

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

Wesley Jorge Freire ¹

INTRODUÇÃO

O cimento, como agente estabilizador do solo, teve sua história iniciada em 1916, nos Estados Unidos da América; vinte anos depois, o Brasil fundou sua Associação Brasileira de Cimento Portland com o objetivo de regulamentar, pesquisar e fomentar o uso e aplicação do solo-cimento.

Quase todos os solos podem ser estabilizados com cimento, muito embora haja alguns que, pelo fato de acarretarem maior consumo daquele aglomerante, tornam-se economicamente inviáveis.

O solo-cimento, executado apenas com areia, assume as características de argamassa, material de ruptura frágil, cujo problema é da maior relevância quando se refere a diques e barragens; seu abrandamento se consegue pela diminuição do teor de cimento ou pelo acréscimo do conteúdo de silte mais argila. Sob este aspecto, os solos sílico-argilosos (silte mais argila igual ou superior a 10%) são, de acordo com BASÍLIO (1973), os mais adequados para fins de solo-cimento, por apresentarem ruptura semi-plástica.

As partículas de cimento envolvem, fisicamente, os grânulos do solo formando os agregados que aumentam de tamanho à medida que se processam a hidratação e cristalização do cimento. CHADA (1979) & FELT (1955) chegaram a verificar que o teor de argila decresce com o aumento do teor de cimento.

Mesmo solos misturados com pequenas quantidades de cimento apresentam características de suporte muito superiores a de outros materiais empregados como base de pavimentos flexíveis; de acordo com PINTO (1960), isto se deve à coesão química criada pelo cimento, cujo efeito cessa se o material for desagregado.

¹ Universidade Estadual de Campinas - SP

FELT (1955) concluiu que a adição de cimento ao solo argiloso efetivamente reduz seu índice de plasticidade e aumenta seu limite de contração.

Já de longa data, STANTON et alii (1943) mostraram que um decréscimo de 5%, no valor do peso específico aparente seco máximo do solo - cimento, ocasiona uma diminuição de resistência igual à provocada por redução de 10 a 15% na quantidade de cimento. Semelhantemente, FELT (1955) relatou que, de modo geral, a cada $0,2 \text{ kN/m}^3$ de diferença, abaixo do peso específico aparente seco máximo de compactação, resulta uma diminuição de 110 a 180 kN/m^2 no valor da resistência à compressão simples, muito embora o método SC-2 da ABCP (1972), que fixa o modo pelo qual se moldam corpos de prova de solo-cimento, admita uma tolerância de mais ou menos $0,3 \text{ kN/m}^3$ para o valor do peso específico aparente seco máximo.

Solos tratados com cimento desenvolvem valores de coesão e atrito interno muito superiores àqueles obtidos a partir do solo original.

Após tratarem seixos quartzosos não plásticos com diferentes teores de cimento (0 a 10%), JOHNSON et alii (1960) concluíram que a coesão aumentou com o acréscimo no teor de cimento até um máximo, alcançando ao teor de 6%, e então decresceu, enquanto que o ângulo de atrito interno aumentou notavelmente entre 6 e 8%, dentro da faixa de pressão confinante usada.

Avaliando os resultados dos ensaios de compressão triaxial do solo-cimento, BALMER (1958) relatou que, enquanto a coesão variou consideravelmente com o teor de cimento e o tipo de solo, o ângulo de atrito interno manteve-se praticamente independente do teor de cimento, variando de 36° para solos siltosos a 45° para solos arenosos.

A estabilidade do solo-cimento é conseguida, principalmente, às custas da hidratação do cimento e não pela coesão e atrito interno dos componentes; daí poder-se utilizar, praticamente, todos os solos e combinações de solos para fins de solo-cimento.

Modernamente, segundo NUNES (1978), o solo - cimento vem sendo empregado na estabilização de taludes de barragens, substituindo a grama ou o enrocamento no talude de jusante e o enrocamento no de montante.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar os possíveis efeitos do cimento sobre as características de resistência e sobre a estabilidade de talude de um solo areno-argiloso previamente selecionado para tal fim.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo areno-argiloso, pedologicamente classificado como Latossol Vermelho Escuro-fase arenosa, foi tratado com 4% e 6% de cimento portland comum CP-320, porcentagem tomada em relação ao peso do solo seco.

A adição de cimento, nas dosagens pré-fixadas, foi feita espalhando-se o produto a seco sobre a superfície do solo e a ele incorporando-o, de maneira uniforme, após o que adicionou-se à mistura uma quantidade de água suficiente para elevar o seu teor de umidade até o da ótima de compactação, seguindo-se nova homogeneização.

Após a aplicação dos tratamentos, a mistura solo-cimento permaneceu em repouso, em condições ambientais, pelo período de sete dias, antes de ser ensaiada em laboratório. Os ensaios foram realizados no Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP (Companhia Energética de São Paulo), em Ilha Solteira, SP.

Todos os ensaios foram conduzidos de acordo com as normas e efetuados com três repetições, exceto no caso particular do ensaio de compressão triaxial rápido, não drenado, com medida de pressões neutras, executado sob pressão de confinamento iguais a 100, 200 e 300 kN/m².

Os corpos de prova destinados aos ensaios de resistência foram moldados por compactação estática, na umidade ótima e ao grau de compactação igual a 95% da compactação média máxima correspondente a cada tratamento.

A análise da estabilidade de taludes foi aplicada sobre taludes supostos homogêneos, simples, isotrópicos, com inclinação igual a 45° e altura igual a 30 metros, desconsiderando-se a possibilidade de percolação de água através do maciço e a presença de fendas de tração.

Para a determinação dos parâmetros de estabilidade dos taludes analisados foram empregados o método sue-

co ou das fatias e os âbacos de Taylor, tal como descritos por FREIRE (1981).

Aos dados obtidos aplicou-se uma análise estatística conveniente com a finalidade de avaliar os efeitos dos tratamentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No quadro I estão apresentados os valores do peso específico dos sólidos, parâmetros de compactação e índices físicos obtidos para o solo areno-argiloso tratado com cimento.

Estatisticamente, apenas o tratamento do solo com 4% de cimento diferiu da testemunha, aumentando o valor do peso específico aparente seco máximo e diminuindo, conseqüentemente, o teor de umidade ótima de compactação. Este mesmo tratamento provocou um decréscimo significativo no grau de saturação do solo.

No presente caso, o simples fato de que o peso específico aparente seco máximo de compactação tenha aumentado em função do tratamento com cimento não significa necessariamente que a resistência do solo-cimento se verá aumentada por causa disto, mesmo porque o ganho de resistência deste material se dá mais em função da hidratação do cimento do que em função da melhoria das características do solo. Pior seria a diminuição do peso específico aparente seco máximo da mistura solo - cimento pois este fato conduziria, segundo a literatura, a um decréscimo de resistência.

Uma vez que, segundo LAMBE & WHITMAN (1979), as pressões neutras crescem com o grau de saturação, diminuindo a segurança dos taludes em virtude da diminuição de resistência efetiva, tal como relatado por MELLO & TEIXEIRA (1971), COCKROFT et alii (1969) e CAMP & GILL (1969), infere-se que o tratamento do solo com 4% de cimento, tendo provocado uma diminuição do grau de saturação em relação à testemunha, levará a maior ganho de resistência efetiva.

A adição de cimento ao solo areno-argiloso teve um efeito marcante sobre sua composição granulométrica, cujos dados acham-se apresentados no quadro II.

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

Tratamentos	γ_s (kN/m^3)	$\gamma_{\text{omáx.}}$ (kN/m^3)	$h_{\text{ot.}}$ (%)	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
% SC A	27,3	19,23	12,20	0,42	29,58	79,30
B	27,3	19,27	12,10	0,42	29,58	78,65
C	27,3	19,31	11,90	0,41	29,08	79,24
\bar{x}	27,3	19,27	12,10	0,42	29,41	79,06
% SC A	27,3	19,15	12,10	0,42	29,58	78,65
B	27,3	19,27	12,20	0,42	29,58	79,30
C	27,3	19,19	12,30	0,42	29,58	79,95
\bar{x}	27,3	19,20	12,20	0,42	29,58	79,30

Test. = Testemunha; SC = cimento; γ_s = peso específico sólidos
 $\gamma_{\text{omáx.}}$ = peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de compactação
 $h_{\text{ot.}}$, n, S = índice de vazios, porosidade e grau de saturação, respectivamente.
 \bar{x} , B, C = repetições
 \bar{x} = média

QUADRO II - Composição granulométrica percentual do solo areno-argiloso tratado com cimento, baseada na classificação do BPR (Bureau of Public Roads) e ASTM (American Society for Testing Materials).

Tratamentos	Argila ($\phi < 0,005\text{mm}$)	Silte (0,005- 0,074mm)	Areia fina (0,074 - 0,42mm)	Areia grossa (0,42 - 2,00 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
4% SC				
A	28,0	24,0	46,2	1,8
B	30,0	22,0	46,2	1,8
C	26,0	26,0	46,2	1,8
- x	28,0	24,0	46,2	1,8
5% SC				
A	18,0	25,0	55,0	2,0
B	18,0	25,0	53,2	3,8
C	22,0	19,0	55,2	3,8
- x	19,3	23,0	54,5	3,2

Submetidos aos testes de significância estatística, os dados revelaram que o tratamento do solo com 6% de cimento provocou um decréscimo no teor de argila e um acréscimo no teor de areia fina, quando comparado com os demais tratamentos. O tratamento do solo com 4% de cimento, por sua vez, aumentou o teor de silte, apenas quando comparado com a testemunha.

No que se refere à fração argila, os resultados concordam com as conclusões de CHADA (1970) e FELT (1955), sendo que a diminuição do teor de argila, provocada pelo efeito agregativo do cimento, é compensada com o aumento dos teores das frações de maior diâmetro.

O quadro III expressa os valores da 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. O tratamento do solo com 6% de cimento aumentou significativamente, tanto a porcentagem acumulada em peneira nº 60 como o módulo de finura dos agregados do solo, em relação aos demais tratamentos.

Ambos os parâmetros utilizados para expressar a estabilidade estrutural do solo sob tratamento com aditivo foram coerentes entre si, identificando o tratamento que maior poder agregativo exerceu sobre as frações mais finas do solo. A estabilidade do solo-cimento é alcançada, segundo a literatura, principalmente por efeito da hidratação do cimento; todavia, como somente o tratamento do solo com 6% de cimento foi estatisticamente diferente dos demais, deduz-se que a dose 4% de cimento, aplicada ao solo, foi insuficiente para provocar agregação, dentro das condições deste trabalho.

O quadro IV registra os dados referentes ao ISC (Índice de Suporte Califórniense) e expansão dos corpos de prova submetidos ao ensaio, bem como os dados do ensaio de compressão simples não confinada.

Os testes de significância mostraram que o tratamento do solo com cimento aumentou significativamente, ao nível de 1% de probabilidade, o ISC do solo areno-argiloso estudado, embora as doses de cimento empregadas não diferissem entre si. Por outro lado, o teste de Tukey, aplicado aos dados de expansão relativa dos corpos de prova, revelou que esta é inversamente proporcional à quantidade de aditivo incorporada ao solo; e como a ex-

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

Tratamentos	Porcentagem acumulada em peneira de 0,25 mm	Módulo de finura
test.	A	0,56
	B	0,58
	C	0,56
	\bar{x}	0,57
% SC	A	0,55
	B	0,57
	C	0,56
	\bar{x}	0,56
% SC	A	0,64
	B	0,66
	C	0,67
	\bar{x}	0,66

QUADRO IV - Valores de índice de suporte californiano (ISC) e de resistência à compressão simples de amostras de concreto de solo arenoso-argiloso tratado com cimento.

Tratamentos	Ensaio de suporte californiano		Resistência à compressão simples	
	ISC (%)	Expansão (%)	Tensões totais (kN/m ²)	Tensões efetivas (kN/m ²)
Test.	A	0,09	171	171
	B	0,08	184	184
	C	0,09	203	203
	\bar{x}	0,09	186	186
1% SC	A	0,03	2092	2098
	B	0,02	2020	2031
	C	0,02	2163	2164
	\bar{x}	0,02	2092	2098
2% SC	A	0,01	2509	2509
	B	0,02	1853	1851
	C	0,03	2800	2800
	\bar{x}	0,02	2387	2387

pecto não há restrição alguma quanto ao aproveitamento do material formado para fins de construção de pavimentos flexíveis. Os acréscimos médios de ISC alcançados em relação à testemunha foram de 24,58 vezes (para a dose 4% de cimento) e de 23,10 vezes (para a dose 6% de cimento).

Quanto aos dados do ensaio de compressão simples não confinada, a análise estatística revelou que o tratamento do solo com cimento 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 comparado com a testemunha, embora não se constatasse diferença entre as doses de cimento utilizadas. Os acréscimos médios verificados foram de 11,25 vezes (para a dose 4% de cimento) e de 12,83 vezes (para a dose 6% de cimento).

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 4% SC: $\tau = 349 + \sigma \cdot \text{tg } 46^{\circ}$
- para o tratamento 6% SC: $\tau = 730 + \sigma \cdot \text{tg } 36^{\circ}$

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), ϕ = ângulo de atrito interno do solo; SC = solo-cimento.

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

- para a testemunha: $\bar{\tau} = 50 + \bar{\sigma} \cdot \text{tg } 29^{\circ}$
- para o tratamento 4% SC: $\bar{\tau} = 349 + \bar{\sigma} \cdot \text{tg } 46^{\circ}$
- para o tratamento 6% SC: $\bar{\tau} = 730 + \bar{\sigma} \cdot \text{tg } 36^{\circ}$

Para os valores de coesão total, verificou-se um aumento, em relação à testemunha, de 4,72 vezes para o tratamento do solo com 4% de cimento, e de 9,86 vezes, para o tratamento com 6% de cimento. O ângulo de atrito interno, por sua vez, aumentou 1,88 vez, em função do tratamento com 4% de cimento e 1,47 vez, para o tratamento com 6% de cimento. Os valores de coesão efetiva por outro lado, apresentaram valores superiores aos da testemunha total, sendo que para o solo com 4% de cimento a coesão efetiva foi de 1,88 vezes a da testemunha e para o solo com 6% de cimento a coesão efetiva foi de 1,47 vezes a da testemunha.

tamento com 4% de cimento aumentou seu valor 6,98 vezes, e o tratamento com 6% de cimento, 14,6 vezes. O ângulo de atrito interno efetivo, por sua vez, aumentou 1,59 vezes, em relação à testemunha, para o tratamento do solo com 4% de cimento, e de 1,24 vez, para a dose maior de cimento.

A coesão do material solo-cimento, sendo função da quantidade do aglomerante, encontrou comprovação prática, alcançando o maior valor para a dose maior de cimento; o inverso se deu com relação ao ângulo de atrito interno que, de acordo com BALMER (1958), independe do teor de aglomerante na mistura solo-cimento.

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

QUADRO V - Fator de segurança (FS) e fator de estabilidade de (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 cimento.

Tratamentos	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
4% SC	5,81	3,59	5,81	3,46
6% SC	9,40	5,80	9,08	5,40

No presente caso, 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. O tratamento do solo com cimento aumentou notavelmente o valor de FS, proporcionalmente à dose aplicada, bem como o valor do fator de estabilidade (N_C) calculado através dos âbacos de Taylor.

De um modo geral, o tratamento do solo com cimento teve um efeito marcante sobre as características do solo e sobre os parâmetros de resistência avaliados experimentalmente, principalmente quando considerada a dose 6% de cimento que, particularmente, levou aos maiores valores de resistência e conferiu aos taludes estudados maior estabilidade.

CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi realizado, os resultados obtidos permitiram concluir que:

- comparado com a testemunha, o tratamento do solo com 4% de cimento aumentou o peso específico aparente seco máximo e diminuiu, conseqüentemente, o teor de umidade ótima de compactação, diminuindo, também, o grau de saturação do solo;
- a dosagem de 6% de cimento afetou a composição granulométrica do solo, diminuindo o teor de argila e aumentando o teor de areia fina, enquanto que a dosagem de 4% de cimento afetou apenas a fração silte, aumentando seu teor em relação à testemunha;
- tanto a porcentagem acumulada em peneira nº 60 (0,25 mm) como o módulo de finura dos agregados do solo aumentaram em função do tratamento do solo areno-argiloso com 6% de cimento;
- embora não diferissem entre si, ambas as doses de cimento empregadas aumentaram os valores do índice de suporte californiano, da resistência à compressão simples e da resistência ao cisalhamento do solo;
- o tratamento do solo com cimento permitiu a obtenção de taludes estáveis, com fatores de segurança superiores a 1,5;
- a dosagem de 6% de cimento teve, em geral, maior efeito sobre as características físicas e mecânicas do solo do que a dosagem de 4%.

RESUMO

Avaliou-se o efeito da adição de cimento portland comum CP-320 a um solo areno-argiloso previamente selecionado para este fim.

Após a incorporação de 4 e 6% de cimento, a mistura foi submetida a ensaios de caracterização, sendo determinados, além dos índices físicos, os limites de consistência, a granulometria e os parâmetros de compactação do solo-aditivo. Calculou-se, também, a estabilidade estrutural dos agregados formados, determinando-se ainda, os valores do índice de suporte californiano, da resistência à compressão simples não confinada e da resistência ao cisalhamento. Os parâmetros de estabilidade dos taludes de terra foram obtidos através do método sueco e dos âbacos de Taylor.

Os resultados mostraram que o tratamento do solo com cimento afetou as características físico-mecânicas do solo areno-argiloso estudado, conferindo aos taludes analisados grande estabilidade.

SUMMARY

THE EFFECTS OF CHEMICAL ADDITIVES ON STRENGTH CHARACTERISTICS AND SLOPE STABILITY OF A SAND-CLAYEY SOIL. III. THE EFFECTS OF CEMENT

A sand-clayey soil was treated with 4.0 and 6.0% of cement and submitted to laboratory tests in order to evaluate quantitatively the effects of the treatments.

The physical indexes of the soil, the Atterberg limits, the grain-size distribution and the soil compaction parameters were determined. The structural stability of soil aggregates was calculated from grain-size analysis. The California Bearing Ratio and the unconfined compressive strength tests were conducted according to routine methods, while 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 and Tay-

The results showed that cement treatments affected soil physical and mechanical characteristics providing strong stability to all tested slopes.

LITERATURA CITADA

- ABCP, 1972. Curso de solo-cimento: normas de dosagens e métodos de ensaios, anexo 3.1. Dosagem das misturas de solo-cimento, São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 44p.
- BALMER, G.G., 1958. Shear strength and elastic properties of soil-cement mixtures under triaxial loading, Portland Cement Association B. D32, Chicago, 18p.
- BASÍLIO, F.A., 1973. Considerações sobre dimensionamento e durabilidade dos pavimentos de solo - cimento, Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 12p.
- CAMP, C.R. & W.R. GILL, 1969. The effect of drying on soil strength parameters. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33(5): 641-644.
- CHADA, L.R., 1970. The phenomenon of aggregation in the stabilization of soils with cement. Central Road Res. Inst. New Delhi. Ind. Concrete J., India, 44 (5): 210-212.
- COCKROFT, B., K.P. BARLEY & E.L. GREACEN, 1969. The penetration of clays by fine probes and root tips. Australian J. Soil Res. 7(3): 333-348.
- FELT, E.J., 1955. Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures, Portland Cement Association B. D5, Chicago, 24p.
- 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.
- 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.
- MELLO, V.F.B. & A.H. TEIXEIRA, 1971. Mecânica dos

los, fundações e obras de terra, vol. II, Fundações e obras de terra, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 192p.

- NUNES, A.J.C., 1978. Estabilização de taludes. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Anais do 29 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, vol. I, São Paulo, p.81-94.
- PINTO, C.S., 1960. Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento, Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 19p.
- STANTON, T.E., F.N. HVEEM & J.L. BEATTY, 1943. Progress-report on California experience with cement treated bases. Highway Res. Board. Proc., Washington, 23: 279-295.