

Análise da Influência da Geometria da Ponta do Pilão na Compactação de Colunas Utilizadas para Melhoramento de Solos

Milena Cardoso de Freitas
USP, São Carlos, Brasil, milena.cardoso@usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha
USP, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

RESUMO: A técnica de reforço com colunas de compactação tem sido amplamente utilizada com a finalidade de melhorar as propriedades geotécnicas e reduzir a compressibilidade de solos de baixa resistência. A execução da técnica consiste na introdução de material compactado com grandes energias, seja por esforços dinâmicos, pela vibração ou pela aplicação de grandes pressões. O processo executivo das colunas garante o deslocamento físico das partículas no entorno, provocando a redução do índice de vazios do solo e aumentando consequentemente a sua resistência. Acredita-se que o deslocamento das partículas está relacionado com a geometria do pilão utilizado na execução das colunas. Como objetivo deste trabalho deseja-se avaliar o efeito da compactação no entorno das colunas de solo compactado provocados por diferentes geometrias de pilões utilizados na abertura e na compactação do material no interior das colunas. O primeiro, tipo (A), possui ponta arredondada, geralmente utilizada na engenharia de fundações e o segundo, tipo (B), apresenta as mesmas dimensões que o pilão A, porém a sua ponta é cônica, com ângulo de ápice de 30°. Os ensaios foram realizados em laboratório, em escala reduzida, utilizando-se uma prensa de compressão e três caixas cúbicas com 300 mm de altura, largura e profundidade. Foram executadas cinco colunas de solo compactado com pilão arredondado, cinco com pilão cônico e também foram executadas duas colunas de solo compactado encamisadas, utilizando o pilão arredondado. Para o preenchimento das colunas foi usado um solo de coloração diferente do solo de preenchimento da caixa, o que possibilitou o contraste da coluna compactada no interior da caixa. Para avaliação dos resultados obtidos nos ensaios, foi feita a escavação do solo na caixa até que as colunas fossem alcançadas. O contraste das duas cores de solos utilizadas permitiu visualizar características como dimensão, geometria, e consequentemente avaliar, de forma qualitativa, o efeito radial da compactação das colunas, assim como a repetitividade dos resultados encontrados. Como resultado desta análise qualitativa, concluiu-se que a geometria cônica apresentou uma maior compactação lateral do solo no entorno da coluna, comparando-se com a geometria cilíndrica, normalmente utilizada na engenharia de fundações. Além disso, verificou-se nos ensaios que o encamisamento das colunas não afetou os efeitos da compactação no entorno da coluna.

PALAVRAS – CHAVE: Fundações, reforço, colunas de compactação, geometria do pilão.

1 INTRODUÇÃO

O solo ideal para apoiar uma fundação direta deve ter boa capacidade de suporte e baixa compressibilidade. Porém, nem sempre o local disponível para construção apresenta tais

condições. É comum encontrar solos de apoio constituído por argilas moles, areias fofas, ou até mesmo camadas de solos colapsíveis.

Geralmente a solução construtiva mais adotada para este tipo de situação é a utilização de fundações profundas, o que pode inviabilizar

a construção da obra devido aos altos custos de execução.

Nos últimos anos, a técnica de melhoramento das camadas superficiais de solo com colunas de compactação tem sido amplamente utilizada como solução de projeto. Esta técnica garante o melhoramento das propriedades geotécnicas do terreno, além de reduzir a compressibilidade dos solos com baixa resistência. A execução do melhoramento das camadas superficiais, por meio de estacas de compactação, pode viabilizar a implantação de fundações diretas e reduzir, de forma significativa, os custos com as fundações.

O princípio fundamental do reforço com colunas granulares é o deslocamento do solo natural provocado pela introdução de volumes de materiais granulares compactados, geralmente em forma de cilindros, com a finalidade de reduzir recalques e aumentar a capacidade de carga do maciço tratado (Passos, 2005).

A eficiência da compactação dinâmica é maior em solos granulares e permeáveis. Solos coesivos tendem a absorver a energia aplicada, o que limita a eficácia do método.

Em cidades como João Pessoa, Natal, Recife e Aracajú, 90 % das obras de fundações têm sido projetadas em sapatas com melhoramento prévio do solo de apoio, utilizando-se estacas de areia e brita, ou somente de areia vibro-compactada (Gusmão Filho, 1998)

Além das colunas de areia e brita, existem também outras colunas que utilizam diferentes materiais de preenchimento combinados ou não, e a escolha do material de preenchimento varia de acordo com o tipo de solos a ser reforçado. Segundo Conciani (2006), a mistura dos materiais solo e cimento já é utilizada no Brasil desde 1948 como técnica de reforço e estabilização de solos compressíveis.

Outras técnicas de reforço de solo são as colunas de areia, brita ou até mesmo de solo-cimento encapsuladas com material geossintético de alta resistência, que geralmente é aplicada em solos moles e compressíveis. A função do geotêxtil é garantir a permeabilidade da camada e possibilitar que as colunas funcionem não somente como estruturas resistentes, mas também como drenos que

aceleram o adensamento do solo (Nogueira, 2010).

Para a execução das colunas de reforço, existem duas técnicas amplamente utilizadas: a vibro substituição e o vibro deslocamento. Na vibro-substituição, inicialmente são executados furos cilíndricos no interior do maciço por meio de uma sonda denominada “torpedo”. Nesta técnica emprega-se água ou ar como fluido de desagregação do solo, espargido pela extremidade da agulha. O material granular é lançado dentro do furo e vibrado, dando origem a uma coluna com maior resistência que o solo natural (Atkinson, 1993), Figura 1.

Já a técnica de vibro-deslocamento pode ser executada com bate-estaca do tipo Strauss, cravando-se inicialmente um tubo de revestimento por meio de vibração e, em seguida, simultaneamente a introdução do material, é feita a retirada do tubo e o apiloamento do material por meio da queda livre de um pilão, Figura 2.

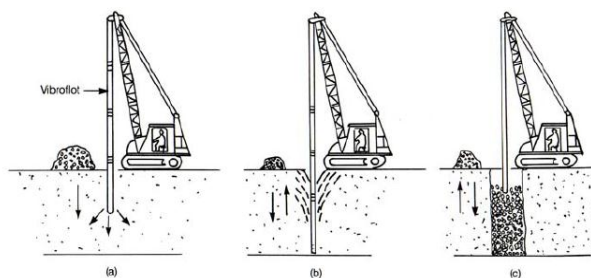


Figura 1 – Vibro substituição (Atkinson, 1993)

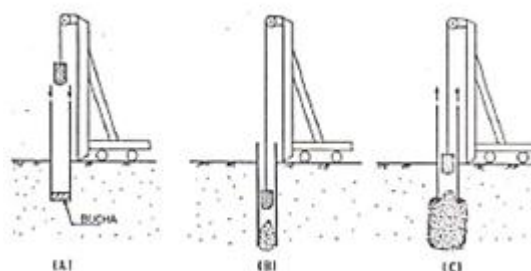


Figura 2 - Vibro-deslocamento (Gusmão Filho, 1998)

O foco principal deste artigo é voltado para a técnica de compactação por vibro deslocamento. Geralmente o pilão adotado para a abertura e compactação do material de preenchimento da coluna possui geometria cilíndrica. Na literatura, poucos estudos são encontrados a respeito da influência da

geometria da ponta do pilão nos efeitos de compactação das colunas.

Na Romênia, Burlacu *et al.* (2013) avaliaram o efeito da compactação de colunas de reforço do solo tipo *loess* utilizando-se três geometrias diferentes de pilões, Figura 3, por meio de ensaios com penetrômetro dinâmico DPM.



Figura 3 - Geometrias testadas: 1) 30°, 2) 60°, 3) hemisférico (Burlacu et al., 2013)

Como resultado desta análise, observou-se que para os ensaios realizados no centro da coluna, não houve grandes diferenças nos resultados. Para determinar o efeito radial da compactação, foram realizados ensaios DPM a uma distância de 2 vezes o diâmetro da coluna (2Dc). Os ensaios indicaram que a ponta com ângulo de 30° ofereceu uma maior compactação radial.

Consequentemente, este fato motivou o desenvolvimento desta pesquisa que teve como finalidade avaliar e comparar os efeitos da compactação de duas geometrias de pilões diferentes para o solo sedimentar, laterítico, típico de países de clima tropical.

O primeiro pilão (tipo A) possui ponta com geometria cônica e o segundo pilão (tipo B) possui ponta cilíndrica, que é a mais usual. Devido à dificuldade de visualizar e mensurar esses efeitos em campo, as colunas de compactação foram executadas em laboratório.

Esta análise, em escala reduzida, teve como objetivo avaliar, de forma qualitativa, os efeitos da compactação no entorno da coluna causada pelas diferentes geometrias dos pilões. Acreditava-se que o pilão de forma cônica, tipo A, ofereceria uma maior compactação lateral do solo, o que implicaria em um melhor reforço.

2 METODOLOGIA UTILIZADA

2.1 Execução das colunas em laboratório

Para a execução dos ensaios foram utilizadas três caixas cúbicas de madeirite, com dimensões de 300 mm, e com todas as faces removíveis, Figura 4. O solo de preenchimento da caixa foi retirado do Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), a uma profundidade de 0,5 m, pois havia o interesse de compreender os efeitos da compactação das diferentes geometrias do pilão para este tipo de solo. Como o solo laterítico retirado da camada superficial deste terreno apresenta comportamento colapsível, pretende-se futuramente avaliar o efeito das colunas de solo compactado, em escala real, na redução do efeito do colapso.

Procurou-se compactar o solo no interior da caixa de modo que a massa específica e o grau de compactação fossem os mesmos do solo natural do Campo Experimental. Como cada caixa foi preenchida duas vezes, o controle da compactação do solo de preenchimento da caixa permitiu que os resultados encontrados pudessem ser comparados.

A compactação do solo no interior da caixa foi feita em 12 camadas. Para isto, foram desenhadas linhas espaçadas de 25 mm, com o intuito de delimitar a altura final de cada camada compactada, Figura 4.b.

Conhecendo-se o grau de compactação, a massa específica dos sólidos do solo do Campo Experimental, e a umidade do solo retirado para o preenchimento da caixa, foi calculada a massa de solo correspondente a cada camada. Em seguida, após adicionar a massa calculada, foi feita a compactação manual, com o soquete ilustrado na Figura 4.a, até que a altura da camada compactada atingisse a linha de referência. Esse processo foi repetido até o total preenchimento da caixa.

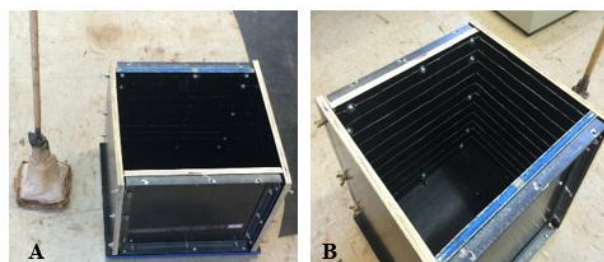


Figura 4 - a) Soquete utilizado para compactação das camadas; b) delimitação das camadas

Os pilões utilizados na execução das colunas foram confeccionados em aço e suas dimensões foram definidas de forma que o solo pudesse se deformar livremente para as laterais, sem que houvesse o efeito de borda da caixa.

Ambos os pilões utilizados (tipo A e B) possuem diâmetro de 25,4 mm, ilustrados na Figura 5. A ponta do pilão cilíndrico foi torneada com ângulo de ápice de 30°, com base nos resultados de eficiência de compactação obtidos por Burlacu *et al.* (2013).



Figura 5 - Geometrias dos pilões: Tipo A (cônica) e Tipo B (cilíndrica)

Para a execução das colunas foi utilizada uma prensa de compressão estática EMIC, do laboratório de Geossintéticos da EESC, sendo feita uma adaptação para o encaixe do pilão na célula de carga, como ilustrada a Figura 6.

Com o auxílio da prensa, inicialmente foi feita a cravação estática do pilão, perfurando o solo, até alcançar a profundidade de 125 mm. Em seguida, a coluna foi preenchida com um solo arenoso claro, com cor diferente do solo utilizado no preenchimento da caixa, de modo que houvesse um contraste entre os dois solos.

O preenchimento da coluna foi feito em 5 camadas e a compactação de cada camada foi executada com o mesmo pilão utilizado na perfuração.

Na primeira camada de preenchimento da coluna foram adicionados 60 g de solo, com o auxílio de um funil, e a compactação da camada foi realizada pelo controle do deslocamento medido pela prensa, de forma que a altura final da camada fosse 25 mm.

Para as outras 4 camadas, foram adicionados 30 g de solo e a compactação foi feita da mesma forma que a primeira, controlando a altura final igual a 25 mm. O intuito de adicionar mais solo

na camada inferior foi de criar uma base mais rígida na coluna de forma que o solo adicionado nas demais camadas tendesse a se deslocar para as laterais, permitindo analisar o comportamento lateral da compactação causado pelas diferentes geometrias de pilão.

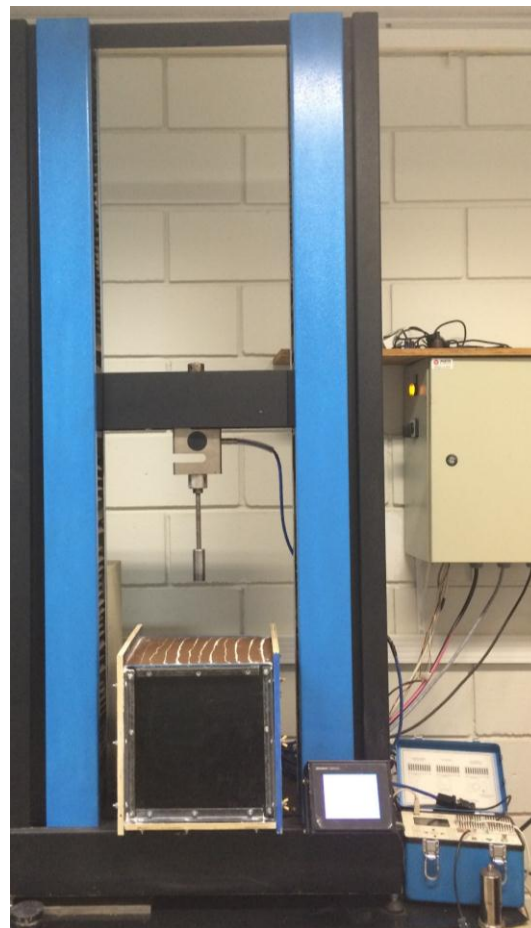


Figura 6 – Caixa preenchida com a amostra de solo instalada na prensa antes do ensaio.

Em cada uma das caixas, foram executadas duas colunas diferentes. No decorrer dos ensaios teve-se a idéia de avaliar o efeito da compactação do pilão mais usual, tipo B, em coluna encamisadas com material sintético. O objetivo deste ensaio foi analisar a interferência do material na compactação da coluna e a sua geometria final após a execução.

O material utilizado como membrana de revestimento foi um preservativo, constituído por látex, com diâmetro de 52 mm. Como as dimensões da membrana eram maiores do que as dimensões do pilão, o material permitiu a movimentação lateral do solo de preenchimento da coluna.

Cada caixa foi preenchida duas vezes e a disposição dos ensaios em cada caixa ensaiada está esquematizada na Figura 7.

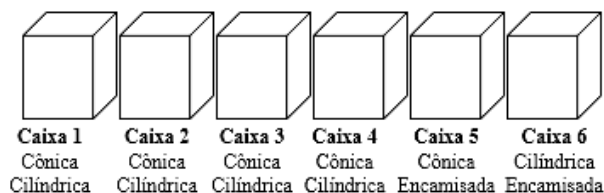


Figura 7 - Disposição dos ensaios em cada caixa

Após a execução das colunas, as caixas foram transportadas ao laboratório para que fosse feita a exumação das colunas para a análise visual da geometria resultante.

Uma das faces da caixa foi removida para permitir a escavação do solo. Com o auxílio de uma espátula, o solo foi removido até que o centro das colunas fosse alcançado. Como o solo utilizado nas colunas era mais claro do que o solo no interior da caixa, foi possível analisar a geometria final das colunas, por meio de fotografias. A Figura 8 apresenta uma das fotos obtidas como resultado dos ensaios após a escavação da caixa.

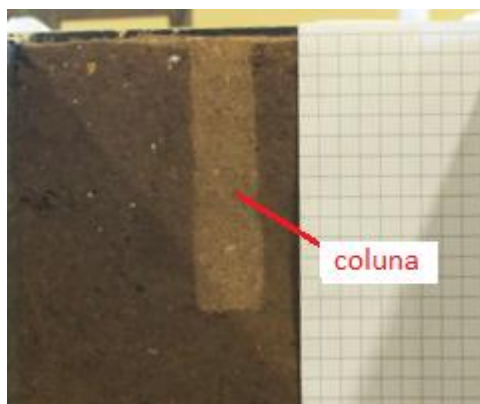


Figura 8 –Foto da escavação da caixa 4: coluna executada com pilão tipo B

2.2 Características do solo estudado

O solo de preenchimento das caixas foi retirado do Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), a uma profundidade de 0,5 m. A camada superficial do terreno é constituída por um sedimento Cenozóico, laterizado, com espessura variando de 5 a 7 m (Vianna, 2005).

Estes sedimentos foram expostos às condições

climáticas características da região tropical, o que originou materiais bastante porosos, pouco compactos e com comportamento colapsível quando inundados (Costa, 1999).

Em laboratório, foram realizados ensaios de caracterização e compactação deste solo seguindo as Normas Brasileiras. Os ensaios de caracterização consistiram em análise granulométrica conjunta, massa específica dos sólidos, limites de liquidez e de plasticidade. Além destes ensaios, também foi determinada a massa específica natural do solo do Campo Experimental de Fundações, a 0,5 m de profundidade.

O solo analisado foi classificado como areia média a fina argilosa marrom, composta por 64% de areia, 28% de argila e 8% de silte. Para esta caracterização, o Sistema Unificado de Classificação dos Solos classifica-o como SC - areia argilosa. Os resultados encontrados para os limites de consistência e massa específica do sólido estão apresentados na Tabela 1.

No ensaio de compactação, foi empregada a energia de Proctor Normal em cinco amostras com teores de umidade diferentes. A massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d \text{ máx}}$) encontrada foi de 1980 kg/m³ e o teor de umidade ótimo correspondente foi de 13,2%.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização

<i>Massa Específica dos sólidos</i>	<i>Limite de Liquidez</i>	<i>Limite de plasticidade</i>	<i>Índice de plasticidade</i>
2750 kg/m ³	29 %	17,7%	11,3%

Para a determinação da massa específica do campo, foram extraídas três amostras indeformadas, a uma profundidade de 0,5 m do nível do terreno, utilizando anéis de PVC com diâmetro de 80 mm. O valor médio encontrado foi de 1490 kg/m³. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica do solo

	<i>Anel 1</i>	<i>Anel 2</i>	<i>Anel 3</i>	<i>Média</i>
<i>Massa específica (kg/m³)</i>	1550	1420	1510	1490
<i>Massa específica aparente (kg/m³)</i>	1390	1270	1350	1340

Conhecendo-se as características do solo, foi determinado também o grau de compactação de 68 % e índice de vazios de 1,05 para o maciço natural.

3 RESULTADOS

Por meio das fotografias tiradas para cada coluna, foi possível identificar algumas características das diferentes geometrias dos pilões devido à repetitividade dos resultados encontrados.

A Figura 9 apresenta as geometrias típicas das três colunas ensaiadas. A coluna E corresponde à coluna encamisada com membrana sintética, executada com o pilão cilíndrico, tipo B. A coluna B corresponde à coluna executada com pilão tipo B, sem encamisamento, e a coluna A representa os resultados encontrados para as colunas executadas com o pilão tipo A.

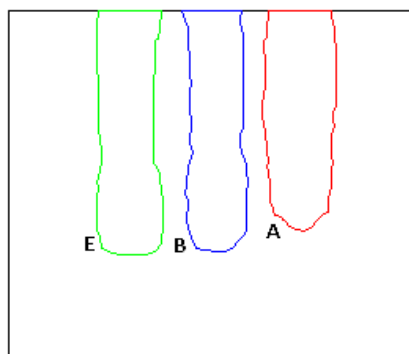


Figura 9 – Comparação da geometria final dos três tipos de coluna estudados (E- encamisada; B- pilão tipo B; A- pilão tipo A)

É possível notar que as colunas executadas com o pilão tipo B ficaram mais profundas do que àquelas executadas com o pilão tipo A. Além disso, nota-se também que as colunas A apresentaram diâmetro maior ao longo da profundidade do que as colunas B.

Estas diferenças mostram que o pilão tipo B provocou o deslocamento do solo para baixo, e o pilão tipo A promoveu o deslocamento do solo para as laterais.

Quanto ao encamisamento das colunas, nota-se que o material permitiu a movimentação do solo durante a compactação. Além disso, nota-se também a similaridade entre a geometria das colunas executadas com o pilão tipo B com e sem encamisamento.

A Tabela 1 apresenta os valores médios dos resultados encontrados nas fotografias das colunas para as 6 caixas ensaiadas. Os parâmetros avaliados para os três tipos de coluna foram a profundidade e a variação do diâmetro ao longo da coluna. Conhecendo-se o diâmetro médio das colunas, a profundidade final de cada uma delas, e a massa de solo adicionada para preenche-las, foi possível determinar o volume final, e a massa específica de cada coluna.

Tabela 3 – Valores médios dos resultados encontrados

	<i>Ponta Cilíndrica</i>	<i>Encamisada</i>	<i>Ponta Cônica</i>
Prof. (mm)	132	131	121
Diâmetro (mm)	31,3	31,5	32,9
Acréscimo do diâmetro (%)	23%	24%	30%
Vol. (mm³)	101.600	102.100	102.900
ρ (kg/m³)	1770	1760	1750

Alguns resultados experimentais de cada caixa são apresentados a seguir com a finalidade de comprovar as diferenças encontradas para as colunas executadas com as diferentes geometrias de pilão.

A Figura 10 e a Figura 11 ilustram os resultados das caixas 3 e 4. Em ambas as caixas, foram executadas duas colunas, sendo uma com o pilão A e outra com o pilão B. Nota-se que as colunas A ficaram mais curtas do que as colunas B nas duas caixas. Além disso, é possível verificar também que as colunas A ficaram mais grossas do que as colunas B.

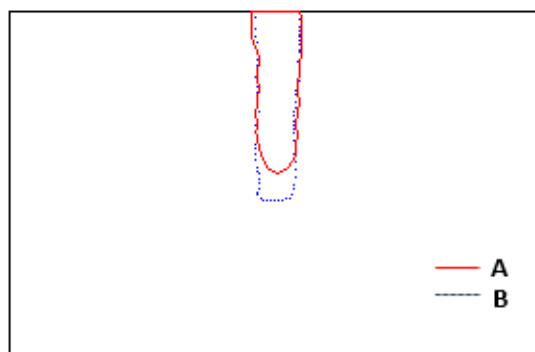


Figura 10 - Caixa 3: Comparação entre colunas executadas com pilão tipo A e pilão tipo B

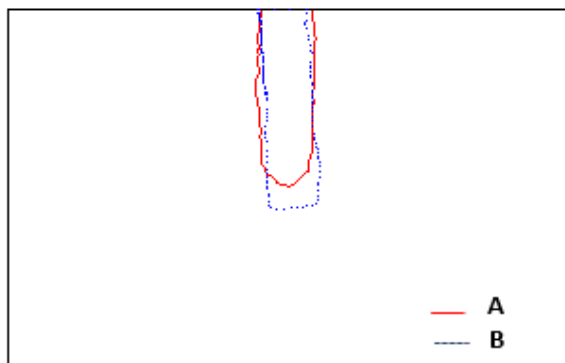


Figura 11- Caixa 4: comparação das colunas executadas com pilão tipo A e pilão tipo B

Na caixa 5 foram executadas duas colunas, ambas com pilão tipo B. Porém, uma delas foi encamisada e a outra não. A Figura 12 ilustra os resultados obtidos para esta caixa. Nota-se que ambas as colunas apresentam dimensões similares, com profundidade e diâmetro aproximados. Isto mostra que a utilização da camisa sintética não limitou aos efeitos da compactação.

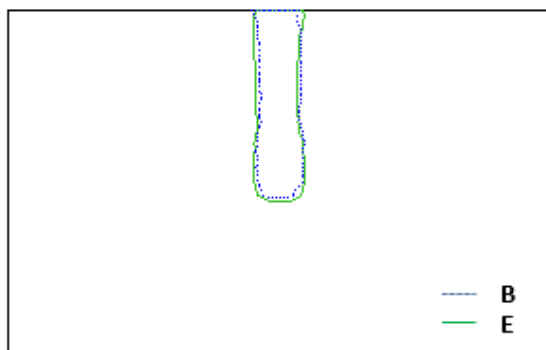


Figura 12 - Caixa 5: comparação das colunas executadas com pilão tipo B com e sem encamisamento

A Figura 13 ilustra os resultados obtidos na caixa 6, onde foram executadas duas colunas sendo uma encamisada, realizada com pilão tipo B, e outra sem encamisamento, executada com pilão tipo A. Nesta figura é possível observar a diferença entre os comprimentos finais das colunas, sendo a coluna E mais longa do que a coluna B, comprovando que o pilão tipo B empurra o solo para baixo, ao contrário do pilão tipo A que empurra o solo para as laterais.

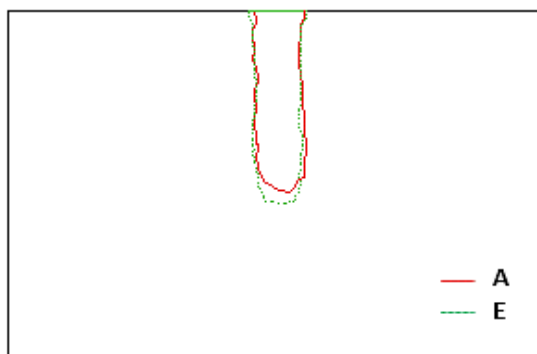


Figura 13- Caixa 6: comparação das colunas executadas com pilão tipo A e com pilão tipo B encamisada

4 CONCLUSÃO

Os resultados preliminares desta pesquisa mostram que a geometria do pilão influencia o movimento do solo compactado (comprimento final e diâmetro).

Concluiu-se que as colunas executadas com pilão tipo A (ponta cônica) ficaram mais curtas e mais grossas do que as colunas executadas com o pilão tipo B (ponta plana).

Obsevou-se que o pilão cônico, tipo A, tende a empurrar o solo radialmente e que o pilão cilíndrico, tipo B, tende a empurrar o solo para baixo.

Além disso, também foi analisada a interferência do encamisamento das colunas no efeito de compactação e os resultados encontrados mostram que não houve intervenção da membrana de revestimento nos efeitos de compactação.

Sabendo-se que as colunas utilizadas como reforço de solo têm como finalidade a densificação do solo no seu entorno, devido ao deslocamento das partículas para as laterais, conclui-se que, mesmo em pequena escala, o pilão com geometria cônica, tipo A, ofereceu uma maior compactação radial do solo, o que implica em melhores condições de reforço.

Os resultados encontrados neste trabalho estão de acordo com os resultados de Barlacu *et al.* (2013) de que o formato da ponta com ângulo de 30° é o formato ideal para execução das colunas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, pelo apoio

financeiro e ao professor Dr. Orencio Monje Vilar que foi quem levantou os primeiros questionamentos discutidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Atkinson, M. F. (1993). *Structural foundations manual for low-rise buildings*. E & EN SPON, 264 p.
- Burlacu, C.; Onlinic, E. e Manea S. (2013). *Compacted soil columns for foundations on collapsible soils*. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Proceedings ...Paris. p. 2433-2436.
- Conciani, W. (2006) *Fundações para construção de Habitação de interesse social no estado de Mato Grosso*. Editora CEFET, Cuiabá –MT.
- Costa, Y. D. J. (1999) *Estudo do comportamento de solo não saturado através de prova de carga em placa*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 160 p.
- Gusmão Filho, J. A. (1998) *Fundações do conhecimento geológico à prática da Engenharia*. Editora Universitária. UFPE. Recife, PE.
- Nogueira, E. G. (2010). *Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho sul do rododanel – SP*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica de São Paulo – USP, SP, 186 p.
- Passos, P. G. (2005). *Melhoramento de solos arenosos com estacas de areia e brita*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, DF, p. 159.
- Vianna, A. P. F. (2005). *Influência da dimensão matricial no comportamento de fundações superficiais assentes em solo arenoso não saturado*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, DF, 159 p.