

# DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLO ARGILOSO ESTABILIZADO COM CAL E SILICATO DE SÓDIO VISANDO APLICAÇÃO EM CONSTRUÇÕES RURAIS<sup>1</sup>

Regis de Castro Ferreira<sup>2</sup>, Heloina Teresinha Faleiro<sup>2</sup> e Wesley Jorge Freire<sup>3</sup>

## ABSTRACT

PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF A CLAYEY SOIL STABILIZED WITH LIME AND SODIUM SILICATE FOR RURAL BUILDING PURPOSES

Use of chemical stabilizers in earth aims at improving mechanical characteristics and behavior under water influence. The objective of this research was to study the effect of chemical additives (lime and sodium silicate) on mechanical properties of a clayey soil. The lime rates in the soil-lime mixtures were 0%, 6%, and 10%, and the sodium silicate rate was 4%. Soil was submitted to tests to determine its main physical indexes. Cylindrical specimens with 127 mm height and 100 mm diameter were molded. The specimens were cured in a humidity chamber for 7, 28, and 56 days. After each aging period, specimens were submitted to compressive tests. Water absorption capacity essays were carried out at the seventh day from molding. Only the 10% lime content associated with 4% sodium silicate reached the minimum strength required by soil-cement block standards. Regarding to total water absorption capacity, no treatment reached the values recommended by that standard. Results suggest a promising use of sodium silicate to improve strength and durability-related physical and mechanical characteristics of soil destined to rural buildings.

KEY WORDS: soil-lime, compressive strength, soil stabilization, earth building material.

## RESUMO

O uso de aditivos químicos em solos destinados à construção civil visa melhorar as suas características mecânicas e o seu comportamento sob a ação da água. O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito da incorporação ao solo de estabilizantes químicos (cal e silicato de sódio) sobre as propriedades mecânicas de um solo argiloso. Os teores de cal foram de 0%, 6% e 10%, e a dosagem de silicato de sódio foi de 4%. O solo foi submetido a ensaios de caracterização a fim de se determinar seus principais índices físicos. Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com 127 mm de altura e 100 mm de diâmetro, os quais foram curados em câmara úmida por 7, 28 e 56 dias. Após cada período de cura os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples. O ensaio de absorção de água foi realizado aos sete dias. Somente o teor de 10% de cal associada ao silicato de sódio permitiu atingir o mínimo de resistência exigido pela norma para tijolos de solo-cimento, e em termos de capacidade de absorção total, nenhum tratamento atingiu os valores recomendados por essa norma. Os resultados sugerem um uso promissor do silicato de sódio com vistas à melhoria das propriedades físico-mecânicas relacionadas à resistência e à durabilidade de solos destinados à construções rurais.

PALAVRAS-CHAVE: solo-cal, resistência à compressão, estabilização de solos, terra para construção.

## INTRODUÇÃO

Sob o ponto de vista da engenharia de construções rurais, os solos podem desempenhar várias funções, ora como bases de sustentação das obras (fundações), ora como materiais de construção para diferentes aplicações (pavimentos, barragens, aterros, tijolos, blocos etc.). Independentemente do uso, os solos devem apresentar certas propriedades físicas

e mecânicas relacionadas à estabilidade volumétrica, resistência e durabilidade. Os solos argilosos, em geral, não apresentam essas propriedades e uma das alternativas é promover sua estabilização.

O termo "estabilização do solo" corresponde a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo original. Tais processos consistem em modificar

1. Parte da tese de doutorado do primeiro autor, apresentada à Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Trabalho recebido em jun./2004 e aceito para publicação em set./2005 (registro nº 597).
2. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, C.P. 131. E-mails: rcastro@agro.ufg.br
3. Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Caixa Postal 6011, CEP, 13-083-875, Campinas, SP.

as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular (Houben & Guillaud 1994).

Dentre os inúmeros métodos de estabilização de solos para fins construtivos, o que tem sido identificado como mais prático e eficiente é o da estabilização química. De acordo com Fang (1991), esse método se refere àqueles em que tanto as interações químicas, quanto as físico-químicas e físicas, podem ocorrer no processo de estabilização. A estabilização química inclui, também, aqueles métodos nos quais um ou mais compostos são adicionados ao solo com o objetivo de estabilizá-lo. Dentre as técnicas de estabilização química citam-se a do solo-cimento, a do solo-cal, a do solo-betume, a do solo-resina, a estabilização com cinzas volantes ("fly ash") e escórias de alto forno ("blast furnace slag"), a estabilização com o emprego de sais (cloretos), ácidos (ácido fosfórico), lignina, silicatos de sódio ("water glass"), aluminatos de cálcio, sulfatos de potássio, óxidos de ferro, cinzas pozolânicas de turfas e restos de atividade agrícola (palha de arroz, casca de amendoim, bagaço de cana-de-açúcar etc.), materiais vegetais (partículas de madeira, sobras de papel, polpa de celulose etc.).

A estabilização com cal é o método comumente aplicado em solos que contêm uma significativa fração argila. Os resultados da estabilização variam dependendo da natureza dos minerais de argila e são melhores sob alta concentração de silicatos de alumínio, sílica e hidróxido de ferro (Ngowi 1997).

O cálcio, principal componente da cal, ataca quimicamente parte das argilas e até mesmo o próprio quartzo, resultando na formação de silicatos e aluminatos hidratados de cálcio, de notável capacidade cimentante pozolânica (Guimarães 1992).

No mecanismo das reações envolvidas entre a cal e os constituintes do solo, as primeiras reações são as de floculação/aglomeração, seguidas das trocas iônicas entre as argilas e a cal. Tais reações resultam na alteração de suas propriedades geotécnicas, tais como: aumento do limite de plasticidade e diminuição do limite de liquidez e do índice de plasticidade; achatamento das curvas de compactação, com aumento do teor de umidade ótima e diminuição da massa específica aparente seca máxima; e aumento da resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica. Posteriormente, ocorre a formação de compostos químicos sílico-aluminosos pelo ataque da cal aos minerais argilosos e ao quartzo. Simultaneamente ocorrem os fenômenos de carbonatação, com o

ataque do anidrido carbônico, presente no ar e na água de infiltração, aos hidroxidados da cal (Webb 1992, Guimarães 2002).

No caso particular dos solos argilosos, a adição de cal provoca reações de troca iônica, mudanças das estruturas cristalinas, recarbonatações e, sobretudo, a formação de novos minerais capazes de cimentar as partículas e/ou preencher os espaços intercrystalinos (Guimarães 1985). De imediato, a cal hidratada provoca elevação da alcalinidade do solo, tornando instável alguns dos seus constituintes, permitindo um possível ataque ao silício e ao alumínio presente nos minerais do solo e a recombinação desses íons com o cálcio, formando compostos estáveis, tais como silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Nessas condições, uma nova estrutura cristalina aparece, com a ocupação dos espaços vazios existentes entre os agregados, dando sustentação à micro-estrutura da mistura solo-cal compactada.

Por outro lado, o tratamento do solo com álcalis fortes favorece as reações do quartzo com os estabilizadores alcalinos, tais como a cal e o cimento Portland, podendo a resistência inicial ser elevada em 15% a 400% (Freire 1976). O silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e o hidróxido de sódio (NaOH) são álcalis usualmente associados ao cimento e à cal com a finalidade de estabilização química de solos (Freidin & Erell 1995). O silicato de sódio é usado na estabilização de solos principalmente porque reage com os sais solúveis de cálcio, em soluções aquosas, para formar silicatos de cálcio gelatinosos insolúveis. Os silicatos de cálcio hidratados são agentes cimentantes que melhoram a estabilidade do solo, preenchendo seus espaços vazios e expulsando, conseqüentemente, a água do solo (Ren & Kagi 1995).

O objetivo do trabalho foi o de pesquisar o efeito da adição de alguns aditivos químicos, notadamente conhecidos como estabilizantes de solo (cal e silicato de sódio), a um solo argiloso, e, com a mistura, moldar corpos-de-prova que tiveram suas características físico-mecânicas determinadas em laboratório e o seu comportamento tecnicamente avaliado.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri) e no Laboratório de Solos da Faculdade de Engenharia Civil, ambos da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

Foi estudado um solo de classe textural argilosa (Latosolo vermelho-escuro). As amostras de solo foram coletadas à profundidade de 1,0 m (horizonte B), de modo a evitar-se a camada superficial, geralmente imprópria para esse tipo de uso devido à presença excessiva de matéria orgânica e alteração na quantidade de partículas finas por lixiviação. O solo foi coletado em uma área pertencente ao Campo Experimental da Feagri / Unicamp, no município de Campinas-SP. As médias anuais de precipitação e de temperatura, características da região, foram respectivamente, 1.364 mm e 20,6°C. O tipo climático é definido como Cwa (mesotérmico de inverno seco), de acordo com a classificação de Köppen, com altitude média de 690 m.

Como aditivos químicos estabilizadores de solos foram usados a cal cálcica hidratada CH-I, de acordo com a NBR 7175 (ABNT 1992a), e o silicato de sódio alcalino sob a forma pura para análise, cuja composição química apresentava 63% de SiO<sub>2</sub>, 18% de Na<sub>2</sub>O e uma relação sílica : álcali de 3,5 : 1.

Para os ensaios de compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos foi utilizada uma máquina universal de ensaios, marca Dynatest, com dispositivo de controle de velocidade de carregamento e capacidade de 25.000 kN.

Após a coleta, o solo foi encaminhado ao Laboratório de Ensaio de Materiais, da Feagri/Unicamp, onde foi passado em peneira nº 4 (abertura de malha igual a 4,76 mm) e acondicionado em caixas especiais até o momento de ser utilizado. Amostras do solo foram submetidas a ensaios de caracterização, a saber:

- análise granulométrica, por sedimentação e peneiramento, para se determinar a distribuição em tamanho das partículas do solo, de acordo com a norma NBR 07181 (ABNT 1984a);
- determinação da massa específica dos sólidos do solo, de acordo com a norma NBR 06508 (ABNT 1984b);
- determinação dos limites de liquidez e de plasticidade do solo, de acordo com as normas NBR 06459 (ABNT 1984c) e NBR 07180 (ABNT 1984d), respectivamente;
- ensaio de compactação normal de Proctor, para a determinação da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima correspondente do solo natural e das misturas solo-cal (0%, 6% e 10% de cal), de acordo com a norma NBR 07182 (ABNT 1986).

Para a realização da pesquisa, foram ainda estudadas as seguintes adições químicas: solo natural,

sem nenhuma adição (testemunha); solo + 6% de cal; solo + 10% de cal; solo + 6% de cal + 4% de silicato de sódio (SS); e solo + 10% de cal + 4% de silicato de sódio (SS). O teor de 6% de cal foi escolhido em função das recomendações de Sherwood (1993), que define um teor mínimo de 6% de aglomerante para a estabilização química de solos. De acordo com o autor, para teores menores que 6%, o termo "estabilização de solos" se torna inadequado, devendo ser adotado o termo "solo melhorado". O teor de 10% de cal foi escolhido em função dos bons resultados alcançados por Gutierrez *et al.* (1998), ao estudarem a estabilização de um solo com características geotécnicas semelhantes ao pesquisado. A adição de 4% de silicato de sódio associada aos teores de cal baseou-se nas recomendações de Ruff & Davidson (1961) e Freire (1981).

Os dois teores de cal (6% e 10%) foram tomados em relação à massa do solo seco, que compreendeu a fração menor que 4,76 mm (100% passando em peneira nº 4), no seu teor de umidade natural, e a ele adicionados e misturados até perfeita homogeneização. A quantidade de silicato de sódio (4%) foi obtida inicialmente em peso e depois transformada em volume, para então ser diluída na água de amassamento cuja quantidade correspondeu à diferença entre o teor de umidade ótima de compactação e o teor de umidade natural do solo.

Os corpos-de-prova cilíndricos, de solo natural e de solo-cal, foram moldados de acordo com os procedimentos da NBR 12024 (ABNT 1990a). Para tal, a mistura dos componentes foi feita manualmente, sendo com ela confeccionados corpos-de-prova de 100 mm de diâmetro e 127 mm de altura, em moldes cilíndricos apropriados. Seguindo as recomendações de Bueno & Vilar (1999), exigiu-se um grau de compactação (GC) não inferior a 95% e nem superior a 105% em relação aos valores da massa específica aparente seca máxima, obtidos nos ensaios de compactação normal de Proctor. Os valores do GC foram obtidos pela seguinte equação:

$$GC = \frac{\gamma_c}{\gamma_s} \times 100$$

em que:

$\gamma_c$ : massa específica aparente seca do corpo-de-prova cilíndrico, em g.cm<sup>-3</sup>;

$\gamma_s$ : massa específica aparente seca máxima do solo obtida pelo ensaio de compactação normal de Proctor, em g.cm<sup>-3</sup>.

Para as misturas adicionadas de silicato de sódio, o valor de GC foi calculado em relação aos

valores de massa específica aparente seca máxima das misturas sem silicato de sódio.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida sob temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $90\% \pm 2\%$ , durante períodos de 7, 28 e 56 dias. Após cada período esses corpos foram rompidos à compressão simples. Quatro horas antes do rompimento, foram imersos totalmente em água, conforme preconiza a norma NBR 12025 (ABNT 1990b).

A determinação da resistência à compressão simples ( $R_c$ ), expressa em MPa, também foi feita de acordo com a norma NBR 12025 (ABNT 1990b), que descreve como devem ser ensaiados à compressão simples os corpos-de-prova de solo-cimento. A resistência foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura ( $C$ , em kgf) pela área de sua seção

transversal ( $A$ , em  $\text{cm}^2$ ):  $R_c = \frac{C}{A} \times 0,1$ . A resistência média foi determinada pela média aritmética de três repetições.

Para o ensaio de absorção de água, os corpos-de-prova cilíndricos (salvo os de solo natural) foram imersos totalmente em água, durante 24 horas. Isso, após um período de cura, em câmara úmida, de sete dias completos. Os corpos-de-prova foram pesados antes e depois da imersão em água, anotando-se suas massas úmida e saturada. Posteriormente, foram secos em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$ , até constância de massa, para a determinação de suas massas secas. A diferença percentual entre a massa saturada e a massa úmida do corpo-de-prova correspondeu ao valor de sua capacidade parcial de absorção de água. Já a diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca correspondeu ao valor de sua capacidade total de absorção de água. Ou seja, para o cálculo das capacidades parcial e total de absorção de água, a base de comparação foi sempre a menor massa para cada saturação.

O plano experimental correspondeu a um esquema fatorial  $5 \times 3$ , delineado inteiramente casualizado, com três repetições. Os fatores de variação foram os tipos de mistura solo-aditivo, em cinco níveis (solo sem adições; solos com 6% e com 10% de cal; e solos com 6% e com 10% de cal, associados a 4% de silicato de sódio), e os períodos de cura, em três níveis (7, 28 e 56 dias), totalizando 15 tratamentos.

Realizou-se uma análise de variância para avaliar o efeito das interações entre os fatores sobre

as variáveis resposta resistência à compressão simples, capacidades de absorção parcial e total de água. As médias obtidas foram comparadas pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A plasticidade de um solo é influenciada por sua textura e pela natureza mineralógica das argilas presentes. Quanto maior o índice de plasticidade, mais o material estará sujeito às variações dimensionais resultantes da expansão do solo, quando úmido, e de sua retração, quando seco. Foram obtidos os valores de 45%, para o limite de liquidez, e de 36%, para o limite de plasticidade (Tabela 1). O índice de plasticidade foi de 9%, obtido pela diferença numérica entre os limites de liquidez e de plasticidade. Em razão disso, o solo foi considerado como moderadamente plástico.

Os valores da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima de compactação, fornecidos pelos ensaios de compactação normal de Proctor, também encontram-se na Tabela 1. Como era de se esperar, a adição de cal promoveu aumento nos valores de umidade ótima. Verificou-se uma tendência de redução da massa específica aparente seca máxima à medida que os teores de cal aumentaram. Isso evidencia que a mistura compactada tendeu a se apresentar mais porosa, conforme relata Mendonça & Lima (1998).

Tabela 1. Características físico-mecânicas do solo estudado<sup>1</sup>.

Características	Médias <sup>1</sup>
Umidade natural (%)	17,01
Massa específica dos sólidos ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	2,90
Limite de Liquidez (%)	45,00
Limite de Plasticidade (%)	36,00
Índice de Plasticidade (%)	9,00
Areia (0,05 – 2 mm)	39,30
Silte (0,005 – 0,05 mm)	30,60
Argila (< 0,005 mm)	30,10
Porcentagem que passa na peneira 200 (0,074 mm)	63,80
Massa específica aparente seca máxima ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) – 0% de cal	1,60
Massa específica aparente seca máxima ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) – 6% de cal	1,57
Massa específica aparente seca máxima ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) – 10% de cal	1,55
Umidade ótima de compactação – 0% de cal	25,00
Umidade ótima de compactação – 6% de cal	25,50
Umidade ótima de compactação – 10% de cal	26,60
Descrição visual do solo	Silte areno-argiloso
Classificação Bureau of Public Roads (BPR)	Siltoso
Classificação AASHTO	A5(6)
Classificação USAD	Franco-argiloso

<sup>1</sup>- Médias de três repetições.

As curvas de compactação das misturas solo-cal (Figura 1) apresentaram valores de massa específica aparente seca máxima abaixo daqueles do solo natural e os teores ótimos de umidade se deslocaram para valores mais altos, acompanhando o aumento do teor de cal das misturas. Gutierrez *et al.* (1998), estudando os efeitos da adição de cal nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso, obtiveram o mesmo padrão de comportamento para a umidade ótima de compactação e a massa específica aparente seca máxima. Os autores encontraram 33,2% e 34,5% de umidade ótima e 1,38 g.cm<sup>-3</sup> e 1,30 g.cm<sup>-3</sup> de massa específica aparente seca máxima, para os teores de 7% e 9% de cal, respectivamente.

A partir dos resultados de granulometria e limites de consistência, o solo foi classificado como A5(6), de acordo com o sistema da AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (Bueno & Vilar 1999). Já, em conformidade com as normas do "Bureau of Public Roads", o solo pertence à classe textural argilosa, e pelo método do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USAD) (Brady 1989), como franco-argiloso.

Conforme se observa na Tabela 2, os valores do grau de compactação (GC) obtidos estiveram em concordância com as recomendações de Bueno & Vilar (1999); isto é, variando entre 95% e 105%.

Os valores médios de resistência à compressão simples e capacidades total e parcial de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos resultaram nas análises de variância apresentadas nas Tabelas 3 e 4. Os fatores adição química e idade de cura, bem como suas interações, promoveram efeitos significativos (p<0,01) sobre a variável resistência à compressão simples (Tabela 3). As adições químicas

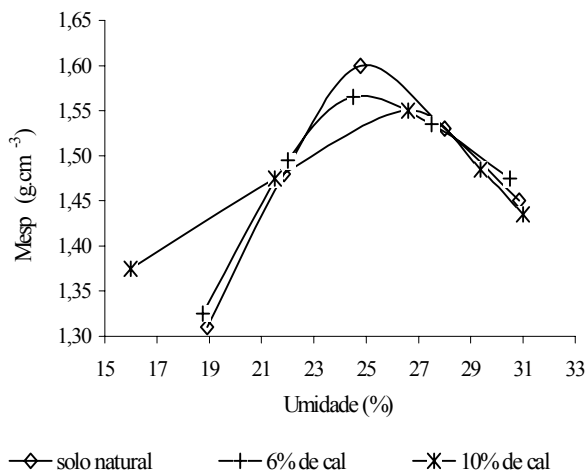


Figura 1. Curvas de compactação para o solo natural e para o solo adicionado de 6% e 10% de cal, como função entre a massa específica aparente seca (Mesp), em g.cm<sup>-3</sup>, e o teor de umidade (%).

aplicadas ao solo também promoveram efeitos significativos sobre a capacidade de absorção parcial de água, mas, em efeitos não significativos sobre a capacidade de absorção total de água (Tabela 4).

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise do efeito da interação entre os fatores adição química e idade de cura sobre os valores médios da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos. A adição de 10% de cal associada ao silicato de sódio proporcionou os melhores resultados. Valores mais elevados de resistência à compressão foram verificados à medida que se aumentou o período de cura; entretanto, não houve diferenças significativas entre as idades de 28 e 56 dias.

A Tabela 6 apresenta os valores médios de resistência à compressão simples e capacidades de absorção parcial e total de água dos corpos-de-prova cilíndricos. Os melhores resultados em termos de

Tabela 2. Valores médios da massa específica aparente seca e do grau de compactação (GC) dos corpos-de-prova cilíndricos para os três períodos de cura estudados

Mistura solo-aditivo químico	Massa específica aparente seca (g.cm <sup>-3</sup> )			Grau de compactação (%) <sup>2</sup>		
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	28 dias	56 dias
0% de cal	1,69 ± 0,01 (0,55) <sup>1</sup>	1,64 ± 0,01 (0,39)	1,66 ± 0,01 (0,58)	104,83 ± 0,57 (0,55)	101,78 ± 0,39 (0,39)	103,39 ± 0,60 (0,58)
6% de cal	1,50 ± 0,01 (0,50)	1,50 ± 0,00 (0,29)	1,50 ± 0,00 (0,20)	95,65 ± 0,46 (0,50)	95,79 ± 0,27 (0,29)	95,41 ± 0,18 (0,20)
10% de cal	1,47 ± 0,02 (1,19)	1,49 ± 0,02 (1,18)	1,48 ± 0,01 (1,02)	95,01 ± 1,11 (1,19)	95,89 ± 1,09 (1,18)	95,63 ± 0,93 (1,02)
6% de cal + SS	1,50 ± 0,02 (1,62)	1,50 ± 0,03 (1,90)	1,49 ± 0,03 (1,83)	95,84 ± 1,51 (1,62)	95,28 ± 1,78 (1,90)	95,23 ± 1,69 (1,83)
10% de cal + SS	1,50 ± 0,01 (0,97)	1,49 ± 0,01 (0,58)	1,49 ± 0,01 (0,58)	96,61 ± 0,94 (0,97)	96,26 ± 0,56 (0,58)	95,98 ± 0,55 (0,58)

<sup>1</sup>- Valores médios ± desvio padrão (coeficiente de variação, em %)

<sup>2</sup>- Para as misturas de solo-cal com silicato de sódio, os valores do GC foram calculados em relação aos valores de massa específica aparente seca máxima das misturas sem silicato de sódio.

Tabela 3. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre a variável resposta resistência à compressão simples para os corpos-de-prova cilíndricos, em MPa.

Fontes de variação	GL	Soma de	Quadrado	F
		Quadrados	Médio	
Adições químicas (AQ)	4	11,60	2,90	208,15**
Idade de cura (IC)	2	0,34	0,17	12,21**
Interação AQ X IC	8	0,96	0,12	8,60**
Tratamentos	14	12,89	0,92	-
Resíduo	30	0,42	0,01	-

\*\* - Valores significativos a 1% de probabilidade.

Tabela 4. Análise de variância referente aos efeitos dos tratamentos sobre as variáveis respostas capacidade de absorção parcial e total de água para os corpos-de-prova cilíndricos, em %.

Fontes de variação	GL	Absorção parcial			Absorção total		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
		Tratamentos	3	4,20	1,40	32,10*	2,16
Resíduo	8	0,35	0,04	-	5,34	0,67	-
Total	11	4,55	-	-	7,50	-	-

\*\* - Valor significativo a 1% de probabilidade; ns: valor não significativo a 5% de probabilidade.

resistência foram obtidos para os teores de cal associados ao silicato de sódio. O maior valor médio de resistência foi de 2,35 MPa, obtido pela adição de 10% de cal associada a 4% de silicato de sódio, aos 56 dias de idade. Os maiores valores de resistência à compressão do solo sem adição de cal (testemunha), em relação à resistência do solo adicionado de 6% de cal (com e sem silicato de sódio) ou de 10% de cal, são explicados em razão dos corpos-de-prova não terem sido imersos em água, durante quatro horas, antes de sua ruptura, conforme as recomendações da NBR 12025 (ABNT 1990b). Assim, este fato deve ter promovido o seu melhor desempenho mecânico. Os corpos-de-prova sem aditivos químicos se desfaziam assim que eram imersos em água.

Tabela 5. Valores médios da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos relativos aos fatores adição química e idade de cura.

Fatores	Níveis	Resistência (MPa) <sup>1</sup>
Adição química	10% de cal + 4% de silicato de sódio	2,08 a
	0% de cal (solo natural)	1,49 b
	6% de cal + 4% de silicato de sódio	0,99 c
	10% de cal	0,89 c
	6% de cal	0,66 d
Idade	56 dias	1,29 a
	28 dias	1,28 a
	7 dias	1,10 b

<sup>1</sup> - Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, a 1% de probabilidade.

A Figura 2 ilustra o desempenho mecânico dos corpos-de-prova cilíndricos submetidos ao ensaio de compressão simples. Os valores de resistência à compressão simples desses corpos-de-prova aumentaram com o acréscimo dos teores de cal. Ademais, a incorporação da solução de silicato de sódio à cal também promoveu ganhos de resistência consideráveis, comparando-se às misturas sem a adição de silicato de sódio (Tabela 7).

A Figura 3 ilustra o desempenho dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de absorção de água. Os valores obtidos para a capacidade de absorção total de água podem ser considerados elevados e típicos de solos finos. A principal explicação para esse comportamento é a alta porosidade proporcionada por esses solos, principalmente quando tratados com cal. Isso sugere que, para a estabilização desses solos, deve-se adotar outras estratégias de tratamento como a impregnação por produtos hidrofugantes.

Em termos de resistência à compressão simples, somente o tratamento referente à adição de 10% de cal associada ao silicato de sódio atendeu às especificações da NBR 08491 (ABNT 1992), empregada para tijolos prensados de solo-cimento.

Tabela 6. Valores médios da resistência à compressão simples e da capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos para os três períodos de cura estudados.

Misturas solo-aditivo químico	Resistência à compressão simples (MPa) <sup>1</sup>			Absorção de água (%) <sup>1</sup>	
	7 dias	28 dias	56 dias	Parcial	Total
0% de cal <sup>2</sup>	1,62 ± 0,09 (5,56) aA	1,45 ± 0,06 (4,13) bA	1,40 ± 0,08 (5,71) bA	-	-
6% de cal	0,61 ± 0,05 (8,20) bA	0,72 ± 0,01 (1,40) dA	0,65 ± 0,03 (4,61) dA	2,09 ± 0,17 (8,13) a	25,90 ± 0,32 (1,24) a
10% de cal	0,85 ± 0,03 (3,53) bA	0,89 ± 0,02 (4,49) cdA	0,92 ± 0,01 (1,09) cdA	0,58 ± 0,05 (8,62) b	26,20 ± 1,49 (5,69) a
6% de cal + SS	0,81 ± 0,10 (12,35) bB	1,05 ± 0,02 (1,90) cAB	1,11 ± 0,03 (2,70) cA	1,68 ± 0,32 (19,05) a	26,26 ± 0,42 (1,60) a
10% de cal + SS	1,60 ± 0,01 (0,62) aB	2,28 ± 0,05 (2,19) aA	2,35 ± 0,03 (1,28) aA	1,95 ± 0,20 (10,25) a	25,19 ± 0,42 (1,67) a

<sup>1</sup> - Média ± desvio padrão (coeficiente de variação, em %); médias seguidas de mesma letra minúscula, em cada coluna, e da mesma letra maiúscula, em cada linha, não diferem entre si, pelo teste Tukey (p < 0,01).

<sup>2</sup> - Os ensaios de compressão simples para o teor de 0% de cal foram feitos sem imersão prévia dos corpos-de-prova em água.

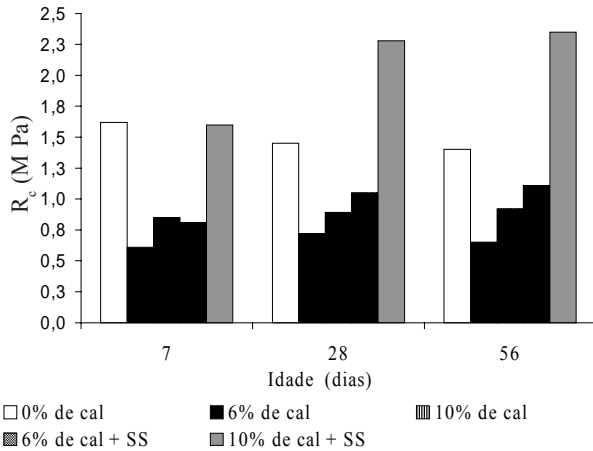


Figura 2. Desempenho mecânico de corpos-de-prova submetidos a ensaios de compressão simples em três idades de cura, como função da resistência à compressão simples ( $R_c$ ).

Essa norma estabelece, como mínimo, o valor médio de 2,0 MPa para a resistência à compressão simples. Em termos de capacidade de absorção total de água, nenhum tratamento atendeu às especificações da NBR 08491, que estabelece, como máximo, o valor médio de 20% e nenhum valor superior a 22%.

### CONCLUSÕES

1. O silicato de sódio afeta o comportamento mecânico do solo estudado, promovendo ganhos consideráveis na sua resistência à compressão simples.
2. Entre os tratamentos avaliados, os maiores valores de resistência à compressão simples são obtidos em corpos-de-prova com 56 dias de cura, tratados com 10% de cal e 4% de silicato de sódio. Apenas este tratamento atingiu o valor mínimo de resistência à compressão simples normalizado para tijolos prensados de solo-cimento (NBR 08491).
3. Em termos de absorção total de água, todos os tratamentos promovem valores de capacidade de absorção de água superiores àqueles estipulados pela NBR 08491. Isso sugere a necessidade de se efetuar outras estratégias para a melhoria do comportamento desse solo frente à ação de água.
4. Solos com características semelhantes ao estudado, desde que tratados com cal, associada ao silicato de sódio, podem ser promissores ao atendimento de demandas por tecnologias de baixo custo, associadas ao uso de solos estabilizados físico-quimicamente para fins de construções rurais.

Tabela 7. Incrementos de resistência dos corpos-de-prova cilíndricos pela incorporação de silicato de sódio

Teor de Cal	Ganhos de resistência (%)		
	7 dias	28 dias	56 dias
6%	32,79	45,83	70,77
10%	97,53	156,18	155,43

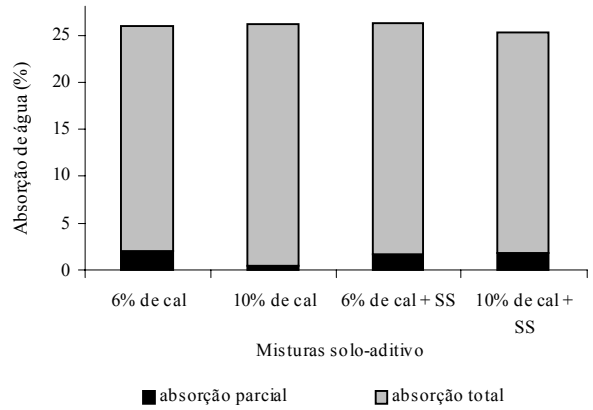


Figura 3. Capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova, avaliada aos sete dias de idade de cura, para quatro tratamentos de estabilização química de solos.

### REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1984a. NBR 07181. Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro. 13 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984b. Rio de Janeiro. NBR 06508. Solo: determinação da massa específica dos grãos do solo. Rio de Janeiro. 2 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984c. Rio de Janeiro. NBR 06459. Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 6 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1984d. NBR 07180. Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 3 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1986. NBR 07182. Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 10 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1990a. NBR 12024. Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 8 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1990b. NBR 12025. Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 8 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1992a. NBR 07175. Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro. 3 p.

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1992b. Rio de Janeiro. NBR 08491. Tijolo maciço de solo-cimento. Rio de Janeiro. 8 p.
- Brady, N. C. 1989. Natureza e propriedade dos solos. Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo Filho. 7 ed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro. 878 p.
- Bueno, B. S. & O. M Vilar. 1999. Mecânica dos solos. Vol. I. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 131 p.
- Fang, H. S. 1991. Foundation engineering handbook. Van Nostrand Reinhold, New York. 923 p.
- Freidin, K. & E. Erell. 1995. Bricks made of coal fly-ash and slag, cured in open air. *Cement & Concrete Composites*, 17(4): 289-300.
- Freire, W. J. 1976. Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 142 p
- Freire, W. J. 1981. Aditivos químicos e seus efeitos sobre a estabilidade de taludes e qualidade do material formado. Tese de Livre-Docência. Faculdade de Ciências Agrônômica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, São Paulo. 113 p.
- Guimarães, J. E. P. 1985. Tijolos de solo-cal. p. 121-130. In Reunião Aberta da Indústria da Cal, 5. São Paulo, SP. 323 p. Anais.
- Guimarães, J. E. P. 1992. Estabilização de solos com cal: princípios básicos. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, São Paulo. 102 p.
- Guimarães, J. E. P. 2002. A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, São Paulo. 341 p.
- Gutierrez, N. H. M., C. A. Krüger & M. T. Nóbrega. 1998. Efeitos da adição de cal e cimento nas propriedades físicas e mecânicas de um solo argiloso laterítico. p. 160-66. In Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 11. Brasília, Distrito Federal. 789 p. Anais.
- Houben, H. & H. Guillaud. 1994. Earth construction: a comprehensive guide. Intermediate Technology Publications, London. 362 p.
- Mendonça, A. A. & D. C. Lima. 1998. Caracterização tecnológica de misturas solo-cal: estudo de caso dirigido a dois solos de Viçosa-MG. p.178-185. In Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 11. Brasília, Distrito Federal. 789 p. Anais.
- Ngowi, A. B. 1997. Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. *Construction and Building Materials*, 11 (1): 1-7.
- Ren, K. B. & D. A. Kagi. 1995. Upgrading the durability of mud bricks by impregnation. *Building and Environment*, 30(3): 433-40.
- Ruff, C. G. & D. T. Davidson. 1961. Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. *Highway Research Board Bulletin*, 304 (1): 76-92.
- Sherwood, P. T. 1993. Soil stabilization with cement and lime: state of the art review. Hmso, London. 153 p.
- Webb, D. J. T. 1992. Lime stabilized soil blocks for third world housing. p. 246-257. In N. Hill, S. Holmes & D. Mather. Lime and other alternative cements. Intermediate Technology Publications, London. 390 p.