

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Autora: Priscilla Henriques Mieli

**AVALIAÇÃO DO TIJOLO MODULAR DE SOLO-CIMENTO
COMO MATERIAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Aprovado por:

Profº: Célio Albano da Costa Neto (Orientador)

Profº: Romildo Dias Tolêdo Filho

Profº: Tsuneharu Ogasawara

Rio de Janeiro

Julho de 2009

MIELI, PRISCILLA HENRIQUES

**AVALIAÇÃO DO TIJOLO MODULAR DE SOLO-CIMENTO
COMO MATERIAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

[Rio de Janeiro] 2009

(DEMM-POLI/UFRJ, Engenharia de Materiais, 2009)

p. 48 xii 29,7 cm

Projeto de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais,
Curso de Engenharia de Materiais

1 – Solo-cimento

2 – Tijolo ecológico

3 – Tijolo modular

“A maior recompensa do nosso trabalho não é o que nos pagam por ele,
mas aquilo em que ele nos transforma.”
(John Ruskin)

Dedico este trabalho à Deus, ao meu filho Eduardo,
ao meu marido e companheiro Leonardo,
ao meu irmão Luiz Felipe e
aos meus pais Ana Cristina e Carlos Alberto
por todo apoio e esforço ao longo de todos esses anos.

Agradecimentos

Agradeço à Deus pela minha vida e por todas as oportunidades que Ele me deu. Ao meu filho Eduardo por cada sorriso e carinho e por ser o principal motivo de mais essa conquista em minha vida. Ao meu marido e companheiro Leonardo por todo apoio e compreensão. Aos meus pais Ana Cristina e Carlos Alberto pelos ensinamentos e conselhos, pela dedicação e esforço ao longo de todos esses anos. Aos familiares e amigos que me incentivaram, apoiaram e, mesmo diante de todas as dificuldades, não me deixaram desistir desse projeto.

Ao professor Célio, pela orientação e conselhos.

Ao professor Romildo e às engenheiras Reila e Ana Catarina por todo apoio, atenção e ensinamentos.

À cada profissional do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ pela disponibilidade, paciência e compreensão com que me atenderam e responderam às minhas dúvidas e questionamentos.

À Construecol e aos seus profissionais que nos cederam os materiais e técnicas para o desenvolvimento deste trabalho.

À todos que, de alguma forma, colaboraram para que este trabalho se tornasse possível.

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO UM DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DO TIJOLO MODULAR DE SOLO-CIMENTO COMO MATERIAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Priscilla Henriques Mieli

Julho/2009

Orientador: Célio Albano da Costa Neto, Ph.D

Palavras-chave: solo-cimento; tijolo ecológico; tijolo modular.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre as propriedades e características do tijolo solo-cimento, com o intuito de produzir um material que seja barato, ecologicamente correto, de boa qualidade e com grande importância para o crescimento da qualidade e produtividade dos serviços de construção civil. Além da questão do material, 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 de 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 das obras sem desprezar a cultura, a realidade de consumo e os limites da mão-de-obra.

Para tal estudo, o auxílio da empresa Construecol foi de grande importância, uma vez que todo o material e técnicas utilizadas foram cedidos pela empresa citada. Dessa forma, a fim de obter informações que permitiram averiguar a eficácia desse material, foram realizados ensaios de caracterização do solo utilizado na composição do tijolo de solo-cimento, de resistência à compressão simples e de absorção d'água dos tijolos e comparados com outros materiais largamente utilizados no mercado da construção civil atualmente. Os resultados apontam que o tijolo de solo-cimento pode ser produzido com qualidade e baixo custo, desde que respeitadas as normas de produção e qualidade, sendo assim, uma boa opção para o setor da construção civil.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRUTURA DO SOLO	5
FIGURA 2 – IDADE EM FUNÇÃO DO AUMENTO DA RESISTÊNCIA PARA DIFERENTES COMPOSTOS DO CIMENTO	10
FIGURA 3 – COMPOSIÇÃO DO TIJOLO SOLO-CIMENTO	11
FIGURA 4 – DIFRATÔMETRO SHIMADZU – MODELO XRD 6000 – LABORATÓRIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA UFRJ	22
FIGURA 5 – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA – LABMIC - UFRJ	23
FIGURA 6 – PRENSA UTILIZADA NO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	26
FIGURA 7 – SOBREPOSIÇÃO DOS TIJOLOS PARA POSTERIOR REALIZAÇÃO DO ENSAIO .	26
FIGURA 8 – TIJOLOS SECOS EM ESTUFA A 105°C ATÉ CONSTÂNCIA DE PESO	28
FIGURA 9 – TIJOLOS IMERSOS EM ÁGUA	28
FIGURA 10 – DIFRATOGRAMA DO SOLO EM ANÁLISE	32
FIGURA 11 – DISTÂNCIAS INTERPLANARES OBTIDAS NO ENSAIO DO SOLO EM ANÁLISE (EM CIMA) CONFRONTADAS COM DISTÂNCIAS INTERPLANARES REFERENTES AOS MINERAIS POSSIVELMENTE PRESENTES NO SOLO EM ANÁLISE (EM BAIXO)	33
FIGURA 12 – DISTÂNCIAS INTERPLANARES REFERENTES A CADA MINERAL POSSIVELMENTE PRESENTE NO SOLO EM ANÁLISE	33
FIGURA 13 – MEV E RESPECTIVOS DIFRATOGRAMAS (OURO) DO SOLO EM ANÁLISE COM AUMENTO DE 50X	35
FIGURA 14 – MEV E RESPECTIVO DIFRATOGRAMA (OURO) COM AUMENTO DE 1000X ...	36
FIGURA 15 – MEV E RESPECTIVO DIFRATOGRAMA (CARBONO) COM AUMENTO DE 1000X	36

FIGURA 16 – MEV E RESPECTIVO DIFRATOGRAMA (CARBONO) COM AUMENTO DE 3000X	36
FIGURA 17 – TIJOLOS APÓS ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES (VISTA FRONTAL E LATERAL)	38
FIGURA 18 – DISPERSÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS TIJOLOS COM 7 DIAS E COM MAIS DE 28 DIAS DE CURA	39
FIGURA 19 – GRÁFICO REFERENTE AO ENSAIO DE ABSORÇÃO D'ÁGUA	40

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – FAIXAS APROXIMADAS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA AMOSTRA DE CIMENTO	9
TABELA 2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	13
TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO ..	13
TABELA 4 – TENSÕES DE RUPTURA (MPA) DE CORPOS-DE-PROVA DE SOLO-CIMENTO ..	14
TABELA 5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E CAPACIDADE DE ABSORÇÃO D'ÁGUA DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	15
TABELA 6 – PRODUTIVIDADE DAS PRENSAS PARA COMPONENTES DE SOLO-CIMENTO ..	25
TABELA 7 – LIMITES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESPECIFICADOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	27
TABELA 8 – LIMITES DE ABSORÇÃO D'ÁGUA ESPECIFICADOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO	29
TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DO SOLO	30
TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO DE CONSISTÊNCIA DO SOLO DE ACORDO COM O IP	31
TABELA 11 – CLASSIFICAÇÃO DO PH DO SOLO	32
TABELA 12 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARGILOMINERAIS APRESENTADOS NO ENSAIO DE RAIOS-X DO SOLO EM ANÁLISE	34
TABELA 13 – ELEMENTOS E RESPECTIVOS PERCENTUAIS DE PESO APRESENTADOS NO ENSAIO DE EDS COM OURO	35
TABELA 14 – ELEMENTOS E RESPECTIVOS PERCENTUAIS DE PESO APRESENTADOS NO ENSAIO DE EDS COM CARBONO.....	35
TABELA 15 – RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	37
TABELA 16 – RESULTADO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO D'ÁGUA	40

**TABELA 17 – COMPARATIVO ENTRE OS PRINCIPAIS TIPOS DE ALVENARIA UTILIZADOS
NA CONSTRUÇÃO ATUALMENTE 41**

INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades mais importantes da economia brasileira e assim será por muito tempo, face ao enorme déficit habitacional, conhecido de longa data, a premente necessidade de crescimento e a geração de empregos no país. Atualmente, assim como há tempos passados, em situações de retomada de crescimento e mesmo em meio a uma crise econômica mundial, visualiza-se rápida resposta do setor, proporcionando volumes vultosos de investimentos e geração de empregos. Isto faz com que esta atividade adquira contornos de destaque e posição de caráter estratégico na economia brasileira. No entanto, apesar do grande potencial do setor, ainda é possível observar atrasos notáveis em termos de tecnologia construtiva, como por exemplo o desperdício no canteiro de obras, o que induz à geração de grandes volumes de entulho, muitas vezes lançados em locais inadequados e que em pouco tempo não suportarão mais esses volumes, chegando a saturação e gerando mais um problema de alocação de resíduos no Brasil.

Por outro lado, ao longo de nossa história, o solo sempre foi amplamente aplicado em soluções arquitetônicas, por ser um material abundante e de fácil obtenção e manuseio, de baixo custo e apropriado para as mais diversas aplicações em construções, havendo registros de sua aplicação até em culturas muito antigas como a egípcia, e distintas, como a grega e a romana. A prova da eficiência desse material é que existem construções feitas com materiais derivados do solo que datam de vários séculos e resistem até os dias de hoje, preservando a estabilidade estrutural, como por exemplo a cidade histórica de Ouro Preto, em Minas Gerais, que tem aproximadamente quatro séculos de história e a maior parte desta, construída com o uso do solo. 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 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 e reciclagem de materiais fazem 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 da obra.

Em estimativa feita pela ONU, para satisfazer as necessidades elementares de moradia no mundo até final do ano 2000, havia necessidade de construção de pelo menos 500 milhões de unidades habitacionais. Nesse contexto, o uso do solo-cimento pode significar o retorno da utilização do solo, pois trata-se de uma matéria-prima abundante, com potencial para reduzir o custo das construções habitacionais e induzir os projetistas ao hábito de construir harmonizando projeto arquitetônico, materiais locais e sistema construtivo.

Desse modo, o uso dos tijolos de solo-cimento, produzidos por meio de prensas manuais ou hidráulicas, com aplicações de técnicas simples e soluções viáveis, está em conformidade com os objetivos acima mencionados e será abordado como tema deste trabalho.

O objetivo principal é realizar um estudo sobre as propriedades e características do tijolo solo-cimento, com o intuito de produzir um material que seja barato, ecologicamente correto, de boa qualidade e com grande importância para o crescimento da qualidade e produtividade dos serviços de construção civil.

Na composição do solo-cimento, o solo é o material que entra em maior proporção, devendo ser selecionado de modo que permita o menor consumo possível de cimento. Quando não se dispõe de um solo com as características desejadas, alguns autores, objetivando a obtenção de um material apropriado, consideram a possibilidade de se misturar dois ou mais solos, ou mesmo de se adicionar areia, de modo que o resultado seja favorável técnica e economicamente.

Na realização deste trabalho, visando a confecção dos tijolos, utilizou-se o solo de uma jazida, conhecida por Morada do Sol, localizada na cidade de Itaboraí, no estado do Rio de Janeiro. O cimento utilizado foi o Portland CP III-RS-32 da marca Nassau e a água é a mesma distribuída pela CEDAE (Companhia Estadual de Água e Esgoto). A composição de solo-cimento analisada foi preparada empregando-se a seguinte dosagem, em volume: 7,5 partes de solo; 1 parte de cimento; 0,5 partes de areia; 0,25 partes de cal e umidade de 5% do peso total da mistura.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 HISTÓRIA DO TIJOLO SOLO-CIMENTO

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o solo-cimento é o produto resultante da mistura íntima de solo, cimento portland e água, que quando compactados na umidade ótima e sob a máxima massa específica seca, em proporções previamente estabelecidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento. Os principais fatores que afetam as propriedades do solo-cimento são: tipo de solo, teor de cimento, teor de umidade, compactação e homogeneidade da mistura, além da idade e do processo de cura.

Em 1929, Proctor descobria a relação umidade / peso específico aparente na compactação de solos, o que permitia o início do desenvolvimento do solo-cimento para diversos tipos de construções, tais como: pavimentação, revestimento de canais, diques, reservatórios e barragens de terra, estabilização de taludes, injeções, ladrilhos, tijolos, blocos, painéis e paredes monolíticas. Os primeiros estudos do solo-cimento em grande escala foram feitos por Moore-Fields e Mill, nos Estados Unidos em 1932.

Em 1944, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) normalizava os ensaios, sendo seguida por outras entidades, tais como a *American Association of State Highway Officials* (AASHO) e a *Portland Cement Association* (PCA). Tais estudos foram rapidamente estendidos à Europa, principalmente Alemanha (na construção de aeroportos na época da guerra), Inglaterra e América do Sul (Brasil, Argentina e Colômbia).

No Brasil, o interesse pelo assunto aumentou após a regulamentação do material e aplicação do mesmo pela ABCP e a primeira obra em solo-cimento foi realizada em 1945, uma casa de bombas para abastecer as obras do aeroporto de Santarém - Pará, com 42 m². Em seguida, em Petrópolis - RJ, no local denominado Vale Florido, foram construídas casas residenciais com paredes monolíticas de solo-cimento.

No entanto, o interesse pelo solo-cimento na construção de habitações (como componente de alvenaria) foi desaparecendo, no Brasil, na medida em que outros materiais, na maioria dos casos, mais industrializados, surgiam no mercado. Foi então que em 1978, quando o extinto BNH (Banco Nacional da Habitação) amparado por estudos feitos pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e pelo CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento) que comprovavam o bom

desempenho do solo-cimento e a possibilidade de redução de custos, aprovou a técnica para a construção de habitações populares. Desde então, a experiência brasileira vem sendo bastante ampliada, com aplicação de novas técnicas construtivas, avanços na tecnologia dos materiais e aprimoramento dos equipamentos de produção. Hoje, por exemplo, se dispõe de equipamentos para a produção de blocos intertravados, que embora tenham custo mais elevado, possibilitam a passagem de tubulações e propiciam maior rapidez na execução da alvenaria, o que reduz o custo final da obra.

Dessa forma, atualmente, a utilização deste tipo de material é bastante expressiva em obras de pavimentação, reforços e melhorias de solos, em barragens e contenções, construções comerciais, além das já citadas casas populares.

1.2 O SOLO

A formação dos solos é causada por fatores como agentes atmosféricos, água, variações de temperatura e decomposições químicas que, continuamente, atacam a superfície terrestre e transformam as rochas em solo.

Os solos podem ser definidos como um conjunto de partículas sólidas, provenientes da desagregação de rochas por ações físicas e químicas, com água (ou outro líquido) e ar (**Figura 1**). Dessa forma, pode-se configurar o solo como uma estrutura porosa, sendo que as partículas, de modo geral, encontram-se livres para se deslocarem e, essa movimentação muda o comportamento dos solos, uma vez que altera as porcentagens, em volume, de suas fases constituintes (sólidos, ar e água).

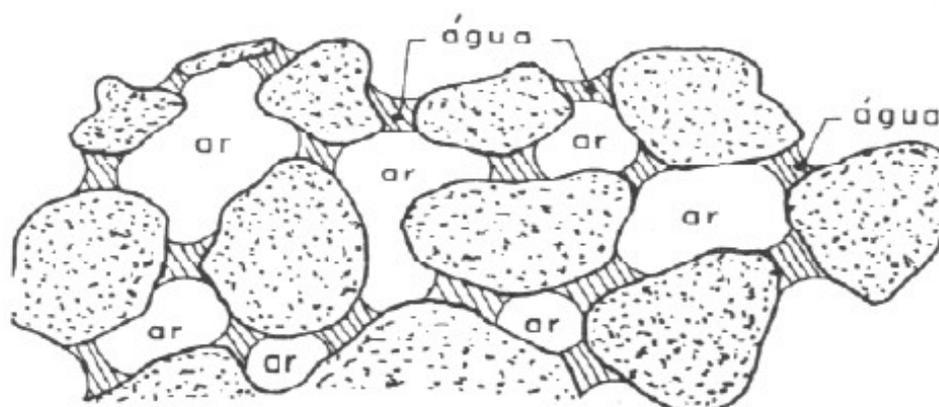


Figura 1 – Estrutura do solo

Como citado anteriormente, o solo é composto por partículas sólidas, por líquidos e gases. A parte sólida, insolúvel em água, é constituída 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.

1.2.1 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

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, conforme exposto anteriormente.

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. Além disso, todo processo de estabilização modifica as propriedades do sistema solo-água-ar, de forma 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 de 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 densidade ao solo, influenciando diretamente na resistência mecânica.

Existem três métodos principais de estabilização dos solos: estabilização mecânica, estabilização física e 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, 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. 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. Dessa forma, a opção pelo tipo adequado de estabilização e a escolha dos agentes estabilizadores 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.

Quando o agente estabilizador do solo é o cimento ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo a ele resistência inicial; paralelamente a este processo, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio provenientes da hidratação do cimento adicionado. Devido a esta troca, o solo torna-se mais granular, a adesividade é reduzida assim como a sensibilidade à variação de umidade e à variação volumétrica tornam-se menores. Além destas modificações iniciais, Abiko (1980) afirmou que, ao longo do tempo, formam-se compostos cimentantes que contribuem para o melhoramento de propriedades do material, tais como resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica.

Já na estabilização do solo com a cal, primeiramente ocorre hidratação da cal, que modifica o pH do solo e provoca floculação das argilas em razão das reações de troca catiônicas. Imediatamente, o material sofre redução da expansão e da retração e melhora sua plasticidade. Com o tempo, o ataque da argila pela cal produz reações pozolânicas e fenômenos de carbonetação, conferindo melhores características geomecânicas ao conjunto (GUIMARÃES, 1995).

1.2.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

A compactação do solo é o processo pelo qual suas partículas são forçadas a agruparem-se mais estreitamente, através da redução nos vazios de ar, geralmente por meios mecânicos.

Um dos mais importantes princípios da mecânica dos solos diz que a densidade de um solo compactado é função do teor de umidade no momento de sua compactação. Para uma energia de compactação constante, ao se adicionar água ao solo, sua densidade aparente aumentará até um certo ponto, chamado *umidade ótima*¹. 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 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. O teor ótimo de cimento ou cal a ser adicionado ao solo depende dos critérios técnicos (resistência, durabilidade) que se pretende alcançar. Abiko (1985), ao analisar sistemas de solo-cimento e solo-cal para componentes de alvenaria, indicou para solos arenosos o traço de 1:10, 1:12 e 1:14 (cimento:solo seco, em volume) e, para solos argilosos, a adição de 5% a 10% (em massa) de cal.

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 superficial do solo. De um modo geral, solos de granulometria desuniformes são ideais, pois além de requererem menor teor de estabilizante, os espaços existentes entre os grãos maiores são preenchidos por partículas menores do próprio solo e, neste caso, os produtos formados das reações de solo-aditivo, ao invés de preencher os vazios, agem de forma integral na ligação entre os grãos. Quando a granulometria do solo não é adequada, pode-se corrigi-la adicionando-se outros tipos de solo, tal como nos trabalhos de Sousa e Barbosa (2000), quando dois tipos de solo caracterizados como arenosos foram corrigidos com a adição de finos (silte + argila), assim promovendo a coesão do solo para moldagem de tijolos prensados.

Após a compactação, o solo adquire nova configuração e, esta, afeta significativamente as características mecânicas e, conseqüentemente, a porosidade e permeabilidade do material. Além disso, as propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão, durabilidade e absorção de água) do sistema solo-agente estabilizante compactados estão intimamente relacionadas com as condições de cura (umidade e temperatura) e compactação, ou seja, deve-se trabalhar com umidades de moldagem em torno do teor ótimo pois, quanto mais denso o sistema, maior a sua resistência. Quanto maior for o efeito da estabilização do solo, menor deve ser a perda de massa,

¹ É o teor de umidade correspondente à massa específica seca máxima.

indicando que o componente construtivo possui durabilidade e resistência (PICCHI et al., 1990).

1.3 CIMENTO

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água e que, depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, esse material não se decompõe mais. O cimento também pode ser tecnicamente definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso (serve como regulador do tempo de início de hidratação ou 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. Quando reduzido a pó, o clínquer tem composição química específica e propriedades físicas de cimento, contendo basicamente uma série de compostos anidros, dos quais pode-se destacar:

- Silicato tricálcico, ou alita $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$;
- Silicato dicálcico, ou belita $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$;
- Aluminato tricálcico $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$;
- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita $(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Tabela 1 – Faixas aproximadas dos principais componentes de uma amostra de cimento.

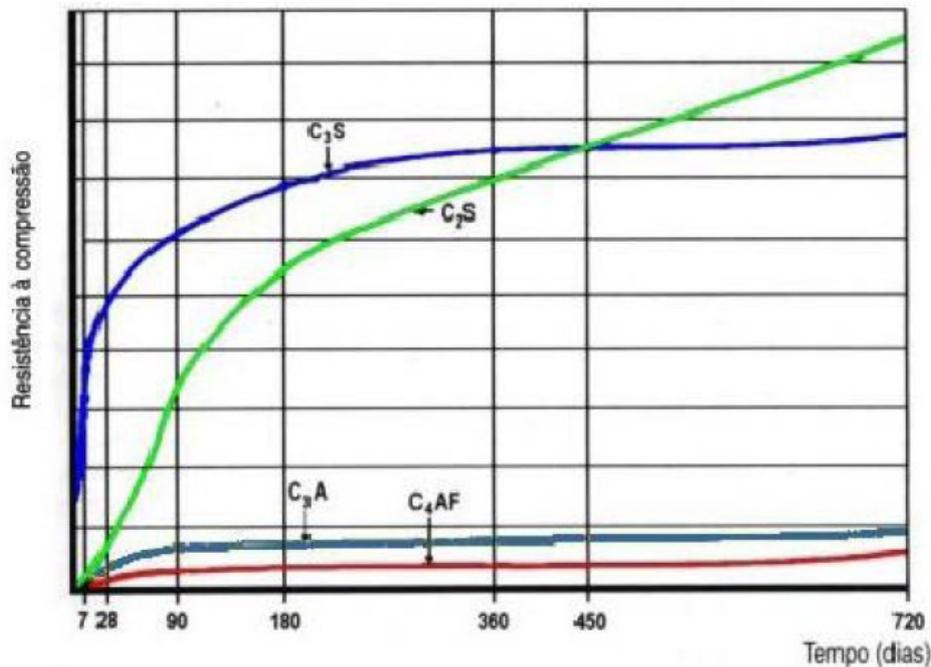
COMPONENTE	FÓRMULA QÍMICA	FÓRMULA USUAL	PROPORÇÃO (%)
Silicato tricálcico	$(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$	C_3S	45 a 75
Silicato dicálcico	$(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$	C_2S	7 a 35
Aluminato tricálcico	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	0 a 13
Ferroaluminato tetracálcico	$(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	1 a 18

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 principais componentes do cimento em hidratação são as seguintes:

- C_3A – reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação, propicia pouco desenvolvimento de resistência e forte retração;
- C_3S – responsável pelo desenvolvimento da resistência nas idades iniciais (3 a 28 dias) e propicia alto desprendimento de calor, libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$);
- C_2S – proporciona o desenvolvimento da resistência em idades mais avançadas (mais de 28 dias) com baixa liberação de calor, produz cerca de 18% em massa de $Ca(OH)_2$;
- C_4AF – desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque por sulfatos.

A **Figura 2** mostra um gráfico do aumento da resistência à compressão em função do tempo, desenvolvida pelos diferentes compostos do cimento.



Fonte: Durante (2000).

Figura 2 – Idade em função do aumento da resistência para diferentes compostos do cimento.

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 no que se refere à fissuração por retração. Os cimentos com elevada saturação de cal contêm sempre uma quantidade expressiva de cal livre e esta, quando hidratada, provoca expansões que reduzem a retração do material. Por isso, o aumento do C_3S na composição do cimento, diminui a retração do solo-cimento. No entanto, a retração aumenta com teores mais elevados de C_3A .

Diversas pesquisas demonstram evolução acerca da composição de cimentos e suas implicações na estabilização de solos. Por exemplo, a influência do cimento Portland de alto forno como estabilizadores de solos, incrementam a resistência mecânica à compressão e reduzem o índice de plasticidade em solos argilosos, o que comprova a eficiência e o potencial de utilização de alternativas tecnológicas na composição de cimentos. 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.

1.4 SOLO-CIMENTO

Solo-cimento é o material obtido pela mistura de solo, cimento e água (**Figura 3**). 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 – sólido, água e ar – que constituem o solo.

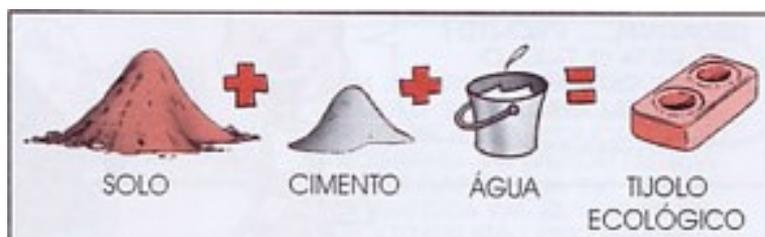


Figura 3 – Composição do tijolo solo-cimento.

À partir de pesquisas mais aprofundadas sobre a estabilização do solo com cimento, o mesmo passou a ser usado, principalmente na pavimentação de estradas. Somente ao final da década de 1940, através de algumas instituições como a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de Camaçari / Ba – CEPED, e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT, o Brasil resolveu utilizar o solo-cimento como material alternativo de construção.

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 em água;
- Há aumento da resistência à compressão;
- É mais durável, pois possui uma menor permeabilidade.

Por outro lado, o teor de cimento na mistura solo-cimento, pode comprometer a qualidade do mesmo, assim como o tipo de solo, o método de mistura e a

compactação. No entanto, sabe-se que, destes fatores, o solo é o que exerce maior influência e, se este for inadequado, pouco se poderá fazer para obter um produto satisfatório. No caso do teor de cimento, o aumento deste resulta no aumento da resistência à compressão e, conseqüentemente, da durabilidade, independente do tipo de solo. Porém, 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. A compactação adequada, por sua vez, é essencial para obtenção de um solo-cimento satisfatório, pois é esta que vai garantir que o material atinja um determinado peso específico, ou densidade aparente, que lhe confira resistência mecânica apropriada para um determinado fim.

No estudo de fissuras em paredes de tijolos de solo-cimento, realizado por Nascimento (1993), foram utilizados para a construção dos painéis, tijolos confeccionados com três tipos de solo: argiloso (A_4)², areno-argiloso (A_{2-6}) e arenoso (A_{2-4}) que foram estabilizados com cimento (7%, em massa). Os tijolos foram moldados em prensa hidráulica e, durante a cura, permaneceram úmidos durante 7 dias e protegidos das intempéries. Os resultados dos testes de resistência à compressão simples e de absorção d'água (**Tabela 2**) dos tijolos permitiram à autora verificar que os valores referentes às resistências ultrapassaram o valor mínimo exigido pela norma, sugerindo que o teor de cimento a ser adicionado no solo poderia ser ainda menor que o utilizado nos testes. Já com relação aos valores de absorção d'água, os tijolos de solo-cimento apresentaram valores aceitáveis pela norma. No entanto, dentre os três tipos de solo utilizados, o que apresentou melhor desempenho geral foi o solo arenoso.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de tijolos de solo-cimento.

Tipo de solo	Resistência à compressão simples (MPa)			Absorção d'água (%)	
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias
Argiloso	3,26	3,29	3,58	18,1	17,4
Areno-argiloso	2,48	3,03	3,38	12,9	12,9
Arenoso	3,82	3,90	4,55	12,9	11,9

Fonte: Nascimento (1993).

² Classificação dos solos segundo a *American Association of State Highway Officials* (AASHO).

Ferreira (2003) estudou a resistência à compressão simples e absorção d'água do material solo-cimento através da determinação experimental em corpos-de-prova cilíndricos, tijolos e painéis. Os solos utilizados foram arenoso (A₂₋₄) e argiloso (A₅₋₆) sendo adicionados a estes solos os teores de 6% e 10% de cimento Portland. Os resultados encontrados pelo autor para a resistência à compressão simples e absorção d'água estão mostrados na **Tabela 3**. O referido autor, com base nesses valores, recomendou solos com características semelhantes àsquelas do solo arenoso estudado para estabilização com cimento, sendo um material promissor para o atendimento às demandas por tecnologias apropriadas.

Tabela 3 – Caracterização físico-mecânica de misturas de solo-cimento.

Tratamentos	Corpos-de-prova				Tijolos			
	Resistência (MPa)			Absorção (%)	Resistência (MPa)			Absorção (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
aren + 6% cim	0,73	1,31	2,04	10,70	0,77	0,83	0,72	11,86
aren +10% cim	2,09	2,74	4,50	11,00	1,39	1,84	1,83	11,53
arg + 6% cim	0,30	0,44	0,67	27,00	0,50	0,39	0,37	26,09
arg +10% cim	0,67	1,07	1,10	27,80	1,01	0,67	0,60	25,21

Fonte: Ferreira (2003).

O objetivo do trabalho de Soares et al. (2004) foi apresentar os resultados dos ensaios de estabilização com cimento de dois solos da cidade de Santa Maria – RS, através dos quais tornou-se viável a construção de uma habitação com paredes monolíticas de solo-cimento. O estudo compreendeu a estabilização de dois solos arenosos (A₂₋₄ e A_{1-b}) com cimento tipo CP-IV (Pozolânico), utilizando-se os traços 1:12, 1:13 e 1:15 (cimento: solo, em massa). Para cada traço foram moldados 6 corpos-de-prova sendo metade para ruptura aos 7 dias de idade e a outra metade para ruptura aos 28 dias de idade. A **Tabela 4** apresenta os resultados médios de resistência à compressão dos corpos-de-prova, na qual os autores puderam observar que todos os traços das duas amostras de solos atenderam à especificação do CEPED, que recomenda a resistência mínima à compressão de 1 MPa, aos 28 dias de idade, para uso em paredes monolíticas de solo-cimento.

Tabela 4 – Tensões de ruptura (MPa) de corpos-de-prova de solo-cimento.

Amostra de solo	Traço 1:12		Traço 1:13		Traço 1:15	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
A ₂₋₄	1,70	2,90	1,70	2,44	1,60	2,10
A _{1-b}	1,83	2,80	1,69	2,50	1,67	2,45

Fonte: Soares et al. (2004).

No entanto, em relação à construção da casa de solo-cimento, Soares et al. (2004) utilizaram o solo A₂₋₄ e o traço 1:12 em função da durabilidade. A fundação da casa foi feita em *concreto ciclópico*³, as paredes monolíticas foram executadas através da compactação do solo em fôrmas, em camadas de 15 cm, com um soquete com peso variando de 2,5 Kg a 3,0 Kg, sendo as paredes internas construídas com 13,5 cm de espessura e as externas com 20 cm. Segundo relatos finais dos autores, a técnica de construção de habitações com paredes monolíticas pode ser adotada facilmente, necessitando de uso de ferramentas simples e proporcionando geração de trabalho e renda para mão-de-obra pouco qualificada. Após 1 ano de uso, a habitação ainda possui bom estado de conservação, não havendo trincas nas paredes e infiltração por umidade, comprovando seu bom desempenho frente as intempéries. As principais características que causaram satisfação do proprietário da habitação foram a boa resistência e aparência da mesma, além do excelente conforto térmico.

Dentro do Programa de Melhoria da Moradia dos Funcionários de Baixa Renda da Universidade Federal de Goiás (Conjunto Nossa Morada, Goiânia - Go), Ferreira et al. (2003) estudaram tijolos prensados de solo-cimento, em paredes de alvenaria auto-portante, empregados no referido programa habitacional, comparando-os com tijolos maciços comuns e tijolos furados, com o intuito de definir critérios de aplicação prática, controle de patologias e comparação de custos. Para tal estudo, foi empregado na fabricação dos tijolos de solo-cimento, um solo argiloso (A₆), o qual teve sua granulometria corrigida através da adição de 10% de areia, além da adição de 10% de cimento Portland (CP II - E 32). Os tijolos foram fabricados com máquina de acionamento mecânico e a cura foi efetuada após 6 horas de moldagem e durante os 7 primeiros dias, com aspersão de água através de regador munido de chuveiro em um galpão de modo a evitar os efeitos do vento e a incidência de raios solares. De todos os lotes de tijolos de solo-cimento foram retirados 3 tijolos, os quais foram submetidos aos ensaios de compressão simples e absorção d'água (**Tabela 5**).

³ Concreto onde se usa pedras de mão ou matacões para aumentar seu volume e peso.

Tabela 5 – Resistência à compressão simples e capacidade de absorção d’água dos tijolos de solo-cimento.

Repetições	Resistência à compressão simples (MPa)			Absorção d’água (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
Amostra 1	2,21	2,72	3,86	14,40
Amostra 2	1,98	2,58	3,20	14,70
Amostra 3	2,15	2,60	3,37	15,00
Média	2,11	2,63	3,48	14,70

Fonte: Ferreira et al. (2003).

Ferreira et al. (2003) observaram um período de 28 dias entre a fabricação e o uso dos tijolos a fim de se garantir que os efeitos da retração volumétrica devido à secagem fossem minimizados. Para a fabricação da casa de tijolos de solo-cimento, a fundação empregada pelos autores foi a do tipo direta e contínua, através do assentamento de dois tijolos em espelho e posterior preenchimento com concreto. Para o assentamento dos tijolos de solo-cimento utilizaram-se da argamassa de traço 1:2:9 (cimento:cal:areia média, em volume) e fator água/cimento 0,50. Já para a cobertura, as lajes foram confeccionadas através da combinação de vigotas pré-moldadas de perfil triangular (10x10x10 cm³) e lajotas (20x20x10 cm³). Devido ao ótimo acabamento final, a alvenaria de tijolos de solo-cimento foi entregue com paredes internas sem revestimento, sendo, no entanto, as paredes externas impermeabilizadas. Em relação à parte econômica, seguindo os mesmos parâmetros de comparação, o custo da casa de tijolo de solo-cimento foi 17,5% menor do que o da casa de tijolo maciço comum e 85% menor que o da casa construída com tijolo furado.

Arini (2000), com base nas experiências práticas efetuadas em laboratórios e canteiros de obra, dissertou sobre a tecnologia de produção da alvenaria estabilizada por cimentação, concluindo que tijolos de solo estabilizados com 6% de cimento, em volume, são mais indicados para utilização como tijolos estruturais. Por outro lado, os tijolos estabilizados com 1% ou 2% de cimento, em volume, são mais indicados para utilização como material de vedação.

Cartilhas como “O Solo-Cimento na Fabricação de Tijolo Modular”, produzida pela empresa Sahara(1998); livros e boletins técnicos como “Manual de Construção

com Solo-Cimento”, produzido pelo CEPED (1984a), o “O Solo-Cimento e suas aplicações Rurais”, produzido pela ABCP (1989), o “Solo-Cimento para fins construtivos” de Myrrha (2003); relatórios técnicos como “Paredes Monolíticas de Solo-Cimento: Hospital Adriano Jorge”, produzido pela ABCP (1979), entre outros ajudaram a difundir as técnicas construtivas do sistema solo-cimento, bem como apresentar aos usuários as vantagens e confiabilidade que se deve ter no produto.

1.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados citados anteriormente, pode-se concluir que materiais alternativos como solo-cimento são promissores nos âmbitos econômico, social e funcional. Sua utilização pode contribuir no sentido de baratear os custos envolvidos em pequenas construções, possibilitando a inserção de tecnologias apropriadas e a obtenção de um produto menos poluente que os convencionais, uma vez que sua produção não exige a queima, conseqüentemente não lança resíduos no ar e também não provoca desmatamento.

No entanto, ainda há necessidade de se estudar, mais aprofundadamente, aspectos técnicos, tais como propriedades mecânicas e durabilidade dos materiais alternativos. Além disso, deve-se levar em consideração a importância da disseminação desta tecnologia para o meio produtivo, tentando assim melhorar a aceitabilidade e emprego do material pelo usuário.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAL

2.1.1 SOLO

O solo utilizado para a realização deste trabalho foi retirado de uma jazida chamada Morada do Sol, localizada na cidade de Itaboraí - RJ e cuja classe textual foi classificada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SBCS - como argiloarenosa.

O solo foi submetido a diversos testes com a finalidade de avaliar seus efeitos sobre a qualidade do produto final, o tijolo de solo-cimento.

2.1.2 CIMENTO

Foi utilizado o cimento Portland CPIII-RS-32 (cimento de alto-forno resistente à sulfatos), da marca NASSAU, cujas características físicas, químicas e mecânicas atendem aos requisitos da norma NBR 5735 (ABNT, 1991).

2.1.3 CAL

Foi utilizada cal hidratada CH-III (de uso corrente em pinturas), da marca MINERCAL, a qual atende às especificações da norma NBR 7175 (ABNT, 1992a). Foi adquirida em casa comercial idônea do ramo da construção civil.

2.1.4 ÁGUA

Durante todo o experimento a água utilizada foi a mesma distribuída pela CEDAE (Companhia Estadual de Água e Esgoto), que é classificada como potável estando, portanto, de acordo com as normas estabelecidas para a produção do tijolo de solo-cimento.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MICROESTRUTURAL DO SOLO

Em todo o experimento foi utilizada a fração de solo passante na peneira ABNT 4,8 mm. As amostras então peneiradas foram secas ao ar para posterior utilização.

A preparação das amostras para a realização dos ensaios de caracterização foi realizada conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 1986a). Os ensaios aplicados ao solo foram os seguintes:

- Análise granulométrica, por peneiramento, de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984a);
- Determinação dos limites de liquidez e de plasticidade de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984c) e NBR 7180 (ABNT, 1984d), respectivamente;
- Determinação do pH;
- Determinação da composição do solo através dos ensaios de Raio-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);

2.2.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO

Para a realização deste ensaio, feito no Laboratório de Análises de Solos e Plantas – Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - , foi tomada a quantidade de amostra preparada de acordo com o disposto no método de ensaio, correspondente à norma NBR 6457 (ABNT, 1986a). A realização deste ensaio se deu através da passagem de toda a massa inicial pela série de peneiras do peneirador RO-TAP®. Após 10 minutos de peneiramento, em cada peneira encontraram-se retidas as partículas com granulometria maior ou igual à mesma e passantes na abertura anterior, além das partículas passantes em todas as peneiras que ficaram retidas no fundo. Na segunda etapa do ensaio, a massa do resíduo de cada peneira e do fundo foram pesadas e anotadas em uma tabela.

2.2.1.2 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO

A realização deste ensaio se deu com secagem prévia da amostra (NBR 6457 - ABNT, 1986a) e através dos procedimentos estabelecidos na norma NBR 6459 (ABNT, 1984c), a qual determina que o limite de liquidez, ou seja, o teor de umidade no qual o solo deixa de apresentar plasticidade, é estabelecido através do ensaio conhecido por “Casa Grande”. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises de Solos e Plantas, do Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

Neste ensaio, a amostra, sob diferentes níveis de umidade, é colocada em um recipiente côncavo do equipamento denominado “Casa Grande”. Antes de iniciar o ensaio, é feito um corte em bisel (1 cm de altura, 2 mm de largura e 60° de inclinação das paredes) nas amostras, que são submetidas a um determinado número de batidas. Para cada nível de umidade, computa-se um número de batidas, até que as paredes do corte em bisel da amostra se juntem em uma espessura de 1 polegada. Esse procedimento é feito de forma que se obtenha um conjunto de dados pareados de umidade da amostra e número de batidas. É recomendado que o conjunto de dados atenda uma faixa de número de batidas entre 18 e 32. Os dados são então plotados em um gráfico, a partir do qual se estima a umidade que equivalha a um número de 25 batidas.

2.2.1.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PLASTICIDADE DO SOLO

Para a realização do ensaio que determina o limite de plasticidade - teor de umidade no qual o solo começa a apresentar consistência plástica - foram seguidos os procedimentos estabelecidos na norma NBR 7180 (ABNT, 1984d), com secagem prévia da amostra (NBR 6457 - ABNT, 1986a). Este ensaio também foi realizado no Laboratório de Análises de Solos e Plantas, do Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Dessa forma, o L.P. foi determinado a partir de amostras de solo fino e seco, as quais foram umedecidas e moldadas em cilindros de 3 a 4 mm de diâmetro. De acordo com a metodologia, a umidade referente ao L.P. é atingida quando os cilindros, em função do trabalho em uma superfície lisa, começam a apresentar rachaduras. O resultado final, média de pelo menos três valores de umidade considerados satisfatórios, deve ser expresso em porcentagem, aproximado para o valor inteiro mais próximo.

2.2.1.4 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO PH DO SOLO

O ensaio de determinação do pH tem como objetivo determinar o grau de alcalinidade ou acidez do solo em análise. Esse procedimento é importante, visto que quanto mais ácido for o solo, maior será a quantidade de aditivos necessários à sua estabilização.

A determinação do pH, realizada no Laboratório de Análises de Solos e Plantas do Instituto de Agronomia da UFRRJ, foi feita em água, na proporção 1:2,5 (TFSA⁴: água destilada). O aparelho usado nessa determinação é o potenciômetro, que é provido de eletrodos de vidro e de calomelano, e deve ser calibrado com soluções tampão (padrões) de pH 7,0 e pH 4,0, visto que a maior parte dos solos apresenta pH dentro desse intervalo. Após a calibração do potenciômetro, faz-se a leitura do pH nas amostras e determina-se a classe de relação do solo.

2.2.1.5 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X APLICADO AO SOLO

Dentre as técnicas de caracterização de materiais, a mais indicada na determinação das fases cristalinas presentes em materiais cerâmicos é a difração de raios-x. Isto é possível porque, na maior parte dos sólidos (cristais), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-x.

Ao incidir um feixe de raios-x em um cristal, o mesmo interage com átomos presentes, originando o fenômeno de difração. A difração de raios-x ocorre segundo a Lei de Bragg (**Equação 1**), a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a

⁴ Terra Fina Seca ao Ar.

distância entre os planos que a originaram, que são característicos para cada fase cristalina.

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

onde:

n = número inteiro

λ = comprimento de onda dos raios-x incidentes

d = distância interplanar

θ = ângulo de difração

Dentre as vantagens da técnica de difração de raios-x para a caracterização de fases, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa destas fases, além da confiabilidade dos resultados obtidos, visto que o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina.

Como um dos objetivos deste trabalho foi a caracterização dos argilominerais presentes no solo estudado, a utilização da técnica de difração de raios-x tornou-se ainda mais indicada, pois uma análise química reportaria somente os elementos químicos presentes no material, mas não a forma como eles estão ligados. Por outro lado, na caracterização de argilas, o elevado teor de quartzo da amostra e sua facilidade de orientar-se resultam em picos bem definidos e de grande intensidade desta fase cristalina, prejudicando, muitas vezes, a identificação e caracterização das demais fases. Além disso, para algumas fases, muitas vezes os picos apresentados estão deslocados ou, em certos casos, nem aparecem. Isso porque é preciso levar em consideração no momento da análise de dados, alguns parâmetros como por exemplo, o comprimento de onda do tubo utilizado no ensaio de referência, pois caso não seja o mesmo, esses deslocamentos já são esperados, ou seja, caso o comprimento de onda do material em análise seja maior do que o comprimento de onda do material de referência, haverá um deslocamento do pico para a direita. Já em relação aos picos que não aparecem, um ponto importante é a intensidade dos picos do mineral de referência, por exemplo, se um pico tem aproximadamente 30% de intensidade do

mineral de referência, pode ser que ele nem apareça no mineral em estudo, caso sua intensidade nesse último seja igualmente pequena.

O ensaio de difração de raios-x para caracterização do solo em questão foi realizado em um difratômetro Shimadzu – modelo XRD 6000 (**Figura 4**), varrendo-se de 10° a 80° (escala 2 θ) com velocidade do goniômetro de 4°/min e tubo de cobre ($\lambda=1,5418$ Å), que encontra-se no Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Foi usado cerca de 20,0 mg de solo seco, desagregado e com granulometria inferior à peneira #ABNT 200 (abertura de 0,074 mm). Após o término do ensaio, as distâncias interplanares (d) referentes aos picos apresentados no difratograma foram confrontadas com as distâncias interplanares características de cada fase.



Figura 4: Difratômetro Shimadzu – modelo XRD 6000 – Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ

2.2.1.6 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) ASSOCIADO À ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDS)

Para a realização da microscopia eletrônica de varredura usou-se uma pequena amostra do solo, que foi colocada, na primeira parte da análise, sobre uma fita de ouro e, na segunda parte sobre uma fita de carbono, ambas com tensão de aceleração do feixe de elétrons de 15,0 kV e sinais emitidos por elétrons secundários. O microscópio

eletrônico utilizado foi o Jeol 2000 FX, do Laboratório Multi-usuário de Microscopia Eletrônica (LABMIC) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ, conforme mostra a **Figura 5**.



Figura 5: Microscópio eletrônico de varredura – LABMIC - UFRJ.

O princípio de realização de uma microscopia de varredura, consiste em um feixe de elétrons com cerca de 20 kV, gerado em um canhão, que é desmagnificado por um conjunto de lentes eletromagnéticas que agem como condensadores. Este feixe é focalizado sobre a amostra e, mediante bobinas defletoras, percorre uma varredura sobre pequena região da mesma. Como consequência, uma série de sinais são emitidos, dos quais destacam-se inicialmente elétrons secundários com cerca de 50 eV. Estes elétrons são captados por um detetor cuja resposta modula o brilho de um tubo de raios catódicos e que é varrido em sincronismo com o feixe eletrônico. Portanto, a cada ponto da amostra corresponde um ponto da tela e nela é mapeada a resposta do objeto ao feixe de excitação. Já o aumento é obtido pela relação entre a área varrida sobre a amostra e a área da tela do tubo.

O EDS (Energy Dispersive x-ray Detector – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X) é um acessório essencial no estudo da caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos assim como os íons constituintes são excitados e, conseqüentemente, mudam de nível energético. Ao retornarem à sua posição inicial, liberam a energia adquirida, a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x. Um detetor instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias

distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado. O diâmetro reduzido do feixe permite a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos ($< 5 \mu\text{m}$), permitindo assim, uma análise quase que pontual.

O uso em conjunto dessas duas técnicas é de grande importância, pois enquanto o MEV proporciona nítidas imagens (ainda que virtuais, uma vez que o que se vê no monitor do computador é a transcodificação da energia emitida pelas partículas, ao invés da radiação emitida pela luz, ao qual estamos acostumados), o EDS permite sua imediata identificação. Além da identificação mineral, o equipamento ainda permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados.

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

2.2.2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Os tijolos foram moldados de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR 10833 (ABNT, 1989). A primeira etapa do processo produtivo foi a preparação do solo, que consistiu na desaglomeração (destorroamento), pulverização e peneiramento do mesmo, de forma a garantir que o solo utilizado possui granulometria inferior a 4,8 mm.

Após o peneiramento, adicionou-se o cimento ao solo preparado e realizou-se uma mistura manual com os materiais secos, até a completa homogeneização, que é alcançada quando a mistura adquire coloração uniforme. A água foi adicionada em forma de chuveiro até a obtenção da umidade ideal, ou seja, uma argamassa ainda desaglomerada (farofada) aprovada no teste prático do bolo. Esse teste é bem simples e bastante utilizado no dia-a-dia da produção dos tijolos; consiste em encher a mão com a mistura de solo-cimento já úmida e, em seguida, aperta-se essa porção com muita força contra a palma da mão. Ao abrir a mão, o bolo formado deve apresentar as marcas dos dedos com nitidez e, ao partir em duas partes, o bolo não deve esfarelar.

Se o bolo esfarelar ao partir, é porque a mistura está precisando de mais água e se a mão ficar suja com uma certa umidade, é porque há excesso de água.

Após tais procedimentos, a mistura foi transferida para a prensa, a qual possui dois moldes, de forma que dois tijolos foram feitos a cada prensagem. A prensa utilizada foi a ECO PREMIUM 2600 MA, da empresa Ecomáquinas. Essa prensa é classificada como manual hidráulica e possui uma tensão de compactação que varia de 2,0 a 10,0 MPa, uma taxa de compactação⁵ de aproximadamente 1,65 e pode produzir até 2800 tijolos por dia (**Tabela 6**). Logo após a prensagem, os tijolos foram levados para a cura, à sombra, durante o período de 7 dias e umedecidos constante e frequentemente com regador munido de chuveiro, a fim de garantir cura necessária.

Tabela 6 – Produtividade das prensas para componentes de solo-cimento.

TIPO DE PRENSA		TENSÃO DE COMPACTAÇÃO (MPa)	TAXA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO	PRODUÇÃO (tijolos / dia)
Manual	Mecânica	1,5 - 2,0	1,38	300 a 1200
	Hidráulica	2,0 - 10,0	1,65	2000 a 2800
Motorizada	Mecânica	4,0 - 24,0	> 1,65	1600 a 12000
	Hidráulica	> 20,0	> 2,00	

Fonte: Grande (2003)

2.2.2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES APLICADO AOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Os tijolos foram submetidos ao teste de compressão simples de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR 10836 (ABNT, 1984). A prensa utilizada no ensaio (**Figura 6**) foi uma máquina hidráulica, servo controlada, da marca Shimadzu, com capacidade máxima total de 1000 KN (100 toneladas), apesar da faixa de carga de trabalho ter sido de 100 KN. O ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais Fernando L. L. B. Carneiro (LABEST) do Departamento de Engenharia Civil da UFRJ. Foram utilizados dois tijolos em cada análise, os quais foram colocados um em cima do outro, de forma que a altura ficasse proporcional à base, conforme se pode observar na **Figura 7**. Essa estrutura é utilizada para uma

⁵ A taxa de compactação corresponde à relação entre os volumes da mistura no estado solto e em estado compactado, sendo diretamente proporcional à tensão de compactação.

melhor dissipação da carga aplicada e, conseqüentemente, um resultado mais próximo da realidade.



Figura 6: Prensa utilizada no ensaio de compressão simples.



Figura 7: Sobreposição dos tijolos para posterior realização do ensaio.

Os resultados foram calculados individualmente para cada tijolo, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo. A resistência média foi determinada pela média aritmética de três ensaios.

Esses resultados são importantes, uma vez que, segundo Franco (1998), a resistência dos tijolos é a grande responsável pela resistência da alvenaria, que aumenta modestamente com o aumento da resistência da argamassa, mas cresce consideravelmente com a resistência dos tijolos.

Ainda segundo a norma NBR 10836 (ABNT, 1989), o valor médio da resistência à compressão dos tijolos analisados deve ser, no mínimo, igual a 2,0 MPa (20 Kgf/cm²), de modo que nenhum dos valores individuais esteja abaixo de 1,7 MPa (17 Kgf/cm²), na idade mínima de 7 dias (**Tabela 7**).

Tabela 7 - Limites de resistência à compressão especificados para controle de qualidade dos tijolos de solo-cimento.

CARACTERÍSTICA	N.º de AMOSTRA	EXIGÊNCIA NBR 8491	
Varição dimensional	-	± 3 mm	
Resistência à compressão	10	Valor médio	≥ 2,0 MPa
		Valor individual	≥ 1,7 MPa

2.2.2.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO D'ÁGUA APLICADO AOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

O ensaio de absorção d'água aplicado aos tijolos foi realizado no Laboratório de Análises Químicas e Processamentos Cerâmicos da UFRJ, de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR 10836 (ABNT, 1989). Dessa forma, os tijolos foram levados à estufa, entre 105°C e 110°C, até constância de massa, obtendo-se assim, a massa do tijolo seco em estufa, em gramas. Em seguida os tijolos foram imersos em água durante 24 hs (**Figuras 8 e 9**). Após este período, os tijolos foram retirados, enxugados superficialmente e novamente pesados, anotando-se a massa saturada, em gramas, dos mesmos. Os valores individuais de absorção d'água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela **Equação 2** e a absorção média foi determinada pela média aritmética de quatro repetições.

$$A = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100\%$$

onde:

A = absorção d'água (%);

M₁ = massa do tijolo seco em estufa (g);

M₂ = massa do tijolo saturado (g).



Figura 8: Tijolos secos em estufa a 105°C até constância de peso.



Figura 9: Tijolos imersos em água.

Também segundo a norma NBR 10836 (ABNT, 1984), os valores médios de absorção de água não devem ser superiores a 20%, nem apresentar valores individuais superiores a 22% (**Tabela 8**).

Tabela 8 - Limites de absorção d'água especificados para controle de qualidade dos tijolos de solo-cimento.

CARACTERÍSTICA	N.º de AMOSTRA	EXIGÊNCIA NBR 8491	
Variação dimensional	-	± 3 mm	
Absorção de água	3	Valor médio	≤ 20%
		Valor individual	≤ 22%

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MICROESTRUTURAL DO SOLO

A **Tabela 9** sumariza os resultados dos ensaios de caracterização física aplicados ao solo utilizado para a produção dos tijolos de solo-cimento.

Tabela 9 – Características físico-mecânicas do solo.

	Parâmetros	Resultados obtidos
Distribuição Granulométrica	Areia Grossa (0,60 - 2,00 mm)	1,40%
	Areia Média (0,20 - 0,60 mm)	32,60%
	Areia Fina (0,06 - 0,20 mm)	16,00%
	Silte (0,002 - 0,06 mm)	5,30%
	Argila (< 0,002 mm)	44,70%
	Porcentagem que passa na peneira nº 200 (0,074 mm)	52,20%
Índices Físicos	Limite de Liquidez (LL)	33,00%
	Limite de Plasticidade (LP)	19,00%
	Índice de Plasticidade (IP)	14,00
	pH	5,8
Classificação	Classe Textual Simplificada (SBCS)	Argilosa
	Classe Textual Detalhada (SBCS)	Argiloarenosa

De acordo com os resultados apresentados na tabela acima, o solo, que foi classificado como argiloarenoso pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SBCS - apresentou uma quantidade de finos (silte + argila) de 50%, o que, segundo a literatura, é um solo aceitável para a produção do tijolo modular de solo-cimento, mas que exigirá maiores quantidade de aditivos químicos para o processo de estabilização.

Em relação aos índices de consistência, o solo apresentou limite de liquidez, que é o teor de umidade no qual o solo deixa de apresentar plasticidade, de 33%. Já o limite de plasticidade apresentado foi de 19%, ou seja, o teor de umidade no qual o solo começa a apresentar consistência plástica. O índice de plasticidade (IP), que é o intervalo de umidade em que o solo se mantém plástico, é obtido através dos

resultados apresentados pelo limite de liquidez e limite de plasticidade conforme a **Equação 3**.

$$IP = LL - LP$$

onde:

IP = Índice de plasticidade;

LL = Limite de liquidez;

LP = Limite de plasticidade.

Dessa forma, o resultado obtido para esta amostra foi $IP = 14$ e assim caracterizada como um solo medianamente plástico (**Tabela 10**), segundo a classificação de Jenkins (Caputo, 1988).

Tabela 10 – Classificação de consistência do solo de acordo com o IP.

IP	Classificação
1 – 7	Fracamente Plástico
7 – 15	Medianamente Plástico
> 15	Altamente Plástico

Segundo a literatura, quanto maior o índice de plasticidade do solo, maior será a dificuldade para estabilizá-lo, uma vez que o material estará mais sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo quando úmido e de sua retração quando seco.

Da mesma forma, o resultado obtido em relação ao pH da amostra ($pH=5,8$), caracteriza a mesma como um solo moderadamente ácido (**Tabela 11**), segundo a classificação da Embrapa Solos e, sabe-se que quanto mais ácido o solo, maior será a necessidade de estabilizantes.

Tabela 11 – Classificação do pH do solo.

CLASSES	pH (solo/água 1: 2,5)
Extremamente ácido	< 4,3
Fortemente ácido	4,3 – 5,3
Moderadamente ácido	5,4 – 6,5
Praticamente Neutro	6,6 – 7,3
Moderadamente Alcalino	7,4 – 8,3
Fortemente Alcalino	> 8,3

Fonte: Embrapa Solos.

Segundo Abiko (1985), a prática tem demonstrado que os solos mais adequados, para confecção desse tipo de tijolo, possuem as seguintes características: 100% de partículas passando na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4); entre 10% e 50% passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200); limite de liquidez $\leq 45\%$ e índice de plasticidade $\leq 18\%$. Dessa forma, os resultados dos ensaios de caracterização (**Tabela 9**) mostraram que, apesar de o solo analisado apresentar uma porcentagem passante na peneira nº 200 com 2,2% acima do limite estabelecido, ele está de acordo com os pré-requisitos relatados pelo autor.

Para complementar os estudos sobre o solo em questão, foram feitas ainda análises sobre a composição química (**Figuras 10, 11 e 12**), através de ensaios de difração de raios-x e EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-x). No entanto, é importante ressaltar que os resultados apresentados para estes ensaios referem-se somente à análise qualitativa dos minerais, não tendo sido trabalhada sua quantificação.

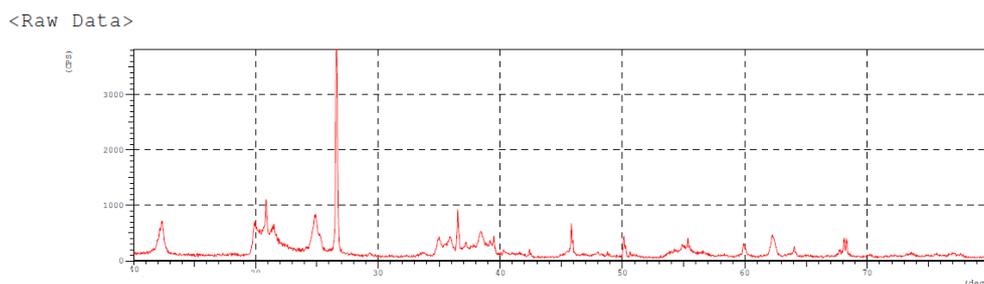


Figura 10 – Difratograma do solo em análise.

<Peak Data/Entry Peak>

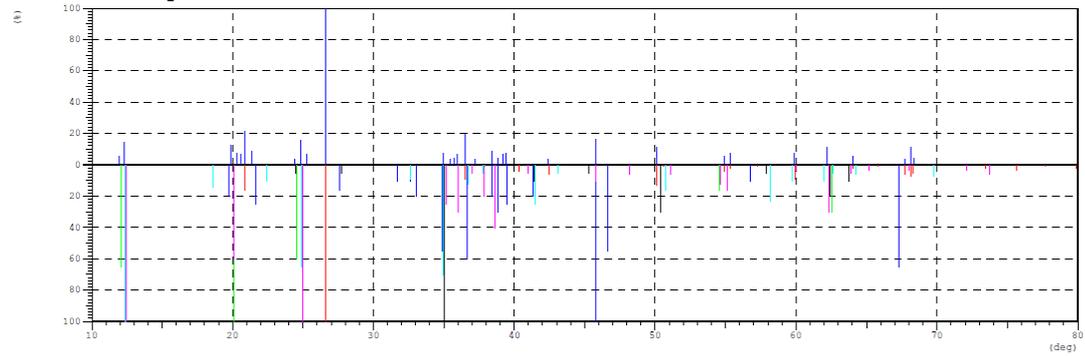


Figura 11 – Distâncias interplanares obtidas no ensaio do solo em análise (em cima) confrontadas com distâncias interplanares referentes aos minerais possivelmente presentes no solo em análise (em baixo).

<Card Data>

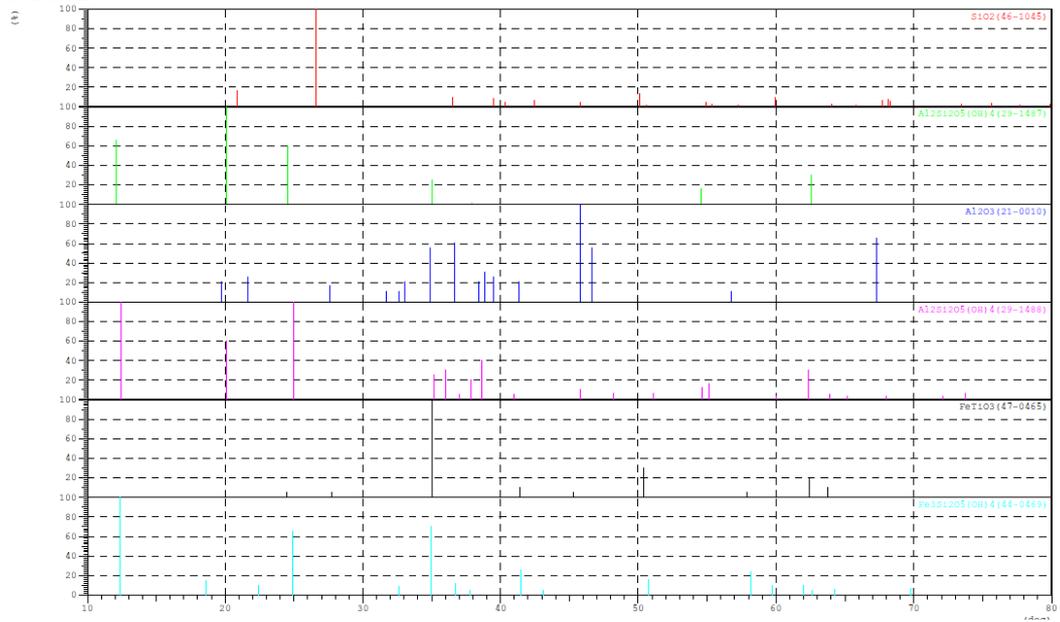


Figura 12 – Distâncias interplanares referentes a cada mineral possivelmente presente no solo em análise.

Tabela 12 – Classificação dos argilominerais apresentados no ensaio de raio-x do solo em análise.

Cor	Fórmula Química	Nome do Mineral
	SiO_2	Óxido de Silício (Quartzo)
	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Hidróxido de Silicato de Alumínio (Halloysita)
	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Hidróxido de Silicato de Alumínio (Caulinita)
	Al_2O_3	Óxido de Alumínio
	FeTiO_3	Óxido de Titânio e Ferro
	$\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Hidróxido de Silicato de Ferro

Os resultados referentes à granulometria e ensaio de consistência do solo, observados na **Tabela 9**, indicam que este solo possui uma mineralogia pouco ativa (quartzo, óxido-hidróxido de ferro e alumínio e argilominerais do grupo da caulinita), como era de se esperar para solos desenvolvidos em clima tropical. Os resultados do ensaio de raio-x (**Tabela 12**), confirmaram essa mineralogia esperada e mostraram a presença dos seguintes argilominerais neste solo: alto teor de quartzo, halloysita (grupo da caulinita) e caulinita, óxido de alumínio, óxido de titânio e ferro e silicato de ferro hidratado.

Através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associado ao EDS, foi possível confirmar essa mineralogia apresentada nos ensaios anteriores. A **Tabela 13**, junto com a **Tabela 14**, resumem os elementos assim como os respectivos percentuais de peso apresentados por cada um, no EDS feito com ouro e com carbono respectivamente. No entanto, por se tratar de uma análise qualitativa e não quantitativa, tomamos esses valores somente como ilustração em relação à presença deles no solo analisado.

Tabela 13 – Elementos e respectivos percentuais de peso apresentados no ensaio de EDS com ouro.

EDS OURO								
elementos	% peso							média
	amostra 1	amostra 2	amostra 3	amostra 4	amostra 5	amostra 6	amostra 7	
O - K	29,2	37,02	37,00	10,52	36,37	38,92	26,51	30,79
Al - K	11,21	11,02	12,41	8,12	9,35	13,09	11,93	11,02
Si - K	11,35	11,41	12,47	7,41	9,24	14,38	12,45	11,24
Ti - K	0,83	0,62	0,39	0,88	0,36	0,00	0,81	0,56
Fe - K	5,33	3,51	4,40	6,65	2,88	4,73	6,04	4,79
k - k	0	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,03

Tabela 14 – Elementos e respectivos percentuais de peso apresentados no ensaio de EDS com carbono.

EDS CARBONO				
elementos	% peso			média
	amostra 1	amostra 2	amostra 3	
O - K	47,82	32,82	48,10	42,91
Al - K	12,72	3,08	11,48	9,09
Si - K	13,05	23,51	11,80	16,12
Ti - K	0,34	0,41	0,88	0,54
Fe - K	4,42	2,04	3,56	3,34
k - k	0,00	0,00	0,24	0,08

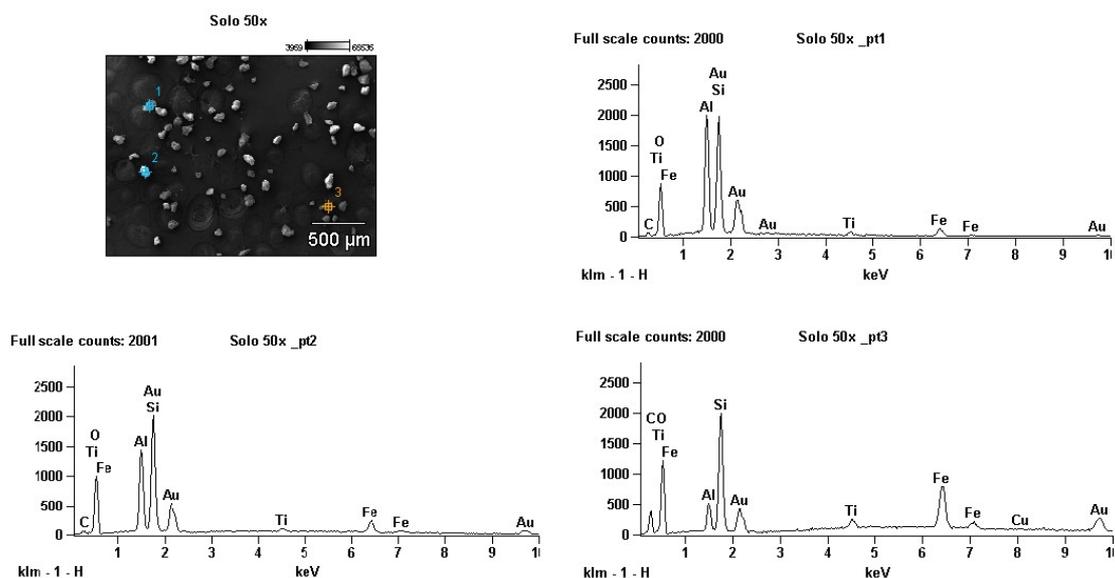


Figura 13 – MEV e respectivos difratogramas (ouro) do solo em análise com aumento de 50x.

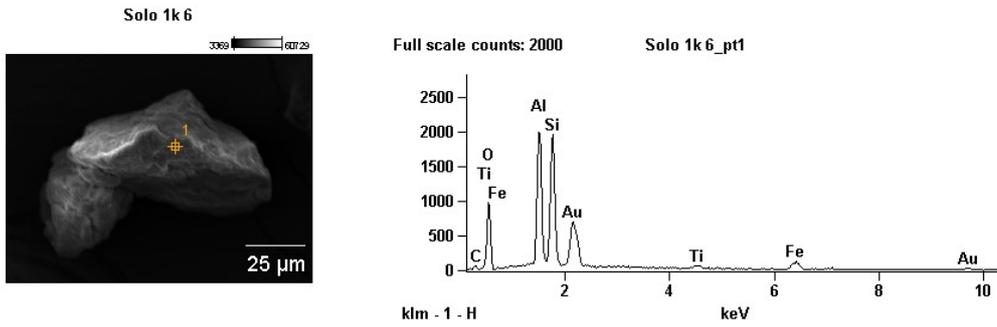


Figura 14 – MEV e respectivo difratograma (ouro) com aumento de 1000x.

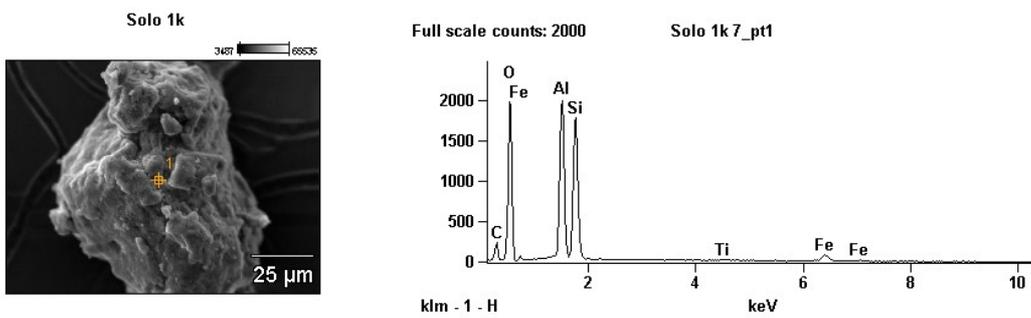


Figura 15 - MEV e respectivo difratograma (carbono) com aumento de 1000x.

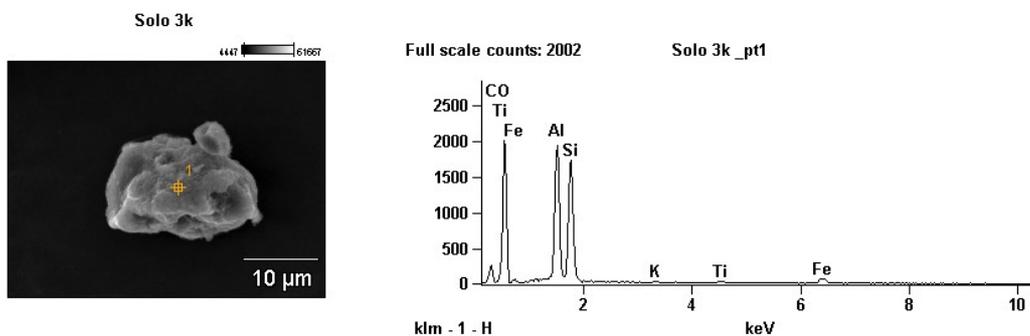


Figura 16 - MEV e respectivo difratograma (carbono) com aumento de 3000x.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

A **Tabela 15** sumariza os resultados do ensaio de compressão simples aplicado aos tijolos de solo-cimento, com 7 dias e com mais de 28 dias.

Tabela 15: Resultados do ensaio de compressão simples.

DADOS DA AMOSTRA						RESULTADOS DOS ENSAIOS	
Nº amostra	Tipo de Pavimento	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área de carregamento (cm ²)	Carga de ruptura (KN)	Resistência (MPa) 7 dias	28 dias
tijolo 1	Tijolo solo-cimento	12,5	25,0	252,12	17,81	0,71	
tijolo 2	Tijolo solo-cimento	12,5	25,0	252,12	18,44	0,73	
tijolo 3	Tijolo solo-cimento	12,5	25,0	252,12	18,40	0,73	
tijolo 4	Tijolo solo-cimento	12,5	25,0	252,12	22,59		0,90
tijolo 5	Tijolo solo-cimento	12,5	25,0	252,12	31,60		1,25
tijolo 6	Tijolo solo-cimento	12,5	25,0	252,12	36,94		1,47

Os resultados do ensaio de compressão simples foram divididos em duas etapas: a primeira que foi realizada com tijolos em idade de 7 dias e a segunda com tijolos com mais de 28 dias de cura.

Em relação à primeira etapa, o menor resultado foi o do tijolo 1, que rompeu com uma carga de 17,81 KN, obtendo uma resistência de 0,71 MPa. Já os tijolos 3 e 4 obtiveram uma resistência de 0,73 MPa cada, fazendo com que a média desses três resultados ficasse em 0,72 MPa.

Na segunda etapa do ensaio, obtivemos um valor muito abaixo do esperado para o tijolo 4 (**Figura 17**), uma vez que este tinha mais de 28 dias de cura e rompeu com uma carga de 22,59 KN, obtendo assim, uma resistência de 0,90 MPa. No entanto, os tijolos 5 e 6 obtiveram resultados significativos, fazendo com que a média da resistência dos três resultados (tijolos 4, 5 e 6) ficasse em 1,21 MPa.

No geral, os resultados não foram satisfatórios, uma vez que os valores observados estão bem abaixo do recomendado pela norma NBR 10836 (ABNT, 1984), que diz que o valor médio da resistência à compressão dos tijolos analisados deve ser, no mínimo, igual a 2,0 MPa (20 Kgf/cm²), de modo que nenhum dos valores individuais esteja abaixo de 1,7 MPa (17 Kgf/cm²), na idade mínima de 7 dias.

Por outro lado, apesar de os resultados não satisfazerem a norma, é preciso observar que a resistência média aumentou em aproximadamente 68% em relação aos tijolos com 7 dias de cura e os tijolos com mais de 28 dias de cura, de onde pode-se concluir que a resistência dos tijolos de solo-cimento aumenta consideravelmente com o tempo (**Figura 18**).



Figura 17: Tijolos após ensaio de compressão simples (vista frontal e lateral).

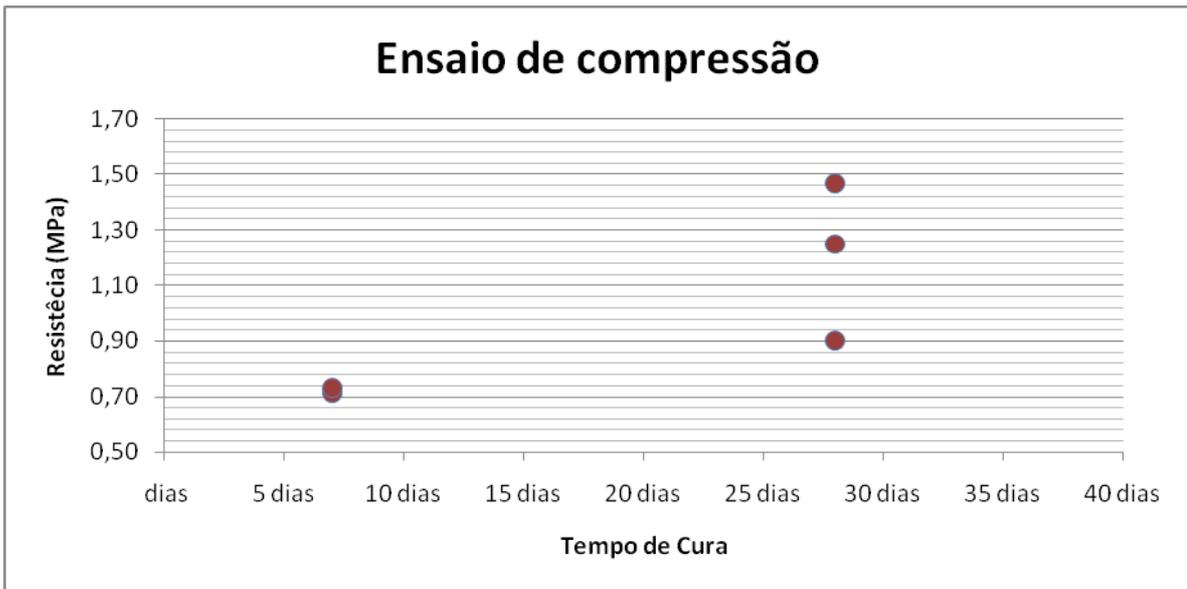


Figura 18 – Dispersão dos resultados do ensaio de compressão dos tijolos com 7 dias e com 28 dias de cura.

Outro ponto importante em relação aos resultados do ensaio de resistência a compressão que deve ser analisado é o fato de que os tijolos ensaiados foram assentados a seco, ou seja, somente encaixados. Pesquisas anteriores, revelaram que a resistência a compressão de prismas compostos por dois ou três tijolos assentados com argamassa é cerca de 30% superior em comparação aos prismas compostos por tijolos assentados a seco. Ou seja, a presença da argamassa, realmente contribui para um melhor desempenho estrutural da parede, distribuindo de maneira eficiente os esforços durante o 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 (Grande, 2003).

Quanto aos resultados do ensaio de absorção d'água, que podem ser observados na **Tabela 16**, o menor valor individual, que foi de 12,59%, foi obtido pelo tijolo 2 e o maior, que foi de 15,57%, foi alcançado pelo tijolo 3. Já a média aritmética, estabelecida através dos resultados dos quatro tijolos, ficou em 13,72% de absorção d'água. No entanto, todos os valores atenderam às especificações da norma NBR 10836 (ABNT, 1984), que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor individual superior a 22%. Um outro dado interessante que pode ser ressaltado

através desse resultado, é o de que 99,5% da absorção d'água dos tijolos se dá nas primeiras 24 h de imersão, conforme apresentado na **Figura 19**.

Tabela 16 – Resultado do ensaio de absorção d'água.

Massa do tijolo (Kg)									
	como recebido	seco em estufa	imersão após 24 hs	imersão após 25 hs	imersão após 26 hs	imersão após 48 hs	imersão após 49 hs	imersão após 120 hs	absorção d'água (%)
Tijolo 1	2,954	2,742	3,102	3,105	3,106	3,112	3,112	3,121	13,13
Tijolo 2	3,040	2,844	3,202	3,203	3,204	3,208	3,210	3,218	12,59
Tijolo 3	2,870	2,716	3,139	3,141	3,142	3,146	3,148	3,156	15,57
Tijolo 4	2,949	2,736	3,108	3,109	3,110	3,115	3,115	3,125	13,60

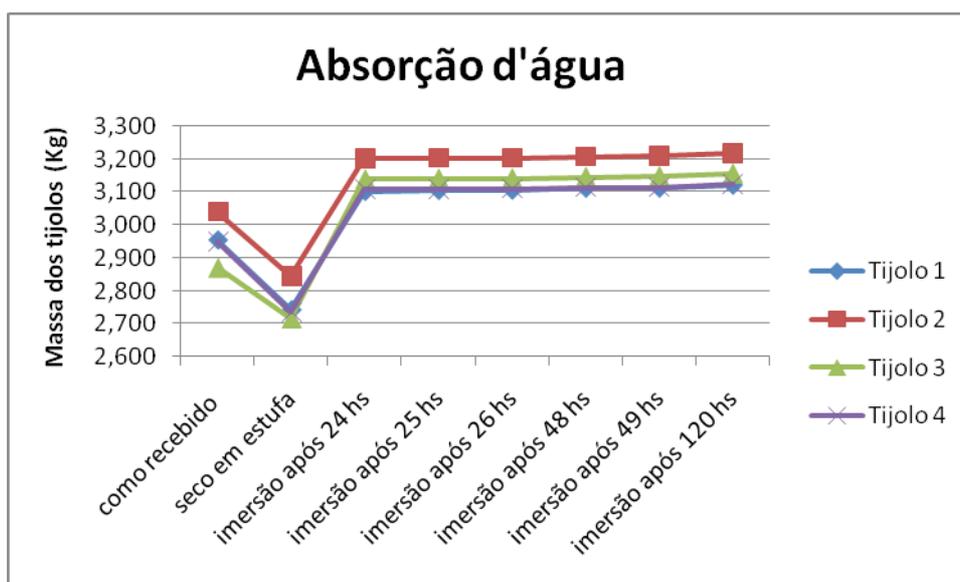


Figura 19 – Gráfico referente ao ensaio de absorção d'água.

Pesquisas realizadas anteriormente no setor da construção civil, mostraram que os tijolos de solo-cimento apresentam grande potencial para serem aplicados largamente, não só pela questão do material em si, mas também pela busca de novas soluções construtivas. Isso se deve, principalmente, ao fato da relação entre o desempenho do material e as questões de sustentabilidade, ou seja, às ações destinadas à redução do impacto ambiental no setor.

Dessa forma, a produção do tijolo modular de solo-cimento está em conformidade com as questões mencionadas anteriormente, visto que se trata de um material ecologicamente correto, ou seja, demanda menor consumo energético na extração de matéria-prima, dispensa a queima na sua fabricação, reduz consideravelmente os desperdícios no canteiro de obras - devido ao sistema construtivo modular - além de possuir boa capacidade termo-acústica e permitir a incorporação de resíduos industriais na sua composição, desde que os critérios de utilização sejam amplamente avaliados e estejam em conformidade com as exigências do material.

A **Tabela 17**, mostra um comparativo entre os quatro principais tipos de alvenaria utilizados na construção civil atualmente: o bloco de concreto, o tijolo cerâmico maciço, o tijolo cerâmico de 8 furos e o tijolo modular de solo-cimento.

Tabela 17 – Comparativo entre os principais tipos de alvenaria utilizados na construção civil atualmente.

	Alvenaria Bloco de Concreto			Alvenaria Tijolo Cerâmico Maciço		Alvenaria Tijolo Cerâmico 8 Furos		Alvenaria Solo-Cimento
	Dimensões Nominais (cm)			Parede	Parede	Parede	Parede	Parede
	20x20x40	15x20x40	10x20x40	1 Tijolo	1/2 Tijolo	1 Tijolo	1/2 Tijolo	1 Tijolo
Nº Peças (m ²)	12,5	12,5	12,5	145	79	28	18	58
Peso Unitário Aprox. (Kg)	14,5	11	9	1,8	1,8	2,9	2,9	2,6
Peso da Alvenaria (Kg/m ²)	181,25	137,5	112,5	261	142,2	110	72	150,8
Argamassa de Assent. (Kg/m ²)	15	13,5	10,5	90	45	45	20	-
Chapisco (Kg/m ²)	-	-	-	-	-	15	15	-
Massa Grossa (Kg/m ²)	-	-	-	30	30	30	30	-
Massa Fina (Kg/m ²)	15	15	15	15	15	15	15	-
Total (Kg/m²)	211,25	166	138	396	232,2	215	152	150,8

(*) N° de peças de tijolo cerâmico maciço que completam o m²

Avaliando esses materiais em relação à produtividade e custo, podemos perceber que quando levamos em consideração a quantidade de tijolos utilizados em uma parede, a alvenaria de solo-cimento (58 tijolos) fica atrás, somente, da alvenaria de tijolo cerâmico maciço, que dentre as analisadas, é a que utiliza um maior número de peças por m², chegando a até 145 tijolos. Por outro lado, se analisarmos a quantidade de material de acabamento (argamassa, chapisco, massa grossa e massa fina) utilizada, podemos compreender porque o custo final da obra feita com tijolo de

solo-cimento fica menor. Esse talvez seja o dado mais importante dessa avaliação, pois enquanto os outros tipos de alvenaria necessitam de materiais de acabamento, a alvenaria de solo-cimento pode ser utilizada como fabricada, não necessitando dessa etapa de construção. Dessa forma, o custo final da obra fica bem reduzido, podendo chegar a até 30% menos do que quando realizada com alvenaria de tijolo cerâmico.

Essa diferença no custo final deve-se não somente a eliminação de materiais de acabamento, mas também à redução da utilização de mão-de-obra, visto que o tempo de conclusão da obra é mais rápido. Além disso, é importante ressaltar que, devido ao sistema construtivo modular, há uma considerável redução do desperdício de materiais como entulho, ferro, madeira, argamassa que pode girar em torno de 10% a 15 % do valor final da obra.

Portanto, tem-se um material ecologicamente correto, com qualidade e baixo custo e que não necessita de mão-de-obra especializada.

CONCLUSÃO

Conforme a exposição inicial deste trabalho, os objetivos desta pesquisa centraram-se em análises de desempenho do tijolo modular de solo-cimento e sua relação com questões de sustentabilidade na construção civil.

Dessa forma, as principais conclusões são:

- I. O material analisado foi produzido com a proporção de 50% areia e 50% argila. No entanto, verificamos através de testes como granulometria, índice de plasticidade e pH, que esta proporção não é a mais indicada, visto que é necessário uma quantidade maior de aditivos para o processo de estabilização;
- II. em relação ao ensaio de compressão, os tijolos analisados não obtiveram o resultado mínimo exigido por norma. É provável que isso possa ter ocorrido devido à pouca quantidade de cimento adicionada à mistura, visto que se tratava de um solo argiloarenoso (50% areia e 50% argila);
- III. os tijolos produzidos atenderam às especificações mencionadas na norma técnica para o ensaio de absorção d'água, que mostra um bom grau de compactação dos mesmos;
- IV. quanto ao custo e à produtividade da alvenaria, observou-se que o emprego do tijolo modular de solo-cimento, assim como do bloco de concreto, propicia melhor rendimento de mão-de-obra e material em comparação com tijolos cerâmicos maciços e de 8 furos;

BIBLIOGRAFIA

ABIKO, A. K. *Tecnologias Apropriadas: Tijolos e Paredes Monolíticas de Solo-Cimento*. Dissertação (de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

_____. *Sistemas solo-cal / solo-cimento*. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL: O USO DA CAL NA ENGENHARIA CIVIL, 5., 1985, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP / ABCP, 1985. p. 113-20.

AGENDA 21. *Conferência das Nações Unidas sobre ambiente e desenvolvimento urbano*. Brasília, DF. Subsecretaria de Edições Técnicas do Senado Federal, 1998.

ALCANTARA, M. A. M.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; COSTA, L. M. *Estabilização química dos solos em estradas agrícolas*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa, UFV. Anais... Viçosa: SBEA, 1995. nº 95-2-158.

ARINI, R. *Arquitetura de terra: solo/cimento/cal*. 287 p. Tese (Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. *NBR 5735 – Cimento Portland de Alto Forno*. Rio de Janeiro, 1991. 10 p.

_____. *NBR 6457 - Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 1986a. 9 p.

_____. *NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 1984c. 6 p.

_____. *NBR 7175 – Cal hidratada para argamassas*. Rio de Janeiro, 1992. 5p.

_____. *NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984d. 3 p.

_____. *NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984a. 13 p.

_____. *NBR 8491 - Tijolo maciço de solo-cimento*. Rio de Janeiro, 1984e. 4 p.

_____. *NBR 8492 - Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água*. Rio de Janeiro, 1984f. 5 p.

_____. *NBR 10832 - Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual*. Rio de Janeiro, 1989. 3 p.

_____. *NBR 10833 - Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica*. Rio de Janeiro, 1989. 3 p.

_____. *NBR 10836 - Bloco vazado de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água*. Rio de Janeiro, 1989. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *Guia Básico de Utilização do Cimento Portland*. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p. Boletim técnico.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *Paredes monolíticas de solo-cimento: Hospital Adriano Jorge*. São Paulo: ABCP, 1979. 55 p. Relatório técnico.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *O solo cimento e suas aplicações rurais*. São Paulo: ABCP, 1989. 20 p. Boletim Técnico.

BOUTH, J. A. C. *Estudo da Potencialidade da produção de tijolos de adobe misturado com outros materiais – uma alternativa de baixo custo para a construção civil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2005.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO CAMAÇARI - CEPED. *Manual de construção com solo-cimento*. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1984. 147 p.

DUARTE, J. B.; GAGLIARDO, D. P. *Resistência ou desempenho: Qual o aspecto mais relevante para construções em concreto?*. Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Adventista de São Paulo. São Paulo, 2004.

DURANTE, R. *Concreto: qualidade, classificação e propriedades*. 2002. Notas de aula. São Paulo.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro, 1999, 412 pp.

FERRAZ, A. L. N.; WADA, P. H.; SEGANTINI, A. A. S. *Estudo do aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de tijolos de solo-cimento*. In: Workshop “Concreto: Durabilidade, Qualidade e Novas Tecnologias”. UNESP, São Paulo, 2005.

FERRAZ, A. L. N. *Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solo-cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNESP, São Paulo, 2004, 92p.

FERREIRA, R. C. *Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos*. 204 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.

FERREIRA, R. C.; SILVA, E. M.; FREIRE, W. J. *Tijolos prensados de solo-cimento em alvenaria aparente auto-portante no “Conjunto Nossa Morada”*, Goiânia-GO. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3, 2003, São Carlos. Anais... São Paulo: [s.n.], 2003.

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

GUIMARÃES, J. E. P. *Solo-cal – Como construir*. Revista de Tecnologia da Construção, São Paulo, ano 3, n. 18, set. 1995. Ficha Técnica 18.

LOPES, D. C. *Estudo da viabilidade de adição de resíduo de pó de fumo à massa cerâmica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2005.

MYRRHA, M. A. L. *Solo-cimento para fins construtivos*. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. *Tecnologia e materiais alternativos de construção*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003. cap.4, p. 95-120.

NASCIMENTO, A. A. P. *Estudo de fissuras em paredes de tijolos de solo-cimento destinadas a edificações habitacionais*. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

NEVES, C. M. M. *Tecnologia alternativa: solo-cimento na habitação popular*. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 1990, Recife. Anais... Recife: [s.n.], 1990. p. 22-30.

PEDREIRA, C. L. S.; DIAS, C. R. R.; TORRADA, D. *Da fabricação de tijolos ecológicos à construção da cidadania coletiva*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 2004, Belo Horizonte. Anais ...Minas Gerais, 2004.

PICCHI, F. A.; CINCOTTO, M. A.; BARROS, J. M. C. *Tijolos de solo-cal*. Revista A Construção, São Paulo, p. 93-8, 1990. Tecnologia de edificações IPT.

ROLIM, M. M.; FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. *Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos-de-prova, tijolos e painéis de solo-cimento*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n 1, p.89-92, 1999, São Paulo.

SAHARA – INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. *Manual Informativo ilustrado – O Solo-Cimento na Fabricação do Tijolo Modular*. São Paulo, 1998. 30 p.

SOARES, J. M. D.; TOMAZETTI, R. R.; PINHEIRO, R. B. *Habitação em paredes monolíticas de solo-cimento. Teoria e Prática na Engenharia Civil*, São Paulo, Brasil. n.5, p.51-57, Agosto, 2004.

SOUSA, S. M. T.; BARBOSA, N. P. *Estabilização granulométrica de solos para a confecção de tijolos prensados de terra crua*. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. Anais... Salvador: [s.n], 2000.

UCHIMURA, M. S. *Solo-cimento*. Instituto de Tecnologia do Paraná, 2006. 21 p. Dossiê Técnico.

VALENCIANO, M. C. M. *Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento*. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1999.