

Análise do Comportamento de um Solo Arenoso Não Saturado Natural e Compactado com Baixa Densidade

Ana Patrícia Aranha de Castro
UNESP, Bauru-SP, Brasil, eng.anadecastro@hotmail.com

Fábio Visnadi Prado Soares
UNESP, Bauru-SP, Brasil, fvps@hotmail.com

Lucas Savio Fagundes
UNESP, Bauru-SP, Brasil, lucassaviofagundes@gmail.com

Roger Augusto Rodrigues
UNESP, Bauru-SP, Brasil, roger_ar@feb.unesp.br

RESUMO: A sucção tem assumido um papel importante no comportamento geotécnico dos solos não saturados e nas obras geotécnicas, visto que sua variação no decorrer das estações do ano pode determinar a escolha mais adequada da fundação de modo a suprir às necessidades de desempenho e segurança dessas obras. Este artigo apresenta resultados experimentais de um solo arenoso situado na região central do Estado de São Paulo. Ensaio de caracterização e ensaios edométricos com sucção controlada foram realizados de modo a se determinar as características físicas e os parâmetros de compressibilidade do solo em questão. Os resultados demonstram que a variação da sucção influencia a tensão de pré-adensamento e o índice de compressão do solo e que o solo quando compactado com baixa densidade pode se tornar tão compressível quanto o solo natural.

PALAVRAS-CHAVE: solo não saturado, sucção, ensaio edométrico com sucção controlada, compactação.

1 INTRODUÇÃO

A terraplenagem é uma atividade fundamental em algumas obras de engenharia, pois viabiliza a execução de projetos construtivos, como: edificações, obras rodoviárias, obras de arte, aterros sanitários, ou até portos de carga e descarga. Desse modo, é indispensável o conhecimento acerca do solo e o controle dos métodos de execução de uma obra desse tipo, em especial quando se trata da execução de compactação em campo. Esse controle das variáveis encontradas no momento da execução visa garantir a segurança da obra bem como a viabilidade técnico-econômica do projeto.

Como a execução de obras de terraplenagem no Brasil são realizadas muitas vezes em solos

não saturados é de grande importância analisar o efeito da compactação e da sucção na deformabilidade desses solos.

Solos não saturados são amplamente encontrados em todo o mundo e a variação da sucção nos mesmos pode afetar diretamente o desempenho de estruturas e obras geotécnicas. As características físicas e hidro-mecânicas de alguns solos não saturados associadas às condições climáticas de cada região condicionam o comportamento do solo, principalmente quando se trata de deformações devido ao umedecimento sob carga constante.

Regiões com estações que alternam seca intensa e período de grande pluviosidade e altas temperaturas promovem solos altamente intemperizados, podendo originar solos de

comportamento laterítico, porosos, não saturados e colapsíveis nas camadas mais superficiais.

Nestes solos, a sucção é uma das principais variáveis de estado que interferem no comportamento dos solos (Alonso, et. al., 1987). Sua variação decorre basicamente de fatores climatológicos e das características de permeabilidade e de retenção do solo.

Estudos detalhados destes solos podem ser realizados utilizando-se ensaios com sucção controlada. Em laboratório, ensaios edométricos que permitem o controle da sucção possibilitam a identificação do grau de influência da sucção sobre o comportamento compressivo e colapsível desses solos.

Este artigo trata da análise da influência da sucção sobre a deformabilidade do solo em condição natural (indeformada) e compactada com baixo grau de compactação.

2 SOLO ESTUDADO

A área estudada situa-se na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Campus de Bauru-SP, onde predominam solos com elevada porosidade e baixo grau de saturação na porção superior do perfil geotécnico.

Do ponto de vista geológico, a área ocupada pelo município pertence à Bacia Sedimentar do Paraná, e está inserida no Planalto Arenítico-Basáltico do Estado de São Paulo, Planalto Ocidental, onde o quadro geológico regional é dominado por rochas do Grupo Bauru (Cretáceo Superior), recobrimdo as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral que afloram em direção ao vale do Rio Tietê (Ross & Moroz, 1997). Os solos superficiais são compostos por areia fina pouco argilosa de compactidade fofa a compacta, de coloração predominante marrom avermelhado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização foram realizados

de acordo com as Normas Brasileiras, consistindo em ensaios de análise granulométrica conjunta (NBR 7181/88), massa específica dos sólidos (NBR 6508/88) e limites de liquidez (NBR 6459/84) e plasticidade (NBR 7180/88). Para o ensaio de compactação, foi utilizada energia do ensaio de compactação Proctor Normal (NBR 7182/86).

3.2. Ensaios Edométricos com Sucção Controlada

Para estudar o efeito da sucção na variação volumétrica do solo foram realizados ensaios edométricos com sucção controlada em câmaras baseadas no edômetro desenvolvido por Escario e Saez (1973) que utiliza a técnica de translação de eixos de Hilf (1956) para a imposição e controle da sucção.

Nos ensaios foram aplicadas trajetórias de carregamento-descarregamento com sucção constante. As sucções selecionadas foram 0, 50, 100, 200 e 400 kPa.

Dois tipos de amostras foram ensaiadas, compactadas e indeformadas, de modo a se avaliar o comportamento das duas estruturas mediante o mesmo valor de sucção. As amostras compactadas foram moldadas com a mesma densidade do solo indeformado, buscando analisar a deformabilidade do solo pobremente compactado, isto é, com baixo grau de compactação.

Na Figura 1 são apresentadas a montagem do experimento e a câmara edométrica com controle de sucção.

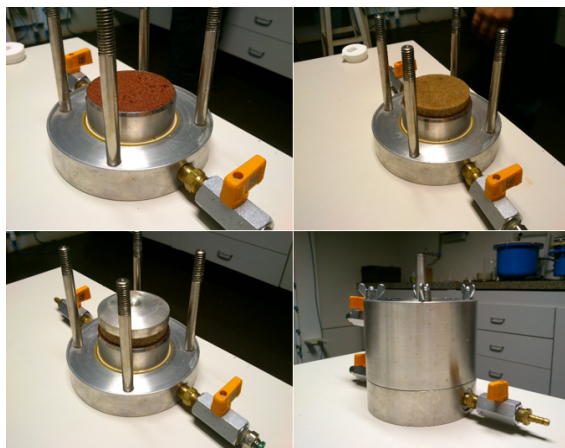


Figura 1. Montagem da câmara edométrica com controle de sucção.

Na Figura 2 é apresentada a câmara edométrica já instalada sobre a prensa edométrica, destacando os dutos para entrada de ar e consequente imposição de sucção e de saída da água do corpo de prova, e na Figura 3 é apresentado o final do ensaio, com a deformação do corpo de prova.



Figura 2. Ensaio edométrico com sucção controlada.



Figura 3. Câmara edométrica desmontada e corpo de prova após a realização do ensaio.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Na Figura 4 é apresentada a curva granulométrica obtida por meio de ensaios de análise granulométrica conjunta (NBR 7181/88), com e sem a utilização do defloculante hexametáfosfato de sódio, onde é possível verificar o estado floculado dos finos.

Na Figura 5 é apresentada a curva de compactação, obtida por meio do ensaio de Proctor Normal com curvas de mesmo grau de saturação para os valores de 80%, 90% e 100%.

Na Tabela 1 são mostradas as principais características do solo a 1,0 m de profundidade, obtidas por meio dos ensaios acima descritos e pelos demais citados.

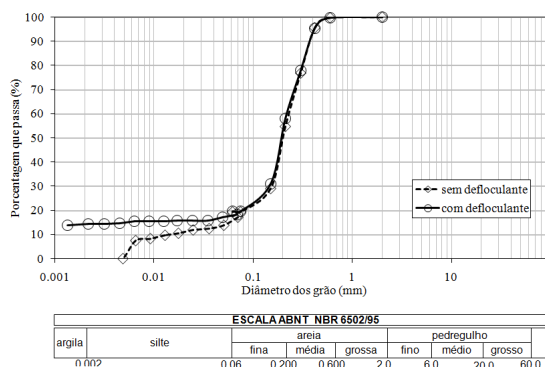


Figura 4. Curvas granulométricas obtidas em ensaios com e sem o uso de defloculante.

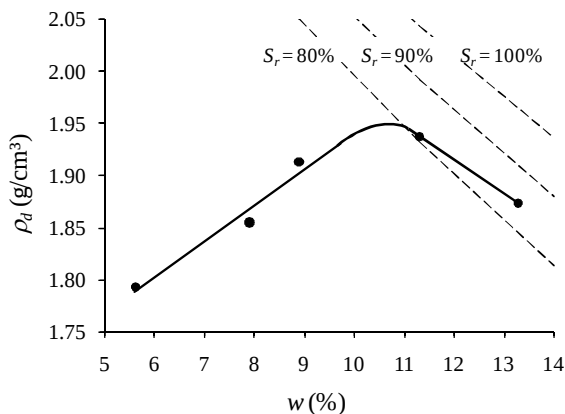


Figura 5. Curva de compactação na energia Proctor normal.

Tabela 1. Características do solo de Bauru-SP.

Variável	Símbolo	Unidade	Valor
Umidade*	w	(%)	5,5
Massa específica dos sólidos	ρ_s	(g/cm ³)	2,649
Massa específica seca	ρ_d	(g/cm ³)	1,507
Índice de vazios	e	-	0,757
Porosidade	n	(%)	43,1
Grau de saturação*	S_r	(%)	19,3
Areia	-	(%)	80,2
Silte	-	(%)	5,8
Argila	-	(%)	14,0
Limite de liquidez	w _L	(%)	15,5
Massa específica seca máxima	$\rho_{dm\acute{a}x}$	(g/cm ³)	1,950
Umidade ótima	w _{opt}	(%)	10,6

* valores referentes à data da coleta do solo.

Nas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10 são apresentados os resultados dos ensaios sobrepostos realizados com amostras naturais e compactadas, respectivamente para cada valor de sucção. Como pode ser visto, as curvas dos ensaios

edométricos relacionam o índice de vazios normalizado (e/e_o) com a tensão vertical líquida ($\sigma - u_a$).

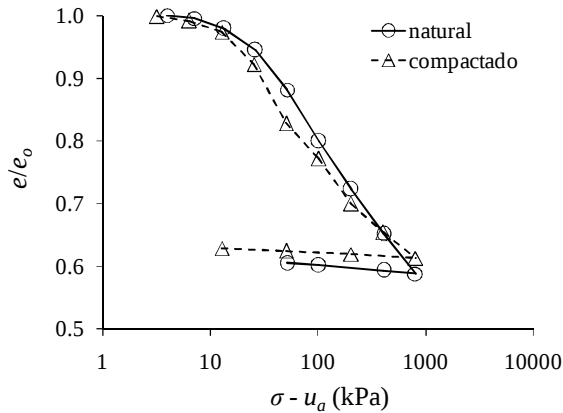


Figura 6. Curvas de ensaios edométricos com sucção igual a 0 kPa (solo saturado).

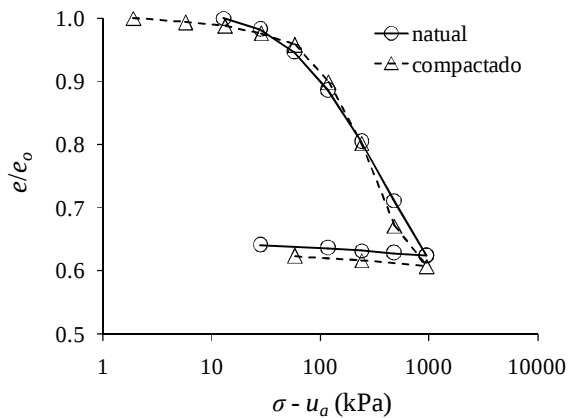


Figura 7. Curvas de ensaios edométricos com sucção igual a 50 kPa.

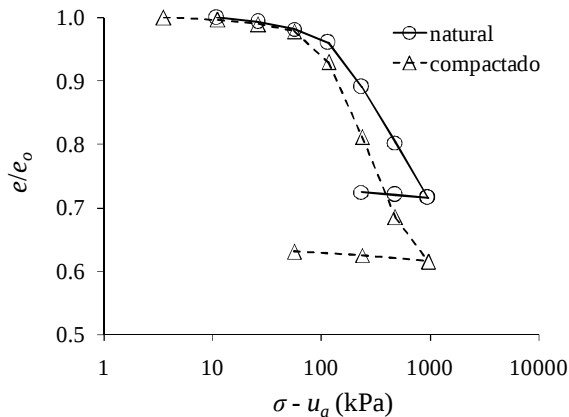


Figura 8. Curvas de ensaios edométricos com sucção igual a 100 kPa.

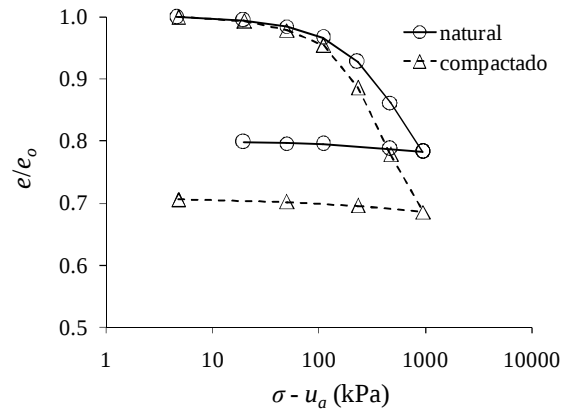


Figura 9. Curvas de ensaios edométricos com sucção igual a 200 kPa.

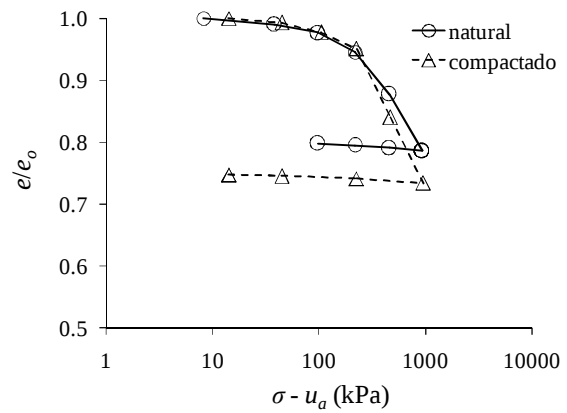


Figura 10. Curvas de ensaios edométricos com sucção igual a 400 kPa.

Na Figura 11 é apresentada a variação da tensão de pré-adensamento do solo com a sucção que corresponde a curva LC (loading-collapse) idealizada por Alonso et al. (1987). Já na Figura 12 é apresentada a variação do índice de compressão do solo com a sucção.

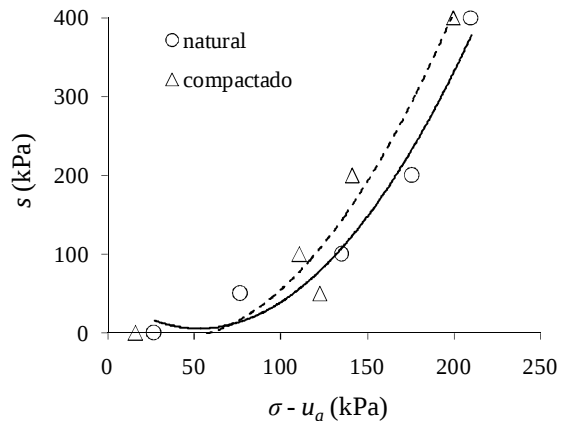


Figura 11. Variação da tensão de pré-adensamento do solo com a sucção (curvas LC).

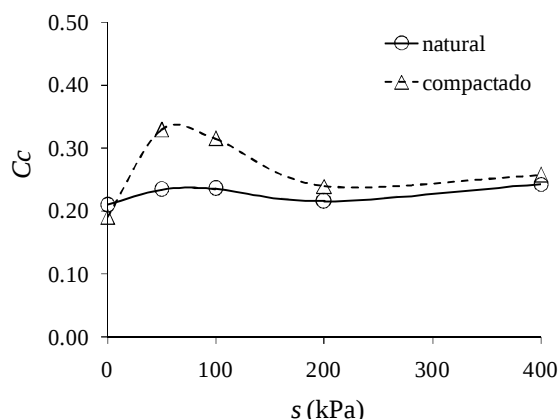


Figura 12. Variação do índice de compressão do solo com a sucção.

Os resultados demonstram a influência da sucção no comportamento compressivo do solo (Figuras 6 a 10). Os resultados mostram certa semelhança entre as curvas de compressão confinada do solo natural em relação às mesmas curvas do solo compactado, com um tendência do solo compactado apresentar-se mais compressível, sobretudo para as tensões mais elevadas. Estes resultados são mais divergentes para sucções mais elevadas (acima de 100 kPa).

Cabe ressaltar que as amostras compactadas foram construídas buscando-se moldá-las com os mesmos índices físicos do solo natural.

Além da diferença estrutural entre as amostras compactadas e naturais, as amostras compactadas não sofreram influência de ciclos de umedecimento e secagem que ocorrem na natureza ao longo do tempo. Isto pode afetar o comportamento mecânico do solo, pois o ressecamento do solo pode gerar deformações plásticas (irreversíveis) no solo enrigecendo-o e tornando-o menos deformável com o aumento das tensões aplicadas, desde que certa sucção exceda a máxima sucção suportada pelo solo ao longo da sua história.

Em linhas gerais, o aumento da sucção provoca a elevação das tensões de pré-adensamento, assim como mudanças na inclinação da reta virgem, reduzindo a variação volumétrica do solo, tanto compactado quanto natural. Na Figura 11, a curvatura das curvas LC ajustadas no plano ($\sigma - u_a$, s) indicam que o solo pode sofrer deformações volumétricas compressíveis irreversíveis para algumas

trajetórias de tensões que envolvem incrementos de $\sigma - u_a$ e decrementos de s ou ambos. Em outras palavras, indicam a colapsibilidade do solo tanto natural quanto compactado.

A variação da tensão de pré-adensamento varia significativamente até a sucção de 400 kPa (sucção limite dos ensaios), indicando, portanto, o comportamento colapsível do solo nestes intervalos de tensão.

5 CONCLUSÃO

Um programa experimental usando ensaios edométricos com sucção controlada foi elaborado para estudo da compressibilidade de um solo arenoso natural e compactado. Dos resultados conclui-se que a sucção influencia a variação de volume e, por conseqüência o colapso do solo. O aumento da sucção eleva as tensões de pré-adensamento, assim como provoca mudanças na inclinação da reta virgem, reduzindo a compressibilidade do solo.

Comparando-se os solos natural e compactado observou-se que a mudança na estrutura ocasionada pela compactação promoveu maiores deformações ao solo, sobretudo para as maiores tensões verticais líquidas aplicadas nos ensaios com sucções mais elevadas. Tal fato se deve provavelmente ao diferente arranjo estrutural ocasionado pela compactação e pelo histórico de tensão e de sucção e na ausência dos eventos climáticos que induzem ciclos de umedecimento e secagem.

É importante destacar que a compactação do solo é um método de melhoria de solo que tem como objetivo aumentar a resistência ao cisalhamento e reduzir a deformabilidade e a permeabilidade do solo. No entanto, sem o devido controle de compactação, o solo pobremente compactado pode torna-se mais deformável e colapsível que o solo natural.

Tal comportamento tem afetado o desempenho de construções assentes neste tipo de solo, especialmente o das edificações de pequeno e médio porte quando ocorrem eventos isolados de precipitações intensas ou quando da ruptura de tubulações de água e de esgoto doméstico.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior - CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alonso, E. E; Gens, A. & Hight, D. W. (1987) *Special problem soils*. General Report (session 5), In: European Conference on Soil Mechanics and Foundation, 9, Dublin. Proceedings. Rotterdam, A. A. Balkema, p.5.1-5.60.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 6p.
- _____. *NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm: determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 8p.
- _____. *NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, (1988). 3p.
- _____. *NBR 7181: Solo: análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13p.
- _____. *NBR 7182: Solo: ensaio de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.
- Escario, V. e Saez, J. (1973) *Measured of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction*. In: Proc. 3rd International Conference Expansive Soils (Haifa), p.195-200.
- Hillel, D. (1971) *Soil and water: physical principles and processes*. New York, Academic Press, p.5-127.
- Hilf, J.W. (1956) *An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils*. Denver, 109p. (Doutorado – Faculty of Graduate School of the University of Colorado).
- Ross, J. L. S.; Moroz, I. C. (1997) *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo/SP. Laboratório de Geomorfologia do Departamento de Geografia/USP e Laboratório de Geologia Aplicada/IPT – FAPESP, Mapas e Relatório.