

Modelagem física em centrífuga geotécnica de reforço de solos moles com colunas granulares

Luiza Massari Machado

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, luiza_massari@poli.ufrj.br

Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, samuelfelipe23@gmail.com

Romain Girout

COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, rgirout@gmail.com

Ken Daigo

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, kendaigo@poli.ufrj.br

RESUMO: Com o desenvolvimento urbano dos solos brasileiros, o melhoramento dos solos tem se tornado de fundamental importância. A técnica de colunas granulares é um método muito eficiente que permite melhorar os parâmetros de resistência e deformabilidade dos ditos solos moles. A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento dos solos moles em termos de recalque e embasar a utilização de colunas granulares como uma técnica de melhoria destes. Para tanto foram realizados ensaios centrífugos em modelos reduzidos utilizando o conceito de coluna isolada e célula unitária para duas situações respectivamente: sem tratamento e com colunas granulares. Avaliou-se a influência da variação da distribuição das tensões utilizando três diferentes geometrias de carregamento. Ensaios de caracterização com T-bar em voo foram realizados em cada modelo prévio aos ensaios de carregamento das colunas granulares. Realizaram-se ensaios de adensamento em voo comparando modelos de adensamento 1D e 2D. Uma análise quantitativa da ruptura por embarrigamento (*bulging*) das colunas granulares após o carregamento é apresentada. Amostras homogêneas foram encontradas como resultado nos modelos de adensamento 1D.

PALAVRAS-CHAVE: Coluna Granular, Solos Moles, Modelagem Centrífuga, Modelagem Física

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente ocupação urbana dos solos no Brasil, e especificamente no Rio de Janeiro, tornou-se necessária a construção em solos com características de resistência e de deformabilidade desfavoráveis. Estas adversidades referentes aos solos motivaram a busca de técnicas que permitissem o melhoramento e trabalhabilidade dos ditos solos moles.

Para possibilitar a construção sobre estes solos é necessário, muitas vezes, executar-se

primeiramente um aterro. Este aterro serve como plataforma para apoiar parte das estruturas que serão construídas.

Ao longo dos anos e em função das experiências adquiridas, as diferentes técnicas desenvolvidas visaram reduzir ou eliminar os efeitos negativos observáveis em obras de solos moles (aterros e construções). Podemos dividi-las em três tipos: as que aumentam a estabilidade do solo mole ou sua resistência; as que aceleram os efeitos do adensamento, como o uso de drenos ou sobrecargas temporárias e as que atuam em ambas as frentes (ALMEIDA e

MARQUES, 2010).

No caso deste presente estudo, a técnica avaliada se enquadra na terceira topologia. E, para respaldar o uso desta técnica como uma das formas de melhoramento de solos moles, foi preciso, primeiramente, definir os moldes dos ensaios a serem realizados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizados dois materiais, cada qual com um propósito distinto. O caulim, que é um solo artificial, foi escolhido para representar o solo mole, por se tratar de um material que apresenta comportamento semelhante aos depósitos de argila dos leitos marinhos. Estudos anteriores a este, como SILVA (2015), objetivaram a caracterização do caulim, de modo que os parâmetros geotécnicos do mesmo pudessem ser utilizados em outros trabalhos. Após análises e seguindo os critérios da NBR7181 (1984), classificou-se este material com comportamento de uma argila siltosa.

O outro material empregado nesta pesquisa, com a finalidade de constituir as colunas granulares, foi areia da praia de São Francisco, localizada em Niterói, RJ. Este solo é uma areia fina, oriunda das encostas que cercam a região da Baía de Guanabara, resultado da desagregação do gnaisse. Em sua composição mineralógica estão presentes quartzo, mica biotita e pequenas porções de hematita e lacoxênio. Em PACHECO (2006) podemos encontrar a caracterização deste material.

2.2 Métodos

2.2.1 Coluna isolada e centrífuga de braço

A centrífuga mais recente, chamada de centrífuga de braço, foi instalada no Laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ em 2012. Seu raio é de 0,75 m e ao contrário da de tambor, sua posição é fixa, horizontal. Possui um braço metálico que suporta duas caixas em cada extremidade. Para sua operação, utiliza-se um

painel de controle digital. A aquisição de dados é feita pelo programa Acqlipse. Abaixo a Figura 1 ilustra a centrífuga de braço.

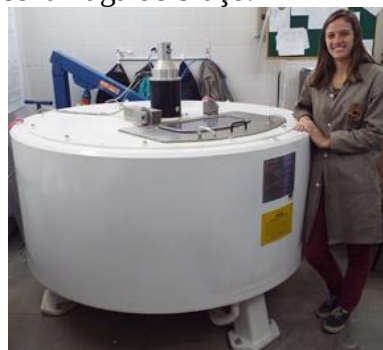


Figura 1: Centrífuga de braço da COPPE-UFRJ.

Na centrífuga de braço foram realizados os ensaios com coluna isolada. Esta foi carregada com três placas de aço inox, com diferentes diâmetros, sendo cada carregamento feito em um ensaio específico. A Tabela 1 apresenta as suas características e a Figura 2, as placas utilizadas.

Tabela 1: Características dos carregamentos aplicados nas colunas isoladas na centrífuga de braço.

Placas de carregamento - Centrífuga de braço		
Relação $\phi_{\text{placa}}/\phi_{\text{coluna}}$	ϕ_{placa}	Peso da placa
1,0	15,4 mm	46 g
1,3	20,0 mm	46 g
1,6	24,6 mm	46 g



Figura 2: Placas de diferentes diâmetros utilizadas nos ensaios.

O objetivo de manter constante a carga aplicada sobre a coluna, variando o seu diâmetro (e também a distribuição da carga), é observar o comportamento da coluna em relação à possibilidade de embarrigamento. Esta situação é similar àquela encontrada nos casos em que se instalam as fundações de construções sobre o aterro reforçado, como ilustra a Figura 3.

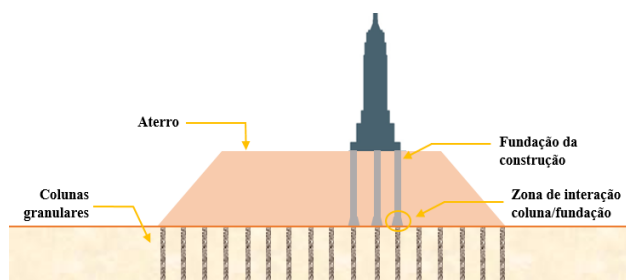


Figura 3: Representação de situação típica de interação de uma fundação com coluna granular.

2.2.2 Células unitárias e centrífuga de tambor

A centrífuga mais antiga, de tambor, foi projetada e montada pela empresa G-Max Scotland Ltd., em 1995 (OLIVEIRA, 2005). Ela possui 0,5m de raio e permite que as atividades sejam realizadas em duas posições: na vertical, que facilita o trabalho de instalação de peças e solo; e na horizontal, que é a sua posição de voo. A centrífuga é controlada por um painel eletrônico, que regula sua velocidade e posicionamento. A aquisição de dados é feita pelo programa LOGS. Essa centrífuga, ilustrada na Figura 4 abaixo, possui uma base, que é acelerada, na qual pode-se apoiar e fixar diferentes caixas de diversos tamanhos.



Figura 4: Centrífuga de tambor COPPE-UFRJ na sua posição de voo, horizontal.

Na centrífuga de tambor foram realizados os ensaios com a célula unitária. A representação da célula unitária foi feita por cilindro de aço inox com três diâmetros diferentes, que podem ser vistos na Figura 5. O uso de diferentes diâmetros tinha como finalidade captar mudanças no comportamento da coluna frente a diferentes espaçamentos entre elas. A malha a ser representada nesta pesquisa é a quadrada.



Figura 5: Células unitárias de diferentes diâmetros.

Também neste caso, a coluna foi carregada com placas de carregamento com três diâmetros diferentes, cada qual com mesmo diâmetro de sua célula unitária, conforme a Figura 6 ilustra. Porém, desta vez a tensão foi mantida constante. Assim, pretendeu-se simular o efeito das tensões do aterro sobre a malha de colunas granulares.



Figura 6: Placas de carregamento de cada célula unitária.

2.2.3 Descrição geral dos ensaios

Em ambos os tipos de ensaio desejou-se trabalhar com caulim pré-adensado, cujo S_u é de 14 kPa. Um solo mole com esta característica de resistência representa tipicamente os depósitos encontrados no Rio de Janeiro, por isso a escolha deste valor. Para atingir esta resistência não-drenada, o caulim precisou passar por um processo de adensamento. Este foi realizado em voo a aceleração de 100 g com carregamento de placas de ferro fundido, sendo o procedimento considerado encerrado quando se obteve 95% do excesso de poropressão dissipado, a ser acompanhado pelo gráfico típico de poropressão mostrado na Figura 7.



Figura 7: Curva típica de poropressão (kPa) versus tempo (min) com base em instrumentação instalada.

Outros aspectos devem ser definidos, como por exemplo a dimensão da coluna, sua forma de instalação e seu posicionamento na caixa. O diâmetro da coluna foi fixado em 15,4 mm e sua altura, variável, de acordo com a altura final da camada de solo mole após o adensamento.

A instalação da coluna foi realizada com a caixa dentro da centrífuga e a pluviação, com os devidos equipamentos, conforme definido no ensaios de pluviação, sendo o funil de passagem da areia com 2 mm de diâmetro e a altura de queda 1,04 m.

Os carregamentos das colunas foram feitos em voos com aceleração a 65 g. A escolha da aceleração para esta etapa foi determinada para representar em protótipo dimensões usuais de projeto. Como pode ser visto para o diâmetro escolhido da coluna, que visa representar em protótipo uma coluna granular de 1m ($65 \times 15,4 \text{ mm} = 1001 \text{ mm} = 1,00 \text{ m}$). Um detalhe típico da interação placa/coluna pode ser visto no esquema da Figura 8 a seguir. Vale ressaltar que este esquema é válido para as duas centrífugas, porém no caso da centrífuga de tambor, onde se realizam os ensaios de célula unitária, há um cilindro metálico circundando a coluna, que não é mostrado no desenho abaixo.

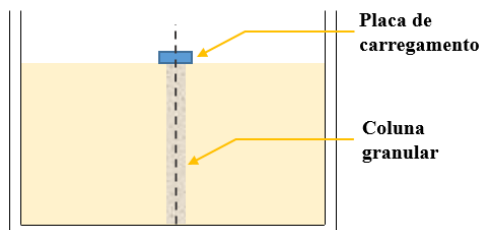


Figura 8: Esquema típico de carregamento em ambas as centrífugas.

As investigações por testes T-bar finalizaram as etapas dos ensaios, em voo centrífugo. Também foram realizados a 65 g e sua realização permite certificar a resistência não-drenada do solo trabalhado, que conforme citado anteriormente, deveria ser aproximadamente 14 kPa após o adensamento.

A velocidade de cravação (v) do ensaio foi a mesma para as duas centrífugas, e definida de forma a garantir um comportamento não drenado durante o ensaio de T-bar. Sendo, então, 1,3 mm/s.

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

4.1 Centrífuga de braço

Nesta fase foram realizados 10 ensaios. Do primeiro ao quarto ensaio, o adensamento foi feito utilizando-se 2 placas com pesos somados de 4,6 kg. Conclui-se após análise dos resultados que o peso das placas estava superdimensionado, além dos 14 kPa que se desejava. O mesmo ocorreu nos ensaios que se sucederam, 5, 6 e 7, nos quais foram usadas placas com 3,6 kg.

Assim, decidiu-se adotar apenas uma placa de adensamento com 1,0 kg nos três últimos testes. Conforme veremos na Figura 9, o uso desta placa forneceu valores de S_u bem próximo ao desejado e por isso estes três ensaios serão mais bem explicados na sequência.

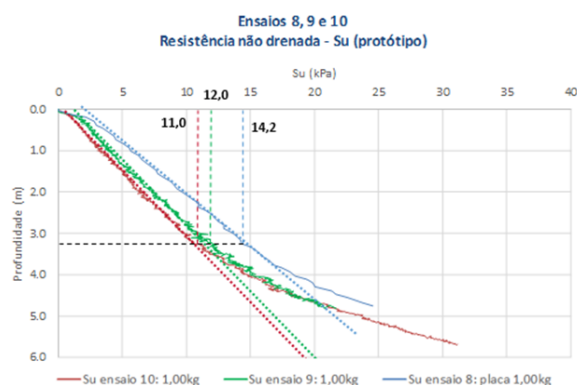


Figura 9: Curva de resistência ao cisalhamento na condição não drenada S_u (kPa) versus profundidade (m) obtida nos 8º, 9º e 10º ensaio (protótipo).

Depreende-se do gráfico acima que os valores de S_u estão razoavelmente próximos ao valor desejado, sendo sua variação decorrente de um ajuste mais refinado do geotêxtil que envolve a placa, diminuindo o atrito com a parede lateral da caixa.

Tendo sido verificada a resistência ao cisalhamento preconizada (S_u de cerca de 14 kPa), analisar-se-á o carregamento da coluna para as três placas de mesmo peso, porém de diferentes diâmetros. A Figura 10 mostra os recalques obtidos para os três tipos de carregamento e a Tabela 2 sintetiza as informações destes três últimos ensaios.

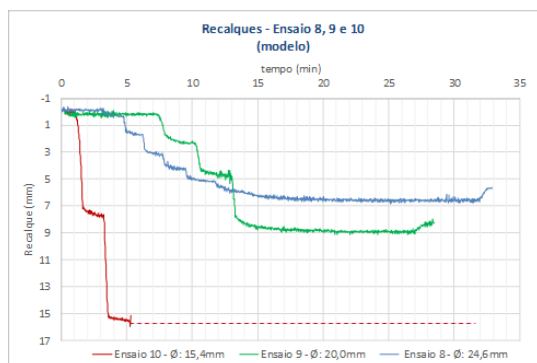


Figura 10: Curvas recalque (mm) versus tempo (min) obtidas no 8º, 9º e 10º ensaio (modelo).

Tabela 2: Tabela comparativa das placas de carregamento e respectivos recalques.

Recalques em protótipo e tensões - Centrifuga de braço			
Relação $\phi_{placa}/\phi_{coluna}$	Recalque modelo	Recalque protótipo	Tensão
1,0	15,2 mm	0,99 m	160,60 kPa
1,3	9,1 mm	0,59 m	95,22 kPa
1,6	6,7 mm	0,43 m	62,94 kPa

Observa-se a situação mais crítica que corresponde à tensão aplicada de 2,42 kPa, em que o recalque em protótipo pode chegar a quase 1 m.

Ao fim dos ensaios, realizaram-se as inspeções visuais da coluna e do caulim próximo. As fotos da Figura 11 exemplificam o que se encontrou nesta etapa final do processo.

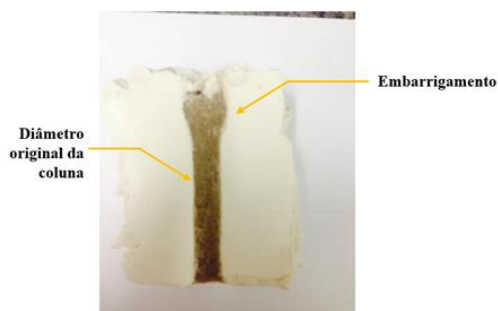


Figura 11: Coluna cortada longitudinalmente, após o 10º ensaio.

Por fim, comparou-se o embarrigamento verificado experimentalmente com a dimensão original da coluna. A razão entre os diâmetros de ambos é igual a 1,8 para o pior caso observado (menor diâmetro do carregamento). Para entender a situação que se encontra a coluna nessa fase de pós carregamento, faz-se a seguinte análise.

Calcula-se a deformação axial da coluna, com a seguinte relação:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta_a}{h_{coluna}} = \frac{15,2}{95} = 0,16$$

onde:

Δ_a : é a deformação vertical da coluna após carregamento e equivale ao recalque obtido e
 h_{coluna} : é a altura inicial da coluna logo após instalação, igual a espessura de caulim.

Buscou-se, então, na literatura uma curva de *tensão x deformação* que pudesse representar este caso de estudado, ou, pelo menos, se aproximar conservativamente. Em GUIMARÃES (2014), foi realizado um estudo da areia de São Francisco, onde se obteve a curva desejada. Para a menor tensão confinante, 30 kPa, do gráfico da Figura 12, observa-se que a ruptura ocorre em uma deformação axial (ε_a) de 3%.

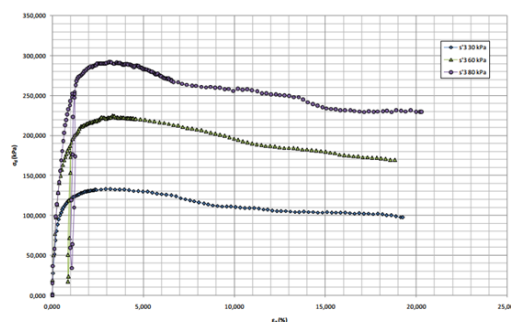


Figura 12: Curvas tensão (kPa) versus deformação (%) da areia de São Francisco (GUIMARÃES, 2014).

Avaliando a deformação axial obtida após a fase de carregamento (16%), infere-se que a coluna carregada com a placa de menor diâmetro rompeu, devido aos esforços deste carregamento. Para os demais carregamentos, encontrar-se-á para a deformação axial 10,5% e 7,4%, para os carregamentos de 20,0 e 24,6 mm de diâmetro, respectivamente. Como a tensão confinante dos ensaios feitos neste trabalho são menores que 30 kPa, a ruptura acontecerá em valores inferiores de tensão. Conclui-se que, como todas as deformações axiais se encontram além da deformação axial de ruptura para a tensão confinante de 30 kPa, que todas as colunas romperam após seu carregamento.

4.1.1 Conclusões

Após a realização destes ensaios, pôde-se estabelecer algumas premissas relativas à

metodologia na execução dos ensaios da centrífuga de braço, são elas:

- a placa de adensamento será uma placa única de 1,0 kg;
- possibilidade de se realizar dois carregamentos simultâneos na mesma caixa em um mesmo ensaio, contribuindo para um valor de β será o mais acurado;
- definição do procedimento (quantidade de estágios) para que fosse atingida a aceleração de 65g, da fase de carregamento, Decidiu-se então, aumentar em uma única etapa a aceleração no painel digital para 65 g, evitando-se estágios intermediários.
- é preferível e muito importante projetar uma melhor distribuição de cargas para a cada coluna, dessa forma, evitando-se dimensionamentos muito robustos das colunas granulares (o que implica maiores gastos econômicos).

4.2 Centrífuga de tambor

Nesta centrífuga foram realizados 15 ensaios. Os quatro primeiros foram feitos sem a célula unitária, apenas para conhecer-se o funcionamento da centrífuga e calibrar-se o peso das placas de adensamento. A princípio foram utilizadas três placas de ferro fundido com peso total de 12,26kg. A drenagem foi feita em duas direções, pelo geotêxtil colocado em sua lateral transversal e fundo.

O resultado, que pode ser visto na Figura 13, foi um valor de S_u maior do que o os 14kPa visados, como já era esperado, porém muito abaixo do valor teórico calculado.

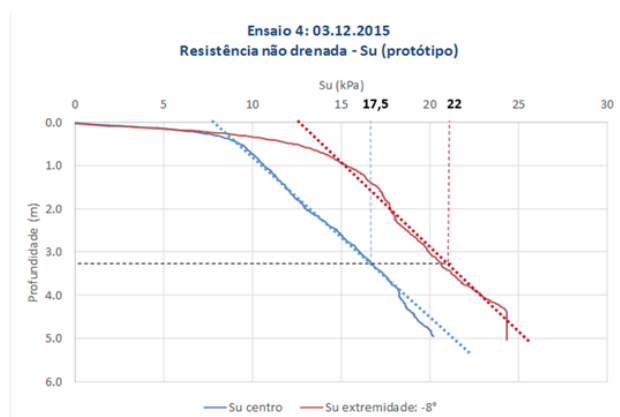


Figura 13: Resultados obtidos no 4º ensaio para um T-bar central e outro a -8°.

Percebe-se também que a resistência não-drenada medida na extremidade da caixa é maior do que no centro, revelando um solo não-homogêneo, o que também não era esperado.

O quinto e sexto ensaios foram feitos novamente com as placas de 12,26 kg para uma maior amostragem de resultados com estes padrões. O diferencial foi a inserção da célula unitária de maior diâmetro.

Durante o tratamento de dados aquistados do quinto ensaio, percebeu-se algo estranho com as curvas obtidas, um comportamento atípico, como segue na Figura 14.

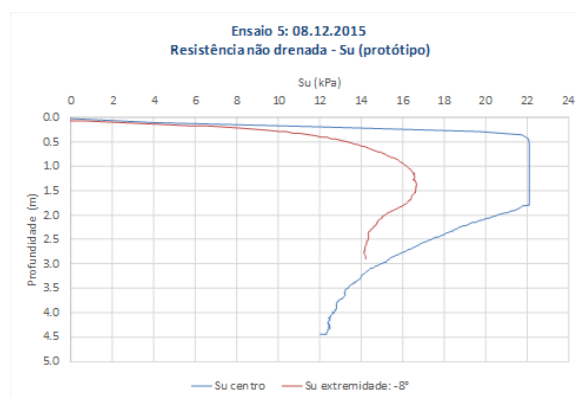


Figura 14: Gráfico obtido após adensamento do 5º ensaio, curvas atípicas.

A espessura da célula unitária foi responsável por fomentar um efeito de arco no solo durante seu adensamento. Desta forma a camada superior do caulim, onde a célula unitária não alcança, foi adensada e ganhou resistência. No gráfico isso é notado pela curva quase horizontal nos primeiros 0,5 m. Enquanto que, as camadas abaixo do topo da célula ficaram extremamente moles, pois toda tensão foi concentrada no material mais rígido, o aço. O que é observado pela manutenção e recuo do valor do S_u mesmo com aumento da profundidade.

Os ensaios não poderiam ter continuidade utilizando estas células unitárias. Logo, elaborou-se um novo design para as mesmas, como mostra a Figura 15.

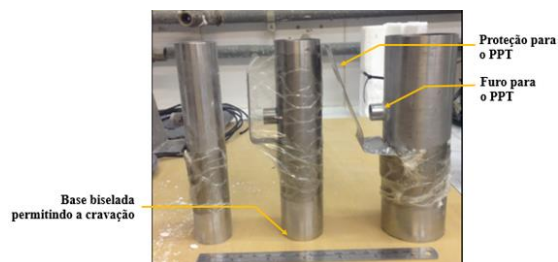


Figura 15: Novas células unitárias fabricadas.

Conforme ocorria no ensaio da centrífuga anterior, o nível de água do final da etapa de adensamento devia ser restaurado, porém esta recolocação da água só podia ser feita com a centrífuga em voo. Esta necessidade só foi identificada ao longo dos ensaios e, por isso, desenvolveu-se o sistema de *standpipe*.

Seu funcionamento consiste em utilizar o sistema de abastecimento elevado já presente nas instalações da centrífuga, para fornecer água para dentro da caixa durante o voo. O nível de água é controlado pelo *standpipe*, que extravasa a água excedente do nível desejado para a parede da centrífuga, conforme esquematizado nas Figura 16.

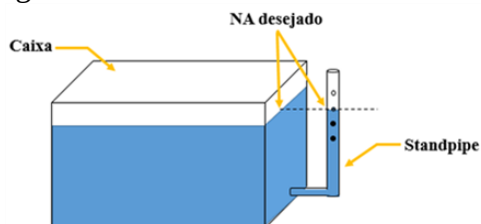


Figura 16: Esquema do *standpipe*.

Enquanto as novas células estavam sendo fabricadas, realizaram-se ensaios para que se investigasse a razão das inconformidades de valores de resistência não drenada encontradas nos quatro primeiros ensaios. Visando isto, os ensaios seguintes 7, 8, 9, 12, 14 e 15 foram feitos utilizando-se drenagem apenas em uma direção. Isto implicou na retirada do geotêxtil das laterais da caixa, permitindo o deslocamento da água apenas na direção vertical. E os ensaios 10, 11 e 13 foram feitos utilizando-se a drenagem bidimensional. Observam-se as Figuras 17 e 18, que apresentam as curvas obtidas nesses ensaios, realizados no centro e na extremidade, respectivamente. Após a análise e organização dos dados foi possível depreender alguns fatos e formular algumas conclusões que serão

explicadas adiante.

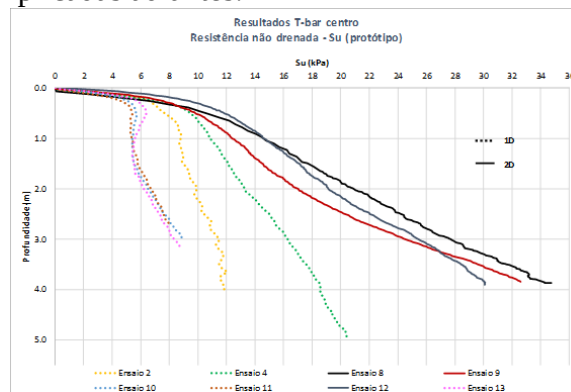


Figura 17: Curvas de resistência não drenada (kPa) versus profundidade (m), obtidas por instrumentação no centro da caixa nos casos de drenagem 1D e 2D (protótipo).

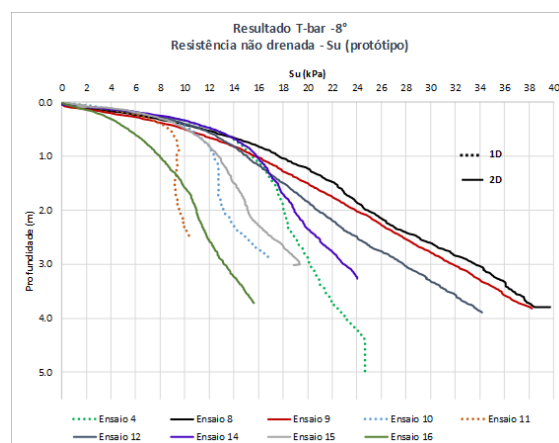


Figura 18: Curvas de resistência não drenada (kPa) versus profundidade (m), obtidas por instrumentação na extremidade da caixa nos casos de drenagem 1D e 2D (protótipo).

O ensaio 2 e 4 foram feitos sem a restituição do nível d'água, ou seja, sem a utilização do *standpipe*. Os resultados das curvas obtidas da instrumentação no centro são satisfatórios quanto ao formato típico de uma curva de T-bar, porém os valores estão em desacordo com os cálculos teóricos.

Nos ensaios subsequentes (8 em diante) foi possível a utilização do sistema de abastecimento de água em conjunto com o *standpipe* para a restituição do nível da água antes da execução do T-bar, conforme já explicado anteriormente. O peso das placas se manteve em 12,26kg, objetivando uma maior quantidade de ensaios realizados nas mesmas condições, que permitissem comparações.

Nos ensaios feitos com drenagem 2D, a partir da utilização do *standpipe* (ensaios 10, 11 e 13) obteve-se uma curva atípica para um

ensaio de T-bar, que não pode ser considerada confiável para avaliar valores de S_u . Este comportamento atípico do caulim frente ao T-bar executado pode ser explicado.

O furo localizado no *standpipe* é responsável por manter um nível d'água a abaixo da superfície do caulim. Desta forma, temos um solo não saturado nos seus primeiros centímetros, o que se reflete na curva do T-bar em um aumento brusco da resistência em função da profundidade. Em seguida, ao cravar no solo saturado, os valores de S_u sofrem uma queda brusca. Ao se aproximar do solo mais próximo ao geotêxtil, no fundo, a resistência volta a aumentar, pois o solo mais próximo ao geotêxtil sofre um adensamento mais rápido devido a sua proximidade do material drenante.

O efeito negativo da existência do *standpipe* durante o adensamento é potencializado no caso de drenagem 2D. O geotêxtil lateral acelera a drenagem e conseqüentemente a ocorrência do secamento da camada superficial de caulim. Essa diferença fica bem evidente nos gráficos apresentados nas Figuras 17 e 18.

Os ensaios que se seguiram, 14, 15 e 16, foram realizados com sobrecargas menores que os 12,26 kg iniciais. O T-bar realizado a -8° representa a localização na qual serão realizados os ensaios durante os testes oficiais. Uma vez que, não será possível realizar o T-bar no centro por conta da coluna instalada.

O valor de S_u obtido experimentalmente associado a sobrecarga de 4,4kg se mostrou adequado à resistência não drenada desejada. O T-bar executado na extremidade comprovou isso, tendo sido obtido um valor de 15,2 kPa, levando-se em conta que na extremidade o valor era um pouco mais elevado. Pode-se concluir que no centro ter-se-á um S_u de 14 kPa.

4.2.1 Conclusões

Ao final de todas as análises feitas, foi possível definir a melhor metodologia de realização dos ensaios, que seguem as resoluções a seguir:

- o sistema de drenagem 2D não funcionou adequadamente com o sistema de *standpipe*, sendo substituído pela metodologia de drenagem 1D. Nesse, os efeitos negativos da combinação *standpipe* + drenagem são

menos agressivos, resultando em curvas do ensaio T-bar, muitas vezes, aceitáveis;

- as bordas, quer seja com o uso de geotêxtil (caso 2D), ou sem (caso 1D), causam efeito de enrijecimento nas suas proximidades resultando, em ambos os casos, uma diferença nos valores de S_u encontrados;
- apesar de não serem iguais aos preconizados pela teoria, os valores de S_u obtidos experimentalmente foram convergindo ao longo da pesquisa em direção aos valores teóricos previstos. Isso parece indicar que se foi adquirindo experiência no ajuste do geotêxtil, de forma a evitar-se ao máximo o atrito lateral que sustenta parte da tensão aplicada pelas placas.
- O valor da sobrecarga foi definido como 4,4 kg.

AGRADECIMENTOS

Gratidão a todos aqueles que direta, ou indiretamente fizeram parte deste trabalho. Em especial aos responsáveis por sua execução, Professor Márcio Almeida, Romain, Ken, Samuel, Mário, Pablo, Raul e Gilberto.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M.S.S e Marques, M.E.S. (2010,). *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 254p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181, *Solo – Análise Granulométrica*, Rio de Janeiro, 1984.
- Pacheco, L. A. (2006). *Modelagem física e numérica de um duto enterrado em areia sujeito a deslocamento lateral*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 114 p.
- Silva, G. M. C. (2015). *Parâmetros Cam-Clay do Caulim Usado em Modelos Centrífugos na COPPE-UFRJ*. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 55 p.
- Oliveira, J. R. M. S. (2005). *Modelagem em centrífuga de um problema de interação solo estrutura*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da UFRJ, 335 p.
- Guimarães, M.P.P. (2014). *Modelagem Centrífuga da Movimentação Lateral de Dutos em Areia*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRJ, 120 p.