

Resistência de Cone Penetrométrico em Sistemas Binários Empacotados

Rogério Dias Dalla Riva

UFV/DEC, Viçosa/MG, Brasil, rogerioriva@yahoo.com.br

Dario Cardoso de Lima

UFV/DEC, Viçosa/MG, Brasil, declima@ufv.br

Liovando Marciano da Costa

UFV/DPS, Viçosa/MG, Brasil, liovando@solos.ufv.br

Claudio Henrique de Carvalho Silva

UFV/DEC, Viçosa/MG, Brasil, silvac@ufv.br

João Herbert Moreira Viana

EMBRAPA/CNPMS, Sete Lagoas/MG, Brasil, jherbert@cnpmembrapa.br

Elpídio Inácio Fernandes Filho

UFV/DPS, Viçosa/MG, Brasil, elpidio@ufv.br

Rodrigo Miranda Carvalho

UFV/DEC, Viçosa/MG, Brasil, rodrigociv@yahoo.com.br

Lucimar Arruda Viana

UFV/DEC, Viçosa/MG, Brasil, lucimarvianna@yahoo.com.br

RESUMO: Propriedades geotécnicas de solos granulares, tais como, resistência à penetração, permeabilidade e compressibilidade podem ser determinadas pelo arranjo de suas partículas, denominado de empacotamento. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar amostras binárias empacotadas submetidas a ensaio de resistência de cone penetrométrico. Foi utilizada uma areia de dragagem de rio coletada às margens da Rodovia MG 238, no Município de Cachoeira da Prata/MG, no ponto de coordenadas geográficas 19°29'59.06"S e 44°29'42.25"W. A fração areia limpa foi obtida por: (i) separação da fração areia; (ii) remoção de matéria orgânica; (iii) remoção de óxidos de ferro; e, (iv) fracionamento da fração areia limpa por peneiramento, em 22 classes de tamanho. Foi determinado o ponto médio de cada classe, obtendo-se as relações binárias (D/d). Para a obtenção dos empacotamentos binários foram realizadas misturas entre classes em termos percentuais de volume real. As curvas de resistência foram obtidas por meio de um penetrômetro, desenvolvido pelo LMS/UFV, utilizando sistema de cravação hidráulico com velocidade calibrada entre 15 ± 5 mm/min. Foram avaliadas as relações binárias D/d iguais a 5,6; 6,7; 8,0; 9,5; 11,3 e 13,4, observando-se que, para relações maiores do que 8,0, os gráficos não apresentaram diferenças significativas quanto a resistência à penetração nas profundidades analisadas, enquanto que, para as demais relações, houve ganho de resistência.

PALAVRAS-CHAVE: Empacotamentos Binários, Penetrômetro, Fração Areia, Resistência de Cone Penetrométrico.

1 INTRODUÇÃO

O entendimento dos fenômenos relativos ao empacotamento de solos arenosos (sem estrutura), é importante nos mais diversos campos da tecnologia. Na Engenharia Geotécnica destacam-se os estudos relativos à fundação de solos, misturas asfálticas, composições otimizadas de concreto, extração de óleo e gás de reservatórios, permeabilidade, estruturação de solos granulares, retenção de água, etc., como exemplos de empacotamentos densos.

Frequentemente, esferas de igual tamanho são utilizadas na modelagem de sistemas de empacotamento. Vários pesquisadores empregaram esferas de aço e vidro de igual tamanho na simulação do empacotamento de partículas, pois esta forma é de grande utilidade na determinação dos fatores que influenciam a densidade. A forma esférica da partícula é a mais utilizada em empacotamentos tridimensionais, pois somente um parâmetro, o diâmetro, é necessário para especificar a sua dimensão.

Todavia, na prática as partículas envolvidas em estudos de empacotamento usados na engenharia diferem da forma esférica, não são de igual tamanho, possuem formato variado e rugosidade superficial, além de exibirem efeitos de coesão e aglomeração não percebidos quando se utilizam esferas grandes. Não obstante a combinação desses fatores influenciar o empacotamento, é possível arranjar as partículas de forma a atingir maiores densidades. O uso de misturas de partículas bimodais ou trimodais podem elevar a densidade. Contudo, a composição e a razão entre as partículas envolvidas deve ser controlada para a otimização do empacotamento.

Estudos envolvendo empacotamentos provêm de diversas áreas. Como consequência dessa diversidade, há vários estudos envolvendo empacotamentos de partículas, especialmente esferas. Segundo Mitchell (1993), em solos granulares as partículas são suficientemente grandes e pesadas, comportando-se geralmente como unidades independentes. Esse autor destaca que, mais recentemente, a modelagem

numérica de solos granulares com base na distorção elástica, escorregamento e rolamento das partículas, usualmente assumindo-se formas esféricas ou de disco para as mesmas, tem permitido avanços na análise do comportamento destes materiais.

Ainda, de acordo com o mesmo autor, nos anos 70 pesquisas foram conduzidas com arranjos de partículas em solos granulares, concluindo-se que a caracterização das propriedades de areias e pedregulhos não devia ser vista somente em termos de densidade relativa, sendo, também, necessário considerar o arranjo de partículas (empacotamento) e histórico de tensões destes materiais. Crescia, então, o entendimento de que propriedades, tais como resistência à penetração, permeabilidade, e compressibilidade, podiam ser determinadas diretamente pelo tamanho e forma das partículas, seus arranjos e as forças existentes entre elas. Assim sendo, o entendimento destas propriedades requer o conhecimento mais detalhado destes fatores.

No presente artigo avalia-se a resistência à penetração em função da profundidade, em sistemas binários na fração areia limpa de areia de dragagem de rio, sujeito à ação vibratória controlada em função das classes envolvidas e das relações entre os seus diâmetros médio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Para essa pesquisa foi utilizada uma areia de dragagem de rio coletada às margens da Rodovia MG 238, no Município de Cachoeira da Prata/MG, no ponto de coordenadas geográficas 19°29'59.06"S e 44°29'42.25"W.

2.2 Preparação da Amostra

A areia, após secagem ao ar, foi passada na peneira de abertura nominal de 2,0 mm, para retirada da fração pedregulho. Esse material foi submetido a pré-tratamentos para dispersão física e química, objetivando a separação da fração areia das frações silte e argila, remoção da matéria orgânica e dos óxidos de ferro,

segundo os procedimentos apresentados a seguir. Ao final desses processos obteve-se a fração areia limpa.

2.2.1 Dispersão das Amostras

Foi realizada por meio de dispersor mecânico, especialmente construído para trabalhar com grandes volumes de solo, durante 16 h, a 50 rpm, e por dispersão química utilizando-se NaOH 0,5 mol L⁻¹ e água deionizada; ao final do processo, as amostras foram lavadas em peneira de 0,053 mm, visando separar a fração areia das frações silte e argila.

2.2.2 Remoção de Matéria Orgânica

Foram colocados aproximadamente 300 g da fração areia em becker de 500 mL, acrescentando NaClO a pH 9,5 até obter-se um volume de 50 mL acima da superfície livre da amostra (adaptado de Anderson, 1963). Em seguida, o conjunto foi colocado em banho-maria a 70°C durante 1 h. Ao final do processo, as amostras foram retidas em peneira de 0,053 mm, sendo lavadas em água corrente.

2.2.3 Remoção de Óxidos de Ferro

Foram colocados aproximadamente 300 g da fração areia em becker de 500 mL, acrescentando solução de citrato de sódio e ácido cítrico, com pH ajustado entre 4,6 e 4,8, até obter-se um volume de 50 mL acima da superfície livre da amostra. Em seguida, as amostras foram colocadas em banho-maria durante 15 min à temperatura de 50°C. Decorrido esse período, foi adicionada a quantidade aproximada de 20 g de ditionito de sódio, agitando-se a solução vigorosamente e deixando-se o conjunto em banho-maria por mais 1 h. Ao final do processo, as amostras foram retidas em peneira de 0,053 mm e lavadas em água corrente. Essa operação foi repetida por três vezes (adaptado de Mehra e Jackson, 1960).

2.3 Fracionamento da Fração Areia Limpa por Peneiramento

Foram utilizadas peneiras certificadas distribuídas em 21 classes para a separação dos diversos tamanhos de partículas da fração areia limpa e esferas de vidro, fazendo-se uso de agitador eletromagnético de ação vibratória vertical e horizontal, com controle de intensidade, tempo e modo de peneiramento, como se informa na Tabela 1.

Tabela 1 - Peneiras Utilizadas para o Fracionamento da Fração Areia Limpa.

| Item | Peneira (mm) | Item | Peneira (mm) |
|------|--------------|------|--------------|
| 1 | 2,000 | 12 | 0,297 |
| 2 | 1,680 | 13 | 0,250 |
| 3 | 1,410 | 14 | 0,210 |
| 4 | 1,190 | 15 | 0,177 |
| 5 | 1,000 | 16 | 0,149 |
| 6 | 0,840 | 17 | 0,125 |
| 7 | 0,710 | 18 | 0,105 |
| 8 | 0,590 | 19 | 0,088 |
| 9 | 0,500 | 20 | 0,074 |
| 10 | 0,420 | 21 | 0,062 |
| 11 | 0,350 | 22 | 0,053 |

2.4 Empacotamentos de Sistemas Binários

O procedimento consistiu na deposição inicial da partícula de maior diâmetro (D) em quantias aproximadas de 50 mL, colocadas em um aparato de acrílico (diâmetro interno de 60 mm e altura de 50 mm) com auxílio de um funil, para evitar que as partículas caíssem de uma única vez e perturbassem o ajuste anteriormente efetuado. Na sequência, foram produzidas vibrações de frequência e amplitudes controladas para permitir que as partículas pudessem se ajustar e atingir a configuração mais densa possível (menor volume). Esse procedimento foi repetido até que a totalidade das partículas de maior diâmetro fosse depositada no aparato de acrílico.

Posteriormente, as partículas de menor diâmetro (d) foram introduzidas no aparato, conforme o procedimento descrito anteriormente, possibilitando que as mesmas pudessem migrar entre os caminhos porosos formados pela matriz das partículas de maior diâmetro, até atingir a maior profundidade possível dentro do aparato de acrílico. Dessa forma, obteve-se a mais densa configuração possível do empacotamento binário (Lade et al., 1998; Dalla Riva, 2005).

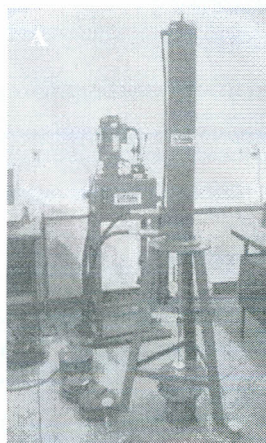
As classes, com seus respectivos pontos médios e suas relações entre o diâmetro médio maior (D) e o diâmetro médio menor (d), encontram-se dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Classes Utilizadas em Empacotamentos de Sistemas Binários.

| Classes utilizadas (mm) | D (mm) | d (mm) | D/d |
|-------------------------|--------|--------|------|
| 2,000 - 1,680 | 1,840 | 0,324 | 5,6 |
| 0,350 - 0,297 | 1,840 | 0,274 | 6,7 |
| 2,000 - 1,680 | 1,840 | 0,230 | 8,0 |
| 0,250 - 0,210 | 1,840 | 0,194 | 9,5 |
| 2,000 - 1,680 | 1,840 | 0,163 | 11,3 |
| 0,210 - 0,177 | 1,840 | 0,137 | 13,4 |
| 2,000 - 1,680 | 1,840 | 0,137 | 13,4 |
| 0,177 - 0,149 | | | |
| 2,000 - 1,680 | | | |
| 0,149 - 0,125 | | | |

2.5 Ensaio de Resistência à Penetração

As amostras foram preparadas em cilindros de acrílico, e submetidas a ensaio de resistência de cone penetrométrico, em três repetições. Para a realização dos trabalhos, foi desenvolvido um penetrômetro (Figura 1A) pelo Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFV, com as seguintes características: (a) sistema de cravação hidráulico, com curso de até 60 cm; (b) célula de carga; (c) haste de penetração; (d) sistema de aquisição de dados e (e) computador. O aparato é constituído por uma base e dois cilindros, ambos em acrílico, com 10 cm de altura (Figura 1B). Para a execução dos ensaios foram adotados os seguintes procedimentos: (i) determinação da curva de calibração da célula de carga com pesos aferidos; (ii) calibração da velocidade de deslocamento da haste entre 15 ± 5 mm/min; (iii) conversão do sinal recebido (10 leituras por segundo) pelo sistema de aquisição de dados (V) em resistência à penetração (Kgf).



utilizado para ensaios de resistência de cone penetrométrico.



A determinação da resistência de ponta foi obtida pela Equação 1:

$$R_p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde R_p = resistência de ponta [$L^{-1}MT^{-2}$]; F = resistência à penetração [LMT^{-2}]; A = área da base do cone penetrométrico [L^2].

2.6 Ajuste das Curvas

Para o ajuste dos valores de resistência de ponta (R_p) em função da profundidade (h), foi utilizado o modelo hiperbólico calculado pela Equação 2:

$$\frac{h}{R} = \frac{1}{a+b \cdot R} \quad (2)$$

2.7 Análises Estatísticas

Os coeficientes a e b da Equação 2 foram obtidos por estimação não linear, a 5% de significância, utilizando o programa Statistica 7.0.

As análises de identidade de modelos foram realizadas a 5% de significância, utilizando o programa GENES (Cruz, 2006).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 1. (A) Penetrômetro desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica de Solos da UFV. (B) Aparato

À medida que aumenta a quantidade de finos no empacotamento binário, há uma redução na resistência de ponta, conforme pode ser observado na Figura 2, sendo esse fato associado à possibilidade de deslocamento dos grãos menores dentro dos interstícios formados pela matriz das partículas de diâmetro maior. Em equivalência, quanto menor a relação D/d , associado à rugosidade superficial inerente do material utilizado, maior o entrosamento das partículas, impossibilitando que as mesmas possam se rearranjar dentro do aparato, ocasionando maiores valores de resistência de ponta.

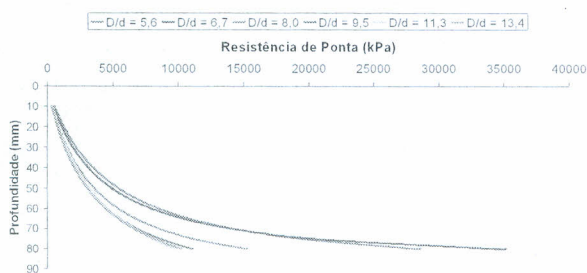


Figura 2. Resistência de ponta (kPa) em função da profundidade (mm), em diferentes relações D/d .

Contudo, quando se observa as relações D/d iguais a 8,0, 9,5, 11,3 e 13,4 nota-se que a perda de resistência de ponta torna-se menos acentuada, quando comparadas com as relações $D/d = 5,6$ e 6,7.

Quando a resistência de ponta é expressa em escala logarítmica, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 3.

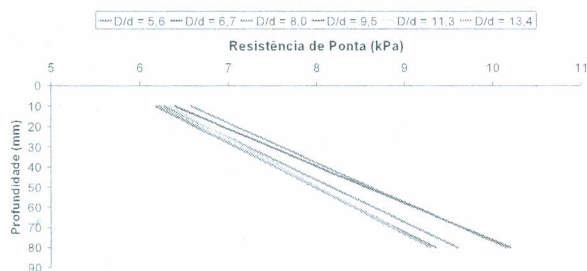


Figura 3. Resistência de ponta (kPa), expressa em escala logarítmica, em função da profundidade (mm), em diferentes relações D/d .

O teste de identidade de modelos aplicado às equações obtidas por regressão linear simples mostrou que os interceptos e as inclinações das relações D/d iguais a 8,0, 9,5, 11,3 e 13,4 não diferem ao nível de significância de 5%. As

equações ajustadas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações de Resistência de Ponta Ajustadas por Regressão Linear Simples.

| D/d | Equação Ajustada | R^2 |
|-------|--------------------------------|-------|
| 5,6 | $R_p = 0,0509612h + 6,0740732$ | 0,99 |
| 6,7 | $R_p = 0,0542853h + 5,8543937$ | 0,99 |
| 8,0 | $R_p = 0,0475078h + 5,7996107$ | 0,99 |
| 9,5 | $R_p = 0,0452668h + 5,7289272$ | 0,99 |
| 11,3 | $R_p = 0,0422298h + 5,9106921$ | 0,98 |
| 13,4 | $R_p = 0,0439106h + 5,7848430$ | 0,98 |

Segundo Lade et. al, (1998) e Dalla Riva (2005), a maior eficiência do empacotamento ocorre em relações D/d próximas a 7, em função da formação do poro triangular formado quando as partículas estão sujeitas à ação vibratória. Empacotamentos com relações D/d superiores a 7 possibilitaram a migração e ajuste das partículas menores por intermédio dos caminhos porosos formados entre os grãos maiores, ocasionando um rearranjo das partículas menores, sem causar, com isso, elevações significativas na resistência de ponta.

4 CONCLUSÕES

Os resultados do estudo permitiram demonstrar que:

1. O acréscimo na quantidade de partículas de menor diâmetro no empacotamento binário reduz a resistência de ponta.
2. As equações de resistência de ponta ajustadas por regressão linear simples nas relações $D/d = 8,0, 9,5, 11,3$ e 13,4 não apresentaram diferença estatística com relação à resistência de ponta.

AGRADECIMENTOS

À UNEMAT - Universidade Estadual de Mato Grosso, à UFV - Universidade Federal de Viçosa, ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

(Processo 471209/2006-6) e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio dado ao presente projeto.

REFERÊNCIAS

- Anderson, J.U. (1963) An improved pretreatment for mineralogical analysis of samples containing organic matter. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 10, p. 380-388.
- Cruz, C.D. (2006) *Programa Genes. Versão Windows*, Editora UFV, Viçosa, MG, Brasil.
- Dalla Riva, R.D. (2005) *Densidade, Porosidade, Resistência à Penetração e Retenção de Água em Resposta ao Arranjo e Morfometria de Partículas da Fração Areia*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, 65 p.
- Lade, P.V., Liggio, C.D., Jr. e Yamamuro, J.A. (1998) Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 21, p. 336-347.
- Mehra, O.P. e Jackson, M.L. (1960) Iron oxide removal from clays by dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 7, p. 317-327.
- Mitchell, J.K. (1993) *Fundamentals of soil behavior*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 437 p.