

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE INCORPORAÇÃO DE CIMENTO EM SOLO ARENOSO ATRAVÉS DE ENSAIOS TRIAXIAIS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Débora Cardoso da Silva
Eduarda Fontoura
Douglas Cardoso Engelke
Anna Paula Sandri Zappe
Natália Guterres Mensch
Lélio Antônio Teixeira Brito

Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura
Laboratório de Pavimentação

RESUMO

A pesquisa realizada buscou estudar o comportamento mecânico de solo estabilizado com cimento Portland através do ensaio triaxial de cargas repetidas, com teores de cimento de 3, 5 e 7%, nas idades de cura de 7, 14 e 28 dias, e as análises foram feitas a partir de três modelos de regressão amplamente aplicados: em função da tensão confinante (σ_3), da tensão desviadora (σ_d) e composto ($\sigma_3 - \sigma_d$). A partir das análises, foi possível confirmar uma forte correlação do comportamento resiliente dos materiais com as tensões de confinamento aplicadas, bem como ampliar a base de dados resilientes para solos nacionais estabilizados com cimento. Também se evidenciou a influência dos diferentes teores de cimento na rigidez do solo em função dos períodos de cura; o teor de 3% obteve redução do incremento do módulo em tempo inferior aos teores maiores do agente cimentante, que tiveram maior lentidão no processo de acréscimo de rigidez.

ABSTRACT

The research aims to study the mechanical behavior of cement-stabilized soil through triaxial tests with cyclic loads, with the rates of 3, 5 and 7% of Portland cement, on ages of 7, 14 and 28 days, and the analyses were made with three different regressions models usually applied: as a function of confining stress (σ_3), deviant stress (σ_d) and compound ($\sigma_3 - \sigma_d$). After the analyses it was possible to notice strong relation between the resilient behavior of the materials and the confining stress applied, as well as expanding the resilient database for cement-stabilized national soils. It was also possible to understand how the different rates of cement influenced the soil stiffness with the cement cure time, the 3% rate had reduction of the modulus increment in inferior time than the higher rates, which needed more time to the process of improving the stiffness.

1. INTRODUÇÃO

O pavimento das rodovias brasileiras é basicamente composto por uma camada de revestimento sobreposta a camadas de base e sub-base e em alguns casos reforços adicionais. É sabido que a eficiência estrutural do projeto está diretamente relacionada aos materiais que compõem a estrutura final do pavimento.

Conhecer as características de disposição, espessura e matérias que compõem as camadas é de suma importância para um bom desempenho. Alguns materiais já vêm sendo muito utilizados nas camadas de base e sub-base, exemplos são a cal, cimento e pozolanas que tem função de aglomerantes. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2013) cerca de 25 mil quilômetros de rodovias foram executados com bases ou sub-bases de solo-cimento.

Um dos fatores considerado nos projetos é o custo da execução da obra, nesse sentido aperfeiçoar o material de locais próximos nem sempre se torna viável devido à precariedade do material. Sendo assim realizar a melhoria dos solos locais passa a ser uma ideia rentável, e a estabilização, por exemplo, é uma alternativa muito utilizada nas construções para o

aproveitamento do material local. E a estabilização química com o uso de cimento é uma das boas maneiras de conferir a determinados materiais características necessárias ao seu emprego em pavimentos.

2. SOLO-CIMENTO

Solos melhorados com cimento proporcionam maior estabilidade, diminuindo sua expansão e plasticidade, mas quando comparados com solo-cimento, que levam teores maiores do aglomerante, a sua rigidez não é elevada (Sanbonsuge *et al*, 2017).

A qualidade da dosagem de solo-cimento está diretamente relacionada aos fatores de quantidade de água, tipo e grau de compactação, tempo de cura, tipo de solo utilizado e até mesmo o tempo de intervalo até a aplicação em campo (Oliveira, 2011). A rigidez é influenciada pelo processo de hidratação que ocorre na mistura solo, cimento e água, assim é de grande importância que o teor de umidade do solo-cimento seja adequado na composição, para que a cimentação ocorra de forma adequada garantindo a redução da plasticidade para o aumento da rigidez (Rocha e Rezende 2017).

Para a escolha do tipo de solo, estudos apontam que solos compostos predominantemente por areias são mais apropriados, já que garantem maior durabilidade mesmo com teores de cimento menores, enquanto solos orgânicos não são indicados (Cancian *et al*, 2017). Em seus estudos, Parente *et al* em 2002, concluíram que solos classificados como lateríticos por serem mais estáveis recebem menor influência do teor de cimento e de tempo de cura, apresentando assim um melhor desempenho em comparação com a mistura composta por solo não laterítico.

A falta de estudos mais criteriosa da composição vem gerando problemas nos projetos de solo-cimento, o que posteriormente causa a deterioração precoce do pavimento executado gerando custos excessivos na manutenção e reaplicação de camadas de revestimento (Cancian *et al*, 2017).

Tendo em vista que o comportamento resiliente do solo-cimento ainda necessita de mais estudos, esta pesquisa busca analisar o módulo de resiliência triaxial de um solo-cimento a partir de diferentes teores de cimento (3%, 5% e 7%) em diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Propriedades dos materiais

A amostra de solo utilizada foi classificada pelo sistema AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) como A-2-4, solos com características granulares, considerados como tendo comportamento como subleito de excelente a bom. Suas principais características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das características do solo

Propriedades	Resultado
CBR	92,6
Expansão	0,03
LL (%)	31,2
IP (%)	7,6
IG (%)	0
Densidade real (g/cm ³)	2,371

As características granulométricas do solo na curva granulométrica na Figura 1, a seguir.

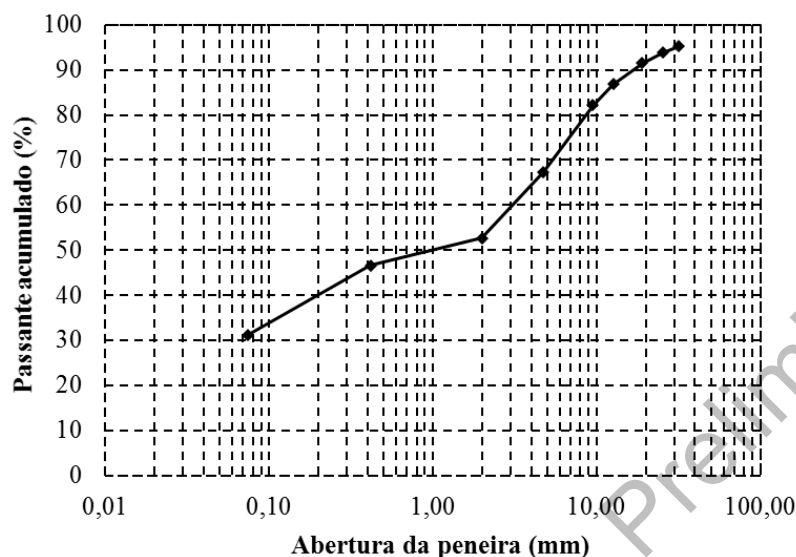


Figura 1: Curva granulométrica do solo

O ensaio de compactação foi realizado conforme orientações da NBR 7182 com energia de compactação intermediária. Realizou-se ensaio de compactação para amostra de solo estabilizada com um teor médio de cimento de 5.5%. Estabeleceu-se para as demais composições iguais valores de umidade ótima e de peso específico aparente máximo, uma vez que, de acordo com DNIT (2010), quando se faz uso de cimento Portland como agente estabilizador químico para os materiais granulares não há grande variação da umidade ótima em relação ao material puro.

A caracterização mecânica dos solos foi conduzida por meio de ensaios triaxiais de módulo de resiliência, conforme orientações da norma DNIT 134/2018 (Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio) nas tensões previstas conforme Tabela 2. Foram ensaiadas amostras com incorporação de cimento nos teores de 3%, 5% e 7%. As porcentagens de cimento foram estabelecidas de forma a encontrar a relação do comportamento resiliente do solo em relação a adição de cimento. Realizaram-se ensaios com tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. A Figura 2 apresenta o programa experimental do presente estudo.

Para realização dos ensaios triaxiais, foram preparadas amostras cilíndricas de dimensões 10x20 cm, compactadas na energia intermediária. O solo, por se tratar de material laterítico, foi umedecido previamente na umidade necessária, deixado em repouso por um período de no mínimo 20 horas, para melhor percolação da água nos vazios e homogeneização da umidade no material, e após foi misturado com cimento para posterior compactação. O armazenamento das amostras foi realizado em caixas térmicas mantidas em temperatura de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ e umidade entre 95-100%.

Tabela 2: Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)
	0,020
0,020	0,040
	0,060
0,035	0,035
	0,070
	0,105
0,050	0,050
	0,100
	0,150
0,070	0,070
	0,140
	0,210
0,105	0,105
	0,210
	0,315
0,140	0,140
	0,280
	0,420

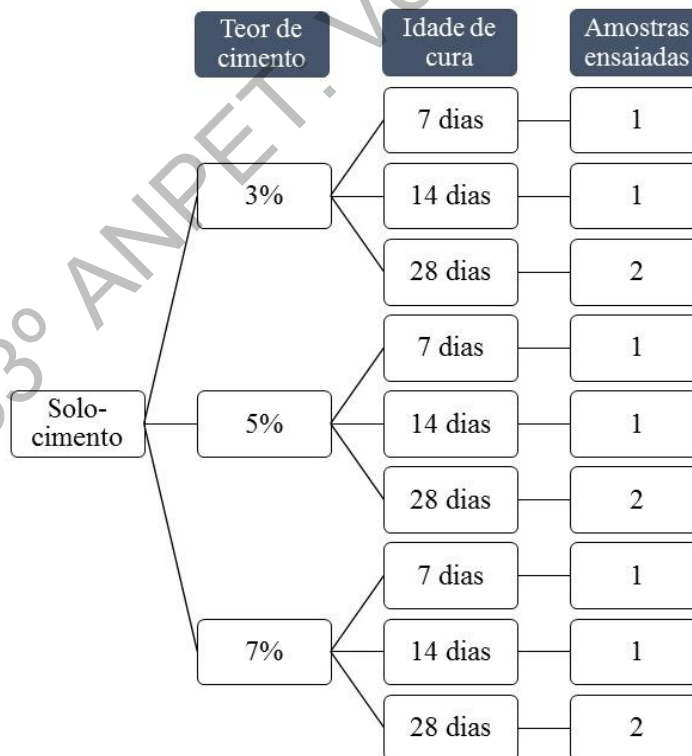


Figura 2: Programa experimental

3.2. Modelos de regressão

O presente estudo incorporou alguns dos principais modelos de regressão sugeridos pela literatura. Os dados de módulo de resiliência foram ajustados pelos modelos arenoso, argiloso e composto, apresentados nas equações 1, 2 e 3 respectivamente (Motta e Medina, 2015).

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (1)$$

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (2)$$

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3} \quad (3)$$

em que: MR : módulo de resiliência,

σ_3 : tensão confinante,

σ_d : tensão desvio e

k_1, k_2, k_3 : constantes de ajuste dos modelos.

Ademais, utilizou-se uma regressão linear dos valores de módulo de resiliência a fim de estimar a rigidez do material cimentado com tensões de confinamento limites próximas de zero. No presente trabalho, chamaremos esta propriedade de $E_{\sigma 0}$. Buscou-se, por conseguinte, avaliar o efeito dos diferentes teores de cimento incorporados sobre tal estimativa de rigidez.

4. RESULTADOS

4.1. Ensaio de compactação

A Figura 3 apresenta a curva de compactação obtida para solo com incorporação de 5,5% de cimento, sendo a umidade ótima igual a 13,6% e peso específico aparente seco máximo de 1,838g/cm³

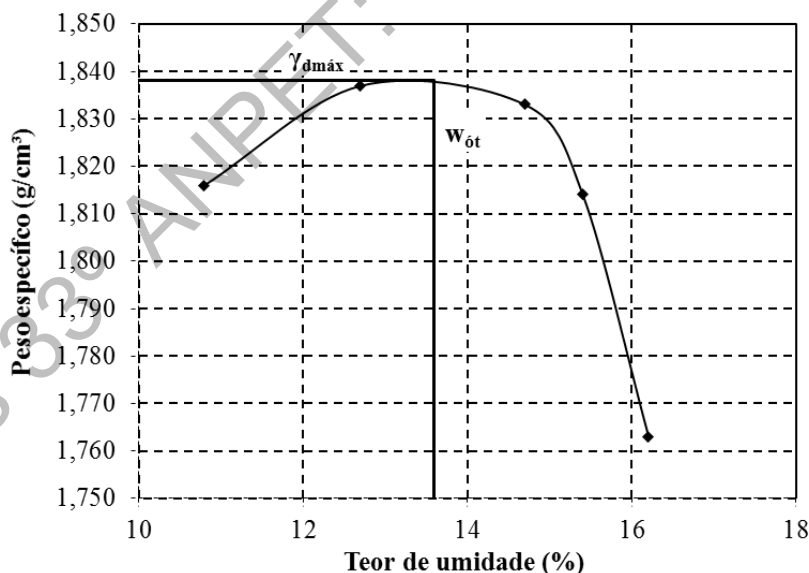


Figura 3: Curva de compactação

4.2. Módulo de resiliência

As Figura 4, 5 e 6 apresentam os resultados de módulo de resiliência obtidos aos 7, 14 e 28 dias de cura, com dados ajustados pelo modelo proposto para solo arenoso (Equação 2). Os gráficos são plotados na escala log-log.

Para um tempo de cura de 7 dias, o solo estabilizado com 7% de cimento apresentou maiores valores de módulo de resiliência. Entretanto, observa-se menor inclinação da curva de ajuste para este teor. Constata-se, portanto, uma menor variação dos valores de módulo para diferentes tensões confinantes.

Para o tempo de cura de 14 dias, as amostras com maiores teores de cimento apresentaram módulos mais elevados. É importante ressaltar que, aos 14 dias, a rigidez das amostras com 5 e 7% de cimento incorporado demonstraram rigidez bastante similar.

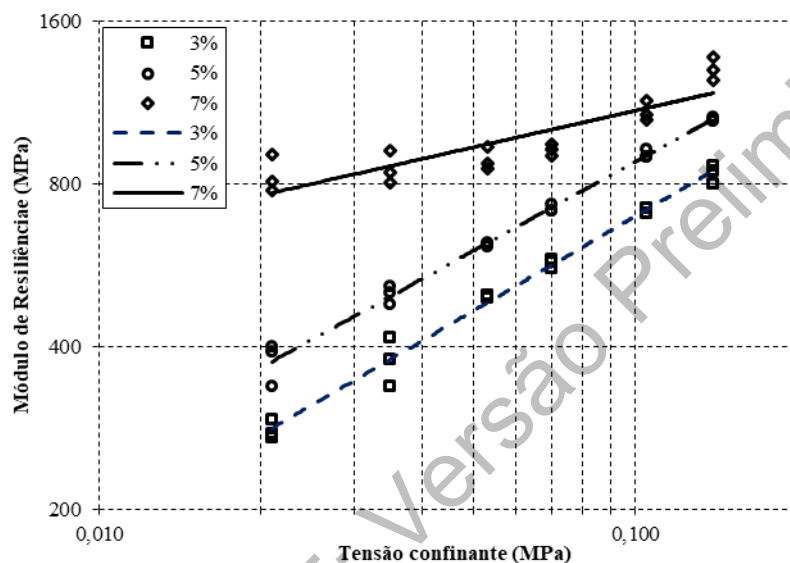


Figura 4: Módulo de resiliência aos 7 dias

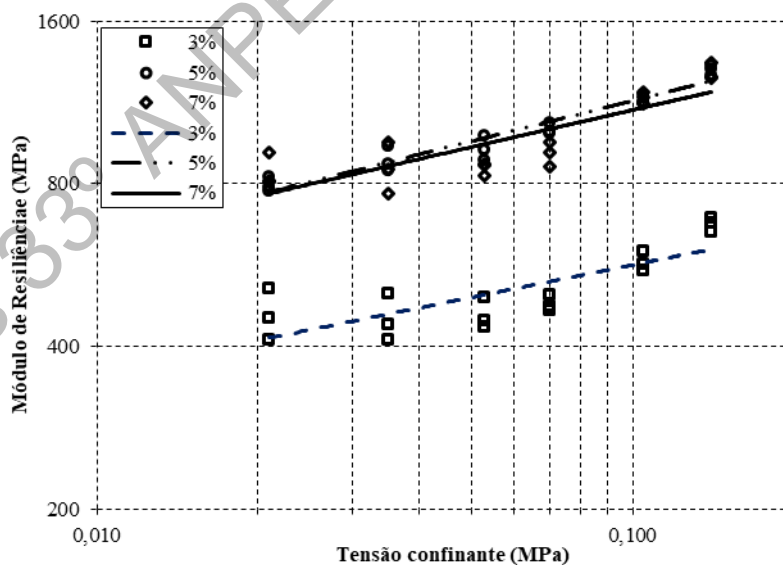


Figura 5: Módulo de resiliência aos 14 dias

Para um tempo de cura de 28 dias, observou-se também um incremento no módulo de resiliência condizente com o aumento dos teores de cimento. É importante ressaltar também que a

inclinação da curva é menor para solos com maiores teores de cimento. Trata-se de um comportamento semelhante àquele observado aos 7 dias de cura.

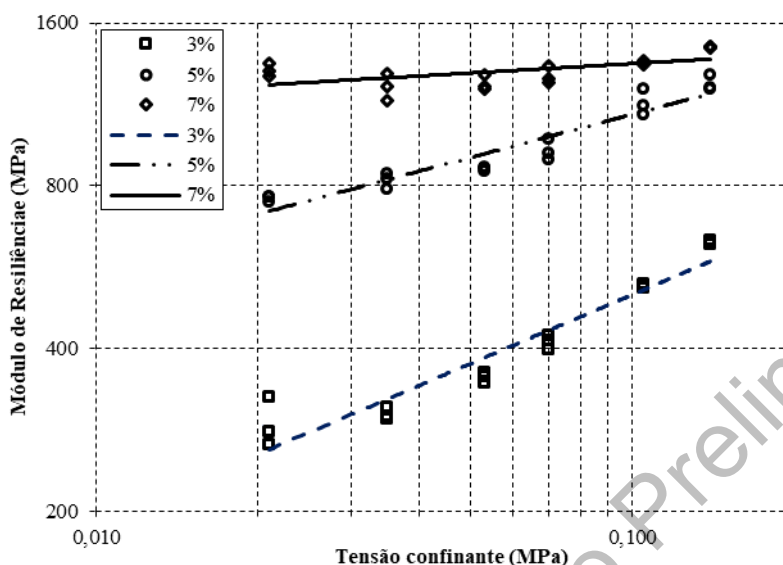


Figura 6: Módulo de resiliência aos 28 dias

Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes obtidos para o modelo arenoso de módulo de resiliência. A Tabela 5 apresenta os coeficientes obtidos para o modelo argiloso de módulo de resiliência. No presente estudo, optou-se por utilizar o modelo arenoso, uma vez que este apresentou maior correlação entre os dados medidos e ajustados ($R^2 > 0,70$).

Tabela 3: Coeficientes do modelo arenoso com k_1 em MPa

Teor (%)	Tempo (dias)	k_1	k_2	R^2
3,0	7	2648,4	0,58	0,99
	14	895,1	0,20	0,63
	28	1329,7	0,42	0,92
5,0	7	3088,8	0,55	0,99
	14	2020,5	0,25	0,93
	28	1992,3	0,26	0,90
7,0	7	1834,6	0,22	0,75
	14	1848,5	0,23	0,70
	28	1535,6	0,06	0,34

Tabela 4: Coeficientes do modelo argiloso com k_1 em MPa

Teor (%)	Tempo (dias)	k_1	k_2	R^2
3,0	7	1243,5	0,40	0,69
	14	640,8	0,10	0,25
	28	731,7	0,27	0,55
5,0	7	1537,2	0,38	0,72
	14	1386,1	0,15	0,48
	28	1415,7	0,18	0,65
7,0	7	1319,4	0,14	0,42
	14	1336,8	0,14	0,42
	28	1387,3	0,03	0,12

Ressalta-se que o solo melhorado com 7% de cimento e tempo de cura de 28 dias uma

estabilização dos valores de módulo, sendo ele não dependente da tensão desvio ou confinante, fazendo com que os coeficientes de correlação tivessem valores baixos (para quaisquer modelos de análise). São apresentados também os coeficientes ajustados para o modelo composto (ou arenoso-argiloso) de módulo de resiliência, pois trata-se de um modelo mais genérico, Tabela 6. Ademais, o modelo composto também descreve melhor o comportamento resiliente do solo pelo fato de ser "genérico" no que diz respeito a granulometria.

Tabela 5: Coeficientes do modelo composto, com k_1 em MPa

Teor (%)	Tempo (dias)	k1	k2	k3	R ²
3,0	7	2582,5	-0,01	0,58	0,99
	14	1008,7	-0,07	0,30	0,71
	28	1550,6	-0,01	0,49	0,95
5,0	7	3044,5	0,03	0,52	1,00
	14	2170,3	-0,05	0,32	0,95
	28	2079,5	0,03	0,26	0,92
7,0	7	2008,5	-0,01	0,26	0,78
	14	2029,7	0,00	0,26	0,75
	28	1581,5	-0,03	0,09	0,42

O efeito da incorporação dos diferentes teores de cimento foi associado a uma estimativa teórica do valor de módulo resiliente em tensões confinantes próximas a zero ($E_{\sigma 0}$). Os elevados valores de correlação obtidos entre as diferentes tensões confinantes e os valores de módulo, para as diferentes composições, indicam uma boa previsão para os valores de $E_{\sigma 0}$. Foi observado que o aumento do teor de cimento incorporado no solo implicou em um crescimento exponencial dos valores de $E_{\sigma 0}$. Na Figura 7, apresenta-se a evolução dos valores de $E_{\sigma 0}$ para os diferentes teores de cimento, aos 28 dias de cura e aos 7 dias de cura.

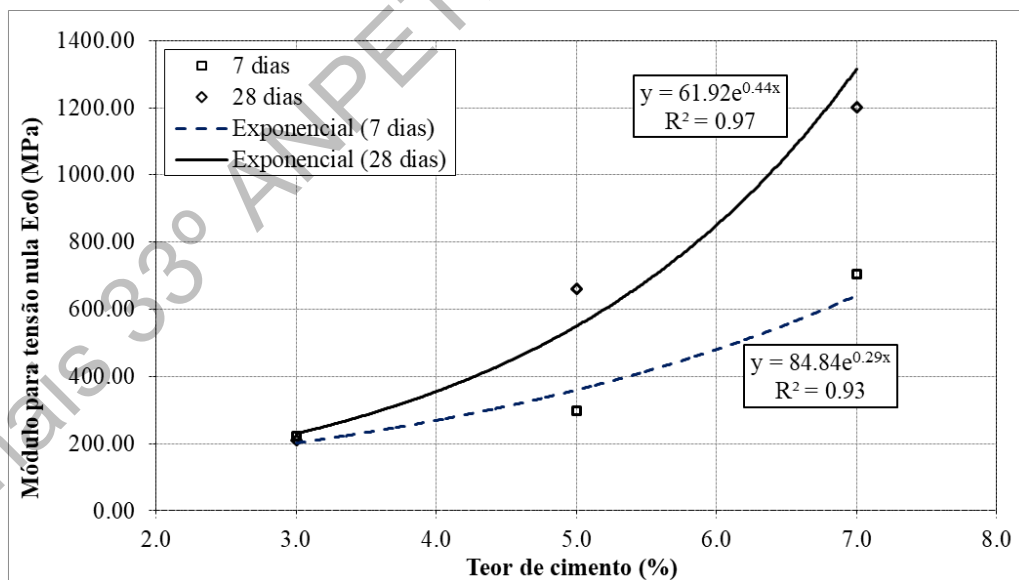


Figura 7: Rigidez do material cimentado para diferentes teores de cimento

5. CONCLUSÕES

O presente estudo dedicou-se a avaliação da incorporação de diferentes teores de cimento em solo granular e sua relação sobre o comportamento resiliente do solo. Dos resultados obtidos, é importante enumerar um conjunto de considerações:

- a) A obtenção de coeficientes de correlação maiores no ajuste dos dados pelo modelo de regressão arenoso indica que o comportamento resiliente apresenta significativa influência das tensões confinantes. Assume-se, portanto, que o cimento desempenhou papel de melhorador. Porém, seu efeito não alterou fundamentalmente a natureza do solo, classificado como granular, como observado nos modelos em relação a tensão desvio.
- b) Observou-se, para o modelo arenoso, um decréscimo dos valores de k_2 para tempo de cura e teor de cimento crescentes. Dado que o coeficiente k_2 está relacionado à inclinação da curva de ajuste (na escala log-log), infere-se que os solos melhorados com maiores teores de cimento, dos quais é esperada maior rigidez, devem apresentar menor influência da tensão confinante em seu comportamento.
- c) Já com relação ao modelo argiloso não foi encontrado um padrão de comportamento dos parâmetros de ajuste do modelo.
- d) O modelo composto utilizado representou com maior precisão o comportamento do solo, visto que a maioria dos dados de módulo de resiliência obtidos tinham boa correlação com as tensões desvios e confinantes.
- e) As amostras com menor teor de cimento (3% de cimento) apresentaram resultados bastante semelhantes nos diferentes tempos de cura (7 dias, 14 dias e 28 dias). Essa constatação indica que o total de acréscimo de rigidez proporcionado pela reação de cimentação, para um teor de 3%, seria atingido em um período inferior ao tempo de cura convencional (28 dias).
- f) Para maiores teores de cimento incorporado, observou-se maior lentidão no processo de acréscimo de rigidez. No tempo de cura de 14 dias, solos melhorados com 5 e 7% de cimento apresentaram comportamento semelhante, e, aos 28 dias, observou-se acréscimos consideráveis apenas para o solo com teor de 7%.
- g) O emprego de um mesmo teor de umidade ótima para amostras com diferentes teores de cimento é uma significativa ressalva. Sugere-se, portanto, que a disponibilidade de água entre os vazios da estrutura do solo pode estar relacionada às diferentes velocidades no processo de cura do material cimentado.
- h) A avaliação do parâmetro de rigidez E_{60} permitiu inferir uma melhora no desempenho do solo granular, com o acréscimo do cimento em sua composição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP – *Estradas de concreto: este é o caminho para o futuro*. Associação Brasileira de Cimento Portland. Brasil, 2013.
- ABNT NBR 7182 – *Solo* – Ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2016.
- DNIT Norma 181 – *Determinação do módulo de resiliência*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2010.
- Cacian, M. A.; Cacian, V. A.; Fontenele, H. B.; Branco C. J. M. C. E Teixeira, R. S. *Influência do teor de umidade, da porosidade e do intervalo de tempo até a aplicação de mistura solo-cimento em pavimento rodoviário*. Transportes. v. 25, n. 1, p. 41-50, 2017.
- Oliveira, R. F. V. *Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Ouro Preto, 2011.
- Parente, E. B.; Parreira A. B. E Soares J.B. *Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e de outro não laterítico estabilizados com cimento.*, p. 95-107, 2002.
- Rocha, M. T. E Rezende, L. R. *Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação*. Revista Matéria. v. 22, n. 4, 2017.
- Sanbonsuge, K.; Vasconcelos, K.; Bernucci, L. L. B. E Moura, E. *Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento*. Transportes. v. 25, n. 4, p. 68-82, 2017.
- Medina, Jacques De; Motta, Laura M. G. *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: Interciência, 2015, 638p.:il.