser realizada também de maneira direta:

Figura 6a – Detalhes das amarrações de encontro de paredes.

- Detalhe da cinta de amarração e da contra-verga que devem ser executadas à meia altura (peitoril da janela), sobre os vãos de portas e janelas e no respaldo.

DETALHE - CINTA DE AMARRAÇÃO
canto de parede.

Figura 7a – Detalhes sugeridos para as cintas de amarração em cantos de parede.

DETALHE - CINTA DE AMARRAÇÃO
encontro de parede.

Figura 7b – Detalhes sugeridos para as cintas de amarração em encontros de parede.

Figura 7c – Detalhes das cintas de amarração e das contra-vergas.

Fonte: SAHARA (2001)

- As canaletas podem ser preenchidas da forma ilustrada na figura 8, possibilitando futuras ampliações da rede elétrica, sem a necessidade do corte da alvenaria.

Figura 8 – Detalhes da desobstrução dos furos com canos de PVC cortados para preenchimento das canaletas.

Fonte: SAHARA (2001)

- Fotos que ilustram o sistema construtivo:

Figura 9 – Exemplos de construção empregando o sistema construtivo modular.

Fonte: SAHARA (2001)

Depois da demonstração dos detalhes construtivos do sistema modular, é pertinente, para um melhor esclarecimento ao usuário, que se faça uma análise da viabilidade econômica do material (tijolo) e da edificação (sistema construtivo).

COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE EDIFICAÇÕES REALIZADAS COM O SISTEMA MODULAR E COM SISTEMA DE ALVENARIA DE TIJOLOS DE BARRO COZIDO.

Neste item, apresenta-se uma análise crítica do custo de uma edificação construída através do sistema modular. Na verdade, seria bastante perigoso apontar valores exatos do custo de uma edificação, pois se corre o risco de surgirem comparações diretas entre realidades distintas, fato que pode ludibriar o usuário, por meio de uma generalização sem responsabilidade, já que o custo de uma edificação envolve muito mais do que simplesmente a quantidade de material necessária para sua construção.

De fato, a primeira variável de custo surge na fase de PROJETO. O projeto encerra três etapas importantes e que se configuram no primeiro controle tecnológico de toda obra de construção civil:

✓ PROJETO PRELIMINAR

Concepção da obra, estudo da viabilidade econômica.

✓ ANTEPROJETO

Concentração completa em termos arquitetônicos e construtivos do partido geral da obra; serve também para fins de apresentação de projeto.

✓ PROJETO EXECUTIVO

Detalhamento arquitetônico, iniciado com o Projeto Básico (plantas, desenhos, memorial executivo, especificações, quantificação de materiais e serviços, orçamentos e custos) e o Projeto Legal, que é composto por desenhos e documentos que formam o acervo necessário para a aprovação do projeto frente ao Poder Público.

Como pode se observar, o projeto permite um amplo planejamento sobre o investimento que será realizado. O sistema modular não dispensa a elaboração do projeto, pelo contrário, o fato de ser constituído por uma execução simultânea de subsistemas (executam-se parte das instalações hidráulicas e elétricas ao mesmo tempo em que se ergue a alvenaria) faz com que um projeto bem elaborado seja fundamental.

Na fase de projeto, é preciso definir o que se deseja construir; qual o tipo de edificação; qual o acabamento que será adotado; onde será a construção; se haverá disponibilidade de matéria-prima; qual solo será utilizado; com que mão-de-obra será

executada. A resposta antecipada a essas variáveis já permite uma redução bastante significativa de custos numa obra.

O custo do material (tijolo) pode ser obtido pela seguinte somatória de custos:

ESTIMATIVA DE CUSTO PARA A PRODUÇÃO DO TIJOLO MODULAR EM PRENSA MANUAL			
MATÉRIA-PRIMA	(R\$/ mil)	M.D.O. ²	(R\$/ mil)
SOLO ¹	6,5	OPERADOR DA PRENSA	20,0
CIMENTO ³	76,0	AJUDANTE DO OPERADOR	20,0
FRETES	Incluso	SERVENTE	10,0
EQUIPAMENTO	(R\$/ mil)	CONTROLE TECNOLÓGICO	(R\$/ mil)
PRENSA MANUAL ^{4,5}	25,0	BALANÇA / FERRAMENTAS	-
TRITURADOR		LONAS / PALETES	-
MANUTENÇÃO	Incluso	CURA	-

ESTIMATIVA DE CUSTO DA PRODUÇÃO DO TIJOLO (no LMABC) = 155,50 R\$/mil

1. valores relativos ao solo utilizado na pesquisa, fornecido pela Mineração Itaporanga Ltda. Período (dez.2002).

3. Consumos aproximados de cimento (kg/mil) e solo (m³/mil) para traço em massa (1:7), de acordo com os modelos de prensa manual:

- modular 10x20 = 200kg/mil – 1,2 m³/mil;
- modular 12,5x25 = 400kg/mil – 2,5 m³/mil;
- modular 15x30 = 520kg/mil – 3,8 m³/mil;

2. valor médio de MDO de servente. Produção estimada de 1,2 milheiro por dia.

4. Produtividade (segundo o fabricante) dos modelos de prensa manual:

- modular 10x20 = 250 a 300 tijolos/ hora (modelo utilizado);
- modular 12,5x25 = 150 a 200 tijolos/hora;
- modular 15x30 = 100 a 150 tijolos/ hora.

5. Tijolos/m² de parede (segundo o fabricante):

- modular 10x20 = 90 a 100 tijolos/ m² (modelo utilizado);
- modular 12,5x25 = 58 a 64 tijolos/ m²;
- modular 15x30 = 41 a 45 tijolos/ m²

No quadro acima é possível perceber a gama de variáveis que compõem o custo do tijolo. Dessa forma é preciso analisar com critério a realidade de cada caso. Por exemplo, o valor da MDO (mão-de-obra) em programas de mutirão é praticamente nulo. Da mesma maneira, solos extraídos do local onde se instala a produção podem gerar uma economia significativa.

Em comparação com o custo de tijolos de barro cozido à vista, há vantagem (de acordo com a realidade analisada) do tijolo modular. O preço por milheiro do tijolo à vista encontra-se na faixa de R\$200,00/ mil a R\$380,00/ mil³⁸. O tijolo comum pode ser encontrado por aproximadamente R\$70,00/ mil³⁹. Quanto ao custo da edificação, as variáveis na composição de custo se multiplicam ainda mais. Para ilustrar uma comparação de custo final de construção residencial, será exposto um trabalho de consultoria técnica realizada

³⁸ Valores de mercado na cidade de São Carlos em dezembro de 2002.

³⁹ Idem nota 1.

pelo Eng.º João Eurípedes Sabino com o título *Projeto Cajuru: Análise Técnica*, destinada à Prefeitura do Município de Sacramento (MG) e tendo como objeto de análise a construção de um conjunto habitacional que empregou tijolos modulares de solo-cimento.

✓ PROJETO.

O projeto foi desenvolvido pela empresa HABITEC e consta da elaboração de três tipologias de moradia denominadas HABITEC 01, 02 e 03 e encerrando, respectivamente, áreas construídas de 43,6m², 46,9m² e 53,64m². As figuras abaixo demonstram as plantas baixas dos projetos:

FIGURA 10 – HABITEC 01 (43,6m²).

FIGURA 11 – HABITEC 02 (46,9m²).

FIGURA 11 – HABITEC 03 (53,64m²).

✓ ANÁLISE DE CUSTOS.

No item 05 da análise técnica, intitulado “Peças Técnicas”, faz parte dos pareceres um laudo de avaliação de custo atualizado de uma edificação isolada construída com tijolos de solo-cimento modulares e uma análise comparativa de uma edificação construída com métodos convencionais (tijolos cerâmicos com 8 furos).

Alguns valores são interessantes de serem analisados:

CUSTO DE CONSTRUÇÃO COM SISTEMA MODULAR				
SERVIÇO	UNID.	QUANTIDADE	CUSTO UNITÁRIO (R\$)	CUSTO TOTAL (R\$)
ALVENARIA MODULAR	m ²	118,04	8,34	948,45
REVESTIMENTOS EXTERNOS	m ²	-	-	-
REVESTIMENTOS INTERNOS	m ²	-	-	-
IMPERMEABILIZAÇÃO ALVENARIA	m ²	12,26	7,62	93,42
INST. HIDRÁULICA	-	-	-	115,53
INST. ELÉTRICA	-	-	-	135,96
CUSTO TOTAL DA RESIDÊNCIA				3.804,97
<i>TIPO DE MDO: MUTIRÃO.</i>				
CUSTO DE CONSTRUÇÃO SISTEMA CONVENCIONAL				
ALVENARIA (tijolo 8 furos)	m ²	118,04	9,09	1.072,98
REVESTIMENTOS EXTERNOS	m ²	71,37	5,76	411,10
REVESTIMENTOS INTERNOS	m ²	164,71	5,43	894,38
IMPERMEABILIZAÇÃO ALVENARIA	m ²	12,26	7,62	93,42
INST. HIDRÁULICA	-	-	-	511,68
INST. ELÉTRICA	-	-	-	328,90
CUSTO TOTAL DA RESIDÊNCIA				10.914,88
CUSTO TOTAL DA MDO				5.147,33
<i>TIPO DE MDO: CONTRATO DE EMPREITA.</i>				

Os valores acima referem-se ao mês de junho de 2.000.

O custo total da edificação construída com tijolo modular foi cerca de 65% menor do que o custo de uma residência construída por sistema convencional. Nota-se, contudo, que se o valor da MDO da construção convencional for subtraído, assumindo uma hipótese de mutirão, essa diferença cai para 34% de economia a favor do sistema modular.

Mas a comparação ainda pode ser contestada, se for analisada a diferença entre os acabamentos. Por exemplo, a ausência de revestimento interno (chapisco, emboço e reboco) na edificação com tijolos modulares. Em contrapartida, o tijolo furado é muito mais barato que o tijolo à vista (assim como a MDO para o seu assentamento).

No geral, pode-se admitir que as grandes vantagens do sistema modular estão concentradas na produtividade da alvenaria, no menor desperdício devido a não necessidade de cortes da parede e do tijolo e na menor espessura de revestimentos. Outra consideração é a facilidade de transferência de tecnologia, além é claro das vantagens ambientais citadas no início do anexo.

O melhor aproveitamento do potencial dos tijolos modulares relaciona-se com uma série de ações conjuntas dentro do contexto da obra e que devem ser, assim como em qualquer outro sistema construtivo, previamente analisadas por um projeto tecnológico.

ANEXO C**GRÁFICOS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DAS PAREDES**

GRÁFICOS TENSÃO DEFORMAÇÃO – PAREDE 1

GRÁFICOS TENSÃO DEFORMAÇÃO – PAREDE 2

GRÁFICOS TENSÃO DEFORMAÇÃO – PAREDE 3

ANEXO D**RESULTADOS DE ENSAIOS EM CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS, TIJOLOS,
PRISMAS E ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO**

CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO
 RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA
 NORMAS ABNT: NBR 12024; NBR12025 E NBR13555

LOTE: L1A - MSC 1:10

Cimento: CP V ARI Plus
Cura: câmara úmida

Agregado: solo arenoso
Moldagem: 26/02/2002

Capeamento: enxofre
Idade do ensaio: 7 dias

MSC 1:10 - Hótima - 26/02						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
1	49,97	101,67	199,39	442,2	2,22	9,9
2	50,12	100,9	199,07	439,6	2,21	nc
3	49,97	100,42	196,94	439,8	2,23	10,3
4	50,15	102,58	202,63	450,4	2,22	9,8
5	50,27	101,1	200,66	446,2	2,22	9,6
6	50,1	101,95	200,98	447,4	2,23	9,4
7	50,15	100,45	200,95	447,8	2,23	10,2
8	50,06	101,67	200,11	444,6	2,22	9,6
9	49,95	101,15	198,21	441,2	2,23	nc
10	51,15	100,25	206,00	456,4	2,22	nc
Média				445,2	2,22	9,8
Desvio Padrão				-	-	0,32
C. V. (%)				-	-	3,26

MSC 1:10 - H5%						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
11	50,13	100,78	198,91	391,7	1,97	5,7
12	50,1	101,10	199,30	390,7	1,96	5,2
13	50,15	101,92	201,32	387,7	1,93	nc
14	50,07	101,22	199,30	389,5	1,95	4,6
15	50,08	101,77	200,47	395,3	1,97	5,0
16	49,7	101,07	196,08	381,0	1,94	4,4
17	50,06	100,45	197,71	385,4	1,95	5,3
18	50,15	101,67	200,83	391,6	1,95	5,1
19	49,97	101,15	198,37	388,1	1,96	nc
20	51,15	100,25	206,00	399,2	1,94	nc
Média				389,6	1,95	5,0
Desvio Padrão				-	-	0,43
C. V. (%)				-	-	8,56

Ensaio de Absorção de Água idade 7 dias - MSC 1:10

CP	m. seca (g)	m. sat. (g)	Absorção (%)	Média (%)
2	408	439,7	7,8	7,6
9	411,5	442,4	7,5	
10	424,9	457	7,6	
13	375,5	419,7	11,8	11,8
19	376,3	420,5	11,7	
20	386,7	432,2	11,8	

CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO
 RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA
 NORMAS ABNT: NBR 12024; NBR12025 E NBR13555

LOTE: L1B - MSC 1:7

Cimento: CP V ARI Plus

Cura: câmara úmida

Agregado: solo arenoso

Moldagem: 18/02/2002

Capeamento: enxofre

Idade do ensaio: 7 dias

MSC 1:7 - Hótima - 18/02						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
1	49,93	101,4	198,54	444,5	2,24	15,0
2	50,13	101,98	201,28	448,6	2,23	14,4
3	49,72	101,98	198,00	441	2,23	15,0
4	50,13	101,3	199,94	448,7	2,24	14,6
5	50,2	102,43	202,73	449,4	2,22	15,7
6	50,13	102,12	201,56	448	2,22	nc
7	50,15	101,25	200,00	447,3	2,24	14,8
8	50,06	101,58	199,93	445,3	2,23	14,9
9	49,95	100,5	196,94	439,1	2,23	nc
10	50,2	100,65	199,21	442,6	2,22	nc
Média				446,4	2,23	14,9
Desvio Padrão				-	-	0,42
C. V. (%)				-	-	2,80

MSC 1:7 - H5%						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
11	50,1	101,72	200,53	389,9	1,94	nc
12	49,78	100,65	195,89	385,2	1,97	nc
13	50,17	101,98	201,60	390,4	1,94	5,91
14	50,06	101,58	199,93	393,4	1,97	5,83
15	50,06	102,55	201,84	393,2	1,95	5,54
16	50,28	100,47	199,49	389,6	1,95	6,62
17	51,02	101,45	207,41	397,6	1,92	5,62
18	50,06	101,85	200,46	390,6	1,95	6,35
19	49,97	101,65	199,35	391,6	1,96	6,35
20	50,15	101,05	199,60	390,6	1,96	nc
Média				391,2	1,95	6,0
Desvio Padrão				-	-	0,41
C. V. (%)				-	-	6,82

Ensaio de Absorção de Água idade 7 dias - MSC 1:7

CP	m. seca (g)	m. sat. (g)	Absorção (%)	Média (%)
6	420,5	449,9	7,0	7,0
9	421,2	449,7	6,8	
10	422,6	452,6	7,1	
11	374,8	413,9	10,4	10,2
12	379,1	417,3	10,1	
20	378,5	416,5	10,0	

CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO
 RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA
 NORMAS ABNT: NBR 12024; NBR12025 E NBR13555

LOTE: L1C - MSC 1:12

Cimento: CP V ARI Plus

Cura: câmara úmida

Agregado: solo arenoso

Moldagem: 27/02/2002

Capeamento: enxofre

Idade do ensaio: 7 dias

MSC 1:12 - Hótima						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
1	49,95	101,15	198,21	438,9	2,21	6,8
2	51,1	101,95	209,08	462,5	2,21	nc
3	50,12	100,9	199,07	439,8	2,21	7,4
4	50,15	102,58	202,63	450,4	2,22	8,1
5	49,97	101,67	199,39	438,5	2,20	7,1
6	49,97	101,42	198,90	442,8	2,23	7,5
7	50,06	100,67	198,14	441,6	2,23	nc
8	50,15	100,45	198,42	439,5	2,22	7,8
9	50,27	101,15	200,76	441,2	2,20	7,3
10	50,15	101,25	200,00	443,2	2,22	nc
Média				444,6	2,21	7,4
Desvio Padrão				-	-	0,43
C. V. (%)				-	-	5,80

MSC 1:12 - H5%						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
11	50,05	100,78	198,28	386,1	1,95	4,8
12	50,1	101,10	199,30	384,3	1,93	4,5
13	49,7	101,92	197,73	383,6	1,94	nc
14	50,15	101,22	199,94	389,5	1,95	5,5
15	49,85	100,05	195,27	379,5	1,94	4,2
16	49,7	101,07	196,08	377,9	1,93	4,3
17	50,06	100,45	197,71	378,1	1,91	nc
18	50,07	101,67	200,19	386,9	1,93	5,1
19	49,93	101,15	198,05	388,1	1,96	5,5
20	50,08	100,25	197,47	381,2	1,93	nc
Média				387,1	1,94	4,8
Desvio Padrão				-	-	0,54
C. V. (%)				-	-	11,17

Ensaio de Absorção de Água idade 7 dias - MSC 1:12

CP	m. seca (g)	m. sat. (g)	Absorção (%)	Média (%)
2	432,8	468,2	8,2	8,1
7	410,9	443,1	7,8	
10	410,2	444,6	8,4	
13	375,4	418,9	11,6	11,8
17	362,1	405,1	11,9	
20	367,8	411,9	12,0	

CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO
 RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA
 NORMAS ABNT: NBR 12024; NBR12025 E NBR13555

LOTE: L2A - MSCSi 1:10

Cimento: CP V ARI Plus
Cura: câmara úmida

Agregado: solo arenoso
Moldagem: 28/02/2002

Capeamento: enxofre
Idade do ensaio: 7 dias

MSCSi 1:10 - Hótima						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
1	49,85	101,55	198,20	440,6	2,22	7,5
2	50,07	101,83	200,50	444,5	2,22	8,2
3	50,20	100,35	198,62	439,3	2,21	7,5
4	49,97	101,28	198,62	438,7	2,21	7,7
5	50,08	101,57	200,07	445	2,22	7,4
6	50,15	100,47	198,46	437,3	2,20	nc
7	50,15	100,05	197,63	438,3	2,22	nc
8	50,05	101,10	198,91	441,3	2,22	nc
9	50,50	100,25	200,80	443,3	2,21	7,5
10	50,15	100,35	198,22	441,3	2,23	7,9
Média				441,4	2,22	7,7
Desvio Padrão				-	-	0,27
C. V. (%)				-	-	3,53

MSCSi 1:10 - H5% - 04/02						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
11	50,08	100,58	198,12	385,6	1,95	4,7
12	49,83	101,43	197,81	384,3	1,94	4,4
13	50,08	101,25	199,44	389,5	1,95	5,4
14	49,95	101,45	198,80	386,2	1,94	5,0
15	50,08	100,42	197,81	387,9	1,96	4,8
16	50,06	100,68	198,16	385,4	1,94	nc
17	51,15	100,15	205,79	393,9	1,91	nc
18	50,20	100,65	199,21	387,4	1,94	5,2
19	49,97	101,45	198,96	387,6	1,95	nc
20	50,00	101,20	198,71	386,4	1,94	4,8
Média				387,8	1,94	4,9
Desvio Padrão				-	-	0,33
C. V. (%)				-	-	6,73

Ensaio de Absorção de Água idade 7 dias - MSCSi 1:10

CP	m. seca (g)	m. sat. (g)	Absorção (%)	Média (%)
6	406,1	438,3	7,9	7,9
7	407,7	439,4	7,8	
8	409,5	442,5	8,1	
16	373,6	412,7	10,5	10,5
17	381,1	420,1	10,2	
19	374,5	415	10,8	

CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-SÍLICA
 RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA
 NORMAS ABNT: NBR 12024; NBR12025 E NBR13555

LOTE: L2B - MSCSi 1:7

Cimento: CP V ARI Plus

Cura: câmara úmida

Agregado: solo arenoso

Moldagem: 26/02/2002

Capeamento: enxofre

Idade do ensaio: 7 dias

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

MSCSi 1:7 - Hótima - 26/02						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
1	50,17	100,60	198,85	442,3	2,22	nc
2	50,10	101,08	199,27	445,1	2,23	15,1
3	50,02	101,53	199,49	448,9	2,25	14,0
4	49,92	101,43	198,50	445,4	2,24	14,5
5	50,00	100,87	198,05	444,3	2,24	15,3
6	49,80	102,10	198,87	446,1	2,24	15,4
7	50,13	100,78	198,91	446,2	2,24	nc
8	50,1	101,10	199,30	448,9	2,25	nc
9	49,78	100,65	195,89	439,5	2,24	14,6
10	50,17	100,98	199,62	448,3	2,25	15,4
Média				446,0	2,24	14,9
Desvio Padrão				-	-	0,54
C. V. (%)				-	-	3,63

MSCSi 1:7 - H5%						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
11	50,07	101,32	199,50	381,1	1,91	6,1
12	50,15	102,27	202,01	388,5	1,92	6,3
13	49,92	101,50	198,66	376,9	1,90	6,0
14	50,20	101,08	200,06	378,4	1,89	5,4
15	49,97	102,03	200,10	383,7	1,92	6,2
16	50,02	100,70	197,88	377	1,91	nc
17	49,7	101,07	196,08	376,5	1,92	5,7
18	50,06	100,45	197,71	378,1	1,91	nc
19	49,95	100,5	196,94	375,9	1,91	nc
20	50,2	100,65	199,21	384,5	1,93	5,8
Média				381,7	1,91	5,9
Desvio Padrão				-	-	0,33
C. V. (%)				-	-	5,52

Ensaio de Absorção de Água idade 7 dias - MSCSi 1:7

CP	m. seca (g)	m. sat. (g)	Absorção (%)	Média (%)
1	416,3	442,8	6,4	6,4
7	421,4	447,1	6,1	
8	421,6	449,6	6,6	
16	365,8	407	11,3	11,3
18	366,1	408,3	11,5	
19	364,5	404,7	11,0	

CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-SÍLICA
 RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA
 NORMAS ABNT: NBR 12024; NBR12025 E NBR13555

LOTE: L2C - MSCSi 1:12

Cimento: CP V ARI Plus
Cura: câmara úmida

Agregado: solo arenoso
Moldagem: 1/03/2002

Capeamento: enxofre
Idade do ensaio: 7 dias

MSCSi 1:12 - Hótima						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
1	49,85	101,55	198,20	442,1	2,23	nc
2	50,08	101,57	200,07	443,5	2,22	nc
3	50,15	100,47	198,46	444,7	2,24	7,1
4	50,15	101,05	199,60	441,4	2,21	6,1
5	50,07	101,83	200,50	440,3	2,20	nc
6	50,20	101,35	200,60	441,6	2,20	5,9
7	49,97	101,28	198,62	441,2	2,22	6,5
8	50,05	101,10	198,91	441,2	2,22	6,2
9	50,50	100,25	200,80	442,1	2,20	5,7
10	50,15	100,35	198,22	441,5	2,23	6,3
				442,0	2,21	6,3
Desvio Padrão				-	-	0,45
C. V. (%)				-	-	7,26

MSCSi 1:12 - H5% - 04/02						
CP	d. médio (mm)	c. médio (mm)	Vol. (cm ³)	massa (g)	dens. (g/cm ³)	f _{sc7} (MPa)
11	50,05	100,58	197,88	379,6	1,92	4,2
12	49,67	101,43	196,54	379,1	1,93	4,8
13	49,95	101,25	198,41	379,1	1,91	4,1
14	49,95	101,62	199,13	384,1	1,93	5,6
15	50,08	100,42	197,81	379,9	1,92	4,5
16	50,06	101,15	199,08	381,6	1,92	4,0
17	50,15	100,15	197,83	380,5	1,92	4,0
18	50,20	100,95	199,80	383,5	1,92	nc
19	49,97	101,45	198,96	378,6	1,90	nc
20	50,00	101,20	198,71	380,5	1,91	nc
				381,5	1,91	4,5
Desvio Padrão				-	-	0,58
C. V. (%)				-	-	12,95

Ensaio de Absorção de Água idade 7 dias - MSCSi 1:12

CP	m. seca (g)	m. sat. (g)	Absorção (%)	Média (%)
1	422,4	457,8	8,4	8,2
2	424,7	459,6	8,2	
5	421,3	455,1	8,0	
18	371,5	416,5	12,1	11,8
19	364,2	405,9	11,4	
20	368,6	411,8	11,7	

RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L1A - MSC 1:10

Cimento: CP-II E 32

Agregado: solo arenoso

Capeamento: Pasta de cimento

Cura: úmida

Moldagem: 03/01/02

Procedimento: NBR 8492

Teor cimento (%): 10

rel. a/agl (kg/kg): 0,55

Teor umidade (%): 5

CP	IDADE (dias)	tensão na A.bruta		tensão na A.líquida		Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		<i>f_b</i> (MPa)	<i>f_{bm}</i> (MPa)	<i>f_b</i> (MPa)	<i>f_{bm}</i> (MPa)		
1	3	1,3	1,38	1,63	1,73	0,15	10,77
2		1,46		1,83			
3		1,16		1,46			
4		1,6		2,01			
5		1,39		1,75			
6		1,36		1,71			
7	7	1,68	1,78	2,11	2,23	0,19	10,67
8		1,89		2,38			
9		1,50		1,89			
10		2,06		2,59			
11		1,79		2,25			
12		1,75		2,20			
13	14	1,64	1,90	2,06	2,39	0,23	12,13
14		2,20		2,76			
15		1,80		2,26			
16		1,70		2,14			
17		2,14		2,69			
18		1,94		2,44			
19	28	2,95	2,85	3,71	3,58	0,39	13,69
20		2,82		3,54			
21		3,03		3,81			
22		2,10		2,64			
23		3,23		4,06			
24		2,94		3,69			
25	63	3,17	3,37	3,98	4,23	0,29	8,51
26		3,42		4,30			
26		3,07		3,86			
28		3,89		4,89			
29		3,29		4,13			
30		3,35		4,21			
31	91	3,17	3,39	3,98	4,26	0,22	6,43
32		3,25		4,08			
33		3,25		4,08			
34		3,57		4,49			
35		3,73		4,69			
36		3,35		4,21			
37	120	3,30	3,48	4,15	4,37	0,11	3,07
38		3,50		4,40			
39		3,60		4,52			
40		3,57		4,49			
41		3,45		4,34			
42		3,45		4,34			

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L1B - MSC 1:7

Cimento: CP-II E 32

Agregado: solo arenoso

Capeamento: Pasta de cimento

Cura: úmida

Moldagem: 07/01/02

Procedimento: NBR 8492

Teor cimento (%): 14,3

rel. a/agl (kg/kg): 0,4

Teor umidade (%): 5

CP	IDADE (dias)	tensão na A.bruta		tensão na A.líquida		Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		fb (MPa)	fbm (MPa)	fb (MPa)	fbm (MPa)		
1	3	1,98	1,79	2,49	2,25	0,15	8,42
2		1,91		2,40			
3		1,84		2,31			
4		1,64		2,06			
5		1,6		2,01			
6		1,75		2,20			
7	7	2,16	2,31	2,71	2,90	0,54	23,31
8		2,93		3,68			
9		1,62		2,04			
10		2,94		3,69			
11		1,90		2,39			
12		2,3		2,89			
13	14	4,12	3,82	5,18	4,80	0,18	4,80
14		3,83		4,81			
15		3,55		4,46			
16		3,75		4,71			
17		3,83		4,81			
18		3,82		4,80			
19	28	4,28	4,22	5,38	5,30	0,25	6,01
20		3,85		4,84			
21		4,48		5,63			
22		4,02		5,05			
23		4,49		5,64			
24		4,2		5,28			
25	63	5,18	5,55	6,51	6,97	0,40	7,12
26		5,95		7,48			
26		5,35		6,72			
28		5,16		6,48			
29		6,09		7,65			
30		5,55		6,97			
31	91	5,53	5,52	6,95	6,94	0,26	4,67
32		5,81		7,30			
33		5,80		7,29			
34		5,21		6,55			
35		5,25		6,60			
36		5,52		6,94			
37	120	5,45	5,65	6,85	7,10	0,20	3,45
38		5,93		7,45			
39		5,84		7,34			
40		5,57		7,00			
41		5,48		6,89			
42		5,63		7,08			

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L1C - MSC 1:12

Cimento: CP-II E 32

Agregado: solo arenoso

Capeamento: Pasta de cimento

Cura: úmida

Moldagem: 09/01/02

Procedimento: NBR 8492

Teor cimento (%): 8,3

rel. a/agl (kg/kg): 0,65

Teor umidade (%): 5

CP	IDADE (dias)	tensão na A.bruta		tensão na A.líquida		Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		<i>fb</i> (MPa)	<i>fbm</i> (MPa)	<i>fb</i> (MPa)	<i>fbm</i> (MPa)		
1	3	0,78	0,89	0,98	1,12	0,08	8,99
2		0,88		1,11			
3		1,02		1,28			
4		0,93		1,17			
5		0,86		1,08			
6		0,87		1,09			
7	7	0,99	0,97	1,24	1,22	0,12	12,20
8		1,12		1,41			
9		0,76		0,96			
10		1,03		1,29			
11		0,97		1,22			
12		0,97		1,22			
13	14	1,68	1,75	2,11	2,20	0,10	5,55
14		1,92		2,41			
15		1,64		2,06			
16		1,73		2,17			
17		1,78		2,24			
18		1,75		2,20			
19	28	2,08	2,24	2,61	2,82	0,12	5,17
20		2,39		3,00			
21		2,19		2,75			
22		2,20		2,76			
23		2,36		2,97			
24		2,22		2,79			
25	63	2,55	2,92	3,20	3,67	0,44	15,16
26		2,93		3,68			
26		3,54		4,45			
28		2,33		2,93			
29		3,25		4,08			
30		2,91		3,66			
31	91	2,87	2,93	3,61	3,68	0,12	3,95
32		2,75		3,46			
33		2,97		3,73			
34		2,95		3,71			
35		3,10		3,90			
36		2,94		3,69			
37	120	2,91	2,92	3,66	3,67	0,05	1,60
38		2,84		3,57			
39		2,97		3,73			
40		2,95		3,71			
41		2,95		3,71			
42		2,91		3,66			

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L2A - MSCSi 1:10

Cimento: CP-II E 32

Agregado: solo arenoso

Capeamento: Pasta de cimento

Cura: úmida

Moldagem: 10/01/02

Procedimento: NBR 8492

Teor cimento (%): 9

rel. a/agl (kg/kg): 0,57

Teor umidade (%): 5

Teor sílica (% subst. m Cimento): 10

CP	IDADE (dias)	tensão na A.bruta		tensão na A.líquida		Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		<i>fb</i> (MPa)	<i>fbm</i> (MPa)	<i>fb</i> (MPa)	<i>fbm</i> (MPa)		
1	3	1,49	1,45	1,87	1,82	0,07	4,91
2		1,52		1,91			
3		1,39		1,75			
4		1,51		1,90			
5		1,35		1,70			
6		1,41		1,77			
7	7	1,76	1,89	2,21	2,37	0,24	12,97
8		2,20		2,76			
9		1,74		2,19			
10		1,60		2,01			
11		2,17		2,73			
12		1,85		2,32			
13	14	1,68	1,82	2,11	2,29	0,09	5,19
14		1,78		2,24			
15		1,82		2,29			
16		1,85		2,32			
17		1,97		2,48			
18		1,82		2,29			
19	28	2,28	2,39	2,87	3,00	0,27	11,36
20		2,26		2,84			
21		2,2		2,76			
22		2,93		3,68			
23		2,28		2,87			
24		2,39		3,00			
25	63	3,09	3,12	3,88	3,92	0,04	1,42
26		3,06		3,85			
26		3,18		4,00			
28		3,16		3,97			
29		3,11		3,91			
30		3,12		3,92			
31	91	3,43	3,34	4,31	4,20	0,14	4,32
32		3,23		4,06			
33		3,5		4,40			
34		3,12		3,92			
35		3,44		4,32			
36		3,344		4,20			
37	120	3,51	3,70	4,41	4,66	0,14	3,89
38		3,75		4,71			
39		3,87		4,86			
40		3,83		4,81			
41		3,56		4,47			
42		3,704		4,66			

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L2B - MSCSi 1:7

Cimento: CP-II E 32 **Agregado:** solo arenoso **Capeamento:** Pasta de cimento
Cura: úmida **Moldagem:** 11/01/02 **Procedimento:** NBR 8492

Teor cimento (%): 12,8 **rel. a/agl (kg/kg):** 0,42
Teor umidade (%): 5 **Teor sílica (% subst. m Cimento):** 10

CP	IDADE (dias)	tensão na A.bruta		tensão na A.líquida		Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		fb (MPa)	fbm (MPa)	fb (MPa)	fbm (MPa)		
1	3	1,65	1,84	2,07	2,31	0,10	5,43
2		1,85		2,32			
3		1,92		2,41			
4		1,89		2,38			
5		1,91		2,40			
6		1,83		2,30			
7	7	2,04	2,39	2,56	3,00	0,20	8,21
8		2,48		3,12			
9		2,37		2,98			
10		2,63		3,31			
11		2,45		3,08			
12		2,37		2,98			
13	14	2,63	2,38	3,31	3,00	0,20	8,33
14		2,51		3,15			
15		2,08		2,61			
16		2,23		2,80			
17		2,45		3,08			
18		2,4		3,02			
19	28	2,77	2,78	3,48	3,49	0,35	12,47
20		2,8		3,52			
21		3,04		3,82			
22		2,14		2,69			
23		3,13		3,93			
24		2,8		3,52			
25	63	3,9	3,76	4,90	4,72	0,23	6,16
26		3,43		4,31			
26		4,07		5,11			
28		3,56		4,47			
29		3,82		4,80			
30		3,77		4,74			
31	91	3,9	3,90	4,90	4,90	0,08	2,01
32		3,86		4,85			
33		3,78		4,75			
34		4		5,03			
35		3,97		4,99			
36		3,9		4,90			
37	120	3,95	4,19	4,96	5,27	0,36	8,55
38		4,9		6,16			
39		4,1		5,15			
40		4		5,03			
41		4		5,03			
42		4,2		5,28			

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L2C - MSCSi 1:12

Cimento: CP-II E 32

Agregado: solo arenoso

Capeamento: Pasta de cimento

Cura: úmida

Moldagem: 15/01/02

Procedimento: NBR 8492

Teor cimento (%): 7,5

rel. a/agl (kg/kg): 0,67

Teor umidade (%): 5

Teor sílica (% subst. m Cimento): 10

CP	IDADE (dias)	tensão na A.bruta		tensão na A.líquida		Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		<i>fb</i> (MPa)	<i>fbm</i> (MPa)	<i>fb</i> (MPa)	<i>fbm</i> (MPa)		
1	3	0,98	1,01	1,23	1,27	0,03	3,43
2		1,02		1,28			
3		1,05		1,32			
4		0,96		1,21			
5		1,04		1,31			
6		1,01		1,27			
7	7	1,18	1,20	1,48	1,50	0,03	2,47
8		1,22		1,53			
9		1,16		1,46			
10		1,18		1,48			
11		1,24		1,56			
12		1,19		1,50			
13	14	1,55	1,48	1,95	1,86	0,06	3,86
14		1,46		1,83			
15		1,38		1,73			
16		1,49		1,87			
17		1,51		1,90			
18		1,48		1,86			
19	28	1,89	1,85	2,38	2,33	0,10	5,42
20		1,8		2,26			
21		1,81		2,27			
22		1,74		2,19			
23		2,03		2,55			
24		1,84		2,31			
25	63	2,12	2,40	2,66	3,01	0,18	7,42
26		2,47		3,10			
26		2,65		3,33			
28		2,3		2,89			
29		2,45		3,08			
30		2,4		3,02			
31	91	2,67	2,57	3,36	3,23	0,21	8,18
32		2,7		3,39			
33		2,31		2,90			
34		2,84		3,57			
35		2,34		2,94			
36		2,55		3,20			
37	120	2,84	2,82	3,57	3,55	0,36	12,62
38		3,37		4,24			
39		2,25		2,83			
40		2,87		3,61			
41		2,76		3,47			
42		2,85		3,58			

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

RESULTADOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E ABSORÇÃO DE ÁGUA

NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L3 - MSC 1:7

Cimento: CP V ARI Plus

Agregado: solo arenoso

Capeamento: pasta de cimento

Cura: úmida

Moldagem: 24/05/02

Procedimento: NBR 8492

Teor cimento (%): 14,3

rel. a/agl (kg/kg): 0,52

Teor umidade (%): 6,5

CP	IDADE (dias)	tensão na A.bruta		tensão na A.líquida		Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		fb (MPa)	fbm (MPa)	fb (MPa)	fbm (MPa)		
1	7	5,15	5,25	6,47	6,60	0,12	2,24
2		5,14		6,46			
3		5,20		6,54			
4		5,25		6,60			
5		5,45		6,85			
6		5,32		6,69			
7	28	6,50	6,91	8,17	8,68	0,36	5,19
8		6,42		8,07			
9		7,28		9,15			
10		7,05		8,86			
11		7,15		8,99			
12		7,05		8,86			
13	119	8,40	8,28	10,56	10,40	0,64	7,79
14		8,25		10,37			
15		7,65		9,61			
16		9,15		11,50			
17		7,45		9,36			
18		8,75		11,00			

absorção de água								
idades	1º det. 7 dias			Média	2º det. 28 dias			Média
amostras	am1	am2	am3	7dias	am4	am5	am6	28dias
m. seca em estufa(g)	1478,4	1485,3	1489,2	1484,6	1495,3	1498,7	1465,7	1486,6
m. saturado (g)	1630,8	1642,1	1639,4	1638,6	1621,3	1634,9	1598,2	1618,1
ganho de massa (g)	152,4	156,8	150,2	154,1	126,0	136,2	132,5	131,6
absorção (%)	10,3%	10,6%	10,1%	10,3%	8,4%	9,1%	9,0%	8,9%
Limite da Norma (%)	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO
RESULTADOS DE ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA
NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L1A - MSC 1:10

idades	1º det. 7 dias			Média	2º det. 28 dias			Média	3º det. 91 dias			Média
amostras	am1	am2	am3	7dias	am4	am5	am6	28dias	am7	am8	am9	91dias
m. seca em estufa(g)	1405,4	1402,7	1403,5	1403,9	1332,1	1374,1	1382,6	1362,9	1386,2	1410,8	1406,9	1401,3
m. saturado (g)	1600,5	1618,3	1612,7	1610,5	1518,0	1551,6	1563,4	1544,3	1568,7	1560,5	1574,2	1567,8
ganho de massa (g)	195,1	215,6	209,2	206,6	185,9	177,5	180,8	181,4	182,5	149,7	167,3	166,5
absorção (%)	13,9%	15,4%	14,9%	14,7%	14,0%	12,9%	13,0%	13,3%	13,1%	10,6%	11,9%	11,9%
Limite da Norma (%)	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%

LOTE: L1B - MSC 1:7

idades	1º det. 7 dias			Média	2º det. 28 dias			Média	3º det. 91 dias			Média
amostras	am1	am2	am3	7dias	am4	am5	am6	28dias	am7	am8	am9	91dias
m. seca em estufa(g)	1430,0	1435,6	1432,1	1432,6	1482,7	1398,7	1478,3	1453,2	1422,0	1409,3	1389,4	1406,9
m. saturado (g)	1607,9	1612,7	1611,1	1610,6	1639,0	1564,9	1632,5	1612,1	1553,3	1570,6	1535,8	1553,2
ganho de massa (g)	177,9	177,1	179,0	178,0	156,3	166,2	154,2	158,9	131,3	161,3	146,4	146,3
absorção (%)	12,4%	12,3%	12,5%	12,4%	10,5%	11,9%	10,4%	11,0%	9,2%	11,4%	10,5%	10,4%
Limite da Norma (%)	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%

LOTE: L1C - MSC 1:12

idades	1º det. 7 dias			Média	2º det. 28 dias			Média	3º det. 91 dias			Média
amostras	am1	am2	am3	7dias	am4	am5	am6	28dias	am7	am8	am9	91dias
m. seca em estufa(g)	1409,4	1350,6	1402,6	1387,5	1397,3	1382,9	1392,5	1390,9	1389,4	1418,3	1394,8	1400,8
m. saturado (g)	1625,8	1568,0	1619,9	1604,6	1602,0	1574,6	1578,9	1585,2	1575,0	1600,3	1578,5	1584,6
ganho de massa (g)	216,4	217,4	217,3	217,0	204,7	191,7	186,4	194,3	185,6	182,0	183,7	183,8
absorção (%)	15,4%	16,2%	15,5%	15,9%	14,6%	13,9%	13,4%	14,0%	13,4%	12,8%	13,2%	13,1%
Limite da Norma (%)	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-SÍLICA
RESULTADOS DE ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA
NORMA: ABNT NBR 8492

LOTE: L2A - MSCSi 1:10

idades	1º det. 7 dias			Média	2º det. 28 dias			Média	3º det. 91 dias			Média
amostras	am1	am2	am3	7dias	am4	am5	am6	28dias	am7	am8	am9	91dias
m. seca em estufa(g)	1401,1	1419,4	1402,6	1407,7	1430,2	1428,6	1432,5	1430,4	1435,7	1438,5	1449,6	1441,3
m. saturado (g)	1603,0	1602,3	1604,7	1603,3	1626,2	1628,3	1629,8	1628,1	1623,2	1627,3	1629,8	1626,8
ganho de massa (g)	201,9	182,9	202,1	195,6	196,0	199,7	197,3	197,7	187,5	188,8	180,2	185,5
absorção (%)	14,4%	12,9%	14,4%	13,9%	13,7%	14,0%	13,8%	13,8%	13,1%	13,1%	12,4%	12,9%
Limite da Norma (%)	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%

LOTE: L2B - MSCSi 1:7

idades	1º det. 7 dias			Média	2º det. 28 dias			Média	3º det. 91 dias			Média
amostras	am1	am2	am3	7dias	am4	am5	am6	28dias	am7	am8	am9	91dias
m. seca em estufa(g)	1427,1	1440,3	1432,7	1433,4	1431,2	1427,9	1430,9	1430,0	1449,8	1440,3	1443,6	1444,6
m. saturado (g)	1611,7	1641,8	1629,4	1627,6	1627,4	1597,2	1599,8	1608,1	1608,2	1604,3	1610,7	1607,7
ganho de massa (g)	184,6	201,5	196,7	194,3	196,2	169,3	168,9	178,1	158,4	164,0	167,1	163,2
absorção (%)	12,9%	14,0%	13,7%	13,6%	13,7%	11,9%	11,8%	12,5%	10,9%	11,4%	11,6%	11,3%
Limite da Norma (%)	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%

LOTE: L2C - MSCSi 1:12

idades	1º det. 7 dias			Média	2º det. 28 dias			Média	3º det. 91 dias			Média
amostras	am1	am2	am3	7dias	am4	am5	am6	28dias	am7	am8	am9	91dias
m. seca em estufa(g)	1368,4	1402,8	1398,5	1389,9	1400,5	1392,7	1388,1	1393,8	1398,4	1438,3	1424,8	1420,5
m. saturado (g)	1565,0	1563,8	1587,6	1572,1	1564,9	1573,7	1570,2	1569,6	1575,0	1600,3	1578,5	1584,6
ganho de massa (g)	196,6	161,0	189,1	182,2	164,4	181,0	182,1	175,8	176,6	162,0	153,7	164,1
absorção (%)	14,4%	11,5%	13,5%	13,1%	11,7%	13,0%	13,1%	12,6%	12,6%	11,3%	10,8%	11,6%
Limite da Norma (%)	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%	22%	22%	22%	20%

RESULTADOS DE ENSAIOS EM TIJOLOS, PRISMAS E ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Nomenclatura:

Prisma composto por dois tijolos, assentados com argamassa	$P_{a2-x/3}$
Prisma composto por três tijolos, assentados com argamassa	$P_{a3-x/3}$
Prisma composto por dois tijolos, assentados a seco	$P_{s2-x/3}$
Prisma composto por três tijolos, assentados a seco	$P_{s3-x/3}$
Corpo-de-prova cilíndrico de argamassa de assentamento	$A-x/3$

x/3 indica a posição representativa do corpo-de-prova no painel de parede dividido em 3 partes.

Resultados de Resistência à compressão de prismas e argamassa da parede 1									
P_{a2}		P_{a3}		A		P_{s2}		P_{s3}	
Prisma	f_p (MPa)	Prisma	f_p (MPa)	C.P.	f_a (MPa)	Prisma	f_p (MPa)	Prisma	f_p (MPa)
$P_{a2-1/3(1)}$	9	$P_{a3-1/3(1)}$	6,1	$A-1/3(1)$	15,3	$P_{s2-1/3(1)}$	5,5	$P_{s3-1/3(1)}$	4
$P_{a2-1/3(2)}$	8,4	$P_{a3-1/3(2)}$	6,2	$A-1/3(2)$	15,3	$P_{s2-1/3(2)}$	5,1	$P_{s3-1/3(2)}$	4,7
$P_{a2-2/3(1)}$	9	$P_{a3-2/3(1)}$	6,4	$A-2/3(1)$	15,6	$P_{s2-2/3(1)}$	5,8	$P_{s3-2/3(1)}$	4,6
$P_{a2-2/3(2)}$	7,4	$P_{a3-2/3(2)}$	5,6	$A-2/3(2)$	13,6	$P_{s2-2/3(2)}$	6,2	$P_{s3-2/3(2)}$	4,2
$P_{a2-3/3(1)}$	6,8	$P_{a3-3/3(1)}$	6	$A-3/3(1)$	13,4	$P_{s2-3/3(1)}$	5,1	$P_{s3-3/3(1)}$	3,7
$P_{a2-3/3(2)}$	7,3	$P_{a3-3/3(2)}$	5,8	$A-3/3(2)$	15,2	$P_{s2-3/3(2)}$	5,7	$P_{s3-3/3(2)}$	4
f_m (MPa)	8,0		6,0		14,7		5,6		4,2
D.P.	0,9		0,3		1,0		0,4		0,4
C.V. (%)	11,8		4,7		6,6		7,7		9,2

Resultados de Resistência à compressão de prismas e argamassa da parede 2									
P_{a2}		P_{a3}		A		P_{s2}		P_{s3}	
Prisma	f_p (MPa)	Prisma	f_p (MPa)	C.P.	f_a (MPa)	Prisma	f_p (MPa)	Prisma	f_p (MPa)
$P_{a2-1/3(1)}$	7,1	$P_{a3-1/3(1)}$	6,9	$A-1/3(1)$	15,6	$P_{s2-1/3(1)}$	6,5	$P_{s3-1/3(1)}$	4,5
$P_{a2-1/3(2)}$	6,7	$P_{a3-1/3(2)}$	5,9	$A-1/3(2)$	15,4	$P_{s2-1/3(2)}$	5,5	$P_{s3-1/3(2)}$	4,7
$P_{a2-2/3(1)}$	6,6	$P_{a3-2/3(1)}$	6	$A-2/3(1)$	15,1	$P_{s2-2/3(1)}$	5,8	$P_{s3-2/3(1)}$	4,1
$P_{a2-2/3(2)}$	7,1	$P_{a3-2/3(2)}$	6,4	$A-2/3(2)$	16,1	$P_{s2-2/3(2)}$	5,4	$P_{s3-2/3(2)}$	4,6
$P_{a2-3/3(1)}$	6,9	$P_{a3-3/3(1)}$	5,6	$A-3/3(1)$	14,9	$P_{s2-3/3(1)}$	5,3	$P_{s3-3/3(1)}$	4,9
$P_{a2-3/3(2)}$	9	$P_{a3-3/3(2)}$	6,1	$A-3/3(2)$	15,1	$P_{s2-3/3(2)}$	5,1	$P_{s3-3/3(2)}$	4,1
f_m (MPa)	7,2		6,2		15,4		5,6		4,5
D.P.	0,9		0,5		0,4		0,5		0,3
C.V. (%)	12,3		7,3		2,8		8,9		7,3

Resultados de Resistência à compressão de prismas e argamassa da parede 3									
P_{a2}		P_{a3}		A		P_{s2}		P_{s3}	
Prisma	f_p (MPa)	Prisma	f_p (MPa)	C.P.	f_a (MPa)	Prisma	f_p (MPa)	Prisma	f_p (MPa)
$P_{a2-1/3(1)}$	5,9	$P_{a3-1/3(1)}$	6,4	$A-1/3(1)$	15,8	$P_{s2-1/3(1)}$	5,7	$P_{s3-1/3(1)}$	4
$P_{a2-1/3(2)}$	7,8	$P_{a3-1/3(2)}$	6,4	$A-1/3(2)$	16,3	$P_{s2-1/3(2)}$	6,1	$P_{s3-1/3(2)}$	4,6
$P_{a2-2/3(1)}$	9,5	$P_{a3-2/3(1)}$	6,1	$A-2/3(1)$	16,8	$P_{s2-2/3(1)}$	5,4	$P_{s3-2/3(1)}$	4,7
$P_{a2-2/3(2)}$	8,9	$P_{a3-2/3(2)}$	6,5	$A-2/3(2)$	14,7	$P_{s2-2/3(2)}$	5,1	$P_{s3-2/3(2)}$	4
$P_{a2-3/3(1)}$	6,9	$P_{a3-3/3(1)}$	5,9	$A-3/3(1)$	16,5	$P_{s2-3/3(1)}$	5,3	$P_{s3-3/3(1)}$	4
$P_{a2-3/3(2)}$	8,4	$P_{a3-3/3(2)}$	6,5	$A-3/3(2)$	15,7	$P_{s2-3/3(2)}$	5	$P_{s3-3/3(2)}$	4,3
f_m (MPa)	7,9		6,3		16,0		5,4		4,3
D.P.	1,3		0,2		0,7		0,4		0,3
C.V. (%)	16,8		3,9		4,7		7,5		7,5

TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

ENSAIO DE DURABILIDADE EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO E SOLO-CIMENTO-SILICA.

NORMA: ABNT NBR 13544 (MODIFICADO - sem escovação)

LOTES: L1 E L2

LOTE	AMOSTRA	MASSA APÓS CICLOS				VARIAÇÃO DE MASSA (%)		RESIST. À COMPRESSÃO	
		1º sec.	1º imers.	6º imers.	7º sec.	individual	média	F _{b120} (MPa)	F _{b120m} (MPa)
L1A	1	1394,9	1568,7	1548,6	1388,6	-0,5	-1,2	3,60	3,30
	2	1411,6	1560,5	1537	1384,0	-2,0		2,95	
	3	1396,8	1570,1	1561,0	1391,4	-0,4		3,35	
	4	1421,3	1573,2	1558,3	1398,2	-1,6		3,35	
	5	1402,9	1555,2	1543,8	1381,3	-1,5		3,25	
L1B	6	1428,7	1553,3	1554,3	1423,9	-0,3	-0,5	6,17	5,52
	7	1428,3	1570,6	1561,3	1417,0	-0,8		4,86	
	8	1435,7	1578,5	1572,6	1425,7	-0,7		5,70	
	9	1431,8	1572,9	1565,3	1425,8	-0,4		5,25	
	10	1432,4	1569,5	1561,3	1426,1	-0,4		5,60	
L1C	11	1389,8	1575	1526,8	1369,2	-1,5	-1,7	2,27	2,71
	12	1418,9	1600,3	1540,7	1399,2	-1,4		3,14	
	13	1411,4	1595,8	1578,1	1388,2	-1,6		2,97	
	14	1392,5	1573,0	1556,3	1369,2	-1,7		2,65	
	15	1395,4	1574,9	1553,9	1366,3	-2,1		2,50	
L2A	16	1366,3	1542	1518	1364,3	-0,1	-0,1	3,93	3,90
	17	1364,7	1537,2	1522,7	1363,2	-0,1		3,87	
	18	1367,2	1531,4	1521,9	1365,1	-0,2		3,85	
	19	1389,1	1569,6	1556,9	1387,7	-0,1		3,94	
	20	1373,6	1531,7	1522,7	1372,2	-0,1		3,90	
L2B	21	1451,4	1612,9	1583,1	1452,4	0,07	0,06	5,17	5,02
	22	1442,0	1609	1582,8	1443,0	0,07		4,86	
	23	1465,2	1626,4	1593,7	1466,7	0,10		4,95	
	24	1454,3	1613,8	1591,4	1454,6	0,02		5,10	
	25	1476,7	1640,7	1601,8	1477,2	0,03		5,00	
L2C	26	1389,0	1556,1	1539,7	1389,2	0,01	0,02	2,95	3,00
	27	1426,8	1581,5	1562	1426,1	-0,05		3,03	
	28	1415,6	1578,1	1547,8	1415,5	-0,01		2,87	
	29	1397,4	1559,0	1528,1	1398,1	0,05		3,10	
	30	1391,6	1552,1	1519,3	1393,0	0,10		3,05	