

EFEITOS DE ADITIVOS QUÍMICOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS
DE RESISTÊNCIA E ESTABILIDADE DE TALUDE
DE UM SOLO ARENO - ARGILOSO.
II. EFEITOS DO DS-328

Wesley Jorge Freire ¹

INTRODUÇÃO

Com a estabilização do solo se pretende reduzir sua compressibilidade, aumentar sua resistência, reduzir sua sensibilidade à ação de variações externas, aumentar ou reduzir sua permeabilidade e garantir durabilidade ao material assim tratado.

Isso se consegue quando o produto usado como estabilizador atua corrigindo a granulometria do solo, desativando a fração argila, aglutinando as partículas entre si e impermeabilizando as partículas ou grupos de partículas.

Tanto a eficiência de um estabilizador como a duração do seu efeito dependem de uma série de fatores, tais como, as características do solo e do produto utilizado, bem como das condições sob as quais o mesmo foi aplicado.

De maneira geral, a literatura é pródiga em relatar os efeitos altamente benéficos de aditivos químicos estabilizadores sobre as características e propriedades físicas do solo, principalmente a agregação, consistência e granulometria.

Alguns destes modernos aditivos químicos, como o DS-328, conquanto venha sendo usado já há mais de uma década em fundações e obras de terra, não se encontra mencionado na literatura científica especializada.

Indicado para a construção de base ou sub-base de

(1) Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botuca-

estradas de rodagem, acostamentos, ruas, pátios de estacionamento, aeroportos, barragens, fundações, etc., o DS-328, segundo informações da Estabiliza Engenharia e Comércio Ltda., firma que o produz, garante aos agregados do solo estável e permanente impermeabilização.

Quer reduzindo a expansão do solo, quer aumentando a sua capacidade de suporte e não permitindo sua diminuição, mesmo sob as condições mais adversas, o DS-328 representa uma grande economia de tempo e de dinheiro pois é de fácil manipulação e seu uso vem sendo recomendado até mesmo para aqueles solos antes condenados para fins de pavimentação de estradas.

Resultados práticos indicaram acréscimos no valor do índice de suporte californiano de até 3,7 vezes, para a dosagem de 1:1000 de DS-328 em relação ao peso do solo seco, e acréscimos de até 2,5 vezes para a dosagem de 1:1500, de solos dos mais variados tipos, utilizados para a construção de sub-base e base de pavimentos rodoviários.

E foi com o objetivo de melhor caracterizar os efeitos do aditivo químico DS-328 sobre as características físicas e mecânicas do solo que este trabalho foi realizado.

MATERIAL E MÉTODOS

Pesquisou-se um solo areno-argiloso, pedologicamente classificado como Latossol Vermelho-Escuro - fase arenosa e, de acordo com os critérios do Bureau of Public Roads, pertencente ao Grupo A₆(4). As amostras de solo foram tomadas da área de empréstimo da Barragem de Ilha Solteira, a uma profundidade de aproximadamente dois metros.

O aditivo químico DS-328, empregado neste trabalho, se compõe de dois elementos, a saber, o estabilizante e o neutralizante. O primeiro se apresenta no estado líquido, cor verde, totalmente solúvel em água, pH (solução a 1%) mínimo igual a 11.

25°C variando de 10,3 a 10,5 kN/m³, viscosidade (copo Ford nº 4) a 45°C de 10 a 13 segundos, com no mínimo 38% de sólidos totais a 105°C (3 horas) e no máximo 1% de insolúveis em álcool etílico. O neutralizante DS-328 é o sulfato de alumínio, granulado, de cor branca. As dosagens empregadas foram 1:1000 e 1:1500 de aditivo em relação ao peso do solo seco.

Os ensaios de laboratório foram realizados no Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP (Companhia Energética de São Paulo), em Ilha Solteira, SP, de conformidade com as normas e após terem sido as misturas solo-aditivo deixadas em repouso, em condições ambientais, pelo prazo de um dia.

Foram determinados os parâmetros de compactação do solo e seus índices físicos, bem como seus limites de consistência e composição granulométrica. A estabilidade estrutural do solo foi determinada de acordo com o procedimento relatado por Tiulin, citado por BAVER (1966) e FREIRE & PIEDADE JR. (1979), para a porcentagem de agregados secos acumulada em peneira de 0,25 mm e módulo de finura, respectivamente.

Os corpos de prova para os ensaios de capacidade de suporte do solo, compressão simples e compressão triaxial, foram moldados por compactação estática, a partir de amostras deformadas, na umidade ótima e ao grau de compactação igual a 95% da compactação média máxima correspondente a cada tratamento.

O ensaio de compressão triaxial rápido, não drenado, com medida de pressão neutra, foi executado sob pressões de confinamento iguais a 100, 200 e 300 kN/m².

Para a análise da estabilidade de taludes, admitiu-se tratar de taludes homogêneos, simples, isotrópicos, com inclinação igual a 45° e altura igual a 30 metros; desconsiderou-se a possibilidade de percolação de água através do maciço e a presença de fendas de tração, bem como a possibilidade de um rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório, em supondo-se tratar de uma bar-

Os parâmetros de estabilidade dos taludes analisados foram determinados através do método sueco ou das fatias, âbacos de Taylor e método de Fellenius para solos com atrito e coesão, da forma descrita por FREIRE (1981).

Os efeitos dos tratamentos foram avaliados estatisticamente de acordo com o procedimento de rotina.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No quadro I estão apresentados os valores do peso específico dos sólidos, peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do ensaio de compactação, além do índice de vazios, porosidade e grau de saturação.

A análise estatística revelou que, com relação ao peso específico dos sólidos, apenas o tratamento 1:1500 DS-328 diferiu da testemunha, aumentando seu valor. O efeito do DS-328 foi mais intenso sobre os parâmetros de compactação do solo, tendo ambas as doses aumentado o valor do peso específico aparente seco máximo e diminuído, proporcionalmente, o teor de umidade ótima correspondente, quando comparadas com a testemunha. Por outro lado, os índices físicos do solo não foram afetados pelos tratamentos.

Tanto os limites de consistência do solo como sua composição granulométrica, cujos dados acham-se registrados nos quadros II e III, respectivamente, não sofreram quaisquer alterações, estatisticamente significativas, em função do tratamento com DS-328.

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. Os testes de significância estatística mostraram que a estabilidade estrutural do solo foi afetada pelo tratamento com DS-328, anotando-se, porém, que apenas o parâmetro porcentagem de agregados acumulada em peneira de 0,25 mm expressou tal variação, o mesmo não ocorrendo com o módulo de finura. Neste parti-

QUADRO I - Parâmetros de compactação e índices físicos do solo areno-argilosos tratado com DS 328.

Tratamento	γ_s (kN/m ³)	$\gamma_{o\text{máx.}}$ (kN/m ³)	$h_{\text{ót.}}$ (%)	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
1:1000 DS-328	A	27,4	19,38	11,80	0,41	29,08	78,86
	B	27,4	19,33	11,90	0,42	29,58	77,63
	C	27,4	19,46	12,00	0,41	29,08	80,19
	\bar{X}	27,4	19,39	11,90	0,41	29,25	78,89
1:1500 DS-328	A	27,5	19,31	12,20	0,42	29,58	79,88
	B	27,5	19,33	11,90	0,42	29,58	77,92
	C	27,5	19,39	11,80	0,42	29,58	77,26
	X	27,5	19,34	12,00	0,42	29,58	78,35

Test. = Testemunha

DS-328 = sigla do aditivo químico

γ_s = peso específico dos sólidos

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

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

A, B, C = repetições

\bar{X} = média.

QUADRO II - Limites percentuais de consistência do solo areno-argiloso tratado com DS-328.

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
1:1000 DS-328	A	29,0	15,0	14,0
	B	27,0	15,0	12,0
	C	28,0	15,0	13,0
	\bar{X}	28,0	15,0	13,0
1:1500 DS-328	A	28,0	15,0	13,0
	B	28,0	15,0	13,0
	C	27,0	16,0	11,0
	\bar{X}	27,7	15,3	12,3

dendo o tratamento 1:1000 DS-328 pelo efeito negativo, verificado em relação à testemunha, e o tratamento 1:1500 DS 328, pelo efeito positivo sobre a estabilidade estrutural do solo.

Os dados referentes aos ensaios de suporte californiano e de resistência à compressão simples não confinada estão registrados no quadro V. Estatisticamente, não houve diferenças significativas entre os tratamentos, permanecendo inalterados os valores de índice de suporte californiano e expansão do solo, bem como os valores de resistência à compressão simples não confinada, quer em termos de tensões totais ou efetivas.

QUADRO III - Composição granulométrica porcentual do solo areno-argiloso tratado com DS-328, baseada na classificação do BPR (Bureau of Public Roads) e ASTM (American Society for Testing Materials).

Tratamento		Argila ($\phi < 0,005$ mm)	Silte ($0,005 - 0,074$ mm)	Areia fina ($0,074 - 0,42$ mm)	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
	\bar{X}	33,0	18,2	47,1	1,7
	<hr/>				
1:1000 DS-328	A	31,0	20,2	47,3	1,5
	B	32,0	19,3	47,1	1,6
	C	31,0	18,0	49,5	1,5
	\bar{X}	31,3	19,2	48,0	1,5
	<hr/>				
1:1500 DS-328	A	33,0	21,0	44,4	1,6
	B	31,0	22,9	44,5	1,6
	C	30,0	23,0	45,2	1,8
	\bar{X}	31,3	22,3	44,7	1,7

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 envoltórios de resistência de Mohr-Coulomb, foram as seguintes:

- para a testemunha..... $\tau = 74 + \sigma \cdot \text{tg } 24^{\circ}30'$
- para o tratamento 1:1000 DS-328: $\tau = 91 + \sigma \cdot \text{tg } 21^{\circ}$
- para o tratamento 1:1500 DS-328: $\tau = 117 + \sigma \cdot \text{tg } 19^{\circ}$

onde τ = resistência ao cisalhamento do solo (kN/m^2), c = coesão do solo (kN/m^2), σ = pressão total normal

QUADRO IV - Porcentagem acumulada em peneira de 0,25 mm e módulo de finura dos agregados do solo areno-argiloso tratado com DS-328.

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
1:1000 DS-328	A	8,00	0,57
	B	7,90	0,58
	C	8,00	0,58
	\bar{X}	7,97	0,58
1:1500 DS-328	A	9,00	0,57
	B	8,80	0,57
	C	8,80	0,55
	\bar{X}	8,87	0,56

ao plano de cisalhamento (kN) e $\phi = \hat{\text{ângulo}}$ de atrito interno do solo.

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

- para a testemunha..... $\bar{\tau} = 50 + \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} \cdot \text{tg } 29^\circ$
- para o tratamento 1:1000 DS-328: $\bar{\tau} = 60 + \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} \cdot \text{tg } 25^\circ$
- para o tratamento 1:1500 DS-328: $\bar{\tau} = 104 + \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} \cdot \text{tg } 22^\circ$

Em relação à testemunha, os valores da coesão total foram 1,23 vezes maior, para o tratamento do solo com 1:1000 DS-328, e 1,58 vezes para o tratamento 1:1500 DS-

QUADRO V - Valores de índice de suporte californiano — (ISC) e de resistência à compressão simples não confinada do solo areno-argiloso não tratado com DS 328.

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
	\bar{X}	12,5	0,09	186	186
1:1000 DS-328	A	15,5	0,06	201	211
	B	14,4	0,04	187	206
	C	15,7	0,07	181	192
	\bar{X}	15,2	0,06	190	203
1:1500 DS-328	A	13,5	0,05	196	198
	B	14,0	0,07	196	185
	C	23,2	0,04	228	218
	\bar{X}	16,9	0,05	207	200

-328. O ângulo de atrito interno, por outro lado, reduziu o valor unitário da testemunha para 0,86, em função do tratamento 1:1000 DS-328, e para 0,77, em função do tratamento 1:1500 DS-328. Os valores da coesão efetiva apresentaram acréscimos de 1,20 a 2,08 vezes para os tratamentos 1:1000 e 1:1500 DS-328, respectivamente, quando comparados com a testemunha, enquanto que, em termos de ângulo de atrito interno efetivo, os decréscimos foram de mesma ordem e grandeza do que aqueles verificados para o caso das tensões totais.

A dosagem maior empregada provocou os maiores acréscimos no valor da coesão e os maiores decréscimos no valor do ângulo de atrito interno.

Os resultados dos cálculos de estabilidade dos taludes de terra, pelo método sueco e através dos ábacos 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 ábacos de Taylor, para o caso do solo areno-argiloso tratado com DS-328.

Tratamento	Método das fatias		Ábaco de Taylor	
	FS	(1,62=1,00)	N_c	(1,68=1,00)
Testemunha	1,62	1,00	1,68	1,00
1:1000 DS-328	1,70	1,05	1,72	1,02
1:1500 DS-328	1,94	1,20	1,93	1,15

Como se observa, todos os tratamentos apresentaram valores de FS (fator de segurança) superiores a 1,50, caracterizando, assim, taludes estáveis. Cada fator de segurança, por outro lado, representa o menor valor encontrado entre vinte e um outros, cada um deles correspondendo a um círculo hipotético de ruptura. Em relação à testemunha, os acréscimos verificados nos valores de FS foram de 1,05 e 1,20 vezes para os tratamentos 1:1000 e 1:1500 DS-328, respectivamente, enquanto que os acréscimos nos valores de N_c (fator de estabilidade), foram de 1,02 e 1,15 vezes.

No quadro VII estão registrados os resultados da análise de estabilidade de taludes de solos com atrito e coesão, obtidos através do método de Fellenius.

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 DS-328.

Tratamento	Parâmetros de estabilidade		
	H ₉₀ (m)	H _{cr.} (m)	i _{máx.}
Testemunha	15,69	58,22	60º
1:1000 DS328	19,06	52,95	65º
1:1500 DS328	24,51	62,08	75º

H₉₀ = altura crítica do talude vertical;

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

i_{máx.} = ângulo máximo de talude para a altura H = 30m.

Os resultados mostraram que, em relação à testemunha, o tratamento 1:1000 DS-328 provocou acréscimos de 1,21 vezes no valor de H₉₀ (altura crítica do talude vertical) e de 1,08 vezes no valor de i_{máx.} (ângulo máximo de talude para a altura fixa de 30 metros), e redução de 0,91 vezes no valor de H_{cr.} (altura crítica até a qual o talude se manterá estável com a inclinação $i = 45^\circ$); o tratamento 1:1500 DS-328, por sua vez, aumentou em 1,56 vezes o valor de H₉₀, em 1,07 vezes o valor de H_{cr.} e em 1,25 vezes o valor de i_{máx.}

A determinação do pH, em água, do solo areno-argiloso empregado, indicou os valores 5,28, para a testemunha; 5,26, para o tratamento 1:1000; e 5,17, para o tratamento 1:1500 DS-328, evidenciando assim uma leve acidificação do solo em função do tratamento com aditivo químico.

O tratamento 1:1500 DS-328, conquanto não tenha alcançado o maior valor de peso específico aparente seco máximo, provocou os maiores acréscimos nos valores de

FS, N_c , H_{90} e $i_{m\acute{a}x}$; por outro lado, provocou o maior decréscimo nos valores do ângulo de atrito interno total e efetivo.

De um modo geral, o efeito do aditivo químico DS-328 sobre as características e propriedades do solo estudado foi de pequeno interesse prático, afetando apenas os parâmetros de compactação, a estabilidade estrutural dos agregados do solo, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a estabilidade dos taludes analisados, as sim mesmo de maneira muito superficial, chegando mesmo, em alguns casos, a apresentar resultados negativos.

CONCLUSÕES

Resguardadas as condições do trabalho, os resultados obtidos permitiram concluir que:

- o tratamento do solo areno-argiloso com DS-328 não afetou o índice de vazios, porosidade e grau de saturação do solo, bem como seus limites de consistência, composição granulométrica, módulo de finura, índice de suporte californiano, expansão e resistência à compressão simples não confinada;
- o tratamento do solo com DS-328 provocou acréscimos, embora inexpressivos, nos valores de coesão e fatores de segurança e de estabilidade dos taludes de terra analisados, bem como na altura crítica do talude vertical e ângulo máximo de talude para a altura fixa de 30 metros;
- resultados negativos foram associados ao tratamento 1:1000 DS-328, quando consideradas a porcentagem acumulada de agregados em peneira nº 60 (0,25 mm) e a altura crítica até a qual o talude se mantém estável com a inclinação $i = 45^\circ$.

sagens 1:1000 e 1:1500 DS-328 e seus efeitos avaliados em laboratório.

As amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização do solo, determinando-se seus índices físicos, limites de consistência, granulometria e parâmetros de compactação. Calculou-se, 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.

Através do método sueco ou das fatias, dos ábacos de Taylor e do método de Fellenius, foram determinados os parâmetros de estabilidade dos taludes de terra.

Os resultados mostraram que o tratamento do solo com DS-328 não exerceu qualquer influência sobre o índice de vazios, porosidade e grau de saturação do solo, não alterando seus limites de consistência, composição granulométrica, módulo de finura, índice de suporte californiano, expansão e resistência à compressão simples não confinada.

Quanto aos demais parâmetros considerados, os efeitos do DS-328 foram praticamente inexpressivos.

SUMMARY

THE EFFECTS OF CHEMICAL ADDITIVES ON STRENGTH CHARACTERISTICS AND SLOPE STABILITY OF A SAND-CLAYEY SOIL. II. THE EFFECTS OF DS-328.

The Ag(4) sand-clayey soil was treated with DS-328 in the quantity of 1:1000 and 1:1500 additive-to-soil ratio and submitted to laboratory tests in order to evaluate quantitatively the effects of the treatments.

The physical indexes of the soil as well as the Atterberg limits and grain-size distribution were determined. The soil moisture-density test provided the compaction parameters required for stability parameters.

The structural stability of soil aggregates was calculated from grain-size analysis. The bearing capacity and the unconfined compressive strength were determined according to routine methods and the shear stress parameters through the undrained triaxial compression test.

The Swedish graphical method for rotational failure, Taylor's charts and Fellenius method were used for analysing earth slope stability.

The results showed that DS-328 treatments did not affect the void ratio, porosity and degree of saturation as well as the Atterberg limits, grain-size distribution, modulus of fineness, California bearing ratio, expansion and unconfined compressive strength.

The effects of DS-328 chemical additive on the other soil physical and mechanical parameters were practically negligible.

LITERATURA CITADA

- BAVER, L.D., 1966. *Soil Physics*, 3rd Ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 489p.
- 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 Agrônomicas, UNESP, Botucatu, 113p.
- FREIRE, W.J. & C. PIEDADE Jr.. O Módulo de Finura dos agregados do solo como um índice de estabilidade estrutural. *Eng. Agric.* 3(2): 29-36.