

Análise dos Efeitos da Estabilização Química com Cimento Sobre a Resistência à Compressão de um Solo Arenoso com o Uso de Planejamento Fatorial

Felipe de Campos Loch

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, Brasil, fcl@sc.usp.br

Osni Jose Pejon

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, Brasil, pejon@sc.usp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a avaliação dos efeitos da estabilização química com cimento na resistência à compressão de um solo arenoso. O procedimento experimental adotado foi o planejamento fatorial 3^2 , com duas variáveis independentes: teor de umidade (w) e porcentagem de cimento (CI), variando em três níveis cada. Os níveis são: w (6,4, 7,6 e 8,8%) e CI (3,0, 7,0 e 10,0%). Foi utilizado cimento Portland CP II-Z32 e água fornecida pela concessionária local. O solo estudado pertence a Formação Botucatu (Estado de São Paulo, Brasil), com uma distribuição granulométrica de 6,1% de argila, 3,9% de silte e 90,0% de areia. Foram realizados ensaios de resistência a compressão simples (RC) em corpos-de-prova após 7 e 28 dias de cura, em câmara úmida. As amostras de solo estabilizado e natural foram compactadas na energia Proctor Normal, de acordo com a norma brasileira de solo-cimento (ABNT NBR 12025, 2012). Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados em uma prensa universal de ensaios EMIC DL 2000. Após a obtenção dos resultados foi realizada a análise estatística dos dados em função das variáveis e suas interações. Foi obtido um modelo de regressão em função das variáveis independentes que permitiu a avaliação dos efeitos desses fatores. Pelo método de superfície de respostas foi possível demonstrar o comportamento da RC dentro do limite das variáveis. A quantidade de cimento representou o fator mais influente no aumento da RC. O planejamento fatorial e a superfície de resposta foram eficientes em demonstrar os efeitos dos fatores e tendência do comportamento da RC. A RC do solo-cimento apresentou resultados variando de 0,12 a 5,6 MPa.

PALAVRAS-CHAVE: estabilização de solos, solo-cimento, planejamento fatorial, resistência à compressão simples.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material muito variável e complexo e, conforme a situação, pode não atender as características e propriedades exigidas nos projetos. Assim, deve ser tomada uma decisão de aceitar o material com suas características naturais adaptando o projeto, descartar o material local ou alterar as propriedades do solo a fim de se criar um novo material que atenda os requisitos do projeto. Esta última opção é atrativa, devido à possibilidade de se eliminar os custos financeiros e impactos ambientais

com escavações e aterros (INGLES & METCALF, 1972).

Por meio de processos de estabilização química as propriedades do solo podem ser modificadas melhorando o seu comportamento do ponto de vista de aplicação à engenharia. Segundo Ismail (2007) o processo de estabilização com a adição de cimento Portland, mesmo em pequenas quantidades, promove melhorias no comportamento mecânico das amostras.

A técnica do solo-cimento há muitos anos é empregada com sucesso na área de

pavimentação, revestimentos de barragens de terra, como melhoria de solo para assentamento de fundações superficiais, em canais de irrigação, etc (INGLES & METCALF, 1972; DUPAS & PECKER, 1979; PORBAHA et al., 2000; SEGANTINI, 2000; THOMÉ et al., 2005).

Na estabilização química com cimento, os principais fatores que exercem influência nas propriedades das misturas são: tipo de solo, quantidade de cimento, teor de água, grau de compactação e o processo de mistura adotado (SILVEIRA, 1966).

Os métodos estatísticos de planejamento experimental podem ser utilizados para otimização de sistemas lineares e não lineares. Tais métodos permitem selecionar as variáveis que exercem influência num processo, estudar diversos fatores simultaneamente, determinar a confiabilidade dos resultados, além de representar o processo estudado através de equações e superfícies de resposta (MYERS et al., 2009; MONTGOMERY, 2009).

Este trabalho investiga o comportamento da resistência à compressão de misturas de solo-cimento. Diferentemente das pesquisas usuais, a análise está embasada pelo planejamento fatorial de experimentos, que permite compreender o fenômeno de estabilização química de modo integrado. A resistência à compressão será descrita em função da quantidade de cimento e teor de umidade de compactação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo utilizado neste trabalho é proveniente do material residual da Formação Botucatu (Estado de São Paulo, Brasil). Conforme a classificação de Embrapa (2009) pode ser considerado como areia ou areia franca. A distribuição granulométrica das amostras (ABNT NBR 7181, 1984) apresentou 6,1% de argila, 3,9% de silte, 48,0% de areia fina e 42,0% de areia média (Figura 1). Segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM D2487, 2011) este material pode ser classificado como SP-SC, areia mal graduada com argila.

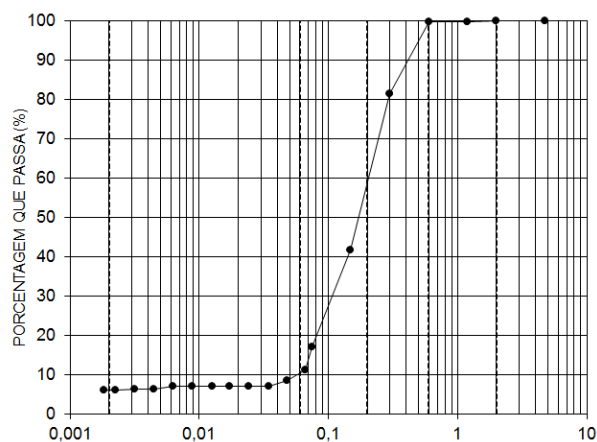


Figura 1. Distribuição granulométrica.

Como estabilizante químico foi empregado o cimento Portland CP II-Z32. Este tipo de cimento Portland pode possuir a adição de 6 a 14% de pozolanas em sua composição (NBR 11578:1991). Este tipo de cimento é o mais usual e de fácil disponibilidade comercial nas regiões que possuem o solo estudado.

2.2 Métodos

O procedimento experimental adotado foi o planejamento fatorial 3^2 , com dois fatores: teor de umidade (w) e porcentagem de cimento (C_i), variando em três níveis cada. Os níveis são: w (6,4, 7,6 e 8,8%) e C_i (3,0, 7,0 e 10,0%).

Os ensaios de resistência à compressão simples (RC) seguiram o recomendado pela norma brasileira de solo-cimento (NBR 12025, 2012). Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com a NBR 12023:2012. A energia de compactação usada foi igual a do Proctor Normal. As amostras foram submetidas a período de cura de 7 e 28 dias, em câmara umida. Os corpos de prova foram testados em uma Máquina Universal de Ensaio EMIC DL10000.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram obtidos resultados de resistência à compressão para as misturas de solo-cimento após os períodos de cura de 7 (RC7) e 28 dias (RC28). A Tabela 1 apresenta a composição das misturas e os valores da RC7 das amostras padrão (PD), sem estabilizante, e das misturas (CI). Os resultados da RC28 são apresentados

na Tabela 2.

Tabela 1. Composição das misturas e resultados RC7.

Mistura	Composição		RC 7 dias (MPa)		
	w (%)	CI (%)	RC7 ₁	RC7 ₂	<u>RC7</u>
CI-01	6,4	3,0	0,2030	0,1907	0,1969
CI-02	6,4	7,0	1,8230	1,8390	1,8310
CI-03	6,4	10,0	1,7260	1,5710	1,6485
CI-04	7,6	3,0	0,5156	0,5092	0,5124
CI-05	7,6	7,0	2,6050	2,6720	2,6385
CI-06	7,6	10,0	3,8560	4,1110	3,9835
CI-07	8,8	3,0	0,2171	0,1747	0,1959
CI-08	8,8	7,0	2,0660	1,9700	2,0180
CI-09	8,8	10,0	1,9610	1,9080	1,9345
PD-01	6,4	0,0	0,0165	0,0165	0,0165
PD-02	7,6	0,0	0,0160	0,0215	0,0188
PD-03	8,8	0,0	0,0208	0,0208	0,0208

A Tabela 2 não apresenta valores para as misturas de solo sem adição de estabilizante, pois não foram sujeitas aos períodos de cura como as misturas solo-cimento.

Tabela 2. Composição das misturas e resultados RC28.

Mistura	Composição		RC 28 dias (MPa)		
	w (%)	CI (%)	RC28 ₁	RC28 ₂	<u>RC28</u>
CI-01	6,4	3,0	0,1758	0,1608	0,1683
CI-02	6,4	7,0	2,0910	2,0540	2,0725
CI-03	6,4	10,0	2,7490	2,8650	2,8070
CI-04	7,6	3,0	2,2140	2,3480	2,2810
CI-05	7,6	7,0	3,2440	3,2170	3,2305
CI-06	7,6	10,0	4,8770	5,4400	5,1585
CI-07	8,8	3,0	0,1396	0,1283	0,1340
CI-08	8,8	7,0	2,7650	2,7690	2,7670
CI-09	8,8	10,0	2,2820	2,2610	2,2715
PD-01	6,4	0,0	-	-	-
PD-02	7,6	0,0	-	-	-
PD-03	8,8	0,0	-	-	-

Comparando os valores de resistência à compressão das misturas de solo-cimento com os resultados obtidos pelas amostras não estabilizadas (PD-01, PD-02 e PD-03) é possível verificar que todas as misturas apresentaram acréscimo da RC (Tabela 1 e 2).

As misturas CI-01 e CI-07, ambas com 3,0% de cimento, obtiveram os menores valores de RC e apresentaram um decréscimo entre as idades de 7 e 28 dias de cura. Este comportamento indica que pode ter ocorrido falha nas reações de longo prazo do cimento, ou então insuficiência da dosagem em permitir este processo.

Os maiores resultados de RC foram obtidos com a mistura CI-06 em ambos os tempos de cura. A mistura CI-07 apresentou os menores resultados entre as misturas testadas, também, para dos dois tempos de cura.

Na Figura 2 é possível comparar os resultados médios observados para RC7 e na Figura 3 para RC28.

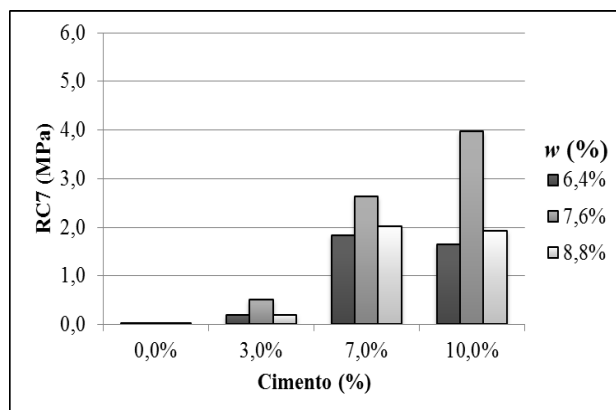


Figura 2. Resultados da RC7 das misturas soloc-cimento.

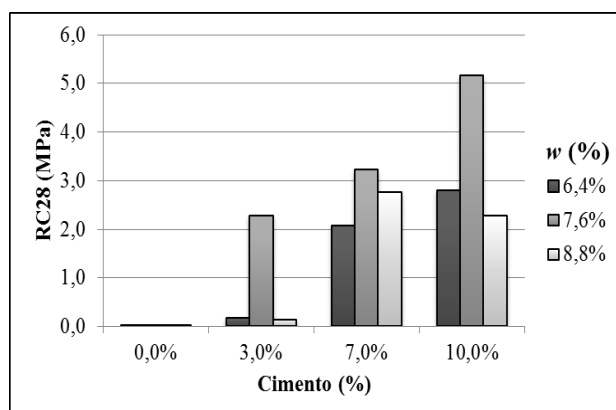


Figura 3. Resultados da RC28 das misturas soloc-cimento.

Conforme as Figuras 2 e 3, as misturas com nível médio do teor de umidade (7,6%) apresentaram os melhores resultados para todos os níveis de quantidade de cimento avaliados.

O solo-cimento apresentou valores de RC característicos de uma argamassa de assentamento e revestimento, conforme a NBR 13281:2001.

A Tabela 3 apresenta a análise de variância dos dados experimentais da RC7. Adotando-se um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), CI linear (x_2), CI quadrático (x_2^2) as interações ($x_1 \cdot x_2$, $x_1^2 \cdot x_2$ e $x_1 \cdot x_2^2$) são significantes para o modelo. São apresentados

os valores da Soma dos Quadrados (SQ), Graus de Liberdade (GL), Média dos Quadrados (MQ), Falta de Ajuste (FA) e Fatores F e p (MONTGOMERY, 2009).

A proporção de variabilidade na medida da RC7, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,998$.

Através de regressão linear foi obtida a Equação 1 que descreve o comportamento das misturas referente a RC7, em função do teor de umidade (x_1) e quantidade de cimento (x_2).

Tabela 3. Análise de variância da RC7.

Fonte	SQ	GL	MQ	F	p
x_1	0,0677	1	0,0677	11,301	8,366 E-03
x_1^2	4,2238	1	4,2238	705,210	7,360 E-10
x_2	14,7912	1	14,7912	2469,543	2,714 E-12
x_2^2	1,3922	1	1,3922	232,437	9,794 E-08
x_1x_2	0,0421	1	0,0421	7,030	2,641 E-02
$x_1^2x_2$	2,3462	1	2,3462	391,720	9,957 E-09
$x_1^2x_2^2$	0,4011	1	0,4011	66,965	1,846 E-05
FA	0,0004	1	0,0004	0,064	0,807
Erro	0,0539	9	0,0060		
Total	24,4346	17			

$$RC7 = 24,2205 - 6,9305 \cdot x_1 + 0,4483 \cdot x_1^2 - 9,4862 \cdot x_2 - 0,0414 \cdot x_2^2 + 2,7499 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,1780 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 0,00014 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 \quad (1)$$

A Figura 4 mostra a projeção da superfície de resposta do modelo de previsão (Equação 1) obtido através dos dados de ensaios. A curvatura desta projeção indica o comportamento das misturas solo-cimento em função das combinações possíveis de w e CI. É possível identificar que o cimento age como principal fator de aumento da RC. A partir da projeção da superfície de resposta é possível verificar que, nas misturas com maior quantidade de cimento, o teor de umidade passou a exercer maior influência.

Segundo a previsão do modelo da RC7 (Equação 1) o maior valor de RC é de 3,8140 MPa e pode ser obtido pela mistura CI-06, com $w = 7,6\%$ e $CI = 10,0\%$.

Experimentalmente foi obtido um valor médio de RC de 3,98 MPa para esta mistura.

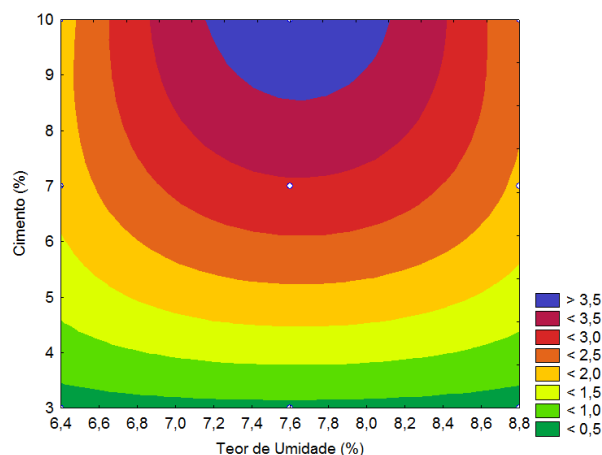


Figura 4. Superfície de resposta RC7 (MPa).

O comportamento das misturas de solo-cimento na Figura 4 evidencia que o CI é o principal fator de aumento da RC. A curvatura da projeção também indica que, com o aumento da quantidade de cimento, o teor de umidade passa a exercer maior influência.

Foi realizada a verificação do modelo RC7 através da análise dos resíduos, ou seja, a diferença entre os valores experimentais e os preditos pela equação 1. Para tanto foi averiguada a distribuição dos valores residuais quanto à normalidade e aleatoriedade (MYERS et al., 2009). Após análise da curva de resíduos (Figura 5) pode-se afirmar que o modelo descrito pela equação 1 é adequado para descrever o comportamento da RC7 como uma função de w e CI.

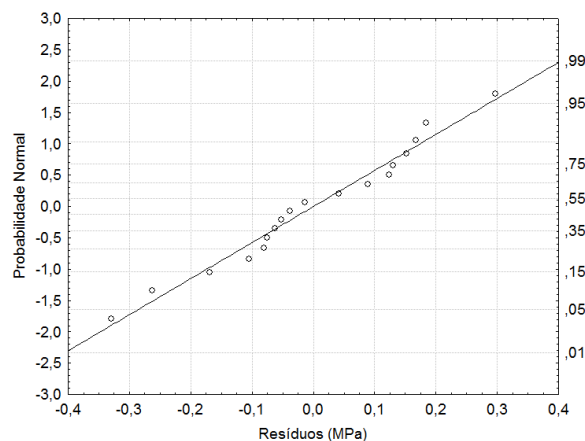


Figura 5. Probabilidade normal dos resíduos para o modelo RC7.

Os resultados da análise de variância dos

dados experimentais da RC28 são expostos na Tabela 4. Adotando-se um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses, os fatores w quadrático (x_1^2), CI linear (x_2), CI quadrático (x_2^2) e as interações ($x_1 \cdot x_2$, $x_1 \cdot x_2^2$, $x_1^2 \cdot x_2$ e $x_1^2 \cdot x_2^2$) mostraram-se significantes para o modelo.

Tabela 4. Análise de variância da RC28.

Fonte	SQ	GL	MQ	F	p
x_1^2	13,52056	1	13,52056	692,792	0,0000
x_2	19,52663	1	19,52663	1000,543	0,0000
x_2^2	0,54702	1	0,54702	28,029	0,0005
$x_1 \cdot x_2$	0,12220	1	0,12220	6,262	0,0337
$x_1 \cdot x_2^2$	0,68176	1	0,68176	34,933	0,0002
$x_1^2 \cdot x_2$	0,15966	1	0,15966	8,181	0,0188
$x_1^2 \cdot x_2^2$	2,25670	1	2,25670	115,633	0,0000
FA	0,00855	1	0,00855	0,438	0,5246
Erro	0,17564	9	0,01952		
Total	37,76928	17			

A proporção de variabilidade na medida da RC28 que é explicada pelos fatores w e CI, obtida na análise de variância, foi $R^2 = 0,995$.

A equação final ajustada para o modelo RC28 pode ser representada pela Equação 2, admitindo que o fator w é representado por x_1 e CI por x_2 . A Figura 6 representa graficamente o efeito de w e CI sobre a RC28.

$$RC28 = 3,1274 - 0,0730 \cdot x_1^2 - 17,1196 \cdot x_2 + 0,8692 \cdot x_2^2 + 4,2976 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,2011 \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,2516 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 0,0107 \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

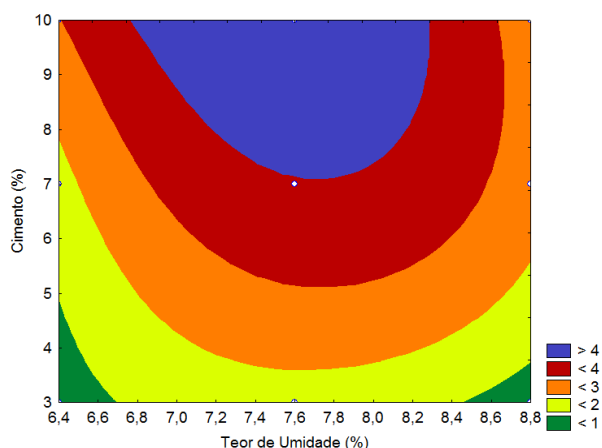


Figura 6. Superfície de resposta RC28 (MPa).

O modelo de regressão RC28 (Equação 2) apresentou um ajuste inferior ao obtido para o

RC7 (Equação 1). As misturas CI-04 ($w = 7,6\%$ e CI = 3,0%) e CI-05 ($w = 7,6\%$ e CI = 7,0%) obtiveram os maiores valores residuais.

Segundo o modelo RC28 (Equação 2) o ponto ótimo, ou seja, a dosagem de solo-cimento que atinge a maior RC, aos 28 dias de cura, corresponde à mistura CI-06, ($w = 7,6\%$ e CI = 10,0%). Conforme o modelo esta mistura apresenta uma RC de 4,94 MPa, porém nos resultados experimentais foi obtida uma RC média de 5,15 MPa.

A Figura 7 apresenta a distribuição dos resíduos para o modelo RC28 (Equação 2). Os valores residuais deste modelo apresentam uma disposição próxima da normalidade, o que indica que o ajuste da equação é adequado.

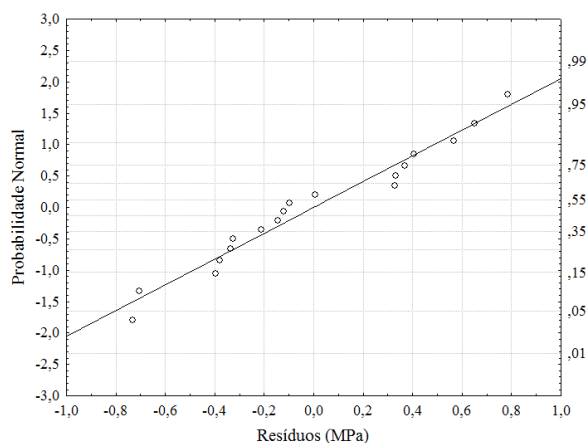


Figura 7. Probabilidade normal dos resíduos para o modelo RC28.

Os resultados de RC28 das misturas de solo-cimento apresentaram grandes diferenças (Tabela 2). A variação elevada de valores de RC dificultou o ajuste do modelo, e, deste modo, foram obtidos valores residuais mais elevados para algumas misturas.

Quando se compara os resultados da RC7 e RC28 é possível observar que algumas misturas apresentaram decréscimo de RC aos 28 dias de cura. Este fato ocorreu para as misturas CI-01, CI-07 e CI-08.

A norma NBR 12025:2012 preconiza a realização do ensaio de resistência à compressão apenas para o período de 7 dias de cura. Apesar do modelo RC28 apresentar ajuste inferior ao observado para o RC7 os resultados de 28 dias foram importantes para evidenciar as misturas que perderam resistência. Foram identificadas, também, as misturas que

continuaram a apresentar reações químicas ao longo do período de cura e obtiveram acréscimo de RC, como a misturas CI-06 que permaneceu como ponto ótimo de dosagem nas duas situações.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples mostraram que todas as misturas de solo-cimento testadas apresentaram aumento de resistência à compressão, quando comparadas as misturas de solo sem estabilizante.

O planejamento fatorial 3^2 e o método de superfície de resposta se mostraram eficientes na avaliação da estabilização química do solo. O uso combinado dessas ferramentas facilitou a compreensão da ação dos diferentes teores de cimento e de umidade de compactação sobre a resistência à compressão simples.

O ponto ótimo da mistura solo-cimento foi encontrado a partir dos modelos e corresponde a um teor de umidade de compactação de 7,6% e porcentagem de cimento de 10,0%. Para a cura de 7 dias esta mistura obteve uma resistência à compressão de 3,81 MPa e para 28 dias de 4,94 MPa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio prestado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Universidade de São Paulo (USP).

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials – ASTM. D2487 (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, DOI: 10.1520/D2487-11, www.astm.org.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7181 (1984), Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984
- _____. NBR 11578 (1991). Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro.
- _____. NBR 12023 (2012). Solo Cimento – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro.
- _____. NBR 12025 (2012). Solo Cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro.
- _____. NBR 13281 (2001). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2009). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2ed., EMBRAPA-SPI, Rio de Janeiro, RJ, 412p.
- Prusinski, J. R.; Bhattacharja, S. (1999). Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *Journal of the Transportation Research Board*, Washington, v. 1652.
- Dupas, J. M.; Pecker, A. (1979) *Static and dynamics Properties of Sand-cement*, *Journal of Geotechnical Engineering division*, vol. 105, p. 419-436.
- Ingles O. G.; Metcalf J. B. (1972) *Soil stabilization—principles and practice*. Butterworths Pty. Limited, Sydney, Australia, 374p.
- Ismail, M. A. (2007) *Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, p. 520-529.
- Montgomery, D. C. (2009) *Design and Analysis of Experiments*. 7 ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 656p.
- Myers, R. H.; Montgomery, D. C.; Anderson-Cook, C. M. (2009) *Response Surface Methodology: Process and product optimization using designed experiments*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 1247p.
- Porbaha A.; Shibuya S.; Kishida T. (2000) *State of the art in deep mixing technology: part III—geomaterial characterization*. *Ground improvement*. J ISSMGE vol. 4, p. 91–110.
- Segantini, A. A. S. (2000) *Utilização de Solo-Cimento em Estacas Escavadas com Trado em Ilha Solteira-SP*. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 176p.
- Silveira, A. (1966) *Estabilização de Solos com Cimento*. Publicação nº 128 – Síntese de Notas de Aula – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Thomé, A.; Donato, M.; Consoli, N. C.; Graham, J. (2005) *Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil*. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, p. 1569–1584.