

O SILICATO DE SÓDIO E SEU EFEITO SOBRE A QUALIDADE DO SOLO-CIMENTO*

Wesley Jorge Freire**
Cezar Piedade Júnior**

1. INTRODUÇÃO

A prática da estabilização do solo com cimento remonta aos idos de 1916, quando o cimento foi empregado pela primeira vez, nos Estados Unidos da América do Norte, para solucionar problemas causados pelo tráfego de veículos de roda não pneumática.

Desde então, o solo-cimento passou a ser utilizado na construção e pavimentação de estradas de rodagem, ruas, aeroportos, acostamentos, áreas industriais, estâbulos, além da fabricação de tijolos, melhoria de fundações, revestimento de barragens de terra e canais de irrigação, construção de silos aéreos e subterrâneos, casas, etc.

Todavia, a espiral inflacionária dos custos de construção, bem como a exigência cada vez maior de pavimentos rodoviários, tem levado os pesquisadores a buscarem novos meios de tornar o solo-cimento mais econômico e, ao mesmo tempo, mais resistente.

Mais recentemente, foram descobertos os condicionadores sintéticos do solo, produtos que, misturados com o solo em quantidades excepcionalmente pequenas, promovem acentuada estabilidade estrutural. Isso fez com que os pesquisadores voltassem sua atenção para o uso de aditivos químicos em solo-cimento, visando, de acordo com MOH *et alii* (9), ao aumento da eficiência do cimento Portland como estabilizante do solo, juntamente com a redução da quantidade de cimento necessária para tratar solos de alta resposta, bem como à descoberta de aditivos que assegurem a eficiência do cimento como estabilizante de solos problemáticos, isto é, solos que não podem ser economicamente estabilizados apenas com cimento.

Alguns compostos metálicos alcalinos vêm sendo investigados, já há algumas

* Recebido para publicação em 23-05-1978.

** Professores Assistentes Doutores do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas, "Campus" de Botucatu — UNESP.

décadas, quanto a seus efeitos sobre a qualidade do solo-cimento.

HANDY *et alii* (6) aspergiram corpos de prova de solo-cimento com uma solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio, e observaram um aumento na resistência desses corpos, de sorte que o silicato de sódio foi eficaz para o solo barro-arenoso, ao passo que o hidróxido de sódio foi melhor para o solo barro-siltoso.

Segundo HANDY (5), o tratamento com álcalis fortes favorece as reações do quartzo com estabilizadores alcalinos, tais como a cal ou o cimento Portland, podendo a resistência inicial ser elevada em 15 a 400%. Por sua vez, MOH *et alii* (9) relataram que o pré-tratamento de solos muito argilosos com pequenas quantidades de sais metálicos polivalentes e sais de cátions orgânicos melhora suas respostas à estabilização com cimento, reduzindo a expansão dos solos montmoriloníticos. Afirmaram, ainda, que os aditivos sódicos aumentam consideravelmente a resistência de todos os tipos de solo-cimento ao ataque de sulfatos.

A resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento aumenta diretamente de acordo com o teor do aditivo; contudo, segundo MATEOS *et alii* (8), este só é eficiente até certo teor de cimento, acima do qual qualquer acréscimo na resistência é atribuído, primeiramente, ao teor mais elevado de cimento e não, propriamente, à reação do aditivo com as partículas do solo.

Os estudos relativos aos efeitos da relação sílica-álcali do silicato de sódio como aditivo de solo-cimento indicam que os silicatos de menor relação tendem, de acordo com MOH *et alii* (9), a produzir maiores resistências iniciais, porém, menores resistências finais, ao passo que silicatos de maior relação sílica-álcali retardam o processo de cimentação. Conseqüentemente, há uma relação sílica-álcali ótima que concorre para a maior eficiência do silicato de sódio como aditivo. Por outro lado, a resistência máxima depende da quantidade total de material cimentante, o qual, por sua vez, depende do teor total de sílica e cálcio disponíveis. Desse modo, maiores resistências são alcançadas com a utilização de silicatos de maior relação sílica-álcali. No entanto, a resistência máxima depende, também, do total de cálcio disponível, o qual, por sua vez, depende do teor de cimento; se a quantidade de silicato adicionada for muito alta, não haverá cálcio suficiente para precipitá-lo ou formar silicato de cálcio hidratado, e, conseqüentemente, menores resistências serão esperadas. MOH *et alii* (9) concluíram que a relação sílica-álcali ótima tenderá a um maior valor se o teor de cimento for aumentado.

O silicato de sódio, além de fornecer silicatos reativos, eleva o pH da mistura de solo-cimento e ataca os constituintes do solo. Segundo DUTT (3), a fração sílica dos silicatos solúveis constitui a causa da formação de agregados de solos estáveis em água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de dois solos, um argiloso e outro barro-arenoso, foram tomadas à profundidade média de 20 a 50 cm, estando suas características principais descritas no Quadro 1.

Foi empregado, neste trabalho, o silicato de sódio neutro, de relação sílica-álcali igual a 3,2, com 30,1% de SiO_2 , 9,4% de Na_2O e 60,5% de água; seu peso específico, a 20°C, é 42,7º Bé (densidade 1,42 g/cm³), sua viscosidade média é da ordem de 900 centipóises. As doses escolhidas foram 0,6% e 1,2%, tomadas em relação ao peso do solo seco.

Os tratamentos foram aplicados nos solos que, em todos os casos, compreenderam fração menor que 4,76 mm, no seu teor de umidade natural, e as eles incorporados, adicionando-se, em seguida, uma quantidade de água definida e calculada da maneira descrita por FREIRE (4).

QUADRO 1 - Características dos solos empregados.

	Solo	Argiloso	Arenoso
Composição textural (%) em peso	Areia Grossa Areia Fina Silte Argila	2,8 25,6 20,8 50,8	4,0 73,4 5,0 17,6
Limites de consistência (%)	Limite de liquidez Limite de plasticidade Índice de plasticidade	41,55 28,29 13,26	17,62 NP NP
Classificação	AASHO USBS (b) Pedológico	$A_{7-6}(9)$ argila TE (c)	$A_{2-4}(0)$ barro-arenoso LVA (d)
Propriedades químicas	Capac. Troca Cat., e.mg/100g pH Matéria orgânica, %	7,41 5,6 1,91	2,73 4,6 0,47
Composição mineralógica (e)	Caolinita Gibbsita Alofana	64,0-75,5 3,0-11,5 13,3-18,0	60,0-85,0 2,2-2,5 11,6-13,9

(a) Baseada na classificação da AASHO (American Association of State Highway Officials) e da ASTM (American Society for Testing Materials): areia grossa: 2,00 a 0,42 mm; areia fina: 0,42 a 0,074 mm; silte: 0,074 a 0,005 mm; argila: inferior a 0,005 mm.

(b) United States Bureau of Soils, classificação trilinear.

(c) Terra Roxa Estruturada.

(d) Latossol Vermelho Escuro - fase arenosa.

(e) Até a profundidade de 2,5 m.

Os ensaios de caracterização dos solos foram feitos de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ao passo que para o ensaio de compactação do solo-cimento foi observado o Método SC-1, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1); os corpos de prova de solo-cimento foram moldados de acordo com o Método SC-2, dessa mesma Associação, e com dois teores de cimento, escolhidos de conformidade com as normas elaboradas pela PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (10), que indicam os prováveis teores necessários e o teor que deverá ser adotado no ensaio de compactação.

O ensaio à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento foi feito de acordo com o Método SC-4, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1), adotando-se uma velocidade de carregamento de aproximadamente $1,4 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$. Para esse ensaio, os corpos de prova foram executados com

dois teores de cimento e rompidos com as idades de 7 e 28 dias.

A determinação da absorção d'água pelos corpos de prova de solo-cimento foi feita da maneira descrita por JONES (7) e FREIRE (4).

O efeito da aplicação dos tratamentos, nos seus diversos aspectos, foi avaliado por análise estatística dos dados fornecidos pelo experimento. Além da análise paramétrica normal dos dados referentes à resistência à compressão simples e à absorção de água por corpos de prova de solo-cimento (com uso da transformação $(Y_{ij} = \text{arc sen}\sqrt{\frac{x_{ij}}{100}})$), aplicou-se, aos dados do ensaio de compactação, uma análise não-paramétrica, conforme recomendação de CAMPOS (2), sendo o teste de Kruskal-Wallis complementado com o emprego das comparações múltiplas correspondentes, para localizar as diferenças significativas ocorridas entre pares de tratamentos. Em todos os casos, o número de repetições foi igual a três.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A escolha do teor de cimento provável (Cp) para o ensaio de compactação do solo-cimento foi feita de acordo com as normas da AASHO (American Association of State Highway Officials), estando os resultados registrados no Quadro 2, enquanto os do ensaio estão apresentados no Quadro 3.

Tanto a densidade aparente máxima como a umidade ótima do ensaio de compactação do solo-cimento foram significativamente influenciados pelo tratamento com silicato de sódio. O tratamento 1,2% SS (silicato de sódio) diminuiu a densidade aparente máxima de ambos os solos, quando comparado com o tratamento 0,6%SS e testemunha dos solos argiloso e arenoso, respectivamente; esse tratamento aumentou, ainda, o teor de umidade ótima do solo argiloso, diferindo estatisticamente da testemunha. No solo arenoso, a umidade ótima foi aumentada pelo tratamento 0,6%SS, que diferiu da Testemunha.

O fato de o tratamento 0,6%SS ter produzido o maior valor de densidade aparente máxima no solo argiloso, significativamente diferente do tratamento 1,2%SS, que alcançou, por outro lado, o menor valor, não encontra apoio na literatura consultada. Em mistura íntima com o solo, o silicato de sódio dá início à formação de um gel que provoca a aglutinação das partículas do solo, alterando, assim, a granulometria da mistura e aumentando a resistência à compactação. Esse aumento da resistência do solo à compactação conduz a um decréscimo na densidade aparente máxima, uma vez que a energia de compactação, durante o ensaio, é mantida constante. Se isso ocorreu, o menor valor de densidade aparente máxima alcançado pelo tratamento 1,2%SS estaria justificado. Com relação à umidade ótima, constatou-se que à diminuição da densidade aparente máxima corresponde um acréscimo no teor de umidade ótima.

Com base nos resultados anteriores, foram escolhidos os teores de cimento prováveis para a moldagem dos corpos de prova de solo-cimento destinados aos ensaios subseqüentes; esses teores encontram-se no Quadro 4.

A Figura 1 registra os resultados do ensaio à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento para os solos argiloso e arenoso. O teste de Tukey, aplicado às médias de tratamentos, mostrou o efeito positivo do silicato de sódio sobre a resistência adquirida pelos corpos de prova de solo-cimento de ambos os solos, sendo que o efeito do tratamento 1,2%SS (silicato de sódio) foi superior ao do tratamento 0,6%SS; do mesmo modo, o teor de cimento Cp + 1% empregado na moldagem dos corpos de prova mostrou-se, independentemente dos tratamen-

QUADRO 2 - Teor de cimento provável (Cp) para o ensaio de compactação do solo-cimento.

CRITÉRIO DA AASHO	(*)	TRATAMENTOS		
		TEST.	0,6% SS	1,2% SS
Solo Argiloso				
% QUE PASSA EM PENEIRA Nº	10 40 200	100,0 97,2 71,6	100,0 96,7 71,8	100,0 97,2 73,5
LIMITE DE LIQUIDEZ (%)		41,55	34,48	31,94
ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)		13,26	7,73	3,75
CLASSIFICAÇÃO DO SOLO		A ₇₋₆₍₉₎	A ₄₍₇₎	A ₄₍₈₎
Cp (%)		13	10	10
Solo Arenoso				
% QUE PASSA EM PENEIRA Nº	10 40 200	100,0 96,0 22,6	100,0 95,3 22,3	100,0 95,4 20,3
LIMITE DE LIQUIDEZ (%)		17,62	12,76	14,37
ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)		NP	NP	NP
CLASSIFICAÇÃO DO SOLO		A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎
Cp (%)		7	7	7

(*)

AASHO = American Association of State Highway Officials.

TEST = Testemunha.

SS = Silicato de Sódio.

QUADRO 3 - Ensaio de compactação do solo-cimento: δ_{\max} (densidade aparente máxima, g/dm³) e h_{ot} . (umidade ótima,%).

Parâmetros do ensaio de compactação		TRATAMENTOS		
		TEST.	0,6%SS	1,2%SS
Solo argiloso	δ_{\max}	1497	1533	1483
		1520	1538	1468
		1536	1534	1462
	h_{ot}	27,6	28,3	30,7
		27,8	28,8	30,9
		26,6	28,7	31,6
Solo arenoso	δ_{\max}	1924	1868	1875
		1922	1884	1866
		1930	1878	1869
	h_{ot}	12,0	13,3	12,4
		12,2	13,5	13,0
		12,3	12,8	13,0

QUADRO 4 - Teor de cimento provável (Cp) para a moldagem de corpos de prova de solo-cimento.

CRITÉRIO DA AASHO (*)	TRATAMENTOS		
	TEST.	0,6% SS	1,2% SS
Solo argiloso			
CLASSIFICAÇÃO	A ₇₋₆₍₉₎	A ₄₍₇₎	A ₄₍₈₎
SILTE (%)	15,7	17,1	19,5
DENSIDADE APARENTE MÁXIMA (g/dm ³)	1518	1535	1471
Cp (%)	14	13	15
Solo arenoso			
CLASSIFICAÇÃO	A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎	A ₂₋₄₍₀₎
SILTE + ARGILA (%)	19,5	19,5	16,9
PEDREGULHO GROSSO (%)	0	0	0
DENSIDADE APARENTE MÁXIMA (g/dm ³)	1925	1877	1870
Cp (%)	7	8	8

(*) AASHO = American Association of State Highway Officials.

tos e das épocas, significativamente superior ao teor Cp - 1%, enquanto a época 2 (28.º dia), independentemente dos tratamentos e das doses, foi melhor que a época 1 (7.º dia), conferindo maior resistência aos corpos de prova de solo-cimento.

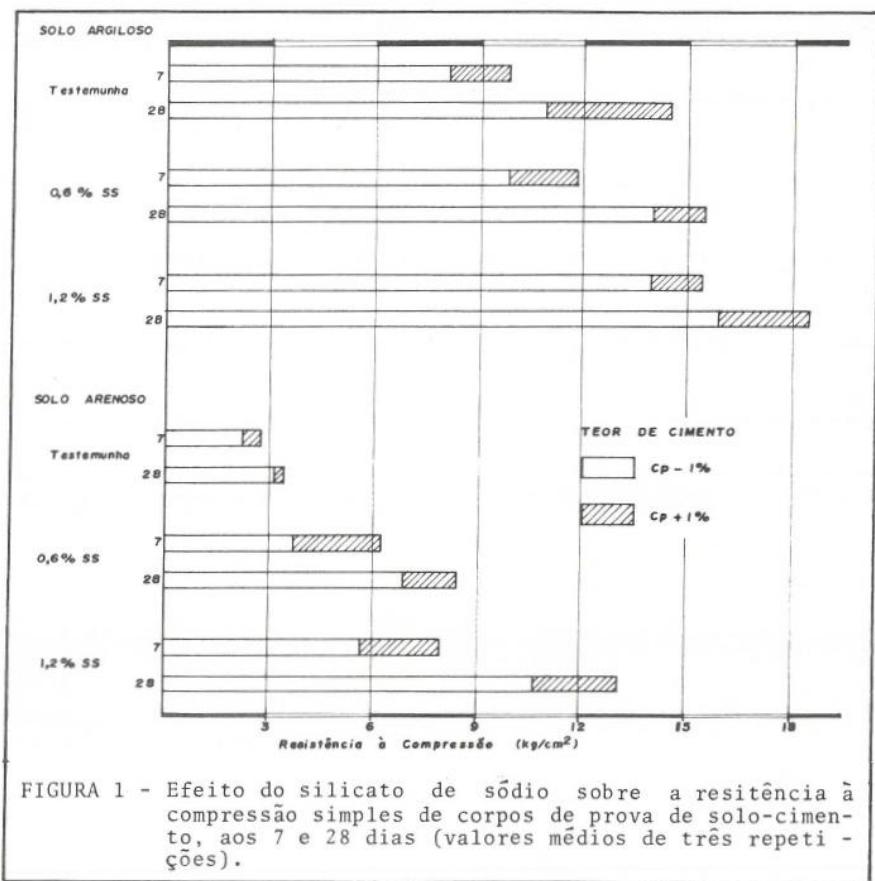


FIGURA 1 - Efeito do silicato de sódio sobre a resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento, aos 7 e 28 dias (valores médios de três repetições).

No caso do solo argiloso, o desdobramento dos graus de liberdade da interação significativa Tratamento x Época revelou que, dentro de tratamentos, a época 2 foi particularmente melhor, sendo que, em ambas as épocas, o efeito do tratamento 1,2%SS foi superior ao do tratamento 0,6%SS, que, por sua vez, superou a testemunha. Com relação à interação significativa Dose x Época, o desdobramento dos seus graus de liberdade mostrou que, para cada dose, a época 2 foi a melhor; em contraposição, dentro das épocas estudadas, a dose Cp + 1% teve sempre efeito.

Em se tratando do solo arenoso, o desdobramento dos graus de liberdade da interação significativa Tratamento x Dose revelou que, dentro de tratamentos, a dose Cp + 1% foi melhor para aqueles com silicato de sódio, ao passo que, para ambas as doses, o efeito do tratamento 1,2%SS foi superior ao do tratamento 0,6%SS, que, por sua vez, superou a testemunha.

A resistência à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento pro-

duziu resultados que concordam com as conclusões de MATEOS *et alii* (8) e, em parte, com as de HANDY (5) e HANDY *et alii* (6), pois os acréscimos médios no valor da resistência à compressão, verificados em relação à testemunha, foram, para o tratamento 0,6%SS, de 20,38% e 17,57%, aos 7 e 28 dias, respectivamente, para o solo argiloso, e de 95,31% e 131,77% para o solo arenoso; no caso do tratamento 1,2%SS, esses acréscimos foram de 63,89% e 36,66%, para o solo argiloso, e de 161,28% e 255,79%, para o solo arenoso, aos 7 e 28 dias, respectivamente.

A resistência à compressão simples aumentou de acordo com o teor de cimento e com a idade dos corpos de prova de solo-cimento. E, muito embora nenhum dos solos tenha alcançado a resistência à compressão mínima aceitável para fins de pavimentação com solo-cimento (21 kg/cm² aos 7 dias), o tratamento com silicato de sódio revelou-se viável como uma das medidas alternativas propostas para o aproveitamento de solos contra-indicados para tal fim.

A absorção de água pelos corpos de prova de solo-cimento apresentou resultados que estão relatados no Quadro 5, expressos em porcentagem. O teste de Tukey, aplicado aos dados do ensaio, mostrou que, em ambos os solos, o tratamento com silicato de sódio reduziu a absorção de água a níveis estatisticamente diferentes dos da testemunha; do mesmo modo, a dose Cp + 1% foi significativamente melhor que a dose Cp - 1%, pois permitiu menor absorção de água pelos corpos de prova.

QUADRO 5 - Absorção de água por corpos de prova de solo-cimento, em porcentagem.

Solo e teor de cimento		TRATAMENTOS		
		TEST.	0,6%SS	1,2% SS
Solo argiloso	Cp-1%	5,36	5,30	4,97
		5,83	4,18	3,66
		6,61	4,75	5,00
	Cp+1%	5,94	4,40	4,14
		4,48	3,96	4,32
		4,64	4,21	3,84
Solo arenoso	Cp-1%	4,57	3,49	3,01
		4,33	3,25	3,47
		4,08	3,02	3,21
	Cp+1%	3,54	2,82	2,78
		3,26	2,55	2,00
		3,98	2,31	2,38

Depreende-se dos resultados verificados que há uma relação inversa entre a absorção de água pelos corpos de prova de solo-cimento e a resistência à compressão por eles alcançada, pois os tratamentos que reduziram a absorção conferiram, por outro lado, maior ganho de resistência. Semelhantemente, verificou-se que a quantidade de água absorvida pelos corpos de prova de solo-cimento é inversamente proporcional à quantidade de cimento na mistura.

4. CONCLUSÕES

Nas condições em que o trabalho foi conduzido, os resultados obtidos, analisados e interpretados estatisticamente, permitiram que se chegasse às seguintes conclusões:

- o tratamento 1,2%SS (silicato de sódio) conferiu ao solo-cimento o menor valor de densidade aparente máxima, em relação à testemunha, no solo arenoso, e ao tratamento 0,6%SS, no solo argiloso;
- à diminuição da densidade aparente máxima pelo tratamento com silicato de sódio corresponderam acréscimos no teor de umidade ótima;
- a resistência à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento, em ambos os solos, foi consistentemente aumentada pelo tratamento com silicato de sódio;
- a resistência à compressão simples, em ambos os solos, aumentou diretamente de acordo com o teor de cimento e com a idade do solo-cimento;
- em ambos os solos, o tratamento com silicato de sódio diminuiu a absorção de água pelos corpos de prova de solo-cimento, diferindo da testemunha, que permitiu absorção máxima;
- a quantidade de água absorvida pelos corpos de prova de solo-cimento diminuiu com o aumento da quantidade de cimento na mistura;
- os tratamentos que reduziram a absorção de água conferiram ao solo-cimento maior ganho de resistência;
- ambos os solos mostraram a viabilidade do tratamento prévio com silicato de sódio como uma das medidas indicadas para o seu aproveitamento como solo-cimento.

5. RESUMO

Dois solos, um argiloso e um barro-arenoso, foram tratados com silicato de sódio (relação sílica-álcali igual a 3,2), nas dosagens de 0,6% e 1,2%, sendo os corpos de prova moldados com cimento Portland comum, ensaiados com dois teores e rompidos aos 7 e 28 dias. Uma vez tratados, os solos foram submetidos a ensaios de caracterização, consistência e compactação, a fim de caracterizar o efeito dos tratamentos. Posteriormente, foram escolhidos os teores de cimento para os ensaios de compactação e resistência à compressão simples do solo-cimento, de acordo com as normas de dosagem, procedendo-se, ainda, ao ensaio de absorção de água.

Os dados obtidos foram analisados estatisticamente, e os resultados permitiram que se tirassem algumas conclusões. A resistência à compressão simples dos corpos de prova de solo-cimento, em ambos os solos, foi consistentemente aumentada pelo tratamento com silicato de sódio; aumentou, também, com o aumento do teor de cimento e com a idade. Os valores de densidade aparente máxima e de umidade ótima do ensaio de compactação do solo-cimento foram influenciados pelo tratamento com silicato de sódio. Os tratamentos que reduziram a absorção de água pelos corpos de prova de solo-cimento foram os que apresentaram maior resistência à compressão.

6. SUMMARY

Two soils, a clayey and a sandy loam, were treated with sodium silicate (3.2 of silica-to-soda ratio) in dosages of 0.6% and 1.2%. The test specimens were molded with common Portland cement, tested with two cement contents and broken under compression at ages of 7 and 28 days. Once treated the soils were submitted to

soil characterization, consistency and compaction tests. Cement contents were then chosen for the moisture-density test and for the compressive strength of soil-cement mixtures, according to the dosage regulations. In addition a water absorption test was made.

The data was statistically analysed and the results led to several conclusions. The compressive strength of soil-cement specimens in both soils was strongly increased by the sodium silicate treatment, increasing also with the cement content and with age. The maximum density and optimum moisture determined by the soil-cement compaction test were affected by the treatment with sodium silicate. The treatments which reduced the absorption of water by soil-cement specimens were those that presented greater compression strength.

7. LITERATURA CITADA

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *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, 1972. 44.
2. CAMPOS, H. *Estatística experimental não-paramétrica*. 2.^a ed. Piracicaba, ESALQ/USP, 1976. 332 p.
3. DUTT, A.K. Mechanism of aggregation of clay minerals by soluble silicates. *Soil Sci.* 65:309-319. 1948.
4. FREIRE, W.J. *Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento*. Piracicaba, ESALQ/USP, 1976. 142 p. (Tese de doutoramento).
5. HANDY, R.L. Cementation of soil minerals with Portland Cement or alkalis. *Highway Res. Board B.*, 198:55-64. 1958.
6. HANDY, R.L., JORDAN, J.L., MANFRE, L.E. & DAVIDSON, D.T. Chemical treatments for surface hardening of soil-cement and soil-lime-flyash. *Highway Res. Board B.*, 241:49-66. 1959.
7. JONES, T.N. *Soil-cement for hard surfacing feed lots*. Miss. Agric. Exper. Sta. Inf. Sheet 949, 1966. 2 p.
8. MATEOS, M., TAWES, R.H. & DAVIDSON, D.T. *Effects of chemical additives on the strength of soil-cement mixtures*. Anais do 2.^o Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, vol. I: 547-570. 1963.
9. MOH, Z.C., LAMBE, T.W. & MICHAELS, A. Improvement of soil-cement with chemical additives. *Highway Res. Board B.*, 309:57-76. 1962.
10. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. *Soil-cement laboratory handbook*. Illinois, Portland Cement Association, Engng B., 1971. 64 p.