

Recomendações para Análises e Projetos com Uso de Colunas de Brita em Solos Argilosos Muito Moles.

Bruno Teixeira Lima

UFF - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil, brunolima@id.uff.br

Márcio de Souza Soares de Almeida

COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, almeida@coc.ufrj.br

RESUMO: Estudos mais aprofundados sobre o uso de colunas de brita em solos moles e muito moles ainda são escassos. O cálculo dos recalques em solos melhorados com colunas de brita ainda é uma questão complexa, sendo um desafio para aplicações em projetos. Já há casos de instalação de colunas de brita em solos com S_u de 4 a 5 kPa (Felix dos Santos, 2010). O método de Priebe (1995) é o mais utilizado em projetos de coluna de brita, porém deve ser utilizado com cautela. Devido à possibilidade de plastificação das colunas gerando um aumento significativo no valor de recalque obtido, é recomendado o uso de modelos de cálculo (numéricos e analíticos) que considerem esta possibilidade. A transformação, ou adequação, de análises axissimétricas em modelos 2D pode ser realizada utilizando-se a proposta de Tan *et al.* (2008).

PALAVRAS-CHAVE: Colunas de Brita, Argila Mole, Colunas Granulares.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de realização de obras civis, em grandes centros urbanos, leva à necessidade de construir em áreas cujos subsolos apresentam baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade. Depósitos desta natureza são denominados solos moles ou compressíveis e são comumente encontrados ao longo de toda a costa brasileira, particularmente no estado do Rio de Janeiro (Silva, 1953; Almeida *et al.*, 2008).

A necessidade de redução na magnitude do recalque e no tempo de entrega da obra leva ao uso de técnicas de instalação de elementos lineares com um coeficiente de permeabilidade elevada e uma maior rigidez. Além de aumentar a capacidade de carga em solos moles e a resistência ao cisalhamento de solos siltosos e argilosos, reduzindo o potencial da instabilidade de taludes. Deste modo, este trabalho enfatiza o uso da técnica de colunas granulares.

No âmbito das técnicas de instalação de

elementos lineares, a técnica de colunas de material granular é uma das mais versáteis e utilizadas mundialmente, devido à característica de redução e aceleração dos recalques esperados, aumento da capacidade de carga e melhoria da estabilidade global. Esta técnica é utilizada não somente em casos de solos compressíveis, mas também em quaisquer outras fundações com cargas elevadas que não permitam recalques consideráveis.

O conceito principal do reforço ou melhoria do solo com colunas granulares envolve a substituição de 10 a 50%, em área, do solo compressível por um material granular como brita ou areia, em forma de colunas. A inclusão de um material granular além de tornar o conjunto colunas/solo mole mais rígido, também acelera o processo de adensamento.

A solução geotécnica de colunas de brita, sem o uso de encamisamento, tem se apresentado versátil e economicamente vantajosa, e é uma técnica cada vez mais em uso no Brasil, e com diversas possibilidades

futuras de uso.

Dentre os métodos clássicos de análise de colunas de brita, os métodos apresentados por Greenwood (1970), Hughes e Withers (1974), Thorburn (1975), Aboshi *et al.* (1979), Balaam e Booker (1981, 1985), e Priebe (1976, 1995) podem ser destacados. Mais recentemente Pulko e Majes (2005), Castro (2008), e Castro e Sagaseta (2009) apresentaram métodos de cálculos que consideram a plastificação das colunas de brita.

Estudos mais aprofundados sobre o uso de colunas de brita em solos moles e muito moles ainda são escassos. Porém, com base em referências bibliográficas e estudos realizados existem algumas recomendações que servem como base para a realização de análises e projetos de colunas de brita.

2 INSTALAÇÃO E MÉTODOS DE DESEMPENHO

2.1 Instalação das Colunas de Brita

A técnica de colunas de brita evoluiu com a utilização de equipamentos e tecnologias mais modernas. O FHWA (1983) apresenta um relatório com os princípios básicos do método de coluna de brita, tipos de coluna, tipos de equipamento e outros detalhes construtivos e de qualidade. Os processos de instalação de colunas de brita (podendo ser utilizada também areia) são:

a) Tubo de ponta aberta

Executa-se um furo no terreno mediante a cravação de um revestimento em aço com ponta aberta, e após a limpeza do material que penetra no tubo, este é preenchido com brita ou areia inundada e removido simultaneamente. Pode ou não ter a compactação do material granular por socagem de pilão e possui como desvantagem a inevitável disposição do material retirado do tubo, e a necessidade de um equipamento com capacidade para introduzir e remover o tubo no solo.

b) Tubo de ponta fechada

Um tubo com um tampão na ponta – ou com um sistema de dobradiças – é cravado e o solo mole é deslocado. No caso do uso de um tampão de concreto o processo é semelhante ao

da estaca tipo Franki. O tampão é uma bucha de brita, que é expulsa com pancadas do martelo e o revestimento é sacado simultaneamente ao preenchimento com material granular. Para o tubo com sistema de dobradiças, o mesmo é sacado e a ponta se abre. Neste método também se pode usar a compactação do material por pilão, sendo necessário um equipamento com capacidade para introduzir e remover o tubo no solo.

c) Vibrosubstituição

As colunas de brita são instaladas no solo mole com o uso de um vibrador profundo, podendo ou não ser utilizada água (método seco ou úmido, na literatura internacional são denominados de *dry system* e *wet system*, respectivamente). O método seco utiliza ar comprimido e o peso do conjunto do vibrador para atingir a profundidade desejada. A colocação da brita pode ser realizada pelo topo do terreno (*top feed*) ou no fundo, na ponta do vibrador, através de um tubo junto a este (*bottom feed*).

A Figura 1 apresenta as etapas de construção de uma coluna de brita por vibrosubstituição em solos saturados moles, com o uso do método seco com colocação da brita pelo fundo: (1) posiciona-se o equipamento no local e carrega-se o silo com a brita; (2) o silo sobe e descarrega a brita na câmara própria, no topo do vibrador; (3) o vibrador penetra o solo mole até a profundidade de projeto, através de vibrações, ar comprimido e esforço vertical para baixo (peso próprio do conjunto ou força mecânica); (4) na profundidade desejada, a brita é liberada e compactada por movimentos do vibrador para cima e para baixo, empurrando a brita contra o solo, aumentando assim o diâmetro da coluna; (5) com adição da brita necessária em cada estágio do processo construtivo, cria-se uma coluna de brita íntegra maior do que o furo inicial, intertravada e integrada ao solo circundante.

As técnicas com cravação de camisa metálica, apesar da simplicidade e facilidade de aplicação, têm baixa produtividade e falta de garantia de compacidade da coluna após a retirada da camisa metálica, principalmente quando da sua utilização em argilas muito moles, devido ao baixo confinamento lateral do

solo sobre a coluna. A técnica de vibrosubstituição apresenta uma boa produtividade e é a mais utilizada atualmente.

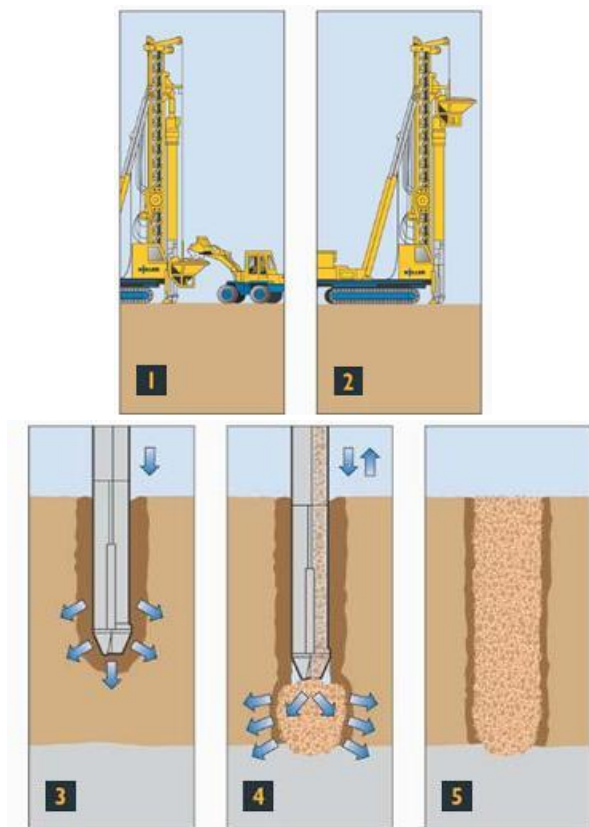


Figura 1. Sequência de execução de coluna de brita em solo mole saturado (McCabe *et al.*, 2009).

Maiores informações sobre a metodologia de construção de colunas de brita por vibrosubstituição foram apresentadas por Hu (1995), Raju *et al.* (2004), Domingues (2005) e Yee e Raju (2007).

Solos com valores de S_u muito baixos (abaixo de 15 kPa, que pode diminuir devido ao amolgamento causado pela vibrosubstituição) historicamente não são tratados com colunas de brita devido ao baixo nível de tensões horizontais para o confinamento da coluna de brita durante sua construção. Porém, segundo McCabe *et al.* (2009) o método de instalação das colunas com alimentação pela ponta do vibrador, o mais utilizado atualmente, pode tratar solos com S_u superiores a 4 – 5 kPa.

Wehr (2006) (*apud* McCabe *et al.*, 2009) relata colunas de brita instaladas na Polônia, Alemanha e Malásia em solos com S_u de 4 a 5 kPa, mas que é muito importante a monitoração automática do processo de construção nestes

casos. Yee e Raju (2007) apresentam diversos casos de obras na Malásia em solos compressíveis com S_u entre 5 kPa a 15 kPa.

Há a recomendação que em solos moles as colunas devem possuir no mínimo 0,80 m de diâmetro, e para solos muito moles ($S_u < 10$ kPa) os diâmetros não podem ser inferiores a 1,00 m. Em termos de espaçamento as distâncias entre colunas devem ser inferiores a 2,5 m, a fim de garantir o efeito de grupo (Yee e Raju, 2007).

A empresa Keller realizou em Março de 2010 testes de instalação de colunas de brita com o método de vibrosubstituição (*bottom feed*), em um depósito de argila mole na baixada de Jacarepaguá, com valores de S_u próximos a 5 kPa, e características similares ao depósito da Gleba F (apresentados por Baroni, 2010). Os testes foram bem sucedidos, onde foi possível verificar a formação de colunas de brita com diâmetros de aproximadamente 1,0 m (Felix dos Santos, 2010).

O método de Priebe (1995) é o mais utilizado em projetos de coluna de brita e consegue prever bem o valor do FRR (Recalque sem colunas / Recalque com colunas), conforme apresentado por McCabe *et al.* (2009). Porém, Lima (2012) verificou que o método de Priebe (1995) indica recalques do solo melhorado com colunas de brita maiores que os obtidos em análises numéricas (Figura 2).

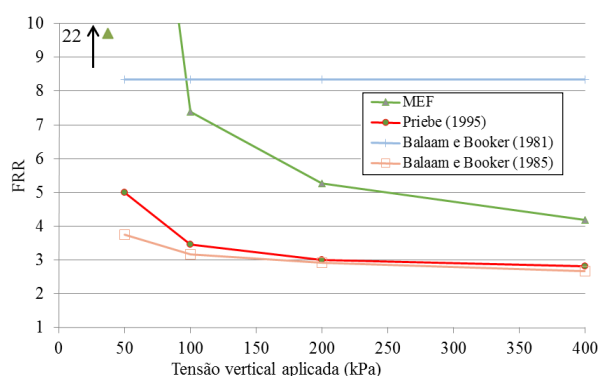


Figura 2. Comparação do FRR entre vários métodos – Adaptado de Lima (2012).

Mestat *et al.* (2006) conclui que o melhor modo de verificar o desempenho de uma metodologia de cálculo continua sendo a comparação com medidas de campo, com instalação de instrumentação para a medição

principalmente de deslocamentos verticais e horizontais e poropressões.

3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

O estudo dos parâmetros geotécnicos a serem utilizados deve ser bem cuidadoso para que estes sejam representativos da condição real do solo, considerando os efeitos de instalação das colunas de brita ou histórico de carregamento (escavações ou aterros executados).

A Tabela 1 mostra uma compilação de valores do ângulo de atrito (ϕ') e Módulo de Elasticidade (E_{col}) das colunas de brita apresentados em diversos trabalhos, compilados por Lima (2012).

No caso do ângulo de atrito das colunas de brita, os valores obtidos para níveis de tensões inferiores a 500 kPa não são inferiores a 40° (Herle et al., 2009). A faixa de variação deste parâmetro na Literatura técnica é de 35° a 64°, com valores médios na faixa de 40° – 45° (Lima, 2012). Lima (2012) realizou análises numéricas que indicaram diferenças máximas de 12 cm de recalque (para construção de 5,0 m de aterro) para valores de ângulos de atrito de 40° e 50°, que em situações da construção de grandes obras de terra esta diferença poderia ser corrigida sem maiores transtornos.

Observa-se que os valores da Tabela 1 possuem uma grande variabilidade. No caso dos valores do módulo da coluna E_{col} esta variação situa-se entre 7 e 200 MPa, com um valor médio de 80 MPa. Em análises numéricas realizadas por Lima (2012) foi verificado que o valor do módulo de elasticidade da coluna de brita não influencia significativamente no valor dos recalques obtidos devido à plastificação das colunas (Figura 3).

Castro e Sagaseta (2009) utilizam uma faixa para os valores do ângulo de dilatação da coluna (ψ) entre 0 e 20°, Choobbasti et al. (2011) apresentam valor de 10° e Guetif et al. (2007) 8°. Diversos autores como Six et al. (2012), Domingues (2005) e Ambily e Gandhi (2007) utilizam o valor do ângulo de dilatação igual a 0°. Devido à falta de concordância na literatura técnica, é recomendado um valor conservativo de $\psi = 0^\circ$.

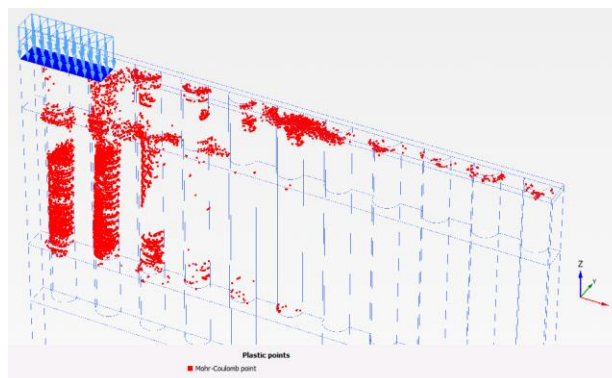


Figura 3. Colunas de Brita no estado plástico - Pontos em Vermelho – Análise 3D – Perspectiva (Lima, 2012)

Tabela 1. Valores de E_{col} e ϕ' para colunas de brita, de diversos autores (Adaptado de Lima, 2012)

Parâmetros		Referência
E_{col} (MPa)	ϕ_c' (°)	
30-100	–	Lambe e Whitman (1979).
30 – 58 e 7 – 21 (projeto)	38 – 45	FHWA (1983)
100 - 200	–	EAU 1990 (1992)
30	38	Mestat et al. (2006)
32	38	Guetif et al. (2007)
70	35	Găb et al. (2009)
30	40	Tan et al. (2008)
22,5 – 67,5	41 - 53	Cimentada e Da Costa (2008)
32	38	Bouassida et al. (2009)
100	38	Castro e Sagaseta (2009)
55	43	Choobbasti et al. (2011)
60	38	Six et al. (2012)

4 EFEITOS DA INSTALAÇÃO DA COLUNA DE BRITA

Egan et al. (2008) concluem que não há procedimento mundialmente aceito e rigoroso que modele corretamente o comportamento do solo após a construção da coluna de brita.

Existem algumas propostas na literatura para tentar levar em consideração estas mudanças, porém há uma incerteza muito grande de como o solo responde a instalação das colunas visto que não há dados de qualidade em quantidade suficiente para que se possa observar um padrão de variação nas características do solo.

As diversas mudanças geradas no solo compressível após a instalação das colunas de brita como a redução da resistência devido ao amolgamento, com posterior aumento devido às tensões horizontais geradas pela expansão das colunas (durante o processo de adensamento), aumento do coeficiente de empuxo do solo, processo de plastificação das colunas, transferência de carga e processos de adensamento, radial e vertical, geram muitas incógnitas e dúvidas para serem respondidas.

O uso de todas estas hipóteses de cálculos em um modelo analítico é de extrema complexidade, e ainda não é possível realizá-las em sua plenitude em modelos numéricos com o método de elementos finitos.

Egan *et al.* (2008) comentam que atualmente algumas propostas estão sendo recomendadas e utilizadas na literatura para tentar levar em consideração essas mudanças nos parâmetros do solo mole:

- A variação das tensões horizontais gerada pela instalação das colunas deve ser levada em consideração aumentando o valor do coeficiente de empuxo (denominado de K^*). Os valores de K^* usualmente são obtidos com simulações numéricas da instalação da coluna de brita em solos com modelos do tipo *Cam-Clay*. Estas simulações são normalmente realizadas considerando a instalação de uma única coluna, devido ao enorme trabalho computacional para o estudo da instalação de várias colunas. Porém os estudos em um grupo de colunas podem apresentar resultados distintos dos estudos em colunas isoladas. Os valores de K^* obtidos e utilizados em diversos estudos variam de 0,4 a 3,0 (Tabela 2), sendo usualmente maiores que a unidade (valor utilizado por Priebe, 1995), podendo assim ser utilizado o valor conservativo de $K^*= 1,0$.

- O amolgamento da argila devido à instalação das colunas deve ser considerado em distâncias do centro da coluna de 2 vezes o raio

desta, conforme obtido por Weber (2008) em ensaios em centrífuga com análises em microscópio, modificando assim nesta região o valor do coeficiente de permeabilidade da camada de argila. Admite-se que tanto a perda de rigidez como a de resistência da argila devido ao amolgamento sejam contrabalanceadas pelo adensamento da camada de argila induzido pela construção da coluna. Devido a este amolgamento, a retirada de amostras e a realização de ensaios de campo para a determinação dos parâmetros pós-construção deve ser realizado, apesar de não ser uma prática comum na engenharia geotécnica, com poucos casos na literatura.

Tabela 2 – Valores de K^* publicados (adaptada de Elshazly *et al.*, 2008)

Referência	Valor de K^*	Método de Determinação
Goughnour (1983)	Entre K_0 e $1/K_0$	Solução analítica
Priebe (1995)	1,0	Solução analítica, K_0 igual ao da água.
Watts <i>et al.</i> (2000)	Entre K_0 e K_p	Provas de carga
Elshazly <i>et al.</i> (2006)	1,1 a 2,5 – melhor resultado com 1,5	Provas de carga e análises axissimétricas.
Elshazly <i>et al.</i> (2008)	0,7 a 2,0 – Média de 1,2	Provas de carga e análises axissimétricas. Análises numéricas simulando a
Guetif <i>et al.</i> (2007),	0,75 – 1,4	instalação das colunas de brita
Weber (2008)	0,8 a 3,0	Análises numéricas
Castro e Karstunen (2010)	1,4. K_0	Análises numéricas
Choobbasti <i>et al.</i> (2011)	0,5 – 2,1	Análises numéricas
Roza (2012)	1,25	Calibração de análises numéricas com área teste
Lima (2012)	~2,0 (1,39 a 3,07 K_0)	Análises numéricas simulando a instalação das colunas de brita

5 MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

O comportamento real dos solos, principalmente dos solos compressíveis, com aumento de rigidez ao longo do tempo (modelos, por exemplo, do tipo *Cam Clay*), pode gerar uma grande diferença no valor dos recalques calculados quando comparados com estudos com modelos que consideram valores únicos de rigidez (ex. Método de Priebe, 1995, e de Castro e Sagaseta, 2009).

Devido à possibilidade de plastificação das colunas, apresentadas por Castro e Sagaseta, (2009), e observada por Lima (2012) (Figura 4, análise 2D; Figura 3, análise 3D), gerando um aumento significativo no valor de recalque obtido, é recomendado o uso de modelos de cálculo (numéricos e analíticos) que considerem esta possibilidade como modelos com critério de ruptura de Mohr-Coulomb e modelos hiperbólicos.

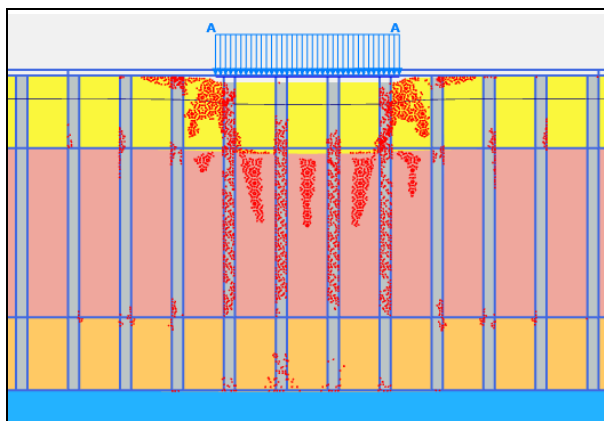


Figura 4. Pontos em Estado Plástico – Análise 2D (Lima, 2012)

Caso a análise realizada tenha o intuito de verificar somente os recalques esperados da solução de coluna de brita, em uma grande área carregada, o conceito de célula unitária pode ser utilizado (condição axissimétrica). Caso haja variações espaciais do carregamento externo aplicado, como por exemplo, diversas alturas de aterro, então devem ser utilizados modelos de deformação plana (2D) ou tridimensionais (3D).

A transformação, ou adequação, de análises axissimétricas em modelos 2D pode ser realizada utilizando-se a proposta de Tan *et al.* (2008), reduzindo-se a dimensão transversal da

coluna de brita, mantendo os parâmetros geotécnicos

Ainda são necessárias pesquisas mais completas quanto a análises de estabilidade em locais com colunas de brita, devendo assim ser utilizados valores conservativos dos parâmetros de resistência do solo.

Basicamente 2 metodologias são utilizadas:

- Considerar o solo heterogêneo com colunas isoladas, apresentado na Figura 5a (caso sejam realizadas análises 2D utiliza-se a metodologia proposta Tan *et al.*, 1998).
- Conceito de um sistema equivalente solo/coluna: consiste em determinar os parâmetros de resistência (c' e ϕ'), além do peso específico e coeficiente de Poisson, de um solo homogêneo (material compósito solo-coluna) que apresente as mesmas propriedades de resistência e peso específico do conjunto solo/colunas de brita (Figura 5b).

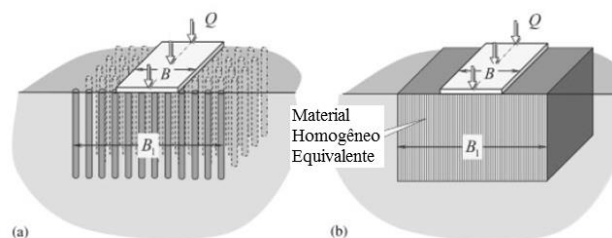


Figura 5 (a) solo com colunas de brita – heterogêneo (b) solo homogêneo (homogeneização)

FHWA (1983), Priebe (1995) e Choobbasti *et al.* (2001) apresentam metodologias para o cálculo dos parâmetros do solo homogêneo.

O uso da opção nas análises numéricas da atualização da malha é recomendado no estudo de colunas de brita, visto que esta prevê a ocorrência de grandes deformações, que normalmente ocorrem neste tipo de solução, com a matriz de rigidez sendo atualizada com base na geometria deformada da etapa. A opção de atualização das poropressões é uma opção do programa de método de elementos finitos, PLAXIS, que também deve ser utilizada a fim de se introduzir o efeito da submersão dos materiais, o que resulta, normalmente, em uma redução da tensão efetiva atuante.

6 O ADENSAMENTO DE SOLOS MOLES COM COLUNAS DE BRITA

As colunas de brita possuem uma equivalência com os drenos verticais no que tange os efeitos de amolgamento do solo durante sua construção e no cálculo da transformação da geometria axial para metodologias que consideram o estado plano de deformação, que podem ser facilmente utilizadas em análises numéricas.

As soluções apresentadas por Han e Ye (2002), Xie *et al.* (2009a e 2009b) e Wang (2009) para o cálculo do adensamento médio com carregamentos instantâneos geram resultados semelhantes, e a solução proposta por Han e Ye (2002) é de fácil utilização. A diferença entre as soluções obtidas, considerando o tempo de construção do aterro, deve ser verificada pelos projetistas. Caso o tempo de construção do aterro seja muito alto, a diferença nos tempos de adensamento pode ser significativa (com diferenças de até 75% no valor da porcentagem de adensamento médio, conforme apresentado por Wang, 2009) quando comparada ao carregamento instantâneo.

Castro e Sagaseta (2009) apresentam que o coeficiente de adensamento radial para os casos das colunas em estado elástico é superior em até 9 vezes ao valor proposto por Han e Ye (2002). No momento da plastificação das colunas o valor do coeficiente de adensamento radial pode ser reduzido em até 80% do valor proposto por Han e Ye (2002), aumentando o tempo necessário para atingir o final do adensamento.

REFERÊNCIAS

- Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. e Harada, K. (1979). The Compozer. A method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns. *International Conference on soil reinforcement. Reinforced earth and other techniques*. Vol I. Paris. p. 221-216.
- Almeida, M.S.S., Futai, M. M. Lacerda, W. A. e Marques, M. E. S. (2008). Laboratory behaviour of Rio de Janeiro soft clays. Part 1: Index and compression properties. *Soils and Rocks Journal*. v. 31, p. 69-75.
- Ambily, A.P. e Gandhi, S.R. (2007). Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis. *ASCE – Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 405–415.
- Balaam, N.P. e Booker, J.R. (1981). Analysis of rigid rafts supported by granular piles. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. Vol. 5. p. 379-403.
- Balaam, N.P. e Booker, J.R. (1985). Effect of stone column yield os settlement of rigid foundations in stabilized clay. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. vol. 9. p. 331-351.
- Baroni, M. (2010) *Investigação geotécnica em solos moles da Barra da Tijuca com ênfase em ensaios in situ*. Dissertação de Mestrado. COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil.
- Bouassida, M., Ellouze, S., e Hazzar, L. (2009). Investigating Priebe's method for settlement estimation of foundation resting on soil reinforced by stone columns. *Proc. 2nd Int. Workshop on Soft Soils - Focus on Ground Improvement* (Karstunen, Leoni, eds.), Glasgow, CRC Press, 321 – 325
- Castro, J. (2008). *Análisis teórico de la consolidación y deformación alrededor de columnas de grava*. Tese de Doutorado, Universidade de Cantabria, Santander, Espanha. (em Espanhol).
- Castro, J. e Sagaseta, C. (2009) Field instrumentation of an embankment on stone columns. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ICSMGE 2009*. CD-ROM.
- Castro, J. e Karstunen, K. (2010) Numerical simulations of stone column installation. *Canadian Geotechnical Journal*. 47 (10):1127–1138.
- Choobasti, A. J.; Zahmatkesh, A. e Noorzad, R. (2011) Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 29, 5, p. 675 – 684.
- Cimentada, A. e Da Costa, A. (2008) Laboratory experimental analysis of radial consolidation around a stone column. *Geotechnics of Soft Soils - Focus on Ground Improvement, 2nd International Workshop on Geotechnics of Soft Soils (IWGSS)*, AMGISS Workshop, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 213 - 217
- Domingues, T.S.S., (2005). *Fundações com Colunas de Brita em Aterros sobre Solos Moles. Análise e Dimensionamento*, Dissertação de Mestrado, FEUP, Portugal.
- EAU 1990 (1992) *Recommendation of the Committee for Waterfront Structures - Harbors & Waterways* Ernest & Son. Berlim. Alemanha
- Egan, D., Scott, W. e McCabe, B.A. (2008). Observed installation effects of vibro-replacement stone columns in soft Clay, *Proceedings of the 2nd International Workshop on the Geotechnics of Soft Soils - Focus on Ground Improvement*, Glasgow, p. 23-29.
- Elshazly, H.A., Hafez, D. e Mosaad M (2006). Back calculating vibro-installation stresses in stone columns reinforced grounds. *Journal of Ground Improvement*

- Elshazly, H.A., Elkasabgy, M. e Elleboudy, A.(2008). Effect of Inter-Column Spacing on Soil Stresses due to Vibro-Installed Stone Columns: Interesting Findings. *Geotech Geol Eng* 26, p 225–236
- Felix dos Santos, M. (2010), Comunicação pessoal.
- FHWA (1983). *Design and construction of stone columns. Vol 1.* Report FHWA/RD-83/027. Barksdale, R.D. e Bachus R.C. Federal Highway Administration.
- Gäb, M., Schweiger, H.F., Kamrat-Pietraszewska, D. e Karstunen, M. (2009). Numerical analysis of a floating stone column foundation using different constitutive models. *Proc. 2nd Int. Workshop on Soft Soils - Focus on Ground Improvement* (Karstunen, Leoni, eds.), Glasgow, CRC Press, 137-142.
- Goughnour, R.R. (1983) Settlement of vertical loaded stone columns in soft ground. *Proc., 8th Europ. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki*, pp 23–25.
- Greenwood, D.A. (1970). Mechanical improvement of soils below ground surface. *C.R. Conference on Ground Engineering. Institution of Civil Engineers.* London. paper II. p. 11-22.
- Guetif, Z., Bouassida, M., Debats, J.M. (2007). Improved soft clay characteristics due to stone column installation. *Computers and Geotechnics*, Volume 34, Issue 2, Março 2007, pp. 104–111
- Han, J., e Ye, S. L. (2002). A theoretical solution for consolidation rates of stone column-reinforced foundations accounting for smear and well resistance effects. *Int. J. Geomech.*, 2(2), p 135–151.
- Herle, I., Wehr, J. e Arnold, M. (2009). Soil improvement with vibrated stone columns – influence of pressure level and relative density on friction angle. *2nd Int. Workshop on Soft Soils - Focus on Ground Improvement.* Glasgow, CRC Press, 235-240.
- Hu, W. (1995). *Physical modelling of group behaviour of stone column foundations*, Tese de Doutorado, Universidade de Glasgow, Escócia. 312 p.
- Hughes, J.O. e Withers, N.J. (1974). Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns. *Ground Engineering*. p 42-49.
- Lambe, T.W. e Whitman, R.V. (1979) *Soil Mechanics*. 2nd Edition, Wiley, New York, 553 p.
- Lima, B.T. (2012). *Estudo do uso de colunas de brita em solos argilosos muito moles*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 321 p.
- McCabe, B.A., Nimmons, G.J. e Egan, D. (2009). A review of field performance of stone columns in soft soils, *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, Vol. 162, No. 6, p. 323-334.
- Mestat, P., Magnan, J.P. e Ddhouib, A. (2006). Results of the settlement prediction exercise of an embankment founded on soil improved by stone columns. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering—NUMGE 06.* (ed. Schweiger) Graz, Austria. Taylor & Francis Group, Londres, p 471–476.
- Priebe, H. (1976) Estimating settlement in a gravel column consolidated soil. *Die Bautech.*, 53, p 160–162 (em Alemão).
- Priebe, H. J. (1995). The design of vibro replacement, *Ground Engineering*. Vol. 28, nº 10.
- Pulko B, e Majes B. (2005) Simple and accurate prediction of settlements of stone column reinforced soil. *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japão, vol. 3; p. 1401–1404.
- Raju, V.R., Hari Krishna, R. e Wegner, R. (2004). Ground Improvement using Vibro Replacement in Asia 1994 to 2004 – A 10 Years Review. *5th International Conference on Ground Improvement Techniques*, Kuala Lumpur. CD-ROM.
- Roza, F.C. (2012) Comportamento de obras sobre solos moles com colunas de brita, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 156 p.
- Silva, F. P. (1953) Shearing strength of a soft clay deposit near Rio de Janeiro, *Geotechnique*, 3(7), p. 300-305.
- Six, V., Mroueh, H., Shahrour, I., e Bouassida, M. (2012) Numerical analysis of elastoplastic behavior of stone column foundation. *Geotechnical and Geological Engineering* (1 March), p. 1–13
- Tan, S. A., Tjahyono, S. e Oo, K. K. (2008). Simplified plane-strain modeling of stone-column reinforced ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134, No. 2, p. 185–194.
- Thorburn, S. (1975). Building structures supported by stabilized ground. *Géotechnique*. Vol. 25 . Nº1. p. 83-94.
- Weber, T.M. (2008). *Modellierung der Baugrundverbesserung mit Schottersäulen*. Tese de Doutorado, Institutes für Geotechnik, ETH Zürich, Alemanha, 232 p. (Em Alemão).
- Wang, G. (2009) Consolidation of soft clay foundations reinforced by stone columns under time-dependent loadings. *Journal Geotech Geoenviron Eng*, ASCE 135(12), p 1922–1931
- Watts, K.S., Johnson, D., Wood, L.A., e Saadi, A. (2000) An instrumental trial of vibro ground treatment supporting strip foundations in a variable fill. *Geotechnique*. 50(6):699–708.
- Wehr J. (2006) The undrained cohesion of the soil as criterion for the column installation with a depth vibrator. *Proceedings of TransVib Conference*, Paris, p. 157–162.
- Xie, K.-H., Lu, M.-M., e Liu, G.-B. (2009a). Equal strain consolidation for stone columns reinforced foundation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(15), p 1721–1735.
- Xie, K.-H., Lu, M.-M., Hu, A.-F. e Chen, G.-H. (2009b). A general theoretical solution for the consolidation of a composite foundation. *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, p. 24-30
- Yee, Y.W. e Raju, V.R. (2007). Ground Improvement Using Vibro Replacement (Vibro Stone Columns) – Historical Development, Advancements and Case Histories in Malaysia, *16th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Kuala Lumpur, Malásia.