

Análise da Adição de Cal em um Solo Arenoso em Ensaios de Resistência à Compressão Simples e Colapsibilidade

Daniela M. Ide

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil

Anna Silvia P. Peixoto

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil

Gustavo Pompermayer

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil

RESUMO: Pesquisas têm mostrado que o solo da região de Bauru, caracterizado como areias pouco argilosas de comportamento laterítico, perde sua capacidade de suporte quando inundado, causando graves problemas de pavimentação, principalmente na época das chuvas. Dessa maneira, esse artigo tem como objetivo avaliar o comportamento desse solo misturado com cal calcítica CH-III nos teores de 4%, 6% e 8% em termos de colapsibilidade e resistência à compressão simples. Os resultados mostraram uma diminuição da tendência ao colapso para os três teores de cal. Adicionalmente, ocorreu um ganho expressivo de resistência à compressão simples sendo que, na umidade ótima, não houve diferença significativa para os tempos de cura de 14 e 28 dias.

PALAVRAS-CHAVE: Mistura Solo-Cal, Solo Colapsível, Compressão Simples, Compressão Edométrica.

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas desenvolvidas por professores da Unesp (campus Bauru) mostram que o solo da região de Bauru é caracterizado como areia pouco argilosa e através da classificação MCT, apresenta comportamento laterítico. Porém, quando inundado, o solo perde sua capacidade de suporte, causando problemas de pavimentação.

Dessa maneira, esse trabalho teve como objetivo apresentar o estudo da estabilização desse solo visando melhorar o comportamento do solo em relação às características mecânicas através da estabilização com cal. Foram analisadas três diferentes porcentagens de mistura solo-cal considerando sua melhoria quanto à resistência à compressão simples e tendência ou não a colapsibilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos Relativos à Mistura Solo-Cal
Optou-se, nesse trabalho, pela cal hidratada,

segundo as recomendações de Dias et al. (2003) que recomendaram a utilização da cal hidratada por questões de segurança e economia, pois a cal virgem quando adicionada à água provoca reações exotérmicas provocando elevação da temperatura e podendo causar danos aos operadores. Além disso, optou-se pela cal calcítica CH-III, pois além de ser mais segura e econômica, é a cal mais utilizada na estabilização de solos para fins rodoviários.

Os teores de cal de 4%, 6% e 8% também seguiram as recomendações de Dias et al. (2003). Os autores citaram a indicação de um teor mínimo de cal igual a 3%, pois valores inferiores normalmente proporcionam baixa reatividade nos solos. Já o teor máximo seria de 10%, por razões econômicas.

A adição de cal provoca reações pozolânicas em certos solos, que são responsáveis pela geração de agentes cimentantes, o que torna o solo menos sensível à penetração das águas infiltradas. Desse modo, a influência da cal na resistência foi estudada por muitos autores, como Mendonça (1998), Carvalho & Souza (1994) e Nardi (1987).

Mendonça (1998) observou ganhos substanciais na resistência mecânica, possibilitando a utilização de misturas solo-cal em bases e sub-bases.

Importante ressaltar que Nardi (1987) observou que os teores de cal de 4 e 6% apresentaram as melhores condições funcionais e estruturais e que misturas de elevada rigidez apresentam trincas de retração que podem refletir no revestimento betuminoso.

2.2 Aspectos Relativos à Colapsibilidade

A metodologia do ensaio de compressão edométrica adotada seguiu o indicado por Head (1982), no qual a inundação do corpo de prova só ocorre na tensão de pré-adensamento determinada no ensaio seco.

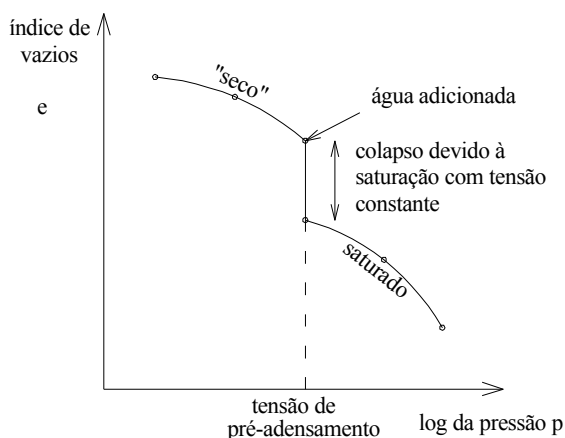


Figura 1. Efeito da determinação devido à saturação na curva $e/\log p$ apud (Head, 1982).

Vargas (2001) indica que o coeficiente de colapsibilidade (r) é a diferença de índice de vazios entre a curva saturada e seca, dividida por 1 mais o índice de vazios inicial, conforme equação 1. Quando esse índice for maior que 2%, tudo indica que o solo é colapsível.

$$r = \frac{\Delta e + \Delta e_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot 100(\%) \quad (1)$$

sendo:

Δe = variação do índice de vazios na tensão aplicada (pré-adensamento);

Δe_c = variação do índice de vazios devido à inundação;

e_0 = índice de vazios inicial e

H = altura do corpo-de-prova.

2.3 Aspectos Relativos à Compressão Simples

Para o estudo de resistência de misturas solo-cal, Carvalho & Souza (1994) recomendam o ensaio de compressão simples. Com os resultados, os autores observaram uma melhoria da trabalhabilidade, uma redução da plasticidade e um aumento da coesão não drenada, do ângulo de atrito e da resistência.

3 ENSAIOS

3.1 Caracterização do Solo

Primeiramente, foram realizados ensaios de caracterização com o solo natural, apresentados nas Tabelas 1 e 2, resultando numa areia fina argilosa. Segundo a classificação unificada, o solo foi classificado como areia argilosa (SC) de comportamento não-laterítico pela classificação MCT, ativo através do ensaio de azul de metileno proposto por Fabbri (1994) e colapsível através do ensaio de compressão edométrica.

Os resultados da classificação MCT difere das características obtidas em outros ensaios, pois o solo encontra-se numa camada mais superficial e muito lixiviada, fato esse também observado por Agnelli (1997).

Tabela 1. Índices físicos do solo natural sem adição de cal.

ρ_s (g/cm^3)	ρ_{nat} (g/cm^3)	ρ_d (g/cm^3)	W_{nat} (%)	η (%)	e	S_r (%)
2,638	1,337	1,257	6,38	52	1,098	15

Obs: ρ_s – massa específica dos sólidos;
 ρ_{nat} – massa específica do solo;
 ρ_d – massa específica aparente seca;
 W_{nat} – umidade natural do solo;
 η – porosidade; e – índice de vazios;
 S_r – grau de saturação.

Tabela 2. Características do solo natural.

$A_{média}$ (%)	A_{fina} (%)	Argila (%)	Silte (%)	$W_{ót}$ (%)	$\rho_{dmáx}$ (g/cm^3)	limites
07	79	13	01	9,5	1,950	NL/NP

Obs: $A_{média}$ – areia média;
 A_{fina} – areia fina;
 $W_{ót}$ – umidade ótima;
 $\rho_{dmáx}$ – massa específica aparente seca máxima;
NL/NP – solo não plástico.

3.2 Ensaios realizados

Ainda com o solo natural, foram realizados ensaios de compressão simples pelo método DNER-ME 180/94.

Com a mistura foram realizados os ensaios de compressão simples segundo a norma DNER-ME 180/94, além de ensaios de compressão edométrica (NBR 12007/90). A norma do DNER foi escolhida para continuação do estudo, pois é a indicada para solos estabilizados.

Nos ensaios de compressão simples foram considerados os períodos de cura de 7, 14 e 28 dias e nos de compressão edométrica o período de cura foi de 28 dias, pois nesse a mistura obteve a maior resistência.

4 RESULTADOS

4.1 Compressão Simples

Os resultados estão apresentados em 2 sub-ítem: solo natural e mistura solo-cal.

4.1.1 Solo Natural

O ensaio de compressão simples foi realizado em cinco umidades, obtidas através da curva de compactação com energia intermediária, seguindo a norma DNER-ME 180/94. Assim, para cada umidade, obteve-se uma tensão de ruptura, como indicado na Tabela 3.

Tabela 3. Tensão de ruptura e características dos cps.

Umidade (%)	5,31	7,39	9,68	11,49	13,31
ρ_d (g/cm ³)	1,854	1,925	1,948	1,917	1,834
Tensão (MPa)	0,21	0,18	0,13	0,12	0,08

4.1.2 Mistura Solo-Cal

Os resultados para os diferentes teores de cal estão representados nas Figuras 2, 3 e 4.

Para todos os teores e tempos de cura, as fissuras ocorreram verticalmente ou com pouca inclinação. Os corpos de prova com umidade acima da ótima apresentaram comportamento mais plástico, sendo visível um abaulamento pronunciado, além disso alguns não fissuraram.

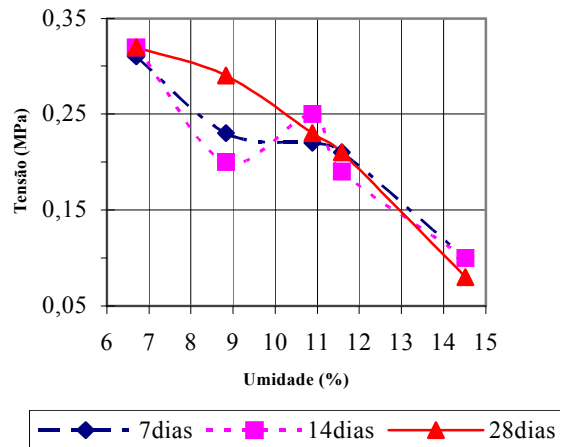


Figura 2. Curvas de resistência do teor de 4%.

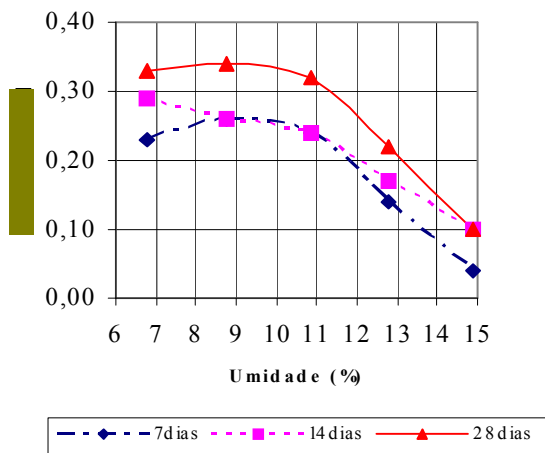


Figura 3. Curvas de resistência do teor de 6%.

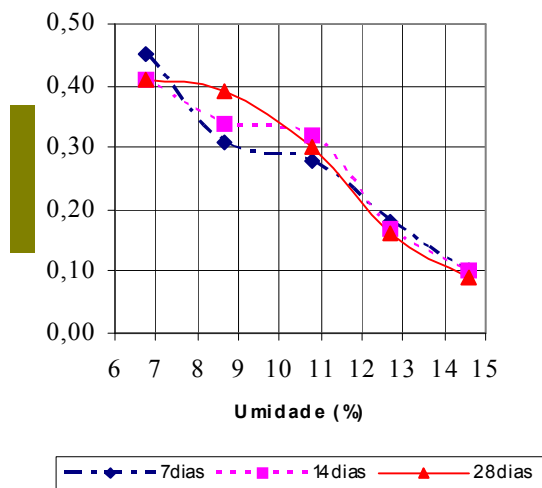


Figura 4. Curvas de resistência do teor de 8%.

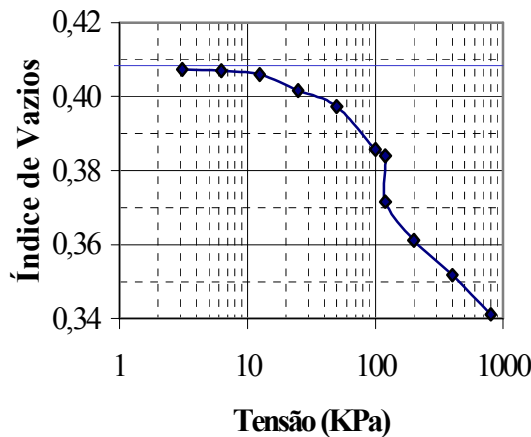
4.2 Compressão Edométrica

Os resultados do ensaio de compressão

edométrica estão divididos nos sub-itens a seguir.

4.2.1 Solo Natural

Utilizando o método de Pacheco Silva no ensaio de compressão edométrica sem inundação, obteve-se a tensão de pré-adensamento. Assim, realizou-se o ensaio de compressão edométrica com inundação na tensão de pré-adensamento determinada no ensaio seco, obtendo-se o gráfico da Figura 5.



$\sigma_a' = 120 \text{ kPa}$ $C_c = -3,654.10^{-2}$ $C_c' = -2,990.10^{-2}$

Figura 5. Curva de compressão edométrica com inundação do solo natural.

4.2.2 Mistura Solo-Cal

Utilizou-se o mesmo método do solo natural, ou seja, inundação na tensão de pré-adensamento obtida no ensaio seco.

Tabela 4. Resultados do ensaio de compressão edométrica.

Teor de cal	σ_a' (KPa)	C_c	C_c'
4%	110	$-3,986.10^{-2}$	$-2,331.10^{-2}$
6%	110	$-3,482.10^{-2}$	$-1,990.10^{-2}$
8%	96	$-4,035.10^{-2}$	$-2,699.10^{-2}$

Obs: σ_a' - tensão de pré-adensamento;
 C_c - índice de compressão;
 C_c' - índice de recompressão.

As curvas de compressão edométrica resultantes obtidas estão representadas na Figura 6.

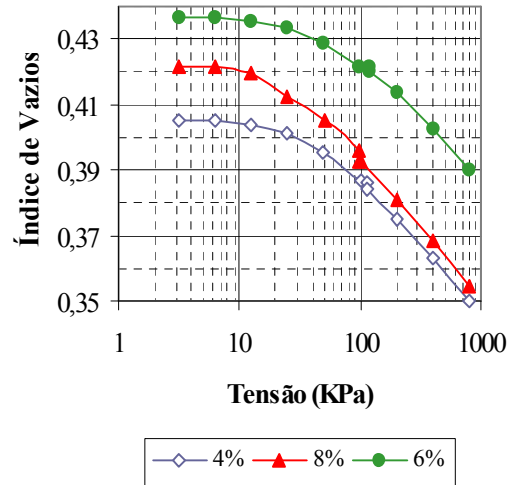


Figura 6. Curva de compressão edométrica das misturas.

Com os resultados obtidos, calculou-se o coeficiente de colapso “r” do solo natural e das misturas conforme proposto por Vargas (2001) representados na Tabela 5, a seguir.

Tabela 5. Valores de coeficiente de colapso.

	Solo natural	Teor de 4%	Teor de 6%	Teor de 8%
r (%)	4,91	2,89	2,39	4,19

Foram calculados também coeficientes de subsidência (Tab. 6) conforme indicado por Denisov (1951) *apud* Agnelli (1992) utilizando-se as equações 2, 3 e 4.

$$R_i = \frac{e_{pn} + e_{pi}}{1 + e_{pn}} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{e_o + e_{pn}}{1 + e_o} \quad (3)$$

$$R_t = \frac{e_o + e_{pi}}{1 + e_o} \quad (4)$$

Sendo:

- Ri – coeficiente de subsidência devido à inundação;
- Rp – coeficiente de subsidência devido à pressão;
- Rt – coeficiente de subsidência total;
- e_{pn} – índice de vazios na tensão de pré-adensamento, estado natural;
- e_{pi} – índice de vazios na tensão de pré-adensamento, após inundação;
- e_o – índice de vazios no estado natural.

Tabela 6. Valores de coeficiente de colapso.

	Solo natural	Teor de 4%	Teor de 6%	Teor de 8%
Ri (%)	0,87	0,14	0,07	0,27
Ri (%)	1,70	1,42	1,11	1,90
Ri (%)	2,56	1,56	1,18	2,18

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Compressão Simples

As resistências da mistura solo-cal, no ensaio de compressão simples, são significativamente maiores que as do solo natural e, entre as misturas, a resistência aumentou com a adição de cal (Fig. 2 a 4). Conforme observado por Consoli e Carraro (1998), a maior resistência à compressão ocorreu no ramo seco da curva de compactação, cerca de 2% de umidade a menos que a ótima. Nas umidades maiores que a ótima, os valores de compressão obtidos não apresentaram variação significativa. A adição de cal promoveu o aumento da resistência mecânica em relação ao solo natural, independentemente do tipo do solo e do teor de cal, corroborando Santanna (1998).

5.2 Compressão Edométrica

Verificou-se que, logo após a inundação dos corpos de prova, houve uma pequena variação no índice de vazios em todas as porcentagens de cal analisadas. Essa variação pode ser considerada insignificante quando comparada com a variação resultante obtida no ensaio com o solo natural (Fig. 5). Assim tem-se que, através dos resultados desses ensaios, o solo com adição de cal diminuiu a tendência a colapsibilidade. Apesar da reação da cal ser lenta e progressiva, seu efeito pode ser observado em curto prazo, como pode ser observado na Figura 6.

Nota-se ainda uma diminuição da colapsibilidade, pois o coeficiente de colapso “r” diminuiu com a adição de cal, apresentando o melhor resultado na mistura com 6% de cal (Tab. 5).

Os coeficientes de subsidência também apresentaram os melhores resultados como teor de 6%, confirmando os valores obtidos pelo coeficiente de colapso. Uma vez que o limite indicado por Agnelli (1992) *apud* Denisov

(1951) é de 2%, tem-se que os teores de 4 e 6% não são colapsíveis.

6 CONCLUSÕES

Os ensaios realizados nessa pesquisa mostraram que o acréscimo de cal ao solo arenoso estudado trouxe vantagens, tanto na melhoria de capacidade de suporte, como na diminuição da tendência ao colapso. É importante também acrescentar que os resultados mais significativos ocorreram para as porcentagens de cal de 6% e 8% no ensaio de compressão simples e de 6% no ensaio de compressão edométrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar os seus agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa - Fapesp, aos técnicos dos laboratórios de Engenharia Civil - Sr. Felisberto, Célia e Israel.

REFERÊNCIAS

- Agnelli, N. *Comportamento de um Solo Colapsível inundado com Líquidos de Diferentes Composições Químicas*. São Carlos. 1997. 219p. Dissertação de Doutorado. EESC/USP.
- Agnelli, N. *Estudo da Colapsibilidade do Solo de Bauru Através de Provas de Cargas Diretas*. São Carlos. 1992. p 15. Dissertação de Mestrado. EESC/USP.
- Carvalho, J. B. e Souza, G. S. (1994). Resistência ao Cisalhamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, X. ABMS. Foz do Iguaçu, PR. Vol. 2 p.581-586.
- Consoli, N. C. e Carraro, J. A. H. (1998) A influência das Condições de Compactação no Comportamento de uma Mistura de Solo-Cinza-Cal. In: *Solos e Rochas*. São Paulo. p 167-173.
- Dias, G. F.; Barros, I. R.; Dias, M. E. P. (2003). Análise Laboratorial de uma Mistura de Solo-Cal como Alternativa para Pavimentação na Região da Grande Natal. Trabalho n°19. In: *12ª Reunião de Pavimentação Urbana*. Aracaju.
- Head, K. H. (1982) *Manual of Soil Laboratory Testing*. Vol. 2: Permeability.
- Mendonça, A. A. *Caracterização Tecnológicas de Misturas Solo-Cal*. Dissertação de Mestrado. Viçosa - MG. 1998.
- Nardi, J. V. *Cinza Volante e Cal Hidratada na Estabilização de Solos Arenosos para Construção de*

Sub-bases e Bases de Pavimentos. Rio de Janeiro. 1987. DNER.

Santanna, J. A. *Estudo do Comportamento de Solos Artificiais em Função da Variação das Características de sua Fração Grossa*. São Carlos. 1998. p 26-99. Dissertação de Mestrado. EESC/USP.

Vargas, M. (2001) *Solos Porosos e Colapsíveis*. São Carlos. EESC-USP. Departamento de Geotecnia.