

EFEITOS DE ADITIVOS QUÍMICOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA E ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM SOLO ARENO-ARGILOSO.

I. EFEITOS DO SILICATO DE SÓDIO

Wesley Jorge Freire ¹

INTRODUÇÃO

O efeito da aplicação de um aditivo ao solo varia muito em função das características do solo e das condições sob as quais o mesmo é aplicado. A quantidade do produto usado, o estado inicial de agregação do solo e seu teor de umidade, a natureza e teor de argila, a concentração e forma de apresentação, bem como o maior ou menor grau de contacto entre o produto e o solo ao qual foi incorporado, são fatores que afetam não apenas a eficiência do aditivo químico mas, também, a intensidade e duração de seu efeito.

SHERWOOD & ENGIBOUS (1953) frisaram que os solos muito argilosos, com problemas de compactação e encrustamento superficial ou exibindo condições físicas indesejáveis, são os que melhor respondem ao tratamento com aditivos. Solos naturalmente bem estruturados reagem pouco ou até mesmo negativamente ao tratamento.

LAWS & PAGE (1946) recomendaram o tratamento de solos barro-siltosos com silicato de sódio com a finalidade de se conseguir um aumento do seu grau de agregação e conseqüentemente, uma melhoria nas suas condições físicas. Observaram estes autores que silicatos de sódio de maior relação $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ são mais eficientes condicionadores de solo que os demais. Posteriormente, DUTT (1948) concluiu que a fração sílica dos silicatos solúveis é a grande responsável pela formação de agregados estáveis em água.

Com efeito, sabe-se que o silicato de sódio reage

¹ Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, SP.

com os sais de cálcio solúveis, presentes na água do solo, formando silicatos de cálcio, gelatinosos e insolúveis, de ação cimentante comprovadamente eficiente. Estes silicatos de cálcio, assim formados, preenchem os vazios do solo, expulsando a água e melhorando sua estabilidade estrutural.

Ao tratar um solo argiloso com uma solução de silicato de sódio, LAWS (1950) notou uma nítida alteração em sua aparência e tato. Mesmo quando umedecido até a capacidade de campo, o solo se apresentou menos pegajoso, perdendo a maioria das propriedades plásticas associadas aos solos muito argilosos e passando a se comportar como um solo barrento. Comprovou o autor um aumento extraordinário da friabilidade do solo tratado bem como uma grande redução de sua capacidade de contração e expansão.

O silicato de sódio, usado como estabilizante de solo, exerce ação cimentadora que, de acordo com SILVEIRÁ (1967), resulta em impermeabilização e aumento de resistência, muito embora de efeito residual desconhecido.

Se aplicado em pequenas doses (0,1% ou menos, em relação ao peso seco do solo), o efeito agregativo do silicato de sódio não é significativo, conforme relatou SINGH (1955); em altas concentrações, por outro lado, JAMISON (1954) observou que este produto desenvolve forte alcalinidade no solo ao qual é adicionado. Por este motivo, e também por causa da impermeabilidade conferido ao solo por alguns produtos químicos sintéticos, tais como os silicatos de sódio e de potássio, MARTIN (1953) e TAYLOR & MARTIN (1953) justificaram seu desuso, em condições de campo e para fins agrícolas, a despeito de sua comprovada eficiência como agentes agregativos.

Pesquisando o efeito do silicato de sódio sobre o solo, FREIRE (1979) concluiu que a aplicação de 1,2% do produto aumentou a estabilidade estrutural do solo argiloso estudado, exercendo forte poder agregativo sobre as frações do solo de menor diâmetro; tal tratamento diminuiu, ainda, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o peso específico aparente seco, aumentando o índice de

mostrou-se menos eficiente que a anterior, quanto ao seu efeito sobre o solo argiloso.

Já nos primórdios do século XIX, os silicatos solúveis foram utilizados como aditivos de pedras artificiais, visando a aquisição de maior resistência. De acordo com RUFF & DAVIDSON (1961), a literatura relata que, em 1910, o silicato de sódio foi empregado no tratamento de leitos carroçáveis de terra, como produto deliquescente, com a finalidade de impedir a formação de poeiras; de forma semelhante, a mistura de silicato de sódio e calcário finamente dividido foi usada como aglomerante de macadame em leitos de estradas pavimentadas com pedras britadas.

Em combinação com outras soluções, como, por exemplo, cloreto de cálcio, o silicato de sódio vem sendo usado principalmente em injeções com o objetivo de consolidar e impermeabilizar rochas porosas, rochas de má qualidade e maciços terrosos, além de se pretender, com essa forma de aplicação, uma melhoria nas características de resistência dos materiais assim tratados.

JOHNSON *et alii* (1960) afirmaram que o silicato de sódio é particularmente indicado para a vedação de aquíferos ou vazamentos; contudo, não se tem notícia de seu uso na construção de estradas de rodagem.

Considerando que, de uma forma geral, as pesquisas salientam apenas os efeitos do silicato de sódio sobre as características físicas e químicas dos solos tratados, elaborou-se o presente trabalho com o objetivo de estudar os possíveis efeitos deste aditivo químico também sobre as características de resistência e sobre a estabilidade de talude de um solo areno-argiloso previamente selecionado.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo pesquisado é classificado, pedologicamente, como Latossol Vermelho Escuro - fase arenosa, pertencente à classe textural areno-argilosa, conforme os critérios do Bureau of Public Roads: seu pH em água

O silicato de sódio empregado é uma solução neutra, de relação sílica-álcali igual a 3,2, contendo 30,1% de SiO_2 em peso; as doses aplicadas foram 1% e 2% do aditivo químico, em relação ao peso do solo seco que, em todos os casos, compreendeu a fração menor do que 4,76 mm.

Após a aplicação dos tratamentos, a mistura solo-aditivo foi deixada em repouso, em condições ambientais, pelo período de um dia, antes de ser ensaiada em laboratório.

Todos os ensaios de laboratório foram conduzidos de acordo com as normas e realizados no Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP (Companhia Energética de São Paulo), em Ilha Solteira, SP.

O índice de vazios, porosidade e grau de saturação do solo, foram calculados a partir de fórmulas desenvolvidas em mecânica dos solos e deduzidas de relações entre os demais índices físicos previamente determinados.

A estabilidade estrutural do solo, determinada a partir dos dados da análise granulométrica, foi expressa através da porcentagem de agregados secos acumulada em peneira de 0,25 mm, que, de acordo com Tiulin, citado por BAVER (1966), é a fração responsável pela estabilidade estrutural do solo. A estabilidade foi expressa, também, através do módulo de finura, calculado da maneira usual, dividindo-se por 100 o somatório das porcentagens acumuladas nas peneiras utilizadas na análise granulométrica, o qual, segundo FREIRE e PIEDADE Jr. (1979) representa a estabilidade estrutural do solo com maior vantagem que os demais métodos que consideram apenas uma única fração de tamanho para expressar os dados de agregação.

A determinação do valor relativo do suporte do solo, a partir de amostras deformadas, moldadas por compactação estática, na umidade ótima e ao grau de compactação igual a 95% da compactação média máxima correspondente a cada tratamento, foi feita de acordo com o método de ensaio DNER-DPT M 50-64, elaborado pela Divisão de Pesquisas Tecnológicas do Departamento Nacional de Es-

tradas de Rodagem. O índice de suporte californiano (ISC), obtido pela relação porcentual entre a pressão calculada ou corrigida e a pressão padrão, correspondeu ao maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

Os corpos de prova para os ensaios de compressão simples e compressão triaxial foram moldados nas mesmas condições anteriores, com 5 cm de diâmetro, e rompidos em prensa de deformação controlada com velocidade de carregamento igual a 0,4572 cm/h.

No caso particular do ensaio de compressão triaxial rápido, não drenado, com medida de pressão neutra, simbolizado pela letra \bar{Q} , adotou-se o procedimento usual do Laboratório de Engenharia Civil da CESP para ensaios geotécnicos especiais. Após a montagem do ensaio, foi aplicada a pressão confinante programada (100, 200 e 300 KN/m²), fazendo-se, simultaneamente, as leituras de pressão neutra em intervalos crescentes de tempo, até sua estabilização, quando então o corpo de prova foi levado à prensa de ruptura.

Todos os ensaios de laboratório foram efetuados com três repetições, com exceção deste último, por motivo de força maior.

Para fins de análise de estabilidade de taludes, foram necessárias a fixação de certos parâmetros envolvidos no cálculo e a admissão de certas hipóteses que, segundo VARGAS (1977), constituem condições ideais.

Assim é que, em todos os casos, a inclinação do talude foi fixada em 45° e sua altura, em 30 metros. Admitiu-se, ainda, tratar de taludes homogêneos, simples, isotrópicos, sem possibilidade de percolação de água através do maciço e isentos de fendas de tração.

Em supondo-se tratar de uma barragem de terra, há de se supor, também, que a possibilidade de um rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório esteja afastada pois, neste caso, os ensaios triaxiais rápidos não drenados não seriam adequados conforme CAPUTO (1980).

Optou-se, neste trabalho, pela análise da estabilidade pelos métodos baseados na tensão total, pois, conforme LAMBE & WHITMAN (1979), não há preferência entre os métodos de análise de estabilidade de taludes baseados nos parâmetros de resistência total ou efetiva, para a etapa final de construção com solo parcialmente saturado (caso dos solos compactados na umidade ótima).

Preferiu-se, também, atribuir à barragem de terra características de ruptura plástica, motivo pelo qual os corpos de prova destinados aos ensaios de resistência foram moldados ao grau de compactação igual a 95% da máxima.

De entre os métodos de análise de estabilidade de taludes, foram escolhidos o método sueco ou das fatias, os âbacos de TAYLOR e o método de FELLENIUS para solos com atrito e coesão, todos eles descritos detalhadamente por FREIRE (1981).

Aos dados fornecidos pelo experimento aplicou-se uma análise estatística adequada a fim de que se pudesse avaliar os efeitos dos tratamentos, sob seus diversos aspectos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores do peso específico dos sólidos e do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do ensaio de compactação, bem como os valores do índice de vazios, porosidade e grau de saturação do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio, estão registrados no quadro I.

Os testes de significância estatística mostraram que o peso específico dos sólidos manteve-se inalterado sob tratamento com aditivo. Por outro lado, ambas as doses de silicato de sódio tiveram um efeito positivo sobre o peso específico aparente seco máximo, aumentando seus valores, quando comparadas com a testemunha, a níveis altamente significativos; o tratamento 1% SS (1% de silicato de sódio) contido foi superior até mesmo ao

tratamento 2% SS (2% de silicato de sódio) quanto ao seu efeito sobre o solo. Inversamente, os tratamentos que aumentaram os valores do peso específico aparente seco máximo, diminuíram, na mesma proporção, os valores da umidade ótima correspondente.

QUADRO I - Parâmetros de compactação e índices físicos do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio.

Tratamento	γ_s (KN/m ³)	$\gamma_{o\text{máx}}$ (KN/m ³)	h_{ot} (%)	e	n (%)	S (%)	
Test.	A	27,3	19,07	12,60	0,43	30,07	79,99
	B	27,3	19,15	12,50	0,42	29,58	81,25
	C	27,0	19,18	12,30	0,41	29,08	81,00
	\bar{X}	27,2	19,13	12,50	0,42	29,58	80,75
1% SS	A	27,4	20,04	10,40	0,37	27,01	77,02
	B	27,4	19,91	10,80	0,38	27,54	77,87
	C	27,4	20,15	10,60	0,36	26,47	80,68
	\bar{X}	27,4	20,03	10,60	0,37	27,01	78,52
2% SS	A	27,4	19,82	11,10	0,38	27,54	80,04
	B	27,4	19,80	11,20	0,38	27,54	80,76
	C	27,4	19,78	11,20	0,38	27,54	80,76
	\bar{X}	27,4	19,80	11,20	0,38	27,54	80,52

Test. = testemunha

SS = silicato de sódio

γ_s = peso específico dos sólidos

$\gamma_{o\text{máx}}$, h_{ot} = peso específico aparente seco máximo e umidade de ótima de compactação.

e, n, s = índice de vazios, porosidade e grau de saturação, respectivamente.

A, B, C = repetições

\bar{X} = média

Tanto o índice de vazios como a porosidade do solo sofreram significativa diminuição de seus valores, reagindo ao tratamento com silicato de sódio de forma inversa e proporcional à variação do peso específico aparente seco máximo. O grau de saturação, por sua vez, não foi afetado pelos tratamentos.

Os resultados encontrados acham-se compatíveis entre si e com a literatura, pois, como se sabe, a maiores valores de peso específico aparente seco máximo correspondem, nas mesmas condições, menores valores de umidade ótima, índice de vazios e porosidade do solo.

O quadro II apresenta os valores dos limites de consistência do solo estudado. Os dados, analisados estatisticamente, revelaram que ambas as doses de silicato de sódio provocaram um decréscimo altamente significativo nos valores do limite de liquidez, sendo maior o efeito da maior dose empregada, diferindo ambas entre si e em relação à testemunha. No que se refere ao limite de plasticidade, apenas o tratamento 1% SS diminuiu seu valor em relação à testemunha, posto que o tratamento 2% SS, aplicado ao solo areno-argiloso, o tornou não plástico, confirmando, de certa forma, as observações de LAWS (1950).

Quanto à composição granulométrica do solo areno-argiloso, registrada no quadro III, os resultados evidenciam o efeito agregativo do silicato de sódio sobre as partículas de menor tamanho, uma vez que as porcentagens de argila diminuíram progressivamente com o acréscimo nos teores de silicato de sódio, enquanto que as porcentagens de silte, proporcionalmente, aumentaram.

O tratamento 2% SS aumentou a porcentagem de areia fina, diferindo da testemunha e do tratamento 1% SS; diferiu, também, do tratamento 1% SS, quanto ao seu efeito sobre as frações argila e silte. A fração areia grossa não foi afetada pelos tratamentos com aditivo químico.

Variando suas características de granulometria e consistência, o solo areno-argiloso, sob tratamento com silicato de sódio, provavelmente terá seus níveis categó-

QUADRO II - Limites percentuais de consistência do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio.

Tratamento		Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade
Test.	A	26,0	14,0	12,0
	B	27,0	15,0	12,0
	C	26,0	14,0	12,0
	\bar{X}	26,3	14,3	12,0
1% SS	A	14,0	10,0	4,0
	B	14,0	10,0	4,0
	C	15,0	11,0	4,0
	\bar{X}	14,3	10,3	4,0
2% SS	A	12,0	NP	NP
	B	12,0	NP	NP
	C	12,0	NP	NP
	\bar{X}	12,0	NP	NP

ricos alterados, principalmente se classificado pelos sistemas que adotam critérios como aqueles retro - mencionados.

O quadro IV apresenta os valores de porcentagem acumulada em peneira nº 60 (0,25 mm) e módulo de finura dos agregados do solo areno-argiloso, obtidos a partir da análise granulométrica. Quanto ao primeiro parâmetro de estabilidade estrutural, os testes de significância nada acusaram; porém, com relação ao módulo de finura, a análise apontou o efeito altamente positivo do tratamento 2% SS que, comparado com a testemunha e com o tratamento 1% SS, aumentou os valores deste índice estrutural.

Como o efeito agregativo do silicato de sódio se evidenciou principalmente sobre as partículas de menor tamanho do solo, os resultados obtidos corroboram as conclusões de FREIRE & PIEDADE JR. (1979) no sentido de

QUADRO III - Composição granulométrica porcentual do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio, baseada na classificação do BRP (Bureau of Public Roads) e ASTM (American Society for Testing Materials).

Tratamento		Argila ($\phi < 0,005\text{mm}$)	Silte ($0,005-0,074\text{mm}$)	Areia fina ($0,074-0,42\text{mm}$)	Areia grossa ($0,42-2,00\text{mm}$)
Test.	A	35,0	17,5	45,9	1,6
	B	31,0	18,5	48,5	2,0
	C	33,0	18,6	46,8	1,6
	X	33,0	18,2	47,1	1,7
1% SS	A	24,0	28,0	46,0	2,0
	B	25,0	26,0	47,0	2,0
	C	24,0	27,8	46,2	2,0
	X	24,3	27,3	46,4	2,0
2% SS	A	18,0	31,0	49,5	1,5
	B	16,0	31,0	51,2	1,8
	C	15,0	32,0	51,4	1,6
	X	16,3	31,3	50,7	1,6

que o módulo de finura, permitindo observar e comparar a formação de agregados maiores quanto maior for o seu valor, é melhor índice de estabilidade estrutural do solo que a porcentagem acumulada de agregados em peneira nº 60. Os resultados confirmam, também, as conclusões de LAWS & PAGE (1946), MARTIN (1953), TAYLOR & MARTIN (1953) e FREIRE (1979).

O quadro V registra os dados referentes aos ensaios de suporte californiano e de resistência à compressão simples não confinada. Os testes de significância mostraram que o tratamento do solo com 2% de silicato de sódio aumentou o ISC (Índice de Suporte Californiano) do solo areno-argiloso estudado apenas quando comparado com

QUADRO IV - Porcentagem acumulada em peneira de 0,25 mm e módulo de finura dos agregados do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio.

Tratamento		Porcentagem acumulada em peneira de 0,25mm	Módulo de finura
Test.	A	8,40	0,56
	B	8,50	0,58
	C	8,50	0,56
	\bar{X}	8,47	0,57
1% SS	A	8,80	0,58
	B	8,80	0,58
	C	8,80	0,58
	\bar{X}	8,80	0,58
2% SS	A	8,50	0,61
	B	9,80	0,63
	C	8,40	0,63
	\bar{X}	8,90	0,62

o tratamento 1% SS que alcançou o menor valor. O teste de Tukey, aplicado aos dados de expansão relativa dos corpos de prova, revelou que o tratamento 1% SS aumentou seus valores, suplantando a testemunha e o tratamento 2% SS.

Neste particular, o silicato de sódio se comportou de maneira peculiar, conferindo ao solo características de rigidez, a tal ponto de provocar a ruptura do corpo de prova a penetrações muito inferiores à penetração padrão (0,03" para o tratamento 1% SS e 0,04" para o tratamento 2% SS, média de três repetições) e a pressões muito superiores à padrão (1,26 vezes maior, para o tratamento 1% SS, e 1,60 vezes maior, para o tratamento 2% SS, em média). Conquanto os valores de ISC não sejam elevados, não há limitação ao uso do solo, tratado ou não com si

QUADRO V - Valores de índice de suporte californiano - (ISC) e de resistência à compressão simples não confinada do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio.

Tratamento	Ensaio de suporte californiano		Resistência à compressão simples		
	ISC (%)	Expansão (%)	Tensões totais (KN/m ²)	Tensões efetivas (KN/m ²)	
Test.	A	13,5	0,09	171	171
	B	10,4	0,08	184	184
	C	13,5	0,09	203	203
	X	12,5	0,09	186	186
1% SS	A	5,2	0,44	291	291
	B	8,2	0,32	292	292
	C	7,2	0,46	313	313
	X	6,9	0,41	299	299
2% SS	A	27,2	0,11	170	169
	B	22,5	0,13	178	177
	C	21,1	0,13	171	169
	X	23,6	0,12	173	172

Os testes de significância estatística, aplicados aos dados do ensaio de compressão simples não confinada, revelaram que o tratamento 1% SS aumentou o valor da resistência à compressão simples, tanto em termos de pressões totais como em termos de pressões efetivas, a níveis altamente significativos, quando comparados com a testemunha e com o tratamento 2% SS.

Apesar de compactado no teor de umidade ótima, o solo o foi, também, ao grau de compactação igual a 95% da máxima. Isso fez com que, relativamente, o índice de vazios aumentasse e, conseqüentemente, o grau de saturação diminuísse; ora, esse maior volume de vazios fez com que o desenvolvimento de pressões neutras fosse inexpressivo.

sivo levando a pequena ou nenhuma diferença entre as tensões totais e efetivas, conforme se pode observar no quadro V.

As equações de resistência ao cisalhamento, da forma $\tau = c + \sigma \cdot \text{tg } \phi$, expressas em termos de tensões totais e obtidas a partir de envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb, foram as seguintes:

- para a testemunha: $\tau = 74 + \sigma \cdot \text{tg } 24^{\circ}30'$
- para o tratamento 1% SS: $\tau = 89 + \sigma \cdot \text{tg } 31^{\circ}30'$
- para o tratamento 2% SS: $\tau = 75 + \sigma \cdot \text{tg } 25^{\circ}30'$

onde τ = resistência ao cisalhamento do solo (kN/m^2), c = coesão do solo (kN/m^2), σ = pressão total normal ao plano de cisalhamento (kN) e ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

Em termos de tensões efetivas, as equações de resistência ao cisalhamento apresentaram os seguintes valores:

- para a testemunha: $\bar{\tau} = 50 + \bar{\sigma} \cdot \text{tg } 29^{\circ}$
- para o tratamento 1% SS: $\bar{\tau} = 92 + \bar{\sigma} \cdot \text{tg } 31^{\circ}$
- para o tratamento 2% SS: $\bar{\tau} = 59 + \bar{\sigma} \cdot \text{tg } 27^{\circ}30'$

Para os valores de coesão total, verificou-se um aumento, em relação à testemunha, de 1,20 vezes para o tratamento do solo com 1% de silicato de sódio, e apenas 1,01 vezes, para o tratamento 2% SS. O ângulo de atrito interno, por sua vez, aumentou 1,28 vezes, em função do tratamento 1% SS e apenas 1,04 vezes, para o tratamento 2% SS. Os valores da coesão efetiva, por outro lado, apresentaram valores superiores aos da coesão total, sendo que, em relação à testemunha, o tratamento 1% SS aumentou seu valor 1,04 vezes, e o tratamento 2% SS, 1,18 vezes. O ângulo de atrito interno efetivo, por sua vez, aumentou 1,07 vezes sob o tratamento 1% SS, em relação à testemunha, experimentando mesmo um decréscimo quando o solo foi tratado com a dose maior de silicato de sódio.

e ângulo de atrito interno, em termos de tensões totais e efetivas, não tenham sido notáveis, o tratamento do solo areno-argiloso com 1% de silicato de sódio permitiu os maiores acréscimos; a dose maior praticamente não diferiu da testemunha.

Os resultados do cálculo da estabilidade dos taludes de terra, pelo método sueco e através dos âbacos de Taylor, estão expressos no quadro VI.

QUADRO VI - Fator de segurança (FS) e fator de estabilidade (N_c) determinados a partir da análise da estabilidade de taludes, pelo método das fatias e pelos âbacos de Taylor, para o caso do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio.

Tratamento	Método das fatias		Âbacos de Taylor	
	FS	(1,62=1,00)	N_c	(1,68=1,00)
Testemunha	1,62	1,00	1,68	1,00
1% SS	2,00	1,23	2,05	1,22
2% SS	1,63	1,01	1,68	1,00

Cada fator de segurança (FS), calculado pelo método sueco, representa o menor valor encontrado entre vinte e um outros, cada um deles correspondendo a um círculo hipotético de ruptura. Todos os tratamentos, inclusive a testemunha, apresentaram valores de FS superiores a 1,5, o que, segundo o método, caracterizam taludes estáveis. Em relação à testemunha, o tratamento 2% SS praticamente não se diferenciou, enquanto que o tratamento 1% SS aumentou apenas 1,23 vezes o valor de FS.

Com relação aos valores do fator de estabilidade (N_c), calculados através dos âbacos de TAYLOR, os núme-

O método de FELLENIUS, aplicado à análise de taludes de solos com atrito e coesão, permitiu calcular os valores das alturas críticas dos taludes verticais (H_{90}), das alturas críticas até às quais os taludes se mantêm estáveis com a inclinação $i = 45^\circ$ (H_{Cr}) e dos ângulos máximos de taludes para a altura fixa de 30 metros ($i_{m\acute{a}x}$); os resultados estão apresentados no quadro VII.

QUADRO VII - Análise da estabilidade de taludes de solos com atrito e coesão, pelo método de Fellenius, para o caso do solo areno-argiloso tratado com silicato de sódio.

Tratamento	Parâmetros de estabilidade		
	H_{90} (m)	H_{Cr} (m)	$i_{m\acute{a}x}$
Testemunha	15,69	58,22	60°
1% SS	17,98	91,89	70°30'
2% SS	15,36	54,60	59°45'

H_{90} = altura crítica do talude vertical;

H_{Cr} = altura crítica até a qual o talude se manterá com a inclinação $i = 45^\circ$;

$i_{m\acute{a}x}$ = ângulo máximo de talude para a altura $H = 30m$.

Os resultados mostraram que, em relação à testemunha, o tratamento 1% SS provocou acréscimos de 1,14 vezes no valor de H_{90} , 1,58 vezes no valor de H_{Cr} e 1,17 vezes no valor de $i_{m\acute{a}x}$; por outro lado, o tratamento 2% SS reduziu a 0,98 o valor unitário de H_{90} , a 0,94 o valor de H_{Cr} e a 0,99 o valor de $i_{m\acute{a}x}$.

A determinação do pH, em água, do solo areno-argiloso empregado, indicou os valores 5,28, para a testemunha; 3,54, para o tratamento 1% SS; e 9,66, para o tratamento 2% SS. Tal acréscimo na alcalinidade do solo, verificado em função do tratamento com silicato de sódio, es

tã de acordo com as conclusões de JAMISON (1954), MARTIN (1953) e TAYLOR & MARTIN (1953).

Os tratamentos que conduzem a maior ganho de resistência são, de acordo com a literatura, aqueles que provocam no solo maior acréscimo no valor do peso específico aparente seco máximo e maiores decréscimos da umidade ótima, porosidade e índice de vazios. Muito embora ambos os tratamentos do solo com silicato de sódio tenham satisfeito estas condições, o efeito do tratamento 1% SS foi muito maior que o efeito do tratamento 2% SS, permitindo ao solo areno-argiloso alcançar maiores valores de resistência à compressão simples, maiores valores de coesão e ângulo de atrito interno totais e efetivos, maiores valores de fator de segurança e fator de estabilidade, aumentando, ainda, os parâmetros de estabilidade determinados através do método de FELLENIUS. O tratamento 2% SS, por outro lado, não alterou o valor da resistência à compressão simples e não diferiu sequer da testemunha, quanto ao seu efeito sobre os valores de coesão e ângulo de atrito interno (expressos em termos de tensões totais) e sobre os fatores de segurança e de estabilidade, chegando mesmo a diminuir os parâmetros de estabilidade de taludes tais como propostos por FELLENIUS.

CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi realizado, os resultados obtidos, analisados e interpretados estatisticamente, permitiram que se tirassem as seguintes conclusões:

- Ambas as doses de silicato de sódio empregadas aumentaram os valores do peso específico aparente seco máximo do solo areno - argiloso, e diminuíram, conseqüentemente, a porosidade e índice de vazios; o maior efeito correspondeu ao tratamento 1% SS.
- O tratamento 1% SS aumentou o valor da resistên-

da, os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, dos parâmetros de estabilidade e dos fatores de segurança e de estabilidade dos taludes analisados; o tratamento 2% SS pouco ou nenhum efeito teve sobre a resistência do solo, chegando mesmo a diminuir os parâmetros de estabilidade de taludes determinados através do método de FELLENIUS.

- O silicato de sódio conferiu ao solo areno-argiloso maior rigidez, denunciada através do ensaio de suporte californiano.
- O silicato de sódio exerceu forte efeito agregativo sobre as partículas do solo de menor tamanho, com o tratamento 2% SS suplantando os demais.
- O módulo de finura dos agregados do solo evidenciou o efeito do tratamento 2% SS sobre a estabilidade estrutural do material solo-aditivo.

RESUMO

Um solo areno-argiloso foi tratado com 1% e 2% de silicato de sódio e seus efeitos avaliados em condições de laboratório.

Através dos ensaios de caracterização, foram determinados os índices físicos, os limites de consistência e as frações constituintes do solo. Os ensaios de compactação forneceram os valores do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima correspondente. Foi calculada, também, a estabilidade estrutural dos agregados do solo. Os ensaios de resistência compreenderam o ensaio de suporte californiano, o ensaio de compressão simples não confinada e o ensaio triaxial rápido não drenado.

A análise de estabilidade dos taludes de terra foi feita através do método das fatias, dos âbacos de TAYLOR e do método de FELLENIUS, utilizando-se, para tal, dos dados fornecidos pelo experimento.

Os resultados mostraram que o tratamento com silicato de sódio afetou os índices físicos do solo, exerceu forte poder agregativo sobre suas partículas de menor tamanho e conferiu ao mesmo características de rigidez.

O tratamento com 1% de silicato de sódio afetou positivamente a resistência à compressão simples, a resistência ao cisalhamento e a estabilidade dos taludes analisados, o mesmo não ocorrendo com a dose maior de silicato de sódio.

SUMMARY

THE EFFECTS OF CHEMICAL ADDITIVES ON STRENGTH CHARACTERISTICS AND SLOPE STABILITY OF A SAND-CLAYEY SOIL. I. THE EFFECTS OF SODIUM SILICATE

A sand-clayey soil was treated with a solution of 1 and 2 percent of sodium silicate and submitted to laboratory tests.

The physical indexes of the soil as well as the Atterberg limits and grain-size distribution were firstly determined. The soil moisture - density test provided the values of dry unit weight and optimum moisture content, required for molding test specimens. The structural stability of soil aggregates was also determined. The California Bearing Ratio and the unconfined compressive strength tests were conducted according to routine methods. The shear stress parameters were determined through the undrained triaxial compression test.

The earth slope stability analysis was done by the Swedish graphical method for rotational failure, TAYLOR's charts and FELLENIUS method.

The results showed that sodium silicate treatments affected the physical indexes, aggregated soil particles of less diameter and conferred to soil rigidity cha-

The dosage of 1 percent of sodium silicate positively affected the unconfined compressive strength, shear stress parameters and slope stability, while the dosage of 2 percent showed the worst results.

LITERATURA CITADA

- BAVER, L.D., 1966. **Soil Physical**, 3rd Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc., 489p.
- CAPUTO, H.P., 1980. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**, vol. 1., 5^a ed. rev. e ampliada, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 219p.
- DUTT, A.K., 1948. Mechanism of aggregation of clay minerals by soluble silicates. **Soil Sci.** 65: 309-319.
- FREIRE, W.J., 1979. O silicato de sódio e seu efeito sobre o solo. **Rev. Agricultura** 54(3): 165-178.
- 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 Agrônômicas, UNESP, Botucatu, 113p.
- FREIRE, W.J. & C. PIEDADE JR., 1979. O módulo de finura dos agregados do solo como um índice de estabilidade de estrutura. **Eng. Agric.**, Botucatu, 3(2): 29-36.
- JAMISON, J.C., 1954. The effect of some soil conditions on friability and compactibility of soils. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 18: 391-394.
- JOHNSON, A.W., M. HERRIN, D.T. DAVIDSON & R.L. HANDY, 1960. **Soil stabilization**. In: Woods, K.B. **Highway Engineering Handbook**, New York, McGraw-Hill Book Co., Section 21 (p.21.1 - 21.133).
- LAMBE, T.W. & R.V. WHITMAN,, 1979. **Soil Mechanics, SI Version**, New York, John Wiley & Sons, 553p.
- LAWS, W.D., 1950. **Water-soluble silicate application to**

- a calcareous clay soil and effect on soil properties and nutrient uptake by plants. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 15: 89-92.
- LAWS, W.D. & J.B. PAGE, 1946. Silicate of soda as a soil -aggregating agent. **J. Amer. Soc. Agron.** 38: 95-97.
- MARTIN, W.P., 1953. Status report on soil conditioning chemicals, I. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 17 (1): 1-9.
- RUFF, C.G. & D.T. DAVIDSON, 1961. Lime and sodium silicate stabilization of montmorillonite clay soil. **High way Res. Board B.** 304: 76-92.
- SHERWOOD, L.V. & J.C. ENGIBOUS, 1953. Status report on soil conditioning chemicals, II. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** 17(1): 9-16.
- SILVEIRA, E.B.S., 1967. **Estabilização do solo: notas de aula**, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, publicação nº 129, 52p.
- SINGH, R., 1955. A review on the use of synthetic soil conditioners. **Sci. and Cult.** 20(10): 483-486.
- TAYLOR, G.S. & W.P. MARTIN, 1953. Effect of soil -aggregating chemicals on soils. **Agr. Engng.** 34(8): 550-554.
- VARGAS, M., 1977. **Introdução à mecânica dos solos**, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 509p.