



SOLO-CIMENTO E ADOBE: COMPOSIÇÃO E DESEMPENHO

Samantha Orui

Coordenadoria de Ensino Tecnológico - Prédio 56
Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT)
Av. Prof. Almeida Prado 532 Cidade Universitária CEP 05508-901 São Paulo, Brasil
Tel.: +55 11 3767 4068 | +55 11 3767 4226
E-mail: samanthaorui@gmail.com

Palavras chave: solo-cimento, adobe, normas técnicas, composição, desempenho.

Resumo

Estratégias de mitigação e adaptação, as mudanças climáticas assumem como premissa a urgência em reavaliar o ambiente construído sob a ótica de seu impacto na biosfera e estimulam iniciativas voltadas à mensuração do impacto ambiental dos materiais construtivos e ao uso de sistemas de avaliação da sustentabilidade da arquitetura. Shuzo Murakami e Tashi Haru Ikaga (2008) avaliaram nove tipologias residenciais, utilizando a metodologia *CASBEE for Home (Detached House)*. O relatório *Evaluating environmental performance of vernacular architecture through CASBEE* evidencia que a arquitetura vernacular concatenou o ótimo desempenho térmico da terra com os benefícios do desenho solar passivo e, assim, durante séculos, respondeu exigências de conforto ambiental, nas mais variadas regiões do planeta.

A partir do início do século XX, estudos sobre a estabilização química da terra por meio da adição de materiais industrializados começaram a ser realizados. Verificou-se que as técnicas construtivas que melhor responderam a estabilização química por meio da adição de cimento foram as técnicas de terra compactada, tanto em forma de paredes monolíticas como em forma de tijolos maciços e blocos vazados. Contudo, a constatação de que o cimento é um material não reciclável e que seu uso representa 5% das emissões dos gases do efeito estufa (*World Business Council For Sustainable Development*, 2002) faz ressurgir uma série de outras novas abordagens sobre a necessidade ou não, da estabilização química da terra.

Este artigo tem como objetivo apresentar um breve panorama do que vem sendo divulgado sobre arquitetura de terra, tendo como recorte a prática da estabilização química por meio da adição de cimento Portland. Para sua elaboração, consultou-se a *Standard guide for design of earthen wall building systems* (ASTM-E2392M-10, 2010), a *norma técnica* [peruana] *de edificación E.080 Adobe* (NTE E.080) e as normas brasileiras sobre solo-cimento.

1. INTRODUÇÃO

Estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas assumem como premissa a urgência em reavaliar o ambiente construído sob a ótica de seu impacto na biosfera e estimulam iniciativas voltadas à mensuração do impacto ambiental dos materiais construtivos (ISO 14040) e ao uso de sistemas de avaliação da sustentabilidade da arquitetura, como CASBEE, BREEAM, LEED, entre outros.

Os relatos de que o ciclo de vida do cimento chega a representar 5% das emissões dos gases do efeito estufa (*The Cement Sustainability Initiative our agenda for action*, 2002, p. 20) e que, em alguns países, entre 25% e 45% da energia consumida nas grandes cidades é utilizada para suprir o baixo desempenho térmico de residências (*United Nation Environmental Programme* apud Lax, 2010), desperta atenção.

No momento em que o Governo Federal estimula a produção habitacional através do Programa Minha Casa Minha Vida (figura 1) e que estão em vigor dois sistemas brasileiros de avaliação de sustentabilidade da arquitetura, a Certificação de Construção Sustentável – Processo AQUA (Fundação Vanzolini) e o Selo Casa Azul (Caixa Econômica Federal), torna-se relevante verificar as vantagens e desvantagens da construção com terra.

Ainda mais porque, além das vantagens ambientais – assume-se a premissa de que o uso da terra como material construtivo é uma estratégia para a mitigação das mudanças climáticas – suas vantagens socioeconômicas já foram verificadas e atestadas. Por exemplo, na Ilha Mayotte (figura 2), departamento francês entre o Oceano Índico e o Canal de Moçambique, no Arquipélago dos Comores, ao longo de 20 anos, foram erguidas cerca de 17.000 casas: 60% do total construído foi realizado com blocos de terra comprimida estabilizada com cimento (BTC). O controle e monitoramento dos dados permitiu avaliar o desempenho econômico do projeto e concluir que a produção de BTC representou 75% do custo de produção de blocos de concreto (CRATerre apud Auroville). O projeto da Ilha Mayotte é um caso de sucesso envolvendo solo-cimento, desenvolvimento local e desempenho econômico de empreendimento habitacionais.



Figura 1. Construções em bloco cerâmico, no Paraná (01/12) e no Piauí (12/11). Fonte: Divulgação do Programa [brasileiro] de Aceleração do Crescimento (PAC) pelo Governo Federal.



Figura 2. Construções em bloco de terra comprimida estabilizada com cimento, na Ilha Mayotte. Fonte: CRATerre apud Auroville.

Sabe-se que, em geral, a avaliação da sustentabilidade da arquitetura desestimula: o uso excessivo de materiais não recicláveis e a geração de grande quantidade de resíduos sólidos; a exploração irracional dos recursos naturais e a elevada emissão de gases do efeito estufa; e o uso indiscriminado de substâncias que prejudicam a saúde e degradam o meio ambiente. As vantagens da terra estão relacionadas exatamente ao que os sistemas de avaliação de sustentabilidade da arquitetura incentivam: seu ótimo desempenho térmico favorece, inclusive, a eficiência energética das edificações.

Tal afirmação provém de diversas fontes dentre as quais se cita apenas uma: em 2008, Shuzo Murakami e Tashiharu Ikaga avaliaram nove tipologias residenciais, utilizando a metodologia CASBEE for Home (Detached House). O relatório “Evaluating Environmental Performance of Vernacular Architecture through CASBEE” evidencia a baixa performance ambiental da arquitetura moderna e confirma o ótimo desempenho térmico de alguns dos mais representativos exemplares da arquitetura vernacular (Murakami; Ikaga, 2008).

Este artigo tem como objetivo apresentar um breve panorama do que vem sendo divulgado sobre arquitetura de terra, tendo como recorte a prática da estabilização química por meio

da adição de cimento Portland. Para sua elaboração, consultou-se a Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems (ASTM-E2392M-10, 2010), a Norma Técnica [peruana] de Edificación E.080 Adobe (NTE E.080) e as normas brasileiras sobre solo-cimento.

2. O USO DA TERRA COMO MATERIAL CONSTRUTIVO

O uso da terra como material construtivo, assim como o uso do bambu, da madeira e da pedra, faz parte da cultura construtiva de povos das mais variadas regiões do planeta. Ao contrário do que se imagina, as construções de pedra não são as únicas que resistiram as intempéries e chegaram até o século XXI: as casas em Taos Pueblo (figura 3), no Novo México (EUA), foram construídas em adobe¹ há mais de 1000 anos e são, até hoje, habitadas; e na China, data dos séculos XV a XX, construções comunais em taipa de pilão, também, até hoje habitadas (figura 4).



Figura 3. Construções em adobe, no Novo México (EUA). Fonte: First Earth.

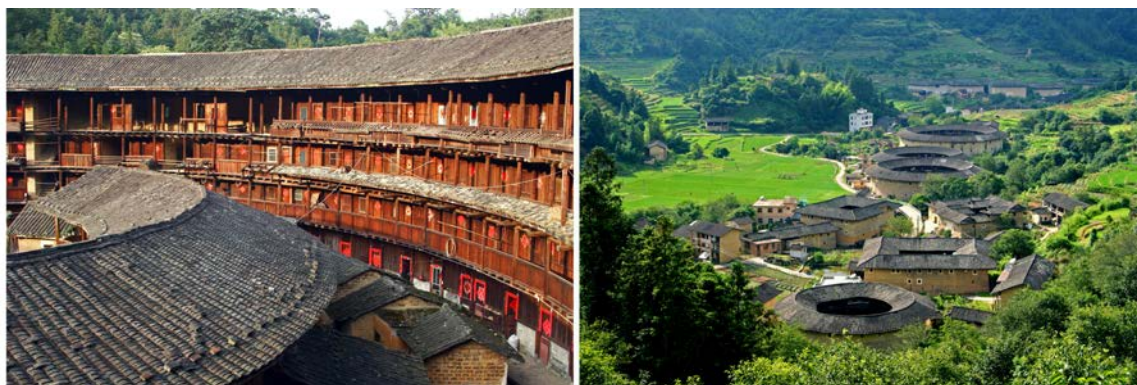


Figura 4. Construções em taipa de pilão, na China. Fonte: © UNESCO

A terra é o material construtivo mais abundante que se encontra na natureza. Seu uso vem sendo aprimorado tanto pelo saber empírico, passado de geração a geração, por meio da arquitetura vernacular, quanto pela pesquisa científica, e diversos ensaios vêm sendo realizados com o intuito de subsidiar a elaboração de normas técnicas e regulamentar seu uso.

Chama a atenção o fato de que o Peru é o único país latino-americano que possui uma norma específica para a construção de casas de adobe (E-080, 2000) e que essa norma é citada na Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems (ASTM-E2392M-10, 2010). De acordo com Schroeder (2011), outros países que também regulamentaram o uso da terra como material construtivo são: Nova Zelândia, França, Índia, Nigéria, Sri Lanka, Zimbábue, Austrália, Espanha, Suíça e Alemanha. Além destes, a ASTM E2392M também cita: China, Equador e EUA (Califórnia e Novo México). O Brasil não é citado, porque a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ao abordar a terra como material

construtivo, assume como premissa que o cimento faz parte da mistura, a qual denomina solo-cimento.

2.1 Aspectos gerais

As técnicas construtivas em terra crua podem ser divididas em três grandes grupos: terra trabalhada no local e utilizada de forma monolítica (ex.: *cob* e taipa de pilão), terra em forma de alvenaria (ex.: adobe e bloco de terra comprimida) e terra como preenchimento de uma estrutura (ex.: pau-a-pique e *bahareque*). Para cada grupo, há uma consistência e uma plasticidade ideal, de acordo com exigências relacionadas à trabalhabilidade do sistema construtivo.

Schroeder (2011) sugere que as normas e regulamentações vigentes sejam divididas, também, em três grandes grupos temáticos, de acordo com seus conteúdos: classificação do solo, o uso da terra como material construtivo e sistemas construtivos em terra crua. As normas brasileiras versam sobre solo-cimento; a NTE E.080 versa sobre blocos de terra secos ao sol (adobe); e a ASTM E2392M não versa sobre nenhum sistema construtivo em específico.

O solo é resultante da ação conjunta de agentes intempéricos sobre as rochas e é constituído por partículas minerais e orgânicas. Sua plasticidade e coesão são influenciadas diretamente pelos teores de areia, silte e argila. A argila é a partícula mineral que atua como aglomerante e o silte e a areia, como agregados. Os argilominerais² mais comuns são: caulinita, illita e esmectitas. A montomorilonita (esmectitas) em contato com a água apresenta expansão significativa, por isso, ao secar, retrai até 25%, sendo isso que torna o solo composto predominantemente por montomorilonita, o menos indicado para a construção.

Carvalho (2007) alerta para o fato de que, diferente dos solos de regiões temperadas, os solos tropicais estão sujeitos a intemperismo contínuo e severo. Segundo o pesquisador, *em um manto de intemperismo, um centímetro de solo não é jamais exatamente igual ao seguinte, apesar de poder apresentar a mesma cor e aparentar a mesma textura* (Carvalho, 2007, p. 527). Por isso, classificações baseadas em propriedades físicas, tais como cor, textura e plasticidade são insuficientes para se ter uma ideia mais precisa do comportamento hidráulico e mecânico dos solos tropicais.

De todo modo, aceita-se a hipótese de que existem diversos testes que podem ser realizados in loco e sem o uso de equipamentos sofisticados para descobrir algumas das principais características do solo disponível para a construção. As principais características verificáveis são: granulometria, plasticidade, coesão e compactabilidade. Os testes prescritos são: teste de adesão, teste de rigidez, teste de retenção de água, teste de consistência, teste de coesão e teste de retração.

A caracterização química e mineralógica sugerida por Carvalho (2007) – que complementa a caracterização baseada em propriedades físicas – é possível por meio de equipamentos sofisticados (difração de raio x e microscopia eletrônica de varredura) e seu custo torna-a pouco viável para obras de pequeno porte.

Estabilizar a terra é compreender o teor das partículas minerais e suas características. Os principais objetivos dos métodos de estabilização da terra são: aumentar a resistência mecânica, aumentar a coesão e a resistência à erosão e reduzir a porosidade e as variações de volume. Há três tipos de estabilização: mecânica, física e química. A adição de fibras vegetais é um exemplo de estabilização mecânica. A palha, por exemplo, age como ponte de transferência das tensões pelas fissuras e, por isso, melhora o comportamento mecânico da terra: ao reduzir a velocidade de propagação das fissuras, aumenta a capacidade de resistência pós-fissuração do material e diminui a retração por secagem, seguindo o mesmo princípio do uso de fibras em concretos. A estabilização física pode ser descrita como a alteração da terra através da mistura controlada de partículas de diferentes composições e granulometrias, ou seja, com o que a engenharia denomina

“empacotamento”. Já a estabilização química, é a ação que busca modificar as propriedades da terra por meio de reações químicas, tal como faz o cimento, o cal e o betume.

3. TERRA ESTABILIZADA COM CIMENTO

A terra pode ser estabilizada com diversos materiais, tanto naturais como processados. Dentre os materiais processados, os mais conhecidos são o cal³ e o cimento, embora existam estudos sobre o uso do gesso e do betume.

Verificou-se que a ABNT considera que o solo-cimento é a matéria prima de técnicas construtivas que pressupõem a compactação da terra. A compactação influencia na densidade do material e este, por sua vez, influencia seu desempenho mecânico e seu desempenho térmico.

Barbosa e Ghavami (2007, p. 1532) explicam que *o objetivo da prensagem da terra é aproximar os grãos, tentando reduzir os poros do material, o que lhe dará maior resistência mecânica*. Segundo Ferreira (2003, p. 1-3) *todo solo coesivo tem a propriedade de adensar-se, mediante compactação, até um máximo conseguido pela acomodação ou entrelaçamento das partículas do solo, sob condições de alta pressão e ótimo teor de umidade*.

Para todas as outras técnicas construtivas, seu uso não convém: a adição de cimento altera a trabalhabilidade da terra, tornando-a pouco plástica, o que compromete a realização de entramados (pau-a-pique, *bahareque*) e das paredes de cob. Além da trabalhabilidade, existe outra justificativa: o cimento ignora a capacidade aglomerante da argila e altera sua permeabilidade ao vapor de água (ASTM-E2392M-10), que é a característica da terra relacionada diretamente a qualidade de ar interno (Minke, 2010). Sem esquecer-se do fato de que, ao ser adicionado a terra, o cimento faz com que esta se torne, definitivamente, imprópria para a agricultura e deixe de ser considerada um material de construção 100% reciclável (ASTM-E2392M-10).

Do ponto de vista da sustentabilidade, pode-se dizer que o aumento da quantidade de cimento adicionado à terra resulta em um aumento linear do impacto ambiental, no caso das paredes monolíticas de solo-cimento (Lax, 2010, p. 41).

Sobre a adição do cimento à terra, assim posiciona-se a ASTM no item 6.3.1:

Historicamente, construções com vários andares foram feitas com terra crua não estabilizada e continuam em pé (ex.: Taos, Shibam), demonstrando que o uso da terra crua não estabilizada com materiais modernos pode ser muito mais durável do que se supõe. Com o objetivo de diminuir o custo econômico e diminuir a poluição gerada com os resíduos de construção, o uso do cimento, do cal e do gesso só deve ser realizado quando outras soluções para aumentar a resistência e a durabilidade não forem encontradas (ASTM-E2392M-10).

3.1 Reações químicas

Não é objetivo deste artigo adentrar no universo da química, contudo julgou-se importante transcrever algumas explicações. Silva (1988, p. 659) afirma que:

(...) o processo de estabilização do solo por um aglomerante hidráulico é um fenômeno ainda não totalmente conhecido, fazendo-se apenas algumas hipóteses. A explicação mais aceita é de que, pela hidratação do cimento, há uma mudança da carga elétrica no meio argiloso, através da troca de cátions, havendo uma atração entre as partículas, fazendo com que se reúnam, formando partículas maiores, determinando, desta forma, a perda de plasticidade da mistura. O produto final se caracteriza pela formação de cadeiras hexagonais que isolam, em seu interior, partículas que não chegam a ser aglutinadas, impedindo sua dilatação pela impermeabilidade.

Ferreira (2003, p. 14) explica que:

(...) ao se formularem quaisquer mecanismos de reação do solo-cimento provocando agregação, Chadda (1970) observou que o efeito do cátion livre, liberado durante o processo de endurecimento do cimento, deve ser levado em conta. Para este autor, uma das mais importantes características do cimento é que suas partículas comportam-se como eletricamente carregadas, aumentando a condutibilidade elétrica da mistura de solo-cimento; a presença de cargas elétricas nas partículas de cimento provoca uma atração entre o cimento e as partículas de argila, produzindo agregação. A aglomeração de partículas de argila é, posteriormente, incrementada pela reação com o cálcio livre liberado durante o processo de hidratação do cimento.

Neste sentido, Carvalho, (2007, p. 532) coloca que:

(...) o pH é particularmente importante na estabilização química do solo. Assim, por exemplo, na estabilização com cal ou cimento, se o solo encontra-se abaixo do correspondente ao ponto isoelétrico, o solo é desestruturado quando este é atingido, podendo, eventualmente, voltar a se agregar a posteriori.

3.2 Desempenho mecânico: resistência à compressão

Sabe-se que a desvantagem do uso da terra como material construtivo está relacionada ao fato de que esta não é padronizável. Para zelar pelo desempenho estrutural das construções em solo-cimento, a ABNT determina valores mínimos de resistência à compressão, tanto de tijolos maciços (NBR 8491:1984) e blocos vazados (NBR 10834:1994), quanto de paredes monolíticas de solo-cimento (NBR 13553:1996)⁴. O mesmo faz a NTE E0.80, para adobes.

Com o intuito de verificar a viabilidade técnica de se produzir tijolos maciços e blocos vazados de solo-cimento, em diferentes regiões do Brasil, optou-se por comparar o resultado de ensaios realizados no Estado da Paraíba (região nordeste), com o resultado de ensaios realizados no Estado de São Paulo (região sudeste). Uma vez que o ótimo desempenho de construções em adobe vem sendo comprovado pela manutenção e uso de habitações centenárias, decidiu-se também comparar o resultado de ensaios realizados no Estado da Paraíba, com o resultado de ensaios realizados em Minas Gerais (sudeste).

Os ensaios consultados foram realizados por Gonçalves (2005), com o apoio do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) do Centro Tecnológico da Universidade Federal da Paraíba (CT/TDPB); pelo Centro Tecnológico de Controle de Qualidade “L.A. Falcão Bauer Ltda.”, a pedido de um fabricante de blocos vazados de solo-cimento do Estado de São Paulo; e, por Corrêa (2003), com o apoio da Universidade Federal de Lavras, em Minas Gerais.

3.2.1 Blocos de terra comprimida (BTC)

Em literatura, encontrou-se informações sobre ensaios realizados por Olarde e Guzman (1993) em que BTCs alcançaram resistência média à compressão igual a 7,25 MPa. Chama a atenção o fato de que Gonçalves (2005), adicionando o mesmo teor de cimento (4%), tenha encontrado resistência média igual a 1,95 MPa (Tabela 1).

O que justifica resultados tão diferentes?

Barbosa e Ghavani (2007, p. 1535) afirmam que:

a percentagem do estabilizante depende do tipo de solo que se vai empregar e também da resistência requerida. Se houver muita argila presente, vai ser exigido no mínimo 6% de cimento. Se o solo é excessivamente arenoso, podem ser requeridas taxas maiores. Se o solo é bem graduado, 4% (e até mesmo 2%) de cimento já aumentam a resistência em relação ao material bruto [e] levam a blocos de ótima qualidade.

Partindo desta afirmação, aceita-se a hipótese de que a granulometria da terra ensaiada por Olarde e Guzman (1993) e por L. A Falcão Bauer Ltda. (2005) são diferentes da granulometria da terra ensaiada por Gonçalves (2005).

Então, qual seria a granulometria ideal para o solo-cimento?

Para Barbosa e Ghavani (2007), um solo que contém entre 10 e 20% de argila, 10 a 20% de silte e, entre 50 e 70% de areia, está bem graduado para o solo-cimento. Importante observar também que, segundo Segantini e Alcantara (2007, p. 835):

os solos devem ter, no entanto, um teor mínimo da fração fina, pois a resistência inicial do solo-cimento compactado se deve a coesão da fração fina compactada. A experiência tem demonstrado que solos com teores de silte mais argila inferiores a 20% não propiciam compactação adequada, sobretudo na confecção de tijolos prensados, dificultando o processo de moldagem.

Tabela 1. Resultados de ensaios de compressão de blocos de terra comprimida

fonte	dimensão (cm)		tipo	argila + silte	resistência média à compressão [MPa]	teor de cimento
Olarde e Guzman (1993)	10x14x16		-	-	7,25	4%
Gonçalves (2005)	10x14x28		tijolo maciço	34,9%	2,34	7%
				34,9%	1,95	4%
L. A. Falcão Bauer Ltda. (2005)	15x7,5x30		bloco vazado	-	3,94	-
NBR 10835/1994	A	9x14x39 9x14x19	bloco vazado	-	2,00	-
NBR 10834/1994 (substituída pela NBR 10834:2012)	B	14x14x39 14x14x19				
	C	19x14x39 19x14x19				
NBR 8491/1984 (substituída pela NBR 8491:2012)	I	20x9,5x5	tijolo maciço	-	2,00	-
	II	23x11x5				

Chama a atenção o fato de que nenhum dos relatórios consultados correlaciona granulometria com resistência à compressão. Diante disso, surge outra questão: quão relevante é, de fato, para pesquisas relacionadas ao solo-cimento, a caracterização química e mineralógica sugerida por Carvalho (2007)?

Os mapas evidenciam que, possivelmente, o solo amarelo escolhido por Gonçalves (2005), no município de João Pessoa, no Estado da Paraíba (figura 5), seja diferente do solo utilizado pelo fabricante do Estado de São Paulo, no município de São Pedro (figura 6). No entorno de João Pessoa, predomina o latossolo amarelo, o latossolo vermelho-amarelo e o argissolo vermelho-amarelo; no entorno da cidade de São Pedro, onde se localiza a fábrica paulista, o latossolo vermelho e o argissolo vermelho-amarelo.

Observação: o mapa a seguir foi elaborado em 1981 e está sendo utilizado apenas para ilustrar a classificação do solo de acordo com a pedologia. Sabe-se que, em 2011, a EMBRAPA divulgou um documento intitulado “O novo mapa de solos do Brasil legenda atualizada escala 1:5.000.000”.

A pedologia é a ciência do solo que se dedica ao estudo do solo em seu ambiente natural. Vem desta área da geologia, as observações de Carvalho (2007) sobre o comportamento distinto entre os solos tropicais e os solos de clima temperado. Para ele *a avaliação das propriedades químicas e mineralógicas é imprescindível quando se vai avaliar a susceptibilidade do solo a estabilização* (Carvalho, 2007, p. 540).

Fica a dúvida: nas reações químicas do solo-cimento, a argila e o silte têm a mesma função?

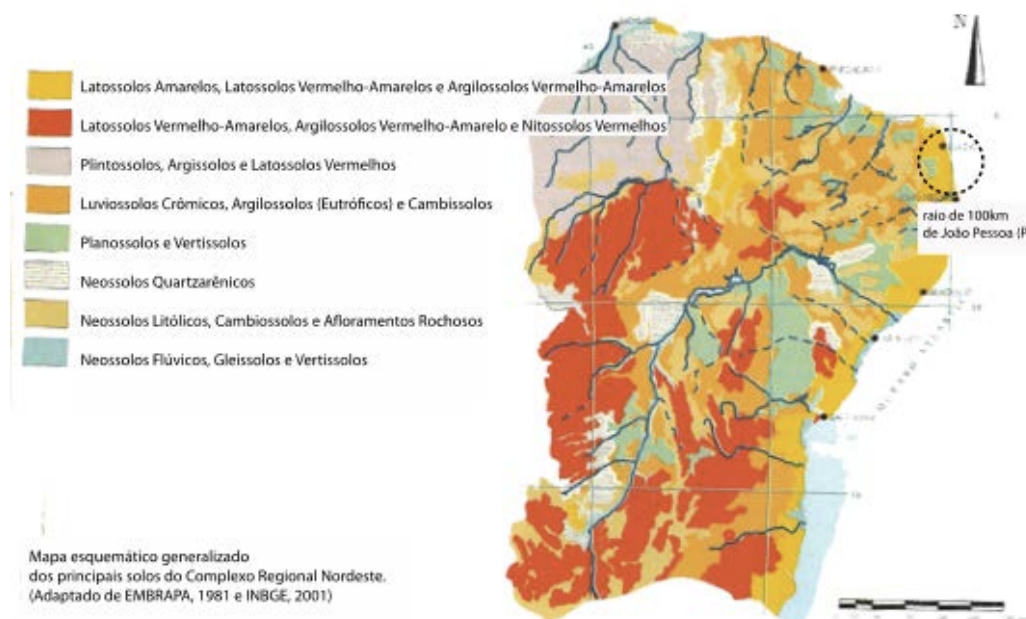


Figura 5. Mapa dos tipos de solo da Complexo Regional do Nordeste, no Brasil.
Fonte: Lepsch, 2002

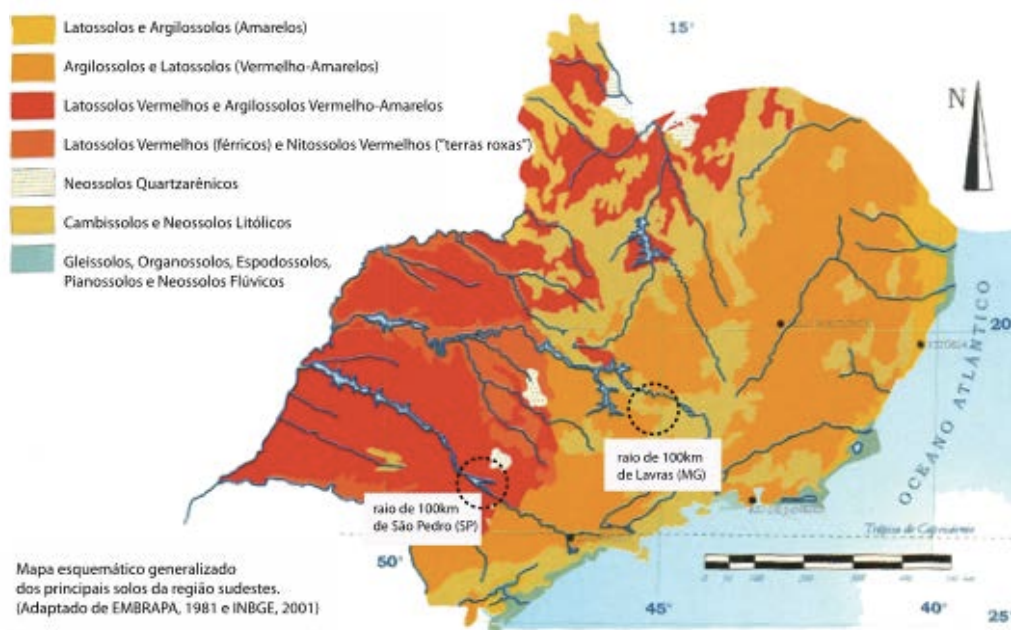


Figura 6. Mapa dos tipos de solo da Região Sudeste, no Brasil.
Fonte: Lepsch, 2002

3.2.2 Adobes

Com o intuito de verificar a viabilidade técnica de utilizar adobes para a construção de habitações rurais na região sul do Estado de Minas Gerais, onde predomina o latossolo vermelho amarelo distrófico – LVAd, Corrêa (2003) realizou uma série de ensaios. A pesquisadora recolheu 3 amostras de terra com diferentes granulometrias e adicionou areia média até encontrar a proporção de 20% de argila, 30% de silte e 50% de areia. Com as amostras de terra recolhidas e as amostras de terra em que a areia foi adicionada, Corrêa (2003) solicitou a produção de 3.000 adobes de 3 diferentes tamanhos, os quais foram submetidos a distintas condições de armazenamento durante a secagem: espaço fechado (F), galpão coberto (G) e sujeito as intempéries (T). Os ensaios provaram que adobes de 29 cm x 14 cm x 10 cm são capazes de atingir resistência a compressão igual e/ou superior a 2 MPa (Tabela 2).

Gonçalves (2005), por sua vez, escolheu a terra amarela disponível nos depósitos de material de construção da capital do Estado da Paraíba, João Pessoa. A terra, composta por 28,2% de argila e silte, foi utilizada para produzir adobes de 30 cm x 14 cm x 10 cm, que foram armazenados em galpão coberto (G) e alcançaram resistência média inferior a 2 MPa (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado de ensaios de compressão de adobes.

Referência	dimensões (cm)	argila	silte	areia	resistência média a compressão [MPa]
Corrêa (2003)	29x14x10	22%	31%	47%	2,13
		22%	31%	47% (*)	1,29
		50%	10%	40%	1,86
		50%	10%	40% (*)	2,88
		71%	10%	20%	4,17
		71%	10%	20% (*)	2,23
		71%	10%	20% (**)	3,00
Gonçalves (2005)	30x14x10 com fibra	28,2%		-	1,41
	30x14x10 sem fibra	28,2%		-	1,21
NTE E.080	-	10% a 20%	15% a 25%	55% a 70%	1,90
(*) + acréscimo de 60% de areia		(**) + acréscimo de 40% de areia			

Por que a resistência a compressão dos adobes ensaiados por Corrêa (2003) e por Gonçalves (2005) é tão diferente?

Para responder a pergunta, diante das informações encontradas, optou-se por verificar o tipo de solo e analisar a influência da granulometria no desempenho mecânico dos adobes.

Enquanto Gonçalves (2005) trabalhou com amostras de latossolo amarelo, latossolo vermelho-amarelo ou argissolo vermelho amarelo cujo teor de areia era 70,8%, Corrêa (2003) trabalhou com amostras de latossolo vermelho distrófico, cujo teor de areia variava entre 20% e 60%. Gonçalves (2005) não informa separadamente o teor de argila e o teor de silte, sabe-se apenas que juntos representavam 28,2%; e, o teor de argila mais silte das amostras de Corrêa (2003) variaram entre 53% e 81%. Por meio dos ensaios de Corrêa (2003) pode-se observar que o teor de argila exerce influência direta na resistência à compressão.

Barbosa e Ghavani (2007) afirmam que um solo que contém entre 15 e 35% de argila, 10 a 45% de silte e, entre 45% e 75% de areia, está bem graduado para a produção de adobes. Sendo assim, pode-se assumir que a proporção argila mais silte deve variar entre 25% e 55%.

Apesar de Gonçalves (2005) ter trabalhado com uma terra com mais do que 25% de argila mais silte, surge uma questão: teria a terra utilizada por Gonçalves (2007) argila suficiente para garantir à mistura, coesão e resistência?

Não se sabe. O que se sabe é que para produzir adobes com resistência a compressão igual e/ou superior a 2 MPa, a terra utilizada por Gonçalves (2005) deveria ter sido estabilizada. A análise prévia dos dados encontrados para os blocos de terra comprimida

(item 3.1.1) indica que mesmo a estabilização química pela adição de cimento poderia ser insuficiente para que componentes construtivos ensaiados por Gonçalves (2005) apresentassem desempenho mecânico satisfatório (resistência a compressão igual e/ou superior a 2 MPa). Então, o que se poderia fazer?

Sabe-se que adobes são componentes construtivos milenares e que pinturas egípcias registraram seu uso há mais de 2.000 anos atrás (figura 7).



Figura 7. Pintura no túmulo de Rekhmara, em Tebas (Egito). Foto: © Charles & Josette Lenars.

O saber popular afirma que a adição de argila pode ser feita em solos arenosos.

Observação: especial atenção deve ser dada aos solos com alto teor de silte. É que o silte, também conhecido como poeira de rocha, apresenta uma fina camada de argila ao seu redor, o que faz com que suas partículas, em contato com a água, apresentem alguma plasticidade e coesão. Sua principal característica é: ao fazer com que a argila presente na terra se ocupe apenas com as ligações químicas necessárias para fazer com que todo o silte seja aglutinado, o silte impede a argila de aglomerar as partículas de areia. Por isso, a estabilização de terras com alto teor de silte é feita pela adição de materiais naturais. O esterco, por exemplo, é utilizado para aumentar a coesão em solos com muito silte e pouca argila, uma vez que, em situações como esta, o acréscimo de argila não se mostra eficaz, devido a própria estrutura atômica e molecular do silte. Contudo, não há conhecimento de pesquisas científicas sobre o uso do esterco (nem da caseína) e seu uso foi consagrado pela arquitetura vernacular.

3.3 Propriedades térmicas

Para simulações computacionais que tenham como objetivo verificar o desempenho térmico de construções em solo-cimento, sugere-se que sejam adotados os seguintes valores: para blocos vazados, densidade igual a 1713 kg/m³ e calor específico igual a 0,80 kJ/kg°C (IPT, 2007); e, para tijolos maciços, densidade igual a 1920 kg/m³ e calor específico igual a 0,83 kJ/kg°C (Adam e Jones apud Ferreira, 2003, p. 185). Segundo Moita (2010, p. 195), a densidade dos adobes pode variar entre 1000 kg/m³ e 1700 kg/m³ de acordo com a quantidade de fibra vegetal mas, apesar disso, o autor sugere que seja adotado calor específico igual a 1,00 kJ/kg°C.

4. CONCLUSÃO

O uso da terra como material construtivo faz parte da cultura construtiva de povos das mais variadas regiões do planeta.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ao abordar o uso da terra como material construtivo, assume a premissa de que o cimento faz parte da mistura, a qual denomina solo-cimento. O uso do cimento como estabilizante de solos nem sempre é adequado: pode-se afirmar que seu uso em fechamentos verticais está associado a técnicas construtivas caracterizadas pela compactação do solo, pois a adição de cimento altera a trabalhabilidade da terra, tornando-a imprópria para as demais técnicas construtivas.

A ABNT estabelece que a resistência média à compressão de paredes monolíticas de solo-cimento deve ser igual ou superior a 1,0 MPa (NBR 13553:1996) e que, no caso dos tijolos maciços (NBR 8491:1984) ou blocos vazados (NBR 10834:1994), igual ou superior a 2,0 MPa. A ASTM-E2392M não faz referência direta a nenhuma técnica construtiva e a E.080 estabelece que a resistência a compressão do adobe deve ser igual ou superior a 1,2 MPa (12 kg/cm²).

De fato, o Brasil carece de normas técnicas sobre o uso da terra como material construtivo e é legítima a proposição de Barbosa e Ghavani apud Gonçalves (2005) acerca de uma norma específica para o adobe.

Ao comparar ensaios de resistência à compressão de tijolos maciços e blocos vazados de solo-cimento constatou-se que, além da granulometria, outros fatores influenciam o teor de cimento e, conseqüentemente, o desempenho mecânico dos componentes construtivos.

Conclui-se que enriquecer as pesquisas sobre solo-cimento, é necessário correlacionar ensaios de resistência à compressão com dados sobre caracterização física, química e mineralógicas das amostras ensaiadas. Tratando-se de um material não padronizado, os resultados não podem ser universalizados e representam o comportamento mecânico apenas de uma determinada amostragem. A correlação dos dados, seguindo a lógica aplicada à ciência (método científico), permitirá a elaboração de parâmetros para teor de cimento e enfraquecerá a hipótese de que o uso da terra como material construtivo é inviável em larga escala, porque a terra não é um material padronizado.

Sugere-se, ainda, que novas pesquisas sejam realizadas com o intuito de demonstrar a importância da inércia térmica e da capacidade térmica para a eficiência energética das edificações e, desta forma, validar a hipótese de que o uso da terra como material construtivo é uma estratégia para a mitigação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcantara, Marco Antonio de Moraes (1995). *Estabilização química de solos para fins rodoviários: técnicas disponíveis e estudo de caso para três solos de Ilha Solteira*. Viçosa, M.G.: UFV, 1995. 91p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Alcantara, Marco Antonio de Moraes; Segatini, Antônio Anderson da Silva (2007). Solo-cimento e solo-cal. In: Isaia, Geraldo C.. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: Ibracon. Cap. 25, p. 833-861. V.2.

American Society for Testing and Materials (2010). *ASTM-E2392M-10 Standard guide for design of earthen wall building systems*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *NBR 8491 – Tijolo maciço de solo-cimento*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994). *NBR 10834 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural*. Rio de Janeiro: ABNT

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994). *NBR 10835 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural: forma e dimensões*. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). *NBR 13553 – Paredes monolíticas de solo-cimento*. Rio de Janeiro: ABNT.

Auroville. *World Project Case Studies*. Disponível em: http://www.earth-auroville.com/world_project_case_study_en.php

Barbosa, Normando Perazzo; Ghavami, Khosrow (2007). Terra crua para edificações. In: Isaia, Geraldo C. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: Ibracon. Cap. 45, p. 1505-1583. V.2.

Carvalho, José Camapum (2007). Solo como material de construção. in: Isaia, Geraldo C. *Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 24, p. 525-561. V.1.

Chadda, L. R. (1970). *The phenomenon of aggregation in the stabilization of soils with cement*. India, Central Road Res. Inst. New Delhi. *Indian Concrete Journal* 44(5):210-212.

Corrêa, Andréa Aparecida Ribeiro (2003). *Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do adobe (tijolo de terra crua)*. Dissertação (mestrado em construções rurais e ambiência). Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Ferreira, Regis Castro (2003). *Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos*. 2003. 204 f. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiência) - Departamento de Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Fontes, Maurício Paulo Ferreira (2006). *Mineralogia do solo*. Departamento de Solos, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa.

Gonçalves, J.S (2005). *Contribuição para a normalização de alvenaria estrutural de tijolos de terra crua para construções urbanas*. Dissertação (mestrado em engenharia urbana). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (2007). *Relatório técnico nº 96 166-205: Determinação de calor específico médio de composto mineral*. São Paulo: IPT.

International Organization for Standardization (2006). ISO 14040:2006 *Environmental management -- Life cycle assessment - Principles and framework*.

L.A. Falcão Bauer Ltda. (2005). *Relatório E/101.883/05: Blocos de solo-cimento. Ensaio de determinação da resistência à compressão*. São Paulo

Lax, Clare (2010). *Life cycle assessment of rammed earth*. Department of Architecture and Civil Engineering. University of Bath, dissertação.

Lepsch, Igo F (2002). *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos.

Lima, D. C. (1981). *Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização de solos, em particular a estabilização solo-cal*. São Carlos, S.P.: EESC, 1981. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Moita, Francisco (2010). *Energia solar passiva*. Portugal: Argumentum.

Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción. *Adobe: Norma Técnica de Edificación E-080*. Lima, Peru: Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción / Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO].

Minke, Gernot (2010). *Manual de construcción en tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Espanha: Ecohabitar.

Murakami, Shuzo; Ikaga, Toshiharu (2008). *Evaluating environmental performance of vernacular architecture through CASBEE*. Japão: Japan Greenbuild Council (JAGBC) e Japan Sustainable Building Consortium (JSBC).

Olarte, Jorge Luis de; Guzmán, Evelin (1993). *Manual de edificación con tierra armada: diseño, cálculo y construcción con el sistema CET*. Madrid: Comunidad de Madrid.

Schroeder, Horst (2011). *Building codes and standards in earth building – The current situation in Germany*.

Silva, Moema Ribas (1988). O uso do solo-cimento na construção. in: Bauer, L. A. Falcão. *Materiais de construção*. Rio de Janeiro: LTC Livros técnicos. Cap. 24, p. 656-681. V.2.

World Business Council for Sustainable Development (2012). *Cement sustainability initiative: our agenda or action*. Suíça.

Notas

1) Adobes são blocos de terra crua: suas dimensões e formas variam de acordo com a cultura construtiva e a região em que são produzidos. Apesar de serem comumente retangulares, há referências sobre adobes trapezoidais.

2) Para os geólogos, todo argilomineral é uma argila, mas nem toda argila é um argilomineral. O termo argila é adotado para a fração do solo com partículas inferiores a 0,005mm (2µm), enquanto que o termo argilomineral refere-se a silicatos hidratados de alumínio ($Al_4 [Si_4 O_{10} (OH)_2]$) do grupo dos filossilicatos. Os minerais pertencentes ao grupo dos filossilicatos tem como unidade básica na sua composição lâmina(s) de tetraedros(s) de silício rodeado por oxigênios (Fontes, 2006, p. 64-65)

3) De acordo com Olarde e Guzman (1993, p. 47): o uso do cal (4%) em solos com muito silte e muita argila diminui a retração, não provoca colapso após absorção de água e aumenta a resistência a compressão; contudo, o uso do cal não é indicado para solos estabilizados fisicamente pela adequada proporção entre argila, silte e areia e para solos arenosos, porque desfavorece a resistência a compressão e provoca colapso após absorção de água. Para mais detalhes sobre a estabilização de solos com cal no Brasil, Segantini e Alcantara (2007) recomendam a leitura dos trabalhos de Lima (1981) e Alcantara (1995).

4) Em 2012, algumas normas da ABNT foram atualizadas. As normas citadas que foram atualizadas são: NBR 8491 – *Tijolo Maciço de solo-cimento*; NBR 10834 – *Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural* e a NBR 13553 – *Paredes monolíticas de solo-cimento*.

Currículo

Samantha Orui, graduada pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) em 2007. Atualmente, cursa mestrado profissional em Habitação: Tecnologia no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).