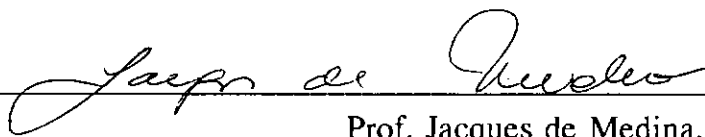


**A ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS APLICADA A HABITAÇÃO,
UM ESTUDO DE MISTURAS SOLO-CIMENTO**

Luís Carlos Dias de Oliveira

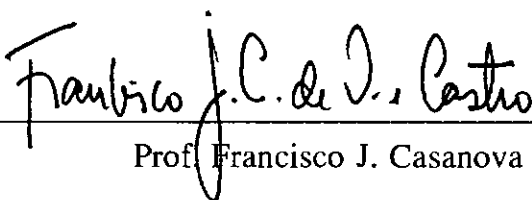
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:




Prof. Jacques de Medina, L.D.


(Presidente)



Prof. Francisco J. Casanova de Castro, M.Sc.



Prof. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.



Prof. Protasio Ferreira e Castro, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1994

DIAS DE OLIVEIRA, LUÍS CARLOS

A Estabilização de Solos Aplicada à Habitação, um Estudo de Misturas Solo-cimento [Rio de Janeiro] 1994

XI, 236 p. 29,7 cm (COPPE / UFRJ, M.Sc. Engenharia Civil, 1994)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Solo-cimento em habitação

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

- À Dona Lucinda Constantina de Oliveira, minha mãe e ao meu pai Manuel Dias Pereira, camponeses de além mar, que deram totais condições para a minha formação intelectual;
- aos amigos de infância em Higienópolis (Rio de Janeiro), aos que acrescentei na Escola Técnica Federal, na Escola de Engenharia e na COPPE que sempre torceram por mim;
- à amiga Katia Monte-Chiari Dantas e família que muito fizeram por mim;
- aos amigos Cláudio Fernando Mahler e Ian Schumann Marques Martins pela oportunidade de iniciação científica;
- ao professor Casanova pelo incentivo e entusiasmo pelo tema desta pesquisa;
- a todos os professores e funcionários da Escola de Engenharia e da COPPE pela formação e referência de Engenharia;
- aos colegas funcionários do Laboratório de Geotecnia COPPE pela sempre prestimosa colaboração;
- aos colegas funcionários da Escola de Engenharia, Sr. Paulo Alves (Laboratório de Mecânica dos Solos), Wilson e Adilson (LAMAC) pelo apoio na fase experimental deste trabalho, Ramon pelos desenhos e ao Gabriel pelos acertos na edição;
- à Prefeitura Municipal de Petrópolis na figura do Sr. Manoel Trancoso pelo relato de sua experiência com o solo-cimento;
- ao Serviço de Educação e Orientação Popular que viabilizaram a impressão final;
- ao extinto GEMD e a Escola de Engenharia da UFRJ, onde trabalhei, pela oportunidade que me deram de cursar o mestrado;
- ao CNPq pela bolsa de estudos;
- a Márcia Vizeu Thomaz pelo carinho nos últimos tempos;
- e a DEUS por estar sempre por perto.

Ao meu saudoso pai Manuel Dias Pereira

Resumo da tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

A ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS APLICADA À HABITAÇÃO, ESTUDO DE MISTURAS SOLO-CIMENTO

Luís Carlos Dias de Oliveira

Abril, 1994

Orientador: Prof. Jacques de Medina

Programa: Engenharia Civil

O aumento crescente nos custos dos materiais de construção tradicionais utilizados pela Construção Civil, em parte refletindo a elevada energia necessária à sua produção, atinge mais duramente as camadas de baixa renda que, através da auto-construção, buscam a solução para os seus problemas de habitação.

Neste trabalho foram estudadas as diversas técnicas e equipamentos empregados na produção de elementos (adobes, blocos e tijolos) e componentes (paredes monolíticas) que utilizam o solo com material de construção. Estas técnicas encontram referência na antigüidade donde foram adaptadas aos nossos dias.

Também foram revisadas as diversas técnicas de estabilização de solos, relacionando-se os principais estabilizantes empregados, com ênfase ao cimento Portland e exemplos de aplicação de misturas solo-cimento em diversas áreas da Engenharia Civil.

Finalmente, realizou-se um programa experimental de ensaios moldando-se, com misturas solo-cimento, tijolos maciços em uma prensa manual. Investigou-se a umidade de moldagem obtendo-se curvas de compactação com a própria prensa de moldagem e realizando-se, para cada ponto destas curvas, ensaios de resistência à compressão e absorção.

Abstract of Thesis presented to COPPE / UFRJ as partial fulfillment of requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

SOIL ESTABILIZATION APPLIED ON HOUSING, AN STUDY OF SOIL-CEMENT MIXTURES

Luís Carlos Dias de Oliveira

April, 1994

Thesis Supervisor: Prof. Jacques de Medina

Department: Civil Engineering

The permanent rise in costs of traditional materials used in construction reflects, in part, the high demand of energy needed in their own manufacturing. It affects strongly the low-income part of society, who looks for a solution for habitational problems by mutual aid housing,

It has been studied the various techniques and equipments used in elements (adobes, blocks and bricks) and components (rammed earth) production that uses soil as construction material. All of these techniques were referred in Ancient times and were updated to present conditions.

It has also been reviewed some techniques of soil stabilization, relating them to the mains stabilizers used. Emphasis was given to cement Portland and to examples of applicability of soil-cement mixtures in various Civil Engineering areas.

Finally, it has been done a experimental testing program moulding bricks in a manual press using soil-cement mixtures. Compaction curves were obtained using the own mouldind press and for each point of these curves were carried compression strength and absortion tests.

ÍNDICE**CAPÍTULO I - Introdução**

I.1 Considerações Gerais	001
I.2 Importância	008
I.3 Objetivo	010
I.4 Conteúdo dos capítulos	011

CAPÍTULO II - O solo como material de construção

II.1 Introdução	012
II.2 O emprego do solo na Engenharia Civil	014
II.2.1 O exemplo do solo-cimento	014
II.3 O uso do solo em habitação	019
II.3.1 Paredes monolíticas	020
II.3.2 Adobes	036
II.3.3 Tijolos e blocos prensados	045
II.3.4 Outras técnicas	071
II.3.5 Experiências no Brasil e no exterior	072

CAPÍTULO III - Estabilização de solos

III.1 Introdução	077
-------------------------------	------------

III.2 A escolha do solo	077
III.2.1 Definição	077
III.2.2 Propriedades básicas e índices físicos dos solos ..	078
III.2.3 Composição da fase sólida dos solos	089
III.2.4 Identificação expedita dos solos	090
III.3 Princípios de estabilização de solos	096
III.3.1 Considerações básicas	196
III.3.2 Métodos de estabilização	101
III.3.3 Suscetibilidade de um solo à estabilização	104
III.3.4 Características dos estabilizantes de solos	106
III.4 A interação físico-química solo-cimento	129
III.4.1 Solo-cimento	129
III.4.2 Mecanismos físico-químicos de estabilização	130
III.4.3 Fatores que influenciam as propriedades físico- químicas do solo-cimento	133
III.5 Métodos de dosagem experimental do solo-cimento	144
III.5.1 O método da ABCP	144
III.5.2 Critérios de dosagem do CEPED	157
III.5.3 O método físico-químico	162

III.5.4 Outros métodos	168
III.5.5 Discussão dos métodos	169

CAPÍTULO IV - Estudo experimental de misturas solo-cimento

IV.1 Introdução	173
IV.2 O solo ensaiado	177
IV.3 O cimento	185
IV.4 Descrição dos equipamentos de preparo, mistura e compactação empregados	185
IV.4.1 Preparo das amostras	185
IV.4.2 Mistura	186
IV.4.3 Compactação	187
IV.5 A definição dos teor de cimento	187
IV.5.1 Ensaio Físico-químico das misturas solo-cimento	187
IV.6 Programa de ensaio	194
IV.6.1 Ensaio de compactação	194
IV.6.2 Ensaio de Resistência à compressão	197
IV.6.3 Ensaio de Absorção	202
IV.6.4 Análise e discussão dos resultados	209

CAPÍTULO V - Conclusões e sugestões para pesquisa futuras

V.1 Introdução	214
V.2 Conclusões	215
V.3 Sugestões para pesquisas futuras	218
Referências Bibliográficas	219
APÊNDICE I	227

INDÍCE DE FIGURAS

Figura II.1 -	(a) Taludes de barragens (ADASKA et alii, 1990); (b) Muros de contenção (PMJF, 1986); (c) Contenção de erosão (PMJF, 1986)	017
Figura II.2 -	Formas de utilização do solo na habitação segundo os estados de consistência (HOUBEN et alii, 1979)	021
Figura II.3 -	(a) Formas de madeira para moldagem de paredes monolíticas; (b) sistema de encunhamento das formas (HOUBEN et alii, 1979)	022
Figura II.4 -	Vista do canteiro de execução de uma moradia tradicional em pisê (HOUBEN et alii)	023
Figura II.5 -	(a) Formas deslizantes horizontais; (b) Formas deslizantes verticais; (c) Forma horizontal integral e (d) Forma vertical integral (UNCHS, 1986)	027
Figura II.6 -	(a) Formas suspensas; (b) Formas com roletes; (c) Formas deslizantes	028
Figura II.7 -	(a) Número de passadas (N); (b) Velocidade de deslocamento do soquete (V) e (c) Gradiente de compacidade (HOUBEN et alii, 1979) . .	031
Figura II.8 -	Variação das tensões de ruptura em painéis monolíticos com o teor de cimento (CEPED, 1985)	034
Figura II.9 -	Formas para moldagem de adobes (HOUBEN et alii, 1979)	040

Figura II.10 -	(a) Moldes múltiplos em arranjo de escada; (b) Moldes múltiplos em arranjo de grelha (HOUBEN et alii, 1979)	043
Figura II.11 -	(a) Prensas com um único sentido de compactação; (b) Prensas de duplo sentido de compactação (BNH, 1985)	057
Figura II.12 -	Tipos de elementos produzidos em prensas manuais e hidráulica (GIZA, 1980; IPT, 1985)	058
Figura II.13 -	Prensa CINVA-RAM (UNITED NATIONS, 1964)	064
Figura III.1 -	Resistências relativas para uma deformação dos corpos de prova de 5 % (HOUBEN et alii, 1994)	086
Figura III.2 -	Faixas das dimensões de partículas nos diversos sistemas de classificação do solo	088
Figura III.3 -	Resistência à compressão seca úmida se solos estabilizados com asfaltos (HOUBEN et alii, 1979)	120
Figura III.4 -	Ensaio de absorção de solos estabilizados com asfalto (HOUBEN et alii, 1979)	121
Figura III.5 -	(a) Modelo dos "esqueletos" formados nas misturas solo-cimento para solos arenosos e argilosos (PITTA, 1979); (b) Modelo de HERZOG da estrutura matriz-esqueleto no solo-cimento (MARCONDES, 1992)	134
Figura III.6 -	Efeito do peso específico seco na perda da massa do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (FELT, 1955)	138
Figura III.7 -	Efeito do peso específico seco na resistência à compressão de misturas solo-cimento (FELT, 1955)	139

Figura III.8 - Efeito de umidade de moldagem na perda de massa no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (FELT, 1955)	141
Figura III.9 - Efeito da umidade de moldagem na resistência à compressão de 28 dias (FELT, 1955)	142
Figura III.10 - Método A - Peso específico seco máximo estimado (ABCP, 1977)	150
Figura III.11 - Método A - Teor de cimento ou peso indicado (ABCP, 1977)	151
Figura III.12 - Método A - Mínima resistência à compressão dos corpos de prova a 7 dias (ABCP, 1977)	152
Figura III.13 - Método B - Peso específico seco máximo estimado (ABCP, 1977)	153
Figura III.14 - Método B - Teor de cimento em peso indicado (ABCP, 1977)	154
Figura III.15 - Método B - Mínima resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias (ABCP, 1977)	155
Figura III.16 - Tensões de ruptura dos painéis de solo-cimento (CEPED, 1985)	160
Figura III.17 - Ensaio Físico-químico (CHADDA, 1971)	164
Figura III.18 - Variação volumétricas dos sedimentos das misturas solo-cimento (CASANOVA & CERATTI, 1986)	165
Figura III.19 - Variação volumétrica dos sedimentos das misturas argilo-mineral-cimento (CASANOVA & CERATTI, 1986)	166
Figura III.20 - Resultados tese ENAMORADO (1990)	167

- Figura IV.1 - Posição das curvas granulométricas das amostras PETRUS-I, PETRUS-II, PETRUS-III e AREIA em relação à faixa e curvas ideais propostas por HOUBEN et alii (1979) para tijolos prensados. 183**
- Figura IV.2 - Operação da prensa manual modelo MRC-1 fabricada pela TECMOR (1986) 189**
- Figura IV.3 - Gráficos da variação volumétrica máxima x teor de cimento para amostra PETRUS-I 191**
- Figura IV.4 - Gráficos da variação volumétrica máxima x teor de cimento para amostra PETRUS-II 192**
- Figura IV.5 - Gráficos da variação volumétrica máxima x teor de cimento para amostra PETRUS-III 193**
- Figura IV.6 - Curva de compactação da amostra PETRUS-II, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$ 198**
- Figura IV.7 - Curva de compactação da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$ 199**
- Figura IV.8 - Curva de compactação da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $1,2 \text{ MN/m}^2$ 200**
- Figura IV.9 - As três curvas de compactação obtidas através do ensaio de compactação utilizando a própria prensa de moldagem . . . 201**
- Figura IV.10 - Ensaio de resistência a compressão da amostra PETRUS-II, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$ 203**
- Figura IV.11 - Ensaio de resistência à compressão da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$ 204**

- Figura IV.12 - Ensaio de resistência à compressão da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de 1,2 MN/m² 205**
- Figura IV.13- Ensaio de absorção da amostra PETRUS-II, pressão de compactação de 0,4 MN/m² 206**
- Figura IV.14 - Ensaio de absorção da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de 0,4 MN/m² 207**
- Figura IV.15 - Ensaio de absorção da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de 1,2 MN/m² 208**

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro I.1 -	Pesquisa na Maré (População sem teto, 1989)	002
Quadro I.2 -	Custos do cimento, areia, brita, tijolos X inflação (A construção, 1993)	006
Quadro I.3 -	Quadro comparativo com os quantitativos da composição de custos para a produção de blocos vazados (GIZA, 1980) .	009
Quadro II.1 -	Resumo do volume de estradas e aeroportos pavimentados com base solo-cimento no Brasil (THOMAZ, 1981)	015
Quadro II.2 -	Blocos e tijolos oferecidos pelo mercado e elementos de solo-cimento normalizados pela ABNT (A construção, março/92)	048
Quadro II.3 -	Quadro resumo das construções em solo-cimento no Brasil registradas pela C.E.F. até fevereiro de 1989 (ABCP, 1990)	073
Quadro III.1 -	Ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade dos solos (VARGAS, 1978)	081
Quadro III.2 -	Características observadas em ensaios expedidos e a interpretação dos solos através destes (UNCHS, 1986)	097
Quadro III.3 -	Adaptação dos solos naturais ao emprego na habitação (UNCHS, 1986)	098
Quadro III.4 -	Critérios de resistência (CEPED, 1985)	161
Quadro III.5 -	Critérios de durabilidade (CEPED, 1985)	161
Quadro III.6 -	Resumo dos critérios de resistência para alguns usos do solo-cimento	172

Quadro IV.1 - Limites de consistência e densidade real dos grãos da amostra PETRUS-I	177
Quadro IV.2 - Granulometria por peneiramento da amostra PETRUS-I ..	178
Quadro IV.3 - Análise química e mineralógica da amostra PETRUS-I ..	178
Quadro IV.4 - Granulometria por peneiramento da amostra AREIA	179
Quadro IV.5 - Correção granulométrica dos solos - PETRUS-II	180
Quadro IV.6 - Limites de consistência e densidade real dos grãos da amostra PETRUS-II	181
Quadro IV.7 - Granulometria por peneiramento da amostra PETRUS-II .	181
Quadro IV.8 - Correção granulométrica dos solos - PETRUS-III	182
Quadro IV.9 - Limites de consistência e densidade real dos grãos da amostra PETRUS-III	182
Quadro IV.10 - Granulometria por peneiramento da amostra PETRUS-III .	184
Quadro IV.11 - Teores dos componentes do cimento Portland (CPIII) em percentuais em peso (NBR 5735)	185
Quadro IV.12 - Leituras dos ensaios Físico-químico para a amostra PETRUS-I	188
Quadro IV.13 - Leituras do ensaio Físico-químico para a amostra PETRUS-II	190
Quadro IV.14 - Leituras do ensaio Físico-químico para a amostra PETRUS-III	190

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela III.1 -	Nomenclatura das faixas granulométricas (ABCP, 1977)	. 144
Tabela III.2 -	Teor de cimento mais provável (ABCP, 1977) 145
Tabela III.3 -	Limites de perda de pesos em ensaios de durabilidade por molhagem e secagem (ABCP, 1977) 146
Tabela III.4 -	Teor de cimento médio requerido por solos arenosos não orgânicos - percentagem passando na peneira N.o 200 \leq 35% (ABCP, 1977) 147
Tabela III.5 -	Teor de cimento médio requerido por solos arenosos siltosos e argilosos - percentagem passando na peneira N.o 200 $>$ 35% (ABCP, 1977) 148
Tabela III.6 -	Crítérios de resistência - kN/m^2 (CEPED, 1985) 158
Tabela III.7 -	Teores de areia mínimos (CEPED, 1985) 159

ÍNDICE DE FOTOS

Foto II.1 -	Residência construída com paredes monolíticas de solo-cimento no Vale Florido, Fazenda Inglesa, Petrópolis, Rio de Janeiro .	074
Foto IV.1 -	Prensa manual modelo MRC-1 da TECMOR	175
Foto IV.2 -	Prensa hidráulica modelo HRC-3 da TECMOR	176

CAPÍTULO I

Introdução

A questão da moradia nas grandes cidades

L1 Considerações Gerais

A indefinição das questões agrárias e urbanas na década de 60 e o aumento da oferta de oportunidades de emprego em diversos setores da indústria, principalmente na Construção Civil durante a década de 70 com o advento do chamado "Milagre Econômico", aumentaram o fluxo migratório para os grandes centros urbanos brasileiros. A concentração populacional nas grandes cidade atingiu 67 % do total da população brasileira em 1980 contra 36 % em 1950. Este inchamento populacional conduziu a total deterioração dos condicionantes da qualidade de vida nas grandes cidades, entre eles a moradia.

A questão da moradia não se restringe ao deficit habitacional que hoje atinge a cifra astronômica de 20 milhões de unidades. A manutenção e proliferação de favelas, cortiços, invasões, loteamentos clandestinos constituem "soluções" com as quais as populações de baixa renda resolveram seus problemas de moradia.

Algumas favelas situadas em terrenos próximos aos centros urbanos desfrutam de condições de vida melhores que os moradores de loteamentos periféricos onde muitas vezes inexistente qualquer infra-estrutura urbana.

Um censo realizado pela Sub-reitoria de Desenvolvimento e Extensão da Universidade Federal do Rio de Janeiro levantou dados estatísticos que expressam a realidade do modo de morar das dez favelas e conjuntos habitacionais vizinhos ao campus. Neste censo iniciado em 1985 os pesquisadores visitaram 18.758 domicílios e puderam verificar o seguinte (POPULAÇÃO SEM TETO, 1989):

Características das moradias	%
Terrenos sem promessa de compra e venda	64,23
Casas	73,23
Apartamentos	26,74
Paredes de alvenaria de blocos cerâmicos	87,03
Paredes de madeira	10,94
Piso de cimento	66,23
Piso de cerâmica	25,59
Piso de madeira	4,42
Cobertura com laje de concreto armado	68,27
Cobertura com telhas cerâmicas	15,64
Cobertura com telhas de cimento amianto	13,25
Quatro cômodos	32,45
Cinco cômodos	21,27
Seis ou mais cômodos	14,08
Três cômodos	13,42
Dois cômodos	9,77
Um cômodo	8,60
Não possuem energia elétrica	1,24
Possuem água canalizada	90,77
Possuem instalações sanitárias	89,98
Possuem coletas públicas de lixo	97,55

Quadro I.1 - Pesquisa na Maré (População sem teto, 1989).

A tentativa institucional

O Sistema Financeiro da Habitação (SFH) criado em 1964 possuía o objetivo de financiar, planejar, pesquisar e construir habitações populares a serem vendidas em prestações mensais idealmente acessíveis às diversas camadas sociais. Os recursos eram extraídos principalmente da administração financeira do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS), instituído em 1966. Constituído por organismos fundamentalmente governamentais, entre eles o Banco Nacional da Habitação (BNH), e órgãos executores municipais e estaduais, como por exemplo as COHABs, responsáveis por contratar empreiteiros para construção dos chamados Conjuntos Habitacionais. Com o agravamento da crise econômica da década de 80 até os dias de hoje o SFH não mais conseguiu corresponder aos seus objetivos iniciais, tornando impossível a aquisição da casa própria até por setores médios da sociedade. Com o advento da chamada "Nova República" o BNH foi extinto passando suas atribuições para à Caixa Econômica Federal.

Existe solução para a questão da moradia?

Quais seriam, então, as alternativas de solução para a questão habitacional no Brasil de hoje já que se dispõe de condições técnicas as mais sofisticadas e contando-se com processos industrializados, mecanizados e até automatizados?

A alternativa conhecida como moderna da construção industrializada, baseia-se na produção ao pé do canteiro de obras ou em fábricas de elementos, componentes, e até células tridimensionais, constituindo sistemas construtivos abertos ou fechados. Os sistemas construtivos fechados, utilizando intensamente a pré-fabricação, reconstruíram a Europa após a 2.^a Guerra Mundial as custas de uma intensa mobilização de capital advinda dos recursos injetados pelo Plano Marshall. Este processo é desenvolvido em grande parte pelo construtor/empreiteiro que edifica os conjuntos habitacionais nas cidades. Ele significa a organização e o planejamento do processo de construção com o objetivo de suprir um mercado através da geração contínua de produtos; deve necessariamente basear em uma tecnologia adequada e em uma continuidade na colocação de produtos. O gerenciamento é centralizado e a organização rígida, utiliza a mecanização como recurso para o aumento de produção, necessita de capital intenso e por esta razão dependem do consumo contínuo, isto é, sua viabilidade está relacionada com o retorno seguro de alta soma de investimentos (ABIKO,1985).

As tecnologias apropriadas à habitação caracterizam-se por soluções simples e podem reviver técnicas já abandonadas ou utilizadas em outros campos adaptando-as de forma simples a conhecimentos, procedimentos, equipamentos ou matérias-primas não disponíveis quando de sua geração, simplificando o produto final, os equipamentos ou outros insumos, inclusive mão de obra. Podem também, envolver pesquisa científica e tecnológica em áreas virgens ou de fronteira do conhecimento atual necessitando de pessoal de alto nível técnico. Constituem alternativas que dispendem pouco capital, utilizam, sempre que possível, materiais locais; faz uso intensivo da mão de obra local, a escala de produção pequena, é entendida, controlada e mantida pelos próprios usuários, permite um trabalho conjunto das pessoas para que, coletivamente, façam melhorias em suas comunidades; as decisões são tomadas por grupos; envolve fontes de energia descentralizadas e renováveis; permite o entendimento das pessoas que a utilizam; não envolve patentes, "royalties", assistência técnica, taxas de importação ou transporte, financiamentos, etc (ABIKO, 1985).

Como solução espontânea encontrada pelas populações alijadas dos programas institucionais de habitação a construção tornou-se uma alternativa viável que deve ser apoiada e reconhecida pelo seu esforço e resultados práticos. Segundo dados estatísticos do IBGE no Rio de Janeiro a auto-construção é responsável pela produção de 60 % das moradias.

Neste processo o principal personagem é o futuro usuário da moradia, que a constrói, algumas vezes sozinho, com a família, com os parentes, por vezes contratando um pedreiro e trabalhando como servente carregando os materiais de construção, preparando a argamassa, etc. As casas são construídas nos fins de semana, nas horas vagas ou durante as férias (ABIKO, 1980). Na auto-construção em centros urbanos são utilizados materiais e processos que refletem, guardadas as devidas limitações, as técnicas empregadas na construção formal dos edifícios das classes média e alta. Conseqüentemente a auto-construção se mostra afetada diretamente pelo alto custo dos materiais de construção tradicionais, que vem aumentando acima dos índices de inflação.

Os mutirões, que historicamente são uma forma de ajuda mútua muito utilizada pelas populações pobres em quase todos os estados da federação, oferecem uma grande oportunidade onde a intervenção governamental, desde que de forma democrática, pode resgatar credibilidade, criando condições favoráveis à autoconstrução de habitações. Neste sentido foi criado pelo BNH, na década de 80, o Projeto João de Barro que tentou retornar aos programas de construção por

ajuda mútua que haviam sido estancados pelos acontecimentos políticos de 1964 (POPULAÇÕES SEM TETO, 1989).

O uso do solo na habitação

Dentre as tecnologias apropriadas destacam-se aquelas que utilizam o solo estabilizado quimicamente como material de construção. O cimento Portland tem sido o agente estabilizador de emprego mais difundido em razão de sua disponibilidade no mercado e a vasta pesquisa até hoje envolvendo a aplicação de misturas solo-cimento em todos os ramos da Engenharia Civil. A produção de elementos (tijolos e blocos) e componentes (paredes monolíticas) são exemplos de aplicação das misturas solo-cimento na Construção Civil.

Os elementos de solo estabilizado com cimento, apesar de já normalizados pela ABNT, não tiveram ainda a sua produção apropriada pelo mercado formal de materiais de construção.

O BNH através do Departamento de Estudos e Pesquisas Aplicadas (DEPEA) iniciou em 1976 uma linha de estudos para a construção de moradias utilizando tijolos e blocos estabilizados com cimento, utilizando prensas manuais e hidráulicas (BNH,1983). Apesar do bom desempenho alcançado pelos elementos de solo-cimento, possibilidade de produção a custos 40 % inferiores aos dos elementos tradicionais de alvenaria e disponibilidade no mercado nacional de equipamentos de prensagem a custos compatíveis existem ainda resistências já diagnosticadas:

- insegurança quanto à tecnologia;
- desconhecimento dos métodos de dosagem e produção de misturas de solo-cimento;
- resistências culturais face os elementos de alvenaria tradicionais;
- temor da concorrência com os elementos tradicionais de alvenaria de mercado já consolidado, e que, por vezes, são comercializados com margens de lucro muito altas, mascarando o seu custo real;
- o momento de insegurança econômica que afasta os investimentos em inovações tecnológicas;
- indefinição da política governamental para o setor habitacional.

Aumento Mensal (%)													Aumento acumulado no ano (%)
MESES	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
INPC	28,77	24,79	27,58	28,37	26,78	30,37	31,01	33,34	35,63	34,12	36,00	37,73	1911
Cimento	8,6	22,9	45,9	41,0	22,4	13,7	25,0	30,0	39,1	43,1	56,0	32,3	2365
Areia	43,4	38,0	23,3	30,8	18,8	26,0	38,7	20,7	36,6	22,2	34,3	60,8	2538
Brita 1	49,7	44,5	1,7	21,0	0,0	7,3	81,9	6,1	21,1	38,6	43,8	33,0	1569
Bloco 10x20x20	17,5	30,7	60,7	48,3	42,4	22,3	10,9	15,1	27,1	20,3	73,8	40,1	2827

Quadro I.2 - Custos do cimento, areia, brita, tijolos x inflação (A construção, 1993)

Em contraponto à tendência acima descrita surgiu a iniciativa do Centro de Pesquisas Siderúrgicas da Usimina de desenvolver uma tecnologia de produção de elementos de alvenaria a partir de misturas de escória de alto forno, solo argiloso e cimento. Uma empresa mineradora já implantou uma unidade de produção em escala industrial utilizando a tecnologia desenvolvida na Usiminas (LIMA,1992). A empreiteira Andrade Gutierrez a partir de pesquisas na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais esta produzindo um elemento de alvenaria de encaixe em solo-cimento conhecido como "blokitto".

A experiência com estabilização de solos na COPPE

A pesquisa envolvendo a utilização de rejeitos industriais, minerários e aditivos químicos comerciais, como a cal e o cimento Portland, para fins de estabilização de solos de bases rodoviárias foi iniciada na COPPE, sob orientação do Prof. Jacques de Medina, desde a fundação do curso de pós-graduação em Engenharia Civil em 1967 (MEDINA, 1977). Já em 1971 o engenheiro Salomão Pinto defendia a tese: "Estabilização de Areia com Adição de Cal e Cinzas Volante".

O estudo da cinza volante, rejeito proveniente de Usinas Termelétricas do sul do país, foi estendido através de mais duas teses (NARDI,1975; MARCON,1977). Obteve-se, assim, uma técnica de pavimentação que permitiu utilizar as areias finas e uniformes de dunas e o aproveitamento de um rejeito abundante nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Outro rejeito estudado numa tese de mestrado (BORGES,1979) foi a cal de carbureto, rejeito oriundo da indústria do gás acetileno, que foi utilizado na estabilização de solos argilosos.

A COPPE também investigou alguns aditivos químicos, entre eles o ácido fosfórico que foi testado numa série de solos lateríticos (GUIDA,1971). Os solos muito expansivos do Recôncavo Bahiano, conhecidos por "massapês", foram estudados utilizando-se cal hidratada (MENENDEZ,1973). Ainda com referência ao estudo da cal na estabilização de solos, em 1981 o Prof. Francisco José Casanova defendeu a tese: "Um Estudo Físico-Químico-Matemático da Estabilização Alcalina de Solos Argilosos".

Para o cimento Portland, aditivo químico para a estabilização de solos de uso muito difundido nos mais diversos ramos da Engenharia Civil, foi desenvolvido um método de dosagem (CHADA, 1954; 1971) que ficou conhecido

por Método Físico-Químico (CASANOVA & CERATTI,1986). Duas teses aprofundaram a investigação deste método (ENAMORADO, 1990; RODRIGUES, 1992) a partir de extenso programa de ensaios utilizando diversas amostras de solos.

I.2 Importância

O estudo de misturas de solo estabilizado com aplicação à fabricação de elementos de alvenaria e paredes monolíticas torna-se relevante quando analisado pelos aspectos econômico, energético e ecológico.

Aspecto econômico

Os custos dos materiais de construção básicos, entre eles os elementos de alvenaria, como já foi mencionado, vêm sofrendo aumentos muito acima dos índices que medem a inflação. Estes aumentos podem ser justificados pelos efeitos econômicos (lei da oferta e da procura), escassez na estação chuvosa, ou ainda, aumento nos custos de transporte da matéria-prima (IPT, 1978). Os jazimentos de argilas próprias para a fabricação de tijolos e blocos cerâmicos, geralmente argilas sedimentares recentes (SANTOS, 1975), próximos às olarias quando não se encontram em extinção têm sua exploração inviabilizada devido à especulação imobiliária que aumenta os custos dos terrenos. Além disso a não utilização de argilas próprias acaba por comprometer a qualidade tecnológica dos elementos produzidos (IPT, 1978).

Aspecto da energia

Houben et alii (1979) cita Mc Killop que demonstrou que a energia consumida no cozimento dos tijolos cerâmicos é de 2 kWh, um tijolo de solo estabilizado com cimento com as mesmas dimensões não chega a consumir 0,05 kWh.

O catálogo promocional da empresa italiana GIZA (1980) apresenta um quadro comparativo da composição de mão-de-obra, materiais e energia para a produção de um bloco vazado com dimensões 20x20x40 cm, 8,50 dm³ de volume e 17 kgf de peso, de solo estabilizado com cimento e um bloco de concreto simples:

BLOCO DE CONCRETO		BLOCO DE SOLO-CIMENTO	
Material	Quantidade	Material	Quantidade
Areia, brita (kgf)	15,36	Solo (kgf)	14,87
Cimento, 300 kgf/m ³ (kgf)	2,49	Cimento, 150 kgf/m ³ (kgf)	1,27
Água (l)	1,00	Água (l)	1,60
Energia (kWh)	0,12	Energia (kWh)	0,12
Mão-de-obra (min.)	1,68	Mão-de-obra (min.)	1,68

Quadro I.3 - Quadro comparativo com os quantitativos da composição de custos para a produção de blocos vazados (GIZA, 1980).

MABARDI (1984) relata que a escalada dos custos da energia é um fenômeno novo e atual; desde 1972 estes custos tem tido um crescente impacto na balança de pagamento da maioria dos países. Todos tentaram impor medidas drásticas de redução do consumo de energia. Em todos os campos das economias nacionais, esforços não tem sido medidos neste sentido. Sendo o solo um material local, logo constitui-se um poupador de energia dentro do setor de construção. MABARDI acrescenta o fato da economia com energia numa produção de blocos estabilizados representar de 35 a 68 % quando comparado às olarias de tijolos cerâmicos. Quando o solo encontra-se em abundância ao longo de todo o território ele é geralmente extraído e processado perto dos locais de construção, caso não esteja no próprio sítio de construção. Conseqüentemente há uma redução ao mínimo dos custos de transporte, consistindo num efeito indireto na economia de energia. Quando comparado aos problemas de transporte provocados pelas unidades de produção centralizadas, o efeito positivo nas economias nacionais, também possui um efeito direto no custo dos próprios produtos, portanto, tornando-os mais acessíveis às populações de baixa renda.

Aspecto da ecologia

A extração da matéria-prima para a fabricação de um material de construção, qualquer que seja ele, implica, geralmente, em impactos ao meio ambiente.

A exploração das areias através de seu bombeamento do leito dos rios implica em um grave impacto porque estes sedimentos são o compartimento mais importante dos ecossistemas aquáticos continentais, porque promovem a ciclagem de matéria e fluxo de energia; nele ocorrem processos biológicos, físico e químicos que influenciam o metabolismo de todo o sistema (ESTEVES, 1988).

A exploração de areias de dunas constitui um exemplo de degradação ao Meio Ambiente para a obtenção de matéria-prima para a produção de elementos e componentes empregados, principalmente, na Construção Civil. Frequentemente estas areias são empregadas na confecção do concreto armado, apesar de conter elevados teores de cloretos.

Os produtos da britagem de rochas dispendem muita energia em seu processo de produção, o que torna estes produtos mais caros. Por este fato devem ser utilizados na confecção de elementos e componentes que empregam o concreto simples, o concreto ciclópico e o concreto armado, todos com finalidade estrutural. A exploração racional do solo natural pode substituir os enormes volumes de materiais pétreos empregados pela indústria da construção e por outras áreas da Engenharia Civil mitigando os impactos ao Meio Ambiente provocado pela exploração em pedreiras.

O emprego dos solos que seriam considerados impróprios ao processamento pelas indústrias tradicionais de materiais de construção, acrescido da possibilidade de utilização de rejeitos na estabilização desses solos constitui uma via de mão dupla. Por um lado amplia-se a faixa de solos utilizáveis pela indústria e, concomitantemente, elimina-se rejeitos que geralmente estão contaminando o meio ambiente ocupando áreas de estocagem gigantescas.

I.3 Objetivo

A proposta deste trabalho é de estudar misturas de solo-cimento, resgatando a já referida experiência do setor de mecânica do solos da COPPE em estabilização de solos para fins de bases rodoviárias.

Houve também a intenção proposital de ampliar os objetivos deste trabalho abordando-se, sucintamente, algumas das utilizações do solo estabilizado nos mais diversos ramos da Engenharia Civil, focalizando sua utilização como material de construção destinado à habitação e descrevendo as diversas modalidades com que é empregado. Tal intenção visou posicionar o escopo deste trabalho dentro de uma perspectiva maior da utilização viável das misturas de solo estabilizado.

O solo-cimento constituiu a base de referência deste trabalho, uma vez que o cimento Portland se apresenta na Engenharia Civil como o estabilizante de solos de emprego mais difundido, além de uma vasta literatura de investigações científicas e experiências práticas contando, inclusive, com a especificação de tijolos e blocos vazados de solo-cimento, já normalizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

I.4 Conteúdo dos capítulos

No capítulo II apresenta-se uma pesquisa bibliográfica dos mais diversos empregos do solo como material de construção pela Engenharia Civil. São mencionados exemplos de obras que utilizam técnicas simples e até obras de grande vulto onde, principalmente, as misturas de solo-cimento foram empregadas. São também relacionados neste capítulo as diversas técnicas construtivas que utilizam os solos estabilizados, além de algumas experiências práticas no Brasil e

O capítulo III versa sobre a estabilização de solos com cimento Portland, exterior. desde os critérios para a escolha do solo, métodos de dosagem, técnicas de produção e compactação das misturas de solo estabilizado. Ainda neste capítulo é feita uma revisão da bibliografia no que se conhece das interações físico-químicas do solo com o cimento e dos rejeitos estudados.

O capítulo IV descreve o estudo experimental de misturas solo-cimento, onde após a caracterização da amostra de solo empregada, obteve-se duas novas amostras de solo resultantes da mistura do solo natural com uma areia lavada de rio. Investigou-se o teor de água para a moldagem de tijolos de prensa manual, obtendo-se uma curva de compactação utilizando o próprio equipamento de prensagem. Ensaios de resistências à compressão e absorção foram feitos para cada ponto desta curva. Ao final é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos.

O capítulo V se propõe a expor as conclusões alcançadas pelo trabalho e sugerir novos enfoques para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

O solo como material de construção

II.1 Introdução

O primeiro uso do solo como material de construção remete o seu emprego na execução das moradias pré-históricas onde a terra era escavada fornecendo, assim, o abrigo que junto ao alimento constituem necessidades básicas para a sobrevivência humana.

As civilizações Persas, Assírias, Egípcias e Babilônicas utilizaram-no em abundância, e os exemplos que restaram até hoje mostram que nossos ancestrais não hesitaram em empregar o solo em obras, por vezes, monumentais tais como o: arco de Ctésifon no atual Iraque. Confiaram seus bens mais preciosos pela eternidade: pirâmides e mastabas em Saggara no Egito (1.^a Dinastia). Mais conhecidas são as ruínas de Chan-Chan no Peru, a maior cidade pré-colombiana da América do Sul (HOUBEN et alii, 1979). A Grande Muralha da China, utilizou solo e foi construída em 3.000 a.C. (TAVEIRA, 1987).

No Egito antigo a madeira era escassa, os blocos de pedra eram encontrados nos topos das montanhas no leste e oeste do Nilo, mas estes eram difíceis de extrair, transportar e trabalhar, ficando o seu uso restrito às estruturas de mausoléus e templos. As argilas (solos aluvionares) eram abundantes e naturalmente tornaram-se materiais de construção quando se descobriu que poderiam ser moldadas em pequenos elementos, que ficaram conhecidos por adobes, e que após deixados a secar ou cozer sob o calor do sol eram empregados em alvenarias. Os adobes feitos com as argilas do Nilo requeriam a adição de palha a fim de evitar que se tornassem quebradiços (SPALDING et alii, 1926).

Na Caldéia eram empregados diversos cimentos nas argamassas de assentamento dos adobes e tijolos: desde simples argamassas de argila para as alvenarias do interior das residências e muros de pouca significância; cal ou uma mistura com cinzas nos grandes edifícios; e o betume muito abundante na região (HOUBEN et alii, 1979).

Os tijolos queimados em fornos foram encontrados no Egito, mas acredita-se que surgiram com a ocupação romana em 44 D.C. (SPALDING et alii, 1926).

Os romanos descobriram as pozolanas, silicatos de alumínio de origem vulcânica, encontrados em Pozzuoli perto do sopé do Monte Vesúvio. Com elas produziam concretos utilizando cal, areia, pedras, tijolos e telhas quebradas (SPALDING et alii, 1926).

Com a expansão do Império Romano as técnicas de construção com terra alcançaram partes da França, Alemanha, Grã-Bretanha e Península Ibérica. Conseqüentemente, espanhóis e portugueses, levaram para suas colônias as técnicas de construção com terra. Na América espanhola foi introduzida a técnica de construção com adobes. No Brasil colonial as construções com terra constituem a grande maioria de nossa arquitetura. Comenta Carlos Cerqueira, em seu estudo sobre a Casa Colonial Paulista, que durante três séculos deste período, a matéria-prima para a construção em São Paulo foi a terra e o sistema construtivo a taipa-de-pilão. Segundo este autor as primeiras notícias de casas de tijolos cerâmicos somente aparecem por volta de 1700 (CEPED, 1985).

A Revolução Industrial que se iniciou na Grã-Bretanha em 1750, trouxe o surgimento de novas técnicas produtivas, a produção de materiais de construção mais duráveis: aço - ABRAHAM DARBY, 1709; cimento Portland - JOSEPH ASPDIN, 1824 e o concreto armado - JOSEPH MONIER, 1861. As técnicas de construção com terra, até então hegemônicas, foram sendo substituídas por técnicas que adotavam os novos materiais, a alvenaria foi relegada de sua função estrutural para a utilização como componente de vedação (TUDO, 1977).

Apesar de revividas em nosso século nos períodos de escassez de materias, após as duas grandes guerras, as técnicas de construção de moradias com terra tiveram sua utilização restringida aos países sub-desenvolvidos. Contudo outras aplicações do solo foram estimuladas desde 1935 quando a Portland Cement Association iniciou atividades de estudo de misturas de solo estabilizadas com cimento Portland para aplicação em bases rodoviárias (CEMBUREAU, 1960).

Ao longo deste capítulo serão apresentadas, sucintamente, algumas das diversas aplicações do solo natural e estabilizado em diversos ramos da Engenharia Civil, destacando-se as técnicas de produção de elementos e componentes e de construção que utilizam o solo para habitação, mencionando experiências no Brasil e exterior de aplicações destas técnicas, faz-se também referência às perspectivas de utilização de rejeitos industriais e minerários na estabilização de solos.

II.2 O emprego do solo na Engenharia Civil

Muitas são as utilizações do solo na Engenharia Civil contemporânea, obras de terra como barragens envolvem em sua construção volumes gigantescos de terra e enrocamento que podem chegar a $32.000.000 \text{ m}^3$ como foi o caso da Barragem de Tucuruí, Pará.

Diversos aproveitamentos tem sido dados ao solo pela Engenharia Civil, particularmente aos solos estabilizados com cimento, cal e rejeitos industriais e minerários.

II.2.1 O exemplo de solo-cimento

O solo-cimento é uma mistura densamente compacta de cimento Portland, solo/agregados, e água. O cimento se constitui no estabilizante de solos de uso mais difundido na Engenharia Civil, o que pode ser constatado na exposição de exemplos a seguir:

Bases de pavimentos

Desde a construção em 1915 de uma rua em Sarasota, Flórida, empregando-se uma mistura de conchas, areia e cimento Portland, o solo-cimento tornou-se uma das formas de estabilização de solos mas amplamente utilizada em estradas. Até 1990 mais de 1180 Km^2 de bases de ruas, estradas e aeroportos foram construídas nos Estados Unidos, tanto para pavimentos flexíveis quanto para pavimentos rígidos. Além disso pavimentos flexíveis deteriorados têm sido reciclados com cimento, obtendo-se, assim uma nova base de solo-cimento (ADASKA et alii, 1990).

O solo-cimento começou a ser estudado no Brasil em 1940 através da Associação Brasileira de Cimento Portland, inspirado nas pesquisas e estudos iniciados em 1932 por MOOREFIELD e MILLS no State Highway Department of South Carolina e depois de 1935 por CATTON na Portland Cement Association (CEMBUREAU, 1960). A primeira experiência foi no Brasil em 1940 em um pequeno pátio de manobras no Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro. Em 1941 foi executado um trecho experimental na Estrada Areias-Caxambú, Minas Gerais e em seguida na Tronco Norte Fluminense, Rio de Janeiro. A primeira pista para pouso de aviões foi executada em Petrolina, Pernambuco de 1942-1943 e a

segunda em Bom Jesus da Lapa, Bahia, em 1944. O quadro II.1 resume o volume de estradas e aeroportos pavimentados com bases de solo cimento nas diversas unidades da federação (THOMAZ, 1981):

Estado	Ano	Rodovia		Aeroporto	áreas diversas pátios, ruas, etc
		km	área em m ² x 1000	área em m ² x 1000	m ² x 100
São Paulo	1975	6.867	49.442	715	
São Paulo	1980	7.600	54.720	800	
Paraná	1975	2.200	15.840	510	
Paraná	1980	3.000	21.600	520	
Santa Catarina	1975	44	316	--	
Rio Grande do Sul	1975	984	7.084	--	
Rio Grande do Sul	1980	1000	7.200	--	
Centro-Oeste	1975	270	2.088	--	
Centro-Oeste	1980	300	2.160	--	
Nordeste	1975	1.200	8.640	120	
Nordeste	1980	1.250	9.000	120	
Norte	1975	14	100	--	
Norte	1980	400	2.880	100	
Totais	1975	11.345	83.510	1.445	--
	1980	13.594	97.876	1.540	1.500.000
Total no Brasil = 100.916.000 m ²					

Quadro II.1 - Resumo do volume de estradas e aeroportos pavimentados com bases de solo-cimento no Brasil (THOMAZ, 1981).

Taludes

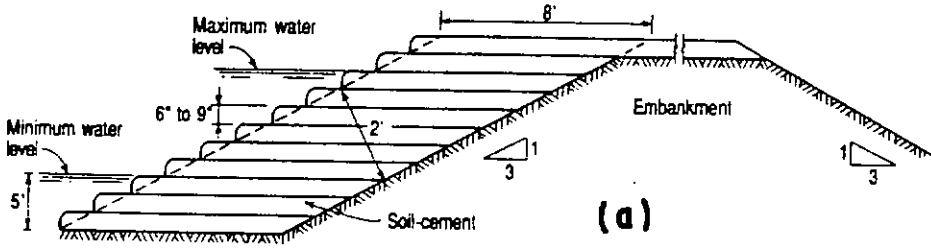
O U.S. Bureau of Reclamation (USBR) dos Estados Unidos, logo depois da 2.^a Grande Guerra mobilizou esforços no sentido de estudar a viabilidade de utilização do solo-cimento como alternativa aos rip-rap (enrocamentos) convencionais. Baseado em estudos de laboratório que indicaram que o solo-cimento elaborado com solos arenosos poderia produzir faces duráveis e resistentes à erosão. Em 1961 foi construída no reservatório de Bonny no leste do Colorado uma seção teste em escala natural, selecionada por esta barragem estar sujeita a severas condições de serviço como ondas e mais de 100 ciclos anuais de gelo e degelo. Depois de 10 anos de observação o USBR ficou convencido da viabilidade de aplicação do solo-cimento e o utilizou como rip-rap alternativo nas barragens de Merrit, Nebraska e Cheney no Kansas.

Desde então mais de 300 projetos de proteção de taludes com solo cimento foram executados nos EUA e Canadá, taludes de canais, vertedouros, linhas de costa, aterros de rodovias e ferrovias e aterro destinados a reservatórios. Nas barragens expostas às ações de moderadas à severas de ondas, ou carregamento de escombros, corredeiras, os taludes de solo cimento foram construídos em camadas conforme a figura II.1a (ADASKA et alii, 1990).

Em Hong Kong; já há décadas, praticamente todos os taludes de cortes e aterros são protegidos superficialmente por um revestimento feito a partir de uma mistura de solo, cal e cimento, aplicado em estado plástico, conhecido como *chunam* (WOLLE, 1992).

No Brasil conforme o relato de DANTAS (1965) o corte realizado no Morro do Telégrafo no Rio de Janeiro, resultou em taludes com 30 m de altura e declividade média de 45°. Como solução definitiva ao processo erosivo e aos constantes escorregamentos localizados, utilizou-se uma mistura do próprio solo local estabilizada com cimento como revestimento dos taludes.

Uma experiência contemporânea tem sido divulgada pela Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura de Juiz de Fora, Minas Gerais (PMJF, 1986). O solo-cimento é ensacado e utilizado como um rip-rap em contenção de encostas, contenção de taludes às margens de rios e córregos, controle de erosão, cabeceiras de pontes e bueiros (ver figura II.1b e c).



(b)

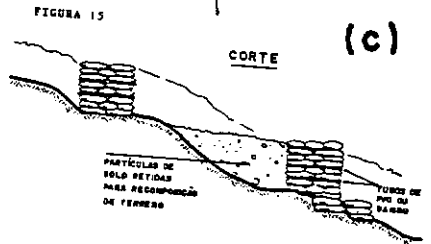
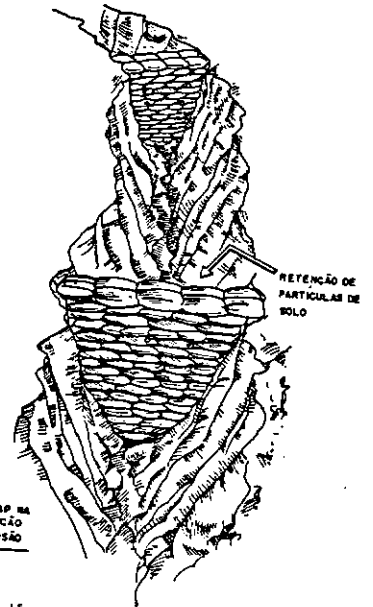
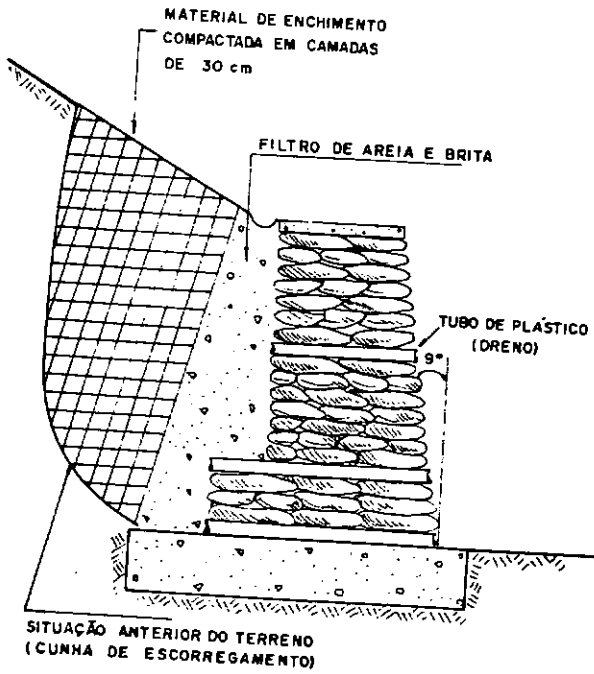


Figura II.1 (a) Taludes de Barragens (ADASKA et alii, 1990);
 (b) Muros de contenção (PMJF, 1986);
 (c) Contenção de erosão (PMJF, 1986).

Barreiras impermeáveis

O solo-cimento tem sido utilizado nos EUA, como material de revestimento de baixa permeabilidade, por mais de 30 anos. Durante a metade dos anos 50 inúmeros reservatórios de água de 0,4 a 1,2 ha foram construídos no sul da Califórnia e revestidos com camadas de solo-cimento com 10 a 15 cm de espessura.

Um dos maiores projetos que envolveu o solo-cimento como revestimento foi o do lago Cahuilla, um reservatório terminal de regularização do sistema de irrigação do Distrito de água do vale do condado de Coachella, também no sul da Califórnia. Terminado em 1969, com uma área de quase 55 hectares teve o seu fundo revestido com uma camada de 15 cm de espessura.

Além da utilização em reservatórios de água, o solo-cimento tem sido utilizado no revestimento de lagoas para tratamento de rejeitos, leitos de secagem de lama, tanques de depósitos de cinza e aterros de rejeitos sólidos (ADASKA et alii, 1990).

Estabilização de fundações

O cimento tem sido empregado para estabilizar massas de solo impróprias como terreno de fundações, melhorando a suas características de suporte e uniformizando a distribuição de cargas de grandes estruturas. Em Koeberg, África do Sul, por exemplo, o solo-cimento foi empregado na substituição duma camada de areia de compactidade de média a densa, saturada, sujeita à liquefação, para a implantação de duas Centrais Nucleares de 900 MW.

O terreno de fundação destinado a construção de um prédio de escritórios com 38 pavimentos, terminado em 1980 em Tampa, Flórida era constituído por uma camada de areia fina sobre um substrato de rocha calcárea com muitas cavidades. A implantação de fundações em estacas ou tubulões mostrou-se solução difícil e bastante onerosa. Optou-se pela escavação da camada de areia (aproximadamente 3,70 m), preenchimento das cavidades com concreto magro e reposição da camada de areia estabilizada com cimento compactada em camadas.

Em 1984 o solo-cimento foi empregado, ao invés do concreto massa prescrito, na fundação em radier de um vertedouro com 366 m de extensão na Barragem de Richland Creek perto de Forte Worth, Texas. Houve a remoção de

uma camada de aproximadamente 3 m de material acima da rocha sã e a substituição deste material por quase 90.000 m³ de solo-cimento.

Na Barragem de Cochiti no Novo México parte dos canais de descarga estavam assentados sobre um bolsão com quase 11 m de profundidade de um folhelho argiloso de pouca resistência foi recomposta com 44.000 m³ de solo-cimento. Esta substituição teve o objetivo de proporcionar ao material propriedades físicas similares ao arenito que envolvia o bolsão, portanto minimizando o perigo de recalques diferenciais ao longo dos canais (ADASKA et alii, 1990).

Outras Aplicações

Em alguns locais, especialmente naqueles onde solos argilosos não são disponíveis, aterros e barragens tem sido construídos inteiramente com solo-cimento. Estes aterros monolíticos servem a muitos propósitos: proporcionam a proteção dos taludes, atuam como núcleos impermeáveis, e podem ser construídos com taludes de inclinação maior que os de solo natural.

Algumas instalações de manejo e estocagem de carvão mineral tem empregado o solo-cimento nas mais variadas aplicações.

II.3 O solo na habitação - produção de elementos e componentes

Muitas vezes os elementos e componentes empregados na construção são confundidos com as técnicas construtivas que os utilizam. Por exemplo, o adobe que é um elemento de alvenaria acaba denominando todas as técnicas produtivas que o empregam, esquecendo-se que uma técnica construtiva emprega outros elementos (ladrilhos, telhas, revestimentos, etc.) e componentes (pavimentos, telhado, portas e janelas, etc.) Nesta seção procurou-se apresentar diversas técnicas de produção elementos (adobes, blocos e tijolos prensados) e componentes (paredes monolíticas) que utilizam o solo como material de construção, pois é muito amplo o espectro e sistemas construtivos que podem absorver estes elementos e componentes.

Os solos podem ser utilizados tanto sob a forma de blocos intactos extraídos diretamente da jazida como é o caso de construções primitivas quanto podem ter a sua estrutura natural destruída, sendo usados pulverizados, como material para a produção de elementos e componentes construtivos. Os solos após pulverização podem ser empregados no estado semi-sólido, plástico e líquido,

conforme o teor de umidade. A Figura II.2 resume as formas de utilização do solo na habitação relacionando com os estados de consistência.

II.3.1 Paredes monolíticas

Construções antigas de muros monolíticos são encontradas no Marrocos, na China e em toda a Europa, principalmente na França nas regiões de Dauphiné, Lion, Auvergne e na Bretanha. No Brasil a construção de paredes monolíticas originou-se da técnica tradicional, trazida pelos colonizadores portugueses, conhecida como taipa-de-pilão. Na França recebe o nome de "pisé" e nos países de língua inglesa é adotado o termo "rammed earth".

A técnica constitui-se basicamente na moldagem in situ de painéis, através da compactação de camadas sucessivas de solo, em estado natural ou estabilizado, lançado em um sistema de formas.

As técnicas tradicionais de construção de paredes monolíticas erguiam as paredes, com espessuras de 50 cm ou mais empregando formas de madeira de montagem bastante simples (ver Figura II.3a), ajustando-se a espessura da parede através de um sistema de cunhas (ver Figura II.3b). Após a compactação de um trecho do painel as formas eram deslocadas horizontalmente conformando juntas verticais ou inclinadas até completar a execução de um nível de parede (ver Figura II.4). O solo era compactado com soquetes de madeira com formatos variados afim, por exemplo, de compactar arestas.

As habitações com paredes monolíticas empregadas em países industrializados, como a França, foram abandonadas menos por razões técnicas e mais por fatores de ordem sócio-econômica. Durante os períodos de pós-guerra foram conduzidas pesquisas para atualizar o processo em inúmeras partes do globo, investigando um meio de produzir, nos períodos de penúria, habitações de baixo custo. A ausência de construções econômicas e duráveis fez surgir os projetos oficiais de habitação utilizando o solo (HOUBEN et alii, 1979).

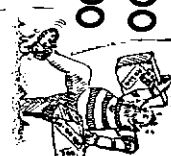

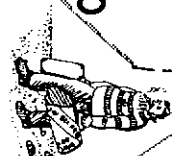
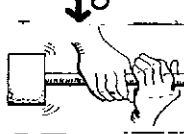
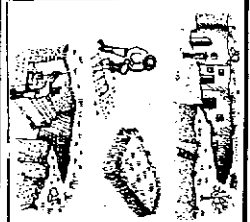
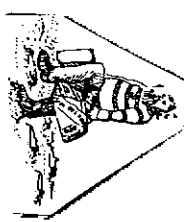
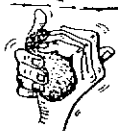
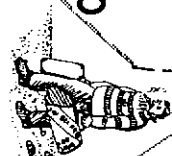
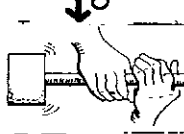

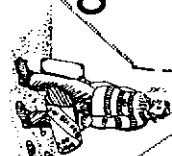
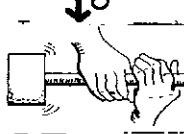
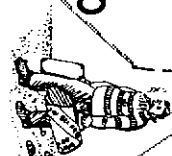
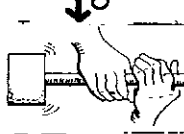
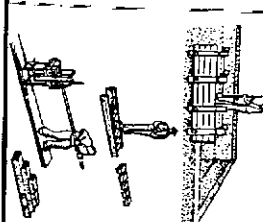
SOLO REVOLVIDO		SOLO não REVOLVIDO
<p>ESTADO LÍQUIDO</p>  <p>↓ LAÇADO ↓</p>  <ul style="list-style-type: none"> • SOLO LANÇADO EM FORMAS • SOLO LANÇADO EM MOLDES 	<p>ESTADO SÓLIDO</p>  <p>↓ COMPACTADO ↓</p>  <ul style="list-style-type: none"> • SOLO COMPACTADO EM FORMAS • SOLO COMPACTADO EM PRENSAS 	<ul style="list-style-type: none"> • TERRA ESCAVADA • PLAÇAS DE TERRA COM RAÍZES • TERRA ESCULPIDA  <p>Habitacões trogloditas</p> <p>Torrões</p> <p>Blocos esculpidos</p>
<p>ESTADO PLÁSTICO</p>  <p>↓ AMASSADO ↓</p>  <ul style="list-style-type: none"> • SOLO MOLDADO COM MOLDES • SOLO MOLDADO À MÃO • SOLO MOLDADO NO LOCAL • SOLO-PALHA EMPILHADO • SOLO LANÇADO EM ARMADURA 	<p>ESTADO SEMI-SÓLIDO</p>  <p>↓ COMPACTADO ↓</p>  <ul style="list-style-type: none"> • SOLO COMPACTADO EM FORMAS • SOLO COMPACTADO EM PRENSAS 	 <p>Adobe</p> <p>Adobe</p> <p>Barroca</p> <p>"Bauga"</p> <p>Taipa-de-sebe</p>
<p>ESTADO SÓLIDO</p>  <p>↓ COMPACTADO ↓</p>  <ul style="list-style-type: none"> • SOLO COMPACTADO EM FORMAS • SOLO COMPACTADO EM PRENSAS 	<p>ESTADO SEMI-SÓLIDO</p>  <p>↓ COMPACTADO ↓</p>  <ul style="list-style-type: none"> • SOLO COMPACTADO EM FORMAS • SOLO COMPACTADO EM PRENSAS 	 <p>Paredes monolíticas</p> <p>Blocos socados</p> <p>Tijolos prensados</p>

Figura II.2 - Formas de utilização do solo na habitação segundo os estados de consistência (HOUBEN et alii, 1979)

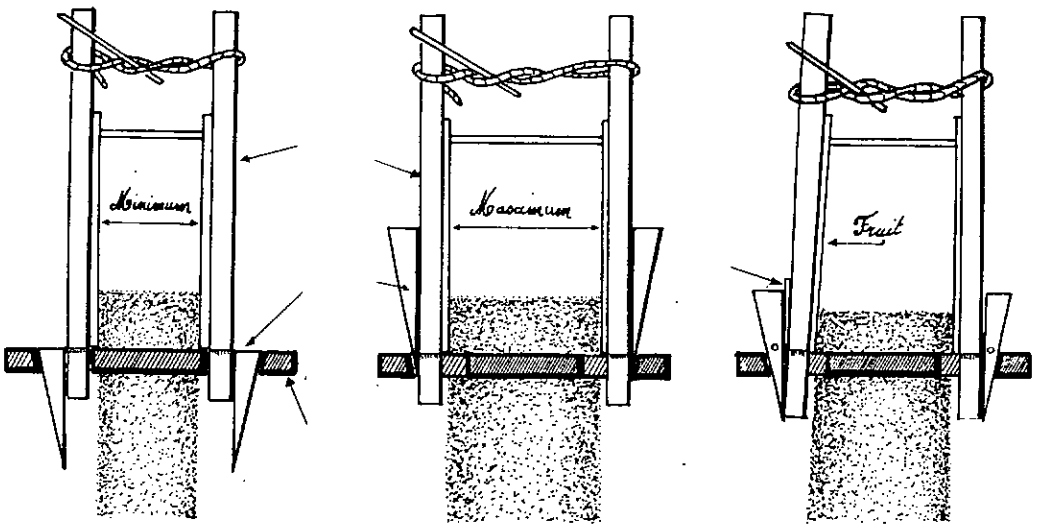
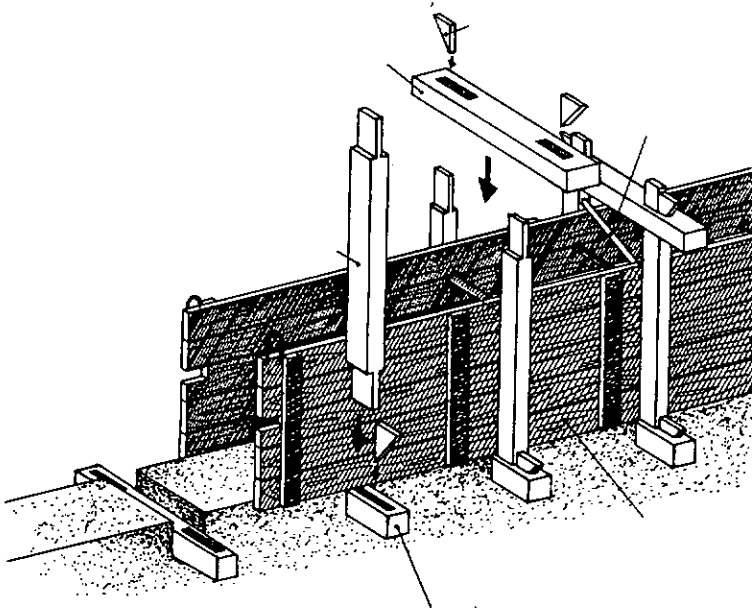


Figura II.3 - (a) Formas de madeira para moldagem de paredes monolíticas; (b) Sistema de encunhamento das formas (HOUBEN et alii, 1979).

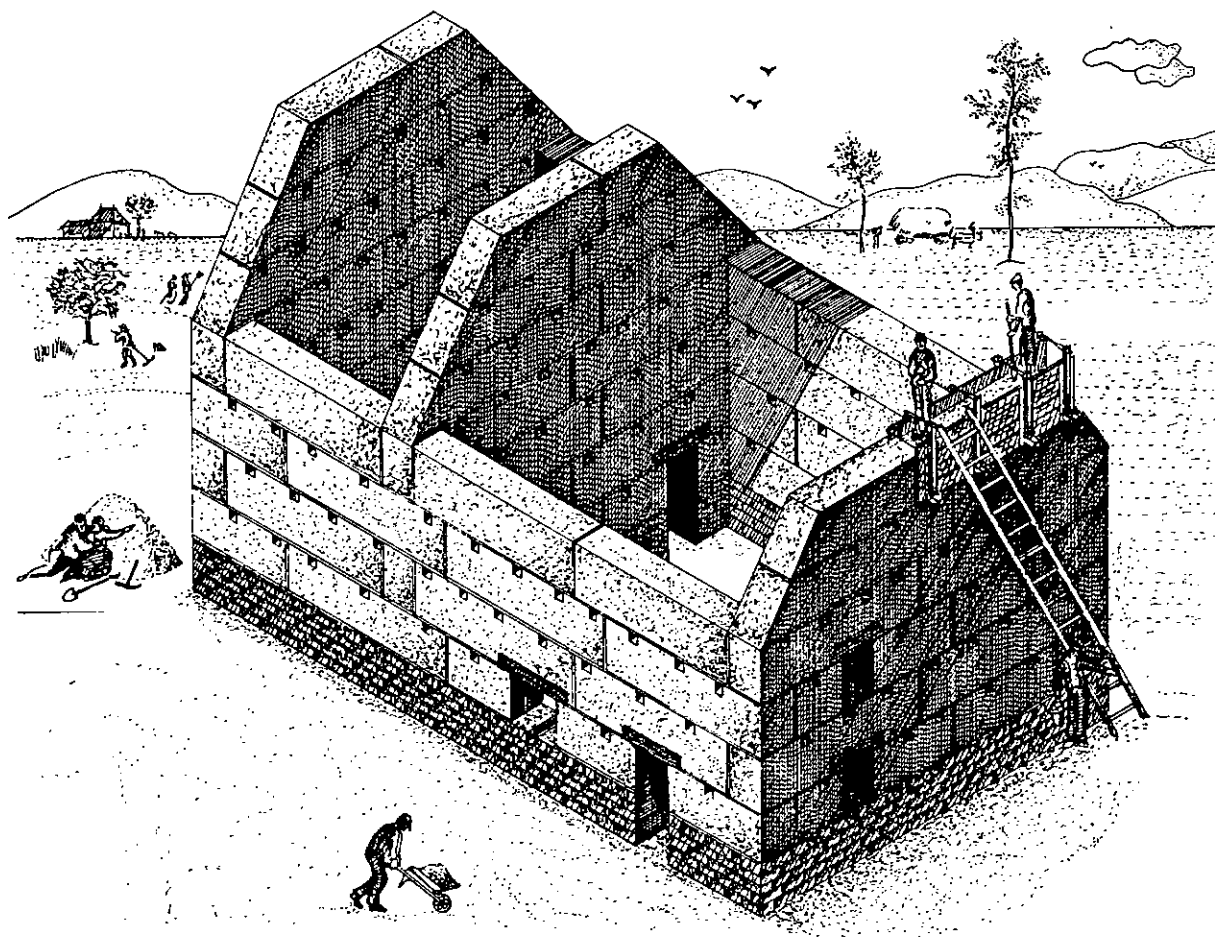


Figura II.4 - Vista do canteiro de execução de uma moradia tradicional em *pisé* (HOUBEN et alii, 1979).

No Brasil o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia desenvolveu um sistema construtivo com paredes monolíticas de solo estabilizado com cimento (CEPED, 1978; 1985; 1989), estudando sistemas de formas, metodologia para escolha dos solos, dosagem de misturas solo-cimento, além de um programa de ensaios avaliando o desempenho dos painéis, durabilidade e permeabilidade de pinturas, conforto térmico, influência da cura e da adição de óleos na resistência do solo cimento.

Sistemas de formas

A experiência tem demonstrado que o desempenho das formas é tão eficaz quanto menores e mais simples estas forem. Devem ser sólidas e estáveis, resistindo a pressões e vibrações resultantes do processo de compactação. Devem ser também fáceis de manusear, isto é, leves, de montagem prática, aprumada e impossibilitar a variação de dimensões, possuindo fixações que proporcionem rigidez a forma. Finalmente, o mais importante, é que devam ser capazes de acomodar mudanças na altura, comprimento e espessura das paredes. Vários materiais podem ser utilizados na confecção das formas, entre eles a madeira bruta, aparelhada ou compensado; alumínio; aço e fibra de vidro (UNCHS, 1985).

(a) **Formas deslizantes horizontais** (ver Figura II.5a), têm sido tradicionalmente adotadas na construção de paredes monolíticas. Este tipo de formas foi desenvolvido por artezãos e possui variações diversas. Empregam engates rápidos que seguem os princípios enunciados acima e as maiores vantagens são: a leveza, maneabilidade e versatilidade.

(b) **Formas deslizantes verticais** (ver Figura II.5b), foram idealmente adaptadas da construção de muros monolíticos destinados a cais de atracação. Facilitam e aceleram grandemente o levantamento da estrutura, porém as formas deve ser projetadas cuidadosamente. Os elementos verticais que sustentam os painéis das formas podem ser "formwork bottoms", pilaretes ou estruturas externas. O CEPED utiliza este sistema com frequência com guias externas ou embutidas nas paredes, estas últimas recuperáveis ou não (CEPED, 1985).

(c) **Forma horizontal integral** (ver Figura II.5c), é um conjunto de formas é deslocado verticalmente à medida que se termina a compactação de um nível de todas as paredes. O sucesso do sistema depende dos elementos do sistema serem leves e de rápida montagem e desmontagem. As principais deficiências se

verificam nas juntas entre os painéis, o alinhamento horizontal e a manutenção do prumo.

(d) **Forma vertical integral** (ver Figura II.5d), se empresta a construção de cais de atracação, a fim de facilitar a compactação, somente um lado da forma é completamente montado, o outro lado é levantada à medida que a parede é construída.

Deslocamento das formas

O deslocamento das formas constitui um problema sério para os operários quando estes estão trabalhando, por exemplo, a alturas de 7 m compactando paredes com 40 cm de espessura. Deve-se considerar a segurança do trabalhador como essencial. Como regra geral a leveza e maneabilidade ajudam a garantir a segurança. Têm se buscado meios de evitar a desmontagem e montagem totais das formas após o deslocamento.

(a) **Formas suspensas** (ver Figura II.6a) - esta técnica melhor se adapta a execução de muros de cais ou paredes. O sistema é leve, consistindo de tábuas, painéis compensados que são mantidos na posição através de suportes de madeira fixados ao terreno e contraventados no topo.

(b) **Formas com roletes** (ver Figura II.6b) - o sistema de formas móveis deslocando-se sobre rolos foi originalmente desenvolvido pelo australiano C.F. Middleton, em 1952. O sistema é adaptável à construção de muros retos porém requer formas estacionárias para saliências, cantos e divisórias internas.

(c) **Formas deslizantes** (ver Figura II.6c) - várias tentativas tem sido feitas no sentido de adaptar o sistema de formas deslizantes utilizado na moldagem de estruturas de concreto.

Formas para cantos

Na construção de paredes monolíticas a execução dos cantos requer a utilização de formas especiais. A mobilidade permitida às formas em trechos de paredes perpendiculares pode-se mostrar inadequada se a atenção dispensada aos cantos for insuficiente. Estas podem ser confeccionadas todas em pedaços ou alternadamente por superposição perpendicular das tábuas. A execução de cantos chanfrados reduz a erosão externa nestes. O sistema "T" empregado na união de paredes divisórias adota os mesmos princípios aplicados aos cantos. São

conhecidos diversos sistemas para a execução de cantos, entre eles podem ser citados:

- O pilares de canto;
- as formas não modulares;
- as formas modulares;
- sistema de canto integral;
- formas simétricas;
- formas variáveis;
- formas arredondadas.

Compactação manual

Diferentes tipos de soquetes são tradicionalmente utilizados na execução de paredes monolíticas e na sua escolha devem ser levados em conta alguns fatores:

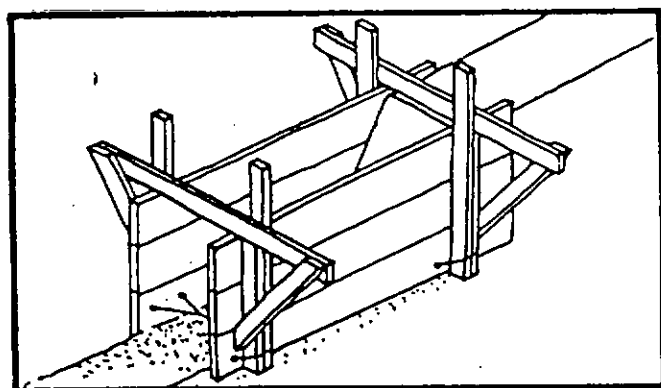
(i) O peso do soquete deve ser da ordem de 5 a 9 kgf, outro critério prescreve que a relação entre o peso do pilão e a área da seção do pilão deve variar entre 80 a 250 g/cm².

(ii) A área da seção do pilão deve se situar próximo a 64 cm² (8x8 cm) não devendo ultrapassar 225 cm² (15x15 cm).

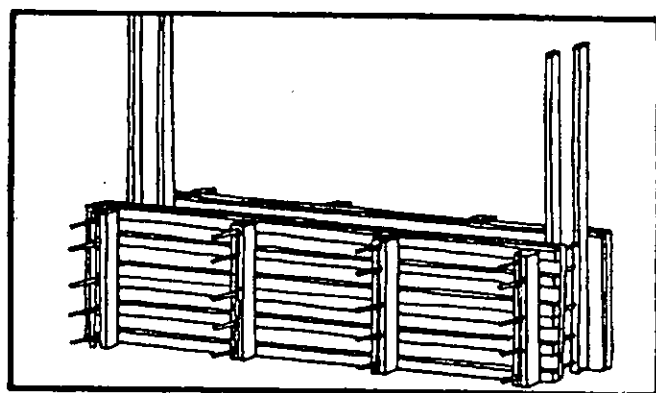
(iii) O cabo pode ser de madeira lisa, metal ou tubos metálicos (diâmetro de 4 cm) com comprimentos variando entre 1,50 e 1,80 m.

(iv) A cabeça dos soquetes é geralmente confeccionada em madeira ou metal. No caso das cabeças de madeira a superfície deve ser protegida com a fixação de um placa metálica afim de oferecer proteção contra o desgaste prematuro e o fendilhamento.

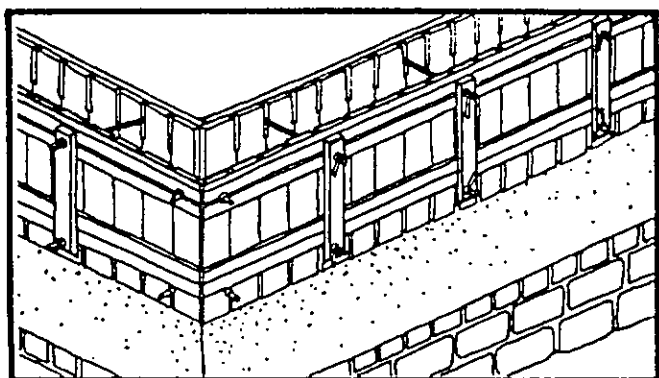
(v) Existem numerosas formas para a cabeça de soquetes, as com o corpo cilíndrico, prismático ou tronco-cônico com extremidades chatas, biseladas formando ângulos de 120° e 90° e as especiais para cantos.



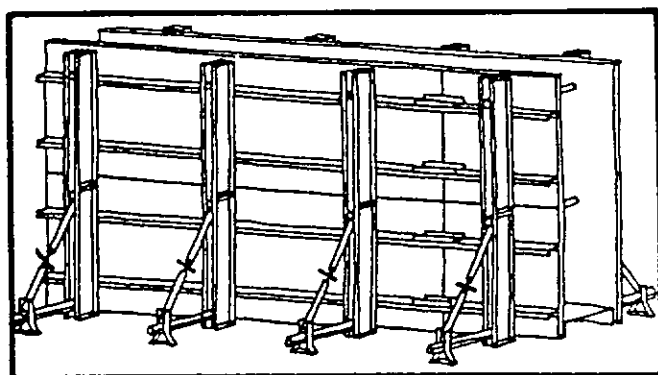
(a)



(b)



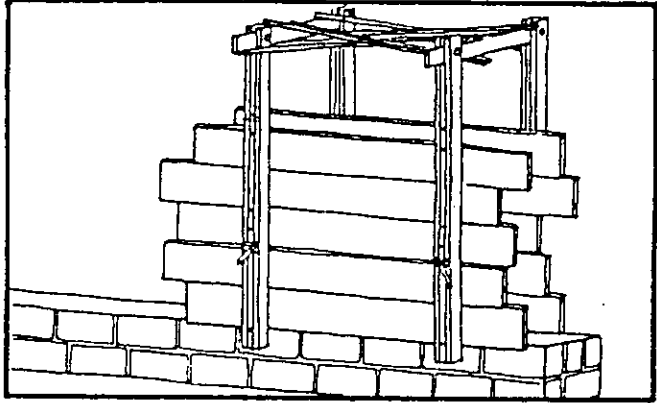
(c)



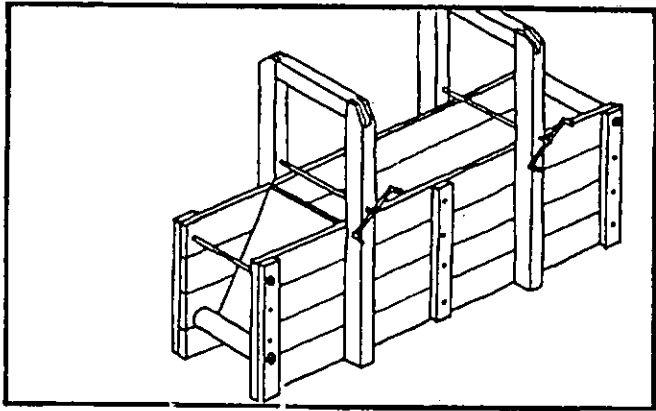
(d)

Figura II.5 - (a) Formas deslizantes horizontais; (b) Formas deslizantes verticais; (c) Forma horizontal integral e (d) Forma vertical integral (UNCHS, 1986).

(a)



(b)



(c)

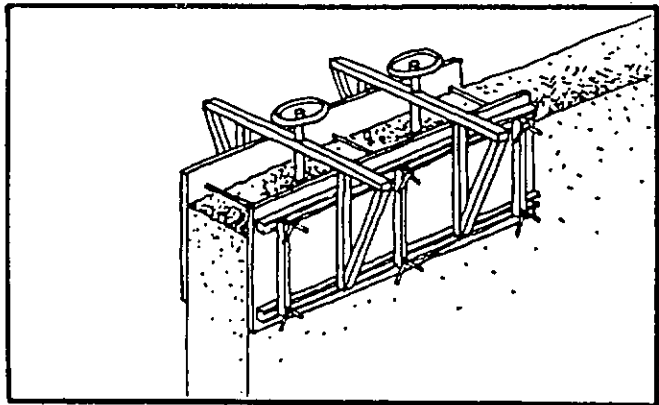


Figura II.6 - (a) Formas suspensas; (b) Formas com roletes; (c) Formas deslizantes (UNCHS, 1986).

Compactação mecânica

A compactação mecânica possui vantagens como maior rapidez, redução do esforço físico e notável uniformidade do peso específico seco quando comparada com a compactação manual.

Para uma escolha criteriosa dos equipamentos destinados a compactação de paredes monolíticas devem-se realizar ensaios práticos no canteiro afim de se estabelecer: o número ideal de passadas; a velocidade desejável de deslocamento do equipamento e a espessura da camada a ser compactada.

(a) O número de passadas (N)

Este número é dependente de características do equipamento e do solo. No gráfico da figura II.7a pode-se observar que no início da compactação existe uma correlação linear do número de passadas e o peso específico seco até se atingir um limite. Daí conclui-se que para um dado solo compactado com um determinado equipamento, acima de um certo número de passadas não se verifica nenhum acréscimo maior no peso específico aparente seco. Para se obter uma maior peso específico aparente deve-se recorrer a equipamentos de maior potência. A inclinação à direita corresponde ao número de passadas mínimo não podendo ser determinados a não ser experimentalmente.

(b) A velocidade de deslocamento do soquete (V)

Como pode ser notado no gráfico da Figura II.7b o número de passadas necessárias para se atingir um bom peso específico aparente seco, cresce com a velocidade de deslocamento do equipamento, porém qualquer que seja esta velocidade o peso específico fica quase constante com o aumento do número de passadas. É observado que o número de passadas não aumenta proporcionalmente com a velocidade, sobretudo se esta é pequena. A velocidade ideal deve ser pesquisada para cada caso particular de solo e equipamento.

(c) Capacidade horária (C)

A capacidade horária (C) é função da relação V / N_{\min} . Quanto maior for a relação V / N_{\min} , maior a capacidade horária.

(d) Gradiente de compacidade

É importante se determinar o gradiente de compacidade, traçando-se a curva de variação do peso específico seco com a profundidade do solo, compactado em determinado teor de umidade, desta forma pode-se obter a espessura máxima da camada de solo que se deseja compactar. Através do gráfico da Figura II.7c podem ser feitos os seguintes comentários:

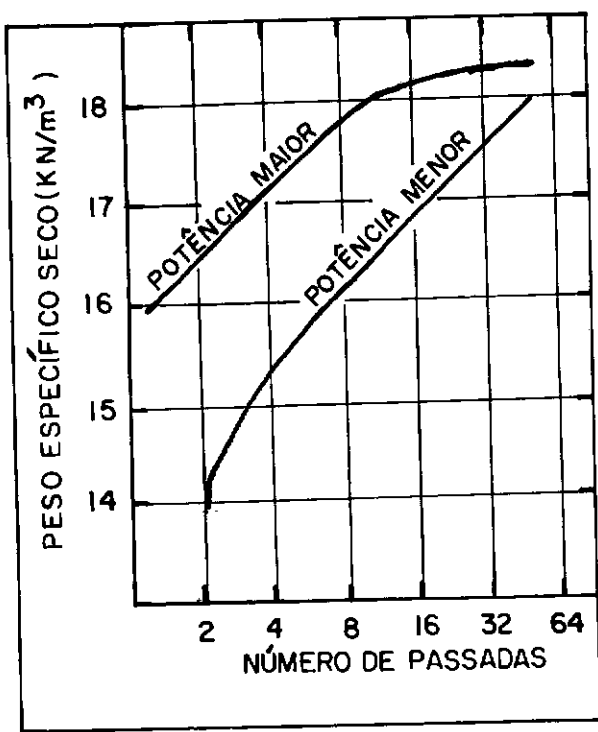
- caso o teor de umidade seja inferior ao teor ótimo o peso específico seco decresce quase que linearmente com a profundidade;
- caso o teor de umidade seja igual ou superior ao teor ótimo o peso específico seco fica constante (gradiente = 0) até uma determinada profundidade onde começa a decrescer linearmente;
- caso o teor de umidade seja muito superior ao teor ótimo, o peso específico seco será inferior ao peso específico máximo e permanecerá constante a grande profundidade.

Equipamentos para compactação

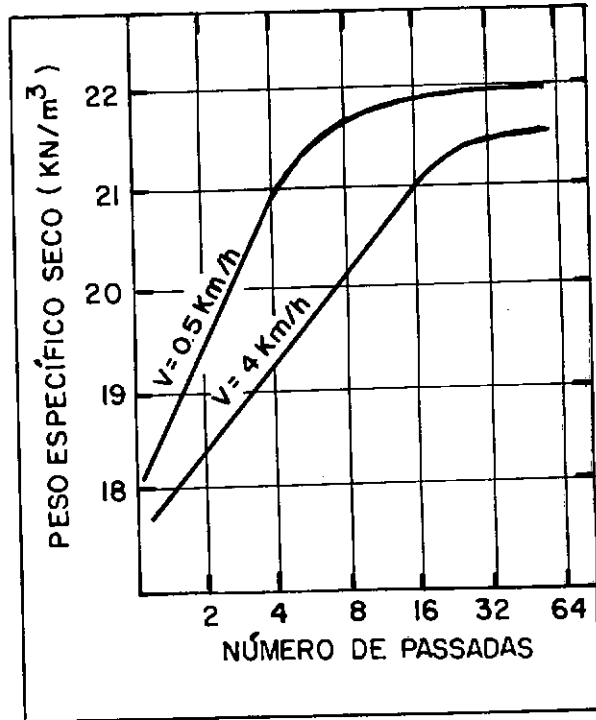
(a) Compactação por impacto

(i) **Soquetes pneumáticos:** estes equipamentos tem sido inspirados naqueles empregados nas fundições para compactar areia em moldes. O seu funcionamento imita um soquete manual, porém são capazes de gerar uma frequência de impactos muito grande (mais de 700 golpes por minuto). De todos os soquetes pneumáticos disponíveis no mercado, somente os soquetes destinados à compactação de solo dão resultados satisfatórios. Estes pilões não devem ser nem muito pesados (15 kgf no máximo) e nem muito potentes, pois neste caso podem vir a gerar deformações nas formas formando barrigas ou, então penetrar no solo no momento da compactação. Devem possuir um pistão com curso longo (aproximadamente 20 cm) e possibilitar a regulagem da pressão de ar. Esta pressão deve atingir no mínimo 500 kN/m^2 .

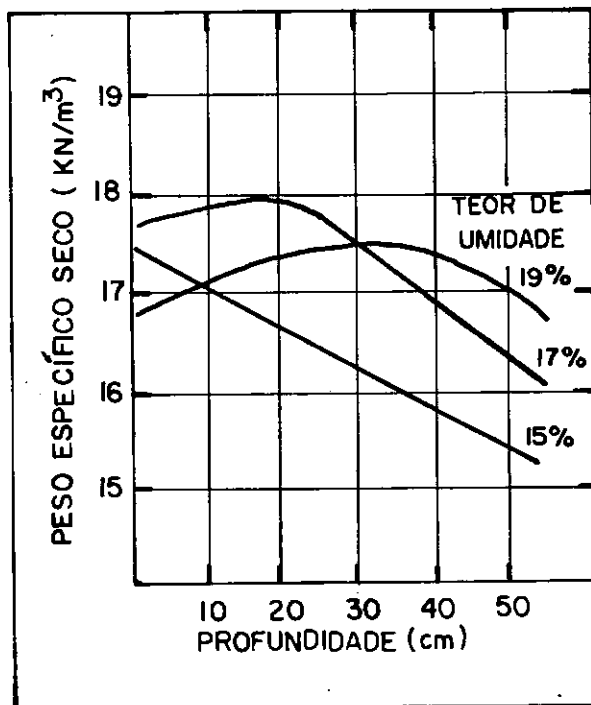
(ii) **Marteletes pneumáticos:** tem se tentado transformar os marteletes equipando-os com placas especiais. Estes equipamentos, entretanto, são de alta potência podendo gerar vibrações ressonantes com as paredes causando fissuras ao material.



(a)



(b)



(c)

Figura II.7 - (a) Número de passadas (N); (b) Velocidade de deslocamento do soquete (V) e (c) Gradiente de compactação (HOUBEN et alii, 1979).

(b) Compactação por vibração

(i) Placas vibratórias: este equipamento é composto por um motor elétrico ou a explosão dotado de uma massa excêntrica que transmite vibrações à uma placa deslocando-a. Uma chave permite ao operador selecionar o sentido do movimento, e assim o equipamento funciona automaticamente. A relação entre o peso do equipamento, a velocidade de deslocamento e a frequência de vibração são parâmetros difíceis de ajustar.

(ii) Soquetes vibratórios: versões destes equipamentos, funcionando com motores elétricos ou à explosão, encontram-se disponíveis no mercado, porém são pesados, de difícil manejo e caros. Seu desempenho tem sido objeto de numerosos ensaios mas os resultados têm sido modestos.

Características das paredes monolíticas

Como já foi mencionado o CEPED (1985) desenvolveu uma técnica construtiva baseada na execução por compactação manual em um sistema de formas deslizantes de paredes monolíticas de solo-cimento. Afim de se avaliar o desempenho destes componentes foi empreendido um extenso programa de ensaios em painéis monolíticos de solo cimento com diversas espessuras (9,5; 11,5; 15 e 20 cm) e em painéis de tijolos e blocos cerâmicos, todos com 1,50m de altura por 1,50m de largura. Os ensaios de resistência basearam-se na norma ASTM E 72-74, "Standards Methods of Strength of Panels for Building Construction" (*). Já os ensaios de choque brando, choque duro e carga excêntrica basearam-se nas metodologias e critérios prescritos pelo Instituto Nacional da Tecnologia Industrial da Argentina (INTI): "Recomendaciones sobre las especificaciones que deben cumplir los elementos de cerramiento exterior y divisorios de interiores no portantes". Todos os painéis foram confeccionados com percentagens de cimento de 4; 4,5 e 5 % em peso de solo.

(a) Ensaios de resistência

Neste ensaio os painéis de solo-cimento ou alvenaria são colocados em um pórtico onde dois macacos hidráulicos que aplicam simultaneamente a mesma carga que é distribuída no topo do painel através de um perfil metálico, este

transmite a carga ao longo de uma linha paralela às faces do painel, ficando esta linha de carga a 1/3 da espessura do painel, conferindo, assim, uma excentricidade igual a 1/6. Através de extensômetros e deflectômetros são medidas, respectivamente, as deformações axiais e as deflexões laterais do painel. O gráfico da Figura II.8 apresenta a variação das tensões de ruptura em painéis monolíticos com o teor de cimento e, também, faz a comparação com os resultados obtidos em painéis de alvenaria de tijolos e blocos cerâmicos, ambos com espessuras próximas a 10 cm.

A partir destes resultados pode-se concluir que os painéis de solo-cimento possuem uma faixa de resistência muito ampla, dependendo da percentagem de cimento utilizada. Comparando-se a resistência dos painéis com a resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos foi estabelecido um critério racional de resistência mínima de 0,1 MPa, aos 28 dias de idade, para a dosagem do solo-cimento aplicado a paredes monolíticas. Foi obtida por extrapolação de resultados uma correlação igual a 0,20 ($R_{\text{painel}} / R_{\text{cp}}$) entre a resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos e paredes com 2,40 m de altura e 10 cm de espessura. Como dado genérico, a dosagem em volume de 1:15 de cimento e solo (8 % em peso) foi considerada razoável, desde que o solo atenda aos critérios de escolha do solo adotados pelo CEPED (1985).

(b) Ensaio de choque brando

Neste ensaio o painel é fixado a uma estrutura, de tal forma que seu topo e base comportem-se como simplesmente apoiados. Uma bolsa de couro cilíndrica, cheia de areia, com 25 cm de diâmetro, pesando 30 kgf é suspensa por um cabo de 2 m, de forma que seu centro de gravidade coincida no momento do impacto com o ponto desejado no painel (por exemplo com as juntas horizontais). A bolsa é deixada cair sem velocidade inicial, descrevendo um movimento pendular, a partir de alturas crescentes de 20 em 20 cm, medidas acima de sua posição de repouso.

(*) A ABNT já publicou a NBR 8949 em junho de 1985: "Paredes de alvenaria estrutural ensaio à compressão simples".

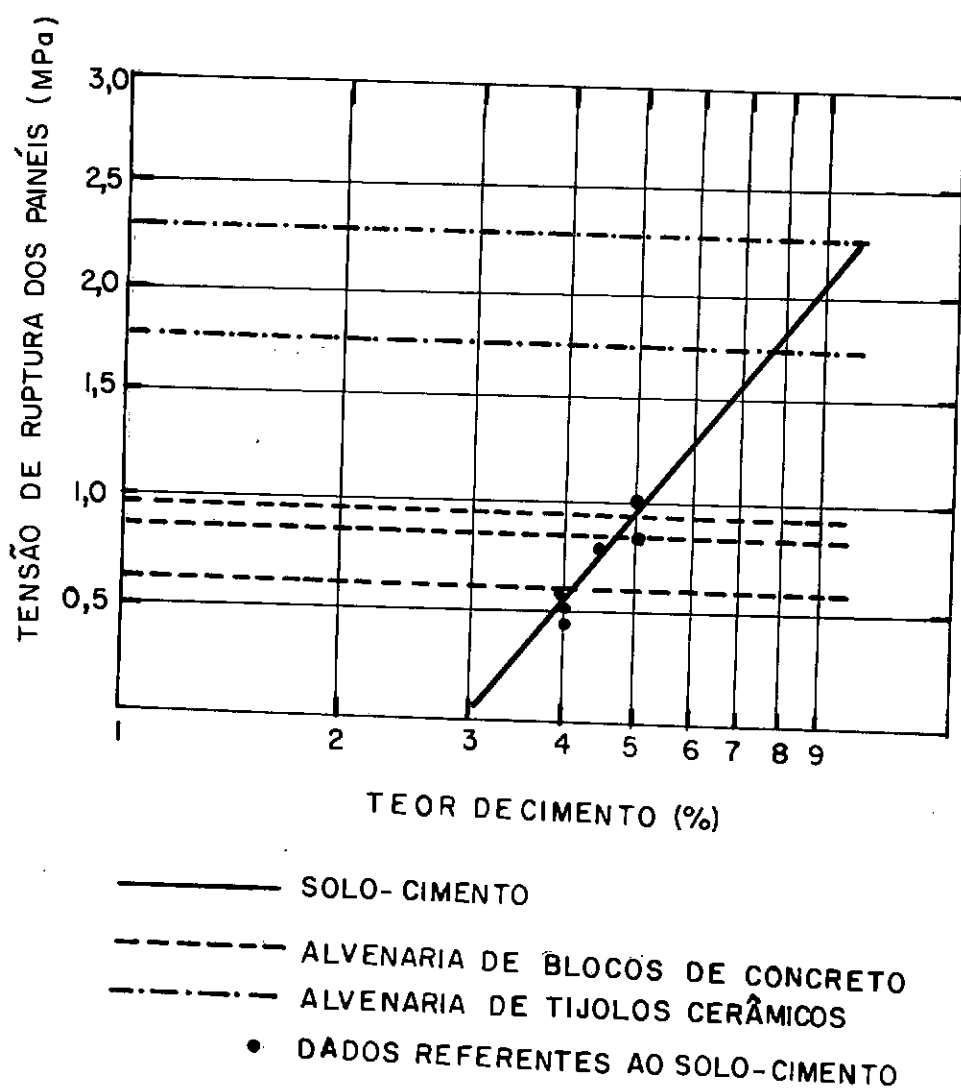


Figura II.8 - Variações das tensões de ruptura em painéis monolíticos com o teor de cimento (CEPED, 1985).

Quanto às deformações, todos os painéis satisfizeram os critérios do INTI, porém, quanto a resistência mecânica, os painéis de solo-cimento com espessuras inferiores a 20 cm (com exceção à um painel de 15 cm executado com 4,5 % de cimento) não satisfizeram aos critérios, considerando sua utilização como painéis externos. Nos painéis de alvenaria com as mesmas espessuras esses critérios também não foram satisfeitos. Nestes ensaios verificou-se que o procedimento para a execução das juntas horizontais foi satisfatório e que a espessura do painel tem grande influência na resistência ao choque brando (CEPED, 1985).

(c) Ensaios de choque duro

Neste ensaio o painel é fixado à mesma estrutura usada no choque brando. O choque duro é simulado por um esfera de aço pesando 0,5 kgf, tal qual o choque brando, a esfera é deixada cair de alturas progressivamente crescentes de 25 em 25 cm. Nos painéis de solo-cimento impôs-se o ponto de impacto situado na linha das juntas do painel.

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que as paredes de solo-cimento são resistentes a choques duros, independentemente dos teores de cimento utilizados e que as espessuras das paredes de solo-cimento ou alvenaria, não tem qualquer influência na resistência a choques duros (CEPED, 1985).

(d) Ensaios de carga excêntrica

Este ensaios tentaram simular os esforços causados por algum móvel ou objeto suspensos nas paredes, transmitindo-lhes esforços paralelos e normais ao seu plano. Consiste em aplicar uma carga de 100 kgf, mantida por 24 horas, paralela à superfície do painel, situada a 30 cm deste e transmitida ao mesmo por meio de duas mísulas separadas entre si de 50 cm, cada mísula é fixada ao painel por intermédio de parafusos distantes entre si de 15 cm na direção vertical.

Os painéis de solo-cimento, assim como os de alvenaria, satisfizeram aos requisitos do INTI (CEPED, 1985).

II.3.2 Adobes

O adobe na antiguidade

Esta técnica construtiva é precedida pela produção de adobes, que são blocos maciços de solo moldados, no estado plástico ou líquido sem compactação, simplesmente pelas mãos ou em formas apoiadas em superfícies planas, procedendo-se a imediata desmoldagem e posterior endurecimento por secagem ao sol.

Os blocos de adobe utilizados a milhares de anos são, certamente, um dos primeiros materiais de construção elaborados pelo homem. O adobe nem sempre se apresentou com a forma paralelepípedica, os primeiros blocos eram massas arredondadas de solo argiloso moldados simplesmente pelas mãos dos artífices, deixados secar ao ar e endurecidos pelo calor do sol. No Peru na época "cupinisque" (1.000 a.C.) os adobes eram manufaturados com a forma cônica, este tipo de adobe foi empregado, por exemplo, na pirâmide de Moxeque. A forma de pera, de uso freqüente na África Ocidental, é utilizada na construção de habitações há mais de 5.000 anos.

Na Babilônia (atual Iraque) as construções empregavam dois tipos de adobes: os estabilizados com palha picada e endurecidos ao sol, conhecidos como adobes crus, possuíam forma quadrada com 20 a 40 cm de lado (mais comum 31,5 cm) e 5 a 10 cm de altura; e adobes de dimensões menores que eram calcinados melhorando, assim, o seu desempenho quando submetidos a ação prolongada da água.

Na Caldéia (atual sul do Iraque), o asfalto, estabilizante natural, característico desta região, era amplamente utilizado nas construções.

Na Grécia os edifícios públicos, assim como os privados, foram em diferentes épocas erigidos com adobes, que representavam "a marca do homem civilizado". As muralhas e prédios militares eram erguidos com adobes e recobertos com paramentos de pedra. As muralhas que cercam Corinto, os templos de Zeus e Heráclito em Patras são exemplos de construções com adobe. Vitruvius (século I a.C.) cita que as muralhas de Atenas, o templo de Cresus em Sardes, ele distingue três tipos de adobe: "Lydienne", retangulares ; o "Pentadorun", utilizado nos edifícios públicos, medindo 45x45x8 cm e o "Tetradorun", empregado nas construções privadas, medindo 30x30x10 cm.

No Egito nos muros de "Tombeaux "está gravada uma cena onde a rainha Hatchpsout (1490-1469 a.C.) prepara um bloco de adobe, mostrando que o moldes utilizados não são tão diferentes dos utilizados em nossos dias. Inúmeras citações bíblicas se referem-se a manufatura de adobes, referindo-se inclusive a utilização da palha.

O solo

O solo destinado a manufatura dos adobes deve ter um textura argilosa ou siltosa, apresentar coesão, podendo ser utilizado nas consistências plástica ou fluida.

Estabilização

As fibras vegetais ou animais são freqüentemente adicionadas ao solo. No Peru emprega-se uma gramínea conhecida como "ichu-Fesuca"; em Trinidad utiliza-se uma fibra vegetal bastante resistente o "Sporobulus Indicus"; na África a palha de milho; no Irã a palha de arroz, folhas de palmeiras e pelos de cabra; no México agulhas de pinheiro. As fibras representam 20 a 30 % do volume dos adobes em peso (30 g para um adobe de 23x11x7 cm). Na Austrália 56 a 67 kgf de palha são usados para fabricar 1.000 adobes de 45x30x10 cm (4 a 5 kgf/m³). Na construção de algumas vilas no Egito empregou-se 20 kgf de palha para produzir 660 adobes de 23x17x7 cm (11 kgf/m³). Nos EUA pesquisas avaliam o grau de deterioração das fibras nos adobes. Uma investigação em adobes com mais de cem anos continham fibras secas e intactas podendo-se até determinar a espécie ao qual pertenciam.

As plantas são cortadas empregando ferramentas com lâminas, entretanto picadores de fibras manuais ou mecânicos, disponíveis comercialmente, são capazes de cortar grandes quantidades de palha ou outras fibras em comprimentos que variam entre 1 e 30 cm.

Afora as fibras, estabilizantes convencionais como o cimento, a cal e o asfalto (emulsões) costumam ser utilizados na estabilização de adobes (HOUBEN et alii, 1979).

Amassamento

A preparação do solo implica em uma longa operação de amassamento. Em algumas regiões homens ou animais pisoteiam o solo destinado a confeccionar os adobes. O material pode ser amassado na própria jazida utilizando-se os próprios equipamento de escavação.

Mistura

Diversos tipos de misturadores podem ser utilizados:

- **Misturadores verticais**, artesanais movidos à força animal, ou mecânicos (produção $10 \text{ m}^3/\text{dia}$);
- **misturadores de argamassa**, utilizados para o solo no estado fluido, produção $8 \text{ m}^3/\text{dia}$;
- **misturadores lineares**, podem ser de eixo simples ou duplo, fluxo contínuo ou descontínuo, utilizam o solo bem plástico; os de pequeno porte são capazes de produzir de 4 a $5 \text{ m}^3/\text{dia}$, os de grande porte (adaptados da indústria cerâmica) atingem produções de $50 \text{ m}^3/\text{dia}$;
- **misturadores de concreto (betoneiras)**, apesar da vasta disponibilidade de modelos no mercado este tipo possui produção baixa, freqüentemente produz misturas com pouca homogeneidade, pois a mistura adere às paredes internas e sobram torrões na mistura resultante;
- **misturadores com parafusos**, misturam pequenas quantidades de solo no estado fluido em tambores, é possível preparar 50 litros de mistura em dez minutos;
- **misturadores planetários**, ideais para a mistura de solo no estado fluido e quando se adicionam fibras vegetais; os de menor porte possuem uma capacidade de 100 litros e chegam a produzir $10 \text{ m}^3/\text{dia}$.

Produção manual em pequena escala

Como já foi referido anteriormente, as formas mais primitivas de manufatura de adobes não utilizam moldes, entretanto estes não apresentam boa aparência e as paredes com eles construídas não apresentam muita solidez.

As técnicas que se consagraram recomendam a utilização de moldes prismáticos de madeira, aço ou fibra de vidro. Quando de madeira os cantos podem

ser reforçados e a superfície interna pode ser revestida com fórmica, afim de evitar a aderência do solo ao molde durante a desmoldagem e, também, proporcionando melhor aspecto visual aos blocos.

A dimensão dos adobes é bastante variável e depende, sobretudo, dos costumes regionais. Os adobes pequenos são fáceis de manipular e demandam o trabalho de um só homem na fabricação, contudo a elevação das paredes é mais demorada consumindo mais argamassa. Ao contrário, as alvenarias executadas com adobes com dimensões maiores são mais fáceis de executar, constituem paredes mais sólidas. Porém necessitam maior período de secagem e apresentam maiores riscos de fissuras por retração hidráulica.

O tipo mais comum de molde possui um único compartimento que nos adobes mais pesados chega a 60 cm de comprimento. A Figura II.9 mostra exemplos de moldes com compartimento único e com múltiplos compartimentos.

Duas técnicas são utilizadas na produção manual de adobes:

- A primeira, conhecida como "slop-moulding", o solo no estado plástico é colocado em um molde que deve estar previamente limpo e umedecido, e ligeiramente trabalhado com as mãos e, em seguida, removido do molde, para a secagem.

- a segunda, conhecida por "moldagem com areia", o molde após uma boa limpeza deve ser mergulhado em água e, em seguida, alpicado com areia. Molda-se uma bola com solo no estado semi-sólido, rola-se a bola na areia. A bola é, então, lançada com força no molde e com os punhos das mãos é conformada à nova geometria, principalmente nas arestas, o excesso é raspado com uma régua de madeira ou metal. Feito isto, retira-se o molde, caso este não tenha fundo ou, se tiver fundo vira-se o molde na área destinada a secagem.

Em ambas as técnicas a área de estocagem do solo deve estar próxima da área de moldagem e deve-se dispor de muitos moldes. É aconselhável que se trabalhe sobre bancadas. Na antiga República Democrática Alemã foi desenvolvida uma bancada equipada com um molde e um sistema mecânico de extração dos adobes, estes são transportados até a área de secagem em pequenas placas de madeira que constituem o fundo do molde (Houben et alii, 1979). Estas técnicas possibilitam uma produção de 500 adobes/dia.

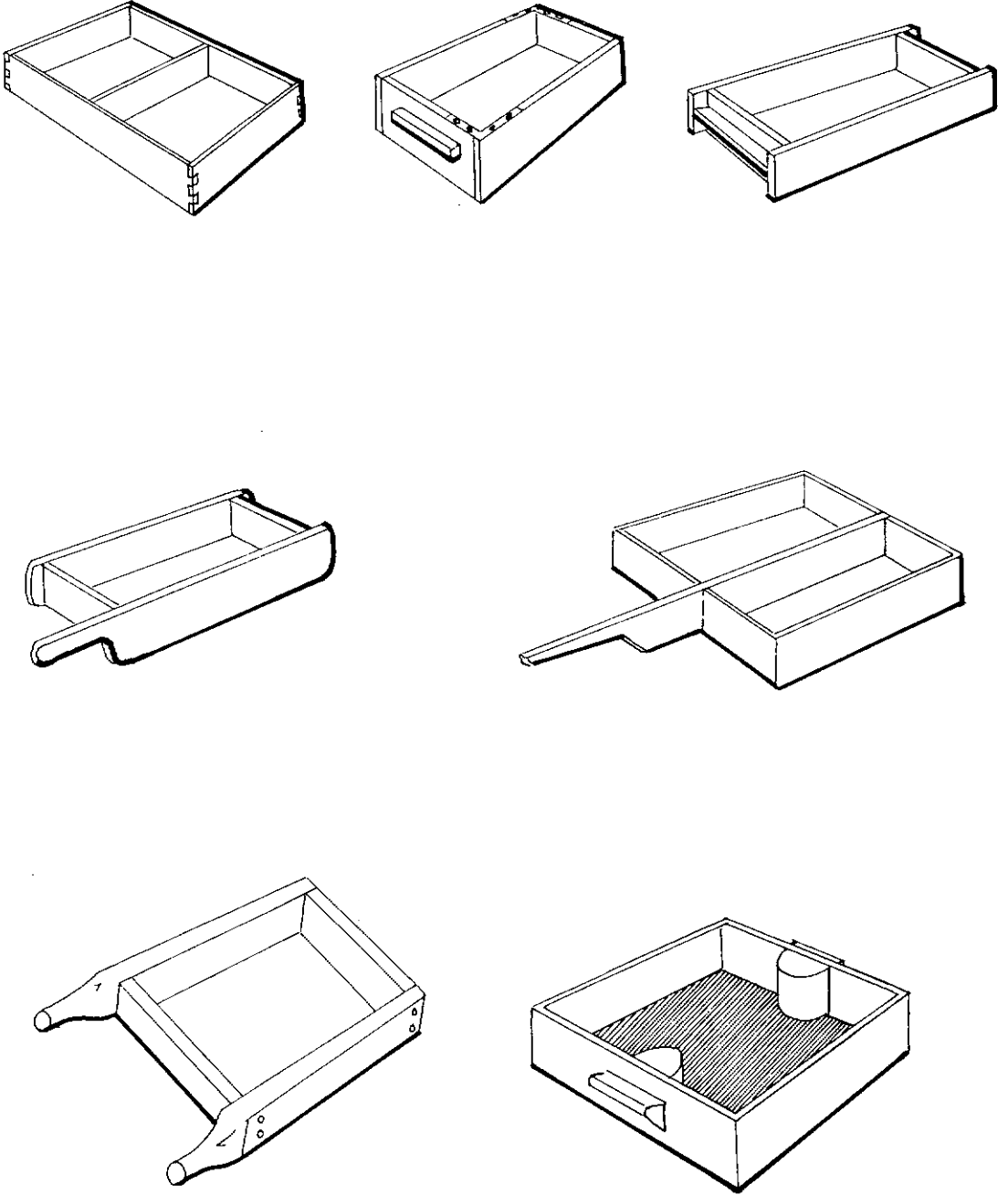


Figura II.9 - Formas para moldagem de adobes (HOUBEN et alii, 1979)

Produção manual em larga escala

(a) Moldes múltiplos

Estes moldes podem ter arranjos que se assemelham a uma escada, justapondo-se os compartimentos para cada adobe (ver Figura II.10 a) ou arranjos na forma de grelha (ver Figura II.10 b), devem ser de madeira ou fibra de vidro para serem leves possibilitando, assim, a manipulação por não mais que dois trabalhadores. Desta forma 10 a 25 adobes podem ser produzidos de uma só vez. O solo utilizado deve ter consistência fluida, para possibilitar o preenchimento, por inteiro de todos os compartimentos do molde. A preparação prévia do solo é idêntica a dos outros modos de produção de adobes. O solo é lançado no molde através de carrinhos-de-mão, gericas, pá-carregadeiras ou diretamente do misturador que neste caso pode ser motorizado, rebocado ou montado na carroceria de um caminhão. Um raspador nivela e distribui o solo no interior dos moldes, inclusive nos cantos. Os adobes podem permanecer algum tempo no interior dos moldes mas, geralmente, são desmoldados imediatamente. Todas as operações são repetidas sem interrupção. Grandes moldes podem ser limpos mergulhando-os em tanques com água ou lavando-se com jatos d'água sob pressão. A qualidade dos adobes é garantida pela boa limpeza dos moldes e pela boa execução da etapa de moldagem. Uma equipe formada por 5 ou 6 trabalhadores é capaz de produzir 8.000 a 10.000 adobes/dia.

(b) Adobes serrados

Com quatro tábuas de 2m de comprimento formando um quadrado obtém-se um molde onde o solo com consistência fluida pode ser lançado de forma análoga a anteriormente descrita. A placa de adobe moldada pode, então, ser cortada em pequenos adobes empregando-se um arame esticado em um suporte de madeira ou, também, usando uma tábua com borda biselada. A produtividade desta técnica é similar à descrita anteriormente, requerendo apenas um modesto volume de investimentos e uma área de moldagem absolutamente plana. O acabamento obtido nos adobes não é muito bom.

Produção mecanizada

(a) Caixas de moldagem

Nos EUA (Califórnia e Novo México) um molde metálico contendo grande número de compartimentos (chegando a 50) é montado numa estrutura sobre rodas. O solo de consistência fluida é lançado, preenchendo todos os compartimentos. Em seguida o molde é suspenso através de um mecanismo acionado por uma alavanca, depositando os adobes no solo. Empurrando-se a caixa de moldagem para o próximo ponto de moldagem, repetem-se as operações anteriores. Antes, porém, a caixa de moldagem deve ser capaz de permitir sua limpeza quando desejado. Um silo móvel pode ser acoplado ao sistema, posicionando-se acima do molde e lançando o solo fluido basculando-se uma caçamba. O excesso é removido por um raspador fixado ao silo. A produção regular deste sistema é da ordem de 7.000 a 10.000 adobes/dia.

Este sistema foi aperfeiçoado pela Hans Sumph Company que desenvolveu uma caixa de moldagem automática projetada como uma unidade independente para operar em usinas de grande porte. Nestas usinas o solo é extraído, peneirado e amassado mecanicamente. A mistura do solo, água e asfalto é feita em um misturador horizontal e transportada até a caixa de moldagem por um trator provido de uma pequena caçamba basculante. Após a moldagem os adobes são depositados em um papel impermeável que é desenrolado por sobre o terreno, evitando a aderência dos adobes e facilitando a limpeza após a secagem. Este tipo de produção exige um investimento inicial considerável em áreas de secagem e estocagem para uma produção de muitos meses. A produção nestas usinas pode alcançar 20.000 adobes por dia (UNCHS, 1986).

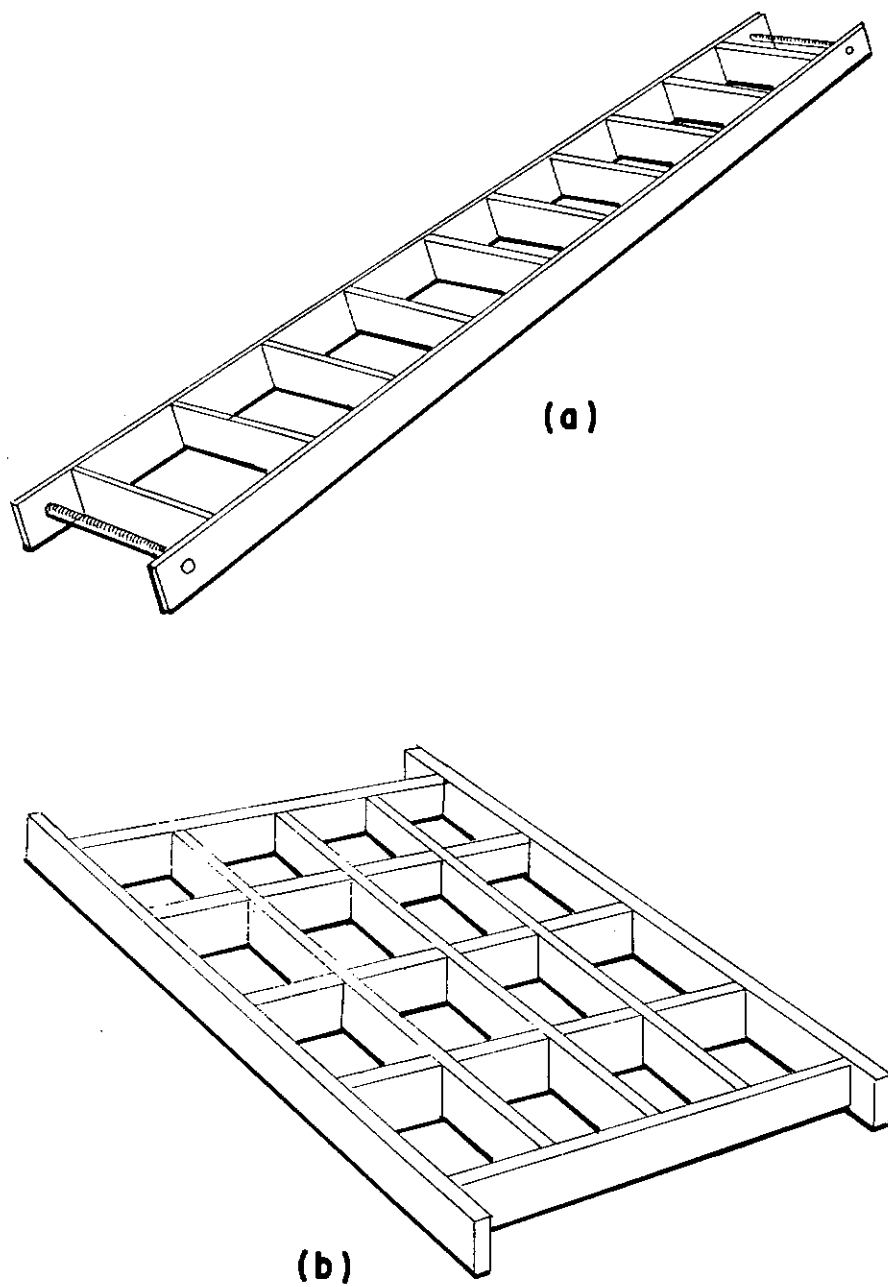


Figura II.10 - (a) Moldes múltiplos em arranjo de escada; (b) Moldes múltiplos em arranjo de grelha (HOUBEN et alii, 1979).

(b) Caixas com discos de corte

O corte utilizando um arame esticado pode ser automatizado se o fio de corte for substituído por um disco de corte. Um silo conjugado a uma caçamba despeja no solo uma camada contínua de solo mole que é cortado em tiras estreitas por um conjunto de discos de corte. A máquina cessa o corte longitudinal a uma distância fixa do ponto de início do corte e inicia o corte transversal das tiras através de outro conjunto de discos de corte. A superfície de produção deve ser bem plana e limpa e a mistura deve ser bastante homogênea. A produção é bastante alta, atingindo 15.000 adobes/dia.

(c) Extrusoras

A extrusão de adobes abre amplas e muito atrativas possibilidades. Três processos de extrusão podem ser adaptados à produção de adobes:

(i) Extrusoras verticais

Este equipamento consiste de um misturador vertical provido de um bico de extrusão. Este sistema pode ser motorizado ou utilizar a tração animal. O processo, embora apresentando bons resultados, é raramente empregado em nossos dias. Com um pequeno misturador, pesando 500 kgf, pode-se atingir uma produção de 1.500 adobes/dia.

(ii) Extrusoras horizontais

Adaptados da indústria cerâmica, estes equipamentos foram amplamente usados nos EUA nos anos 40 e ainda são comuns na Índia. Embora envolva um pesado investimento inicial, são muito eficientes e capazes de alcançar os mesmos níveis de produção obtidos na indústria de blocos e tijolos cerâmicos. Contudo, os solos empregados na fabricação de adobes são mais arenosos que os empregados na indústria cerâmica, conseqüentemente são mais abrasivos, e um grau significativo de desgaste é notado no equipamento.

(iii) Extrusoras móveis

Montados em estruturas sobre rodas, encontram-se comercialmente disponíveis atualmente. São equipamentos pesados, aproximadamente 30t, combinam um misturador e uma extrusora e uma unidade geradora. Algumas unidades encontram-se em operação em várias partes do mundo produzindo tijolos cerâmicos. Podem ser adaptadas para a produção de adobes. A produção deste sistema varia entre 2.500 e 3.000 tijolos/hora.

Secagem e estocagem

Após a moldagem deixa-se os adobes secar ao sol por no mínimo três dias numa área de secagem própria, nivelada e recoberta com uma fina camada de areia, suficiente para comportar a produção de quatro dias. Com o intuito de acelerar o processo de secagem deve-se virar os adobes e deixa-los secar por mais 3 a 5 dias. Afim de evitar a fissuração deve-se mante-los à sombra nos dois primeiros dias (período de retração hidráulica do adobe). Os adobes devem ser protegidos da chuvas, para adobes estabilizados é suficiente que se protejam nos quatro primeiros dias após a moldagem.

Preve-se de três semanas a um mês o tempo para uma secagem completa dos adobes. As perdas, habitualmente, não ultrapassam 5 % do total da produção. No caso de excesso de perdas os adobes devem permanecer mais tempo na área de secagem ou verificar se o terreno não contém irregularidades e, eventualmente, aumentar a espessura da camada de areia.

II.3.3 Tijolos e blocos de solo prensado

Antes de iniciar a descrição dos processos de fabricação de tijolos e blocos de solo natural e solo estabilizado, faz-se importante transcrever algumas definições empregadas correntemente neste trabalho e constantes das normas brasileiras para elementos cerâmicos, elementos de concreto simples e solo-cimento.

Material (NBR 8798, 1985) - Constituinte dos elementos da obra.

Elemento (NBR 8798, 1985) - Parte elementar da obra, constituída de material natural ou de fabricação industrial.

Componente (NBR 8798, 1985) - Parte da obra suficientemente elaborada, constituída da reunião de elementos ou materiais.

Tijolo maciço (NBR 7170, 1983) - Tijolo (elemento) que possui as faces plenas de material, podendo apresentar rebaixos de fabricação em uma das faces de maior área.

Bloco (NBR 7171, 1983) - Elemento de alvenaria que possui furos prismáticos e/ou cilíndricos perpendiculares às faces que os contém.

Bloco vazado (NBR 6136, 1980) - Elemento de alvenaria cuja seção transversal média útil é inferior a 75 % da seção transversal bruta.

Bloco cerâmico de vedação (NBR 7171, 1983) - São projetados para serem assentados com os furos na horizontal. Podem ser comuns e especiais.

Bloco cerâmico portante (NBR 7171, 1983) - São projetados para serem assentados com os furos na vertical. Podem ser classificados em comuns e especiais.

Alvenaria estrutural não armada ou autoportante (TAUIL et alii, 1990) - Elementos estruturais compostos pela união de elementos de alvenaria e argamassa, contendo armadura de amarração; não sendo esta considerada na absorção dos esforços calculados.

Alvenaria estrutural armada (TAUIL et alii, 1990) - Elementos estruturais compostos pela união de elementos de alvenaria, argamassa e armadura praticamente dimensionada para resistir aos esforços a que estará submetida a alvenaria, além das armaduras com finalidade construtiva.

No Brasil as indústrias de elementos de alvenaria oferece uma grande variedade de produtos, além de produzir tijolos e blocos destinados a alvenarias de vedação das estruturas reticuladas de concreto armado. Os fabricantes passaram, primeiramente, a produzir blocos vazados de concreto simples destinados à construção de prédios em alvenaria autoportante e em alvenaria estrutural armada, e hoje a indústria cerâmica oferece, também, tijolos e blocos destinados a estas

técnicas de construção. A alvenaria voltou a ser empregada como componente estrutural nas edificações, o quadro da Figura II.11 apresenta um resumo dos elementos de alvenaria mais usados pelos construtores no Brasil. Os tijolos e blocos de solo-cimento, apesar de já normalizados pela ABNT não constam do quadro original (MEDEIROS, 1992), este fato presumível porque estes elementos não pertencem ao mercado formal. Contudo, procurou-se acrescentar a descrição e características destes elementos, constantes das normas da ABNT.

Elementos de alvenaria	Dimensões mais utilizadas (em cm) L x M x C	Classes de resistência a compressão segundo a norma (MPa)
Blocos de concreto estrutural (NBR 6136)	19 x 19 x 39 14 x 19 x 39	fbk \geq 4,5 fbk \geq 6,0
Blocos de concreto de vedação (NBR 7173)	19 x 19 x 39 14 x 19 x 39 11,6 x 19 x 39 9 x 19 x 39	fi \geq 2,0 fm \geq 2,5
Bloco cerâmico estrutural vazado - Portante (NBR 7171)	19 x 19 x 39 14 x 19 x 39 11,5 x 19 x 39 9 x 19 x 39 14 x 19 x 29	fi \geq 4,0 fi \geq 7,0
Bloco cerâmico estrutural vazado - autoportante (NBR 7171)	11,5 x 5,5 x 24	fi \geq 10,0
Tijolo cerâmico laminado (NBR 7171)	11,5 x 11,3 x 24,0 14 x 11,3 x 24,0	fi \geq 10,0

Bloco cerâmico de vedação (NBR 7171)	14 x 19 x 33 11,5 x 19 x 33 9 x 19 x 33 14 x 19 x 29 19 x 19 x 19 14 x 19 x 19 14 x 19 x 19 9 x 19 x 19	$f_i \geq 1,5$ $f_i \geq 2,5$
Bloco silicocalcáreo (DIN 106)	17,5 x 11,3 24,0 14,0 x 11,3 24,0 11,5 x 11,3 24,0 19 x 19 x 39 14 x 19 x 39 9 x 19 x 39	$f_m \geq 7,5$ $f_m \geq 15$
Bloco de concreto celular autoclavado (DIN 4165)	10 x 30 x 60 12,5 x 30 x 60 15 x 30 x 60 20 x 30 x 60	$f_m \geq 2,5$; $f_i \geq 2,0$ $f_m \geq 5,0$; $f_i \geq 4,0$
Tijolo cerâmico (NBR 7170)	11 x 5,5 x 22	$f_i \geq 1,5$ $f_i \geq 2,5$ $f_i \geq 4,0$
Tijolo maciço de solo-cimento (NBR 8491)	20 x 5 x 9,5 23 x 5 x 11	$f_m \geq 2,0$ $f_i \geq 1,7$
Bloco vazado de solo-cimento (NBR 10834)	9 x 14 x 39 14 x 14 x 39 19 x 14 x 39	$f_m \geq 2,5$ $f_i \geq 2,0$
fbk = valor característico f_i = valor individual f_m = valor médio		

Quadro II.2 - Blocos e tijolos oferecidos pelo mercado e elementos de solo-cimento normalizados pela ABNT (A Construção, março/92)

O solo utilizado na fabricação de tijolos e blocos prensados deve apresentar consistência semi-sólida, da mesma forma que o destinado a moldagem de paredes

monolíticas. Após a secagem (*), os elementos apresentam forma análoga a alguns tipos de adobes, tijolos cerâmicos e blocos de concreto simples (HOUBEN et alii, 1979).

Quando comparado com a elevação de paredes monolíticas o modo de produção de elementos de solo prensados apresenta as mesmas vantagens dos adobes:

- Possibilidade de estocagem da produção por um longo período;
- nas alvenarias acontece a diminuição das fissuras por retração hidráulica, esta se processa durante a fase de secagem dos elementos;
- maior flexibilidade, isto é adaptação a várias técnicas construtivas e concepções arquitetônicas.

O principal inconveniente decorre do processo de execução dos painéis de alvenaria que pelos métodos tradicionais resulta em produtividades muito pequenas. A produtividade pode ser aumentada utilizando-se gabaritos compostos por réguas metálicas ou paredes de encosto.

Com relação aos adobes os elementos prensados apresentam as seguintes vantagens:

- Possibilidade de estocagem imediata;
- áreas de fabricação extremamente reduzidas;
- elementos mais regulares;
- possibilidade de fabricação de elementos especiais: blocos vazados, blocos encaixáveis, canaletas, telhas, etc.
- maior resistência à compressão;
- melhor acabamento.

Tijolos apilados manualmente

Após a 2.^a Guerra Mundial este modo de manufatura foi empregado na França e na antiga República Democrática Alemã em canteiros de obras destinados à "reconstrução de moradias sociais". O processo era bastante simples, o solo era colocado em moldes e apilados com soquetes pesando 6 kgf. Dois trabalhadores,

(*) O termo secagem refere-se a fase do processo de produção na qual deixa-se evaporar a água que garantiu a consistência desejada ao solo nas fases de moldagem ou compactação. O termo cura aplica-se aos solos estabilizados quimicamente quando se processam reações físico-químicas, simultaneamente à evaporação de parte da fase líquida do solo. Acredita-se que o termo secagem é mais enérgico.

treinados e dispendo de 10 moldes individuais fabricavam de 200 a 250 tijolos de 10x20x40 cm ou 100 a 150 blocos de 20x20x40 cm por dia. Como pode-se inferir este era um modo de produção lento, de rendimento baixo e fatigante para o trabalhador (HOUBEN et alii, 1979).

Etapas na produção de elementos prensados

Os processos atuais de produção de tijolos ou blocos de solo empregam, para a etapa de compactação, prensas manuais ou motorizadas. Porém, para a melhoria da qualidade dos produtos, diversas ferramentas e equipamentos são empregados nas etapas de preparação do solos e mistura deste com água ou, se houver necessidade de estabilizantes e aditivos. A seguir apresenta-se as etapas de produção dos tijolos e blocos prensados e os respectivos equipamentos disponíveis no mercado.

(a) Pulverização

Após a escavação, afim de obter uma mistura homogênea do solo, água e estabilizante, deve-se proceder o destorroamento do solo eliminando torrões com mais de 20 mm de diâmetro. Grãos com estrutura homogênea, tais como pedregulhos e pedras devem ser deixados intactos e aqueles com estrutura composta (tendo a argila como ligante) devem ser destorroados até que, pelo menos, 50 % dos grãos fiquem com menos de 5 mm de diâmetro. Para ser destorroado o solo deve estar seco, pois os solos úmidos só podem ser manejados com certos sistemas mecânicos.

O manual do UNCHS (1986) cita dois tratamentos são utilizados:

(i) Moagem seguida de peneiramento: o material é prensado entre duas superfícies. Resultam num processo lento e muito ineficiente por produzirem um material de granuometria continua. O maquinário, porém, é simples.

(ii) Pulverização: o material é golpeado com grande força, desintegrando-se os torrões. O maquinário requerido é complexo mas de performance satisfatória. Ao final do processo quaisquer pedras ou pedregulhos remanescentes podem ser removidos por peneiramento. As seguintes técnicas e sistemas são empregados para pulverizar os solos:

- **Socamento:** processo manual, muito lento, processamento de $1 \text{ m}^3/\text{dia}/\text{homem}$;
- **Mandíbulas:** utiliza um mecanismo elementar de movimentos recíprocos, processa 3 a $4 \text{ m}^3/\text{dia}$, peso 150 kgf;
- **Moinho de rolos:** Quatro séries de eixos girando a 150 rpm, versões manual e com motor elétrico de 1,5 kVA, eficiência mecânica excelente, processa $10 \text{ m}^3/\text{dia}$, peso 250 kgf;
- **Gaiola de esquilos:** Alta rotação - 600 rpm, motor elétrico de 3 Hp, processa 15 a $25 \text{ m}^3/\text{dia}$, peso 150 kgf;
- **Soquetes mecânicos:** vários soquetes montados em molas em um eixo central golpeiam o solo a uma alta frequência, utiliza um motor elétrico de 10 Hp, processa $40 \text{ m}^3/\text{dia}$, peso 200 kgf;
- **Parafusos:** é o mesmo sistema utilizado em máquinas convencionais de compostagem. Estas máquinas podem ser usadas se cuidados forem tomados para evitar o atrito excessivo. São providas de um único fuso ou de um conjunto de fusos, funciona com um motor a diesel de 5 Hp, processa $15 \text{ m}^3/\text{dia}$, peso 200 kgf;
- **Correia dentada:** única máquina com um silo, muito eficiente, funciona com um motor a gasolina de 3 Hp, processa $30 \text{ m}^3/\text{dia}$, peso 100 kgf.

(b) Peneiramento

Esta operação é absolutamente essencial quando - requer-se que elementos de grandes dimensões ou matéria orgânica sejam removidos - após uma pulverização incompleta do solo ou quando haja necessidade de se corrigir a granulometria do solo afim de melhorar a eficiência da compactação do solo. Na maioria dos casos grãos com diâmetro entre 10 a 20 mm passam (10 mm para prensas com pressão de compactação baixa e entre 20 e 25 mm para pressões de compactação alta - hiper-compressão); o diâmetro máximo dos grãos parece estar relacionado, também, a menor dimensão da peça a ser compactada. D'AMICO cita que o manual da fábrica de prensas TECMOR recomenda que se utilize uma malha de peneira com 6 mm, já ensaios de molhagem e secagem, realizados pelo IPT, em tijolos e blocos prensados de solo-cimento, mostraram que a presença de grãos maiores que 4,8 mm, provocam, geralmente, zonas de fraqueza e fácil desagregação (D'AMICO,1983).

Segundo o manual do UNCHS (1986) existem quatro métodos de peneiramento:

(i) **Peneira fixa:** a peneira é colocada sobre cavaletes na horizontal ou inclinada. A operação é manual e fácil de executar, bastando ao trabalhador jogar com uma pá o solo de encontro à peneira, o solo que passa enche um carrinho-de-mão e o material retido é descartado ou armazenado para outro uso. No Brasil esta peneira é chamada de ciranda. Este método possui baixo rendimento: $1\text{m}^3/\text{h}/\text{homem}$.

(ii) **Peneira com movimentos alternados:** este processo é simples e consiste em suspender a peneira, através de cabos, em um galho de árvore ou estrutura de madeira. Em uma plataforma num plano acima da peneira colocam-se um funil e o solo é lançado de um carrinho-de-mão. O solo é peneirado pelos movimentos de vai e vem empreendidos na peneira.

(iii) **Peneira rotativa:** sua construção é bastante simples bastando fabricar um cilindro feito com tela de arame ou metal, posto a girar manual ou mecânicamente. Este equipamento possibilita, utilizando diversas aberturas da malha da tela, separar as diversas frações do solo. Peneiras rotativas utilizadas na agricultura, por exemplo peneiras para amendoim, são apropriadas para esta operação. Peneiras rotativas de todos os tamanhos funcionando com motores com potência variando de 1 a 30 Hp encontram-se disponíveis comercialmente. Teoricamente estas peneiras são capazes de processar até $14\text{ m}^3/\text{h}$.

(iv) **Peneiras vibratórias:** tanto uma única peneira vibratória ou a combinação de várias peneiras, geralmente sobrepostas, podem ser usadas neste processo. Este sistema oferece a mesma vantagem que o peneiramento rotativo, possibilitando separar o solo em diversas frações granulométricas. São usados junto as jazidas de solo e em pedreiras.

(c) Mistura

Este estágio do processo é de particular importância, pois é essencial que se obtenha uma mistura homogênea mesmo que um estabilizante seja utilizado ou não. Trabalhadores treinados podem fazer a mistura de pequenos volumes de solo,

porém quando se dispõe de um potente misturador mecânico alguns minutos são suficientes para se obter uma boa mistura. É importante que o material seja, primeiramente, misturado seco, a água deve ser adicionada com um aspersor, um gerador de névoa, ou por vapor d'água pressurizado. A seguir descrevem-se os métodos e equipamentos mais utilizados na fase de mistura.

(i) Mistura manual: pode ser feita com pás, enxadas, ancinho ou outras ferramentas simples, produção entre 1 e 3 m³/dia/homem.

(ii) Misturador manual: vários sistemas tem sido inventados fazendo uso de tambores de óleo com 200 l, a produção com esses engenhos é ligeiramente superior à mistura manual, em torno de 1,5 a 2,5 m³/dia/homem.

(iii) Misturadores motorizados: um motor pode facilitar muito a mistura, já que esta é uma operação lenta quando feita manualmente. Porém, deve-se evitar utilizar misturadores convencionais de concreto (betoneiras), pois formam torrões na mistura e parte desta fica aderida às paredes do misturador.

(iv) Misturador com lâminas: os moto-cultivadores são apropriados para simultaneamente misturar e esmagar o solo, uma ampla variedade destas máquinas se encontra disponível no mercado, modelos com diferentes tamanhos e potências, com produção acima de 4 m³/dia.

(v) Misturador planetário de disco: este misturador é convencionalmente empregado na extrusão de concreto. Misturadores de pequeno porte deste tipo são difíceis de encontrar. Um motor elétrico de 0,5 Hp ou a diesel com 0,75 são requeridos para processar 10 litros de solo. Este misturador tem uma produção de 15 m³/dia.

(vi) Misturador de pás: este misturador é semelhante ao misturador de argamassas, porém mais robusto. Trabalha bem em solos muito secos, mas pode se danificar com solos úmidos (12 - 15 % de umidade). Requer, se utilizando motores elétricos, uma potência de 0,75 Hp para cada 10 litros de solo e, para motores a diesel 1 Hp para cada 10 litros;. A produção de um misturador com capacidade de 150 litros é de 8 a 10 m³/dia.

(vii) **Misturadores lineares:** são dotados de um eixo com um fuso helicoidal onde se fixam lâminas simples ou duplas, este eixo deve ser bastante robusto. É um equipamento muito pesado e caro, raramente utilizado.

Prensas

Existe na indústria de elementos cerâmicos uma grande variedade de prensas que podem ser utilizadas na moldagem de tijolos e blocos de solo natural ou solo estabilizado. Várias são utilizadas sem modificações outras sofrem algumas adaptações, especialmente para a fabricação de blocos. No Brasil algumas indústrias mecânicas oferecem modelos de prensas destinados, especificamente, a produção de elementos de solo, sendo inclusive exportadas. Acredita-se, porém, que no Brasil um grande número de indústrias têm condições de adaptar os seus produtos, destinando-os a fabricação de elementos de solo.

(a) Tipos de prensas:

(i) **Manuais:** a compactação é assegurada por um ou mais trabalhadores através de um sistema mecânico de alavanca ou por apiloamento;

(ii) **mecânicas:** a compactação é feita por um sistema mecânico de alavancas ou apiloamento acionado por um motor à gasolina, diesel ou elétrico;

(iii) **hidráulicas:** a energia mecânica gerada por um motor é transmitida à placa de compactação por intermédio de um sistema hidráulico;

(iv) **pneumáticas:** a energia mecânica do motor é transmitida a um soquete por intermédio de um sistema pneumático.

(b) Modos de compressão:

(i) **Pressão estática:** a compactação é assegurada pela aproximação relativa de duas superfícies entre as quais se encontra o solo, que é contido lateralmente pelas paredes do molde;

(ii) **Pressão dinâmica:** a compactação é obtida pelo apiloamento do solo no molde, Neste caso a pressão exercida no solo é muito difícil de se controlar.

(c) Características qualitativas:

(i) Pressão: uma boa parte da potência fornecida ao sistema é perdida durante a transmissão até a placa de compactação devido ao atrito e a elasticidade dos elementos mecânicos das prensas. Segundo HOUBEN et alii (1979), pressões de compactação de 0,7 a 1 MN/m² são suficientes apesar de mínimas, pressões de 2 a 4 MN/m² são excelentes. As pressões superiores são supérfluas, produzindo desperdícios de energia e, às vezes, conduzem a deterioração das qualidades mecânicas dos elementos produzidos com a ocorrência do fenômeno da laminação.

As pressões indicadas são obtidas na produção equivalente a uma média estatística de um trabalhador durante 8 horas de trabalho que é muito diferente do que se pode obter com uma única passagem. Por exemplo, uma manipulação feita por um trabalhador em uma prensa manual, modelo Cinva-Ram, resulta numa pressão de 2 MN/m², após toda uma jornada de trabalho este mesmo trabalhador proporcionará uma pressão de 0,5 a 0,7 MN/m².

(ii) Taxa de compressão: representa a relação entre o volume do molde vazio e o volume do elemento produzido. Na maioria dos casos esta taxa é superior a 1,65, este é um valor mínimo e toda a prensa que apresentar um valor inferior exige uma pré-compactação do solo. Uma taxa de compressão de 2,0 é considerada ideal. Quase todas as prensas manuais ou mecânicas proporcionam taxas iguais ou inferiores a 1,65, necessitando o solo de uma pré-compactação. Deste ponto de vista é preferível que as prensas possuam tampas pivotantes àquelas com tampas giratórias. As tampas pivotantes esmagam o excesso de solo no molde, realizando, assim, uma ligeira pré-compactação. Já as tampas giratórias raspam o excesso de solo no molde, neste caso deve-se ao encher o molde e pressionar o solo com as mãos (HOUBEN et alii, 1979).

(iii) Profundidade máxima do molde: para as prensas que possuem somente uma placa compactadora móvel, isto é, um único sentido de compactação, a profundidade do molde é dada pela distância máxima entre a tampa do molde (fixa) e o compactador, diminuído do curso deste (ver Figura II.12a). Segundo a publicação "Tijolos maciços de solo-cimento; fabricação e utilização" (BNH, 1985), prensas com um único sentido de compactação devem fabricar elementos com no máximo 80 mm de altura, elementos com até 200 mm de altura devem utilizar prensas com duplo sentido de compactação (ver Figura II.12b). Para fabricar-se

elementos planos como telhas e ladrilhos basta fixar-se um calço (de aço ou madeira dura) no interior do molde.

(iv) Curso máximo do compactador: nas prensas manuais e mecânicas não é possível regular o curso do compactador. O efeito de não deslocar a alavanca até o fim de seu curso pode dar a ilusão de se regular o deslocamento da placa de compactação. O esforço de compactação máximo é conseguido deslocando a alavanca até o fim de seu curso, desta forma produz-se elementos muito mais resistentes. Nas prensas hidráulicas o curso do compactador(s) é facilmente regulável.

(v) Formas e dimensões dos elementos: é enorme a variedade de elementos que pode ser moldada tanto em prensas manuais quanto em prensas mais sofisticadas, a Figura II.13 apresenta alguns elementos fabricados em máquinas manuais como a Civa-Ram (Colômbia) e a Elson Blockmaster (India) e prensas hidráulicas como a HRC-03 da Tecmor (Brasil). Porém adotar-se sistemas construtivos que necessitem de muitos componentes diferentes implicam em alguns inconvenientes, à medida que se utilizem prensas mais sofisticadas, entre eles pode-se citar: o custo bastante alto dos moldes (matrizes) e as dificuldades, devidas ao grande peso dos moldes, geradas no momento da troca destes. Neste sentido o IPT junto a Tecmor, fabricante das prensas hidráulicas HRC-03 e HRC-05, desenvolveram o projeto de um bloco básico (ver Figura II.13), com dimensões de 39x15x19cm, onde linhas de corte definidas por zonas de menor espessura de parede do bloco possibilitam o fracionamento deste. Estas frações permitem combinações dimensionalmente coordenadas, resultando em amarrações de paredes contínuas, cantos, paredes ortogonais e cruzadas, feitas exclusivamente por justaposição, sem a necessidade de emprego de elementos auxiliares (IPT,1985).

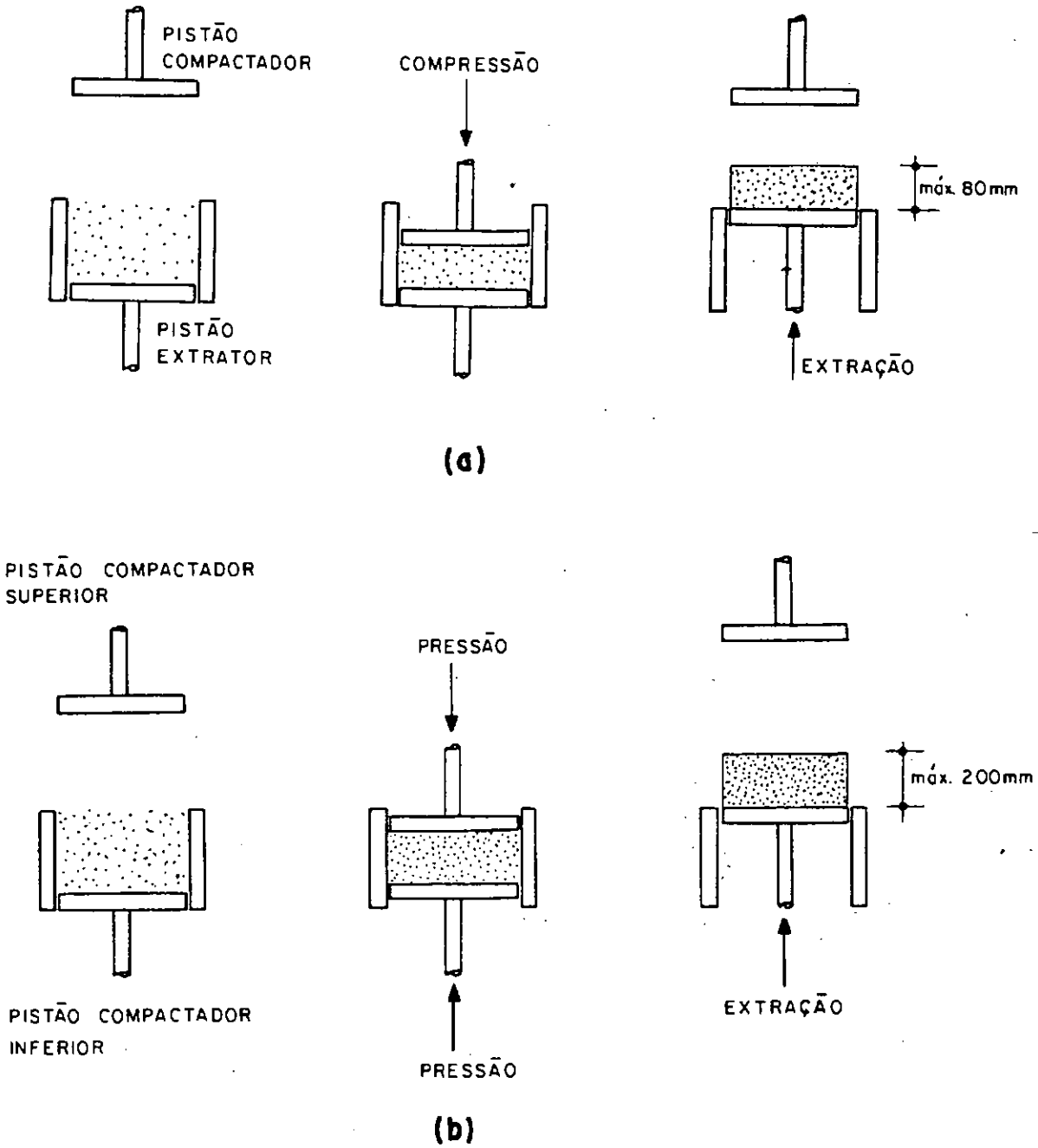
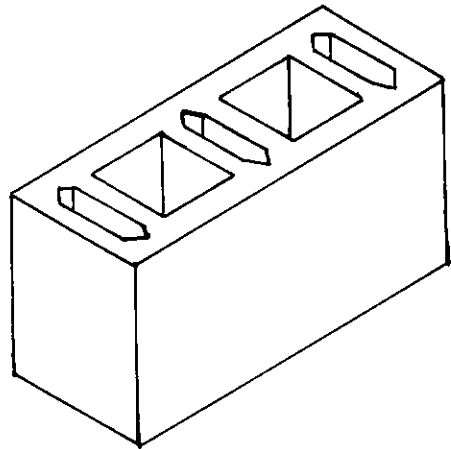
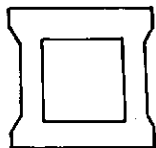
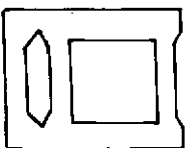
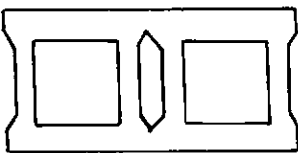
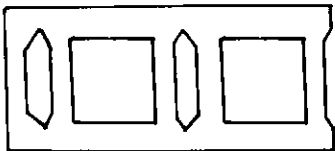
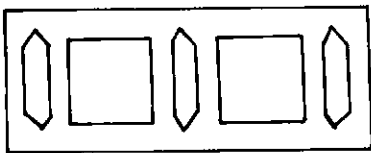


Figura II.11 - (a) Pressas com um único sentido de compactação; (b) Pressas de duplo sentido de compactação (BNH,1985)



ELEMENTOS CONFECCIONADOS NA
PRENSA CINVA-RAM (ICP,1973)



BLOCO BÁSICO E VISTA EM PLANTA
DAS FRAÇÕES QUE SE COORDENAM
DIMENSIONALMENTE (IPT, 1985)

Figura II.12 - Tipos de elementos produzidos em prensas manuais e hidráulicas.

Classificação das prensas quanto aos níveis de produção alcançados (HOUBEN et alii, 1979):

- **pequena:** prensas manuais, o rendimento varia em função da organização do canteiro, podem variar de 300 à 1.200 elementos/dia;

- **média:** as prensas hidráulicas atingem produções de 2.000 à 2.800 elementos/dia, o que comanda o ritmo de produção é o ciclo automático de prensagem

- **elevada:** prensas mecânicas móveis têm produção de 8.000 à 16.000 elementos/dia, moldam o solo no estado plástico;

- **muito elevada:** prensas hidráulicas muito sofisticadas, derivadas da produção industrial de blocos sílico-calcários trabalham em um ritmo de produção bastante elevado variando de 10.000 a 72.000 elementos/dia. Contudo demandam uma grande infra-estrutura e pessoal altamente qualificado.

Prensas manuais

(a) Prensas manuais leves

A produção de elementos em prensas manuais é determinada em grande parte pela forma de organização do trabalho, a forma de pagamento da equipe de trabalhadores e das relações de trabalho tradicionais prevalentes. A produção média destas prensas é de 300 elementos/dia, contudo pode ser aumentada para 1.200 elementos/dia. A seguir descrevem-se as prensas mais conhecidas no mercado:

CINVA-RAM: prensa, ilustrada na Figuras II.14 foi idealizada em 1952 em Bogotá, Colômbia pelo Centro Interamericano de Planejamento e Habitação (CINVA) é fabricada em vários países sob licença da IBEC-Housing Corporation de New York, EUA (SCHRECKENBACH, 1990). Simples, econômica, pode ser fabricada em pequenas oficinas mecânicas. Constituída por uma caixa de aço com paredes de 12 mm de espessura (molde único), montada sobre quatro pés, que constituem a estrutura de todo o mecanismo. Para garantir sua estabilidade durante

a operação, deve ser fixada a uma base de concreto simples. Após o enchimento do molde com solo fecha-se a tampa que pode funcionar basculando fixa à dois braços ou pode girar em torno de um eixo no canto do molde.

A alavanca é fixada entre dois coxins localizados acima da tampa. A transmissão do movimento ao pistão é feita por duas bielas. Em posição vertical, duas hastes fixadas a um eixo são mantidas solidárias uma a outra e ligadas à alavanca e às bielas. As hastes não são regulados à mão, o espaçamento entre os dois eixos da alavanca determina o curso do pistão que intervém na taxa de compressão. O atrito nos roletes desgasta-os prematuramente sendo recomendável ter sobressalentes para estas peças. Em alguns modelos o braço da alavanca não é fixo e constitui-se de um tubo metálico com 2 m de comprimento ou um braço desmontável em três segmentos. A relação de braço da alavanca é superior 150 por 1.

O pistão é um cilindro que sustenta uma placa retangular (compactador). Este é guiado por duas chapas reguláveis (HOUBEN et alii, 1979).

TEC BLOCK: prensa desenvolvida e fabricada pelo Departamento de Pesquisa em Habitação e Planejamento da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Ciência e Tecnologia de Kumasi, Gana (SCHRECKENBACH, 1990). Os princípios de funcionamento desta prensa são os mesmos da Cinva-Ram, salvo as operações de abertura e fechamento da tampa que são automáticas. A manipulação da prensa é mais prática, acelerando o ritmo de produção.

O molde, a tampa e o pistão de compressão são em aço de 12 mm de espessura assim como todos os elementos ativos. Os trilhos, que garantem a estabilidade da prensa, e a alavanca são em madeira (HOUBEN et alii, 1979).

ELLSON BLOCKMASTER: manufaturada na África do Sul pela Ellson PTY (SCHRECKENBACH, 1990), possui a maior relação de braço da alavanca (500 por 1) e produz elementos muito densos. É, também, fácil de operar, com o molde a 860 mm acima do solo enquanto a Cinva-Ram e a Tek-Block estão a 500 mm do solo (HOUBEN et alii, 1979).

Outras prensas inspiraram-se na Cinva-Ram e acrescentaram alguns melhoramentos, tais como: melhor mecanismo de ejeção dos elementos (Palafitte, Stevin, Ceneema); maior profundidade dos moldes (Ait Ourir); melhor transmissão de energia (Dart-Ram); Tampa pivotante (Meili); utilização de perfis de aço

padronizados (Unata); duplo sentido de compactação (C + B1); moldes compartimentados (MRC-1); produção de blocos vazados (Ceta-ram).

No Brasil a Tecmor é fabricante da prensa manual MRC-1 que possui molde dividido em três compartimentos produzindo, segundo o fabricante, até 1.500 tijolo/dia com dimensões de 23x11x5 cm (TECMOR, 1986).

(b) Prensas hidráulicas leves

Uma pequena prensa, a **BREPAK**, conjuga os melhores melhoramentos feitos ao sistema Cinva-Ram. O sistema de roletes e eixos da Cinva foram substituídos por um pistão hidráulico que permite atingir pressões de 10 MN/m^2 . Os blocos obtidos possuem dimensões idênticas aos produzidos pela Cinva, porém 20 % mais densos. A hiper-compactação é bastante conveniente para compactar solos muito expansivos (UNCHS, 1986). A empresa italiana GIZA fabrica prensas manuais com mecanismo hidráulico com pressão específica de compactação de 6 MN/m^2 e pistão com curso de 200 mm e com os mais diversos tipos de moldes (GIZA, 1980).

(c) Prensas mecânicas pesadas

Estas prensas podem gerar pressões de compactação maiores que o limite mínimo de 20 MN/m^2 . Robustas, não desgastam seus componentes facilmente. São fáceis de operar e de manutenção simples. Possuem moldes intercambiáveis. Permitem pré-compactação do solo através de uma tampa pivotante. Os movimentos para frente e para trás e de um lado para o outro são eliminados. O projeto da máquina permite uma melhor organização do trabalho ao redor da prensa. São conhecidas no mercado com os nomes: **TESTARAM**, **LANDCRETE** e **STABIBLOC** (UNCHS, 1986).

Prensas motorizadas

(a) Prensas mecânicas

Representam uma nova geração de prensas que se acham correntemente disponíveis no mercado e que parecem estar destinadas a um futuro brilhante. Apesar de seu custo de quatro a sete vezes o das prensas manuais pesadas, sua viabilidade econômica é excelente. Algumas destas prensas como a **SEMI-TERSTAMATIC** são descendentes diretas das prensas manuais pesadas e receberam melhoramentos a partir das lições aprendidas no modelo antigo. Esta prensa foi algum tempo conhecida no mercado pelos nomes comerciais **MAJOR** e **LP9** (UNCHS, 1986).

As prensas mecânicas motorizadas pertencem a um de dois grupos existentes no mercado: as que possuem uma bancada fixa e um molde único; e as que possuem uma bancada circular rotativa e vários moldes (três ou quatro), que em certas condições aumentam os níveis de produção. No primeiro caso o molde pode ser trocado rapidamente a um custo baixo, enquanto nas prensas com a bancada rotativa a troca dos moldes é mais demorada e mais dispendiosa. As bancadas circulares rotativas podem ser giradas manualmente como na prensa **PACT 500**, constituindo-se tarefa cansativa; ou podem ser giradas mecanicamente como na **CERAMAN**, estas últimas possuem mecanismos mais sofisticados e consomem mais energia. No Brasil existe um modelo de prensa que opera neste sistema, é fabricado pelo **SERVIMAC** (1991).

Os sistemas que utilizam um molde único possibilitam efetuar uma precompactação dinâmica quando a tampa do molde é baixada, conferindo vantagens significativa à qualidade dos elementos. A precompactação é possível nas bancadas giratórias, ajustando-se um rolo pré-compactador embutido localizado entre a posição de alimentação e a posição de compactação. O nível do solo deve estar um pouco acima da borda do molde e isto só é possível quando a prensa possui um alimentador.

Os projetistas deste tipo de prensas têm encontrado outros problemas que ainda não foram resolvidos quando as prensas são colocadas no mercado: o solo perturba o funcionamento da máquina penetrando em áreas sensíveis; deve ser garantida uma operação segura para que não aconteça um defeito na máquina; a prensa não deve permitir operar no sentido reverso, o que pode ocorrer se o motor for instalado com a rotação invertida; onde a pressão de compactação disponível

for menor que a requerida (quando existe demasiada quantidade de solo no molde, por exemplo, a prensa deve parar; a remoção de um elemento mau compactado deve retardar a produção). Conseqüentemente a prensa deveria ser dotada de uma mola de compensação e um sistema de "motor-release".

Finalmente, estas prensas deveriam ser projetadas de forma a dar ao usuário a escolha de um motor elétrico ou à combustão. São prensas que dependem muitos das operações que precedem a compactação: peneiramento, dosagem e mistura (UNCHS, 1986).

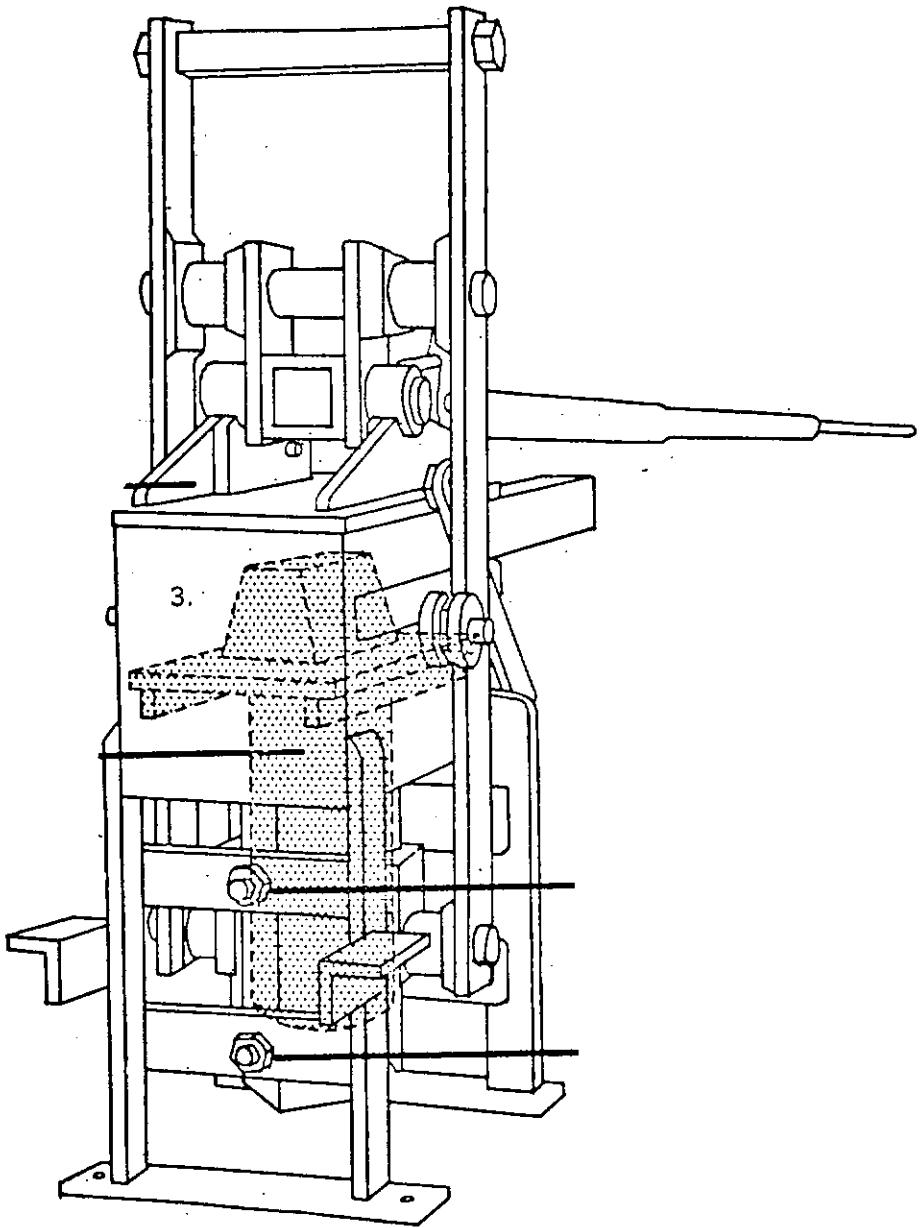


Figura II.13 - Prensa CINVA-RAM (UNITED NATIONS, 1964).

(b) Prensas hidráulicas

Prensas hidráulicas automáticas são capazes de atingir níveis médios de produção. Na década de 50 estiveram em moda mas rapidamente desapareceram do mercado. Novas prensas do mesmo tipo foram lançadas na década de 70, mas a sua confiabilidade é discutida tendo trazido mais desapontamento que satisfação (UNCHS, 1986). No próximo capítulo relacionou-se alguns problemas enfrentados com a prensa hidráulica utilizada neste trabalho. Contudo, devido a rigidez de seu pistão cujo sistema hidráulico tem a vantagem de permitir um curso longo dos compactadores. Como resultado podem-se alcançar taxas de compressão iguais ou maiores que 2.

Este sistema pode ser facilmente ajustado para dosar a composição do solo. Pode ser também, equipado com um silo, primeiro passo para a automação do sistema. Além disso as prensas hidráulicas podem ser equipadas com duplo sentido de compactação.

Entretanto, também é verdade que, nas prensas hidráulicas aparecem muitos problemas, como por exemplo, no delicado sistema da bomba hidráulica. Além disso nas prensas dotadas de bancadas circulares movimentadas hidráulicamente o volume do reservatório de óleo é no mínimo de 200 litros. Nos países de clima tropical a temperatura do fluido pode alcançar 70 °C, sendo esta é a temperatura máxima permissível para que haja um bom funcionamento dos componentes hidráulicos. Pode-se utilizar componentes que possam tolerar temperaturas de até 120 °C, porém, estes caso danifiquem são de difícil reposição. Pode-se utilizar um sistema de refrigeração do óleo, contudo isto torna a planta de produção muito complexa. O óleo deve ser trocado periodicamente, o que constitui tarefa difícil e que necessita, além da disponibilidade do óleo, pessoal técnico especializado.

Estas prensas podem funcionar bem em circunstâncias ideais, se por exemplo, na região onde forem instaladas houver um desenvolvimento tecnológico adequado. Áreas rurais ou áreas periféricas às cidades em países em desenvolvimento, freqüentemente, não reúnem condições para um bom desempenho destas máquinas. Muitos destes modelos de prensas são fabricados ficando o mercado a assistir ao seu repentino aparecimento e desaparecimento. O manual da UNCHS (1986) conclui colocando que raramente estes modelos de prensas têm sido conhecidos como confiáveis.

No Brasil, a literatura consultada faz referência a três prensas hidráulicas: os modelos **HPT-20** e **HPT-30** fabricados pela Supertor Máquinas e Artefatos Metalúrgicos Ltda. (SCHRECKENBACH,1980; IPT,1978); a prensa **PHT** fabricada pela EKA - Mudrei Indústria e Manutenção Hidráulica Ltda. (MUDREI,1991); os modelos **HRC-3** e **HRC-5** fabricados pela Tecmor S/A Equipamentos Mecânicos (TECMOR,1986). As duas primeiras prensas possuem um único sentido de compactação; as últimas, possuem duplo sentido de compactação, porém segundo informações não são mais fabricadas.

Uma prensa hidráulica Supertor, modelo HPT-30, foi utilizada pelo IPT em conjunto com a COHAB-SP na implantação de uma usina de produção de tijolos de solo-cimento objetivando a construção de 48 embriões. O relatório técnico que descreve esta experiência menciona um série de problemas técnicos ocorridos com a prensa, sendo a maioria envolvendo o reparo das conexões entre o motor e a bomba de óleo. Este relatório recomenda que se deve garantir no ato da aquisição, uma eficiente assistência técnica por parte do fabricante e em se tratando da montagem de mais de uma unidade é mais interessante dispor-se de um técnico (treinado na fábrica) para realizar ele mesmo a manutenção do equipamento. Felizmente os problemas não comprometeram a produção dos tijolos e conseqüentemente a conclusão dos 48 embriões (IPT,1978).

Unidades de produção móveis

Prensas potentes, freqüentemente necessitam uma maior mecanização das operações que precedem a compactação. Conseqüentemente, projetos de pesquisa tem perseguido linhas de integração de toda a planta de equipamentos utilizados em uma unidade de produção automatizada, refletindo uma tendência corrente na produção. Entretanto, embora o custo possa ser razoável, a viabilidade econômica de uma produção automatizada continua a ser um problema. Cada modelo possui um modo de produção, necessitando condições ótimas para operação. Mesmo em países industrializados, estas máquinas não operam em condições econômicas de muita escassez de recursos. Em países em desenvolvimento, freqüentemente, são antieconômicas. Existem dois tipos de unidades móveis de produção:

(a) Unidades leves

Estas unidades oferecem a vantagem de abrir um novo mercado em países industrializados e em áreas urbanas de países em desenvolvimento, chamada locação (leasing) para auto-construtores. De fato, podem ser alugadas por todo período de produção de elementos para a construção por um preço relativamente barato. Mesmo assim, este tipo de equipamento ainda sofre por algumas deficiências, principalmente pela falta de integração entre os diferentes equipamentos que constituem a produção e que devem funcionar conjuntamente. Um esforço deve ser feito para harmonizar os volumes de produção e o custo destes equipamentos nos diferentes estágios que eles integram.

As unidades leves podem operar com prensas mecânicas. As prensas **MEILI**, que é fabricada na Suíça, e **HALLUMECA (HOUBEN et alii, 1979)** são os únicos exemplos no mercado deste tipo de prensa. Não existe um espectro muito amplo desta classe de unidades e, além disso, não existe no mercado uma unidade totalmente integrada.

A prensa M.M.M. 2.000 começou a ser fabricada em 1976 por uma empresa inglesa de produtos químicos a partir de uma experiência com um protótipo testado em projeto na Maurîtânia (HOUBEN et alii, 1979)

Unidades leves também são capazes de operar em prensas hidráulicas. A **EARTH RAM**, a **CLU 2000** e **CLU 3000** são alguns exemplos deste tipo de unidade. Estas máquinas são algumas vezes adaptadas de unidades fixas. O princípio do projeto é atrativo, mas estimativas de custo mostram que em amplas áreas de produção, é mais econômico adquirir equipamentos de produção (pulverizadores, misturadores e prensas) separadamente. A experiência tem demonstrado que plantas não integradas não são menos eficientes que os equipamentos integrados. Por sua vez, não está comprovado que as plantas integradas sejam mais eficientes (UNCHS, 1986).

(b) Unidades pesadas

Alguns grandes fabricantes de equipamentos tem proposto a utilização de grandes unidades móveis que podem ser transportadas a qualquer lugar. São unidades muito grandes e pesadas, porém correspondem a uma produção anual muito elevada. As plantas das unidades assemelham-se as descritas no parágrafo anterior. Existe uma tendência para a utilização da hiper-compressão. A viabilidade

econômica dessas unidades já tem sido demonstrada, porém deve-se empreender uma pesquisa de mercado antes de se adquirir tais unidades.

O manual da UNCHS (1986) cita o conhecimento de uma única unidade pesada operando com prensas hidráulicas. O projeto é baseado na combinação de vários equipamentos montados em um único chassis e é conhecida pelo nome de **UNIPRESS**. Esta planta, muito robusta, é comumente usada na moldagem de tijolos cerâmicos.

Os modelos de prensas hidráulicas encontrados no mercado, são apresentados como sendo bastante versáteis, porém, na realidade, possuem um restrito espectro de aplicações. Estas unidades não são equipadas com pulverizadores ou peneiras. O solo que é depositado em um silo, é pré-misturado, por gravidade, com um estabilizante através de um sistema integrado de dosagem. É, então, transferido por uma correia transportadora até o misturador. Um silo de estocagem distribui o solo no molde onde é hiper-compactado e automaticamente ejetado na forma de blocos. Estas unidades dispõem de um sistema de moldes deslizantes que não permitem a produção de elementos vazados ou blocos celulares. Caras e com um volume de produção apenas moderado, seu futuro parece confinado a um mercado limitado (UNCHS, 1986).

Unidades de produção industrial

Por vários anos o mercado assistiu ao surgimento de toda uma série de unidades de produção completamente equipadas e de porte limitado. As prensas destas unidades industriais operam com compressão estática ou dinâmica, com sentido de compactação simples ou duplo. A variedade de elementos que pode ser fabricada não é limitada a tijolos de pequenas dimensões, que quase todas as outras prensas podem fabricar. Todas as formas de blocos de concreto simples (blocos vazados) e tijolos cerâmicos (tijolos perfurados) podem ser produzidos utilizando o solo estabilizado. Estes equipamentos de produção são destinados a mercados limitados. Somente programas de construção maciça podem assegurar que os investimentos envolvidos possam ser recuperados e o custo dos blocos produzidos seja reduzido significativamente. Estes tipos de prensas são correntemente utilizadas em países como a Argélia, Brasil, Gabão, México e Nigéria. Existem dois tipos de unidades de produção industriais:

(a) Unidades com prensas hidráulicas

Todas as unidades industriais automáticas são fabricadas em vários tamanhos. Entre as unidades de menor porte, a **CERAMASTER** apresenta-se com bastante compacta, porém é ainda só um protótipo.

Unidades de médio porte como a **LUXOR**, e os anteriormente citados modelos da Tecmor foram reequipados, habilitando-se para produzir em escala industrial. As prensas desta unidade de produção empregam duplo sentido de compactação.

Finalmente, as prensas hidráulicas pesadas de produção industrial são verdadeiras caixas pretas encontram-se disponíveis em vários tamanhos. Hoje, parece que apenas algumas plantas existem operando em todo o mundo. Um segredo considerável envolve a operação dessas unidades industriais. As unidades do tipo **LATOREX** (utilizam uma prensa **DROSTHOLM L3**) e **KRUPP** fazem uso de um processo de estabilização baseado na cal hidratada e na cal virgem respectivamente. Em ambos os casos a tecnologia tem muito a ver com a utilizada pela indústria de blocos sílico-calcáreos, da qual foi adaptada. As pressões de moldagem são hiper-pressões e mega-pressões. Os blocos são curados em autoclave e a operação é completamente automática. Na Nigéria e nas Filipinas, muitos problemas tem sido enfrentados com esses tipos de plantas com prensas hidráulicas pesadas. A tecnologia que tem sido desenvolvida é de fato muito sofisticada, requerendo um perfeito controle técnico e a supervisão da organização do trabalho (UNCHS, 1986).

A empresa italiana GIZA oferece duas plantas móveis para produzir blocos de solo estabilizado. A primeira planta é semi-automática sendo capaz de produzir 2.000 blocos vazados de 20x20x40 cm por dia demandando diariamente 29 m³ de material solto, 2,55 t de cimento, 3,5 m³ de água e 240 kWh de energia. A segunda planta é automática sendo capaz de produzir diariamente 4.000 blocos vazados de 20x20x40 cm demandando 58 m³, 5,1 t de cimento, 7,0 m³ de água, 80 l de óleo diesel e 400 kWh de energia elétrica (GIZA, 1980).

(b) Prensas que combinam mecanismos hidráulicos e mecânicos

Estas unidades correspondem à fábricas totalmente automatizadas. Um protótipo foi colocado em operação na França, na construção experimental "Village Terre" na l'Isle d'Abeau próximo a Lion. Estas prensas foram adaptadas das prensas de blocos de concreto simples. O processo combina vibração mecânica de alta frequência e baixa amplitude (1,5 a 2,0 mm), e compactação hidráulica com pequenas pressões (2 MN/m^2), estas podendo ser reguladas de acordo com o tipo de solo. O ciclo de produção consiste nas seguintes operações: enchimento do molde por uma gaveta, vibração, compactação, o molde é levantado, o elemento moldado é removido do molde com o próprio compactador e em seguida o elemento é transportado através de uma correia transportadora. A duração de um ciclo completo é de 40 segundos. este tipo de prensa pode fabricar tijolo maciços ou blocos vazados (20x20x40 ou 50 cm), produzindo 2.000 a 2.500 tijolos/dia ou 1.000 a 1.500 blocos/dia. Representam uma economia de 50 % em relação aos blocos de concreto simples. A operação cuidadosa dessas prensas requer, além disso, um ambiente tecnologicamente adequado, operadores bem treinados e experientes além de pessoal de manutenção. Existe uma tendência atual para a redução do tamanho dessa prensas, um exemplo disso é a máquina francesa **DYNATER** que se encontra em fase de teste (UNCHS, 1986).

II.3.4 Outras técnicas

Em seu artigo sobre a casa rural brasileira o engenheiro Ângelo Murgel (CEPED, 1985) cita três técnicas primitivas de construção:

Barroca

Consiste na ereção de paredes pela superposição de camadas de solo argiloso plástico sem o emprego de moldes ou formas, cujos bordos excedentes são aparados à faca antes da secagem completa.

Tijuco

Consiste no empilhamento de cascarões de solo argiloso, formados pela secagem no próprio terreno.

Torrões

Construção rural de uso mais difundido no Rio Grande do Sul, em que se cortam blocos da camada superior do solo, armada pela trama radicular das gramíneas.

II.3.5 Experiência no Brasil e no Exterior

Brasil

THOMAZ (1984) cita como primeira experiência em construção habitacional com solo estabilizado. No Brasil a construção com solo-cimento na cidade de Santarém, no Pará, em 1945, de uma casa de bombas, com 42 m^2 , para abastecimento das obras de construção do aeroporto local.

Ainda na década de 40, registra-se a construção de resistências em paredes monolíticas de solo-cimento no Vale Florido, na Fazenda Inglesa, em Petrópolis (RJ) que se mantém em bom estado até os dias de hoje, ver foto II.1 (ABCP, 1990).

Em 1950, concluiu-se a execução do Hospital de Tuberculosos de Manaus, hoje Adriano Jorge com 432 leitos, centro cirúrgico, e demais dependências, formando um conjunto de 8 blocos interligados com uma área total constituída de 10.800 m^2 , empregando o solo-cimento em paredes monolíticas. A empreiteira lastrou-se na pequena casinha de bombas de Santarém, porém contou com o apoio tecnológico da ABCP. Em 1966 foi obtida uma pequena amostra proveniente de um pedaço de parede, retirado de uma das paredes internas, onde fora aberta uma porta. Desta amostra foram moldados corpos de prova cilíndricos que foram rompidos à compressão simples obtendo-se uma média de resistência de 2,3 MPa. Uma inspeção realizada em 1976, não constatou nenhum defeito que pudesse ser atribuído ao solo-cimento, enquanto diversos materiais tradicionais, como a madeira, a cerâmica, tubulações de ferro galvanizado e outros tiveram de ser substituídos (THOMAZ, 1984).

O quadro II.3 relaciona um total de 3.142 construção em solo-cimento registrados pela Caixa Econômica Federal até fevereiro de 1989 (ABCP, 1990).

Região Geográfica	Número de unidades registradas (até fevereiro de 1989)			
	Sistema Construtivo			
	Paredes monolíticas	Tijolos prensados	Blocos prensados	Totais
Região Norte	17	-	54	71
Amazonas	6	-	5	11
Pará	2	-	49	51
Roraima	1	-	-	1
Acre	8	-	-	8
Região Nordeste	639	219	1	859
Maranhão	5	-	-	5
Piauí	1	58	-	59
Ceará	1	42	-	43
Rio Grande do Norte	135	-	-	135
Paraíba	4	-	-	4
Pernambuco	18	1	1	20
Alagoas	2	66	-	68
Sergipe	125	-	-	125
Bahia	348	52	-	400
Região Sudeste	400	468	192	1060
Minas Gerais	142	14	1	157
Espírito Santo	50	-	1	51
Rio de Janeiro	59	13	166	238
São Paulo	149	441	24	614
Região Centro-Oeste	7	972	1	980
Mato Grosso	-	11	-	11
Mato Grosso do Sul	1	5	-	6
Goiás	1	906	-	907
Distrito Federal	5	50	1	56
Região Sul	164	1	7	172
Paraná	163	-	7	170
Santa Catarina	-	1	-	1
Rio Grande do Sul	1	-	-	1
Totais	1227	1660	255	3142

Quadro II.3 - Quadro resumo das construções em solo-cimento no Brasil registradas pela C.E.F. até fevereiro de 1989 (ABCP, 1990).



Foto II.1 - Residência construída com paredes monolíticas de solo-cimento no Vale Florido, Fazenda Inglesa, Petrópolis, Rio de Janeiro.

Exterior

Em todo mundo é crescente a utilização do solo como material de construção. HOUBEN et alii (1989) cita projetos que utilizaram técnicas revitalizadas de execução de paredes monolíticas em 15 países. Neste século, entre elas pode-se se citar a construção, em 1970, de 30 casas na vila agrícola de Mostefa Ben-Bramim na Argélia.

Nos dias de hoje o adobe é um elemento de construção comercializado no mercado formal na Califórnia e Novo México no Estados Unidos onde se utilizam equipamentos automatizados capazes de proporcionar níveis de produção bastante elevados.

Em 1975, o Ministério de Habitação e Construção do Peru construiu, em canteiro experimental, na cidade de Cayalti, residências com 90 m², executados com adobes estabilizados com asfalto diluído CR-250 e reforçados com bambu (HOUBEN et alii, 1979).

A utilização de elementos de alvenaria, tijolos e blocos de solo prensado também encontra-se em franco desenvolvimento. Na América Latina o Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento da Colômbia (CINVA), que em 1952 desenvolveu a prensa manual portátil CINVA-RAM, irradiou a técnica, de produção de tijolos prensados por todo o continente, onde foram utilizados na construção de habitações, equipamentos urbanos e em componentes como arcos, cisternas, silos, fogões e fornos.

Em 1975 na Maurîtânia, um projeto coordenado pela "Associação Pour le Développement Naturel D'une Architecture et D'un Urbanisme Africains" (ADAVA) construiu a vila de Rosso na zona de Satara utilizando tijolos de solo estabilizado, fabricados em uma unidade de produção composta por uma prensa protótipo de fabricação Inglesa a MMH 4.000 (HOUBEN et alii, 1979).

Um exemplo recente de construção com solo estabilizado é a do Hotel Douar com 240 quartos num total de 14.000 m² de área construída, situado a 10 km de Marraquesh (Marrocos). Foi inteiramente construído em paredes monolíticas e blocos de solo estabilizado. Sua construção envolveu 3.600 operários ao longo de 14 meses.

Como o solo era o único material disponível no canteiro, foram utilizados duas prensas motorizadas ALETCH PACT 500 para a fabricação dos blocos (800.000 unidades), além de um forno de cozimento de parte de tijolos que foram utilizados em componentes específicos da construção.

O custo total de alvenaria foi inferior a 15 % quando comparado a construções em concreto. Um primeiro balanço térmico (gastos com refrigeração e aquecimento) deste hotel, hoje sob a gestão do Club Méditerranée, durante a temporada 1989-1990, permitiu constatar uma economia de 30 % com referência ao consumo de uma construção convencional (BOY, 1991).

CAPÍTULO III

Estabilização de solos

III.1 Introdução

O presente capítulo inicia-se com uma descrição do solo como material de construção, apresentando suas propriedades básicas, composição da fase sólida e um resumo de técnicas simples para a identificação dos solos. Amplia-se o escopo deste trabalho fazendo-se uma breve resenha dos princípios de estabilização de solos, descrevendo-se os principais métodos de estabilização, a suscetibilidade de um solo à estabilização e as características dos estabilizantes de solos.

Retorna-se ao objetivo principal do trabalho estudando-se as iterações físico-químicas entre o solo-cimento e solo-rejeitos estudados. Relaciona-se e discute-se os principais métodos de dosagem experimental do solo-cimento que serviram de ponto de partida para a metodologia empregada na fase experimental desta pesquisa.

III.2 A escolha: solo ou terra ?

III.2.1 Definição

Do ponto de vista semântico os vocábulos *solo* e *terra* são sinônimos e designam a parte superficial da crosta terrestre proveniente, mais freqüentemente, de processos mecânicos (desintegração), químicos (decomposição) e mecânico-biológicos atuantes nas rochas e nos próprios solos, através da ação dos fenômenos climáticos e dos organismos vivos.

Os geotécnicos e os demais engenheiros civis, geralmente, evitam o termo *terra*, apesar de o empregarem na denominação das chamadas *Obras de Terra*. Ao contrário, os arquitetos utilizam o termo *terra* para designar os estilos arquitetônicos e o conjunto de técnicas construtivas que empregam o solo natural ou estabilizado. Neste texto por força da formação geotécnica do autor optou-se por empregar o termo *solo*, porém não havendo nenhuma reserva de preconceito ao termo *terra*.

III.2.2 Propriedades básicas e índices físicos dos solos

Textura

O tamanho relativo dos grãos que formam a fase sólida dos solos é chamado "*textura*" e sua medida a *granulometria*. A disposição relativa dos grãos em relação à água intersticial e o ar na fase gasosa, constituem a *estrutura* do solo (VARGAS, 1978). A distribuição granulométrica do solo representa as proporções relativas, expressas sob a forma de percentagens, das diferentes dimensões das partículas que constituem a fase sólida dos solos. Determinada através do peneiramento para as partículas com diâmetro maior que 0,074 mm e por sedimentação para as partículas menores que 0,074 mm, é representada, graficamente, pela curva granulométrica.

Forma das partículas

Segundo CAPUTO (1980) a forma das partículas tem grande influência sobre suas propriedades. As partículas arredondadas ou, mais exatamente, com forma poliédrica são as que predominam nos pedregulhos, areias e siltes. Partículas lamelares, isto é, semelhantes a lamelas ou escamas são as que se encontram nas argilas.

Propriedades como, por exemplo, a compressibilidade e a plasticidade dependem da forma das partículas de areia. As areias que contêm uma percentagem acentuada de mica, torna-se, por isso muito elásticas.

Atividade de fração argilosa

Uma dada fração de argila presente em um solo pode transmitir a este, em maior ou menor grau, um determinado comportamento argiloso, ou seja, maior ou menor plasticidade e coesão. O impacto nestas propriedades dependerá da natureza mineralógica e íons absorvidos da fração argilos do solo.

A medida da atividade da fração argilosa no solo é feita, segundo Skempton, pelo índice de atividade do solo (Ia) definido como a relação entre o seu índice de plasticidade e a porcentagem de argila (grãos de diâmetro inferior a 0,002 mm).

$$I_a = \frac{IP}{\% \phi < 0,002 \text{ mm}}$$

Segundo VARGAS (1978) este índice pode servir, então, como indicação da maior ou menor influência das propriedades mineralógicas e químico-coloidal, da fração das propriedades geotécnicas de um solo argiloso.

Umidade

É a razão do peso da água contida em um certo volume de solo e o peso da parte sólida existente neste volume, expressa em percentagem, ou seja:

$$h = \frac{Pa}{Ps} * 100, \text{ onde:}$$

h = umidade (%)

Pa = peso da água

Ps = peso da parte sólida

Absorção

A absorção de elementos ou componentes de solo estabilizado é medida fazendo-se secar corpos de prova em estufa à temperatura entre 105 °C e 110 °C até constância de peso, obtendo-se assim o peso seco. Em seguida o corpo de prova é imerso em um tanque aonde permanece durante 24 horas. Retira-se o corpo de prova do tanque, efetuando-se a pesagem para a determinação do peso saturado. A diferença entre o peso saturado e o peso seco em relação ao peso seco expressa a absorção de água do elemento ou componente estudado.

Peso específico seco

É a razão entre o peso da parte sólida e o volume total ocupado pela parte sólida e a líquida, ou seja:

γ_s = peso específico seco

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_t}, \text{ onde:}$$

P_s = peso da parte sólida

V_t = volume total ocupado pela parte sólida, líquida e gasosa

Na prática, geralmente, determina-se o peso específico úmido (γ_h) que é expresso pela razão do peso parte sólida e da parte líquida do solo e o volume total ocupado por estes. Para se determinar o peso específico seco basta dividir o peso específico úmido pela umidade acrescida da umidade:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \frac{h}{100}}, \text{ onde:}$$

γ_s = peso específico seco

γ_h = peso específico úmido

h = umidade

Porosidade

É a razão entre o volume de vazios (parte líquida + gasosa) e o volume total da amostra de solo, ou seja:

$$n \% = \frac{V_v}{V_t} * 100, \text{ onde:}$$

n = porosidade (%)

V_v = volume de vazios

V_t = volume total

Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele (CAPUTO, 1980). O coeficiente de permeabilidade expressa a maior ou menor dificuldade que o solo opõe à percolação d'água através de seus poros. O Quadro III.1 apresenta a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade dos solos.

Grau de permeabilidade	Tipos de solos	Coeficiente de permeabilidade a 20 ^o C(cm/s)
Alta	Pedregulhos	$> 10^{-1}$
Média	Areias	10^{-1} a 10^{-3}
Baixa	Siltes+Argilas	10^{-3} a 10^{-5}
Muito Baixa	Argilas	10^{-5} a 10^{-7}
Baixíssima	Argilas	$< 10^{-7}$

Quadro III.1 - Ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade dos solos (VARGAS, 1978).

Um fenômeno importante que afeta diretamente às construções com solo estabilizado é a ascensão capilar. Neste fenômeno os poros, entre os grãos de solo, formam canalículos capilares. A água ascende até uma determinada altura, contra a gravidade, tanto maior quanto menor o diâmetro. Conseqüentemente quanto mais argilos é o solo, maior é a argila de ascensão capilar. Por esta razão deve-se isolar as paredes de solo estabilizado das fundações que estão em contato direto com o terreno.

Plasticidade

A plasticidade é normalmente definida como uma propriedade dos solos, que consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados sob certas condições de umidade, sem variação de volume (CAPUTO, 1980).

O comportamento plástico fundamenta-se nas características tensão-deformação, um corpo plástico não recupera seu estado original ao cessar a ação deformante.

Os solos apresentam uma fase elástica e outra plástica. A predominância de uma sobre a outra depende da intensidade das forças aplicadas e, também, do grau de precisão das observações efetuadas. A plasticidade de um solo, a exemplo dos limites entre os diferentes estados de consistência, são determinados através de ensaios efetuados na fração fina do solo (diâmetro dos grãos menor que 0,4 mm). A quantidade de água, expressa em percentagem, que corresponde ao limite de transição entre o estado de consistência fluida e o de consistência plástica é conhecido como limite de liquidez (LL), nesta umidade o solo começa a manifestar uma certa resistência ao cisalhamento. A transição entre o estado plástico e o semi-sólido é conhecida como limite de plasticidade (LP), a partir desta umidade o solo torna-se quebradiço. Já a transição entre o estado semi-sólido e o estado sólido é conhecida como limite de contração (LC). A diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade é conhecida como índice de plasticidade (IP).

Elasticidade

É a propriedade de um solo de diminuir de volume quando uma pressão é aplicada e retornar ao volume inicial, ou perto dele, quando a pressão é removida (UNITED NATIONS, 1964).

Compressibilidade

É a propriedade que alguns solos possuem de diminuir de volume quando solicitados por pressões exercidas sobre eles. Esta pressão possui o efeito de reduzir a porosidade dos solos através da diminuição do volume de vazios (UNITED NATIONS, 1964).

Compacidade

A compacidade é uma característica da maior ou menor densidade dos solos não coesivos. Só para esse tipo de solos pode-se falar efetivamente em maior ou menor compacidade, no sentido de apresentar-se ele mais "compacto" (denso) ou mais "fofo" (solto) (VARGAS, 1978).

A compacidade quantificada pelo *grau de compacidade* ou *densidade relativa*:

$$Dr = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{mín}}, \text{ ou;}$$

$$Dr = \frac{\gamma_s - \gamma_{s_{mín}}}{\gamma_{s_{máx}} - \gamma_{s_{mín}}} * \frac{\gamma_{máx}}{\gamma}, \text{ onde:}$$

$e, e_{máx}, e_{mín}$ - índice de vazios, máximo e mínimo;

$\gamma_s, \gamma_{s_{máx}}, \gamma_{s_{mín}}$ - peso específico seco, máximo e mínimo;

Compactação

É o processo pelo qual se comunica ao solo não só a densidade e resistência como também, e principalmente, estabilidade (VARGAS, 1978).

Os modos de compactação empregados na confecção de elementos ou componentes da construção podem ser estáticos (prensas manuais ou mecânicas), dinâmicos (soquetes manuais ou pneumáticos) ou por amassamento.

Através do ensaio de compactação, identificado por PROCTOR (1933), pode-se determinar experimentalmente a correlação entre a massa específica seca (γ_s) de um solo e a umidade (h) e a energia utilizada para a compactação do mesmo. Através deste ensaio chega-se a conclusão de que existe uma umidade, denominada umidade ótima para cada energia de compactação, que corresponde a uma densidade máxima do solo. Para qualquer solo ou modo de compactação a medida que se aumenta a energia de compactação a umidade ótima diminui e o peso específico máximo aumenta.

Solos com graduação uniforme não atingem peso específico seco máximo elevados, ao contrário dos solos bem graduados de granulometria contínua que atingem níveis maiores.

Os efeitos principais da compactação são:

- O aumento do número de contatos entre as partículas do solo;
- a diminuição da proporção de vazios do solo, consqüentemente diminuição da porosidade do solo;

Nos solos argilosos a pequena dimensão dos grãos e grande superfície específica lhes confere um comportamento particular: conforme a importância relativa das forças de atração e de repulsão, são observados dois tipos fundamentais de estrutura:

- A estrutura dispersa corresponde à predominância das forças de repulsão. As placas de argila mantêm uma distância entre as outras tendendo a ficar paralelas;

- a estrutura floculada corresponde à predominância das forças de atração. As placas de argila se aproximam entre si formando ângulos.

O estado floculado corresponde, geralmente, a teores de umidade abaixo da ótima, enquanto o estado disperso a teores de umidade acima da ótima.

Os efeitos de uma compactação efetuada sob boas condições se traduzem na diminuição da permeabilidade, da compressibilidade, da absorção de água e inchamento e no aumento das resistências mecânicas iniciais (após moldagem) e a longo prazo. Alguns destes melhoramentos são favorecidos por uma compactação no ramo seco, enquanto outras se manifestam com a compactação no ramo úmido.

Segundo Houben et alii (1979) a permeabilidade é mínima quando se compacta o solo na umidade ótima e aumenta com a compactação o ramo seco.

Desde que o esforço de compactação exercido não ultrapasse um determinado valor, um solo com estrutura floculada é muito mais compressível que o mesmo material com estrutura dispersa. Por outro lado, caso o esforço de compactação seja suficiente para permitir o rearranjo das partículas, os dois materiais tendem ao mesmo estado disperso e a deformação será idêntica. Quando for retirada a força o material expande. Essa expansão é muito importante pois resulta na laminação do solo, observada em tijolos e blocos confeccionados em prensas que trabalham com pressões muito elevadas. Por esta razão deve-se limitar a pressão de moldagem em 4 a 6 MN/m² (Houben et alii).

A absorção de água é maior quando se compacta o solo no estado floculado mínimo no estado disperso. Elementos ou componentes destinados a trabalhar em ambientes secos devem ser compactados com unidades do ramo seco da curva de compactação. Já quando estes forem utilizados em um meio úmido devem compactados com teores de umidade mais elevados, no ramo úmido.

A resistência mecânica inicial, logo após a compactação, possibilita uma rápida desmoldagem e manipulação dos elementos. Constitui um parâmetro importante e é máxima para uma compactação realizada no ramo seco (HOUBEN et alii, 1979).

A resistencial mecânica a longo prazo é diretamente ligada a massa específica seca do material. Quanto a umidade de moldagem HOUBEN et alii (1979) sugere que se compacte o solo na umidade ótima ou em teor vizinho.

Quando o solo encontra-se com uma umidade próxima da saturação, a incompressibilidade da água proporciona um sensação ilusória de acréscimo de compacidade. Neste estado a compactação não produz um rearranjo das partículas.

O modo de compactação infui intensamente na resistência final do material. A figura III.1 representa qualitativamente a incidência do modo de compactação. Nesta figura relacionam-se a resistência do material para a um esforço de compactação que proprociona uma deformação no corpo de prova de 5 %. Obtiveram-se os melhores resultados através da compactação com prensas e soquetes pneumáticos, respectivamente, 3 e 5 vezes as resistências obtidas com a amostra compacta com soquetes manuais.

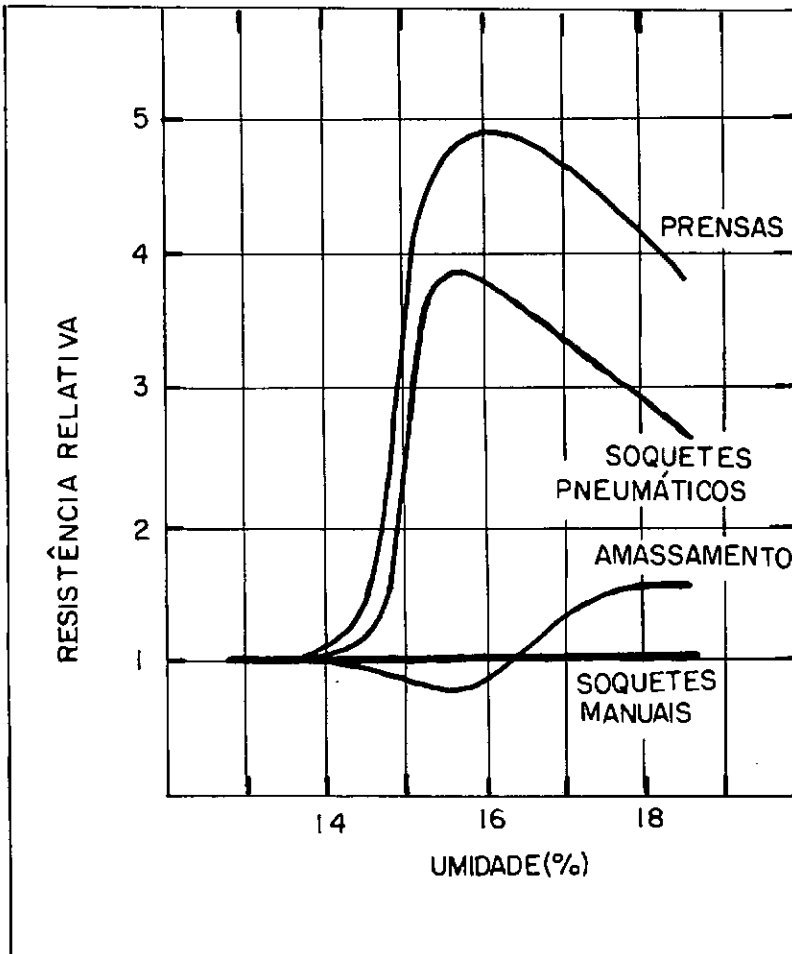


Figura III.1 - Resistências relativas para uma deformação dos corpos de prova de 5 % (HOUBEN et alii, 1994).

Consistência

Segundo VARGAS (1978) a consistência refere-se sempre aos solos coesivos e é definida como a maior ou menor dureza e que a argila é encontrada na natureza.

A dureza de um solo argiloso varia na razão inversa do seu teor de umidade, isto é, à medida que a umidade da massa argilosa diminui, a argila vai-se tornando mais dura.

Coesão

É uma propriedade da fração argilosa do solo de manter unidas as partículas quando se lhes impõem tensões de tração. A coesão pode ser devida a cimentos naturais que aglutinam os grãos entre si; pela ligação de grãos, muito próximos uns dos outros, exercido pelo potencial atrativo de natureza molecular ou coloidal, este potencial exerce pressões elevadas também na água intersticial formando uma camada de água adsorvida em estado sólido que envolve os grãos, esta é a origem do que se convencionou chamar *coesão verdadeira*; e, finalmente, devido ao efeito da pressão capilar na água intersticial, conhecida por *coesão aparente* (VARGAS, 1978).

Atrito interno

É uma definição genérica, inclui-se não só o *atrito físico* entre as partículas, como o *atrito fictício* proveniente do entrosamento de suas partículas; nos solos não existe uma superfície nítida de contato, ao contrário há uma infinidade de contatos pontuais (CAPUTO, 1980).

Escala Internacional

Pedregulho	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
2 mm	0,2 mm	0,02 mm	0,002 mm	

Escala da ABNT

Pedregulho	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila
5 mm	2 mm (# 10)	0,4mm (# 40)	0,05 mm	0,005 mm	

Escala da ABCP

Pedregulho grosso	Pedregulho fino	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
76 mm	4,8 mm	2,0 mm	0,42 mm	0,05 mm	0,005 mm

Figura III.2 - Faixas das dimensões das partículas nos diversos sistemas de classificação de solos.

III.2.3 Composição da fase sólida dos solos

Pedras de mão

Também conhecida por *rachão*, possuem diâmetro compreendido entre 7,6 e 25,0 cm (ABNT, 1982). Constituem-se de material grosseiro resultante da desintegração da rocha mãe, da onde vem suas características básicas. Também pode constituir material transportado, como as pedras transportadas pelos rios (seixos rolados) ou geleiras apresentando formato arredondado.

Pedregulhos

O diâmetro dos pedregulhos ou cascalhos varia de 4,8 a 76,0 mm (ABNT, 1982). Constituem-se de grãos de material grosseiro, resultado da desintegração da rocha mãe ou das pedras. Também podem ser transportados pelas correntes dos rios e portanto possuem a forma arredondada, embora também existam pedregulhos de forma angulosa. Os pedregulhos constituem o esqueleto do solo e impõe um limite para a capilaridade e retração.

Areias

O diâmetro das areias varia de 0,05 até 4,8 mm (finas - 0,05 a 0,42 mm; médias - 0,42 a 2,00 mm; grossas - 2,00 a 4,80 mm). Constituem-se na maioria das vezes de grãos de sílica ou quartzo. Algumas areias de praia contém carbonato de cálcio proveniente de fragmentos de conchas. As areias são os componentes do solo marcados pelo elevado atrito interno, permeabilidade alta (10^{-1} a 10^{-3} cm/s), expansão e retração baixas.

Siltes

A faixa granulométrica dos siltes esta compreendida entre 0,002 e 0,05 mm. Do ponto de vista físico-químico os siltes são idênticos às areias, a única diferença está nas dimensões. Os siltes transmitem ao solo estabilidade aumentando o atrito interno. Os filmes de água entre as partículas dos siltes garantem uma certa coesão aos solos siltosos. Os siltes possuem uma permeabilidade (10^{-3} a 10^{-5}

cm/s) que os torna bastante sensíveis ao congelamento. Estão sujeitos em pequenas proporções à expansão e retração.

Argilas

As argilas possuem diâmetro inferior a 0,002 mm, distinguem-se dos outros componentes do solo pela sua composição química e propriedades físicas. São silicatos de alumínio hidratados formados pelo processo de lixiviação que atua nos minerais primários das rochas. Possuem a forma de placas alongadas, sua superfície específica é superior aos das partículas grosseiras que possuem forma arredondada ou angulosa. As argilas são muito suscetíveis a expansão e retração.

Colóides

As areias estão frequentemente revestidas por uma espécie de pasta adesiva que mantém estas partículas unidas. Esta pasta adesiva é constituída de colóides, a dimensão destas partículas é menor que 0,002 mm. Algumas destas partículas são resultantes do intemperismo da rocha mãe. São colóides minerais, cujos principais são as argilas, porém não os únicos. Estão frequentemente misturados a "debris" muito finos de quartzo, sílica hidratada, cristais extremamente finos de rocha calcária e colóides magnesianos, como também o ferro coloidal e os óxidos de alumínio. Outros colóides são resultantes da decomposição da matéria orgânica, estes são os colóides orgânicos, como o húmus e as colônias de bactérias.

III.2.4 Identificação expedita dos solos

Amostragem

A coleta de amostras de solo pode ser feita utilizando trados manuais ou mecânicos montados sobre um caminhão. Utilizando hastes extensoras pode-se alcançar profundidades entre 5 a 6 m. O diâmetro dos trados varia de 6 a 25 cm, seu peso é de 5 kgf, aumentando de 3 kgf por cada metro de haste de extensão. A principal desvantagem do equipamento é o risco de se misturar o solo de camadas superficiais com aqueles de camadas inferiores.

Alternativamente pode-se escavar um poço, com diâmetro de 1 m, ou uma trincheira, que deve ser orientada convenientemente em relação ao sol de maneira

a facilitar a observação. Deve-se tomar precauções com a segurança dos trabalhadores, quanto possíveis desmoronamentos, quando se estiver trabalhando com solos pouco coesivos.

As amostras também podem ser coletadas em taludes naturais onde interfaces das camadas de solo forem claramente visíveis. Deve-se ter o cuidado de remover toda a vegetação e a matéria orgânica da superfície.

A princípio, 1,5 kgf de solo são suficientes para os ensaios básicos de caracterização dos solos, ensaios de compactação executados na própria prensa de ensaio requerem de 10 kgf (tijolos de 5 x 11 x 23 cm) a 50 kgf (blocos 20 x 15 x 40 cm). Ensaios de resistência à compressão e absorção utilizados na dosagem das misturas requerem 20 kgf (tijolos) e 90 kgf (blocos). A quantidade de solo que constituirá a amostra dependerá do número de ensaios que serão realizados, da acurácia desejada dos resultados (reprodutibilidade e repetibilidade), despesas e dificuldades envolvidas (o custo dos ensaios é freqüentemente dependente da qualidade da amostra de solo ensaiada) e, finalmente, o diâmetro das partículas do solo (solos de granulometria grossa requerem volumes de amostra maiores que os solos finos).

Uma amostra de boa qualidade deve ser representativa da jazida de solo estudada. Para garantir que a amostra coletada seja representativa da jazida, deve-se fazer um esforço para garantir que os seguintes princípios sejam observados:

- Devem ser tomados cuidados para prevenir a contaminação do solo devido a mistura de amostras de outros horizontes;

- não se deve retirar nem adicionar nada à amostra, não se deve tentar melhorar o seu estado natural;

- deve-se retirar amostras somente de uma área restrita, ou seja, a amostra é representativa de uma determinada área;

- se a jazida for heterogênea, não se deve misturar o solo achando que assim estará se obtendo parâmetros médios. Retire mais amostras de pontos diferentes;

- para quartear uma amostra proceda da seguinte forma: despeje a amostra coletada por sobre uma lona plástica, formando um cone de solo. Com o auxílio de uma enxada, divida o cone em quatro partes e descarte dois dos setores opostos, forme um novo cone com o material restante, repetindo a operação anterior até se obter o volume de amostra desejado.

Ensaio expedito

Antes de se levar amostras das jazidas ao laboratório, o que só é viável no caso de produção à níveis elevados de blocos ou tijolos, deve-se proceder ensaios rápidos de identificação, realizados no campo, que permitem avaliar algumas das propriedades do solo e, assim, determinar quais solos são provavelmente mais apropriados a serem usados na produção de elementos. Para a produção em pequena escala, utilizando prensas manuais, estes ensaios constituem a única ferramenta de caracterização de uma jazida.

(a) Exame visual do solo

O solo seco é examinado a olho nu de modo a estimar as proporções relativas entre areia e as frações finas do solo. Pedras, pedregulhos e areia grossa devem ser removidos para facilitar a avaliação. A fração fina é constituída por grãos com diâmetros menores que 0,074 mm. Este diâmetro corresponde ao limite do poder de resolução do olho humano.

Os pedólogos quando estudam visualmente as características morfológicas dos horizontes de solo identificam a cor do solo comparando-a com uma escala padrao de cores, conhecida como escala de Munsell. Outras características que podem ser distinguidas visualmente são: a estrutura do solo, porosidade, cerosidade e eflorescências (LEMOS & SANTOS, 1982).

(b) Exame do solo pelo odor

O odor da amostra de solo deve ser sentido imediatamente após sua retirada do terreno. Um odor de mofo indica que o solo contém matéria orgânica. O odor se torna mais forte se o solo for aquecido ou umedecido.

(c) Exame do solo através da "mordidela"

Muito cuidado deve ser tomado para que seja seguro colocar qualquer amostra na boca. Deve-se morder uma pitada de solo, esmagando-a levemente com os dentes. O solo será arenoso se ao ser triturado, provocar uma sensação desagradável. O solo será siltoso se puder ser triturado pelos dentes sem causar

sensação desagradável. Solos argilosos dão sensações de "maciez ou farinha", e aderem em contato com a língua.

(d) Exame do solo pelo tato

Depois de remover todos os grãos maiores destorree a amostra esfregando-a com a ponta dos dedos e as palmas das mãos. O solo será arenoso se a sensação for de aspereza e se não manifestar coesão quando umedecido. O solo será siltoso quando apresentar uma sensação de leve aspereza e for moderadamente coesivo quando umedecido. O solo é argiloso se, quando seco, contiver torrões ou concreções que resistem ao esmagamento, e se torna plástico e aderente quando umedecido.

Examinando o solo através do tato pode-se avaliar a textura do solo: a areia dá sensação de atrito, o silte, de sedosidade e a argila, de plasticidade e pegajosidade. Também é possível avaliar a consistência, detectar a cimentação, nódulos e concreções minerais (LEMOS & SANTOS, 1982).

(e) Ensaio simplificado de sedimentação

O ensaio de sedimentação simplificado permite obter uma ideia mais exata das frações constituintes da amostra de solo. Pode ser efetuado no campo e o aparato requerido consiste em em um frasco cilíndrico e transparente, fundo plano, com capacidade para no mínimo um litro e a boca deve ser suficientemente larga para permitir o acesso de uma mão e estreita o necessário para ser vedada com uma mão. O procedimento de ensaio consiste nos seguintes passos:

- Encher o frasco até um quarto de sua capacidade com solo;
- completar o volume do frasco com água;
- balançar o frasco para ajudar a saturar o solo;
- fechar o frasco e agitando-o vigorosamente;
- Deixar decantar até desaparecer a turbidez da água;
- decorrida uma hora agite e decante novamente;
- após pouco mais de 45 minutos, a areia poderá ser vista depositada no fundo do frasco. Acima dela uma camada de silte e acima do silte uma camada de argila. Na superfície da água flutuam restos de matéria orgânica, enquanto colóides muito finos permanecem em suspensão na água. Normalmente deve-se deixar

transcorrer oito horas antes de se medir as alturas das diferentes camadas precipitadas. Primeiro deve-se medir a altura total de sedimento, excluindo a espessura de água que o cobre, depois deve-se medir cada camada separadamente.

A medida das espessuras de sedimento possibilita estimar a percentagem de cada fração de solo. As percentagens calculadas estarão ligeiramente distorcidas tendo em vista que as frações de silte e argila expandem apresentando-se um pouco maiores do que realmente são.

(f) Exame do solo através do brilho

Corta-se, com uma faca em duas metades, um bolo de solo ligeiramente umedecido. Se a face revelada for opaca, o solo possui em predominância a fração silte. Por outro lado, uma superfície brilhante indica a presença preponderante da fração argila.

(g) Exame da adesão do solo

Toma-se uma porção de solo úmido não apresentando aderência aos dedos e introduz-se uma espátula ou uma faca em seu interior. O solo será argiloso se a espátula penetrar com dificuldade e o solo aderir à lâmina quando retirado. O solo será moderadamente argiloso, se o solo não oferecer grandes dificuldades à introdução da espátula e aderir à lâmina quando retirada. O solo contém pouca argila se a espátula não encontrar nenhuma resistência e a espátula estiver limpa após sua retirada.

(h) Ensaio de lavagem

Lavam-se as mãos após o manuseio de uma porção de solo ligeiramente umedecida. O solo será arenoso se as mãos forem lavadas facilmente, ficando limpas. O solo será siltoso se sua aparência for pulverulenta e as mãos ficarem limpas, quando lavadas sem muita dificuldade. O solo será argiloso se ao lavar-se as mãos estas ficarem limpas com dificuldade, sentindo-se a plasticidade da argila.

(i) Ensaio de retração

O teste da retração linear, ou teste de ALCOCK, é realizado com ajuda de uma caixa de madeira com 60 cm de comprimento, 4 cm de largura e 4 cm de altura. Nas superfícies internas da caixa deve ser aplicado um óleo lubrificante antes de ser preenchida com solo na umidade ótima. Com uma espátula de madeira deve-se pressionar o solo nos cantos da caixa, além de alisar a superfície. A caixa com solo é, então, exposta ao sol por um período de três dias, ou deixada à sombra durante 7 dias. Depois deste período a massa de solo seca e endurecida é empurrada para um canto da caixa e a retração total do solo é, então, medida.

(j) Análise da fração fina dos solos

Os ensaios descritos a seguir são realizados na fração fina dos solos obtida por peneiramento na peneira de malha 2,0 mm, ou sifonando-se o material decantado no ensaio simplificado de sedimentação. O quadro III.2 apresenta as características observadas em cada ensaio e identificação dos solos a partir da interpretação destas características. Havendo condições técnicas de se identificar e classificar um solo de acordo com a Classificação Unificada de solos, pode-se consultar o Quadro III.3 onde é possível ter uma indicação da adequação ou não do emprego deste solo em seu estado natural na produção de elementos ou da construção. Além disso, é apresentada a suscetibilidade ou não deste solo à estabilização física.

(i) Ensaio de resistência seca - Umidecendo a fração fina do solo moldam-se duas ou três pastilhas, deixando-se secar ao sol ou em um forno até secar completamente. Estime a resistência dos torrões formados pressionando-os, até quebrar, entre o indicador e o polegar.

(ii) Ensaio de retenção de água - Prepara-se uma bola com 2 ou 3 cm de diâmetro com a fração fina do solo. Umidece-se a bola até que ela ganhe coesão mas não manifeste aderência aos dedos. Achate-se, delicadamente, a bola na palma da mão. Bate-se vigorosamente na amostra até que haja exudação da água, neste instante anotar se a aparência do solo é lisa, brilhosa ou gordurosa. Finalmente pressiona-se o solo entre o indicador e o polegar e observa-se as reações.

(iii) **Ensaio de consistência** - Prepara-se uma bola com 2 ou 3 cm de diâmetro com a fração fina do solo. Deve-se umidecer a mistura não a deixando ficar pegajosa. Rola-se a bola, com a palma da mão, em uma superfície plana e limpa até lentamente ir assumindo a forma cilíndrica. Se o cilindro se quebrar antes de alcançar 3 mm, o solo está muito seco e deve-se adicionar água e remoldar o cilindro. Este deve romper-se quando atingir 3 mm, quando isso ocorrer molda-se reconstituindo a bola e observando o seu comportamento durante a remoldagem.

Ensaio de coesão - Molda-se com a fração fina do solo um cilindro com o tamanho aproximado de uma salsicha e 12 mm de diâmetro. O solo não deve ficar pegajoso devendo permitir ser conformado continuamente até atingir 3 mm cuidadosamente com os dedos polegar e indicador, a partir de uma das extremidades, conformando uma fita com largura entre 3 e 6 mm o mais longa possível. Mede-se o comprimento obtido antes que a fita quebre.

III.3 Princípios de estabilização de solos

III.3.1 Considerações básicas

O problema fundamental

Construir habitações com solo implica uma escolha entre três proposições:

- usar o solo disponível junto à área onde se pretende construir as moradias, adaptando-se o projeto tanto quanto for possível à qualidade do solo;
- usar um outro solo mais adequado aos requerimentos do projeto mas que tenha que ser transportado até a área onde se deseja construir;
- modificar o solo local de forma a torna-lo mais adequado aos requerimentos do projeto.

A terceira possibilidade se refere, geralmente, a estabilização de solos e compreende o conjunto de técnicas que possibilitam o melhoramento das propriedades do solo.

OBSERVAÇÕES	INTERPRETAÇÕES
ENSAIO DE RESISTÊNCIA SECA	
Resistência seca alta	Um torrão seco é muito difícil de quebrar. Quando quebra; desloca-se como um biscoito seco. O solo não pode ser esmagado entre o polegar e o indicador, simplesmente espedaça-se, nunca em pó: argilas quase pura.
Resistência seca moderada	Um torrão não é tão difícil de quebrar. Pode ser esmagado até virar pó com pequeno esforço entre o indicador e o polegar: siltos orgânicos arenosos.
Resistência seca baixa	Um torrão pode ser facilmente quebrado e reduzido a pó sem dificuldade entre o polegar e o indicado: siltos ou areias finas, baixo teor de argila.
ENSAIO DE RETENÇÃO DE ÁGUA	
Reação rápida	5 ou 6 golpes são suficientes para trazer água até a superfície. Quando pressionada a água desaparece e a bola despedaça-se: areias muito finas ou siltos grossos.
Reação lenta	20 a 30 golpes são necessários para trazer a água até a superfície. Quando pressionada a bola não apresenta fissura e nem espedaça-se: siltos ligeiramente plásticos ou argilas siltosas.
Reação muito lenta ou ausência total de reação	Nenhuma água na superfície. Quando pressionada a bola mantém sua aparência brilhante: solo argiloso.
ENSAIO DE CONSISTÊNCIA	
Cilindro rígido	A pequena bola reconstruída é difícil de esmagar: alto teor de argila.
Cilindro mediantemente rígido	A pequena bola reconstruída tende a fissurar e espedaçar-se: percentual de argila baixo.
Cilindro frágil	É impossível moldar uma bola pequena do cilindro sem que este quebre ou despedace-se: percentuais elevados de silte ou areia, muito pouca argila.
Cilindro mole ou absorvente	O cilindro e a bola reconstituída possuem uma aparência mole ou absorvente: solos orgânicos.
Ensaio de coesão	
Fita longa (25 a 30 cm)	Percentagem alta de argila
Fita curta (5 a 10 cm obtidos com dificuldade)	Percentagem baixa de argila
Não conforma uma fita	Percentagem muito baixa de argila

Quadro III.2 - Características observadas em ensaios expeditos e a interpretação dos solos através destes (UNCHS,1986).

Solo	Retração e expansão	Sensibilidade a ação do gelo	Peso específico máximo (kN/m ³)	Índice de vazios $\delta = 2,7$	Resistência à compressão seca	Adequação em geral sem estabilização e suscetibilidade do solo à estabilização física.
GW-Pedregulho Limpo bem graduado	quase nula	quase nula	20,0	0,35	-----	Não adequado. Devem-se acrescentar solos finos.
GP-Pedregulho Limpo mal graduado	quase nula	quase nula	18,4	0,45	-----	Não adequado. Devem-se acrescentar solos finos.
GM-Pedregulho Siltoso	quase nula	pequena a média	17,6	0,50	-----	Adequado mas falta coesão. Facilmente erodível. Acrescentar solos finos.
GC-Pedregulho Argiloso	pequena	pequena a média	19,2	0,40	-----	Adequado. Algumas deve-se acrescentar solos finos.
SW-Areia limpa graduada	quase nula	quase nula	19,2	0,40	-----	Não adequado. Devem ser acrescentados solos finos.
SP-areia limpa mal graduada	quase nula	quase nula	16,0	0,70	-----	Não adequado. Devem ser acrescentados solos finos.
SM-areia siltosa	quase nula	pequena a alta	16,0	0,70	-----	Adequado mas falta coesão. Facilmente erodível. Acrescentar solos finos.
SC-areia argilosa	pequena e média	pequena a alta	17,0	0,60	-----	Adequado. Algumas deve-se acrescentar solos finos.
CL-areia de baixa plasticidade	média e alta	pequena a alta	15,2	0,80	leve a alta	Algumas vezes adequado. Solos arenosos devem ser acrescentados.
ML-silte pouco plástico	pequena a alta	média a muito alta	16,0	0,70	pequena	Adequado, mas perde coesão eventualmente.
OL-silte orgânico e argilas de baixa plasticidade	média a alta	média a alta	14,4	0,90	-----	Não adequado. Algumas vezes aceitável.
CH-argilas de alta plasticidade	alta	muito pequena	14,4	0,90	média a muito alta	Raramente adequado. Devem ser acrescentados solos arenosos.
MH - Silte muito plástico	alta	média a alta	16,0	0,70	muito pequena a média	Muito raramente adequado.
OH-Orgânico muito plástico	alta	muito alta	16,0	0,70	média a alta	Não adequado.
PT-Turfa	muito alta	pequena	-----	-----	-----	Adequado como tijuco.

Quadro III.3 - Adequação dos solos naturais ao emprego na habitação (UNCHS, 1986).

Definição

Estabilizar solos implica na modificação das propriedades do sistema solo-água-ar de maneira a obter propriedades duradouras que devem ser compatíveis com uma aplicação particular. A estabilização é, todavia, um problema complexo, e um número extremamente amplo de parâmetros estão envolvidos. De fato é importante o conhecimento dos seguintes condicionantes:

- Propriedades do solo que requer estabilização;
- as melhorias nas propriedades requeridas pelo solo;
- custos e prazos envolvidos na estabilização dos solos;
- o sistema e as técnicas de construção escolhidos para o projeto;
- custos de manutenção do projeto.

O melhoramento das propriedades do solo através da estabilização alcançará sucesso se o procedimento utilizado for compatível com as condicionantes do programa, em particular os custos e prazos de construção e os custos de manutenção.

Objetivos

A ação de estabilização pode ser direcionada para somente duas características do solo: a textura e a estrutura. Existem três meios de ação:

- Reduzir o volume de vazios, isto é atuar na porosidade;
- preencher os vazios que não podem ser eliminados, isto é atuar na permeabilidade;
- melhoramento das cimentações entre os grãos, isto é atuar na resistência mecânica.

Os principais objetivos visados são:

- Alcançar melhores características mecânicas: melhorando as resistências à compressão seca e molhada, a resistência à tração e a resistência ao cisalhamento;
- melhorar a coesão;
- redução da porosidade e as variações de volume: retração e expansão devido a ação da água;

Procedimentos

Existem três procedimentos básicos para a estabilização de solos:

(a) Estabilização mecânica - consiste basicamente na compactação do solo que resulta em mudanças na densidade, resistência mecânica, compressibilidade, permeabilidade e porosidade.

Na execução de paredes monolíticas ou na confecção de tijolos ou blocos, este modo de estabilização está sempre presente através do apiloamento (compactação dinâmica) ou da prensagem (compactação estática), respectivamente.

(b) Estabilização física - nesta as propriedades do solo podem ser modificadas atuando-se na textura - mistura de solos com diferentes frações granulométricas. Outras técnicas podem envolver tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico, eletro-osmose que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos.

(c) Estabilização química - neste procedimento outros materiais ou produtos químicos são adicionados ao solo, desta forma modificando as propriedades através das reações físico-químicas entre os grãos e os materiais ou produtos adicionados ou pela criação de uma matriz que cimenta ou envolve os grãos. As reações físico-químicas podem resultar na formação de novos materiais.

Quando a estabilização química é requerida?

Ao longo deste texto o termo estabilização é empregado quando se conjugam dois ou mais procedimentos de estabilização, ou seja, estabilização mecânica e física, mecânica e química ou mecânica, química e física.

A estabilização química não é obrigatória, alguns solos podem ser utilizados na construção sem serem estabilizados. Todavia, atualmente, existe uma clara tendência ao uso indiscriminado da estabilização química, considerada uma panacéia universal para todos os problemas. Tal atitude pode ser inoportuna já que a estabilização química pode envolver custos extras, variando de 30 a 50 % do custo final do elemento ou componente. Além disso a estabilização química gera trabalho adicional na produção dos elementos ou componentes da construção.

E aconselhável insistir que a estabilização química seja utilizada quando for absolutamente essencial e deve ser evitada onde os recursos econômicos forem limitados.

Segundo o manual do UNCHS (1986) não se deve estabilizar quimicamente o solos quando estes forem utilizados em elementos ou componentes não expostos à ação da água, tais como paredes protegidas ou revestidas, paredes internas, emfim em ambientes cuja arquitetura foi projetada de forma a acomodar as exigências do solo como material de construção. Por outro lado a estabilização química é recomendada quando os elementos e componentes forem expostos às intempéries, quando o projeto ignorar as regras básicas de construção com terra; ou quando houverem imposições climáticas ou do terreno, como a constução em terrenos alagadiços, paredes expostas às chuvas, etc.

III.3.2 Métodos de estabilização

(a) Densificação

Existem duas maneiras distintas com as quais se pode aumentar a densidade de um solo:

(i) **Compactação** - este processo normalmente conjugado a outros procedimentos de estabilização, não afeta a distribuição granulométrica do solo, porém a estrutura é transformada devido ao rearranjo das partículas do solo e eliminação do ar dos vazios.

RALPH PROCTOR em 1933 enunciou, pela primeira vez, que a densidade com que um solo é compactado, sob determinada energia de compactação, depende da umidade do solo no momento da compactação. A densidade máxima é alcançada para uma determinada umidade, conhecida como umidade ótima, a partir da qual o solo umidecido deixa de apresentar uma estrutura floculada para passar a uma estrutura dispersa. O aumento da umidade faz com que as forças atrativas entre as partículas que as ligam entre si, cantos ou arestas contra faces, formando flocos, sejam desfeitas passando os grãos a atuar como partículas dispersas em água (VARGAS, 1978)

(ii) **Preenchimento de vazios** - os vazios do solo são preenchidos, o máximo possível, com outros grãos, busca-se uma distribuição granulométrica contínua (solo bem graduado).

(b) Reforço

Se não existem razões para interferir na distribuição granulométrica de um solo, mas este apresentar-se excessivamente sensível a movimentos induzidos por

(b) Reforço

Se não existem razões para interferir na distribuição granulométrica de um solo, mas este apresentar-se excessivamente sensível a movimentos induzidos por várias causas, tais como: compressão, tração, ação da água, expansão térmica entre outras, pode-se neutralizar estes movimentos utilizando-se uma armadura. Esta pode ser feita a partir de uma grande variedade de fibras de animais, vegetais, minerais ou sintéticas. A armadura de fibra tem o seu efeito a nível macroscópico, isto quer dizer ao nível de um conjunto de grãos e não ao nível individual dos grãos.

(c) Construção

Pode-se introduzir no solo uma matriz tridimensional, resistente e inerte, capaz de restringir os movimentos do solo. Esta é, em essência, a ação consolidante da cimentação, resultante do preenchimento dos vazios com um ligante insolúvel que envolve os grãos fixando-os em uma matriz inerte. O principal estabilizante que atua através deste mecanismo é o cimento Portland. Resultados semelhantes podem ser obtidos utilizando-se soluções eletrolíticas de sais de silicato de sódio e certas resinas. A principal característica deste mecanismo de estabilização é que a formação da matriz inerte é relativamente independente da fração argila. De fato, as principais reações químicas de endurecimento ocorrem no próprio estabilizante e entre o estabilizante e a fração granular do solo. Mesmo assim, podem ser observadas reações secundárias entre o estabilizante e a fração argilosa. A quantidade e a qualidade da fração argilosa tem efeito na eficiência do processo de estabilização e podem alterar o comportamento mecânico do material.

(d) Ligação

Neste caso a matriz inerte introduzida no solo inclui a fração argilosa. Conhece-se dois mecanismos de ligação que resultam no mesmo resultado:

- uma matriz inerte é criada a partir das argilas, fazendo uso das propriedades elétricas de suas partículas ou de sua composição química, mantendo-as unidas através de um estabilizante, que assume o papel de ligante ou catalizador desta ligação. Alguns estabilizantes químicos atuam desta forma, incluem-se entre estes certos ácidos, polímeros, floculantes, etc.

- uma matriz inerte é formada pela fração argila. Um estabilizante reage com a argila e precipitando um material novo, inerte e insolúvel, uma espécie de

cimento. Esta é a chamada reação pozolânica que pode ser obtida com a cal. A reação se processa lentamente e depende essencialmente da quantidade e da qualidade da argila.

(e) Impregnação

Este método de estabilização age reduzindo a erosão do solo provocada pela expansão e retração quando o material é sujeito a ciclos sucessivos de molhagem e secagem. Existem dois métodos de impregnação possíveis:

- Todos os vazios, poros, fissuras e microfissuras são preenchidos com um material insensível à água. O asfalto é um dos melhores exemplos de estabilizante que atua desta forma. Este método de estabilização é particularmente adequado para solos arenosos com boa estabilidade para o seu volume e que não são muito afetados pelos movimentos da água. É igualmente apropriado para solos siltosos e argilosos que necessitam de uma grande quantidade de estabilizante por causa de sua grande superfície específica.

- o estabilizante é disperso no solo que expande a partir do menor contato com a água e evita a infiltração nos poros, este fenômeno é conhecido por tixotropia. A bentonita é um material que apresenta esta propriedade.

(f) Impermeabilização

Neste método o objetivo é impedir o movimento da água e do vapor d'água no interior do solo. Isto pode ser alcançado pela troca da natureza da água ou reduzindo a sensibilidade da argila a ação da água. Três sistemas são utilizados:

- Modificando-se a propriedade da água nos poros introduzindo-se cloreto de cálcio. Este aumenta a tensão superficial, reduz a pressão de vapor d'água e da taxa de evaporação e age, também, reduzindo a variação do teor de umidade;

- troca iônica: ions são substituídos por outros até que estes estejam bem fixados aos argilominerais, não podendo a água diluí-los. Certos ácidos podem provocar este fenômeno;

- moléculas são fixadas em uma das extremidades das lâminas dos argilominerais no exterior de agregados compactos. A outra extremidade destas moléculas são repelentes à água.

III.3.3 Suscetibilidade de um solo à estabilização

Solos indicados à estabilização com fibras e agregados minerais

O critério para a escolha de um solo a ser estabilizado com fibras ou minerais é acompanhado dos limites máximos de resistência a que estes materiais estão sujeitos e na qual eles podem ser utilizados com total segurança. Pode ser observado que estes materiais não podem trabalhar com taxas acima de $0,3 \text{ MN/m}^2$, para os solos estabilizados com fibras, e $0,5 \text{ MN/m}^2$ para os solos estabilizados com minerais. Certos solos não conseguem alcançar estes limites de resistência. Assim, os valores fornecidos por uma "curva de desempenho" não devem ser interpretados como valores permissíveis, mas como valores que em nenhum caso devem ser excedidos.

Existe um critério de utilização aplicável aos solos estabilizados com fibras e minerais. Este critério foi desenvolvido nos anos 40 como resultado de prolongada pesquisa de laboratório envolvendo um número grande de amostras. Estas observações de laboratório foram subsequentemente enriquecidas por uma massa de experiências práticas de construção. Todavia, estes critérios foram estabelecidos na Europa do Norte, e são aplicáveis aos solos desta região, que são do tipo siltosos (loess). É possível que este critério possa ser adotado para outros tipos de solo, mas somente após extensiva verificação (UNCHS, 1986).

Solos indicados à estabilização com cimento

Quase todos os solos, exceto aqueles que possuem um teor excessivo de matéria orgânica, podem ser tratados com cimento e assim sofrer drásticos melhoramentos em suas propriedades. Solos ricos em sal são também difíceis de estabilizar com cimento; mesmo assim, um incremento no teor de cimento pode frequentemente trazer bons resultados. Solos que possuem uma grande fração argilosa são misturados somente com muita dificuldade e requerem maiores quantidades de cimento. Quando o processo de dosagem de solos argilosos é controlado por laboratório, bons resultados podem ser alcançados. Na prática, entretanto, o cimento não é utilizado para estabilizar argilas quando o limite de liquidez é superior a 30 %. Tratamentos preliminares de solos, extremamente

argilosos, com cal hidratada aumentam a probabilidade de obter bons resultados com a adição de cimento em uma fase posterior (UNCHS, 1986).

A caracterização e classificação para os solos tropicais, MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), propostas por NOGAMI e VILLIBOR (1981), reúne os solos em dois grandes grupos: os de comportamento laterítico e os de comportamento não laterítico. Os solos lateríticos que em seu estado natural possuem estrutura granular, baixa plasticidade, coeficiente de permeabilidade e ângulos de atrito efetivo elevados, semelhantes aos dos solos arenosos. Entretanto, devido a sua estrutura são muito sensíveis à remoldagem mecânica, pois esta quebra a estrutura granular, o que aumenta a quantidade de finos e expõe maior área superficial para a absorção de umidade, gerando um aumento da plasticidade (MOURA, 1987). Por esta razão, o sistema HRB-AASTHO não considera solos com estas características próprios ao emprego como bases rodoviárias. O sistema de classificação MCT veio resgatar a boa experiência, em pavimentação rodoviária, com os solos lateríticos finos do interior de São Paulo.

Solos indicados à estabilização com cal

A cal possui apenas efeito limitado nos solos com alto teor de matéria orgânica (teores maiores que 20 %) e em solos pouco argilosos. É mais efetiva e pode ser mais efetiva que o cimento em solos argilo arenosos e solos muito argilosos. Tem sido observado que a cal reage muito mais rapidamente com argilas monmoriloníticas que com as caulínicas, reduzindo a plasticidade das monmorilonitas e possuindo apenas um leve efeito nas caulinitas. Os solos com baixo teor de sílica reativa (areias e siltes) quase não reagem com a cal às temperaturas ambientes; atingem rapidamente a resistência final, porém esta é pequena.

O teor de umidade possui um efeito significativo nos solos argilosos que podem ser estabilizados com cal, particularmente nos estágios de pulverização e compactação. Pozolanas naturais reagem particularmente bem com a cal.

Finalmente deve-se notar que as proporções estabelecidas para a dosagem da cal se aplicam a cales de qualidade industrial, onde os percentuais de cal virgem variam de 90 a 99 %. Cales produzidas por métodos menos sofisticados que podem conter somente 60 % de cal virgem (o percentual restante é de componentes resultantes de temperaturas superiores ou inferiores à calcinação) necessitam que a sua proporção na mistura seja incrementada (UNCHS, 1986).

Solos indicados à estabilização com asfaltos

Embora solos argilosos tenham sido tratados com sucesso com asfaltos diluídos ou emulsões asfálticas, a estabilização com asfaltos é mais adequada para solos arenosos ou solos areno-pedregulhosos, ou ainda para solos sem coesão ou quando um acabamento impermeável é particularmente desejado. Com solos arenosos extremamente limpos, a baixa aderência do betume com a superfície das partículas de sílica pode conduzir a separação do betume sob a ação da água, como resultado o efeito estabilizante do betume é consideravelmente reduzido. Solos úmidos não são em geral adequados a estabilização com betume, face a dificuldade de mistura dos deste com o solo.

A presença de sais solúveis no solo é o bastante para conduzi-lo a deterioração com resultado de sucessivas hidratações e desidratações. Os sais também têm a tendência a produzir eflorescências. Além disso, na presença de um estabilizante como o betume, eles podem ser muito prejudiciais aos filmes adesivos entre os betumes e as argilas. A presença de sais num solo que se pretende estabilizar com betume não deve, preferencialmente, exceder 0,25 % (UNCHS, 1986).

III.3.4 Características dos estabilizantes de solos

Fibras

A estabilização através do reforço com fibras, muito freqüentemente a palha, é largamente utilizada. A palha deve, de fato, ser considerada um agente de reforço estrutural similar a brita. As mais modernas instalações industriais, como as fábricas de adobes nos EUA, a palha combinada com o betume é freqüentemente adicionada ao solo. Este método de estabilização é interessante visto que pode ser adaptado a vários métodos de execução, com o solo em estado líquido ou plástico, ou ainda empregando técnicas de compactação. As fibras são principalmente empregadas na confecção de blocos por amassamento. Empregam solos muito argilosos que sem estas, geralmente, sofreriam trincas de retração. A produção artesanal de adobes estabilizados com palha varia muito, além disso outras técnicas como o torrões, pau-a-pique, tijolos e blocos prensados e as paredes monolíticas também podem utilizar a palha.

As fibras reduzem o número de fissuras do elementos através da distribuição das tensões, resultantes da retração da argila, por todo o volume do elemento. Aceleram a secagem pois aumentam a drenagem da água para a

superfície exterior através de canais deixados por elas. Por outro lado, as fibras aumentam a absorção na presença da água. Elas tornam o material mais leve. O volume de palha é geralmente muito grande, reduzindo o peso específico aparente e aumentando as propriedades isolantes. As fibras aumentam a resistência a tração, constituindo esta a sua mais interessante propriedade.

Elementos ou componentes reforçados com fibras podem resistir muito ao aparecimento e propagação de fissuras. Considerado ao nível potencial de fissuração, as fibras se opõem a formação de fissuras à medida que aumentam as tensões. A resistência ao cisalhamento do material composto depende bastante da resistência a tração das fibras. Além disso, os solos compostos com fibras vegetais podem adquirir uma boa resistência à compressão, o que depende da quantidade de fibra utilizada, da resistência à compressão do solo sem reforço, da resistência à tração das fibras e do atrito interno entre as fibras e solo. Ainda com respeito a resistência à compressão, a adição de fibras em geral permite um ganho de resistência de no mínimo de 15 % em relação ao mesmo material sem as fibras. Somente em casos muito excepcionais, como por exemplo nos solos muito arenosos, que é difícil constatar diferença entre a resistência do solo natural e o estabilizado com fibras.

Elementos de solo estabilizados com fibras podem resistir a grandes tensões de tração, já que absorvem uma grande parte da energia aplicada à estrutura. Este fato faz com que o uso de elementos de solo reforçado com fibras, particularmente, indicado em lugares onde haja risco de abalos sísmicos.

A resistência dos elementos depende da quantidade de fibras adicionadas, porém existe um teor ótimo que não deve ser excedido. Teores muito elevados podem reduzir muito a densidade da mistura reduzindo o número de pontos de contato entre as fibras e o solo. O teor mínimo que tem conduzido a resultados satisfatórios se inicia com 4 % em volume. São bastante comuns quantidades de 20 a 30 kgf por m³. A palha deve, de preferência, ser picada em pedaços com comprimento variando entre 4 e 6 cm. São obtidos melhores resultados quando os pedaços de palha cortada são espalhados em todas as direções do solo. Pedaços excessivamente longos, colocados em paralelo, em pontos concentrados ou formando ninhos não conduzem a bons resultados. Algumas pesquisas sugerem que a palha misturada ao solo seja deixada apodrecendo durante várias semanas afim que haja a produção de ácido láctico que possui um efeito secundário na estabilização dos solos.

As fibras também podem ser utilizadas com outros estabilizantes, tais como, o cimento, a cal e o asfalto. Se as fibras forem utilizadas com o asfalto, este deverá ser, primeiramente, adicionado ao solo que deverá ser cuidadosamente

misturado antes de receber a palha. Se a operação de mistura ocorrer fora desta sequência há o perigo da palha e do asfalto formarem um conglomerado independente do solo.

As fibras incorporadas ao solo irão se preservar sem deterioração somente se o elemento for mantido seco. Se o elemento ou componente permanecer em ambiente úmido por muito tempo há o risco das fibras se deteriorarem. Ciclos de molhagem e secagem não irão acelerar o apodrecimento desde que se garanta a secagem. Análises de elementos muito antigos (por exemplo, o adobe do Egito dos faraós) tem demonstrado claramente isto. As fibras também podem ser atacadas por roedores e termitas, principalmente quando molhados (UNCHS, 1986).

Os principais tipos de fibras são:

- **Fibras vegetais:** palha de várias espécies vegetais como a cevada, centeio, trigo, cevada de inverno, lavanda. Cascas de cereais: trigo, arroz, levada, etc. Filers leves como a serragem. Outras fibras adequadas incluem o feno, milhete, bagaço de cana, fibra de coco, sisal, manila, grama de elefante, fibras de bambu, palmeiras e hibiscos, da mesma forma que sobras, depois de espalhar o cânhamo e linho.

- **fibras animais:** pelos de animais domésticos.

- **fibras sintéticas:** colofane, aço e lã ou fibra de vidro.

Cimento Portland

O cimento Portland comum é um aglomerado hidráulico resultante da moagem do clínquer com pequena quantidade de sulfato de cálcio dihidratado $\text{SO}_4 \text{Ca} 2 \text{H}_2\text{O}$.

O clínquer Portland é obtido pelo aquecimento até 1.450 °C de uma mistura definida e homogênea de substâncias, contendo óxidos ácidos como SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e óxidos básicos como CaO que reagem quimicamente, resultando nos seus principais constituintes:

- Silicato Tricálcico: 3CaOSiO_3 (C_3S);
- Silicato Bicálcico: 2CaOSiO_2 (C_2S);
- Alumínio Tricálcico: $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ (C_3A);
- Tetracálcio Aluminoferrita $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

Do ponto de vista de resistência, o C_3S é o constituinte mais importante do cimento, pois reage rapidamente com a água, atingindo grande resistência em pouca idade, crescendo certamente até após o primeiro mês.

A reação do C_2S é mais lenta, apresentando pequena resistência até sete dias e aumentando rapidamente depois de um mês.

Após um ano, os dois silicatos revelam resistência da mesma ordem de grandeza.

O C_3A e o C_4AF são de pouco interesse no desenvolvimento das resistências, pois contribuem fracamente para a resistência do cimento em qualquer idade.

Todos os compostos presentes no clíquer são anidros, porém, quando postos em contato com a água eles reagem, dando origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis.

O C_2S e o C_4AF conferem maior resistência química do que C_3S e o C_3A , pois na reação de hidratação do C_3S surge 49 % de $Ca(OH)_2$ enquanto do C_2S a quantidade de $Ca(OH)_2$ é de 21 % e o C_3A reage rapidamente com a água aparentemente só em presença de solução saturada de cal, sem formação de hidróxido de cálcio.

O C_3A em contato com a água reage rapidamente e solidifica em minutos. Este fenômeno é evitado com a adição de gesso, com o que se evita as variações de volume originadas por um aquecimento e resfriamento rápidos.

De acordo com a NBR 5732 o cimento Portland comum é denominado pelas siglas CPI e CPI-S (para o cimento com adição de 5 % de material pozolânico). Este cimento é de difícil obtenção no mercado.

Os cimentos mais disponíveis no mercado são chamados de cimentos aditivados. E os compostos são misturas de cimento Portland comum com certos produtos, como materiais pozolânicos, escórias de alto forno e filler. Estas misturas são efetuadas após o cozimento do aglomerante simples, apresentando algumas propriedades interessantes.

As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que apesar de não ter por si só propriedades de aglomeração hidráulica na forma finamente moída e em presença da umidade e à temperatura ambiente, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio originando compostos insolúveis estáveis e com propriedades aglomerantes. Os materiais pozolânicos naturais são os tufos e cinzas vulcânicas e as terras ditatomáceas. Os materiais pozolânicos artificiais são derivados de certas rochas que submetidas a um tratamento térmico adquirem propriedade pozolânica, é o exemplo dos subprodutos industriais como as cinzas volantes da queima de carvão mineral e de destilação de xistos betuminosos. Outros materiais como a

cinza da casca de arroz tem sido pesquisados manifestando propriedades pozolânicos.

A escória de alto forno é um material obtido pela combinação da ganga (mistura de óxido de ferro e outras substâncias ricas em cálcio, sílica e alumínio) com fundentes apropriados e cinzas de carvão.

Quando o resfriamento se dá de maneira rápida, pela imersão ou aspersão de água ou vapor, a escória se vitrifica e seus componentes não perdem as características hidráulicas. Este produto não caracterizado é diminuindo à figura adequada e usado com adição ao cimento Portland. São cimentos, porém, que reagem com extrema lentidão quando aplicados isoladamente (SCANDIUZZI & ANDRIOLO, 1946).

O filer é um subproduto de britagem de rochas em pedreiras.

No Brasil os cimentos com aditivos são denominados pelas normas NBR 5735 de cimento Portland de alto forno (sigla CPIII) e cimento Portland pozolânico (sigla CPIV), respectivamente.

Os cimentos compostos são denominados pela norma NBR 11578 de cimento Portland composto com escória (sigla CPII-E), cimento Portland composto com pozolana (sigla CPII-P) e cimento Portland composto com filer (sigla CPII-F).

Outro cimento produzido no Brasil é o cimento Portland de alta resistência inicial (norma NBR 5733, sigla CPV-ARI). É um cimento que permite obter resistência elevada, em curto período de tempo. A velocidade de endurecimento mas elevada é conseguida por um teor mais elevado de C_3S pela moagem do clínquer e finuras mais altas (SCANDIUZZI & ANDRIOLO, 1946).

Cal

Mecanismos Básicos

A teoria de estabilização de solos sugere quatro mecanismos básicos para a cal:

- **Absorção de água:** a cal virgem sofre uma reação de hidratação quando em contato com o solo úmido. Esta reação é fortemente exotérmica, libera aproximadamente 300 kcal para cada kgf de cal virgem.

- **Troca catiônica:** quando a cal é adicionada ao solo úmido este é inundado com íons cálcio. A troca catiônica acontece entre os íons cálcio e os cátions trocáveis, como o magnésio, sódio, potássio e hidrogênio, presentes nos

constituintes do solo. O volume desta troca depende da quantidade de cátions trocáveis e da capacidade de troca catiônica das partículas do solo.

- **Floculação e agregação:** como resultado da troca catiônica e com o aumento da quantidade de eletrólitos na água dos poros, os grãos de solo floculam tendendo a se agregar. O tamanho dos agregados na fração fina do solo aumenta. Tanto a granulometria quanto a estrutura dos solos são alterados.

- **Carbonatação:** a cal adicionada ao solo reage com o gás carbônico do ar formando uma fraca cimentação. Esta reação consome parte da cal disponível para as reações pozolânicas.

- **Reação pozolânica:** esta é de longe a mais importante reação envolvida na estabilização com cal. A resistência do produto da reação é, preponderantemente, resultado da dissolução dos minerais argílicos no meio alcalino proporcionado pela cal e da recombinação da sílica (SiO_2) e da alumina (Al_2O_3) presentes nas argilas com o cálcio de maneira a formar complexos silicatos de alumínio e cálcio, desta maneira cimentam os grãos de solo. A cal deve ser adicionada ao solo em quantidades suficientes de modo a tornar e manter o pH alto.

(b) Eficácia e dosagem das misturas solo-cal

Quando 1 % de cal virgem é adicionada ao solo a reação exotérmica de hidratação desidrata o solo, removendo entre 0,5 e 1 % da água. A adição de 2 a 3 % de cal virgem provoca imediatamente a redução na plasticidade e a quebra dos torrões. Esta reação é conhecida como ponto de fixação.

Processos industriais sofisticados, para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cal, fazem uso de tratamentos a vapor e altas temperaturas utilizando autoclaves e teores de cal acima de 20 %. Os produtos obtidos são similares aos obtidos pela indústria de tijolos e blocos sílico-calcáreos.

(c) Tipos de cales

- **Cales não-hidráulicas:** são produzidas pela queima de rochas calcáreas muito puras.

- **Cal virgem, viva , "quicklime" (CaO ou MgO):** é produzida diretamente pela queima de rochas calcáreas em fornos a uma temperatura inferior à de início de fusão (850 a 900 °C). Condições delicadas requeridas para a estocagem e manutenção podem limitar o seu uso. A cal virgem é bastante higroscópica e precisa ser protegida da umidade. É um material cáustico que precisa ser manuseado com muito cuidado. A cal virgem é mais efetiva quando comparada com a cal hidratada, porque pode fornecer maiores quantidades de íons cálcio. A cal dolomítica ou magnésiana se hidrata mais lentamente, podendo conter cerca de 40 % de MgO.

- **Cal hidratada ou extinta (Ca(OH)₂):** é obtida pela hidratação da cal virgem. Largamente empregada na estabilização, não possui as desvantagens da cal virgem. Cales gordas não têm que ser muito finamente pulverizadas. Cales industriais contém de 90 a 99 % de cal ativa enquanto cales produzidas artesanalmente contém de 70 a 75 %. A diferença constitui-se de produtos não calcinados ou resultantes de temperaturas superiores a de calcinação. A qualidade da cal deve ser levada em conta na dosagem das misturas com solo.

- **Cal hidráulica:** similar ao cimento Portland. Não deve ser utilizada a menos que não se disponha de outros tipos de cal. As cales hidráulicas naturais são estabilizantes mais efetivos que as cales hidráulicas artificiais.

- **Cales de uso agrícola:** empregadas na correção do pH de solos ácidos, normalmente não são empregadas na estabilização de solos.

(d) Aditivos

Alguns aditivos quando misturados em pequenas quantidades com as cales proporcionam efeitos especiais:

- Aditivos que **umentam a reatividade do solo**, como por exemplo: a soda cáustica; o sulfato, metasilicato, carbonato e aluminato de sódio. São adicionados em quantidades variando de 0,25 a 2 moles por litro de água utilizada na estabilização;

- aditivos que **umentam a resistência à compressão**, a exemplo do cimento, são adicionados em quantidades superiores a 100 % da cal;

- aditivos que **umentam a eficácia na estabilização de solos silto-arenosos** reduzindo a expansão provocada pela cal hidratada. O sulfato de magnésio dosado na proporção de 25 % da cal em peso;

- aditivos como o sulfato de potássio ou produtos de betume que **tomam o solo estabilizado com cal impermeável.**

(e) Efeitos da cal nas propriedades do solo

Distribuição granulométrica: os solos finos se agregam tornando a textura mais grossa;

Plasticidade: com a troca catiônica o limite de plasticidade do solo aumenta, significando uma demanda maior de água pelo solo para chegar ao estado plástico; o limite de liquidez, geralmente, aumenta para as argilas não expansivas e diminui nas argilas não expansivas.

(f) Etapas da estabilização com cal

Destorroamento: quanto mais finamente o solo for destorroado, mais ativa será a cal no ataque aos argilominerais. Esta operação pode se tornar difícil porque a argila pode ser muito coesiva. Solos muito úmidos podem ser secados e "quebrados" com a cal virgem. Segundo UNCHS (1986) a estabilização com cal será mais eficiente se no mínimo 50 % dos torrões de argila forem reduzidos a diâmetros inferiores a 5 mm.

Mistura: esta etapa deve proporcionar uma mistura íntima entre o solo e a cal. Para solos muito plásticos, o processo deve ser executado em dois estágios, com intervalo de um a dois dias entre si. Isto possibilita a cal desagregar os torrões. Este procedimento em dois estágios, todavia, pode reduzir o efeito da cal na resistência da mistura. A homogeneidade da mistura pode ser checada observando-se a uniformidade da cor.

Tempo de repouso: caso se faça a mistura por via úmida, deve-se permitir que a mistura repouse por um período de no mínimo 2 horas e, preferencialmente, de 8 a 16 horas para quantidades de cal superiores ao ponto de fixação. O efeito no peso específico seco é desprezível, porém maiores resistências podem ser atingidas.

Compactação: o peso específico seco é bastante sensível ao grau de compactação, principalmente quando se empregam teores altos de cal. Quando a mistura for deixada repousar por um período adequado, a umidade da mistura se

posicionará no ramo úmido próximo a umidade ótima. A reação exotérmica provocada pela cal virgem consome perto de 1 % do teor de umidade em relação a percentagem de cal virgem adicionada. A umidade devera ser corrigida à medida que se aproximar da umidade ótima durante o segundo estágio de mistura, isto é, durante o amassamento após o repouso da mistura.

Cura seca: pode ser obtido um incremento na resistência à compressão se o período de cura for estendido. Este fenômeno se prolonga por várias semanas e persiste por meses. É ainda melhor em um ambiente quente e úmido. Os produtos da estabilização de solos com cal podem ser, vantajosamente, expostos a altas temperaturas ($\pm 60^{\circ}$ C). A cura ao sol sob lona plástica ou em túneis construídos com anéis de aço corrugado permite atingir-se temperaturas e umidades relativas altas. O UNCHS (1986) cita que uma pesquisa realizada na Universidade da Dinamarca demonstrou que produtos muito bons podem ser obtidos através de secagem em autoclave por 24 horas a temperaturas variando entre 60 e 97^o com uma umidade relativa de 100 %.

Materiais Betuminosos

O termo betume tem sua origem no sânscrito no vocábulo "jatu" (resina) e "jatu krit" (geração de resina) por analogia às resinas extraídas de certas coníferas. O equivalente em latim parece ser "pix-tumens", de outro modo chamado "poix exudante" e mais tarde "bitumen" (HOUBEN et alii, 1979).

Com o objetivo de estabelecer uma distinção entre os termos asfalto e betume, a ASTM (American Society for Testing Materials) estabeleceu as seguintes definições:

Asfalto - Material aglutinante de consistência variável, cor pardo-escuro ou negro e no qual o constituinte predominante é o *betume*, podendo ocorrer na natureza em jazidas ou ser obtido pela refinação do petróleo.

Betume - Mistura de microcarbonetos pesados, obtidos em estado natural ou por diferentes processos físicos ou químicos, com seus derivados de consistência variável e com poder aglutinante e impermeabilizante, sendo completamente solúvel no bissulfeto de carbono (CS₂).

Os materiais betuminosos utilizados em pavimentação, classificam-se em dois tipos: alcatrões e asfaltos.

Os alcatrões para pavimentação resultam de processos de refino de alcatrões brutos, os quais originam-se da destilação dos carvões durante a fabricação de gás e coque.

Os asfaltos são materiais aglutinantes que originam-se do petróleo, no qual estão dissolvidos e a partir do qual podem ser obtidos, seja pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais), seja por destilação em unidades industriais especialmente projetadas.

Os asfaltos naturais, podem ocorrer em depressão da crosta terrestre, constituindo os lagos de asfalto (Trinidad, Bermudas), ou aparecerem impregnando os poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas asfálticas (gilsonita). Encontram-se também misturas com impurezas minerais (areias e argilas), em quantidades variáveis, sendo geralmente submetidas a processos de purificação para serem aplicadas em pavimentação. (IBP, 1990).

(a) Princípios da estabilização com materiais betuminosos

Os materiais betuminosos adquirem as características necessárias a estabilização de três formas: pelo aquecimento, misturado a solventes resultando em asfalto diluído ou disperso em água sob a forma de uma emulsão. Estes últimos constituem-se de glóbulos microscópicos em suspensão em solventes ou em água.

O materiais betuminosos após misturado ao solo e ao iniciar-se a evaporação do solvente ou a água, os glóbulos de betume se difundem formando filmes muito finos e resistentes que revestem aderindo a superfície das partículas do solo. O revestimento é tão fino que o solo permanece com a mesma coloração. Uma vez seco o solo apresenta praticamente as mesmas características do solo não tratado. Entretanto as partículas de argila, praticamente, não mais absorvem água, conseqüentemente não há perda de coesão pelo solo. Além disso o materiais betuminosos fornecem um aporte suplementar de coesão aos solos que naturalmente são pouco coesivos (solos arenosos e siltosos) aumentando-lhes a resistência mecânica (HOUBEN et alii, 1979).

(b) Cimentos asfálticos

Para a obtenção do asfalto, tipos específicos de petróleo são submetidos ao processo de destilação na qual as frações leves (gasolina, querosene, diesel), são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação. A operação se desenvolve em torres de fracionamento com arraste de vapor. A fim de permitir

o processamento a temperaturas relativamente baixas, o estágio final consta da destilação a vácuo, evitando assim, o craqueamento do asfalto com conseqüente perda de suas propriedades aglutinantes.

O produto obtido no fundo da torre de vácuo, após a remoção dos demais destilados de petróleo, é denominado resíduo asfáltico, ou cimento asfáltico de petróleo (CAP) caso possua determinadas características especificadas em normas. À temperatura ambiente, esse material apresenta consistência semi-sólida.

O cimento asfáltico de petróleo é obtido em diferentes consistências medidas pelo ensaio de viscosidade dinâmica ou absoluta. No Brasil são classificados os seguintes tipos: CAP-7, CAP-20 e CAP-55 (IBP, 1990).

(c) Os asfaltos diluídos ou "cut-backs"

Os asfaltos são fluidificados através de solventes voláteis como o diesel, querosene e nafta. Dependendo da natureza e das proporções dos solventes, os asfaltos diluídos serão mais ou menos fluídos e mais ou menos inflamáveis. A velocidade de evaporação dos solventes depende da própria natureza do solvente, das condições climáticas e da natureza do solo que será estabilizado. Quanto a velocidade de secagem distinguem-se três tipos de asfaltos diluídos: os de cura lenta, média, ou rápida. Como referência da utilização de asfaltos diluídos na estabilização de solos Houben et alii (1979) cita o emprego do RC 250 ("Rapid curing road oil" segundo a classificação da ASTM) utilizado na fabricação de adobes pelo "International Institute for Housing Technology (IIHT)" da Universidade de Fresno na Califórnia, onde foi realizada uma série de ensaios com resultados satisfatórios.

No Brasil de acordo com o tempo de cura, determinado pela natureza do diluente utilizado, os asfaltos diluídos são classificados em duas categorias: CR - asfaltos diluídos de cura rápida e CM - asfaltos diluídos de cura média. Cada uma dessas duas categorias apresenta tipos de diferentes viscosidades cinemáticas, determinadas em função da quantidade de diluente. Assim os CR ou CM são constituídos pelos seguintes tipos; CR-70, CR-250, CR-800, CR-3000; CM-30, CM-70, CM-250, CM-800 e CM-3.000. Recomenda-se a aplicação do CM-250 na confecção de misturas solo-betume para a execução de bases ou sub-bases rodoviárias (IBP, 1990)

(d) As emulsões

Neste caso as partículas de cimento asfáltico são dispersas na água ou, inversamente, a água é dispersa no cimento asfáltico com a ajuda de emulsificante. As emulsões contêm em geral 55 a 65 % de cimento asfáltico e 1 a 2 % de emulsificante. Este último favorece a emulsificação e mantém o cimento asfáltico em suspensão na água.

As emulsões asfálticas podem ser classificadas quanto ao tipo de carga da partícula ou quanto ao tempo de ruptura. Quanto a carga da partícula classificam-se em:

- **Emulsões aniônicas:** raras, não são convenientes a todas as granulometrias de solo;
- **emulsões catiônicas:** mais dispersíveis e compatíveis com quase todos os tipos de solo, apresentam partículas eletrizadas, carregadas positivamente.
- **emulsões bi-iônica;**
- **emulsões não iônicas;**

As emulsões são em geral muito fluidas e misturam-se facilmente a solos úmidos. A velocidade de ruptura das emulsões, isto é a separação ulterior da água do cimento asfáltico, depende, sobretudo, da natureza e da qualidade do emulsificante. Distinguem-se três tipos de ruptura: lenta, média e rápida. Uma ruptura lenta permite o tratamento de solos com granulometrias muito finas. A aderência entre os grãos depende do emulsificante e dos agentes tensoativos eventualmente incorporados.

As emulsões são extremamente mais estáveis que os "cut-backs " porém devem ser adicionados estabilizantes para prevenir a segregação da água com o betume que pode ser causada por um longo período de estocagem, gelo e vibrações provocadas pelo transporte.

Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo, nas misturas solo-betume utiliza-se a emulsão alfática catiônica de ruptura lenta (RL-1C) que não apresenta solvente em sua constituição e tem teor asfáltico residual mínimo de 60 %.

(e) Dosagem com betume

O princípio de estabilização com produtos betuminosos, conforme descrito anteriormente, é recobrir os grãos de solo com um filme impermeável. Logo, a dosagem vai depender da superfície específica do solo, por conseguinte da natureza e da qualidade dos grãos que o constituem. Em trabalhos rotineiros são utilizadas fórmulas que permitem calcular os teores ótimos de material betuminoso em função da granulometria do solo. Estas quantidades variam de 5 a 20 % em peso de solo. O International Institute for Housing Technology (IIHT) recomenda que, na dosagem de solos a serem estabilizados para a produção de adobes, aumente-se progressivamente os teores de asfalto diluído a partir de 2 % e para as emulsões a partir de 3 %. Ensaia-se, para cada teor, três ou quatro amostras de adobe à compressão, flexão e um ensaio onde o elemento é regado. Este organismo adverte que solos excessivamente argilosos que demandam bem mais de 3 % de asfalto diluído ou 6 % de emulsão em geral não se adaptam a fabricação de adobes pois tendem a fissurar devido a retração hidráulica (HOUBEN et alii, 1979).

(f) Efeitos da estabilização com materiais betuminosos

Influência no diagrama de Proctor: os materiais betuminosos provocam uma diminuição do peso específico aparente seco e um acréscimo no teor ótimo do líquido (água + material asfáltico). A curva de compactação fica mais abatida e a umidade ótima mais precisamente definida.

Resistência à compressão: conforme a Figura III.4 a resistência à compressão seca aumenta com o aumento no teor do material betuminoso empregado até um determinado limite quando começa a decrescer. Ultrapassado o teor ótimo o excesso de material betuminoso fará com que este se comporte como um lubrificante. A resistência úmida cresce regularmente com a quantidade de material betuminoso, independentemente da resistência seca.

Absorção: a quantidade de água absorvida decresce a partir de um determinado limite do teor de material betuminoso cuja determinação é importante (ver Figura III.5). Uma temperatura de 40°C durante o amassamento, a moldagem e a cura diminui a absorção. Temperaturas superiores não contribuem para o melhoramento das misturas.

(g) Amassamento

Amassar excessivamente a mistura pode aumentar a absorção de água do elemento ou componente após a secagem. Um amassamento muito enérgico pode produzir a ruptura prematura da emulsão. Existem dois métodos de mistura do solo com os materiais betuminosos:

- quando o solo **não será compactado** (por exemplo na produção de adobes, moldagem direta, argamassas), neste caso deve-se fazer a mistura com umidade (material betuminoso + água) ligeiramente superior a umidade ótima. O amassamento manual fica mais fácil e a homogeneidade excelente;

- quando o solo **for compactado** é importante que este esteja com umidade próxima à umidade ótima determinada pelo ensaio Proctor. Se o solo natural estiver úmido, a quantidade de líquido fornecida pelo estabilizante traz o risco de se conduzir a mistura a teores de umidade superiores à umidade ótima do ensaio Proctor. Empregando-se o solos na umidade ótima o amassamento manual torna-se uma tarefa fastigante, a mistura fica menos homogênea do que quando feita com solo mais úmido. Conseqüentemente a resistência úmida e a impermeabilidade dos elementos serão muito menores. Por outro lado, a compactação e a desmoldagem dos blocos prensados será muito mais fácil e os tijolos apresentaram arestas impecáveis, pois o betume atua como um lubrificante auxiliando a desmoldagem.

Estabilizantes não convencionais

Estes estabilizante são muito menos empregados que o cimento, a cal e os materiais betuminosos, e seus mecanismos de estabilização são, geralmente, pouco conhecidos. Podem-se distinguir três grupos principais:

- Os produtos naturais, vegetais ou animais;
- os produtos industriais;
- os estabilizantes comerciais;
- rejeitos industriais e minerários.

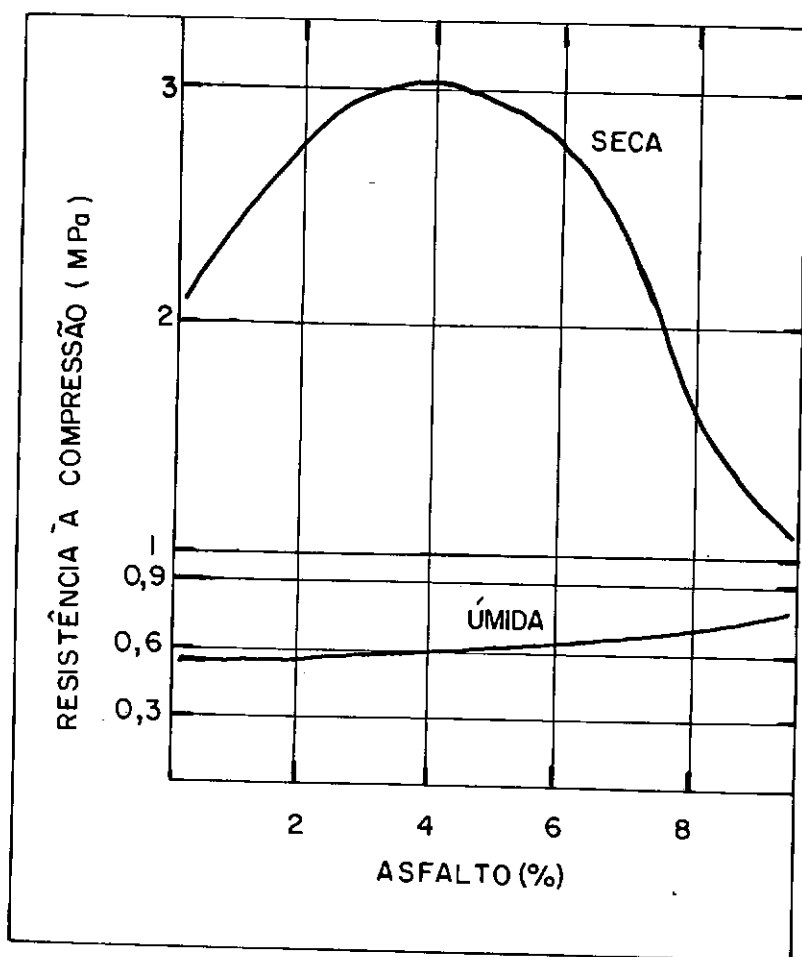


Figura III.3 - Resistência à compressão seca e úmida de solos estabilizados com betume (HOUBEN et alii, 1979).

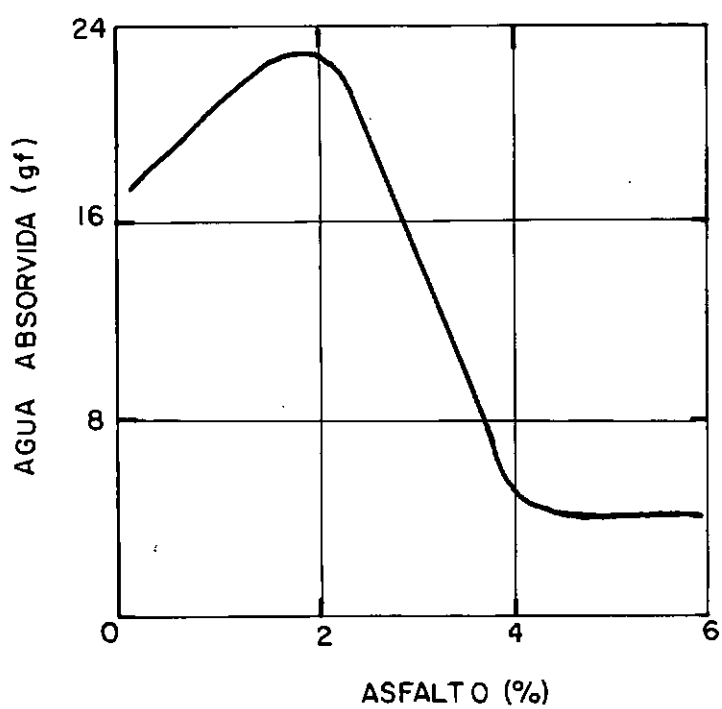


Figura III.4 - Ensaio de absorção de solos estabilizados com asfalto (HOUBEN et alii, 1979).

Produtos naturais

São assim conhecidos todos os produtos provenientes diretamente da natureza sem maiores beneficiamentos. Não são em geral muito eficazes, contudo são ainda muito baratos e empregados em técnicas construtivas tradicionais. Muitos dos produtos citados abaixo podem parecer demasiado inusitados, porém a idéia de relacioná-los é importante tendo em vista que remetem a uma tradição, por vezes milenar, de utilização e que começam a ser pesquisadas afim de se descobrir substâncias com propriedades efetivas de estabilização, ainda não estudadas cientificamente:

- **Ácido tânico;**

- **ácido úmico;**

- **"Caoutchouc" natural:** obtido a partir do látex da "hévea "(América do Sul, Sudeste Asiático, África tropical);

- **caseína:** proteína encontrada no leite animal é, muitas vezes empregada na estabilização de solos combinada com o sangue bovino. Alguns tipos de leite em pó já foram testados e deram bons resultados. "Sabão de poulh" como é conhecida a caseína diluída, é misturada a tijolos moidos e amassados, formando uma pasta que é adicionada ao solo;

- **cinzas de madeira;**

- **goma arábica:** extraída da acácia mas por ser solúvel em água possui fraca propriedade impermeabilizante. Atua primeiramente como floculante, ajuda no incremento da resistência à compressão seca, diminui a ascensão capilar da água agindo no mecanismo cinético do fenômeno (UNCHS, 1986);

- **palmo copal:** resina extraída de algumas espécies de arbóreas tropicais;

- **óleos vegetais:** óleo de "abrasin ", coco, algodão, linhaça e rícino;

- **gorduras animais:** óleo de peixes e de baleia são estearatos é servem como agentes impermeabilizantes;

- **sangue de animais:** o uso do sangue de boi é conhecido desde o tempo dos Romanos. A estabilização com sangue de boi se torna efetiva quando combinado com a cal ou polifenóis. O sangue deve ser empregado fresco e não em forma de pó, acrescenta o manual da UNCHS (1986);

- **excrementos:** todo o tipo de excrementos tem sido utilizados. Os excrementos bovinos são os mais amplamente empregados, mas também têm-se o conhecimento do emprego de excrementos de cavalos, camelos e até pombos. A ação deste tipo de estabilizante é provavelmente devida a presença de fibras (palha), do ácido fosfórico e do potássio. A utilização da urina também é conhecida. A urina de cavalos quando utilizada na mistura, substituindo a água, elimina a possibilidade do aparecimento de fissuras e melhora a capacidade do solo de resistir a erosão. Bons resultados tem sido obtidos utilizando urina combinada com a cal.

- **colas animais:** são, particularmente, utilizados em argamassas de revestimento. São produzidas a partir de chifres, ossos, cascos e peles;

- **termitas:** estes insetos secretam uma substância ativa, que parece ser um polímero não iônico do grupo da celulose do tipo polisacarídeo. Os cupinzeiros resistem bem às chuvas e o solo que forma estes cupinzeiros pode ser misturado a outros solos para a produção de blocos. Segundo o manual da UNCHS (1986) trabalhos de pesquisa recentes na África do Sul sintetizaram esta substância que, entretanto, custa três vezes mais caro que o cimento;

- **bentonita:** argilomineral que possui propriedades tixotrópicas, isto é, expande em presença da água impedindo a percolação da mesma no solo, onde é adicionada em pequenas quantidades (UNCHS, 1986);

- **pozolanas:** alguns solos (em particular as areias vulcânicas) possuem propriedades pozolânicas naturais. Podem ser empregadas estabilizando solos argilosos, porém freqüentemente requerem a adição de no mínimo 30 % de cal ou cimento antes de se tornar um ligante eficaz (UNCHS, 1986).

Produtos industriais

Estes estabilizantes são produtos sintéticos. Segundo Houben et alii (1979) a nível económico a sua aplicação é mais duvidosa que satisfatória e sua eficácia não é todavia exemplar. São produtos geralmente pouco utilizados.

(a) Ácidos

Sempre de manipulação mais ou menos perigosa, sob a forma concentrada ou diluída, os ácidos modificam o pH do solo a qual são adicionados e produzem uma floculação que, infelizmente, é reversível. São conhecidos como estabilizantes os ácidos fosfórico, clorídico, sulfúrico, nítrico e fluorídrico.

(b) Resinas

Muitos bons resultados tem sido obtidos na estabilização com resinas. Existe uma grande variedade de resinas sintéticas muitas de origem vegetal (algumas já citadas anteriormente), porém o custo extra quando comparado com os métodos de estabilização convencionais formam uma grande barreira para a difusão do uso deste tipo de estabilizantes.

Possuem ação vigorosa, rápida e fácil incorporação ao solo já que em certas resinas a viscosidade é comparável a da água, podendo solos muito úmidos serem solidificados.

O seu alto custo e a tecnologia sofisticada de produção faz das resinas, somente disponíveis em países industrializados. As quantidades requeridas são maiores que as dos estabilizantes convencionais. Geralmente os produtos são tóxicos e difíceis de manipular, requerendo o uso de catalizadores, sensíveis a ação da água e possuem durabilidade incerta quando os produtos são biodegradáveis.

As resinas são formadas por longas cadeias de moléculas resultantes do processo de "linking"(polimerização) ou certos agentes químicos (monómeros e polímeros). Podem ser empregadas de duas maneiras distintas:

- Monómeros são adicionados ao solo ao mesmo tempo que o catalizador: a reação entre o solo e os monómeros é imediata à medida que estes vão se polimerizando. Este é o caso, por exemplo, de resinas abiéticas;

- um polímero é formado anteriormente por processos naturais ou é sintetizado e depois é adicionado ao solo sob a forma sólida, de solução ou emulsão.

As resinas atuam de diferentes formas, como flocculantes, dispersantes ou ácidos. A maioria torna o solo impermeável, enquanto as mais sofisticadas aumentam a coesão do solo.

- **Resina de wallaba:** é um repelente de água;

- **colofane:** é obtida durante a destilação de essências "turpentina" das resinas oleosas dos pinheiros. É solúvel em solventes orgânicos e em soluções aquosas alcalinas. O colofane forma um gel após reagir com certos sais metálicos (ferro e alumínio). Atua reduzindo a absorção dos solos;

- **vinsol:** também é obtida na produção de "turpentina". É utilizada em solos ácidos com controle crítico dos teores adicionados ($\pm 1\%$). Hidrófobo, aumenta a coesão mas não afeta a resistência à compressão do solos;

- **liguinina:** é um sub-produto da indústria de papel. Líquido resinoso e alcalino com capacidade impermeabilizante. É solúvel mas pode se tornar insolúvel quando reagida com o cromo, porém cromo-liginina é, infelizmente, um produto muito caro;

- **molasses:** aldeídos dos açúcares provenientes de molasses desidratados podem ser polimerizados a altas temperaturas com catalizadores fenólicos. A substância resinosa obtida possui características similares as que ocorrem naturalmente nos asfaltos e resinas sintéticas;

- **carbometil celulose:** é um estabilizante não iônico com ação coagulante e solúvel em água;

- **shellac:** confere excelente resistência aos solos arenosos mas o material estabilizado não resiste bem a ação da água.

Houben et alii (1979) cita outras resinas empregadas na estabilização de solos: acetato de polivinila (PVA), acrilato de cálcio, anilina furfural, melanina, metil-uréia, fenol formol, fenol furfural, resorcinol-formaldeído, uréia formaldeído, uréia formol, uréia furfural.

(c) Sais

Sua utilização como estabilizantes esbarra em um certo número de dificuldades onde a principal vem do fato de sua ação ser pouco duradoura. São lixiviados quando se submete o solo estabilizado à circulação da água. Produzem eflorescências. Sua principal ação benéfica é diminuir a afinidade das partículas argilosas com a água.

- **Cloretos:** de sódio (floculante), de cálcio (mais eficaz que o de sódio), dialquil dimetilamônio, férrico;

- **sulfato de cálcio** (gesso): sua utilização é considerada com reserva;

- **sais de alumínio:** são eletrólitos e criam uma estabilização eletroquímica.

Silicatos

São citados na bibliografia os silicatos de sódio, cálcio e potássio (HOUBEN et alii, 1979).

Estabilizantes Comerciais

Segundo HOUBEN et alii (1979) estes produtos não são miraculosos com pode-se pensar ou serem propagandeados. Pelo contrário, frequëntemente, possuem desempenho medíocre. Este trabalho cita 32 produtos comerciais a base de produtos químicos industriais tais como são aminas, detergentes, resinas, ácidos, etc, cujos mecanismos de reação são bem conhecidos. Alguns são comercializados junto a equipamentos.

No Brasil é comercializado o DYNASOLO DS-328 que é misturado ao solo recebendo a adição da cal ou do sulfato de alumínio, empregado na estabilização de bases rodoviárias. Não se conhece trabalhos de pesquisa que tenham comprovado a eficácia deste produto.

Rejeitos Industriais e Minerários

Como já foi referido no início deste trabalho o Programa de Engenharia Civil da COPPE desde a sua criação vem estudando a viabilidade de se utilizar os rejeitos industriais e minerários na estabilização de solos destinados à bases rodoviárias. Porém, nada impede que esta experiência seja transferida para a fabricação de elementos e componentes de emprego da Construção Civil. A adoção de um rejeito implica na viabilidade técnica e econômica para a sua utilização, a pesquisa sobre a utilização de rejeitos industriais e minerários na construção rodoviária (IPR, 1987), que teve a participação da COPPE, considerou os seguintes critérios para a escolha de rejeitos:

- Potencialidade técnica de utilização do rejeito como agregado ou como aglutinante;
- volumes disponíveis do rejeito em depósitos;
- localização dos depósitos e/ou das instalações de produção em relação à malha rodoviária existente e planejada;
- acessibilidade dos depósitos e/ou às instalações de produção de rejeito;
- condições de manejo do rejeito.

Neste mesmo relatório avaliou-se o desempenho de misturas solo-rejeito que receberam ou não diversos aditivos. Os rejeitos estudados pela COPPE que se enquadram nos critérios acima são:

Cinzas volantes - rejeito oriundo das usinas termelétricas, empregado com a cal manifesta propriedades pozolânicas (MARCON, 1977; NARDI, 1975 e PINTO, 1971).

Linina-sulfonato de cálcio - rejeito proveniente da fabricação da celulose, experiências de laboratório mostraram uma densificação do solo e aumento de sua rigidez. Foi estudado na década de 40 pelo engenheiro Galileo Antenor de Araújo e pelo Professor Jacques de Medina (IPR, 1987).

Cal de carbureto - subproduto residual sólido da reação entre o carbureto de cálcio e a água na produção do gás acetileno, menos reativa do que a cal comercial. Pode ser obtida em estado quase seco e hoje possui as seguintes aplicações:

- Retorna ao forno elétrico para produzir novas quantidades de carbureto de cálcio ;

- corretivo agrícola;

- emprego na construção rodoviária, onde agirá pelo fenômeno de pega pela carbonatação pelo gás carbônico do ar (IPR, 1987)

Foi estudada na tese do Engenheiro Humberto F. Borges: "Estabilização de um Solo Argiloso com Cal de Carbureto" em 1979.

Gesso químico (fosfogesso) - subproduto (sulfato de cálcio hidratado) obtido na produção do ácido fosfórico mediante o ataque sulfúrico de rochas fosfáticas. Para cada tonelada de ácido fosfórico produzido são geradas cerca de 4,5 toneladas de fosfogesso que é depositado em quantidades enormes em barragens ou montanhas, causando riscos de contaminação radiológica dos terrenos e cursos d`água. Tem sido empregado em pequenas quantidades como corretivo de solos e como retardador da pega do cimento Portland (IPR, 1987).

Lama vermelha - constituem a maior fonte poluente das fábricas de alumina e nelas se concentra a alumina que não reagiu na digestão e as impurezas presentes no minério; apresentam, ainda, apreciável teor de soda cáustica resultante da autoclavação das bauxitas e novos silicatos complexos; a lama vermelha é um sistema de óxidos. Através do processo Bayer para se produzir uma tonelada de alumina, utiliza-se aproximadamente 2,4 toneladas de bauxita, o que corresponde também a uma produção de cerca de 2,2 toneladas de lama vermelha com 50 % de sólidos. As lamas vermelhas já têm sido estudadas para produção de ferro e titânio, na fabricação do cimento, como corretivo da acidez do solo, porém os resultados não são muito animadores (IPR, 1987).

Salmoura - este é o principal rejeito obtido da produção do carbonato de sódio (barrilha). Constituída pelo cloreto de cálcio e pelo cloreto de sódio a salmoura é um subproduto do Processo Solvay que consiste na adição do bicarbonato de amônio a uma solução saturada de sal comum, precipitando-se o bicarbonato de sódio; este calcinado, fornece a barrilha. Para cada tonelada de barrilha produzida, gera-se 10 metros cúbicos de salmoura (IPR, 1987).

Escórias de alto forno - constituem subprodutos da indústria siderúrgica, formados pela ação de um fluxo sobre a canga de um minério, ou sobre as impurezas oxidadas que acompanham o metal principal; é uma solução metalúrgica de óxidos fundidos. A composição das escórias pode ser expressa em termos de seus quatro óxidos principais: sílica, alumina, cal e magnésia; juntamente com eles

estão presentes também em pequenas proporções, o enxofre, o manganês e o ferro, bem como traços de compostos de outros elementos.

A escória granular de alto forno, destinada à fabricação de cimento, deve possuir alta basicidade (predominância do CaO e MgO) e sua estrutura deverá ser vítrea, amorfa. A vitrificação se obtém mediante resfriamento brusco da escória, pelo contato com água.

As escórias podem ser utilizadas como substitutivo da pedra britada na construção rodoviária; ou utilizada na indústria de cimento face à sua composição química e hidráulica, o que contribui para a diminuição do preço do aglomerante e em consequência facilitando o seu emprego na pavimentação rodoviária e na construção de estradas de solo-cimento (IPR, 1987). Deve-se aprofundar o estudo da escória granular de alto forno através da estabilização física - correção granulométrica de solos argilosos e siltosos; e química função de suas propriedades pozolânicas. A norma NBR 5735 faculta o emprego de 35 a 70 % de escórias de alto forno na produção do cimento Portland tipo CP-III.

III.4 A interação físico-química solo-cimento

III.4.1 Solo-cimento

Se um solo natural possui certas características técnicas que o indicam a ser estabilizado com cimento Portland é possível que, adicionando pequenos teores de cimento, misturando com a água até se atingir a umidade ótima para uma determinada energia de compactação, obtenha-se uma massa bastante resistente. Quando isto é feito, o material poderá suportar cargas de trabalho muito superiores aquelas que são aplicadas a elementos ou componentes de solo natural, apresentando, também, maior durabilidade na presença contínua dos agentes atmosféricos.

Um solo após estabilizado com cimento apresenta as seguintes vantagens:

- Maior resistência à compressão, similar ou até maior que os tijolos ou blocos cerâmicos;
- menor absorção e permeabilidade;
- menores variações de volume devidas à absorção ou perda de umidade;
- durabilidade quando submetido às variações climáticas;
- maior resistência à erosão e a deterioração quando submerso.

III.4.2 Mecanismos físico-químicos de estabilização

Durante a hidratação do cimento ocorrem interações físico-químicas que provocam a sua pega, descrita em MARCONDES (1992) como a transformação da pasta plástica de consistência normal em um sólido friável, e posterior endurecimento.

Dois mecanismos físico-químicos descrevem as interações do solo com o cimento durante o processo de estabilização:

Hidrólise dos componentes do cimento

A adição de água à mistura solo-cimento provoca a hidratação do silicato tricálcico (C_3S), do silicato dicálcico (C_2S), do aluminato tricálcico (C_3A) e do ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). Estes silicatos hidratados dão origem a um gel coloidal de grandes dimensões e estrutura bastante indefinida, que envolve os grãos de cimento que ainda não reagiram e os outros produtos cristalinos da hidratação, como o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e aluminatos hidratados (D'AMICO, 1979).

CASTRO (1981) descreve quatro etapas do mecanismo de hidratação do cimento: numa primeira etapa de hidratação do cimento os componentes do cimento reagem exotermicamente (40 cal/g/h) durante 5 a 10 minutos liberando o hidróxido de cálcio que se dissolve parcialmente na fase aquosa, elevando o pH para 13; a solução torna-se supersaturada, precipitando o $Ca(OH)_2$; apenas 1 % do cimento se hidrata nesta etapa. Numa segunda etapa, denominada período de indução e cuja energia de reação é bem menor (1 cal/g/h) com duração de aproximadamente 1 hora, as superfícies dos grãos ficam cobertas por géis neoformados, ocorrendo a difusão da água para o interior do grão e dos produtos formados para fora da membrana gelatinosa; este processo atinge um estágio onde é gerada uma pressão osmótica que rompe a membrana, forçando a solução supersaturada em produtos de reação a ser expulsa e preencher os vazios ao redor do grão, além de que com a ruptura outros pontos da superfície do grão ficam livres para serem atacados pela solução aquosa, formando membranas que serão novamente rompidas. Começa, então, a terceira etapa conhecida como período de pega, onde o calor de reação aumenta para 5 cal/g/h e dura em média 6 horas, sendo a mais importante do processo; com as sucessivas rupturas das membranas, ocorre o crescimento do gel que endurece, promovendo a ligação dos grãos parcialmente hidratados. A quarta e última etapa do processo de hidratação é o

endurecimento, quando o calor de hidratação volta a ser de 1 cal/g/h e tem duração de semanas a anos.

Com o desenvolvimento progressivo da hidratação, essa combinação complexa de gel e hidratos cristalinos abrangem as partícula de solo, estabelecendo-se ligações mecânicas entre o gel e a superfície rugosa das partículas, o que vai conferir resistência à mistura. Esta reação é análoga ao que ocorre no concreto, contudo, no solo-cimento a pasta de cimento não preenche completamente os vazios da massa e, o gel de cimento une somente grãos adjacentes de solo formando um "esqueleto", mais ou menos contínuo, de um material duro e resistente, envolvendo matrizes de grãos de solo não atingidos pela cimentação (D'AMICO, 1979). A figura III.6 apresenta o aspecto dos "esqueletos" formados nas misturas solo-cimento para solos arenosos e argilosos;

Reação do cimento com os argilominerais

O cimento hidratado reage quimicamente com os argilominerais, gerando produtos de cimentação adicional que aumentam a resistência das ligações entre os grãos de solo e as partículas de cimento. Ao mesmo tempo, a argila participante desta reação, pode sofrer alterações de forma e se tornar menos plástica e expansiva. Inicialmente as partículas de argila adsorvem os íons cálcio liberados na hidratação dos silicatos de cálcio. A adsorção dos íons Ca^{++} , aumenta a força de atração entre as partículas de argila conduzindo a floculação. O aumento do pH do meio, devido à liberação do hidróxido de cálcio, provoca a dissolução de sílica e alumina dos argilominerais e de constituintes amorfos do solo. O material dissolvido combina-se com os íons cálcio, formando um material de cimentação adicional.

Quanto menor o tamanho das partículas de solo, maior é a proporção de sílica e alumina reativa disponível, e assim, mais rápida e mais intensa é a capacidade de consumir cal. As reduções do pH, por sua vez, vão favorecer a hidrólise dos silicatos e aluminatos do cimento, que só são estáveis em pH maior que o de uma solução saturada de cal. A hidrólise causa a queda na resistência do cimento, cujo maior responsável é o C_3S (D'AMICO, 1979).

A estabilização alcalina do solo pode ser dividida em duas etapas, segundo CASANOVA (1981) na primeira fase quando a cal, presente no cimento, é misturada a um solo argiloso juntamente com a água, parte dela se dissolve por um mecanismo de difusão na água dos poros, fornecendo íons Ca^{++} , CaOH^+ , OH^- que são químio-adsorvidos via transferência de carga resultando na coagulação da argila. Os flocos formados crescem em tamanho devido a colisão com outros

cristais em solução e com outros flocos, a estabilização dos agregados (grãos de quartzo arenosos ou siltosos) ocorrem através desta cal adsorvida que age como um cimento "amorfo" ou reagindo quimicamente com a sílica e a alumina da argila.

Na segunda etapa denominada por CASANOVA (1981) de pozolânica, cujo mecanismo consiste na dissolução das partículas argilosas, gerando silicatos e aluminatos, que em presença do cálcio livre precipitam como compostos razoavelmente hidratados conhecidos como minerais de neo-formação. Os produtos gelatinosos são adsorvidos pelas superfícies, principalmente as prismáticas, efetuando sua cimentação com outras.

Modelos de estrutura solo-cimento

PITTA (1979) descreve dois modelos, bastante simplificados, de estruturas para as misturas solo-cimento. Nos solos de granulometria fina e natureza coesiva, a agregação cimento x sólidos tende a formar uma matriz hexagonal, assemelhada aos favos de mel, que envolve e protege as partículas finas não atingidas pela cimentação. Neste sistema a durabilidade e resistência do conjunto são governadas pela qualidade das paredes da matriz e pelo grau de aderência entre uma célula hexagonal e as que lhe são vizinhas. Se o solo é granular, a cimentação se dá de forma análoga àquela que ocorre no concreto, com a diferença que a pasta não preenche completamente os vazios da massa.

HERZOG, citado em MARCONDES (1992), apresenta um modelo de estrutura de argila para solos coesivos contendo domínios de argila, estes são constituídos por placas de argila orientadas paralelamente em pacotes fechados, comportando-se como unidades estruturais em argilas. A resistência e estabilidade do solo com esta estrutura são atribuídas ao contato friccional entre os domínios.

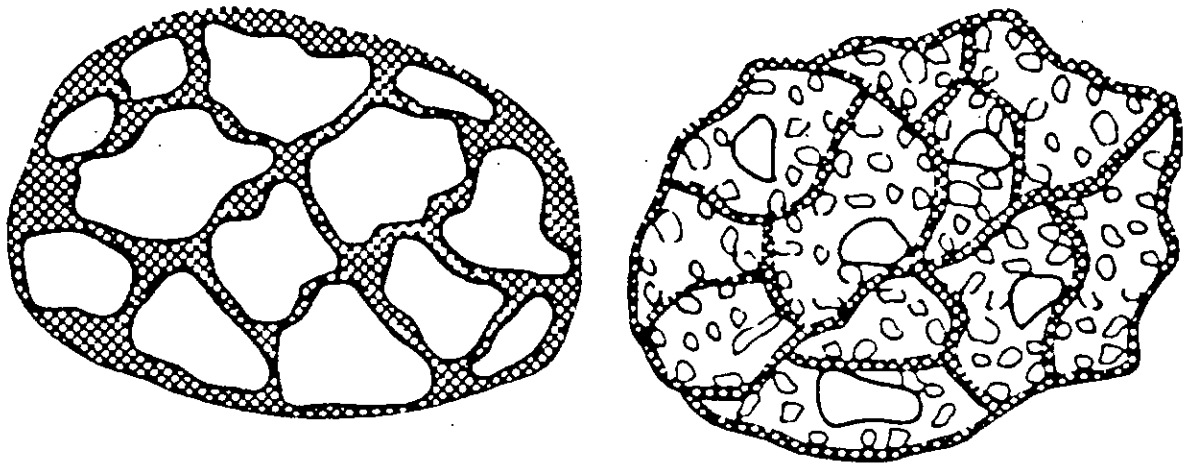
Nas misturas argila-cimento Herzog propôs um modelo de estrutura denominado matriz-esqueleto, neste as partículas de cimento hidratado são rodeadas por uma camada de domínios de partículas argilosas encaixadas e o material cimentante secundário (cimento neo-formado) se deposita, principalmente, em pontos de contato de aresta com aresta e aresta com face dos domínios. Os íons cálcio e hidróxido devem avançar na massa argilosa, preferencialmente, nos macroporos interconectados entre domínios (cimentação interdomínio) do que nos microporos dentro dos domínios (cimentação "intradomínios"). Se o teor de cimento da mistura for muito baixo as unidades (grãos de cimento hidratado envolvidos pelos domínios) se comportam como partículas bem granulares e separadas flutuando na matriz argilosa, à medida que se aumenta o teor de cimento, as unidades do esqueleto vão ficando menos espaçadas, as ramificações

vão se interligando, aumentando a estabilidade e resistência da matriz argilosa. Para teores de cimento maiores a matriz argilosa desaparece, devido a interconexão das unidades, havendo a formação de um esqueleto rígido.

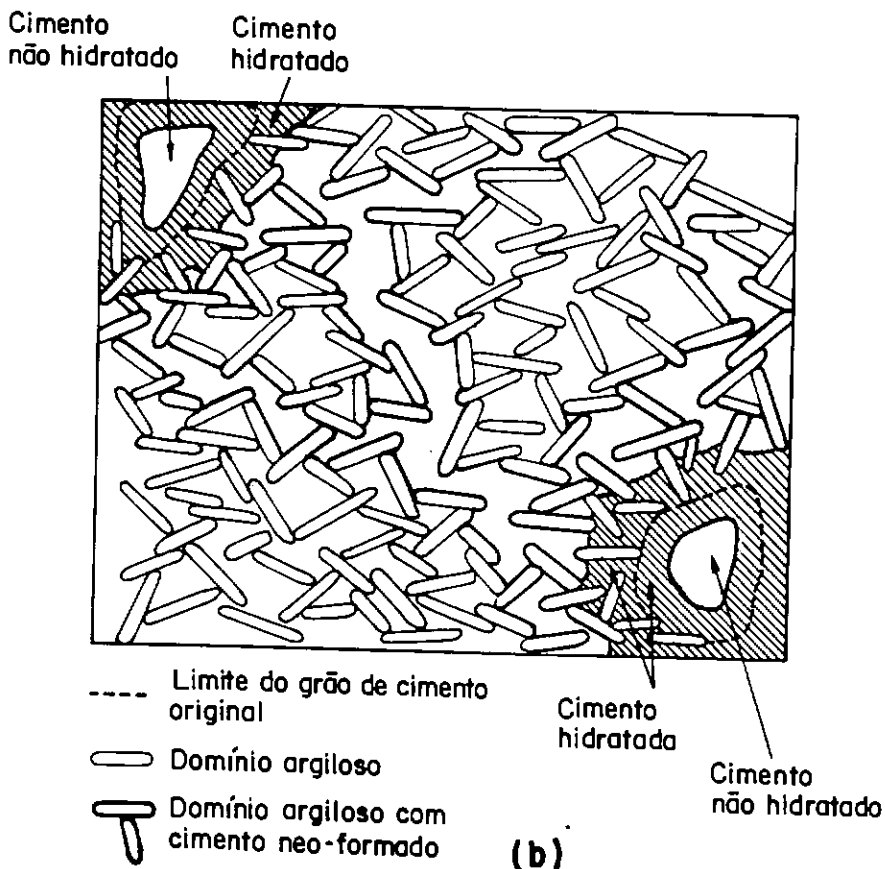
III.4.3 Fatores que influenciam as propriedades físico-químicas do solo-cimento

(a) Composição mineralógica

CROFT citado em MOURA (1987) concluiu que as reações secundárias entre a caulinita e a cal produzida durante a hidratação são lentas nos primeiros estágios de cura e têm pequena influência sobre a estabilidade dos géis formados durante a hidratação; conseqüentemente, o endurecimento acontece independentemente da presença do argilomineral. Após períodos de cura mais prolongados, a cal livre é consumida em reações secundárias ou absorvida pelas fases primária e secundária da hidratação, contribuindo, ambos os processos, com a cimentação. Já os argilominerais expansivos, dependendo de sua atividade, podem influenciar significativamente o endurecimento dos materiais gelatinosos e a cristalização de novos minerais.



(a)



(b)

Figura III.5 - (a) Modelo dos "esqueletos" formados nas misturas solo cimento para solos arenosos e argilosos (PITTA, 1979).
 (b) Modelo de HERZOG da estrutura matriz-esqueleto no solo-cimento (MARCONDES, 1992)

CROFT afirma que os produtos cimentantes formados durante o envelhecimento de misturas de montmorilonita com cimento têm grau de cristalização inferior ao daqueles produzidos em misturas com os argilominerais não expansivos. Conseqüentemente, não devem desenvolver resistências de magnitude similar em misturas compactadas, e sem a adição de cimento para suprir a cal em quantidade que satisfaça a montmorilonita e promova o endurecimento, as propriedades prejudiciais do argilomineral podem não ser modificadas.

Enfim, solos caulíníticos e iliticos são mais adequados para a estabilização que solos contendo grandes quantidades de argilominerais expansivos.

(b) Granulometria

Quanto mais fino é um solo, maior é a sua superfície específica, conseqüentemente a área a ser cimentada aumenta. A rugosidade dos grãos é diretamente proporcional ao seu diâmetro. Assim, os solos mais grossos são mais fáceis de ser estabilizados, exigindo menores quantidades de cimento e adquirindo maior resistência devido às fortes ligações mecânicas que se estabelecem na interface do gel com as partículas do solo.

Nos solos finos, as ligações mecânicas, na interface gel-grão, são de menor intensidade, pois prevalecem ligações químicas mais fracas. Além disso a resistência do cimento pode ser enfraquecida devido à absorção dos íons de cálcio pela argila. Desta forma, os solos finos demandam maiores quantidades de cimento para serem estabilizados e apresentam resistência e durabilidade mais baixas.

Os solos de granulometria uniforme apresentam um volume de vazios maior e um número menor de contatos entre os grãos. Conseqüentemente a ação cimentícia é dificultada, sendo necessário um teor de cimento mais elevado afim de que os géis, formados em torno dos grãos de cimento, ocupem os vazios e promovam as ligação dos grãos entre si. Ao contrário, os solos de granulometria contínua, o volume de vazios é menor demandando, então, menores teores de cimento (D'AMICO, 1979).

(c) Plasticidade

Diversas experiências tem comprovado que solos com índice de plasticidade e limites de liquidez elevados são mais difíceis de serem estabilizados, exigindo, geralmente, maiores teores de cimento (D'AMICO, 1979). Contudo, quando o solo-cimento é utilizado na fabricação de elementos construtivos, uma

pequena plasticidade faz-se necessária, garantindo coesão suficiente para as operações de desmoldagem e transporte até o local destinado à cura dos elementos.

(d) Matéria orgânica, sais solúveis e sulfatos

Na estabilização de solos a presença de matéria orgânica prejudica sensivelmente as reações de interação solo-cimento devido, principalmente, à sua grande capacidade de troca catiônica que pode determinar a absorção de grande quantidade de íons cálcio, liberados na hidratação do cimento. Entretanto, D`Amico (1979) menciona que experiências na Inglaterra mostraram que o efeito depende do tipo de matéria orgânica: compostos com peso molecular elevado, como a celulose, a linhita e a gelatina, pouco afetam o solo-cimento enquanto os de baixo peso molecular, como a glicose, os açúcares e o ácido húmico, são altamente prejudiciais.

Sulfatos de cálcio e magnésio, quando presentes em teores maiores que 1%, reagem com o aluminato tricálcio do cimento hidratado, provocando seu aumento e conseqüente desagregação do solo-cimento. Os sais inorgânicos solúveis em presença água podem se expandir e causar a desagregação do solo-cimento.

(e) Grau de finura do cimento e cimentos de alta resistência inicial

Os cimentos de alta resistência inicial, além de conferirem ao solo-cimento resistência mais elevada nos primeiros dias, o que é importante para a moldagem e o manejo de elementos, liberam durante a hidratação, maiores quantidades de íons cálcio, que poderam vir a neutralizar o efeito da matéria orgânica, porventura existente no solo.

D`AMICO (1979) cita CLARE e FARRAR que concluíram que utilizando-se cimentos mais finos o teor de cimento requerido para a estabilização de um solo pode ser reduzido.

(f) O peso específico seco

FELT (1955) observou, através de ensaios de durabilidade por molhagem (12 ciclos) e secagem e congelamento e degelo, efeitos bastante relevantes da variação do peso específico na perda de massa das misturas utilizando diferentes tipos de solo. Embora todas as misturas ensaiadas foram beneficiadas com o aumento do peso específico, as misturas solo-cimento empregando solos argilosos e siltosos foram as mais beneficiadas, como pode ser comprovado no gráfico da

Figura III.7 onde foram plotadas as perdas de massa em função do acréscimo ou decréscimo do peso específico a partir de um valor selecionado como linha de base.

A Figura III.8, de forma análoga a anterior, plotou a resistência à compressão de corpos de prova com diferentes massas específicas aparentes. Novamente, o aumento do peso específico aparente resulta em aumento da resistência à compressão, mantendo-se este efeito mais pronunciado nos solos argilosos.

(g) Umidade de moldagem

Para estudar o efeito da umidade de moldagem das misturas solo-cimento, FELT (1955) ensaiou corpos de prova em ciclos de molhagem e secagem, congelamento e degelo com umidades acima e abaixo da umidade ótima (ensaio de compactação, método ASTM D558-44) selecionada como linha de base. Os corpos de prova para os ensaios de resistência foram moldados nas mesmas massas específicas e umidades. Mantendo-se a energia de compactação constante e a umidade variável, conseqüentemente o peso específico dos corpos de prova também variou, mas os resultados indicaram que o efeito da umidade se sobrepõe ao efeito das diferenças nas massas específicas.

Foi observado nos ensaios de durabilidade que os solos siltosos e argilosos registraram maior perda de massa quando compactados com umidades inferiores à umidade ótima, a menos de um que não foi afetado significativamente (ver figura III.9). FELT conclui a partir dos resultados desta investigação que para obter misturas de solo-cimento, com boa qualidade, de solos siltosos e argilosos, as misturas devem ser compactadas acima ou na umidade ótima, nunca abaixo deste valor, o autor ainda cita que estes resultados tem corroborado com outros testes da Portland Cement Association em concordância com resultados obtidos por outros pesquisadores.

O efeito da umidade de moldagem nos ensaios de durabilidade para as misturas solo-cimento feitas a partir de solos arenosos não foi o mesmo constatado nos solos siltosos e argilosos. Neste caso, a umidade de moldagem ligeiramente no ramo seco da curva de compactação foi mais favorável.

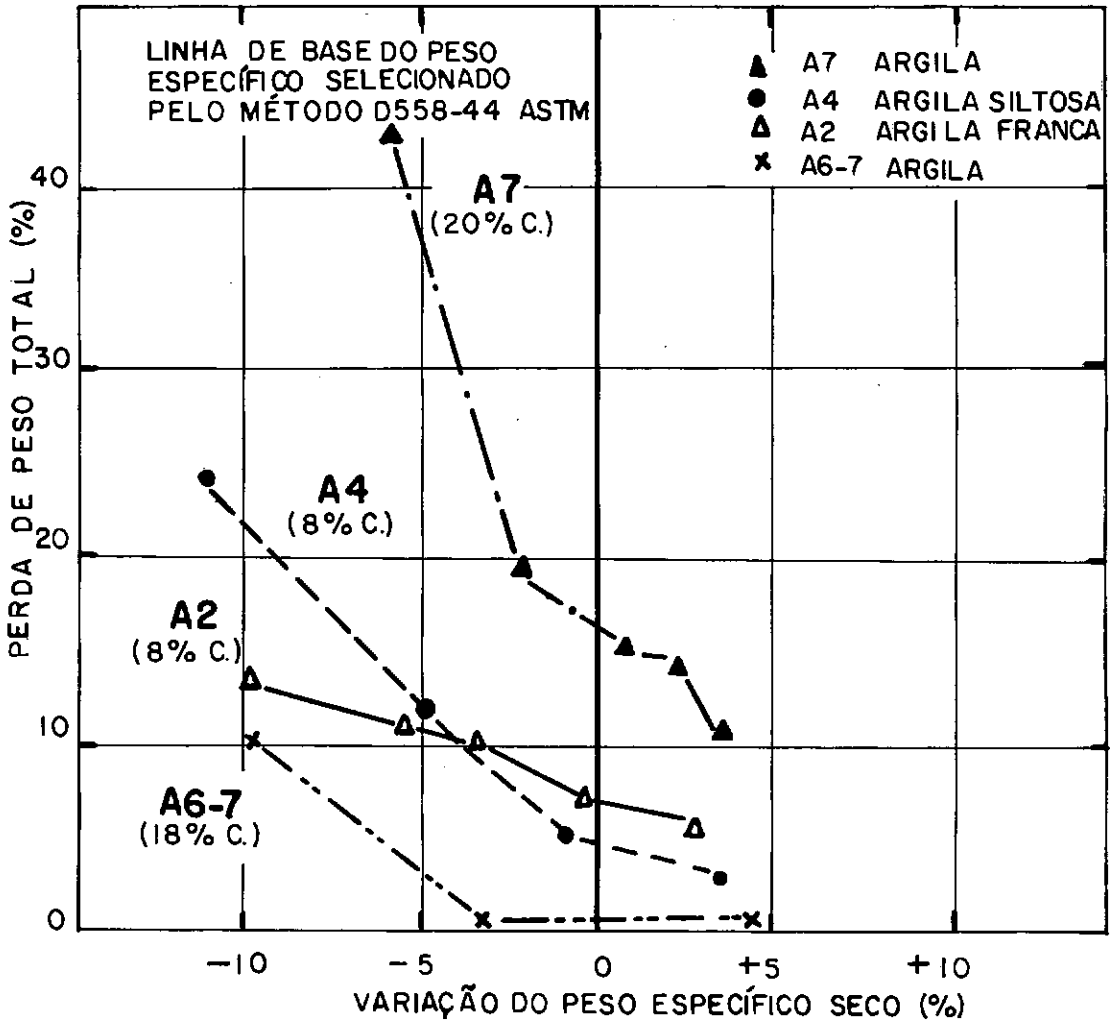


Figura III.6 - Efeito do peso específico seco na perda de massa do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (FELT, 1955).

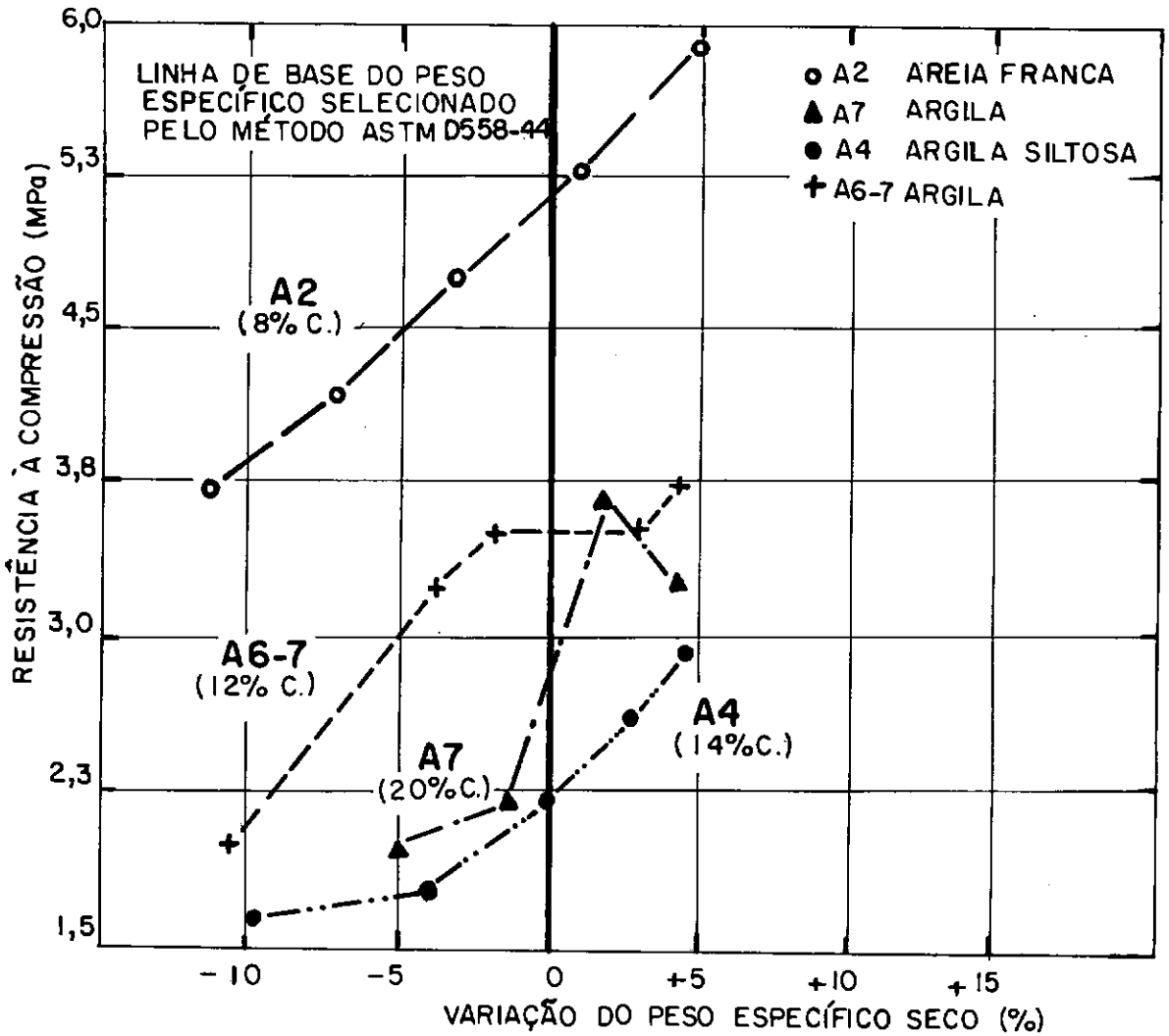


Figura III.7 - Efeito do peso específico seco na resistência à compressão de misturas solo-cimento (FELT, 1955).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para as várias misturas solo-cimento publicadas por FELT estão apresentadas na figura III.10. Nesta observa-se que os corpos de prova moldados na umidade ótima ou ligeiramente abaixo desta, exceto para o solo A7, alcançam a resistência máxima.

Finalizando, FELT conclui que considerando conjuntamente os ensaios de durabilidade e a resistência à compressão indicam que para uma máxima eficácia das misturas solo-cimento empregando solos arenosos, estas devem ser compactadas na umidade ótima ou ligeiramente abaixo desta, ao passo que misturas solo-cimento a partir de solos argilosos e siltosos devem ser compactadas com umidades 1 a 2 % acima da umidade ótima.

(h) Eficiência da mistura

D`AMICO (1979) cita pesquisas efetuadas por BAKER que indicam haver uma razão logarítmica da resistência do solo-cimento com a uniformidade da mistura e com o tempo de execução.

A execução de bases de pavimentos com misturas de solo-cimento utilizam, freqüentemente, procedimentos em que o solo é pulverizado no local, o cimento é adicionado, executando-se a "mistura seca". A água é, então, adicionada iniciando-se a mistura úmida. A totalidade da água requerida na estabilização não é adicionada de uma só vez, e são necessárias várias passadas do caminhão pipa com barra espargidora e do equipamento de mistura, em decorrência deste procedimento a mistura úmida pode demandar 2 horas ou mais. Analogamente, as misturas solo-cimento destinadas a moldagem de tijolos, blocos e paredes monolíticas são feitas em duas etapas, a "mistura seca" e a mistura úmida, ambas podem ser feitas manualmente ou, preferencialmente, empregar misturadores adequados. Geralmente o processo de mistura é mais rápido do que na execução de bases de pavimentos, porém a demora refere-se ao tempo em que a mistura permanece em repouso aguardando a compactação, esta demora conduz a uma produção de características heterogêneas dos elementos e componentes. D`AMICO (1979) refere-se a uma publicação do pesquisador Carlos de Souza Pinto que verificou que com o passar do tempo de mistura, há um decréscimo na resistência do solo cimento devido, principalmente, às reações iniciais do cimento que diminuem o peso específico aparente máximo atingível com determinada energia de compactação. Este efeito é mais pronunciado quando a mistura é deixada em repouso, do que quando é agitada periodicamente.

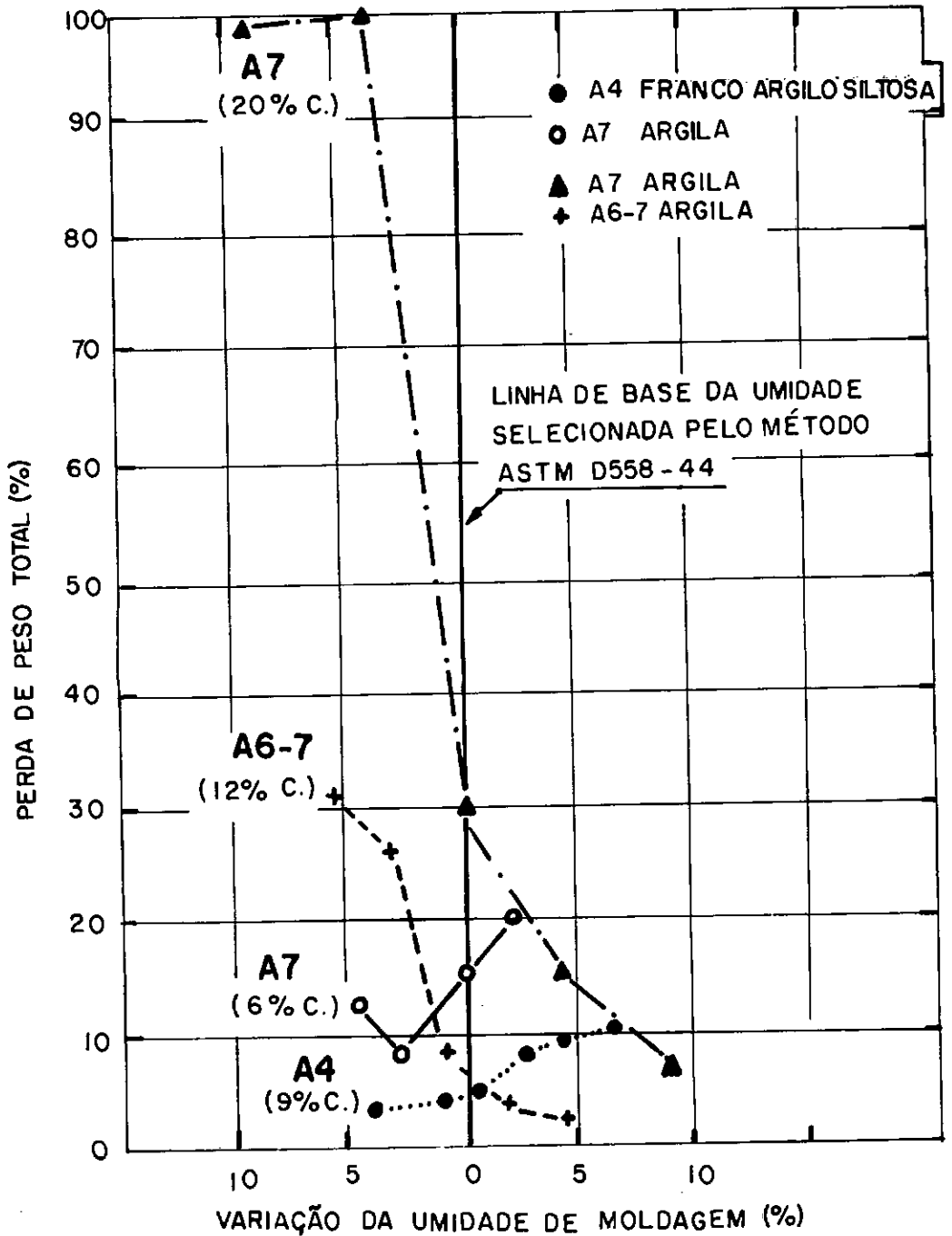


Figura III.8 - Efeito da umidade de moldagem na perda de massa no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (FELT, 1955).

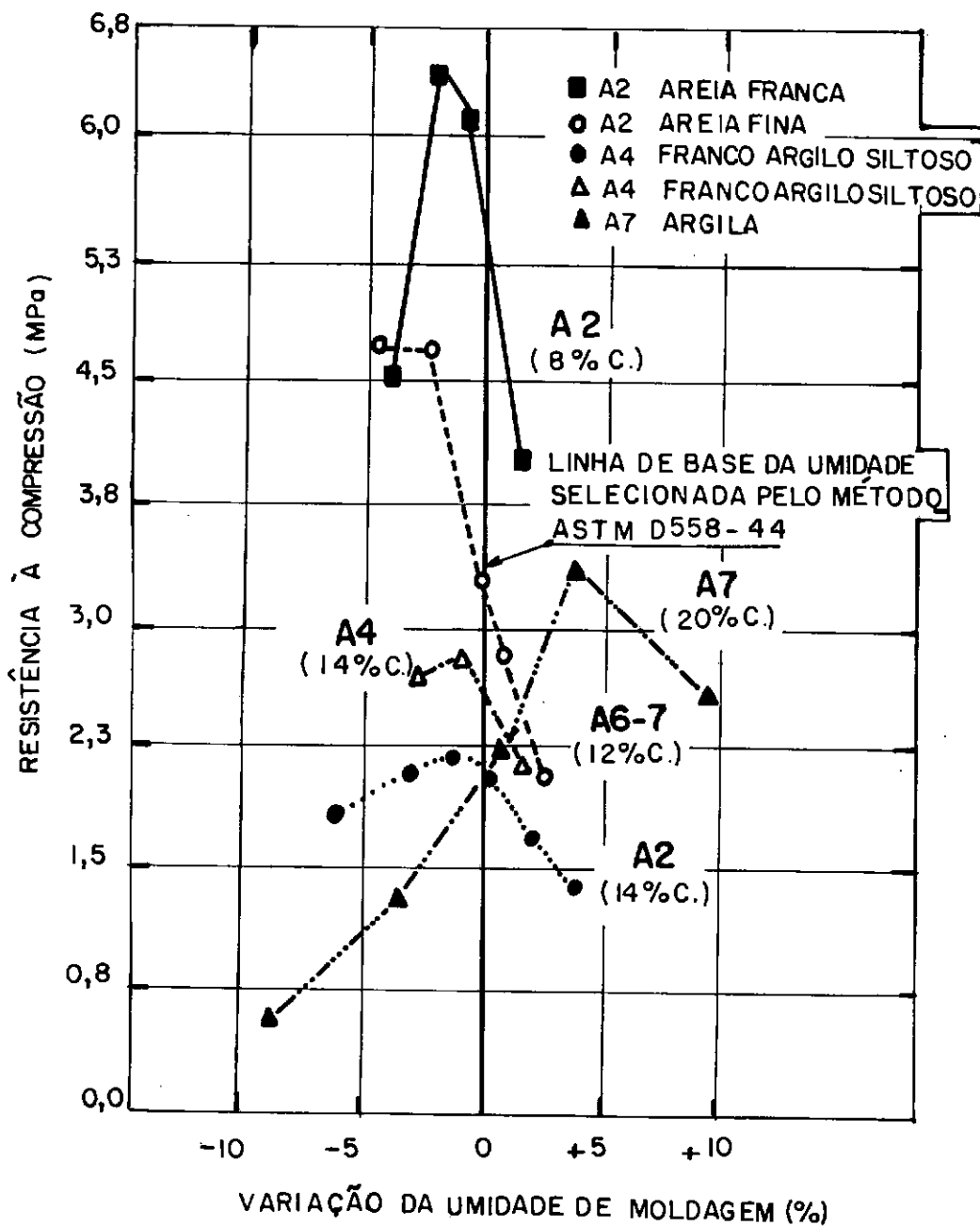


Figura III.9 - Efeito da umidade de moldagem na resistência à compressão a 28 dias (FELT, 1955).

Os resultados do programa de ensaios apresentado em FELT (1955) já haviam detectado que a umidade ótima do solo-cimento misturado intermitentemente aumenta, diminuindo o peso específico aparente, à medida que o tempo de mistura aumenta. Este efeito é devido provavelmente à troca catiônica nos argilominerais que ocorre à medida que a mistura envelhece, durante prolongados períodos de mistura. Inclusive, há um desenvolvimento de uma nova estrutura e textura da mistura solo-cimento.

FELT também já havia constatado, através dos ensaios de durabilidade que as perdas de massa com o tempo de mistura se tornavam mais pronunciadas quando a mistura não era feita de modo intermitente, isto é, várias vezes por hora até a compactação.

MOURA (1987) estudou a variação de resistência em função do tempo de demora antes da compactação para uma amostra de solo laterítico e outra de solo saprolítico, constatando que o solo laterítico é muito afetado por esta variável, sofrendo um decréscimo de resistência de quase 30 % na primeira meia hora e de mais de 40 % após cerca de duas horas, em relação à resistência correspondente a apenas 12 minutos de demora. Já o solo saprolítico investigado foi muito menos afetado por esta demora, apresentando mesmo um ganho de resistência da ordem de 10 % em relação à resistência inicial ou de 20 % em relação à resistência máxima registrada, que corresponde à demora de aproximadamente 30 minutos. Outro dado observado por MOURA é que quanto maior a demora antes da compactação, menor é a densidade que se consegue atingir para uma mesma energia de compactação.

(i) Grau de pulverização do solo

Segundo FELT (1955) a qualidade da misturas solo-cimento elaboradas com solos argilosos e siltosos é melhor quando 100 % do solo (exclusive pedras e pedregulhos) é pulverizado e passa na peneira N.^o 4 (4,8 mm). Entretanto, a qualidade não foi seriamente afetada pela presença de até 30 % de solo não pulverizado, contanto que os torrões de solo estivessem úmidos no momento da mistura (na umidade ótima ou ligeiramente acima desta) fosse compactada. Se os torrões de solo estivessem secos no instante da compactação, a qualidade do material seria seriamente prejudicada.

(j) Cura

A cura é o tratamento empregado afim de garantir nas bases de pavimentos, elementos ou componentes de construção, confeccionados com misturas solo-cimento após compactação, que as reações físico-químicas se processem normalmente.

III.5 Métodos de dosagem experimental de solo-cimento

III.5.1 O método da ABCP

Este procedimento, que sempre figurou como parte das normas internas da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, teve como origem as normas usadas pela PCA - Portland Cement Association (PCA, 1945), existindo dois procedimentos de dosagem; um conhecido como Norma Geral de Dosagem, que aplicava-se a qualquer tipo de solo, desde o A1 ao A7 (segundo a classificação ASTM D 3282, originada na classificação da AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials), e a Norma Simplificada de Dosagem aplicada a solos mais granulares. Em ambas as normas é feita, preliminarmente, a caracterização e classificação da amostra de solo, utilizando-se os seguintes métodos: MB-28; MB-29; MB-30; MB-31 e MB-32. As diversas frações de solo são agrupadas em faixas granulométricas, conforme a tabela III.1:

Nomenclatura	Diâmetro (mm)
Pedregulho graúdo	4,8 a 76
Pedregulho fino	2,0 a 4,8
Areia grossa	0,42 a 2,0
Areia fina	0,05 a 0,42
Silte	0,005 a 0,05
Argila	menor que 0,005

Tabela III.1 - Nomenclatura das faixas granulométricas (ABCP, 1977).

A *Norma Geral de Dosagem*, elaborada em 1940, utiliza o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, congelamento e degelo que segundo CATTON citado em PINTO (1980) não constituem ensaios de intemperismo, mas seu objetivo é determinar a influência da estabilização com cimento na resistência às forças destruidoras, de expansão, contração e congelamento, que podem fazer variar as características físicas do solo, de um extremo ao outro.

Neste procedimento é feito, primeiramente, o ensaio de compactação (antigo ABCP SC-1, atual MB 3359) realizado com o teor de cimento mais provável, teor este fixado pela experiência com solos de características análogas ou o indicado na tabela III.2, em função da classificação segundo a AASHTO.

Classificação do solo segundo AASHTO	Teor de cimento em peso, indicado para o ensaio de compactação (%)
A 1-a	5
A 1-B	6
A 2	7
A 3	9
A 4	10
A 5	10
A 6	12
A 7	13

Tabela III.2 - Teor de cimento mais provável (ABCP, 1977).

O ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (ABCP SC-3) consiste em submeter corpos de prova após o período de cura a ciclos de solicitação que consiste em: imersão em água à temperatura ambiente por 5 horas, depois permanecer em estufa à temperatura de 71 ± 2 °C por 42 horas e, na hora seguinte escová-los, perfazendo um ciclo de 48 horas. Após 12 destes ciclos o corpo de prova é colocado em estufa a 105 - 110 °C até constância de peso, para que se determine a perda de massa sofrida durante os ciclos de molhagem e secagem. Na versão original deste procedimento outros corpos de prova são, simultaneamente, submetidos a 12 ciclos de congelamento, em temperatura inferior a -23° C durante 24 horas; e degelo, temperatura de 21° C durante 23 horas, e escovação.

Neste ensaio utilizam-se 3 teores de cimento, moldando-se um corpo de prova para cada teor: o teor mais provável para o solo em estudo, indicado pela

experiência com solos de características análogas ou pelas tabelas III.4 e III.5, em função das características físicas do solo e do peso específico aparente máximo obtida no ensaio de compactação; e com teores 2 % acima e abaixo do mais provável.

Será adotado, como teor de cimento indicado, o menor dos teores com os quais os corpos de prova submetidos ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, acusam uma perda de peso inferior aos limites da tabela III.3.

Solos A 1, A 2-4, A 2-5 e A 3	14 %
Solos A 2-6, A 2-7, A 4 e A 5	10 %
Solos A 6 e A 7	7 %

Tabela III.3 - Limites de perda de pesos em ensaios de durabilidade por molhagem e secagem (ABCP, 1977).

A PCA, baseada na dosagem de 2.438 solos arenosos através da Norma Geral de Dosagem, obteve uma correlação entre os teores de cimento adequados e três características da mistura: granulometria do solo, o peso específico aparente máximo e resistência à compressão simples, aos 7 dias de idade. Descobriu-se que um solo arenoso com determinada granulometria e o peso específico seco máximo requererá de acordo com o critério da Norma Geral de Dosagem (baseada em ensaios de Durabilidade), o mesmo teor de cimento que outro solo com a mesma granulometria e mesmo peso específico seco máximo, desde que apresente uma resistência à compressão aos 7 dias superior a um valor estabelecido (PINTO, 1980). A partir deste fundamento surgiu em 1952 a Norma Simplificada de Dosagem, que começou a ser divulgada no Brasil em 1954. Os solos denominados arenosos deveriam satisfazer as seguintes condições:

- Possuir no máximo 50 % do material com diâmetro inferior a 0,05 mm (silte mais argila);
- possuir no máximo 20% de material com diâmetro inferior a 0,005 mm (argila).

Pedregulho grosso (%)	Silte mais argila (%)	peso específico seco máximo (KN/m ³)					
		16,8 a 17,6	17,6 a 18,4	18,4 a 19,20	19,20 a 20,0	20,0 a 20,8	20,8 ou mais
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	9	8	7	7	5	5
	40-50	11	10	9	8	6	5
15-29	0-19	10	9	8	6	5	5
	20-39	9	8	7	6	6	5
	40-50	12	10	9	8	7	6
30-45	0-19	10	8	7	6	5	5
	20-39	11	9	8	7	6	5
	40-50	12	11	10	9	8	6

Tabela III.4 - Teor de cimento médio requerido por solos arenosos não orgânicos - percentagem passando na peneira N.º 200 \leq 35 % (ABCP, 1977).

Índice de grupo do solo (%)	Silte (%)	Peso específico seco máximo (KN/m ³)						
		14,4 a 15,2	15,2 a 16,0	16,0 a 16,8	16,8 a 17,6	17,6 a 18,4	18,4 a 19,2	19,2 ou mais
0-3	0-19	12	11	10	8	8	7	7
	20-39	12	11	10	9	8	8	7
	40-59	13	12	11	9	9	8	8
	60 ou mais	-	-	-	-	-	-	-
4-7	0-19	13	12	11	9	8	7	7
	20-39	13	12	11	10	9	8	8
	40-59	14	13	12	10	10	9	8
	60 ou mais	15	14	12	11	10	9	9
8-11	0-19	14	13	11	10	9	8	8
	20-39	15	14	11	10	9	9	9
	40-59	16	14	12	11	10	10	9
	60 ou mais	17	15	13	11	10	10	10
12-15	0-19	15	14	13	12	11	9	9
	20-39	16	15	13	12	11	10	10
	40-59	17	16	14	12	12	11	10
	60 ou mais	18	16	14	13	12	11	11
16-20	0-19	17	16	14	13	12	11	10
	20-39	18	17	15	14	13	11	11
	40-59	19	18	15	14	14	12	12
	60 ou mais	20	19	16	15	14	13	12

Tabela III.5 - Teor de cimento médio requerido por solos siltosos e argilosos - percentagem passando na peneira N.º 200 > 35 % (ABCP, 1977).

Dependendo da granulometria do solo adotam-se um dos dois procedimentos descritos a seguir:

Norma A - usada quando 100 % da amostra original passa na peneira de abertura 4,8 mm;

Norma B - usada quando o material que passa na peneira de abertura 19 mm fica retido parcialmente na peneira de abertura 4,8 mm.

Em ambos procedimentos são realizados os mesmos ensaios preliminares da Norma Geral, ou seja:

- Na Norma A determina-se o peso específico aparente máximo e a umidade ótima da mistura solo-cimento através do Ensaio de Compactação. Obtem-se o teor de cimento indicado para a realização deste ensaio, estimando-se, inicialmente, o peso específico aparente máximo da mistura por meio do gráfico da figura III.8, entrando-se com dados da granulometria do solo. Com o peso específico seco máximo e dados da granulometria do solo entra-se no gráfico da figura III.9 e, finalmente, obtém-se o teor de cimento indicado. Moldam-se, então, três corpos de prova, e determina-se à resistência a compressão após 7 dias de cura. Verifica-se na figura III.10, em função de dados da granulometria do solo, a mínima resistência à compressão a ser obtida. Se a média das resistências obtidas for superior à indicada pela figura III.10 o teor investigado será adotado, caso contrário a amostra deverá ser ensaiada pelo Norma Geral de Dosagem, moldando-se os corpos de prova com o teor de cimento indicado e com um teor 2 % acima dele;

- a Norma B segue procedimento idêntico à Norma A, havendo apenas a substituição dos gráficos das figuras III.8, III.9 e III.10 pelos das figuras III.11, III.12 e III.13 respectivamente.

Os procedimentos das Normas Geral e Simplificada foram modificados por uma comissão de estudo da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), resultando na norma NB 1336 - Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento. Segundo NASCIMENTO & JUNIOR (1991) a experiência adquirida no Brasil ao longo dos anos indicou a necessidade de limitar o uso de solos a serem empregados nas bases ou sub-bases de solo-cimento restringindo-os aos grupos A1, A2, A3 e A4 e que contenham: 100 % de material passando na peneira de abertura 76 mm; e no máximo 45 % de material retido na peneira de abertura 4,8 mm.

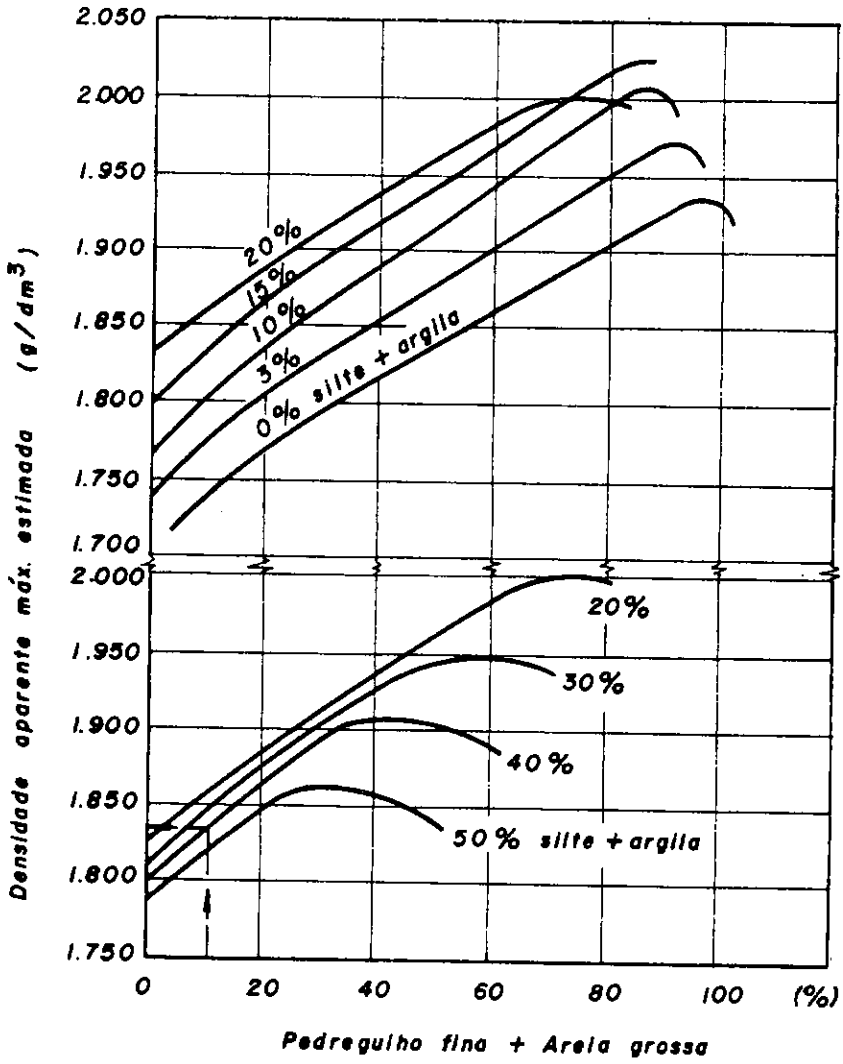


Figura III.10 - Método A - Peso específico seco máximo extimado (ABCP, 1977).

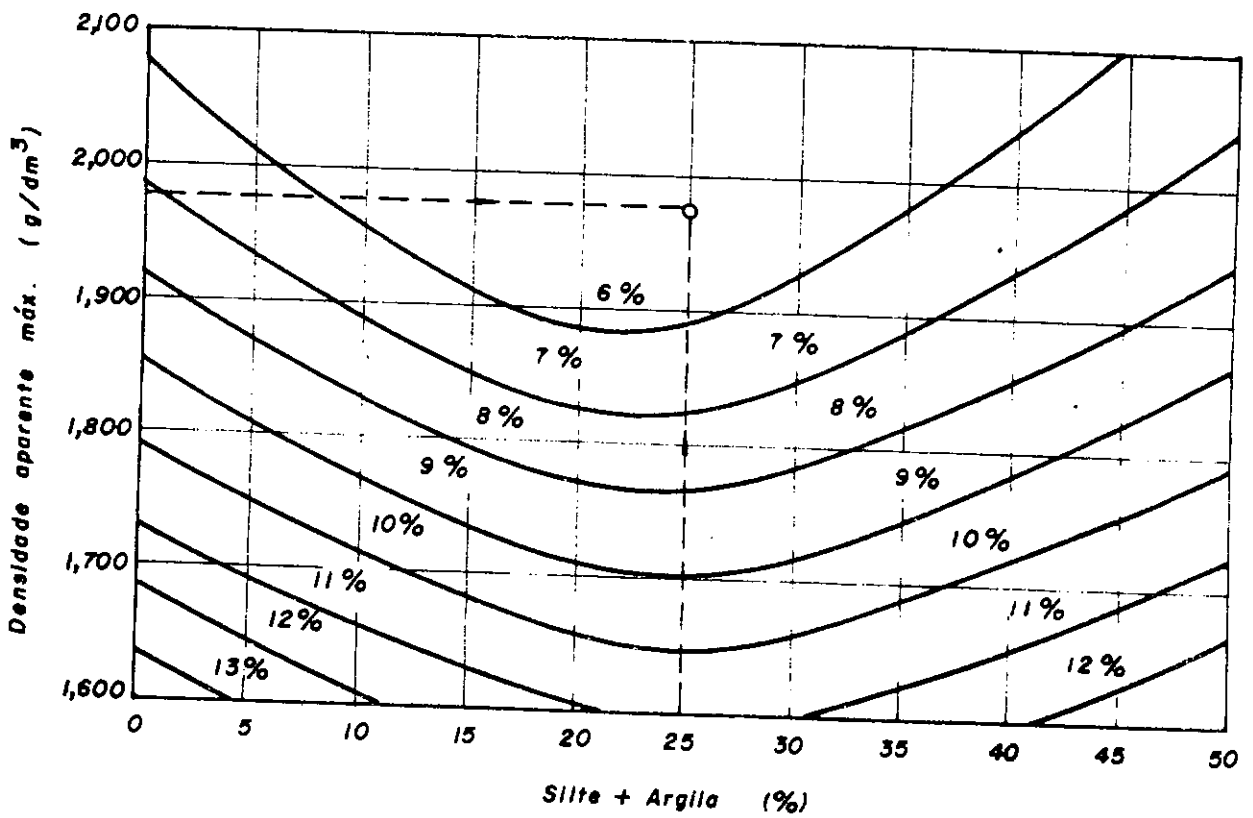


Figura III.11 - Método A - Teor de cimento em peso indicado (ABCP, 1977).

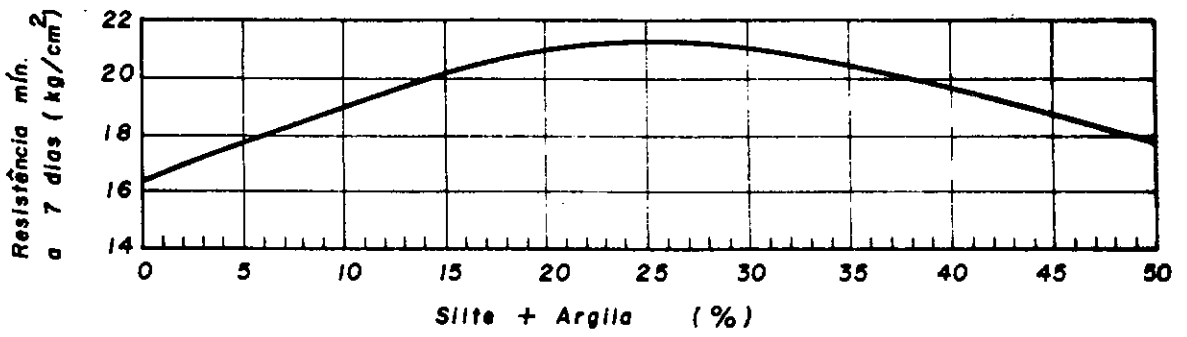


Figura III.12 - Método A - Mínima resistência à compressão dos corpos de prova a 7 dias (ABCP, 1977).

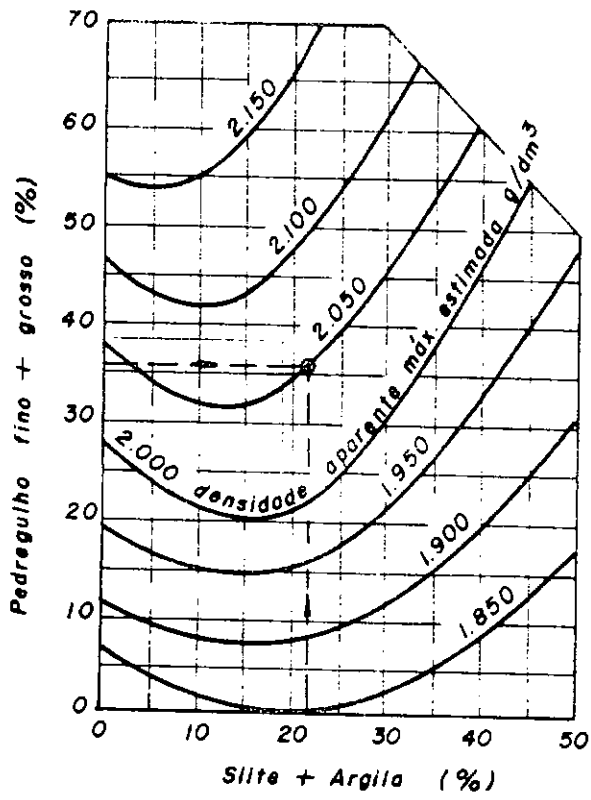


Figura III.13 - Método B - Peso específico seco máximo estimado (ABCP, 1977).

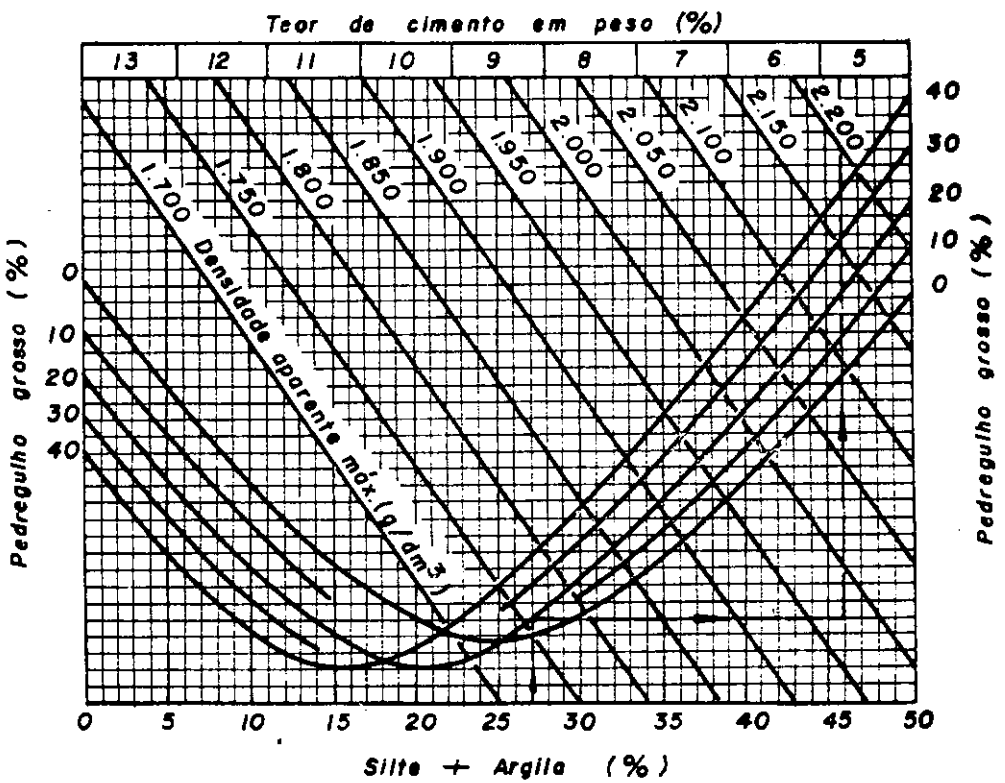


Figura III.14 - Método B - Teor de cimento em peso indicado (ABCP, 1977).

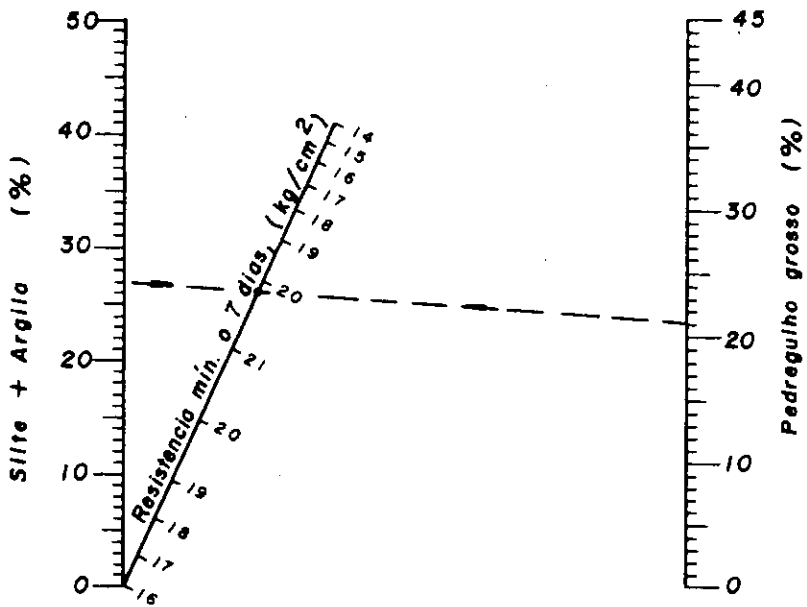


Figura III.15 - Método B - Mínima resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias (ABCP, 1977).

Abandonou-se o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem após ter sido constatado em um programa de ensaios interlaboratoriais, de acordo com o método ISO 5725, com a participação de laboratórios de todo o Brasil, que o ensaio é pouco preciso, pois o tratamento estatístico dos resultados acusou valores de repetibilidade e reprodutibilidade muito elevados.

Os solos siltosos e argilosos, descartados pelo novo procedimento de dosagem, oferecem dificuldades de execução no campo e requerem teores de cimento bastante elevados para a sua estabilização.

O novo procedimento de dosagem mantém os ensaios preliminares e o sistema de classificação utilizados pelas Normas Geral e Simplificada. Estando o material classificado dentro dos grupos aos quais a norma se aplica, executa-se o ensaio de compactação conforme o método MB 3359 - Solo-cimento - Ensaio de compactação, o teor de cimento a ser utilizado nesse ensaio, caso não houver experiência anterior com o solo, será o sugerido pela tabela III.2 (ver Norma Geral). Com os valores do peso específico aparente máximo e da umidade ótima moldam-se os corpos de prova para os ensaios de compressão simples, com os teores de cimento sugeridos pelos gráficos das figuras III.13 e III.14, (ver Norma Simplificada, norma A e B, respectivamente) caso também não se tenha experiência com o solo. Devem ser moldados corpos de prova (MB 3360 - Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos) com um ou mais teores de cimento, de forma que se determine o teor que forneça resultados de resistência à compressão simples de, no mínimo 2,1 MPa aos sete dias de idade (MB 3361 - Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos).

A norma admite a interpolação dos resultados para a determinação do teor de cimento correspondente ao valor mínimo da resistência a compressão média especificada; a extrapolação de dados é proibida.

O teor mínimo de cimento recomendado pela norma é de 5 % em peso; no entanto, solos dos grupos A1-a, A1-b e A2-4 podem ser dosados com teores a partir de 3,5 % desde que a dosagem seja feita em usina e que se atinja a resistência mínima exigida pela norma.

III.5.2 Critérios de dosagem do CEPED

Segundo o Manual de Construção com solo-cimento elaborado pelo CEPED (1985) a dificuldade básica, uma vez que já existem ensaios normalizados para a reprodução aproximada das solicitações previstas em paredes monolíticas, está em estabelecer os valores numéricos que deverão alcançar os ensaios em laboratório. Rigorosamente, a fixação de tais valores só se pode fazer depois de um acompanhamento, durante um certo tempo, do estado do material empregado em um número razoável de construções, nas quais se conheçam as condições iniciais de aplicação. Tais dados não existem, o que irá obrigar que a fixação de qualquer critério tenha que se apoiar em uma das seguintes opções: orientar-se a partir de outros usos do mesmo material, uma comparação com materiais convencionais, ou a partir de estudos de características estruturais das paredes.

Critérios de resistência

Buscar-se parâmetros de resistência em outros usos do solo-cimento, como por exemplo a execução de bases e sub-bases para pavimentos que são solicitados a esforços dinâmicos distancia-se bastante dos carregamentos estáticos e eventualmente de choque aos quais estão submetidas as paredes. Fixar-se como parâmetros as resistências adotadas pelas normas destinadas a tijolos e blocos cerâmicos também seria inconsistente tendo em vista a questão da forma geométrica distinta entre os elementos de alvenaria e os corpos de prova cilíndricos de solo-cimento utilizados nos critérios de paredes monolíticas.

Foi realizado um programa de ensaios à compressão em painéis de solo-cimento, com diversas dosagens e espessuras, e painéis de alvenaria de blocos e tijolos maciços cerâmicos como referência para comparação, onde foram moldados corpos de prova cilíndricos, com a mesma mistura utilizada para cada painel, ensaiados à compressão com medida de deformações. Os resultados obtidos foram extrapolados para paredes com esbeltezes maiores que as ensaiadas, aplicou-se a teoria da fórmula secante para colunas, que analisa as tensões médias de compressão na flambagem de colunas submetidas à cargas excêntricas em função da esbeltez da peça, do módulo de elasticidade da tensão limite de compressão do material. No caso do solo-cimento, a tensão limite de compressão foi considerada como sendo a resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos. Obtiveram-se curvas teóricas como a da figura III.16 e os dados obtidos nos ensaios dos painéis se localizaram bem próximos às curvas.

Considerado que as paredes usuais de solo-cimento têm esbeltez em torno de 80 (uma parede com 2,80 m de pé-direito e 12 cm de espessura tem uma esbeltez igual a 81). Pelo gráfico da figura III.16 tem-se que, para a essa esbeltez a tensão crítica na parede é 0,20 da resistência à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos. Aplicou-se um coeficiente de segurança igual a 2, já que há grande segurança na avaliação nas cargas que chegam às bases das paredes; as condições de fronteira na aplicação da teoria da fórmula secante para colunas são de uma peça sem vínculos laterais e, numa edificação, sempre há a presença desses vínculos nas paredes; foi considerada a excentricidade do carregamento; na determinação da resistência à compressão os corpos de prova foram imersos por 4 horas antes do ensaio, simulando as piores condições.

As solicitações existentes na base de uma parede de uma casa térrea são devidas basicamente ao peso próprio das paredes, lajes, telhas e estruturas de telhado, e sobrecargas na laje e no telhado. Raramente estas cargas excederão valores de 100 KN/m^2 quando telhados convencionais de telhas cerâmicas se apoiam nas paredes e 50 KN/m^2 quando o telhado não se apoia nas paredes.

Reunindo estas premissas o CEPED estabeleceu um critério racional para a resistência mínima requerida em corpos de prova cilíndricos ensaiados à compressão simples, mostrados na tabela III.6

Hipótese de carga	Paredes monolíticas (CS = 2)
Cargas do telhado sobre as paredes	$(2 \times 100)/0,2 = 1,0 \text{ MPa}$
Cargas do telhado sobre pilares	$(2 \times 50)/0,2 = 0,5 \text{ MPa}$
CS = coeficiente de segurança	

Tabela III.6 - Critérios de resistência - kN/m^2 (CEPED, 1985).

Critérios de Durabilidade

O já referido trabalho do CEPED (1985) menciona, como uma das poucas iniciativas de sistematização de dosagem nas aplicações de solo-cimento na construção de paredes monolíticas, a formulada em um trabalho de ABCP de 1948. Neste trabalho foram estabelecidos os seguintes critérios:

- Perda de peso seco ao fim do 6o. ciclo no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem inferior a: 14 % para os solos arenosos, 10 % para os solos siltosos e 7 % para os solos argilosos;

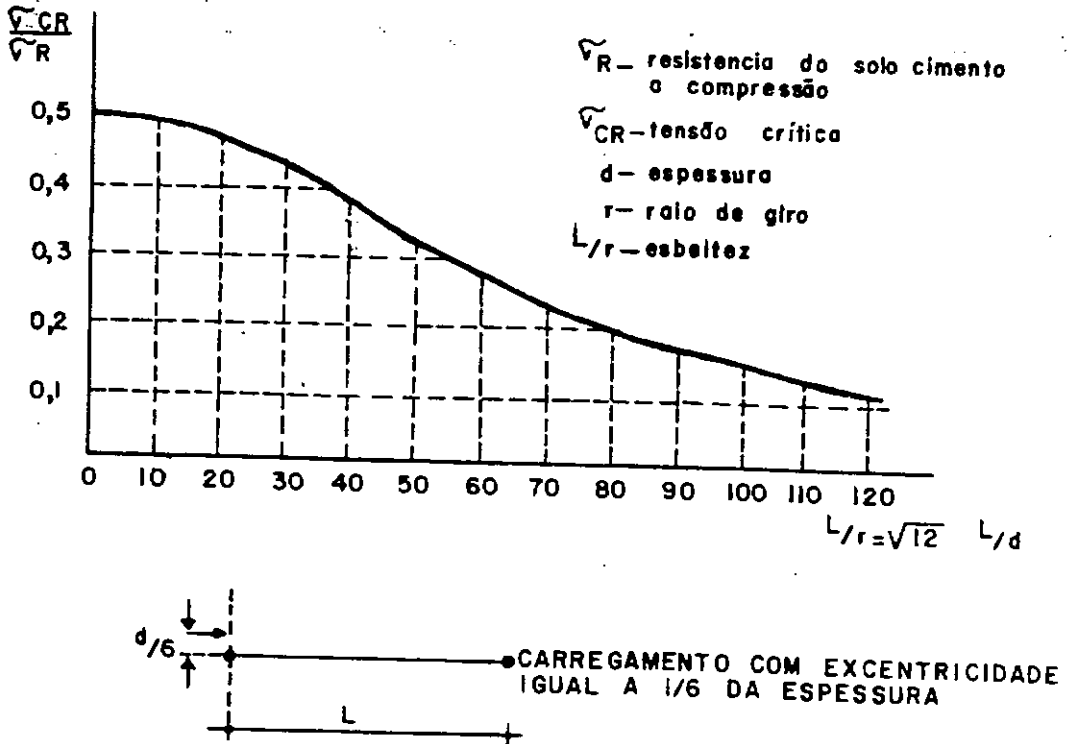
- variação máxima de volume em qualquer fase dos ensaios, até o 60.º ciclo, inferior a 1 % do volume inicial;
- teor de umidade nunca superior ao teor de saturação do corpo de prova;
- resistência à compressão crescente com a idade, devendo apresentar a 28 dias um valor mínimo de 100 kPa, após uma hora de imersão em água.

Segundo o CEPED (1985) o estabelecimento de critérios com relação à durabilidade de paredes monolíticas de solo-cimento só pode ser feito através da comparação com parâmetros admitidos em outros usos e através da experiência de execução de casas em solo-cimento. A comparação com o desempenho, nos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem, de elementos convencionais de alvenaria e corpos de prova de solo estabilizado acabaria inviabilizando a utilização destas misturas, ignorando, desta forma, todo um histórico de construções em excelente estado de conservação em todas as partes do globo.

Afim de definir um critério de dosagem baseado no fração de areia constituinte do solos o CEPED ensaiou diversos solos, agrupados conforme o percentual de areia presente em cada um (ver tabela III.7), e ensaiou-os à compressão simples e durabilidade por molhagem e secagem. O critério de perda de peso do ensaio de durabilidade foi de 10 % ao final do 12.º ciclo, foram também testados critérios mais flexíveis de perdas de 15 e 20 %. Os resultados dos ensaios estão apresentados nos quadros III.4 e III.5.

Grupos	Teor de areia (%)
G-I	45 a 54
G-II	55 a 64
G-III	65 a 74
G-IV	75 a 84
G-V	≥ 85

Tabela III.7 - Teores de areia mínimos (CEPED, 1985).



RELACÃO ENTRE TENSÃO CRÍTICA E RESISTENCIA DO SOLO-CIMENTO EM FUNÇÃO DA ESBELTEZ

Figura III.16 - Tensões de ruptura dos painéis de solo-cimento (CEPED, 1985)

Teor de areia (%)	Resistência à compressão (MPa)	Teor de cimento em peso (%)
45 a 54 G-I	0,5	10
	0,75	14
	1	14
55 a 64 G-II	0,5	10
	0,75	14
	1	14
65 a 74 G-III	0,5	14
	0,75	14
	1	14
75 a 84 G-IV	0,5	14
	0,75	14
	1	14

Quadro III.4 - Critérios de resistência (CEPED, 1985).

Teor de areia (%)	Perda de peso (%)	Teor de cimento em peso (%)
45 a 54 G-I	≤ 10	10
	≤ 15	14
	≤ 20	14
55 a 64 G-II	≤ 10	10
	≤ 15	14
	≤ 20	14
65 a 74 G-III	≤ 10	14
	≤ 15	14
	≤ 20	14
75 a 84 G-IV	≤ 10	14
	≤ 15	14
	≤ 20	14

Quadro III.5 - Critérios de durabilidade (CEPED, 1985).

Observando-se os quadros pode-se perceber que, os critérios de resistência impõe teores de cimento mais altos, de forma que o critério de durabilidade é sempre satisfeito. É evidente que o critério proposto pelo quadro da figura III.18 é conservador, uma vez que o teor de areia não é a única variável na dosagem, pois outros fatores como os limites plásticos, distribuição granulométrica e minerais argílicos apresentam influências fundamentais. O critério pela resistência à compressão ao propor valores mais conservadores, simplifica o apoio do laboratório, ao mesmo tempo que cobre a possibilidade de ocorrência de solos cujas características nem sempre são as mais favoráveis.

III.5.3 O método Físico-químico

A demanda elevada de tempo para a investigação do teor de cimento mínimo através das metodologias da PCA e das Normas Geral e Simplificada da ABCP motivaram muitos pesquisadores a desenvolver métodos rápidos de avaliação do teor de cimento requerido para a estabilização de solos.

A partir do método proposto por DIAMOND e KINTER (1958), em que o teor de cimento era determinado através de uma correlação deste com a superfície específica do solo, o pesquisador indiano CHADDA (1971) desenvolveu um método rápido para a determinação do teor de cimento. Aplicou o método em cinco amostras nas quais faziam parte solos muito plásticos (IP = 44,7 %) a solos de plasticidade moderada (IP = 10,1 %), e detalhou o experimento fazendo ensaios de compressão simples em corpos de prova moldados na umidade ótima, cujos resultados confirmaram uma confiabilidade razoável no método. Em trabalho anterior, CHADDA (1954) demonstrou que nas misturas solo-cimento o cimento se comporta como partículas eletricamente carregadas e sua presença no solo aumenta a condutividade elétrica da massa de compactada de solo-cimento. A interação elétrica do cimento e das argilas coloidais carregadas negativamente, seguidas instantaneamente pela hidratação do cimento, produzem rápidas alterações físico-químicas nas misturas solo-cimento.

O método proposto por CHADDA compreende um único ensaio onde várias provetas contendo uma suspensão em água de misturas de quantidades iguais de solo em todas as provetas e teores crescentes de cimento em peso (ver figura III.15). São observadas as variações volumétricas do sedimento de solo-cimento na suspensão e o sedimento da suspensão contendo somente solo ao longo do tempo. A proveta cujo teor de cimento produzir a máxima variação volumétrica percentual, com relação ao volume de sedimento da proveta sem adição de cimento, contém o teor mínimo requerido à estabilização do solo ensaiado. Este fenômeno se deve

ao aumento gradual do sedimento de solo-cimento causado pela rápida interação do cimento e das partículas de solo, que cessa tão logo o teor de cimento atinja um limite de saturação requerido para a produção de uma mistura estável. Um aumento do teor acima desse limite de saturação pode implicar em ganho de resistência mecânica da mistura compactada, porém não produzira mais nenhuma interação com a fração argila (CHADDA, 1971).

Tomando conhecimento desta publicação CASANOVA e CERATTI iniciaram, na COPPE/UFRJ, em 1985 o estudo do método testando-o em argilominerais puros, oxi-hidróxidos de ferro e alumínio e solos sesquióxídicos e caulíníficos, num total de trinta solos. Os resultados desta pesquisa foram publicados no "Eight International Soil Classification Workshop "(CASANOVA & CERATTI, 1986). Nesta primeira pesquisa confirmaram-se as observações feitas por CHADDA e obtiveram-se os resultados esperados na pesquisa com argilominerais, os menos reativos como a caolinita e a illita requereram, respectivamente, 2 % e 5 % de cimento enquanto que o mais reativo, a montmorilonita (previamente saturada com cálcio), requereu 15 a 20 % de cimento, observou-se também, que os argilominerais puros tiveram uma variação volumétrica pequena em relação aos oxissolos que apresentaram variações de 200% (ver figuras III.16 e III.17). Outro trabalho (CASANOVA & CERATTI, 1988) ensaiaram 12 solos e compararam o resultados obtidos com o método físico químico e o método da ABCP (denominado na COPPE/UFRJ como método mecânico), concluindo que há razoável concordância entre os dois métodos de dosagem e que a maioria dos solos alcançou boa resistência à compressão com o teor indicado pelo método Físico-químico.

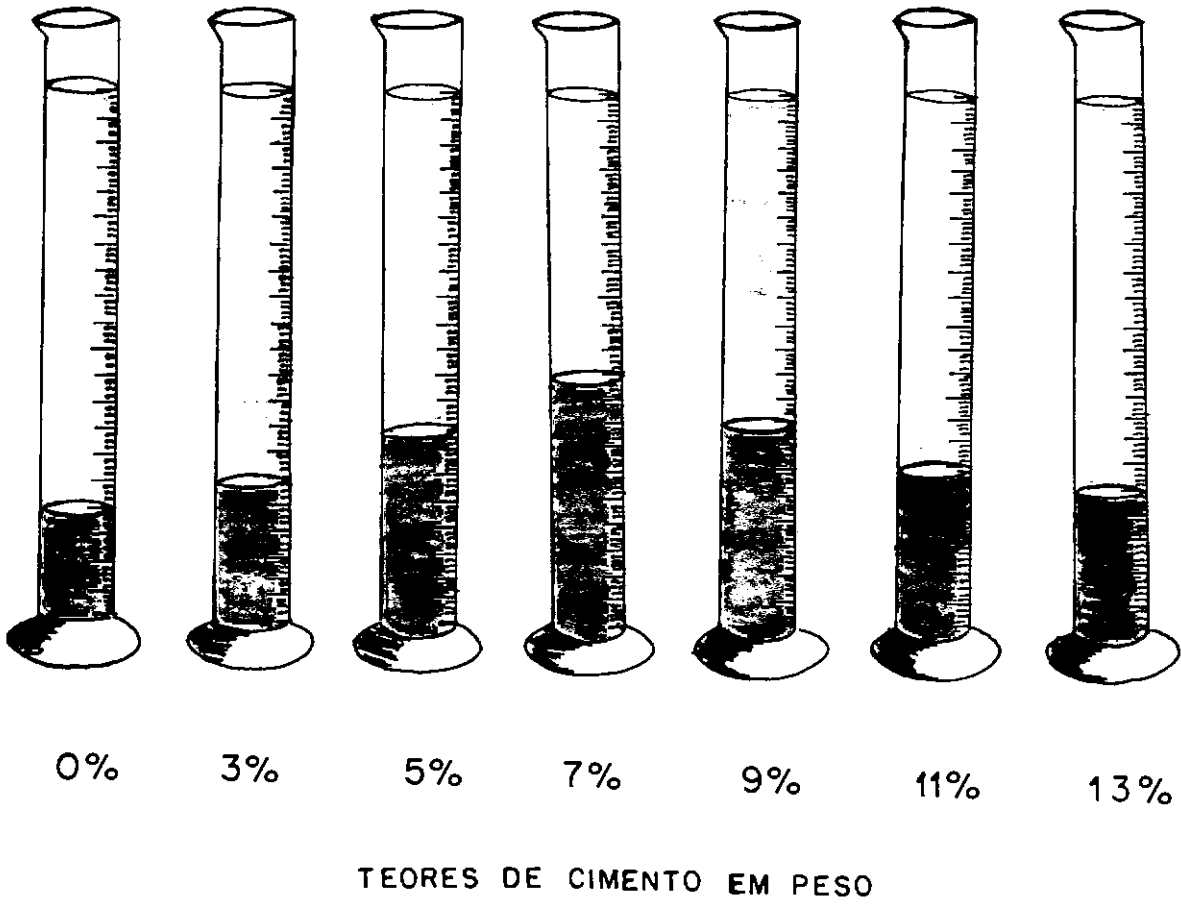


Figura III.17 - Ensaio físico-químico (CHADDA, 1954; 1971)

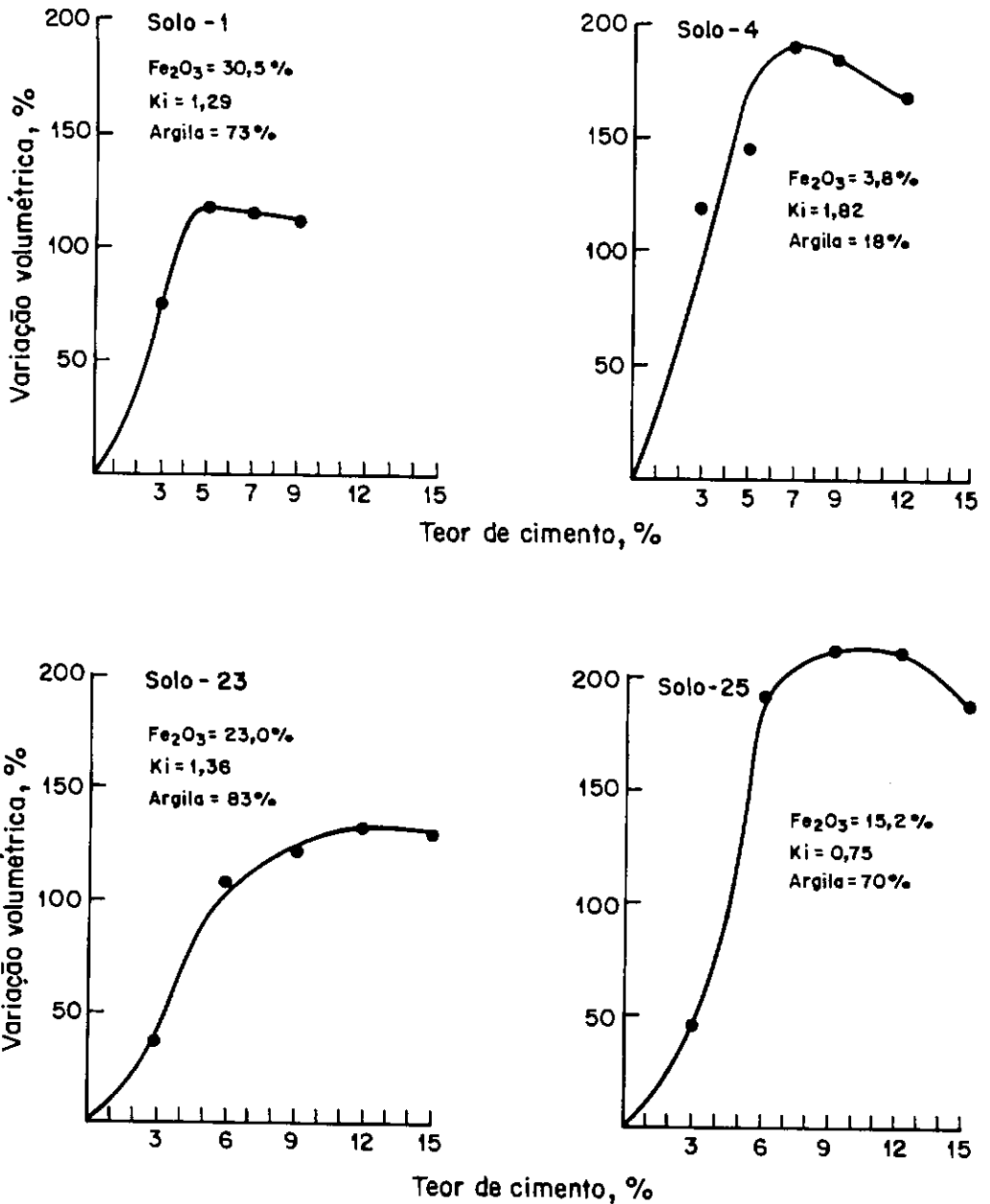


Figura III.18 - Variações volumétricas dos sedimentos das misturas solo-cimento (CASANOVA & CERATTI, 1986).

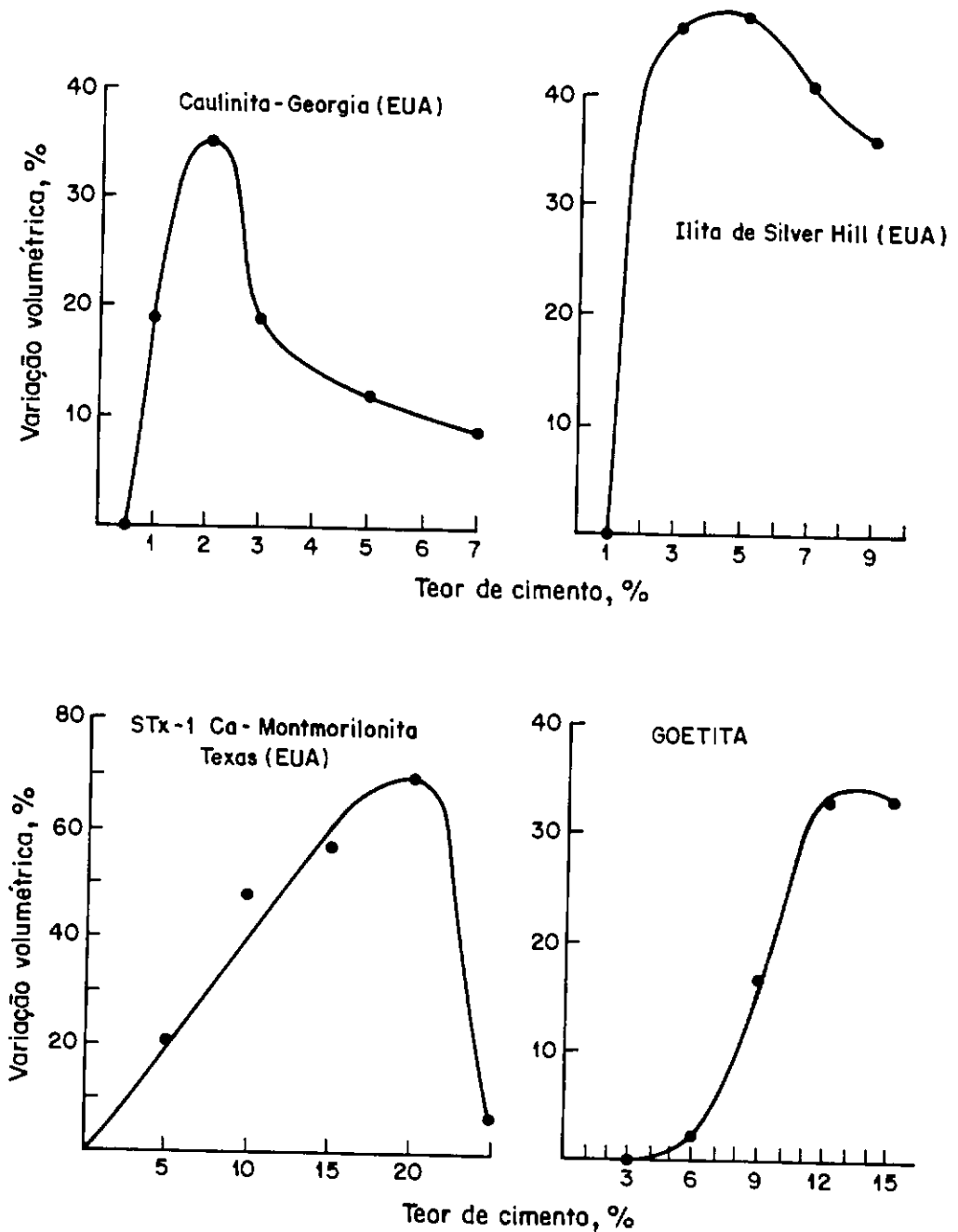


Figura III.19 - Variação volumétricas dos sedimentos das misturas argilo-mineral-cimento (CASANOVA & CERATTI, 1986).

Continuando o estudo deste método ENAMORADO (1990) comparou em sua tese de mestrado as resistências obtidas para três amostras de solos saprolíticos utilizando três metodologias de dosagem: a Norma Simplificada da ABCP; a Norma Simplificada, fazendo a substituição da escolha do teor de cimento indicado para o ensaio de compactação através do ábaco da figura 2 pelo teor determinado através do Método Físico-químico e uma proposta de Dosagem Físico-química Simplificada. Esta última consiste em, a partir da estimativa do peso específico seco máximo da mistura, feita através do ábaco da figura 1 (Norma Simplificada A) ou da figura 4 (Norma Simplificada B) e do teor de cimento determinado através do Método Físico-químico, moldar-se para cada razão água / cimento três corpos de prova impondo-se a mesma a massa específica aparente máxima prevista através do Método de moldagem de corpos de prova para compressão de corpos de prova cilíndricos de solo-cimento (COPPE, 1980). Com as resistências médias obtidas para cada razão água / cimento, plota-se a curva "Resistência à compressão simples x razão água / cimento, o valor máximo dessa curva determina a máxima resistência à compressão simples e a respectiva razão ótima água / cimento. Os resultados alcançados por Enamorado estão apresentados no quadro da figura III.18.

	Resistência obtida aos 7 dias (MPa)			Resistência mínima (MPa)		
	Teor de cimento (%)					
Método empregado	Solo A-1	Solo A-2	Solo A-3	Solo A-1	Solo A-2	Solo A-3
Mecânico Simplificado	2,5	4,1	3	1,8	1,9	2
	7	9	7			
Mecânico Simplificado e Físico-químico	1	4,6	1,7	1,8	1,9	2
	3	11	3			
Proposta Físico-químico simplificado	1	6,1	2	1,8	1,9	2
	3	11	3			

Figura III.20 - Resultados tese ENAMORADO (1990).

Em seu trabalho de tese de mestrado RODRIGUES (1992) avaliou a precisão do método através de índices estatísticos de repetibilidade e reprodutibilidade. Para este fim, foram realizados dez ensaios para cada solo com o mesmo operador e um programa interlaboratorial utilizando quatro laboratórios, quatro amostras de solos de alteração laterítica e três repetições por amostra. Com o programa de dez ensaios efetuados pelo mesmo técnico e utilizando o mesmo equipamento foi observado, através do valores de repetibilidade encontrados, uma variação no teor máximo de cimento dependente do tipo de solo ensaiado, esta variação foi de aproximadamente 3 a 4 %. Já o programa interlaboratorial, que segundo WAENY citado em RODRIGUES (1992) permite calcular índices de precisão melhores, deduziu que para os solos estudados.

- A diferença máxima que se pode encontrar entre dois resultados de um mesmo operador, em condições de repetibilidade do método em questão, é de 3 %;
- e para operadores e/ou laboratórios diferentes, essa diferença não pode ultrapassar 3,2 %.

Estes índices são válidos para comparação entre dois resultados de um mesmo operador ou entre resultados de dois laboratórios e/ou dois operadores.

RODRIGUES também determinou, através dos critérios da Norma ISO/DP 4259-2 da "International Organization for Standardisation", os limites de confiança para a repetibilidade e reprodutibilidade de um método. Estes limites se situaram em 1 % em torno da média.

III.5.4 Outros métodos

Em sua dissertação de mestrado ABIKO (1980) cita os critérios utilizados pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.) para a determinação dos teores de cimento mínimo requeridos para a dosagem de misturas solo-cimento utilizadas na fabricação de tijolos. Nesta pesquisa foram utilizada uma prensa manual (SUPERTOR), e um prensa hidráulica (TOR-HPT-3).

Para os tijolos moldados na prensa manual foi feita uma correlação entre ensaios de durabilidade por molhagem e secagem (ABCP SC-3) e ensaios de resistência a compressão aos 28 dias (ABNT MB 52, 1945). Foi adotada uma percentagem de perda de peso até a 8 %, considerada como satisfatória, correspondendo a uma resistência a compressão de 1,5 MPa. Como procedimento de dosagem moldavam-se vários corpos de prova cada qual com um teor de cimento rompendo-os aos 28 dias de idade, o menor teor que atende-se ao critério seria adotado.

O procedimento que estabelecia o teor de cimento para os tijolos fabricados em prensa hidráulica foi idêntico, porém utilizou-se como critério de resistência à compressão aos 28 dias valor médio de 3,0 MPa e individual de 2,0 MPa e percentagem de perda de peso após 12 ciclos do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem igual a 5 %. Não se encontrou no trabalho explicação para a diferenciação de critérios.

A quantidade de água adicionada à mistura foi definida de forma expedita, comprimindo-se uma certa quantidade de solo-cimento e água com a mão e em seguida quabrando-se ao meio; a umidade considerada adequada era aquela responsável a que a mistura não se partisse em mais de duas partes e também não grudasse na mão (ABIKO, 1980).

III.5.5 Discussão dos métodos

O primeiro comentário sobre os métodos de dosagem relacionados é que nenhum deles foi formulado especificamente para a produção de tijolos ou blocos prensados. Os métodos da ABCP, que fundamentaram o procedimento de dosagem normalizado pela ABNT, têm por finalidade a dosagem de misturas para a execução de bases e sub-bases de pavimentos. Já os procedimentos e critérios definidos pelo CEPED, inspirados nas norma da ABCP, foram adaptados para a aplicação em paredes monolíticas. O método físico-químico, segundo menção feita nos trabalhos de CHADDA (1954 & 1971), seria um método rápido de dosagem de misturas de solo-cimento destinada também a construção rodoviária na época de sua publicação. As pesquisas na COPPE buscam a consolidação do método aplicando-o a fins rodoviários.

Outro comentário que deve ser feito é que todos os métodos descritos anteriormente necessitam de laboratório equipado e de pessoal técnico qualificado e este custo adicional só se justifica quando as unidades de produção de tijolos ou blocos dispõem de prensas com níveis de produção médios, elevados ou muito elevados. Na produção de tijolos em prensas manuais, que possuem um nível de produção pequeno, devem ser usados os procedimentos expeditos descritos no item III.2.

Sempre foi uma tendência constante na evolução dos procedimentos de dosagem de solo-cimento o questinamento do longo tempo de duração dos ensaios. Na Norma Geral eram demandados 45 a 60 dias, este tempo foi reduzido para 10 a 12 dias na Norma Simplificada e na atual NBR-1336 que não utilizam o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. O ensaio físico-químico, como já foi mencionado, toma de 3 a 7 dias para avaliar o teor de cimento requerido pelo solo,

caso for conjugado a um ensaio de resistência a compressão aos 7 dias demandaria de 10 a 14 dias.

O exame das metodologias existentes para a dosagem de misturas de solo-cimento aplicados a outros usos do material servem de ponto de partida para o estabelecimento de uma metodologia específica para misturas a serem empregadas na fabricação de tijolos e blocos prensados e assim, através de seu uso e a avaliação do desempenho dos elementos produzidos, acumular experiências neste com os solos brasileiros.

Todos os critérios e ensaios utilizados em cada método definem dois parâmetros essenciais ao proporcionamento das misturas solo-cimento, são eles:

- **Teor de cimento** mínimo necessário pelo solo afim de garantir ao elemento moldado as características físicas requeridas (resistência mecânica, baixa porosidade, isolamento térmico e acústico), que estas características se mantenham ao longo do tempo (durabilidade), e viabilise economicamente a produção;
- **a umidade da mistura**, apresenta como metodologia de determinação o ensaio Proctor (1919), consenso em todas os procedimentos estudados.

Outra característica dos métodos é a de restringir o uso dos procedimentos de dosagem a alguns solos, reunidos em grupos, classificados a partir de ensaios de caracterização (granulometria e limites de Atterberg). Fazem esta restrição as Normas Simplificada e NBR-1336 e os critérios do CEPED, justificando que os solos excluídos apresentam dificuldades nos processos de execução no campo de estradas e aeroportos e paredes monolíticas, respectivamente, além de conduzirem a teores elevados de cimento que inviabilizam a sua utilização. Neste trabalho o item III.2 deste trabalho discutiu as faixas granulométricas e dos limites de consistência em que se devem situar os solos destinados à fabricação de tijolos e blocos prensados à luz da experiência no exterior.

Os procedimentos da ABCP e da NBR-1336 recorrem a ábacos e tabelas propostos pela PCA que sugerem o teor de cimento a ser usado nos ensaios de durabilidade, compactação e resistência à compressão. Estes ábacos e tabelas refletem a experiência com solos, provavelmente do território americano, desde que se iniciou a utilizar o solo-cimento em projetos rodoviários na década de 30 até 1952 quando se divulgou os resultados de dosagem de 2.438 solos (PINTO, 1980), infelizmente não sendo enriquecidos com dados obtidos ao longo dos quase 50 anos de uso do solo-cimento no Brasil.

OLA citado em MOURA (1987) afirma que os solos lateríticos respondem mais favoravelmente à estabilização com o cimento que os solos das zonas temperadas, tendo-se observado que as recomendações da Portland Cement Association (PCA) são exageradamente conservadoras para os solos lateríticos.

MOURA menciona que no trabalho que deu origem a Norma Simplificada os pesquisadores LEADABRAND e NORLING já recomendavam que os ábacos fossem utilizados na forma apresentada até que dados e experiências locais fossem obtidos e permitissem revisar os ábacos para melhor adequá-los às condições locais.

O método físico-químico determina este teor a partir de um ensaio cujo resultado reflete o comportamento dos constituintes do solo, principalmente a fração mais fina (silte, argilominerais, óxidos) quando interagem com os compostos que formam o cimento Portland. A experiência com o método tem mostrado que ele é ótimo indicador da presença de argilominerais expansivos, matéria orgânica em excesso além de outros compostos que possam vir a comprometer a estabilização do solo.

O ensaio de durabilidade por molhagem e secagem observam as alterações nas misturas estabilizadas submetendo os corpos de prova a esforços advindos de variações bastante bruscas de temperatura e umidade. Este ensaio que fundamenta a Norma Geral acabou desaparecendo na Norma Simplificada e na NBR-1336. Foi reapresentado pelo CEPED, no estudo de paredes monolíticas, como um ensaio que conduz a teores de cimento inferiores aos analisados por critérios de resistência. Conclui-se daí que os critérios de resistência, apesar de conservadores, satisfazem os critérios de perda de peso do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

O quadro III.6 resume os critérios de resistência a compressão nas normas e estudadas e os critérios especificados pelas normas da ABNT para tijolos maciços de solo-cimento (NBR 8491, abril/1984) e para blocos vazados de solo-cimento (NBR 10834, novembro/1989).

CRITÉRIO	USO	Rc (MPa) aos 7 dias
ABCP - Norma Simplificada, normas a e b	Bases e sub-bases rodoviárias e aeroportos	variável em função das percentagens de pedregulho e silte + argila
ABNT - NBR 1336	Bases e sub-bases rodoviárias	Rc média $\geq 2,1$ MPa
CEPED	paredes monolíticas	carga de telhado nas paredes, Rc ≥ 1 MPa carga de telhado em pilares, Rc $\geq 0,5$ MPa
ABNT - NBR 8491	Tijolos maciços	Rc média ≥ 2 MPa Rc individual $\geq 1,7$ MPa
ABNT - NBR 10834	Blocos vazados	Rc média $\geq 2,5$ MPa Rc individual ≥ 2 MPa
IPT (ABIKO, 1980)	Tijolos maciços	Prensa manual Rc média $\geq 1,5$ MPa Prensa hidráulica Rc média ≥ 3 MPa Rc individual ≥ 2 MPa

Quadro III.6 - Resumo dos critérios de resistência para alguns usos do solo-cimento.

CAPÍTULO IV

Estudo experimental de misturas solo-cimento

IV.1 Introdução

Este estudo iniciou-se com ensaios preliminares utilizando a planta para a produção de tijolos e blocos vazados (15 x 20 x 40 cm) pertencente a Prefeitura Municipal de Petrópolis instalada junto ao Hortomercado Municipal no distrito de Itaipava. A planta utilizada se constitui por uma prensa hidráulica modelo HRC-3 (ver foto IV.2) com duplo-sentido de compactação, misturador horizontal modelo MT-250, plataforma de acoplamento, elevador de matéria-prima, peneira rotativa modelo PRT-200, elevador de canecos com silo, destorroador modelo DT-1000; todos estes equipamentos fabricados pela TECMOR (1986). A planta encontrava-se em perfeito estado de conservação, funcionando, porém com uma produção de tijolos e blocos bastante aquém do potencial do equipamento.

Segundo o Sr. Manuel Trancoso, encarregado responsável pela planta, que além de produzir elementos de solo-cimento produz, utilizando moldes pré-moldados de concreto simples e armado, outros elementos tais como meio-fios, tampas de ralo e briquetes de pavimentação. A idéia da instalação da planta de produção de elementos de solo-cimento era de aproveitar como matéria-prima os solos oriundos de bota-fora, principalmente, de escorregamentos, onde o material é removido pela Prefeitura.

Em seu relato de experiências utilizando o equipamento o Sr. Manuel Trancoso enumerou diversos problemas nos componentes da planta, principalmente na prensa. Tais defeitos demandaram a freqüente contratação de serviços de manutenção, ou quando isto não era possível, o próprio esforço e criatividade da equipe por ele coordenada.

Pela descrição dos problemas enfrentados pode-se perceber que a manutenção do equipamento só foi possível em razão de Petrópolis ser um Município com razoável disponibilidade de recursos, além de dispor de pessoal técnico especializado oriundo das indústrias eletro-mecânicas ali instaladas.

O nosso trabalho experimental partiu da instalação, junto a planta de produção, de um pequeno laboratório de campo constituído pela aparelhagem mínima necessária aos ensaios de compactação e absorção realizados.

Utilizou-se a mesma jazida que vinha sendo utilizado na produção de blocos vazados de um solo caracterizado expeditamente com silto-argiloso (não

submetido a ensaios de caracterização). Moldaram-se, para um teor de cimento arbitrado em 8 %, dois corpos de prova para cada teor de umidade, partiu-se da umidade higroscópica, acrescentando-se 2 % de umidade até atingir um teor em que os corpos de prova se esborroavam ao serem retirados da prensa. A intenção principal deste procedimento era de se traçar uma curva de compactação, pressupondo-se constante a energia de compactação da prensa. Neste estágio da pesquisa o objetivo principal era familiarizar-se com o equipamento e desenvolver uma metodologia para um estudo experimental mais rigoroso. Os corpos de prova obtidos foram curados ao abrigo da chuva, porém não do vento. Foram ensaiados a resistência à compressão e a absorção, após sete dias de cura, atingindo resultados incompatíveis com as especificações de norma (NBR 10834), além de bastante dispersos refletindo uma não-homogeneidade na produção.

Face as dificuldades de transporte (a distância entre a planta de produção em Itaipava e o laboratório da Escola de Engenharia, onde foram ensaiados os corpos-de-prova, é de 85 Km) demandavam um custo incompatível com os recursos disponíveis para a realização da pesquisa. Além disso a manipulação de grandes volumes de solo (em torno de 25 dm³ de solo solto por bloco) requeriam ajuda de serventes, nem sempre disponível. Dentro deste contexto, optou-se por estudar as misturas solo-cimento no ambiente do laboratório de Geotecnia da COPPE, visto que este dispunha de uma prensa manual modelo MRC-1, ver foto IV.1 (TECMOR, 1986), cedida pela Caixa Econômica Federal. Além de viabilizar economicamente a pesquisa, as condições para o controle das variáveis envolvidas num ambiente de laboratório de pesquisa são maiores que em um laboratório de campo.

Neste capítulo procurou-se descrever, detalhadamente, todos os procedimentos experimentais empregados apresentando os resultados obtidos pelo programa de ensaios executado. Finalmente é feita uma análise dos dados obtidos que lastreou as conclusões contidas no capítulo subsequente.



Foto IV.1 - Prensa manual modelo MRC-1 da TECMOR.



Foto IV.2 - Prensa hidráulica modelo HRC-3 da TECMOR.

IV.2 O solo ensaiado

Empregou-se o mesmo solo que vinha sendo utilizado na produção e blocos vazados e que encontrava-se na área de estocagem da planta de produção ao abrigo da chuva. Não foi possível determinar a procedência deste. A única informação existente é de que se tratava de um solo oriundo da remoção pela Prefeitura de um escorregamento. Este fato ocorre às dezenas todos os anos, no período de chuvas que vai de outubro a março em todo o Município de Petrópolis. Classificado expeditamente como um silte-argiloso, foi denominado em seu estado natural de PETRUS-I. Os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados nos quadros IV.1 e IV.2 enquanto a análise química e mineralógica (obtidas através de difração de raios X) no quadro IV.3.

Limites de consistência:	
Límite de liquidez (LL)	56 %
Límite de Plasticidade (LP)	29 %
Índice de Plasticidade (IP)	27 %
Densidade real dos grãos (Gs)	2,624

Quadro IV.1 - Limites de consistência e densidade real dos grãos da amostra PETRUS-I.

Peneira N.º (mm)	% total acumulado passando
4 (4,8)	99,79
8 (2,4)	98,43
10 (2,0)	94,11
20 (0,840)	81,59
30 (0,60)	74,42
40 (0,42)	68,66
60 (0,25)	63,27
100 (0,150)	57,99
200 (0,075)	54,42

Quadro IV.2 - Granulometria por peneiramento da amostra PETRUS-I

Perda ao Fogo, T = 600 °C (%)	9,97
Fe ₂ O ₃ (%)	7,25
SiO ₂ (%)	20,7
Al ₂ O ₃ (%)	21,8
Resíduo (%)	36,9
Índices de Intemperismo	
Ki (sílica / alumina)	1,61
Kr (sílica / sesquióxidos)	1,33
Difração de Raios X	Caulinita

Quadro IV.3 - Análise química e mineralógica da amostra PETRUS-I

Pelo ensaio de granulometria por sedimentação a fração argila do solo ensaiado (diâmetro inferior a 0,002 mm) correspondeu a 40 % do peso total da amostra seca.

O Sistema Unificado de Classificação, que se originou na classificação de CASAGRANDE (VARGAS, 1978), identifica o solo estudado como CH (C = "clay "; H = "high"). A este grupo pertencem as argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.

Pela classificação ASTM D 3282, originada na classificação adotada pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) em 1945, o solo estudado pertence ao grupo A-7-6 onde estão os solos argilosos

A amostra de solo foi misturada a areia quartzosa de rio a partir de agora denominada AREIA com o objetivo de e ajustar a curva granulométrica do solo. Produzindo, assim, solos dentro dos limites de uma determinada faixa e o mais próximo a curva ideal proposta por HOUBEN et alii (1979) para solos destinados à confecção de tijolos prensados. O quadro IV.4 apresenta a granulometria por peneiramento da amostra AREIA.

Peneira N.º (mm)	% total acumulado passando
3/8 "(9,5)	99,60
4 (4,8)	97,74
8 (2,4)	90,73
10 (2,0)	77,33
20 (0,840)	41,62
30 (0,60)	22,83
40 (0,42)	11,82
60 (0,25)	4,55
100 (0,150)	1,77
200 (0,075)	1,12

Quadro IV.4 - Granulometria por peneiramento da amostra AREIA.

Para a mistura dos dois solos PETRUS-I e AREIA, afim de se obter a mistura ideal PETRUS-II, utilizou-se o processo algébrico para a correção granulométrica descrito em CAPUTO (1980) para o qual montou-se o quadro IV.5. Nas duas primeiras colunas estão, respectivamente, as frações percentuais de material entre as peneiras N.º 200 (0,074 mm) e N.º 4, e as frações percentuais

de material passante na peneira N.º 200. Na terceira coluna estão os percentuais, retirados da curva ideal de HOUBEN et alii (1979).

PETRUS-I	AREIA	PETRUS-II
42 %	98,87 %	58 %
58 %	1,12 %	42 %
X	Y	100 %

Quadro IV.5 - Correção granulométrica de solos - PETRUS II.

Desta forma montou-se o sistema IV.1 de duas equações cujas incógnitas (X e Y) são os percentuais dos dois solos que compõe a mistura ideal PETRUS-II.

$$42X + 98,87Y = 58$$

$$58X + 1,13Y = 42 \quad (IV.1)$$

Encontrou-se, então que, para produzir o novo solo PETRUS-II deveria-se misturar 72 % da amostra PETRUS-I e 28 % da amostra AREIA. Foram feitos ensaio de caracterização da amostra PETRUS-II conforme apresentado nos Quadros IV.5 e IV.6.

Limites de consistência	
Limite de liquidez (LL)	42%
Limite de Plasticidade (LP)	24 %
Índice de Plasticidade (IP)	18 %
Densidade real dos grãos (Gs)	2,639

Quadro IV.6 - Limites de consistência e densidade real dos grãos da amostra PETRUS-II.

Peneira N. ^o (mm)	acumulado passando (%)
4 (4,8)	100
8 (2,4)	97
10 (2,0)	94
20 (0,84)	76
30 (0,60)	65
40 (0,42)	56
60 (0,25)	50
100 (0,15)	44
200 (0,075)	42

Quadro IV.7 - Granulometria por peneiramento da amostra PETRUS-II.

O ensaio de granulometria por sedimentação encontrou um percentual em torno de 36 % de grãos com diâmetro equivalente inferior a 0,002 mm.

A figura IV.I apresenta as curvas granulométricas dos solos PETRUS-I e PETRUS-II, além da faixa e curva ideal proposta por HOUBEN et alii (1979). Pode-se notar que, para o solo PETRUS-I o ramo da curva correspondente ao percentual de grãos que passam na peneira N.^o 200 encontra-se fora da faixa e bem afastado da curva ideal. A mistura PETRUS-II, apesar de se terem fixados dois pontos com percentuais idênticos à curva ideal apresentou a fração argilosa

fora dos limites da faixa. Decidiu-se, então produzir-se uma nova mistura (denominada PETRUS-III) cuja curva granulométrica ficasse integralmente encaixada nos limites da faixa. Para isso lançou-se mão, novamente, do processo algébrico de correção granulométrica fixando o percentual de material entre as peneiras N.º 4 e N.º 200 em 70 % e o percentual de material passando na peneira N.º 200 em 30 %, conforme o Quadro IV.8.

PETRUS-I	AREIA	PETRUS-III
42 %	98,87 %	70 %
58 %	1,12 %	30 %
X	Y	100 %

Quadro IV.8 - Correção granulométrica do solo - PETRUS-III.

Montou-se o sistema IV.2 que resolvido deduziu que, para a nova mistura PETRUS-III, eram necessários percentuais de 51 % da amostra PETRUS-I e 49 % da amostra AREIA. Os limites de consistência, densidade real dos grãos e granulometria da nova mistura está apresentada no quadro IV.9 e IV.10.

$$42X + 98,87Y = 70$$

$$58X + 1,13Y = 30$$

(IV.2)

Limites de consistência	
Limite de liquidez (LL)	42 %
Limite de Plasticidade (LP)	22 %
Índice de Plasticidade (IP)	20 %
Densidade real dos grãos (Gs)	2,642

Quadro IV.9 - Limites de consistência e densidade real dos grãos da amostra PETRUS-III.

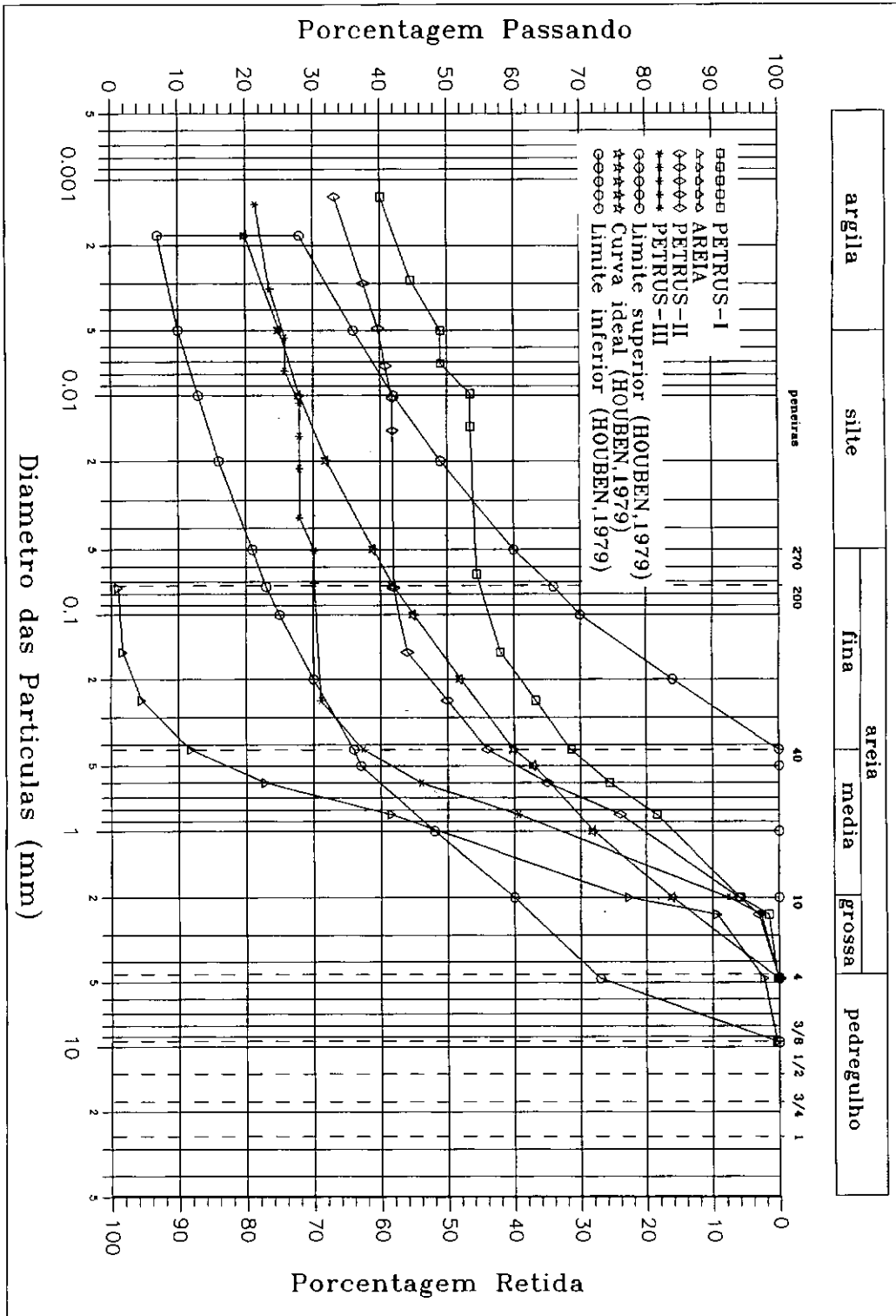


Figura IV.1 - Posição das curvas granulométricas das amostras PETRUS-I, PETRUS-II, PETRUS-III e AREIA em relação à faixa e curva ideal propostas por HOUBEN et alii (1979) para tijolos prensados.

Peneira N.º(mm)	% acumulado passando
4 (4,8)	100
8 (2,4)	97,26
10 (2,0)	92,39
20 (0,84)	60,68
30 (0,60)	46,04
40 (0,42)	37,41
60 (0,25)	31,13
100 (0,15)	27,74
200 (0,075)	25,78

Quadro IV.10 - Granulometria por peneiramento da amostra PETRUS-III.

Para esta amostra o ensaio de peneiramento por sedimentação encontrou um percentual de grãos inferiores a 0,002 mm em torno de 22 %. Observando-se a figura IV.11 constata-se que a distribuição granulométrica desta nova amostra encontra-se totalmente compreendida dentro dos limites da faixa proposta por HOUBEN et alii (1979).

As amostras PETRUS-II e PETRUS-III produzidas a partir da mistura do solos naturais PETRUS-I e AREIA classificam-se pelo Sistema Unificado de Classificação no grupo CL característico das argilas de plasticidade baixa a média, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras. Já para a classificação da ASTM D 3282 a amostra PETRUS-II continuou no grupo A-7-5, porém, a amostra PETRUS-III classificou-se no grupo A-2-7.

IV.3 O cimento

Utilizou-se na fase experimental desta pesquisa o cimento Portland de Alto Forno designado pela sigla CPIII-32, produzido pela Cimento Tupy, segundo a norma da ABNT, EB-208 / NBR 5735. O Quadro IV.11 apresenta os teores dos componentes deste cimento.

Sigla	Classe	Clinker + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada (%)	Material carbonático (%)
CP III	25, 32 e 40	65 - 25	35-70	0 - 5

Quadro IV.11 - Teores dos componentes do cimento Portland CP III em percentuais de massa (NBR 5735 - ABNT).

A quantidade equivalente a um saco de cimento (50 kgf) foi estocada em uma bombona plástica e os volumes menores em frascos de vidro. As quantidades destinadas à confecção de cada corpo de prova foram pesadas e lacradas em sacos plásticos utilizados no máximo 12 horas após a pesagem.

IV.4 Descrição dos equipamentos e procedimentos do preparo, mistura e compactação

IV.4.1 Preparo das amostras

A amostra natural de solo PETRUS-I e a amostra AREIA foram deixadas secar ao ar por no mínimo uma semana. Após este período foram peneiradas na malha de abertura 4,8 mm, sendo que o material retido foi destorroado em almofariz e novamente peneirado. Utilizou-se o peneirador mecânico de agregados disponível no LAMAC/EE (Laboratórios de Materiais de Construção da Escola de Engenharia). Em seguida todos os materiais foram armazenados em bombonas plásticas. Ao serem utilizados determinava-se a umidade higroscópica.

As misturas PETRUS-II e PETRUS-III foram preparadas a partir das proporções, determinadas anteriormente, da amostra natural PETRUS-I e AREIA. Na dosagem dos dois componentes da mistura foi descontada a umidade higroscópica das amostras. As amostras foram pesadas, colocadas em uma

bombona plástica e em seguida rolava-se a bombona pelo piso do laboratório até que ao abrir-se a bombona a mistura se apresenta homogênea.

As sub-amostras destinadas à moldagem dos tijolos maciços foram pesadas, acondicionadas em sacos plásticos e tiveram a umidade higroscópica determinada.

IV.4.2 Mistura

Definidas as proporções de solo, cimento e água, correspondentes ao volume de um tijolo, procedia-se à mistura manual da seguinte forma:

- Colocava-se o cimento dentro do saco com a amostra de solo e, após insuflar ar no saco, agitava-se vigorosamente até que pela coloração fosse alcançada uma mistura homogênea;

- espalhava-se a mistura seca em uma bacia plástica acrescentando a água aos poucos e, com uma colher de pedreiro, misturava-se os materiais, sempre buscando obter uma mescla homogênea;

- raspava-se toda a mescla da bacia, colocando o material no molde, com muito cuidado para não haver perda de material.

O volume de água utilizado foi calculado em função da soma dos pesos de solo e o peso de cimento.

tentou-se sem sucesso a utilização de um misturador mecânico, tipo bateadeira. O solo úmido ficou aderido às paredes de aço inóx do recipiente do misturador.

IV.4.3 Compactação

Utilizou-se uma prensa manual modelo MRC-1 (TECMOR, 1986), apresentada na figura IV.2, capaz de compactar 3 tijolos de 5,5 x 13 x 26 cm por vez. Esta prensa não possuía a alavanca original. Foi necessária adaptar-se uma alavanca com comprimento superior à original de forma a permitir que um homem pudesse se pendurar na extremidade da alavanca. Desta forma foi possível aplicar uma carga fixa a alavanca, equivalente ao peso do homem, e aumentar a relação do braço da alavanca para se compensar perdas mecânicas provenientes de uma folga, devido ao desgaste dos roletes da prensa.

Através de um simples cálculo envolvendo equilíbrio de momentos determinou-se a pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$, considerando-se um homem pesando 70 kgf pendurado na extremidade da alavanca. Esta pressão é inferior às proporcionadas pelas prensas CINVA-RAM ($0,7 \text{ MN/m}^2$), dos modelos

da Ellson Blockmaster (0,7 a 2,5 MN/m²) e da SM Testaram (2,0 MN/m²), citadas em HOUBEN et alii (1979). Por isso, optou-se por moldar um tijolo por vez ao invés de três. Desta forma, elevou-se a pressão de compactação para 1,2 MN/m² considerada superior à faixa mínima (0,7 a 1,0 MN/m²) recomendada em HOUBEN et alii.

IV.5 A definição do teor de cimento

Os teores de cimento utilizados nas misturas solo-cimento com as amostras PETRUS-I, PETRUS-II e PETRUS-III foram obtidos através do Método Físico-químico, já apresentado no Capítulo II deste trabalho. Este método envolve o ensaio físico-químico da mistura solo-cimento.

IV.5.1 Ensaio Físico-químico das misturas solo-cimento

Preparação das amostras

A amostra deixada secar ao ar é destorroada e, em seguida, passada na peneira N.º 10 (2,00 mm), descartando-se o material retido.

Preparação das suspensões

Coloca-se numa proveta de vidro graduada com capacidade de 250 ml e resolução de 2 ml por sobre o prato de uma balança eletrônica. Descontada a tara do frasco, toma-se 20 gf da fração do solo passando na peneira N.º 10. Desta forma preparam-se 7 a 10 provetas. O cimento é acrescentado a cada proveta, descontando a tara do frasco mais o solo, em teores crescentes, variando de 2 a 15 % em peso de solo seco. Uma proveta deve ser deixada apenas com o solo. Feito isto, adiciona-se 100 ml de água destilada, em cada proveta uma por vez. Agita-se vigorosamente a proveta, tampando a boca com uma das mãos e guardando extremo cuidado para não perder material. Em seguida completa-se o volume de água, limpando-se o solo aderido às paredes da proveta. Colocam-se as provetas, lado a lado, por sobre uma bancada isolada de vibrações.

Leituras

Após 24 horas de repouso, utilizando uma bagueta de alumínio com 5 mm de diâmetro, agita-se a suspensão em cada proveta. Deve-se ter o cuidado de agitar

cada proveta durante o mesmo intervalo de tempo e com a mesma intensidade, com o cuidado de evitar que parte do solo fique aderida às paredes da proveta. Duas horas depois toma-se a leitura do volume de sedimento em cada proveta.

Repete-se diariamente as operações descritas anteriormente até que não se verifique variações no volume dos sedimentos.

Teor de cimento

O teor de cimento mínimo indicado para a estabilização do solo ensaiado corresponderá aquele que apresentar ao longo do período de duração do ensaio, a maior variação de volume em relação ao volume de sedimento da proveta que não recebeu cimento.

Os teores de cimento em peso indicados pelo ensaio físico-químico para o solo natural (amostra PETRUS-I) foi de 12 %, já para as misturas com areia o teor indicado foi de 7 % (amostras PETRUS-II e PETRUS-III).

Os Quadros IV.11, IV.12 e IV.13, complementados pelos gráficos das figuras IV.3, IV.4 e IV.5 apresentam a leituras dos ensaios com as amostras PETRUS-I, PETRUS-II e PETRUS-III, respectivamente.

Cimento (%)	Leituras (ml)			Variação volumétrica máxima (%)
	1. ^a	2. ^a	3. ^a	
0	32	34	35	0
3	46	45	45	44
5	61	62	62	91
6	66	70	60	106
7	63	62	60	97
8	64	66	64	100
9	72	72	72	125
10	72	72	70	125
12	86	84	83	169
15	70	70	70	119

Quadro IV.12 - Leituras do ensaio Físico-químico para a amostra PETRUS-I.

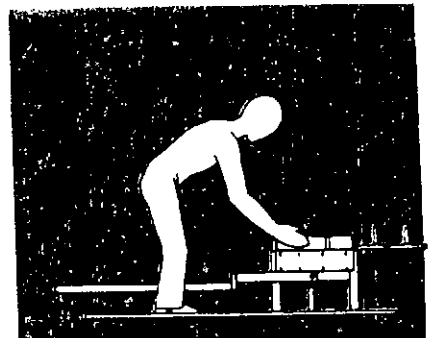
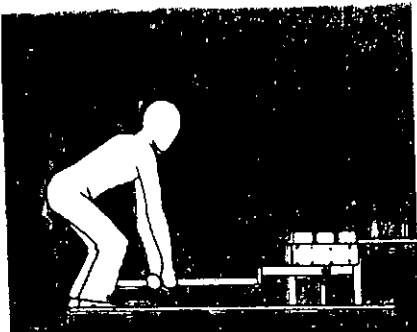
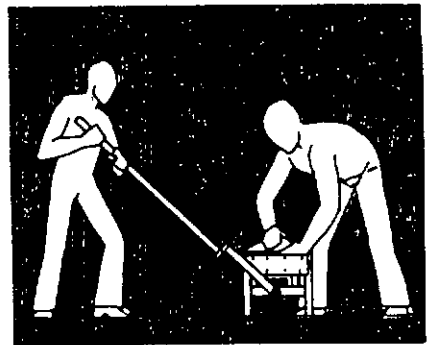
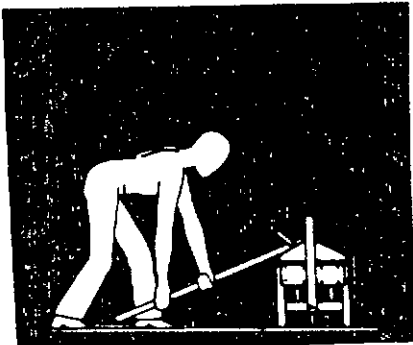
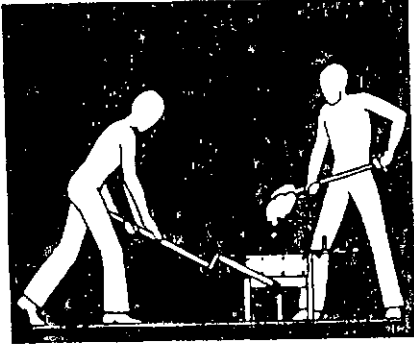


Figura IV.2 - Operação da prensa manual modelo MRC-1 fabricada pela TECMOR (1986).

Cimento (%)	Leituras (ml)				Variação volumétrica máxima (%)
	1. ^a	2. ^a	3. ^a	4. ^a	
0	31	32	32	32	0
3	38	39	39	38	23
5	50	62	63	61	97
7	48	68	64	63	113
9	54	64	62	61	100
11	43	62	58	57	94
12	46	65	60	60	103
13	47	66	62	62	106
15	42	58	56	55	81

Quadro IV.13 - Leituras do ensaio Físico-químico para a amostra PETRUS-II.

Cimento (%)	Leituras (ml)			Variação volumétrica máxima (%)
	1. ^a	2. ^a	3. ^a	
0	28	28	28	0
3	40	41	40	46
5	49	58	58	107
7	50	60	56	114
9	47	56	54	100
11	45	60	56	114
12	49	54	51	93
13	48	60	56	114
15	46	53	49	89

Quadro IV.14 - Leituras do ensaio Físico-químico para a amostra PETRUS-III.

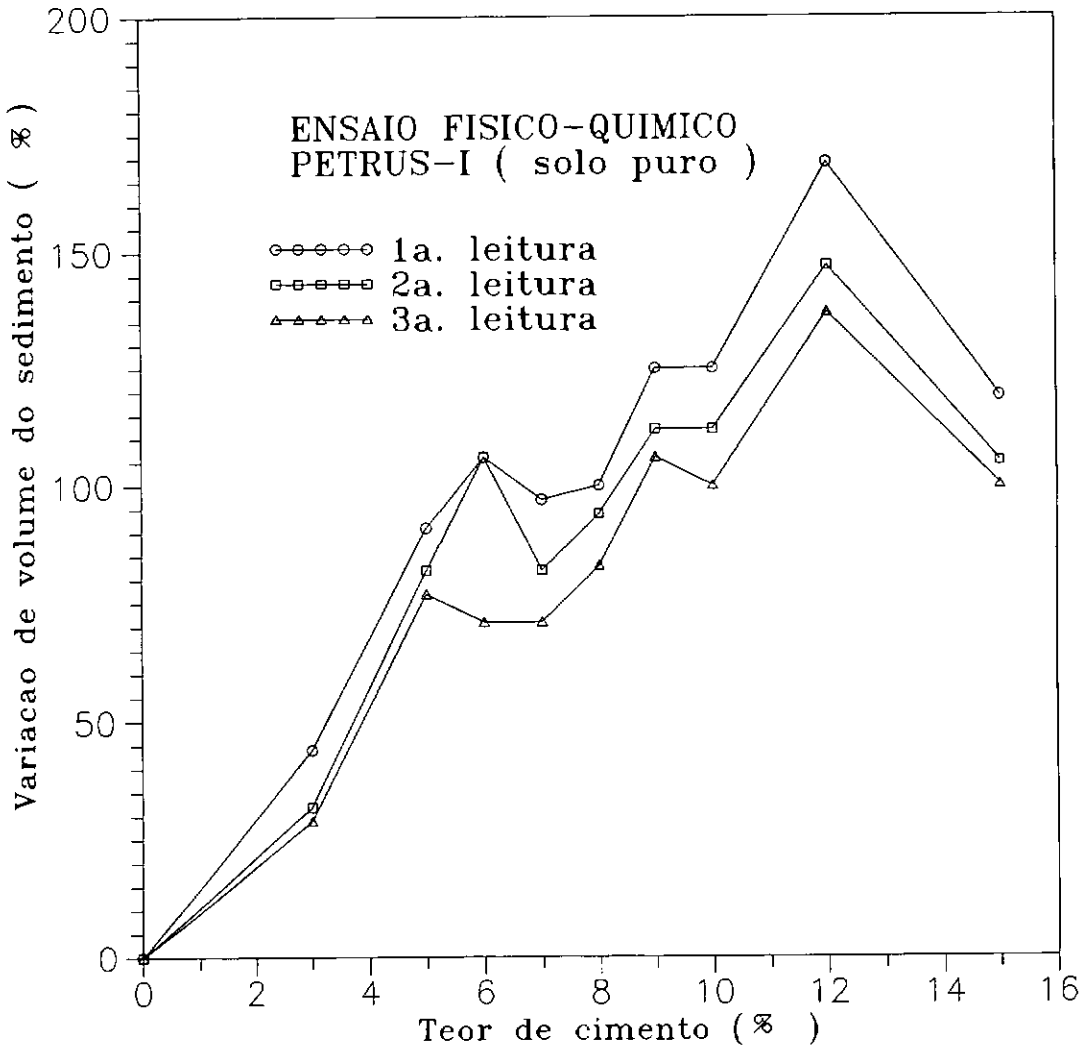


Figura IV.3 - Gráficos da variação volumétrica máxima x teor de cimento para amostra PETRUS-I.

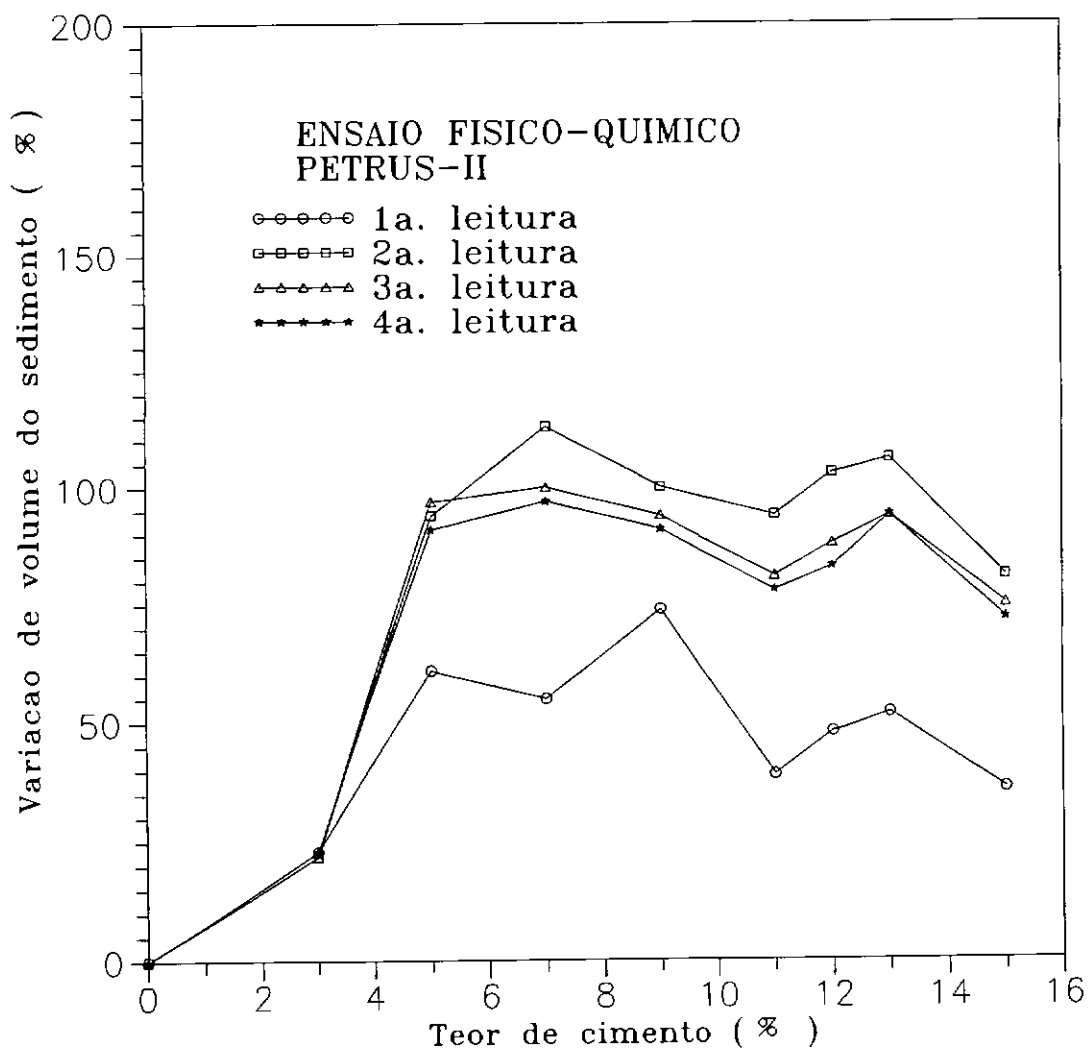


Figura IV.4 - Gráficos da variação volumétrica máxima x teor de cimento para amostra PETRUS-II.

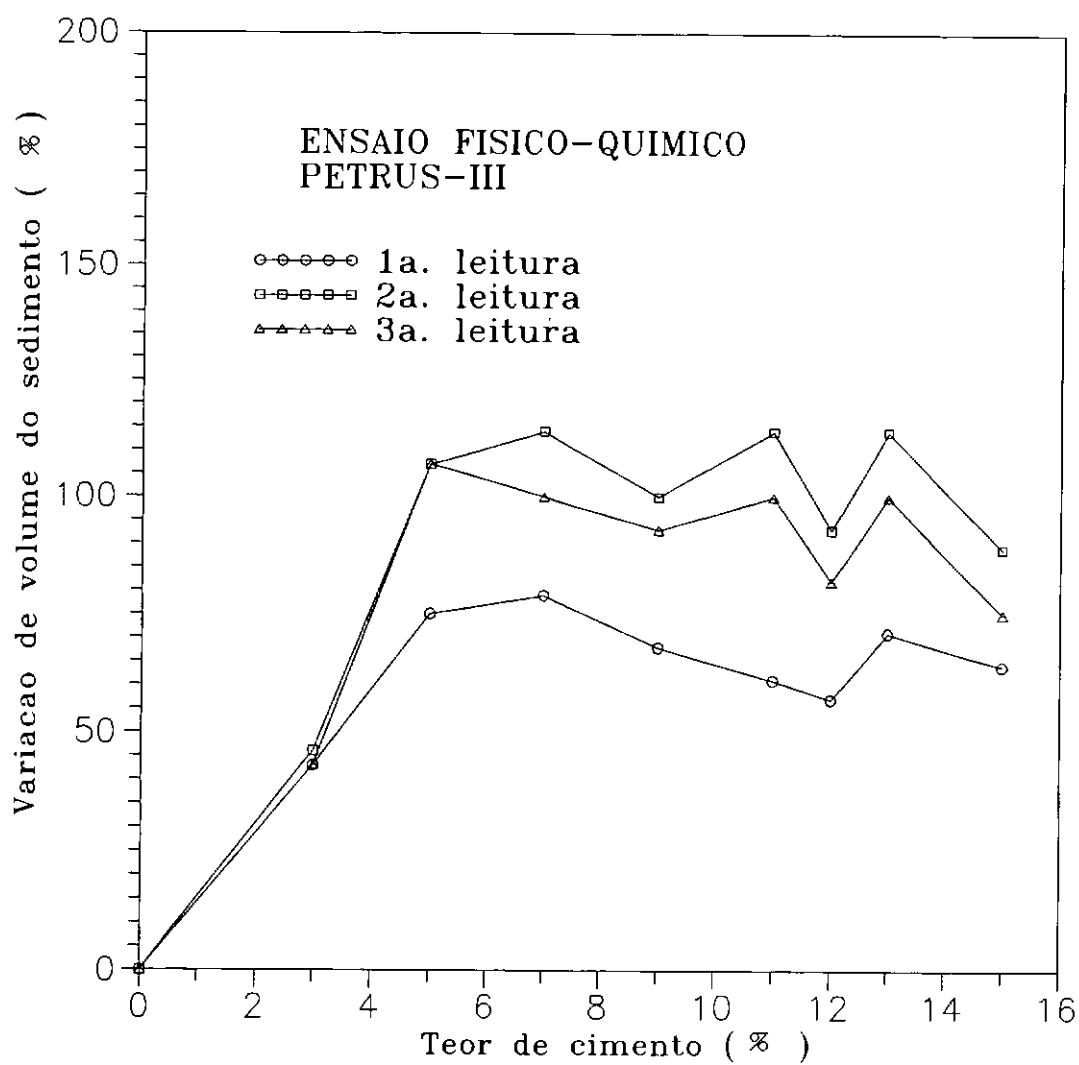


Figura IV.5 - Gráficos da variação volumétrica máxima x teor de cimento para amostra PETRUS-III.

IV.6 Programa de Ensaios

Foi desenvolvido um programa de ensaios utilizando misturas obtidas com as três amostras preparadas e os teores de cimento em peso determinados através do Ensaio Físico-químico. Obtiveram-se curvas de compactação utilizando a própria prensa de moldagem e para cada ponto da curva eram determinados a resistência à compressão dos tijolos e a absorção segundo a norma NBR 8492 - "Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água - Método de Ensaio". Desta forma perseguiu-se o teor de cimento mínimo, a energia de compactação mínima e a umidade de moldagem capazes de produzir tijolos em condições de aceitação pelas especificações da norma NBR 8491 - "Tijolo maciço de solo-cimento - Especificação".

IV.6.1 Ensaios de Compactação

As metodologias de dosagem de misturas solo-cimento, por originar-se da aplicação a bases de pavimentos, determinam a umidade de moldagem dos corpos de prova através do ensaio de Proctor, onde o esforço de compactação é de natureza dinâmica exercido através de soquetes. Neste ensaio a energia de compactação varia conforme a massa e altura de queda do soquete empregado, e convencionou-se 3 paredes de energias, conhecidas como Proctor Normal, Intermediário e Modificado. A fabricação de elementos em prensas, sejam elas manuais, mecânicas ou hidráulicas empregam energias de natureza estática. Por esta razão fomos levados a supor que as umidades de moldagem, consideradas iguais à umidade ótima dos ensaios Proctor, não deveriam corresponder à umidade ótima para a mistura solo-cimento quando compactadas utilizando-se prensas.

Decidiu-se, então, desenvolver uma metodologia de ensaio de compactação em que os corpos de prova fossem os próprios elementos moldados pela própria prensa de fabricação. O procedimento para este ensaio é simples e baseou-se na metodologia utilizada no Laboratório de Geotecnia da COPPE para a moldagem de corpos de prova cilíndricos destinados a ensaios triaxiais. Tentou-se, primeiramente, executar-se o procedimento descrito abaixo com a amostra natural PETRUS-I não se obtendo sucesso. A grande plasticidade do material quando úmido fazia com que ao ser retirado do molde deformava-se excessivamente, impossibilitando leituras confiáveis da altura dos elementos. Quando seco esborroava-se durante o manejo. Resolveu-se, então, preliminarmente, corrigir o solo granulométricamente (ver seção IV.2 O solo ensaiado) obtendo-se as amostras

PETRUS-II e PETRUS-III. Como já mencionado utilizou-se uma prensa manual e as amostras PETRUS-II e PETRUS-III, adotando-se o seguinte procedimento:

(1) Para traçar a curva de compactação projetou-se a execução de no mínimo cinco pontos, isto é, fixou-se cinco umidades de moldagem diferentes, utilizando-se como referência o limite de plasticidade do solo. Para cada ponto foram moldados três tijolos: dois para o ensaio de resistência à compressão e um para o ensaio de absorção;

(2) A quantidade de solo e o teor de cimento adicionados foram constantes para cada umidade de moldagem. Avaliou-se esta quantidade de forma a garantir que durante a moldagem não houvesse excesso de mistura, isto é, todo o material deveria preencher o volume do molde;

(3) Misturou-se os materiais da forma descrita anteriormente;

(4) Após obtenção da mistura homogênea para cada tijolo, retirou-se duas cápsulas de material para a determinação da umidade, tomando-se o cuidado de ao retirar o material para o ensaio de umidade o volume fosse o máximo possível igual nos corpos-de-prova de uma mesma umidade de moldagem;

(5) Colocou-se a mistura no molde da prensa com todo o cuidado para não haver perda de material;

(6) Com o auxílio de um soquete de madeira com seção equivalente ao tijolo exerceu-se uma pré-compactação na mistura com o objetivo de acomodá-la ao molde;

(7) Fechou-se o molde e em seguida, com o corpo inteiramente pendurado na extremidade da alavanca, prensou-se os tijolos;

(8) O tijolos foram, então, desformados, retirados da prensa e colocados de cutelo sobre uma bancada plana onde, com o auxílio de um paquímetro, determinava-se suas alturas em três pontos (nas extremidades e no centro). Desta forma obtinha-se o volume do corpo-de-prova já que o comprimento e a profundidade do mesmo são constantes (23 e 11 cm, respectivamente) Esta operação demandou extremo cuidado para que os tijolos quando muito secos não se esborroassem e quando muito úmidos não deformassem;

(9) Cada tijolo foi, cuidadosamente, levado até uma balança para pesagem;

(10) Finalmente, da balança os tijolos foram etiquetados, deixados curar à sombra e no dia seguinte foram transportados até a câmara úmida onde permaneciam por no mínimo sete dias até a execução dos ensaios de resistência à compressão e absorção;

(11) Com o peso úmido e volume dos corpo-de-prova obteve-se o peso específico aparente úmido e, no dia seguinte, com o resultado do ensaio de umidade obteve-se a massa específica seca.

A partir dos dados obtidos através desta metodologia foram construídas três curvas de compactação que podem ser vistas no gráfico da figura IV.9:

(1) Na primeira utilizou-se a amostra PETRUS-II com um teor de cimento em peso de 7 %. Com ela foram moldados três tijolos por vez para cada umidade de moldagem projetada, isto significa que a pressão de compactação foi de 0,4 MPa (ver gráfico da figura IV.6). Obteve-se um peso específico aparente seco de $15,4 \text{ kN/m}^3$ e uma umidade ótima de 25 %;

(2) Para a segunda utilizou-se a amostra PETRUS-III com um teor de cimento de 7 %. Com ela foram moldados três tijolos por vez para cada umidade de moldagem projetada, logo a pressão de compactação também foi equivalente a 0,4 MPa (ver gráfico da figura IV.7). Obteve-se um peso específico aparente seco de $16,6 \text{ kN/m}^3$ e uma umidade ótima de 20,5 %;

(3) Na terceira utilizou-se a amostra PETRUS-III com um teor de cimento de 7 %. Cada tijolo foi prensado individualmente o que aumentou a pressão de compactação para 1,2 MPa, contudo, para cada umidade de compactação continuou-se a moldar três tijolos (ver gráfico da figura IV.8). Obteve-se um peso específico aparente de $17,0 \text{ kN/m}^3$ e uma umidade ótima de 19 %.

Estas três curvas foram geradas por uma função quadrática que interpolou os resultados.

IV.6.2 Ensaio de Resistência à Compressão

O método de ensaio de resistência à compressão de tijolos maciços de solo-cimento encontra-se na norma NBR 8492 - "Tijolo maciço de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água - Método de Ensaio". Cabe neste trabalho um breve comentário sobre este método do ensaio, cuja preparação dos corpos-de-prova implica nas seguintes tarefas: corte com disco de videa do tijolo ao meio, colagem com pasta de cimento das duas metades e capeamento das duas faces opostas; desta forma conformando-se um prisma cúbico. Estes procedimentos são por demais trabalhosos, demorados (dois a três dias) e caso não forem executados com perfeição podem causar bastante dispersão de resultados.

Sugere-se modificar esta norma, que é idêntica à destinada aos tijolos maciços cerâmicos, simplificando a preparação dos corpos de prova, por exemplo: ensaiando-se o tijolo inteiro ou um prisma constituído por dois tijolos inteiros. Os corpos-de-prova foram rompidos no LAMAC (Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia) utilizando-se uma prensa VERSA-TEST (fabricada pela Soil-Test americana) com velocidade controlada conforme previsto pela norma.

Para cada ponto das curvas de compactação foram ensaiados dois corpos-de-prova. As figuras IV.10, IV.11 e IV.12 apresentam os gráficos com os resultados da resistência à compressão em relação a umidade de moldagem correspondendo às três curvas obtidas com o ensaio de compactação utilizando a própria prensa de moldagem. As três curvas foram geradas através de uma função quadrática que interpolou os resultados de ensaio.

Para a amostra PETRUS-II, moldada com 7 % de cimento e pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$, a resistência à compressão máxima foi de 0,9 MPa para uma umidade de moldagem de 21,5 %.

A amostra PETRUS-III, também moldada com 7 % de cimento e pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$, a resistência à compressão máxima foi de 1,6 MPa para um umidade de moldagem de 17,5 %.

Amostra: PETRUS-II

Pressao de Compactacao = $0,4 \text{ MN/m}^2$

Teor de Cimento = 7 %

Peso especifico seco maximo = $15,4 \text{ kN/m}^3$

Umidade otima = 25 %

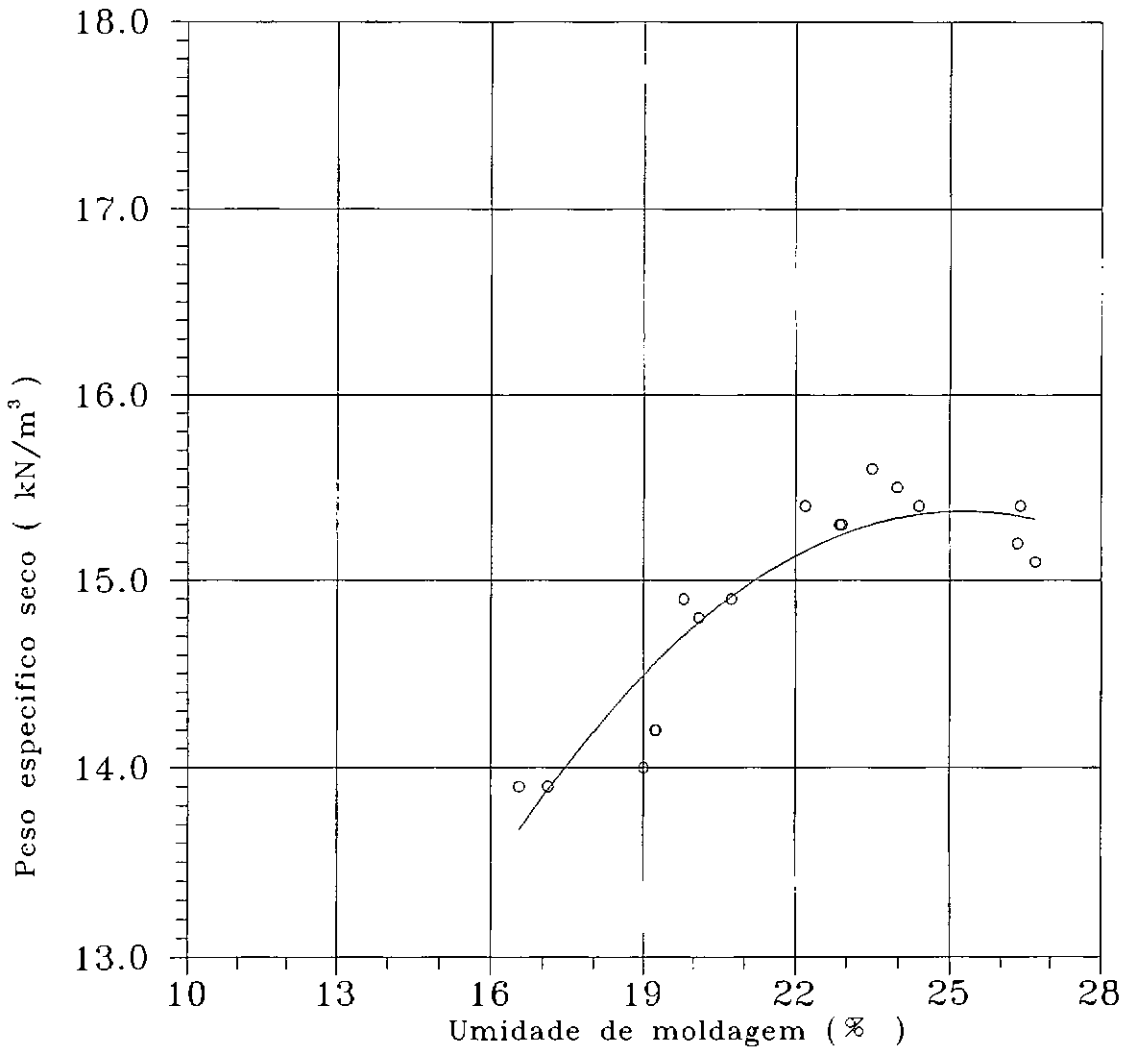


Figura IV.6 - Curva de compactação da amostra PETRUS-II, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$.

Amostra: PETRUS-III

Pressao de Compacacao = $0,4 \text{ MN/m}^2$

Teor de cimento = 7 %

Peso especifico seco maximo = $16,6 \text{ kN/m}^3$

Umidade otima = 20,5 %

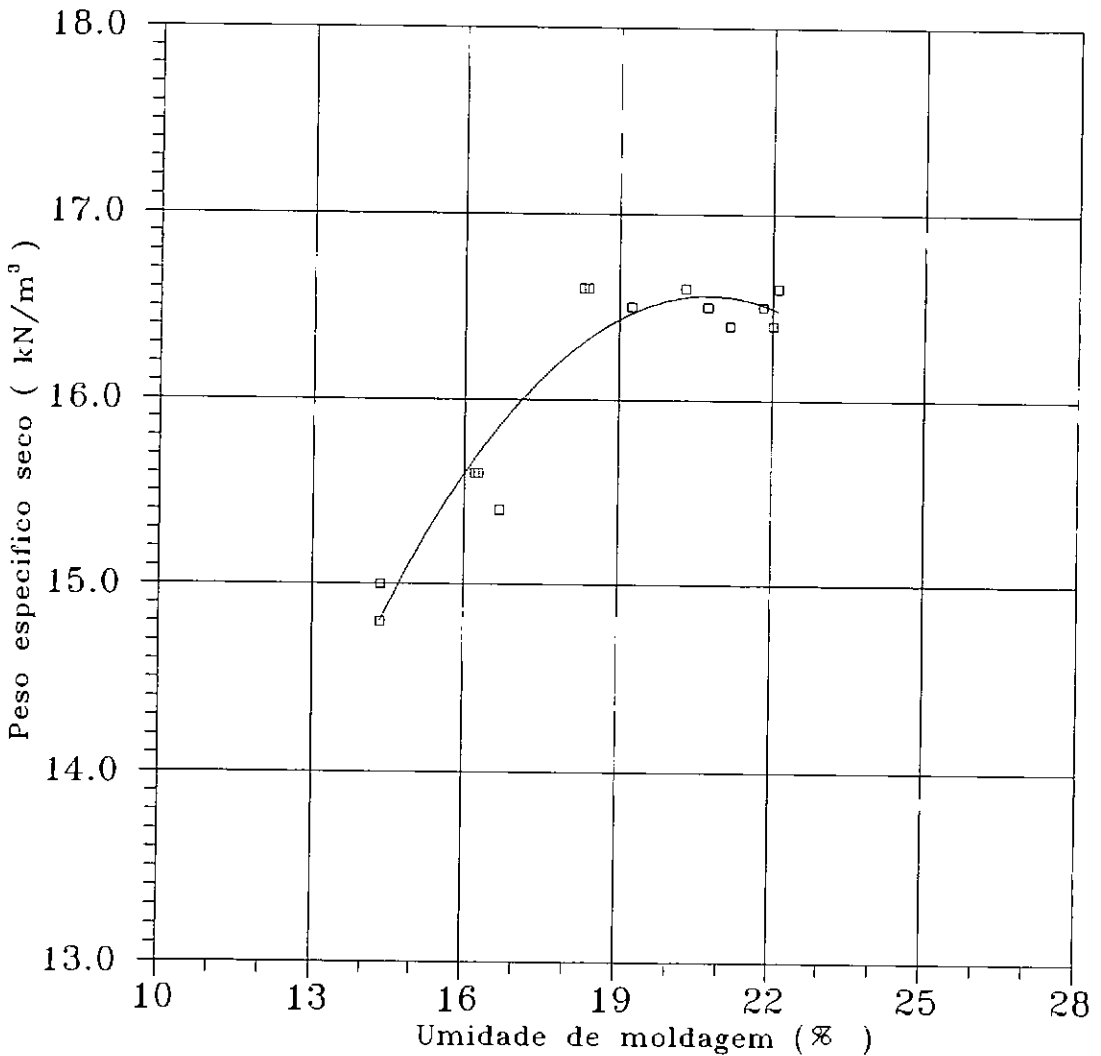


Figura IV.7 - Curva de compactação da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$.

Amostra: PETRUS-III

Pressão de Compactação = $1,2 \text{ MN/m}^2$

Teor de Cimento = 7 %

Peso específico seco máximo = 17 kN/m^3

Umidade ótima = 19 %

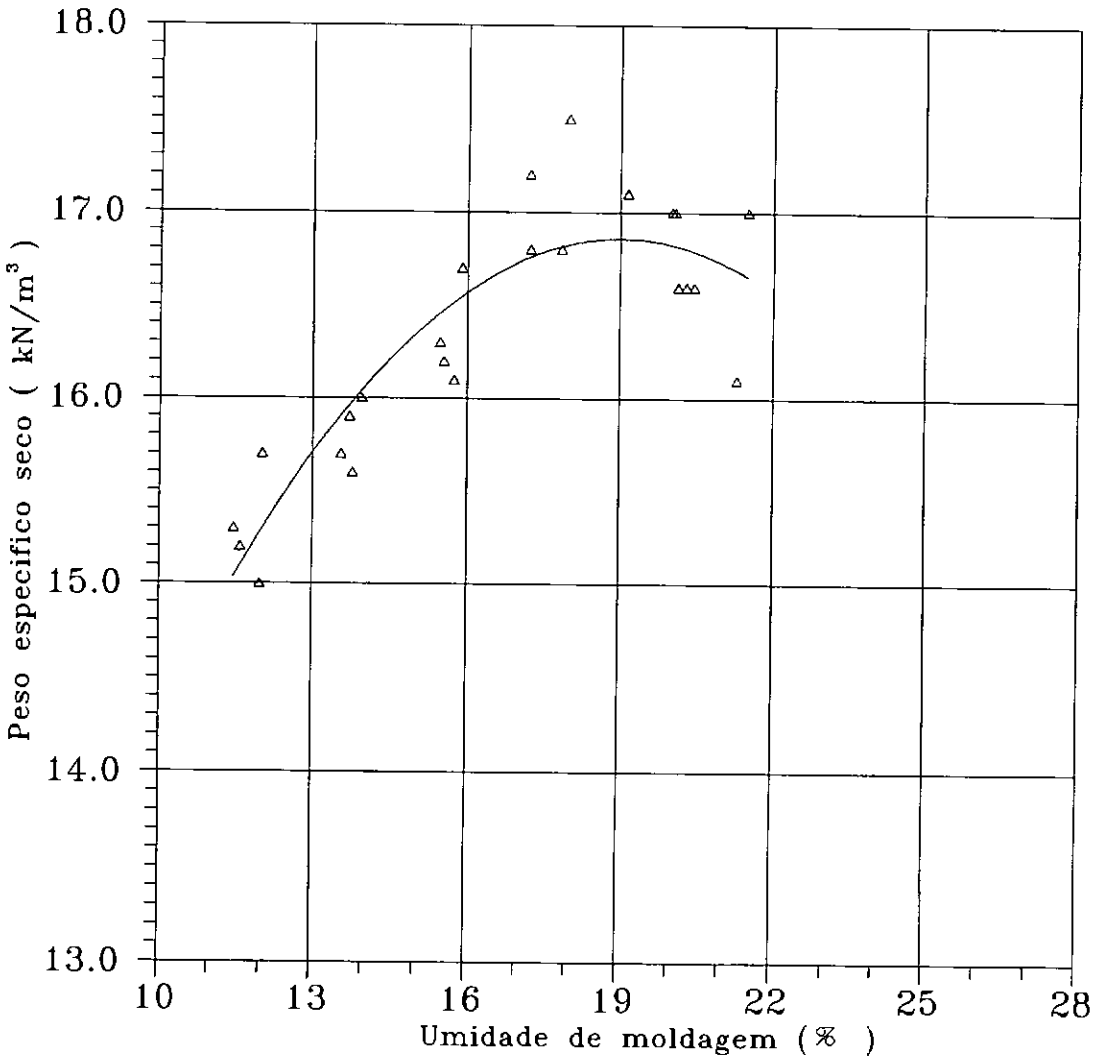
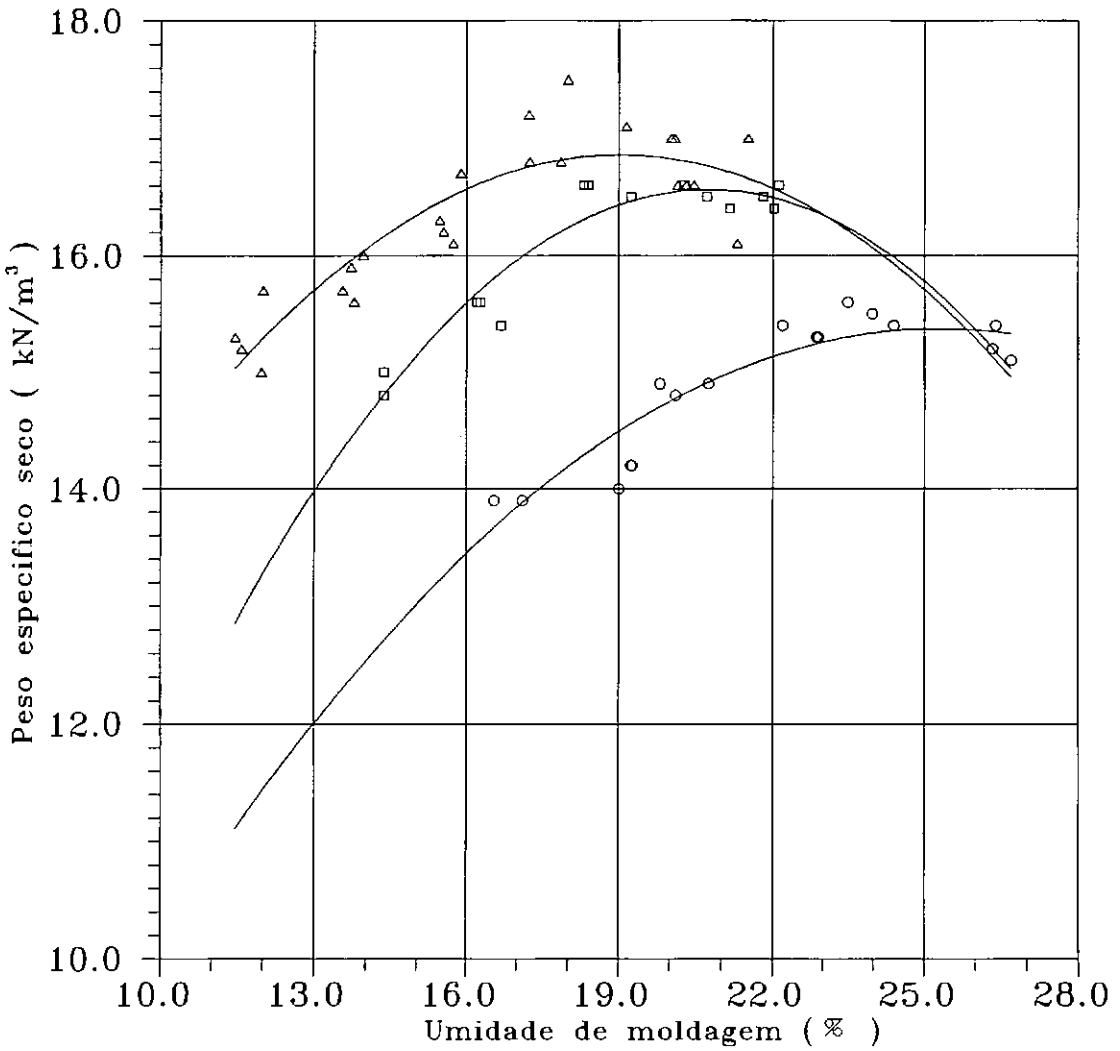


Figura IV.8 - Curva de compactação da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $1,2 \text{ MN/m}^2$.

Ensaio de Compactação

Maquina Manual - Modelo MRC-1 TECMOR

- ○ ○ ○ ○ PETRUS-II - PC = 0,4 MN/m²
 □ □ □ □ □ PETRUS-III - PC = 0,4 MN/m²
 △ △ △ △ △ PETRUS-III - PC = 1,2 MN/m²



Figuras IV.9 - As três curvas de compactação obtidas através do ensaio de compactação utilizando a própria prensa de moldagem.

Já a amostra PETRUS-III, que foi moldada com 7 % de cimento e $1,2 \text{ MN/m}^2$ de pressão de compactação, a resistência à compressão máxima não passou de 1,5 MPa para uma umidade de moldagem de 18 %. Preparou-se mais 8 (oito) corpos de prova com esta amostra com a mesma pressão de compactação e projetando-se a mesma umidade de moldagem que resultou na resistência à compressão máxima, porém, elevou-se o teor de cimento para 9 %, obtendo-se uma corpos de prova. O resultado foi um peso específico seco médio de $17,2 \text{ kN/m}^3$ com desvio padrão de $0,02 \text{ kN/m}^3$; a resistência à compressão média foi de 3,3 MPa com desvio padrão de 0,6 MPa, o menor valor individual foi de 2,4 MPa.

IV.6.3 Ensaio de Absorção

Os ensaios de absorção, também seguiram a metodologia prescrita na norma NBR-8492. Os tijolos foram imersos totalmente em um tanque com água por vinte e quatro horas, depois de enxugados com um pano foram pesados determinando-se o peso úmido. Em seguida foram colocados em uma estufa onde permaneceram até se verificar a constância de peso, a temperaturas entre 105 e 110°C . Ensaiou-se um corpo de prova para cada ponto do ensaio de compactação traçando-se as curvas apresentadas nas figuras IV.13, IV.14 e IV.15.

A série de corpos de prova confeccionados com a amostra PETRUS-II moldados com 7 % de cimento e pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$ alcançaram uma absorção mínima de 23,3 % correspondendo a uma umidade de moldagem de 23 %, posicionada no ramo seco da curva de compactação (Umidade ótima = 25 %). Já a absorção mínima para a série com corpos de prova moldados com a amostra PETRUS-III, teor de cimento de 7 % e pressão de compactação igual a $0,4 \text{ MN/m}^2$, foi de 17,2 % correspondendo a uma umidade de moldagem de 19,5 %, também no ramo seco da curva de compactação (Umidade ótima = 20,5 %). Por fim, absorção mínima da série com corpos de prova moldados com a amostra PETRUS-III, teor de cimento de 7 % , porém com pressão de compactação igual a $1,2 \text{ MN/m}^2$, foi de 13 % para uma umidade de moldagem de 17,5 %, mais uma vez no ramo seco da curva de compactação (Umidade ótima = 19 %). Todos os resultados acima foram obtidos através da interpolação de uma função quadrática nos valores obtidos nos ensaio.

Amostra: PETRUS-II
 Pressao de Compactacao = $0,4 \text{ MN/m}^2$
 Teor de Cimento = 7 %
 Absorcao minima = 23,3 %
 Umidade de moldagem = 23%
 Umidade otima = 25 %

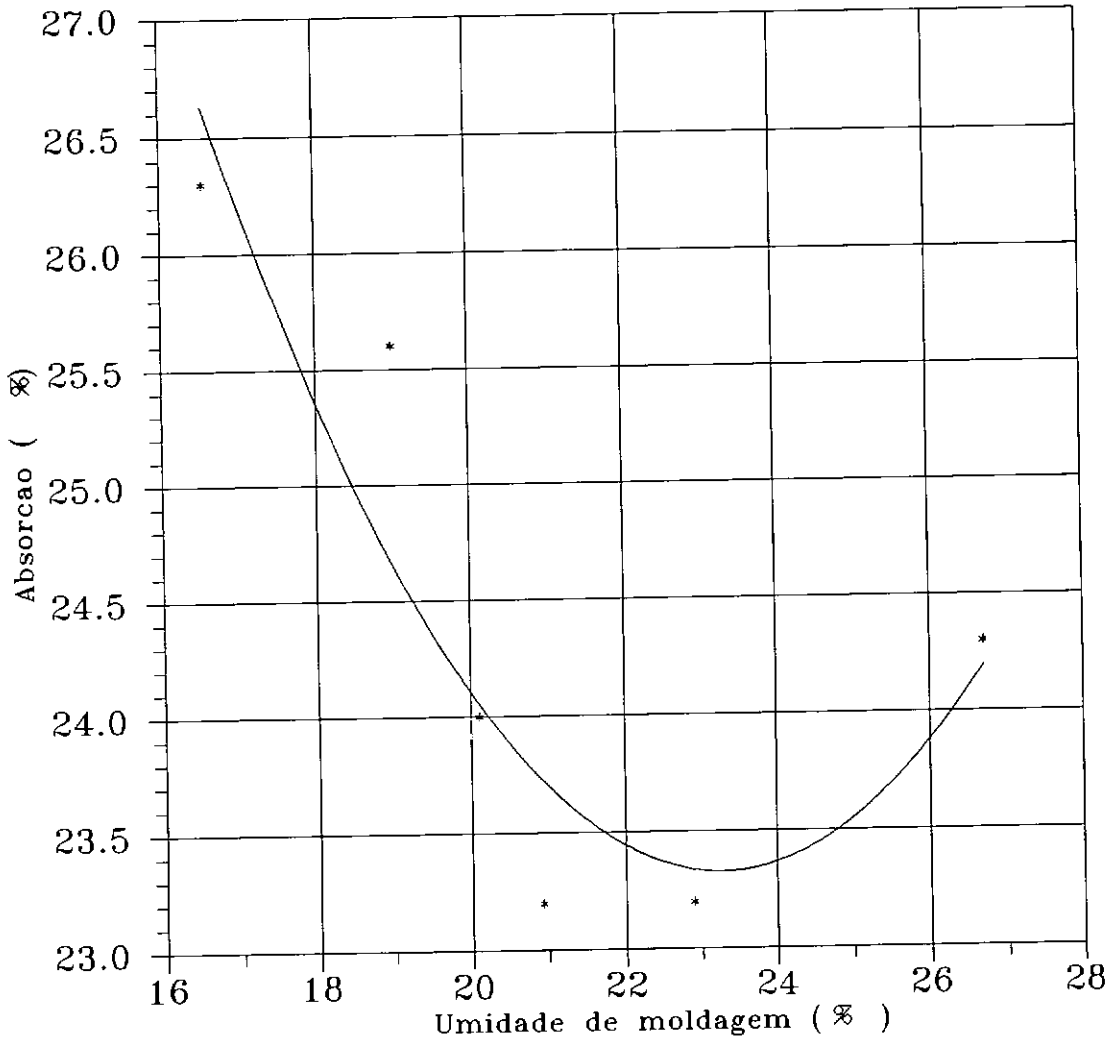


Figura IV.10 - Ensaio de resistência à compressão da amostra PETRUS-II, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$.

Amostra: PETRUS-III
 Pressao de Compactacao = 4 MN/m²
 Teor de Cimento = 7 %
 Absorcao minima = 17,2 %
 Umidade de moldagem = 19,5 %
 Umidade otima = 20,5 %

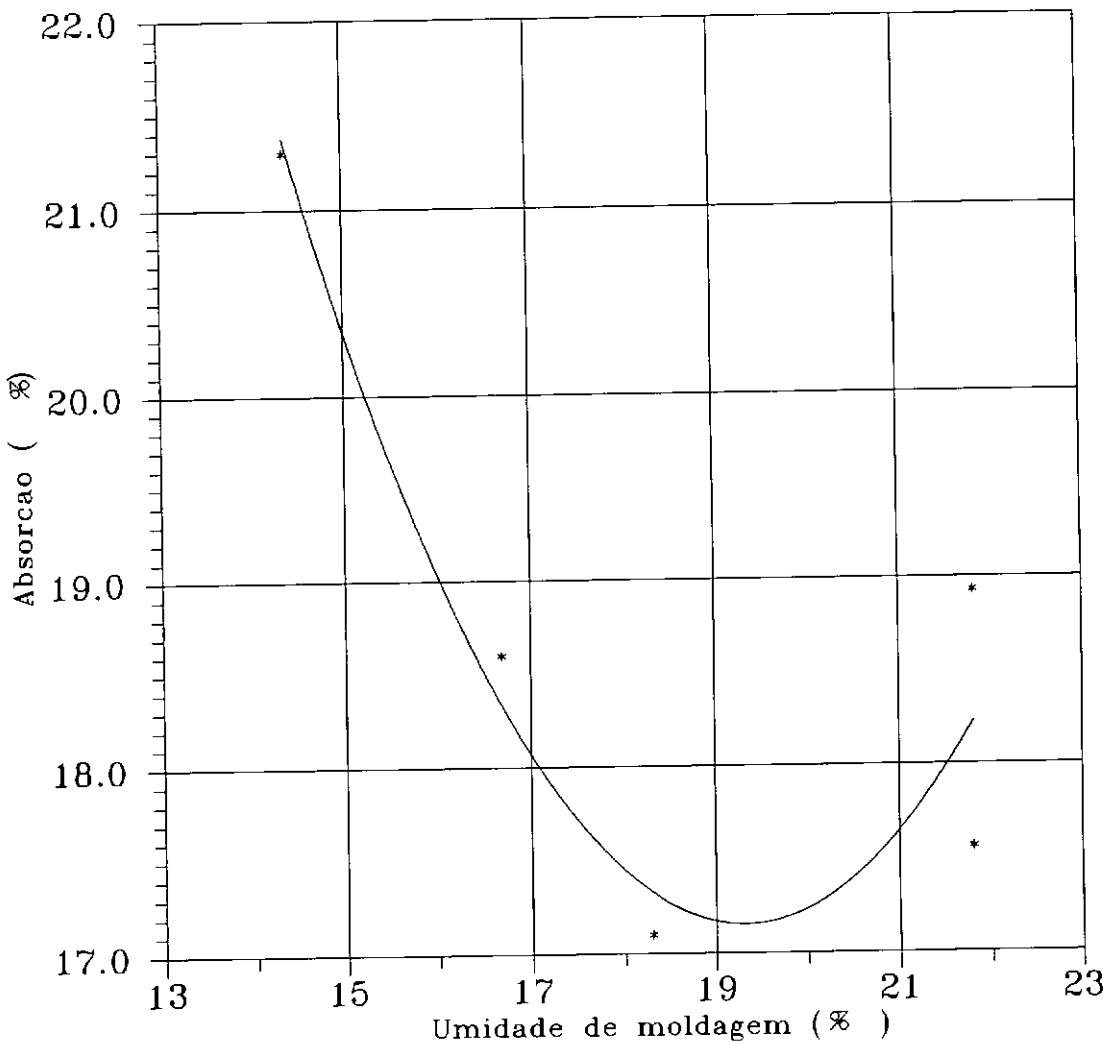


Figura IV.11 - Ensaio de resistência à compressão da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de 0,4 MN/m².

Amostra: PETRUS-III
Pressao de Compactacao = $1,2 \text{ MN/m}^2$
Teor de Cimento = 7 %
Absorcao minima = 13 %
Umidade de moldagem = 17,5 %
Umidade otima = 19 %

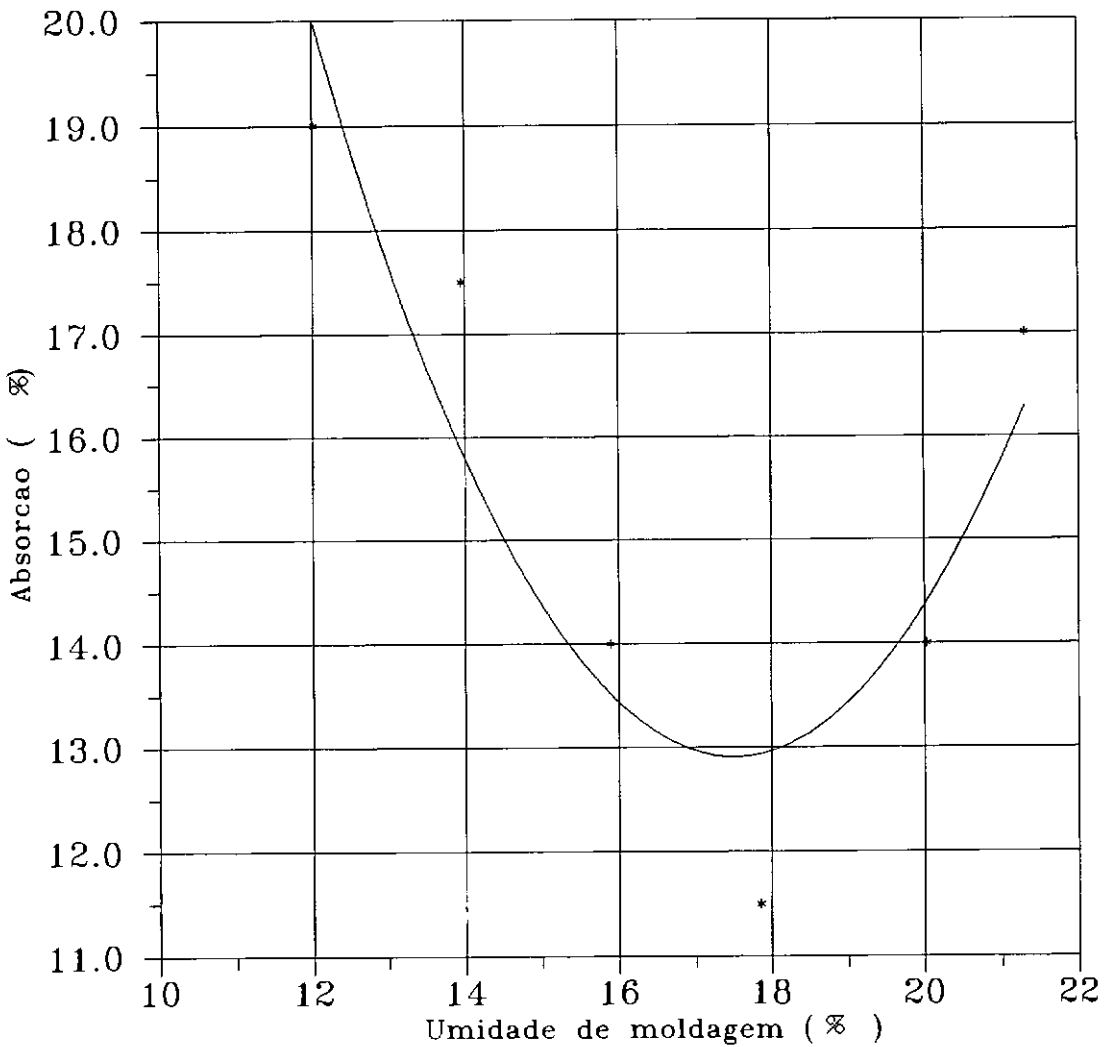


Figura IV.12 - Ensaio de resistência à compressão da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $1,2 \text{ MN/m}^2$.

Amostra: PETRUS-II
Pressao de Compactacao = $0,4 \text{ MN/m}^2$
Teor de Cimento = 7 %
Resistencia maxima = 0,9 MPa
Umidade de moldagem = 21,5%
Umidade otima = 25 %

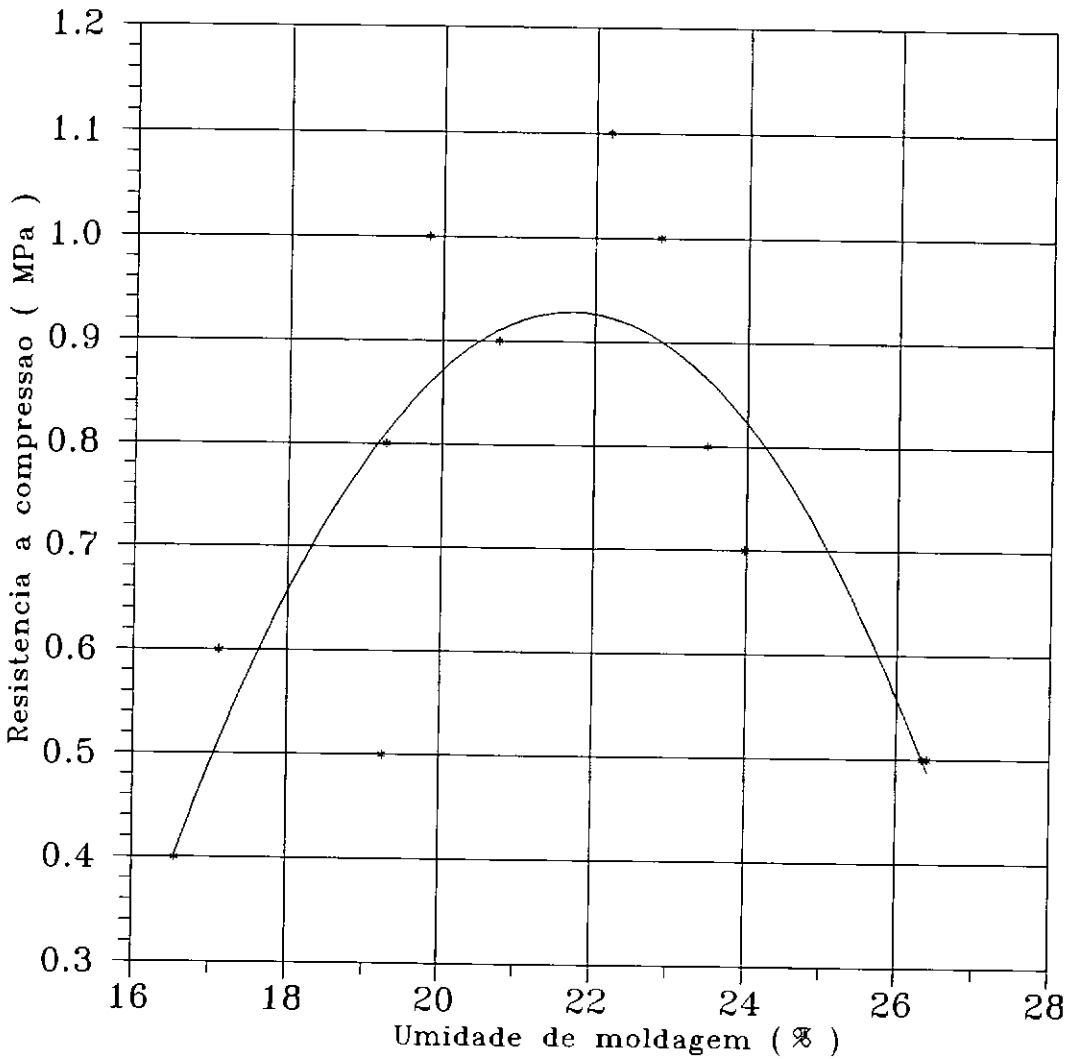


Figura IV.13 - Ensaio de absorção da amostra PETRUS-II, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$.

Amostra: PETRUS-III
 Pressao de Compactacao = $0,4 \text{ MN/m}^2$
 Teor de Cimento = 7 %
 Resistencia maxima = 1,6 MPa
 Umidade de moldagem = 17,5 %
 Umidade otima = 20,5 %

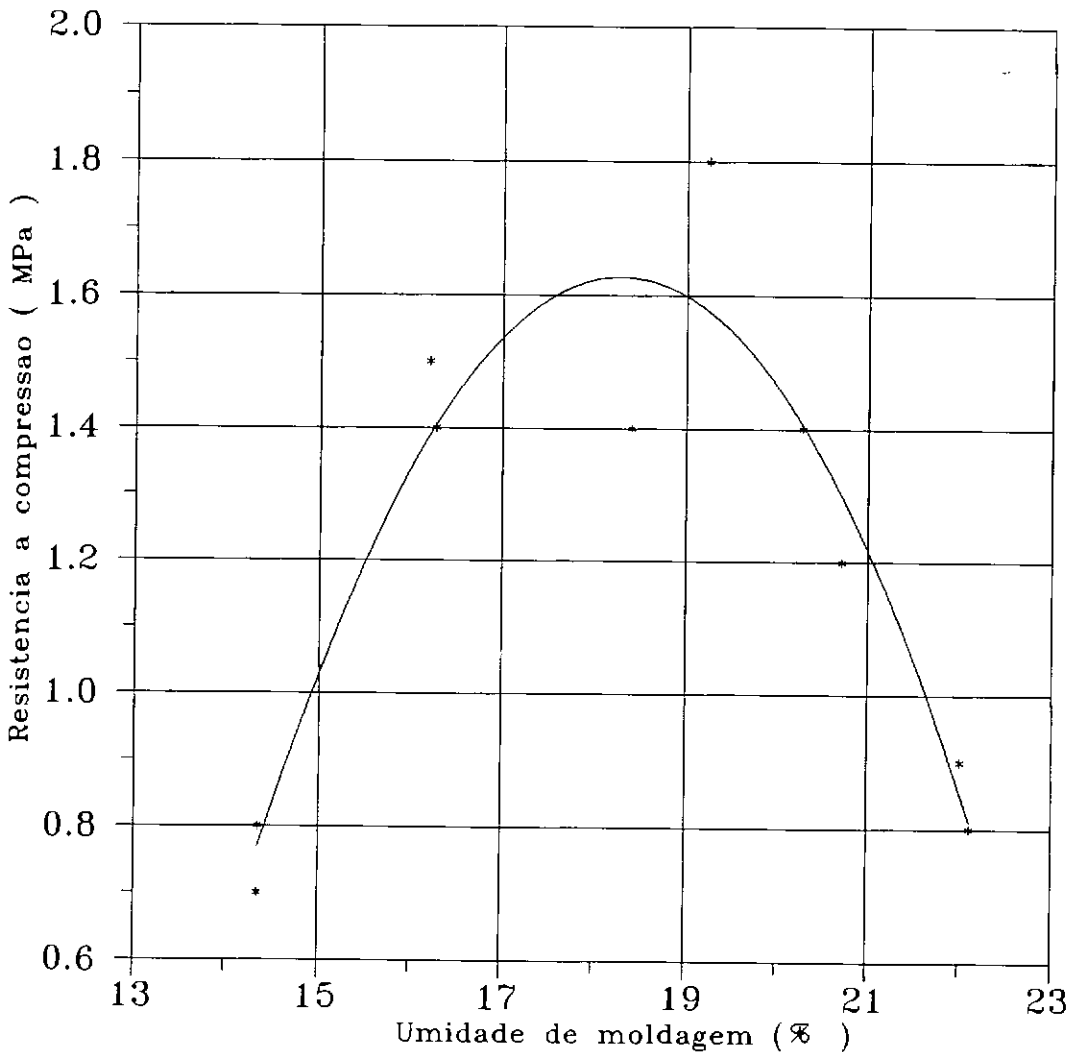


Figura IV.14 - Ensaio de absorção da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$.

Amostra: PETRUS-III
 Pressao de Compactacao = $1,2 \text{ MN/m}^2$
 Teor de Cimento = 7 %
 Resistencia maxima = 1,5 MPa
 Umidade de moldagem = 18%
 Umidade otima = 19 %

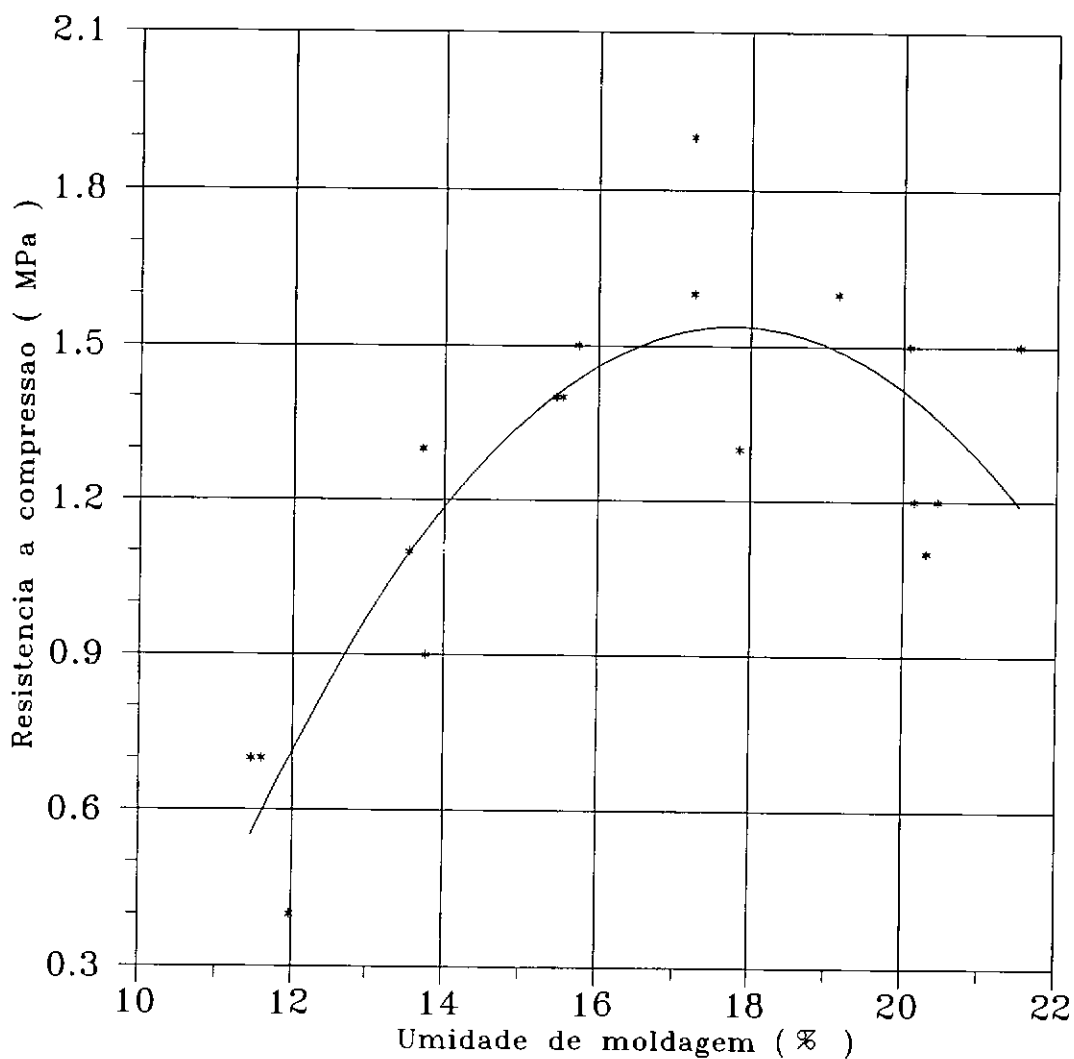


Figura IV.15 - Ensaio de absorção da amostra PETRUS-III, pressão de compactação de $1,2 \text{ MN/m}^2$.

IV.6.4 Análise e discussão dos resultados

As especificações da norma NBR 8491/1984 para tijolos maciços de solo-cimento, além de definirem as dimensões nominais com as quais os elementos devem ser fabricados, fixam que a amostra ensaiada de acordo com a NBR 8492 não deve apresentar a média dos valores de resistência à compressão menor que 2,0 MPa nem valor individual inferior a 1,7 MPa com idade mínima de sete dias. Além disso a amostra ensaiada não deve apresentar a média dos valores de absorção de água maior do que 20 %, nem valores individuais superiores a 22 %.

Conforme pode ser constatado neste programa experimental para a obtenção de uma amostra de tijolo dentro dos limites da norma, utilizando o de solo natural PETRUS-I foi necessário submetê-lo à estabilização física, através da correção granulométrica, à estabilização química por adição de cimento e a estabilização mecânica, efetuada pela compactação por prensagem.

Este estudo apontou três variáveis que devem ser investigadas na dosagem de misturas solo-cimento destinadas a confecção de elementos prensados:

(1) A plasticidade do solo - através da determinação dos limites de consistência, e com o ensaio de compactação torna-se fácil avaliar se um solo apresenta uma plasticidade excessiva que acaba inviabilizando as etapas de mistura e prensagem;

(2) o teor mínimo de cimento - o cimento atua de duas formas principais nas misturas solo-cimento: diminui a plasticidade e confere resistência ao elemento após decorrido o período de cura;

(3) a umidade de moldagem da mistura - conforme os princípios da compactação de solos para um dado esforço de compactação existe uma umidade que confere ao solo uma estrutura estável.

Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação empregando a própria prensa de moldagem correspondeu às expectativas, demonstrando ser um instrumento bastante prático para a dosagem da umidade de moldagem dos elementos solo-cimento. Os outros métodos de dosagem (citados no capítulo anterior) não dão muita importância à umidade de moldagem dos elementos, geralmente adotam o valor da umidade

ótima para o ensaio Proctor Normal, cujo esforço de compactação por impacto do soquete não corresponde à compressão estática aplicada, geralmente, pelas prensas.

As vantagens detectadas com a utilização deste método são:

- Utilização dos próprios elementos como corpos de prova;
- o contato com o solo durante a operação de mistura permite avaliar se o solo é apropriado ou não à presagem;
- a correspondência direta da umidade de moldagem ao esforço de compactação por prensagem;
- os elementos conformados podem ser utilizados nos ensaios de resistência à compressão e no ensaio de absorção;
- este ensaio permite de forma direta determinar o limite de plasticidade da mistura, pois a partir de um dado teor de umidade não se verifica variação na altura do corpo de prova.

Notou-se que pelo menos dois fatores podem conduzir à dispersão nos resultados deste ensaio:

- A pré-compactação: deve-se ter o cuidado de ao acomodar a mistura ao molde exercer um esforço constante para todas as umidades de moldagem;
- o tempo decorrido entre a mistura e a moldagem: quando foram prensados os três elementos de uma vez (pressão de compactação de $0,4 \text{ MN/m}^2$) o espaço de tempo entre a mistura do primeiro elemento e o terceiro gerou uma certa diferença nos resultados devido, provavelmente, ao início das reações físico-químicas com o cimento.

Ensaio de Resistência à Compressão

Os ensaios realizados indicaram que a resistência à compressão dos corpos de prova apresenta a tendência a aumentar com a melhoria da distribuição granulométrica do solo, através da diminuição do teor de finos e com o aumento no teor de cimento.

Observou-se que a curva de resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento apresenta comportamento semelhante ao observado nos ensaios com solos naturais, previamente, saturados. Ou seja, ao contrário dos solos naturais não saturados em que a resistência decresce com o aumento da umidade, nos tijolos de solo-cimento esta iniciou-se crescente, atingiu um pico e em seguida passou a crescer com a umidade de moldagem. Provavelmente este comportamento deve-se ao fato dos tijolos de solo-cimento, antes de serem rompidos, permanecerem

inversos em água durante 24 horas, porém este fenômeno demanda um estudo mais completo envolvendo um maior número de ensaios e amostras de solo diferentes.

O aumento na pressão de compactação, de 0,4 para 1,2 MN/m² com a amostra PETRUS-III, não causou incremento significativo de resistência, apesar da pouca representatividade de um único experimento.

Observou-se que as resistências à compressão máximas determinadas correspondem a umidades de moldagem localizadas no ramo seco da curva de compactação.

A dispersão dos resultados para uma mesma umidade de moldagem deve estar relacionada às dificuldades de confecção dos corpos de prova.

A teoria e a prática de compactação de solos estabelece que os solos devem ser compactados na umidade ótima, apesar desta não corresponder ao valor de máxima resistência, pois esta é capaz de transmitir maior estabilidade à estrutura face a possibilidade de saturação (VARGAS, 1978).

Os resultados dos ensaios de resistência deste trabalho corroboraram o fato da máxima resistência não corresponder à umidade ótima de moldagem e, sim a umidades variando de 1 a 3,5 % abaixo da ótima determinada pelo ensaio de compactação com a própria prensa de moldagem. Cabe neste trabalho levantar a discussão de qual das duas faixas de umidades devem ser escolhidas para a dosagem de misturas solo-cimento destinadas à confecção de elementos de alvenaria?

Duas razões nos inclinam a adotar os valores de umidade abaixo da ótima, obtendo, assim maiores valores de resistência: primeiramente, nas misturas solo-cimento as cimentações decorrentes dos fenômenos físico-químicos de estabilização conferem maior estabilidade à estrutura do solo compactado e em segundo lugar a possibilidade de saturação das alvenarias construídas utilizando estes elementos só ocorrem devido à infiltrações ou enchentes.

As conclusões obtidas por FELT (1955), mencionadas no Capítulo III, enunciam que misturas solo-cimento empregando solos arenosos devem ser compactadas na umidade ótima ou ligeiramente abaixo desta, ao passo que misturas a partir de solos argilosos e siltosos devem ser compactadas com umidades 1 a 2% acima da ótima.

As amostras PETRUS-II e PETRUS-III constituem-se de argilas arenosas e caso fossem obedecidos os critérios de FELT deveriam ser estabilizadas com valores de umidade acima da ótima. Deve-se atentar ao fato que os critérios fundamentam-se em métodos de ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, gelo e degelo, adotados pela ASTM em 1944 (D559-44 e D550-44, respectivamente). Portanto, as "forças destruidoras" de contração, expansão,

congelamento e de gelo impostas por estes ensaios não correspondem à realidade dos esforços atuantes nas alvenarias em países de clima tropical.

Ensaio de Absorção

A melhoria na distribuição granulométrica do solo e o aumento na pressão de compactação proporcionaram uma diminuição na absorção de água pelos elementos.

Os gráficos apresentados mostram que nas três condições estudadas a absorção de água diminui até uma determinada umidade de moldagem no ramo seco da curva de compactação, a partir daí passa a aumentar adentrando o ramo úmido desta curva. A maior absorção no ramo seco da curva deve ser atribuída à estrutura floclada dos solos compactados com umidades inferiores à ótima. Já o aumento da absorção a medida que se avança no ramo úmido, onde a estrutura das partículas de solo se comporta como estando dispersas em água, pode ser explicado pelos vazios deixados pela água totalmente vaporizada durante a secagem em estufa.

Teor de cimento

As misturas solo-cimento dosadas com teores de cimento determinado através do ensaio Físico-químico não proporcionaram aos tijolos, para as pressões de compactação aplicadas na prensagem, a resistência mecânica especificada pelas normas da ABNT.

Como já foi mencionado no capítulo III o ensaio Físico-químico é ótimo indicador da presença de argilo-minerais expansivos, matéria orgânica em excesso além de outros compostos que dificultem a estabilização química do solo. Desta forma o ensaio proporciona um conhecimento mais amplo da jazida de solo que se deseja empregar, além de fornecer um teor que sirva de ponto de partida para a seguinte análise:

- Se o teor for muito alto, acima de 13 %, deve-se avaliar a viabilidade econômica de sua utilização, provavelmente demandará por estabilização física (correção granulométrica) ou pela escolha de outro estabilizante químico disponível (por exemplo: cal, rejeitos industriais);

- caso for um teor aceitável, sugere-se que sejam moldados, além do teor definido, corpos de prova (tijolos ou blocos) com teores crescentes de cimento (por exemplo: +2 e +4 %). Desta forma é possível traçar uma curva de resistência em

função do teor de cimento e estudar-se a viabilidade econômica da utilização da jazida.

Observações de ordem práticas

Neste trabalho pode parecer contraditória a utilização de uma metodologia de dosagem para tijolos e blocos prensados que requer pessoal com conhecimentos técnicos específicos e laboratório de apoio convenientemente equipado, quando se está utilizando uma prensa manual que é correntemente utilizada onde predomina a escassez de recursos. Deve ser lembrado que a prensa manual foi utilizada apenas como instrumento de pesquisa, e principalmente pelo fato de estar instalada dentro de um laboratório de pesquisas o que possibilita um maior controle das variáveis em estudo.

A metodologia proposta neste trabalho que sugere a utilização do ensaio Físico-químico para a determinação do teor mínimo de cimento, a determinação da umidade de moldagem a partir do ensaio de compactação com a própria prensa e os ensaios de compressão dos elementos moldados, só se justifica em ambientes com unidades de produção que alcancem níveis de médios a muito elevados. Esta produção deve objetivar a atender a demanda de projetos habitacionais e no futuro o mercado formal de materiais de construção.

A metodologia de dosagem de misturas solo-cimento para a produção de tijolos em prensas manuais deve ser baseada nas características dos solos determinadas através de ensaios expeditos. Normalmente serão utilizados teores de cimento mais conservadores e fundamentalmente as experiências de sucesso ou fracasso com os solos empregados em uma dada região.

Apesar de não ter havido oportunidade de estender esta pesquisa, principalmente o ensaio de compactação com a própria prensa de moldagem, para prensas hidráulicas (por exemplo HRC-3 da TECMOR, disponível na Prefeitura Municipal de Petrópolis) pelo que se pôde observar neste equipamento não existe impedimento para este tipo de investigação.

Nestes equipamentos o solo é dosado em volume e o cimento em peso (sacos de 50 Kgf), quantidade de mistura para um bloco ou tijolo, pode ser calibrada dentro de uma faixa de valores que resultem em uma produção homogênea.

Vale a pena ressaltar que estes equipamentos que surgiram no Brasil na década de 70 hoje encontram-se obsoletos. A nova geração de equipamentos, alguns chegando a ser totalmente automatizados, permitem um controle da dosagem bem mais rigoroso.

CAPITULO V

Conclusões e sugestões para pesquisas futuras

V.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas conclusões fundamentadas na revisão bibliográfica e no programa de ensaios empreendidos.

Este trabalho procurou despertar para a importância do conhecimento das propriedades geotécnicas dos solos e de suas técnicas de estabilização, adaptando-o ao novo enfoque de aplicação constituído pelos elementos e componentes destinados à Construção Civil, principalmente a construção de moradias. No Brasil em que a construção de moradias utilizando elementos e componentes elaborados com solo se encontra ainda em fase embrionária, apenas com experiências isoladas onde prevaleceram o insucesso e a falta de continuidade de projetos o que gerou sentimentos de desconfiança e, por vezes, total descrédito na tecnologia. Ignora-se por aqui o continuo avanço destas tecnologias em todo o mundo, inclusive nos países industrializados. Face este quadro, acredita-se ser a hora e a vez de se intensificar, não tão somente estudos, mas também projetos de pequeno, médio e grande porte, desde que lastreados pelo profundo conhecimento da tecnologia aliada a controles realísticos de viabilidade econômica.

V.2 Conclusões

Os custos dos materiais de construção tradicionais vem aumentando acima dos índices de inflação refletindo, afora os problemas de especulação gerados pelo cartéis e oligopólios, o aumento em seus custos de produção explicado pela escassez de matérias primas em determinadas regiões ou durante a estação chuvosa, obsolescência de instalações gerando baixa produtividade, utilização intensa de energia e fontes não renováveis de energia, custos de transporte, etc.

O emprego de misturas de solo estabilizado na produção de elementos de alvenaria e paredes monolíticas se torna relevante quando analisado pelos aspectos econômico, energético e ecológico.

No passado o homem comum dominava as técnicas de construção e edificava suas próprias moradias utilizando, principalmente, o solo como material de construção. A Revolução Industrial trouxe novos materiais que para o seu emprego exigiam mão-de-obra especializada, além disso o modo de vida urbano não reservava tempo para que o trabalhador atuasse na construção de sua própria moradia.

Os diversos empregos na Engenharia Civil das misturas solo-cimento exemplificam o grande potencial de aplicação dos solos estabilizados quimicamente.

Muitas vezes os elementos e componentes confeccionados com solo são confundidos com as técnicas de construção que os utilizam. Existe uma tendência a acreditar que o domínio da produção destes elementos e componentes é condição suficiente para o bom desempenho e economia na construção de uma moradia. As técnicas de construção com solo, além de empregar diversos outros materiais, elementos e componentes, prescindem de projetos adequados às especificidades do uso do solo como material de construção.

As técnicas de moldagem in situ de paredes monolíticas e fabricação de adobes, blocos e tijolos de solo estabilizado foram resgatadas do passado e vem incorporando inúmeras inovações tecnológicas. Apresentam-se como alternativa viável aos materiais de construção tradicionais.

Os equipamentos destinados a compor uma planta de produção de elementos (adobes, blocos e tijolos) de solo estabilizado, principalmente as prensas, devem ser dimensionados levando-se em conta os seguintes condicionantes:

- nível de produção desejado, calculado em função da demanda do projeto habitacional;
- disponibilidade de matéria-prima compatível com a produção desejada;
- distâncias de transporte, tanto da matéria-prima quanto dos produtos;
- infraestrutura necessária: disponibilidade de água, energia, coberturas, galpões, etc;
- área de estocagem para a produção;
- modalidade das relações de trabalho na planta, isto é, saber se esta vai operar com mão-de-obra contratada fixa ou voluntária;
- garantia de assistência técnica permanente e de peças de reposição próximos à planta de produção.

A identificação dos solos, mesmo através de ensaios expeditos, é essencial na investigação da suscetibilidade ou não do solo à estabilização, definindo a melhor técnica e estabilizante a serem empregados.

De todos os grupos de estabilizantes conhecidos, os rejeitos industriais e minerários se destacam como sendo os de aproveitamento mais promissor. Sua utilização constitui uma verdadeira via de mão dupla tendo em vista os impactos causados ao Meio Ambiente decorrentes de seu manejo e estocagem.

O cimento Portland apesar de ser o estabilizante de solos de uso mais difundido, devido a sua disponibilidade, domínio tecnológico e inúmeros sucessos práticos, nem sempre é o mais adequado técnica e economicamente. O grande volume de conhecimentos acumulados ao longo de mais de sessenta anos de pesquisa constituem importante referência, inclusive no estudo de outros estabilizantes.

O exame das metodologias existentes para a dosagem de misturas de solo-cimento aplicadas a outros usos do material, servem de ponto de partida para o estabelecimento de uma metodologia específica para a dosagem de misturas empregadas na fabricação de tijolos e blocos prensados. O Método Físico-químico demonstrou refletir o comportamento dos constituintes do solo, principalmente a fração mais fina, quando interage com os compostos que constituem o cimento

Portland, além de sugerir um teor de cimento em peso que deve ser empregado nos ensaios de compactação, resistência e absorção.

A primeira conclusão que pode ser extraída do programa de ensaios desenvolvido é que nem todo o solo, mesmo utilizando um estabilizante químico, serve para a produção de elementos de alvenaria, ao contrário do que muitos fabricantes de prensas estampam em seus catálogos promocionais.

Para que as misturas solo-cimento elaboradas com as amostras de solo estudada alcançassem os padrões de resistência e grau de absorção definidos pelas normas vigentes, foi necessário intervir na distribuição granulométrica e plasticidade do solo (estabilização física), umidade de moldagem da mistura e pressão de compactação da prensa (estabilização mecânica) e adição de cimento (estabilização química).

O programa de ensaios, desenvolvido no capítulo IV, demonstrou a viabilidade do ensaio de compactação de misturas solo-cimento empregando-se a própria prensa manual na moldagem dos corpos-de-prova.

Os resultados obtidos através dos ensaios de resistência à compressão dos pontos da curva de compactação indicam que umidades de moldagem abaixo da umidade ótima conduziram a maiores valores de resistência à compressão para as amostra ensiadas.

Umidades de moldagem abaixo do valor da umidade ótima resultaram em menores graus de absorção para as amostra ensiadas.

Os resultados deste trabalho sugerem que partindo-se do teor mínimo de cimento sugerido pelo ensaio Físico-químico e após definida a umidade de moldagem da mistura, a partir do ensaio de compactação com o próprio equipamento de prensagem. Moldando-se no corpos de prova com teores crescentes de cimento (por exemplo: + 2 e + 4 %) e encontrando-se resultados de resistência mínima e absorção máxima conforme os métodos de ensaio da ABNT. Porém, mesmo simples, esta metodologia demanda equipamentos e pessoal técnico treinado, adequando-se a níveis médios a muito elevados de produção de elementos de solo-cimento.

V.3 Sugestões para pesquisas futuras

- Desenvolver trabalhos de estabilização de misturas com outros estabilizantes e técnicas de estabilização, principalmente com rejeitos industriais, aplicados à produção de elementos (adobes, tijolos e blocos) e paredes monolíticas.

- Aprofundar o estudo da umidade de moldagem de tijolos e blocos de solo-cimento, utilizando a própria prensa de moldagem, desenvolvendo um programa de ensaios mais extenso com a utilização de maior número de amostras e outros tipos de prensas

- A metodologia de dosagem proposta no capítulo IV só é adequada à níveis de produção médios e elevados quando se pode dispor de pessoal técnico treinado. Seria importante desenvolver uma metodologia a partir de ensaios expeditos e uma simplificação do ensaio Físico-químico.

- Desenvolver estudo apropriando os custos de produção de elementos e componentes de solo estabilizado, comparando-os com materiais disponíveis no mercado, elaborando-se matrizes energéticas de produção.

- Todos estes estudos deveriam estar, preferencialmente, ligados ao desenvolvimento de protótipos habitacionais utilizando elementos ou componentes de solo estabilizado. Conjugando esforços de outros programas da COPPE, da Escola de Engenharia e da Faculdade de Arquitetura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ABIKO, A.K. (1980). *Tecnologias Apropriadas: Tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento*. Tese M.Sc. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [02] ABRAMS, C. (1984). *Habitação, Desenvolvimento e Urbanização, Man's struggle for shelter in a urbanizing world*, Alexandre Lissovsky. Rio de Janeiro, Edições O cruzeiro, 368p.
- [03] ADASKA, W.S. et alii (1990). *State-of-the-Art, Report on soil-cement*. Commitee 230, ACI Materials Jornal, jul./ago., p.305-417.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1977). *Normas de dosagem de solo-cimento*. São Paulo, ABCP, 67p.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1984). *Prospecção de jazidas e coleta de amostras de solos para solo-cimento; mistura de dois solos*. São Paulo, ABCP, 27p.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1990). *Solo-cimento na habitação popular atual*. 3.^a ed. rev. São Paulo, 10p.
- [07] AZAMBUJA, M.A. (1981). *Geologia aplicada a solo-cimento*. 2.^a ed., São Paulo, ABCP, 66p.
- [08] BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO (1983). *Tecnologias simplificadas para a construção habitacional*. Rio de Janeiro, BNH/DEPEA.
- [09] BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO (1985). *Tijolos maciços de solo-cimento; fabricação e utilização*. Rio de Janeiro, Departamento de Estudos e Pesquisas Aplicadas - DEPEA, 20p.
- [10] BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO (1985). *Uniformização das técnicas de aplicação do solo-cimento na constução habitacional*. Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 14p.

- [11] BOY, D. (1991). *Maisons Enterre: que sont-elles devenues?* Revista Systèmes Solaires, n.º 69, Mai 1991, France, p.21-27.
- [12] CAPUTO, H.P. (1980). *Mecânica dos Solos e suas aplicações*. 5.^aed. rev.e e ampliada. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 1980, vol. 1, 219 p.
- [13] CASANOVA, F.J. & CERATTI, J.A. (1986). *The assessment of cement requirement of oxisols by physico-chemical method*. 8th INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, Brazil, part 1, p. 243.
- [14] CASANOVA, F.J. (1988). *O estado atual dos estudos sobre a dosagem físico-química do solo-cimento*. Relatório do curso COC-802, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- [15] CASANOVA, F.J. (1981). *Um estudo físico-químico-matemático da estabilização alcalina de solos argilosos*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [16] CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DA BAHIA (1978). *Solo-cimento na habitação popular*. Relatório final, fase 2, Salvador, BNH/APQ, 130p.
- [17] CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DA BAHIA (1978). *Tratamento estatístico da dosagem de solo-cimento*. Salvador, BNH/APQ, 189p.
- [18] CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DA BAHIA (1985). *Cartilha para construção de paredes monolíticas de solo-cimento*. 4.^a ed, Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 39p.
- [19] CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DA BAHIA (1985). *Manual de construção com solo-cimento*. 4.^a ed., Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 129p.

- [20] CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DA BAHIA (1989). *Avaliação de edificações com paredes monolíticas, tijolos e blocos de solo-cimento*. Rio de Janeiro, CEF/DIPEP, 88p.
- [21] CEMBUREAU (1960). *Soil-cement - A literature study*. Translation of the "S.C.W. - Mededeling N.º 6 ", published by "Stichting Studie-Centrum Wegenbouw ", Amsterdam. The cement statistical and technical association, Malmö, Sweden, 80p.
- [22] CENTRO INTERAMERICANO DE VIVENDA (1953). *Bloques de suelos estabilizados. Máquina giratória hidráulica para la compresión de bloques de tierra para construcción*. Servicio de Intercambio Científico, Bogotá, Colômbia, 5p.
- [23] CHADDA, L.R. (1954). *The rapid determination of cement in cement-soil mixtures*. Indian Concret Journal, vol. 28, p. 446-448.
- [24] CHADDA, L.R. (1971). *A rapid method of assessing the cement requirement for the stabilization of soils*. Indian Concret Journal, vol. 45(7), p.298-314.
- [25] D'AMICO, M.A. (1983). *Metodologia de dosagem de solo-cimento para a fabricação de tijolos*. Tese M.Sc. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 125p.
- [26] DANTAS, H.P. (1965). *Estabilização de Taludes com solo-cimento*. I Simpósio sobre pesquisas rodoviárias. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 10p., ago./65.
- [27] EKA (1991). *Cátalogo da prensa hidráulica PHT*. Mudrei Indústria e Manutenção Hidráulica Ltda. Av. Faustino Ramalho, 857, Jardim Vila Galvão, Guarulhos, São Paulo
- [28] ENAMORADO, M.A. (1990). *Estudo comparativo entre o método mecânico e o método físico-químico de dosagem do solo-cimento*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- [29] ESTEVES, F.A. (1988). *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro. Interciência/FINEP, 575p.
- [30] FABER, A.H.O. & GOMES, J.W. (1977). *Cidade Ocidental: Uma experiência em execução de casas com tijolos e blocos de solo-cimento*. 12p.
- [31] FARRENBERG, M.L.A. & CORBISIER, A.C.C. (1986). *Manual para a fabricação de tijolos de solo-cimento*. CESP, São Paulo, 12p.
- [32] FELT, E.J. (1955). *Factores influencing some of the physical properties of soil-cement mixtures*. Portland Cement Association, Research and Development Division, Chicago, EUA, 41p.
- [33] FUNDAÇÃO NUCLEO DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL (1987). *Estabilização do solo com emprego da cal, Manual de fabricação de tijolo de solo-cal*. CEF/DEPEA.
- [34] GIZA (1980). *Manufatti in terra*. Giza s.p.a.. 42011 Bagnolo in Piano (RE), Itália, 90p.
- [35] GUIDA, H. (1971). *Estabilização de um solo laterítico fino pelo ácido fosfórico*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [36] HOUBEN, H. et alii (1979). *Construire en terre*. France, Éditions Alternative et Parallèles / collection Architecture, 272p.
- [37] INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO (1990). *Informação básicas sobre materiais asfálticos*. Rio de Janeiro, 4.^a edição, IBP / Comissão de Asfalto, 78p.
- [38] INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO (1973). *Fabrication de ladrillones con mezclas de suelo y cemento portland*. Buenos Aires, Argentina, 12p.
- [39] INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS (1987). *Pesquisa sobre utilização de rejeitos industriais e minerais na construção rodoviária -*

Estabilização de solos. Relatório final, Rio de Janeiro, TRAFECON Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda., 123p.

- [40] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1978). *Implementação técnica para a produção de tijolos solo-cimento através de máquina automática TOR-HPT-30*. São Paulo, BNH/APQ, 2v.
- [41] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1985). *Utilização de blocos vazados de solo-cimento na construção de habitações*. 2.^a ed., Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 51p.
- [42] MABARDI, J.F. (1984) *International Colloquium on "Earth Construction Technologies Appropriate to Developing Countries"*, *Proceedings*. The Government of Belgium, Ministry of Development Cooperation, Brussels, Belgium, 186p.
- [43] LIMA, M.F. (1992). *Fruto permitido - USIMINAS diversifica e lança tijolo de escória de alto-forno*. Revista Construção, Rio de Janeiro, Ed. PINI, ano XXI, N.º 309, p.21-23, mai./92.
- [44] MARCON, A. (1977). *Durabilidade e módulos de elasticidade de misturas de areia-cal-cinzas volantes*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [45] MENENDEZ, J. (1973). *Solos expansivos; sua estabilização com cal*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [46] MEDEIROS, E. (1992). *Muro no caminho*. Revista Construção, Rio de Janeiro, Ed. PINI, ano XXI, N.º 307, p.10-20, mar./92.
- [47] MEDINA, J. (1977). *Research on soil stabilization at Federal University of Rio de Janeiro*. 5th SOUTHEAST ASIAN CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, Bangkok, Thailand, p. 439-452, jul./77.
- [48] MORIARTY, T.I. et alii (1975). *Soil-cement for low-cost housing*. Building Research and Practise, Grã-Bretanha, mai./jun., p. 156-167.

- [49] MOURA, P.R.M. (1987). *Estudo comparativo do comportamento de solo-cimento feito com um solo laterítico e um solo saprolítico*. Tese M.Sc. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 95p.
- [50] NARDI, J. (1975). *Estabilização de areia com cinza volante e cal; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [51] NASCIMENTO, A.A.P. & AUGUSTO JR., F. (1991). *Solo-cimento - A nova norma de dosagem*. 25.^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, São Paulo, out./91.
- [52] PINTO, C.S. (1980). *Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento*. 4.^a ed., São Paulo, ABCP, 22p.
- [53] PINTO, S. (1971). *Estabilização de areia com adição de cal e cinza volante*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [54] PINTO, T.P. (1992). *Entulho de construção: problema urbano que pode gerar soluções*. Revista Construção, Rio de Janeiro, Ed. PINI, ano XXI, N.º 314, p.11-12, out./92.
- [55] PITTA, M.R. (1979). *Uma proposta para o estabelecimento de um método de dosagem de solo-cimento para uso na construção de moradias*. São Paulo, ABCP, 18p.
- [56] POPULAÇÃO SEM TETO (1989). Revista Engenharia & Arte, Rio de Janeiro, Ed. Escola de Engenharia da UFRJ, ano 2, N.º 8, p. 10-20.
- [57] PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1959). *Soil-cement laboratory handbook*. Chicago, EUA, PCA, 60p.
- [58] RODRIGUES, M.G.M. (1992). *Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem do solo-cimento*. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- [59] LEMOS, R. C. & SANTOS, R. D. (1982). *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Campinas. SBCS e SNLCS, 2.^a edição, 46p.
- [60] SANTOS, P.S. (1975). *Tecnologia das argilas*. São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, vol. 2.
- [61] SCADIUZZI & ANDIROLO (1946). *Concretos e seus materiais, propriedades e ensaios*. São Paulo, Ed. Pini, 1986, 553p.
- [62] SCHRENCKENBACH, H & ABANKAWA, J.G.K. (1990). *Construction technology for a tropical developing country*. Deutsche gesellschaft für technishe zusaammenarbeit (GTZ), Department of Architecture, University of Science and Technology, Kumasi, Ghana, 338p.
- [63] SECRETARIA MUNICIPAL DE OBRAS DA PREFEITURA DE JUIZ DE FORA (1986). *Utilização do solo-cimento em obras de contenção*. boletim N.º 1, 3.^a ed., São Paulo, ABCP, 27p.
- [64] SMITH, R.G. (1974). *Building with soil-cement bricks*. Building Research and Practise, Grã-Bretanha, mar./abr., p. 98-101.
- [65] SPALDING, F.P. et alii (1926). *Mansonry Structures*. 2.^a ed., New York. John Wiley & Sons, Inc., 575p.
- [66] SPENCE R.J.S. (1975). *Predicting the performance of soil-cement as a building material in tropical contries*. Building Science, Grã-Bretanha, Pergamon Press, Vol. 10, p. 155-159.
- [67] SERVIMAC (1991). *Catálogo de prensa hidráulica*. Mecânica Industrial Servimac Ltda. Av. Adalberto Simão Nader, 860, Goiabeiras III, Vitória, Espírito Santo.
- [68] TAUIL, C.A. et alii (1990). *Manual técnico de alvenaria*. São Paulo, Associação Brasileira da Construção Industrializada / PROJETO.
- [69] TECMOR (1986). *Catálogo da prensa mecânica manual MRC-1 e da prensas hidráulicas HRC-3 e HRC-5*. Rua Ernesto Cardinali s/n, Distrito Industrial, São Carlos, São Paulo.

- [70] THOMAZ, C.A. (1981). *Solo-cimento na pavimentação rodoviária*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, 23p.
- [71] THOMAZ, C.A. (1984). *Paredes Monolíticas de Solo-cimento, Hospital Adriano Jorge, Manaus - 1950/1976*. 4.^a edição rev. São Paulo, ABCP, 44p.
- [72] THOMAZ, C.A. (1985). *Dosagem de solo-cimento em traços de um saco de cimento*. 2.^a ed., São Paulo, ABCP, 27p.
- [73] TUDO (1977). *Dicionário enciclopédico ilustrado*. Abril Cultural, São Paulo, Brasil.
- [74] UNITED NATIONS CENTRE FOR HUMAN SETTLEMENTS - HABITAT (1986). *Earth Construction Technology, Manual on design and construction technology. Earth Construction Technology, Manual on production of rammed earth, adobe and compressed soil blocks. Earth Construction Technology, Manual on basic principles of earth application. Earth Construction Technology, Manual on surface protection*. Nairobi, Kenia, 210p.
- [75] UNIVERSIDADE DO AMAZONAS (1979). *O uso do solo-cimento em habitações*. Rio de Janeiro, BNH/DIPEP, 60p.
- [76] VARGAS, M. (1978). *Introdução à Mecânica dos Solos*. Ed. McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [77] WESKOTT, J.K. (1984). *Can earth houses help to rebuild slums?* INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPEMENT OF LOW-COST AND ENERGY SAVING CONSTRUCTION MATERIALS AND APPLICATIONS. Ed. K. Ghavami, Rio de Janeiro, p. 135-146, jul./1984.
- [78] WOLLE, C.M. (1992). *Veias abertas na serra*. *Téchne*, Revista de Tecnologia da Construção. Editora Pini, São Paulo, Ano 1, N.º 1, nov./dez.

APÊNDICE I

Dados dos gráficos apresentados no capítulo IV - Estudo experimental de misturas solo-cimento.

Dados da curva de compactação (fig. IV.6)**Amostra: Petrus-II****Teor de cimento = 7 %****Pressão de compactação = 0,4 MN/m²****Peso específico seco máximo = 15,4 KN/m³****Umidade ótima = 25 %**

Umidade de moldagem (%)	Peso específico seco (KN/m ³)
16,55	13,90
16,55	13,90
17,11	13,90
19,01	14,00
19,24	14,20
19,26	14,20
19,81	14,20
20,11	14,80
20,75	14,90
22,19	15,40
22,86	15,30
22,90	15,30
23,49	15,60
23,98	15,50
24,41	15,40
26,34	15,20
26,40	15,40
26,70	15,10

Dados da curva de compactação (fig. IV.7)**Amostra: Petrus-III****Pressão de compactação = 0,4 MN/m²****Teor de cimento = 7 %****Peso específico seco máximo 16,6 KN/m³****Umidade ótima = 20,5 %**

Umidade de moldagem (%)	Peso específico seco (KN/m ³)
14,35	15,00
14,35	14,80
16,21	15,60
16,28	15,60
16,69	15,40
18,31	16,60
18,41	16,60
19,24	16,50
20,28	16,60
20,72	16,50
21,76	16,40
21,81	16,50
22,02	16,40
22,12	16,60

Dados da curva de compactação (fig. IV.8)**Amostra: Petrus-III****Pressão de compactação = 1,2 MN/m²****Teor de cimento = 7 %****Peso específico seco máximo 17 KN/m³****Umidade ótima = 19 %**

Umidade de moldagem (%)	Peso específico seco (KN/m ³)
11,46	15,30
11,59	15,20
11,97	15,00
12,02	15,70
13,55	15,70
13,72	15,90
13,77	15,60
13,95	15,70
15,46	16,30
15,54	16,20
15,74	16,10
15,89	16,70
17,24	17,20
17,25	16,80
17,86	16,80
18,00	17,50
19,15	17,10
20,03	17,00
20,09	17,00
20,15	16,60
21,30	16,10
21,52	17,00

Dados da curva de resistência (fig. IV.10)

Amostra: Petrus-II

Pressão de compactação = 0,4 MN/m²

Teor de cimento = 7 %

Resistência máxima = 0,9 MPa

Umidade de moldagem = 21,5 %

Umidade de moldagem (%)	Resistência à compressão (MPa)
16,55	0,40
17,11	0,60
19,24	0,50
19,26	0,80
19,81	1,00
20,75	0,90
22,19	1,10
22,86	1,00
23,49	0,80
23,98	0,70
26,34	0,50
26,40	0,50

Dados da curva de resistência (fig. IV.11)**Amostra: Petrus-III****Pressão de compactação = 0,4 MN/m²****Teor de cimento = 7 %****Resistência máxima = 1,6 MPa****Umidade de moldagem = 17,5 %**

Umidade de moldagem (%)	Resistência à compressão (MPa)
14,35	0,70
14,35	0,80
16,21	1,50
16,28	1,40
18,41	1,40
19,24	1,80
20,28	1,40
20,72	1,20
22,02	0,90
22,12	0,80

Dados da curva de resistência (fig. IV.12)**Amostra: Petrus-III****Pressão de compactação = 1,2 MN/m²****Teor de cimento = 7 %****Resistência máxima = 1,5 MPa****Umidade de moldagem = 18 %**

Umidade de moldagem (%)	Resistência à compressão (MPa)
11,46	0,70
11,59	0,70
11,97	0,40
13,55	1,10
13,72	1,30
13,77	0,90
15,46	1,40
15,54	1,40
15,74	1,50
17,24	1,90
17,25	1,60
17,86	1,30
19,15	1,60
20,09	1,50
20,15	1,20
20,31	1,10
20,46	1,20
21,52	1,50

Dados da curva de absorção (fig. IV.13)**Amostra: Petrus-II****Pressão de compactação = 0,4 MN/m²****Teor de cimento = 7 %****Resistência máxima = 23,3 MPa****Umidade de moldagem = 23 %**

Umidade de moldagem (%)	Absorção (%)
16,55	26,30
19,01	25,60
20,11	24,00
20,93	23,20
22,90	23,20
26,70	24,30

Dados da curva de absorção (fig. IV.14)**Amostra: Petrus-III****Pressão de compactação = 0,40 MN/m²****Teor de cimento = 7 %****Resistência máxima = 17,2 MPa****Umidade de moldagem = 19,5 %**

Umidade de moldagem (%)	Absorção (%)
14,35	21,30
16,69	18,60
18,30	17,10
21,80	17,56
21,81	18,93

Dados da curva de absorção (fig. IV.15)**Amostra: Petrus-III****Pressão de compactação = 1,2 MN/m²****Teor de cimento = 7 %****Resistência máxima = 13 %****Umidade de moldagem = 17,5 %**

Umidade de moldagem (%)	Absorção (%)
12,02	19,00
13,95	17,50
15,89	14,00
17,86	11,50
20,03	14,00
21,30	17,00