

EFEITO DOS ARGILÓ-MINERAIS DO SOLO NA MATÉRIA PRIMA DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS COM SOLO CAL

É preciso preservar e restaurar patrimônios arquitetônicos. Algumas arquiteturas de terra constituem obras-primas de inestimável valor. A área de restauração e preservação requer conhecimento de teorias e técnicas de restauro. Ainda, para fazer uma restauração é preciso que se faça, previamente, uma pesquisa histórica, o cadastramento, a concepção do projeto e seu desenvolvimento. Isso tudo exige a elaboração de um projeto integrado, com a associação de disciplinas como a arqueologia, a museologia e a engenharia. Os sistemas construtivos com solo-cal são parte importante da cultura brasileira. No entanto os solos tropicais foram formados por processos de intensidade diferente daquelas ocorridas na formação de solos europeus e norte-americanos. Têm, portanto, características diferentes, que causam efeitos significativos e diferenciados no sistema solo-cal. Para contribuir com o melhor entendimento na escolha do tipo de solo para as arquiteturas de terra, foram estudados, neste trabalho, solos tropicais estabilizados com cal, na proporção de zero a doze por cento. Ficou claro o efeito do tipo de solo para a qualidade do sistema solo-cal. Também ficou clara a necessidade de aprofundar o estudo do solo-cal, principalmente no que se refere ao preparo do traço e ao tempo e processo de cura.

Introdução

Existe hoje grande conscientização sobre a importância da restauração e preservação de patrimônios históricos. Contribuiu para isso a publicação das teorias desenvolvidas pelos grandes mestres do restauro. Essas teorias estão sistematizadas em documentos normativos, conhecidos como Cartas Patrimoniais.

No entanto, normas técnicas, embora seguidas pela maioria dos profissionais, não são de aplicação obrigatória. Os conceitos desenvolvidos pelos grandes mestres e a cartas patrimoniais que deles advieram às vezes ficam desprovidos de sentido, porque a restauração, como a arquitetura, exige revisão constante, em especial no que se refere aos critérios de intervenção e aos juízos de valor, produtos da cultura.

De qualquer forma, a restauração dos monumentos arquitetônicos tem, como princípio básico, a obrigação de eles serem apropriados pela sociedade. Isso significa que o monumento restaurado deve ser utilizado pela comunidade, nas mais variadas formas. Além disso, é preciso integrar, quando se faz um projeto de restauração, disciplinas como arqueologia, museologia, engenharia e outras. Conforme colocam Oliveira e Santiago (1993 p. 404), “Isto (a restauração) implica em atividade interdisciplinar, com também o é a atividade da conservação”.

É importante saber que constituem arquitetura de terra todos os edifícios construídos com terra crua, ou seja, com terra estabilizada por meio de simples compactação ou pelo uso de aditivos aglutinantes, naturais ou industrializados. Edifícios construídos com terra estabilizada através da temperatura (queima) – caso dos tijolos queimados ou blocos cerâmicos – não constituem arquiteturas de terra.

Em todo o mundo existem obras-primas de arquitetura de terra. No entanto, a tomada de consciência do valor que elas têm e da necessidade de preservá-las e

restaurá-las é recente. Por exemplo, só na última década a UNESCO classificou, como “Patrimônio Universal”, as cidades Shibam e Sanaa no Iêmen, inteiramente edificadas em terra crua, e o célebre palácio de Alhambra, em Granada.

Essa atitude não é apenas a procura de uma arquitetura saudosista, de querer voltar a um passado que não existe mais. No dizer de Montoro (1993 p. 7):

... Quando pensamos em terra, lembramos aquele chão do quintal onde brincávamos, quando crianças. Com os pés no chão e as mãos sujas misturávamos, com água, esse material macio, colorido e sem fim e criávamos, sem saber, referências na memória que fizeram com que o respeito pelo mais nobre dos materiais seja tão antigo e tão profundo a ponto de não poder, jamais, ser esquecido.

Em seu conhecido dicionário, Viollet-Le-Duc¹ diz, no verbete “restauro”, que edifícios góticos são “verdadeiros livros de pedra”. Estendendo a metáfora, pode-se dizer que monumentos arquitetônicos de terra crua são “livros de terra” que devem ser conhecidos, estudados e decifrados. Só assim se poderá desenvolver um sistema construtivo com esse material abundante, que permite infinitas possibilidades plásticas para a arquitetura contemporânea.

Apesar de enfrentar tanto descaso, a construção de terra tem vantagens de natureza econômica, social, energética e ecológica. Afinal de contas, a terra é o material mais barato e abundante que conhecemos, mesmo considerando apenas aquela com as características necessárias para o uso na construção civil. E, segundo Guillaud, para construir com terra é preciso preencher apenas duas condições: “... existir matéria prima em abundância e haver conhecimento completo das técnicas de construção”. (HOUBEN e GUILLAUD, 1994 p. 33)

De qualquer forma, as tecnologias de construção em terra crua são antigas e conhecidas em todo o mundo e estão consagradas no atual mercado da construção civil (Figura 1). Elas vêm sendo profundamente estudadas em centros de pesquisa da área, como o CRATerre². Como expõe Dethier (1981, p.7):

A arquitetura só ganha existência concreta quando dá forma apropriada aos materiais de construção, sejam eles naturais ou transformados. Dentre os materiais naturais, o meio ambiente propicia potencialidades diversas: pedra, madeira e terra crua. Até ao século XX, a terra foi, em muitos países, um dos materiais de construção mais utilizados.



Figura 1: Fundação em solo cimento

A terra, como matéria prima, não tem limitações de aplicação e oferece vantagens comprovadas em relação a outros materiais. Ainda, as técnicas de construção com terra representam enorme potencial diante da crise mundial da habitação e dos desafios do impasse energético deste milênio. E mais: a terra pode ser usada como material de acabamento e decoração, como rebocos e tintas em tons cor de terra. Eles aparecem em todos os sistemas e em todas as regiões.

O solo é, portanto, a principal matéria prima para qualquer sistema construtivo em terra crua. No caso particular da taipa de pilão ou adobe, o solo – desde que tenha algumas características físicas próprias – é o único material usado. Na maioria das vezes, no entanto, acrescenta-se ao solo fibras vegetais, aglutinantes naturais ou industrializados, como a cal e o cimento, para estabilização. Mesmo nesses casos, o solo representa de oitenta a noventa e dois por cento (dependendo de suas características) do peso da estrutura construída.

O processo construtivo, no mundo contemporâneo, é, porém, industrializado. Mas é preciso entender processo construtivo industrializado como todo método de construção econômico, modular, com controle de qualidade, que respeite todos os parâmetros de uma construção bioclimática e preserve o ecossistema, tanto no canteiro de obras quanto no canteiro de produção dos componentes. Não mais podem ser admitidos processos industriais que causem “danos ao meio-ambiente como também à saúde dos operários”. (SILVEIRA, 1995, p.182).

Ainda, o homem contemporâneo tem necessidades e ambições diferenciadas, que variam em função da cultura. O arquiteto precisa, pois, estudar as características das culturas construtivas de cada região, para desenvolver sistemas construtivos que dêem ao usuário o ambiente que ele almeja, respeitando a grande evolução social e tecnológica do nosso tempo.

Metodologia

Escolha dos tipos de solos

A EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) publicou, em 1999, o novo “Sistema Brasileiro de Classificação de Solos”. No presente trabalho foram estudados quatro tipos de solo, classificados, segundo a EMBRAPA como:

1. LVA (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO distrófico típico);
2. PVA (ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico);
3. LV (LATOSSOLO VERMELHO ACRIFÉRRICO);
4. VG (VERTISSOLO HIDROMÓRFICO).

De início, foram coletadas amostras de solo em seus locais de origem. Depois, foram feitas análises de cor, granulometria e composição mineralógica do solo contido nas amostras, para verificar se correspondiam à classificação feita pela EMBRAPA. Tais análises, que comprovaram serem as amostras provenientes dos solos escolhidos, foram feitas nos laboratórios do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP.

A identificação e a quantificação de minerais foi feita, neste trabalho, por meio de ensaios de difração de raios X, de acordo com a metodologia estabelecida por Camargo et al (1986, p.43), pois a argila contém material cristalino mineral que produz diferentes padrões de difração dos raios X.

Ensaio de compactação

Para a análise das características físicas da mistura de solo com cal e água, foi necessário moldar corpos de prova. Primeiro, os solos foram secos ao ar e destorroados em um destorroador mecânico. Depois, foram misturados com a quantidade de areia necessária para a correção da granulometria e peneirados em peneira de 4,8mm.

Foi, então, adicionada cal ao solo, nas seguintes porcentagens: 0,0%; 4,0%; 8,0% e 12,0%. As quantidades de cal que deveriam ser adicionadas ao solo para atingir as porcentagens estabelecidas foram calculadas em função do peso seco do solo. Esse procedimento não é adotado nos canteiros de obras, mas foi utilizado neste trabalho para que as porcentagens de cal na mistura fossem controladas com precisão. A porcentagem ótima de cal, para cada tipo de solo estudado, conforme indicam a prática e a literatura da área, deve estar no intervalo estudado.

Alguns autores, principalmente americanos e franceses, indicam, para solos muito plásticos e para solos de difícil trabalhabilidade como os estudados no presente trabalho, um período de cura antes da compactação. Essa cura prévia, comumente usada nas sub-bases de estradas, melhora algumas características do solo, mas nem sempre aumenta a capacidade de carga do solo estabilizado. Após a adição de água, foi dado um período de descanso, de vinte e quatro horas. Essa cura prévia obedeceu à recomendação dos manuais do DNER, que seguem, em sua maior parte, recomendações americanas e européias. A justificativa dessa recomendação é a de que é difícil homogeneizar a umidade na mistura de solo com cal.

Os valores da massa específica e os valores da umidade ótima foram determinados de acordo com as normas previstas na NBR 7182, através do ensaio de compactação. Foi feito um ensaio de compactação para cada tipo de solo coletado e para cada percentual de cal, porque a incorporação de cal no solo achata as curvas de compactação, pelo fato de diminuir o valor da massa específica e aumentar o valor da umidade ótima. As curvas de Proctor foram traçadas manualmente, sempre com cinco pontos, pois foram adicionadas cinco diferentes quantidades de água.

Foram, então, moldados os corpos de prova. As amostras de solo foram compactadas na densidade máxima com energia normal definida através do ensaio Proctor. Foram feitos ensaios Proctor para cada um dos quatro tipos de solo estudado e para cada uma das quatro porcentagens de cal utilizadas. Todo este trabalho foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Ensaio de expansão, retração e compressão.

Para a realização dos ensaios de expansão e retração, foram moldados 48 corpos de prova mini-CBR (Figura 2), com 50mm de diâmetro por 50mm de altura. Para

os ensaios de compressão simples, foram montados 48 corpos de prova no cilindro de Proctor, com 100mm de diâmetro por 127mm de altura. Então, no total, foram montados 96 corpos de prova.

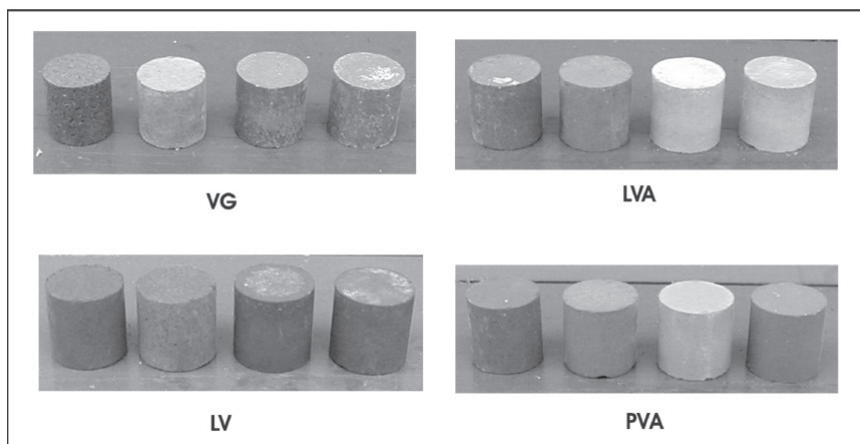


Figura 2: Mini CBR dos solos analisados

Todos os corpos de prova foram moldados na massa específica, obtida por meio do cálculo da massa que deveria ser compactada nos cilindros, porque se conhecia tanto a massa específica de cada solo-cal como o volume dos cilindros e as umidades ótimas de compactação. Atingiram-se, assim, os 100% do grau de compactação. Todos os corpos de prova foram moldados com a mistura de solo e cal, previamente curada por 24 horas para homogeneização da umidade.

Para evitar que ocorressem pontos fracos nos corpos de prova, foram usados soquetes com os mesmos diâmetros dos cilindros, que tinham um dispositivo de controle de altura de queda. Os mini-CBR foram moldados em uma única camada. Os corpos de prova feitos no cilindro de Proctor foram moldados em três camadas de mesma massa e mesma espessura, controlada por marcas na guia do soquete.

Como não seria possível desmoldar os corpos de prova dos cilindros de Proctor devido a grande adesão dos diversos tipos de solo-cal ensaiados, foi feita uma adaptação: o cilindro de Proctor foi cortado ao meio e, em ambas as partes, foram soldadas duas porcas para que se pudessem unir as metades com parafusos (Figura 3). Os corpos de prova foram extraídos depois de moldados, mas no mesmo dia da compactação.



Figura 3: Cilindro de proctor adaptado

Para cada um dos quatro tipos de solo estudados e para cada uma das quatro diferentes porcentagens de cal usadas para estabilização, foram feitos três tipos de ensaios:

- a) ensaio de expansão de solos compactados;
- b) ensaio de retração ou determinação da contração;
- c) determinação da resistência à compressão.

Depois de moldados no mini-CBR na umidade ótima de compactação e ainda dentro do cilindro, os corpos de prova foram submersos em água (Figura 3.7), seguindo as normas determinadas pelo DNER para *Ensaio de mini-cor e expansão de solos compactados*. Com os valores obtidos pelo método, na condição “com embebição”, foi calculada a expansão dos corpos de prova por meio da fórmula:

$$E = \frac{Li - Lf}{Ai} \times 100$$

onde E é a expansão axial expressa em porcentagem; Li é a leitura inicial do extensômetro; Lf é a leitura final do extensômetro; Ai é a altura inicial do corpo de prova.

Para determinar a retração dos corpos de prova, os corpos de prova, depois de moldados no mini-CBR, foram extraídos e, ainda na umidade ótima de compactação, foram submetidos aos ensaios (Figura 3.8), de acordo com as normas descritas pelo DNER na *Determinação da contração de solos compactados em equipamento miniatura*. O cálculo da retração foi feito através da fórmula:

$$C = \frac{Li - Lf}{Ai} \times 100$$

onde C é a retração expressa em porcentagem; Li é a leitura inicial do extensômetro; Lf é a leitura final do extensômetro; Ai é a altura inicial do corpo de prova.

Para cada porcentagem de cal e para cada tipo de solo, foram moldados três corpos de prova, para proceder-se à determinação da resistência à compressão simples. O tempo de cura foi de 28 dias, sendo os sete primeiros dias em câmara úmida e os restantes à sombra, o que permitiu estabelecer comparações. Não havia a intenção de atingir os resultados máximos do sistema solo-cal e estabelecer a porcentagem ótima de cal para a estabilização de cada tipo de solo.

Os ensaios foram realizados seguindo as determinações descritas na NBR12770. Usou-se uma prensa eletro-hidráulica Wykeham-Farrance, com capacidade de cinco toneladas com anel 5170 de 1500kg com constante 0,8360kg/divisão com relógio comparador de 0,002cm.

Resultados

A análise da composição mineralógica dos solos, por meio dos ensaios de difração de raios X, apresentou os resultados que estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Interpretação da análise da composição mineralógica

Mineralogia	LVA	PVA	LV	VG
Caulinita	+++++	+++++	++++	+++++
Montmorilonita	-	-	-	++++
Vermiculita	+	++++	-	-
Mica	+	+++	-	-
Gibbsita	++	-	+++	-
Esmectita	-	-	-	-
VHE	+	-	+	-

No LVA, predominam a caulinita e a gibbsita, e há baixos teores de mica e VHE; no PVA, predomina a caulinita, mas também há alta quantidade de VHE e de mica; no LV, predomina a caulinita, mas também há grande quantidade de gibbsita e alguma quantidade de VHE com hidróxidos entre camadas; no VG, ocorre predomínio da caulinita com grande quantidade de montmorilonita.

Os ensaios de expansão conduziram aos valores apresentados na Tabela 2 e em gráfico de linhas na Figura 4. Em média, o VG tem grande expansão, mas a Figura 4 mostra que a expansão do VG diminui, com a adição cal. Não se registrou expansão nos outros tipos de solo.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de expansão em percentagem

Percentual de cal	LVA	PVA	LV	VG
0	0,040	0,020	0,040	3,800
4	0,000	-	0,000	0,900
8	0,020	0,000	0,000	0,040
12	0,000	0,020	0,040	0,060
Média	0,015	0,013	0,020	1,200

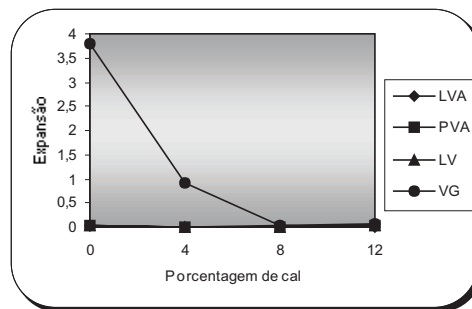


Figura 4 - Expansão dos solos, em percentagem, em função do percentual de cal.

Os resultados dos ensaios de retração para os corpos de prova de cada tipo de solo estudado e para cada percentual de cal utilizado estão na Tabela 3 e em gráfico de linhas na Figura 5. É fácil ver que o VG tem, em média, maior retração. O PVA também tem, em média, grande retração. No entanto, o LVA e o LV têm, relativamente, pouca retração. De qualquer forma, para os quatro tipos de solo estudados, a retração diminui acentuadamente com o acréscimo de 4% de cal, embora depois tenda à estabilização, conforme mostra a Figura 5.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de retração, em porcentagem.

Percentual de cal	LVA	PVA	LV	VG
0	1,3	2,08	0,8	3,7
4	0,4	0,9	0,2	0,9
8	0,5	0,7	0,4	2,0 ¹
12	0,5	0,76	0,14	1,4
Média	0,68	1,11	0,39	2,00

Nota: 1. O valor é discrepante. Talvez possa ser explicado pela variação aleatória inerente à variável, mas também pode ser erro de ensaio.

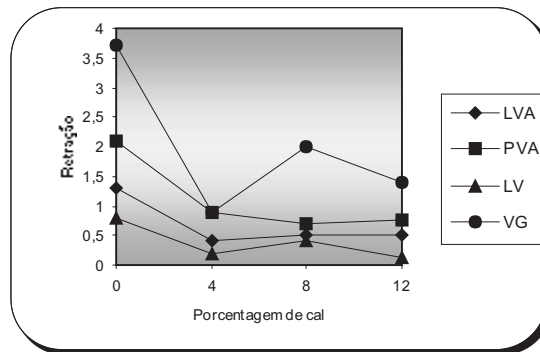


Figura 5 - Retração dos solos, em porcentagem, em função do percentual de cal.

Os valores de compressão simples medidos em kgf/cm^2 nos vários corpos de prova submetidos aos ensaios, com as respectivas médias, estão na Tabela 4. As médias de tensão estão apresentadas na Figura 6. É fácil ver que o PVA tem, em média, maior resistência à compressão e o LVA a menor. No entanto, sem adição de cal o VG tem a maior resistência à compressão e o LV e o PVA respondem bem à adição de 4% de cal. No caso deste último, a resistência continua aumentando com o aumento de cal.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de compressão em kgf/cm²

Percentual de cal	LVA	PVA	LV	VG
6,05	7,28	1,16	8,41	
0%	–	–	4,49	8,12
5,57	1,55	9,69	10,01	
Média	5,81	4,42	5,11	8,85
4%	2,57	9,12	10,14	3,83 ¹
2,24	5,54	10,08	3,48 ¹	
2,12	6,61	–	–	
Média	2,31	7,09	10,11	3,66
6,92	12,53	5,16	7,96	
8%	4,72	16,75	5,97	7,89
4,48	16,72	7,99	7,12	
Média	5,37	15,33	6,37	7,66
3,63	14,35	5,49	7,70	
12%	4,09	13,30	6,37	7,54
4,26	–	5,85	13,62	
Média	3,99	13,83	5,90	9,62
Média geral	4,37	10,17	6,81	7,45

Nota: 1. Estes valores são discrepantes. Podem ser explicados tanto por variação aleatória como por erro de ensaio.

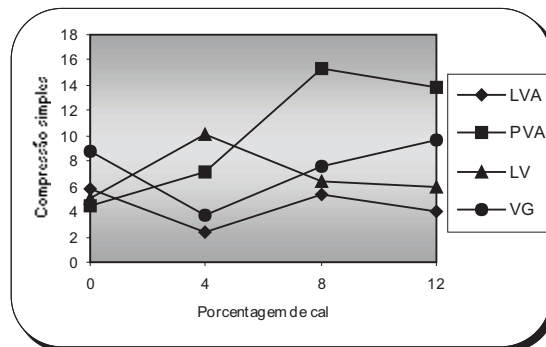


Figura 6 - Resultados dos ensaios de compressão simples

Conclusões

1. Solos com predominâncias diferentes de argilo-minerais mostram características diferentes em diversos ensaios. Portanto, argilo-minerais têm influência sobre o sistema solo-cal.
2. A metodologia adotada neste trabalho não conseguiu captar pequenas variações de expansão, que podem ter ocorrido nos solos LVA, PVA, e LV. De qualquer forma, observou-se que a expansão, no caso do VG natural, que é grande, diminui acentuadamente com a adição de cal.
3. A retração depende do tipo de solo e da quantidade de cal adicionada. A contração é maior no VG, seguido do PVA. Latossolos têm pouca contração. A contração diminui acentuadamente com o acréscimo de 4% de cal, mas depois tende à estabilização.
4. A metodologia utilizada para fazer a mistura deve ser questionada, pois observou-se que o uso de uma pré cura não parece conveniente para a arquitetura de terra, porque a posterior compactação da mistura provoca perdas das ligações solo-cal.
5. A resistência à compressão simples é, em média, maior no PVA e menor no LVA. A resistência à compressão simples parece não aumentar com a adição de cal, a não ser para o PVA. Portanto, a recomendação é a de que seja feita a compactação logo após o preparo da mistura.
6. Os ensaios de compressão simples mostraram que os solos naturais têm alta variabilidade, em função de sua composição. Os corpos de prova foram, porém, foram poucos para uma afirmativa final. Dada a importância de se estabelecerem parâmetros para a construção, e principalmente para o restauro das arquiteturas de terra, faz necessário um número maior de ensaios, com maior número de repetições.
7. Este trabalho mostrou que existem diferenças significativas entre os diferentes tipos de solo, dependendo de sua composição mineralógica. Fica claro que, entre os solos estudados, o PVA é o mais recomendado para a arquitetura de terra. De modo geral, os latossolos podem ser utilizados, mas devem ser evitados os solos expansivos, que contenham alta quantidade de montmorilonita, como é o caso do VG.
8. A adição de cal é benéfica, sobretudo para melhorar a trabalhabilidade e reduzir a contração e expansão dos solos argilosos, evitando assim, problemas de fissuração nas estruturas de terra.

Márcio Hoffmann é arquiteto, pesquisador associado do Centro de Memória da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - CMU e pesquisador do grupo Proterra do HABITED, programa de desenvolvimento do CYTED. Este artigo é baseado na sua dissertação de mestrado, defendida em 2002 no PPG-AU/FAUFBA, sob a orientação do prof. Mario Mendonça.

Notas

- ¹ O arquiteto francês Eugène Emmanuel VIOLLET-LE-DUC é considerado o pioneiro na elaboração das teorias sobre a preservação e restauração de monumentos divulgados a partir do século XIX.
- ² Centre International de Recherche et d'Application pour la Construction en Terre, sediado em Grenoble, França.

Referências bibliográficas

A.A.V.V. 7a. Conferencia Internacional sobre a Conservação de Arquitetura de Terra – Terra 93. Anais... Silves, Portugal, 24 a 29 de Outubro de 1993. Portugal: DGEMN, 1993.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORJE, J. A. ; VALADARES, J. M. A. S. *Métodos de análise química, mineralógica e físicas de solos do Instituto Agrônomo de Campinas*. Campinas. 1986. 94p.

DETHIER, Jean. *Des architectures de terre, une tradition millenaire*. Paris: Centre Ponpidou, 1981.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisas de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro, 1999.

MONTORO, Paulo. ESTON, David. *Como Construir Paredes de Taipa*. São Paulo: ILAM, 1994.

NEVES, Célia Maria Martins. Inovações tecnológicas em construção com terra na Ibero-América. In: NUTAU – *Arquitetura de Terra*: LGP-FAUUSP, 1995. p. 49-60.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. *Tecnologia da Conservação e da Restauração*. Roteiros de Estudos. Edição bilíngüe português/ espanhol. Salvador: Mestrado em Arquitetura e Urbanismo da UFBA/ PNUD UNESCO, 1995, 310p.

