

VARIAÇÃO DA UMIDADE DE UM PERFIL DE SOLO POROSO NÃO SATURADO

Paiva, N.B.¹ & Fagundes, L.S.² & Lodi, P.C.³ & Giacheti, H.L.⁴ & Rodrigues, R.A.⁵

Resumo – Este artigo apresenta resultados de monitoramento da umidade realizado em um solo não saturado arenoso situado na região central do Estado de São Paulo. O monitoramento foi realizado determinando-se a umidade gravimétrica de solos coletados em profundidade. Ensaio de curvas de retenção de água, índices físicos do solo e dados pluviométricos complementam as informações básicas do estudo. Os resultados mostram que a variação da umidade depende das alterações climáticas sazonais e das características de retenção de água do solo. Nos períodos mais úmidos não foram registradas umidades próximas à saturação na superfície do terreno, devido à elevada porosidade, baixa capacidade de retenção e a grande quantidade de água necessária para a redistribuição da umidade do solo.

Palavras-Chave – umidade; sucção; perfil de solo

MOISTURE CONTENT VARIATION OF A POROUS UNSATURATED SOIL PROFILE

Abstract – This paper presents results of a monitoring of moisture content performed in an unsaturated sandy soil from central São Paulo State. The monitoring was carried out by determining the gravimetric moisture content of samples collected in depth. Soil-water retention curve tests, soil physical indexes and rainfall data complement the basic information of this study. Results show that the moisture variation depends on seasonal weather changes and water retention characteristics of soil. In wetting period, moisture data close to saturation at surface soil weren't registered due to the high porosity, low soil-water retention capacity and the large amount of water necessary to redistribution of soil moisture content.

Keywords – moisture content; suction; soil profile.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de água em um solo não saturado pode ser descrita recorrendo-se à quantificação do estado de energia em que a água se encontra. Na física, reconhecem-se duas formas de energia, a potencial e a cinética. Nos solos, considerando-se a reduzida velocidade de fluxo nas situações corriqueiras, a energia cinética é desprezada. A energia potencial, ou simplesmente, potencial da água, decorre da interação da água com campos de força, ou seja, basicamente da soma dos potenciais gravitacional, matricial, osmótico e pneumático. Portanto, o conceito do estado energético da água no solo envolve parcelas referentes à posição da partícula de água, aos fenômenos osmóticos, capilares e de adsorção e à pressão externa sobre ela exercida.

¹ Engenheira Civil nat_paiva@yahoo.com.br

² Engenheiro Civil e Mestrando - FEB/UNESP lucassaviofagundes@gmail.com

³ Professor - FEB/UNESP plodi@feb.unesp.br

⁴ Professor - FEB/UNESP giacheti@feb.unesp.br

⁵ Professor - FEB/UNESP roger_ar@feb.unesp.br *

Dos potenciais, o gravitacional e o matricial são dois dos que mais afetam a infiltração e a percolação da água no solo em condição não saturada. No processo de infiltração, inicialmente o potencial matricial exerce grande influência, mas à medida que a água infiltra e a umidade do solo se eleva, o potencial matricial torna-se menos importante. Já próximo à saturação do solo, o potencial gravitacional é que predomina.

O potencial matricial resulta das forças de capilaridade e de adsorção decorrentes da interação entre a matriz sólida do solo e a água. Esta interação solo-água pode ser medida a partir da avidéz que um solo não saturado tem por água. Esta avidéz está associada à sucção e é função basicamente da mineralogia, da massa específica e da umidade inicial do solo.

A sucção tem assumido um importante papel na engenharia geotécnica, já que a sucção matricial que tem sido reconhecida como a mais importante fonte de sucção a interferir no comportamento mecânico dos solos não saturados (Alonso et al., 1987).

A variação da sucção e, por conseqüência, da umidade do solo decorre de um processo complexo que depende das condições atmosféricas e das características de permeabilidade e de armazenamento ou retenção do solo, principalmente na superfície, onde o solo interage com a atmosfera.

Embora se reconheça que a sucção e a umidade do solo variem de estação para estação e de ano para ano, os projetos geotécnicos de engenharia são quase sempre baseados nas informações obtidas em investigações realizadas em curto prazo (Blight, 2003). Em geral, o comportamento e as propriedades dos solos que compreendem a zona não saturada, entre a superfície do solo e o nível freático, são fortemente dependentes da transferência de água e de energia entre a atmosfera e o solo (Blight, 1997; Cui, et al. 2005).

De modo geral, na natureza o solo sofre variação paulatina da umidade devido às estações de seca e de chuva com ciclos de umedecimento e secagem. Tal variação tem sido investigada com uso de diversas técnicas e instrumentos de medida, especialmente desenvolvidos para esta finalidade

No entanto, ainda que várias pesquisas tratem do desenvolvimento de equipamentos para medida de sucção e de umidade em campo, muitos estudos carecem de dados contínuos de monitoramento no solo, restringindo-se muitas vezes a previsões geotécnicas de comportamento baseadas em análises pontuais. Este artigo contribui para suprir tal necessidade através do monitoramento da umidade, procurando identificar os fatores que mais influenciam as alterações dessa variável ao longo do tempo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Curvas de retenção de água no solo

Ensaio foram realizados para determinar as curvas de retenção de água no solo com amostras de solo indeformado coletadas em trincheira a cerca de 1 m de profundidade. O método da câmara de pressão (Figura 1) foi usado para valores baixos de sucção e o método de papel filtro (Figura 2) para valores mais elevados de sucção.

Os resultados obtidos foram ajustados de acordo com a equação de Van Genuchten (1980), expressada em termos de umidade gravimétrica.

$$w = w_r + (w_s - w_r) \cdot \left\{ \frac{1}{\left[1 + (\alpha \cdot s)^n \right]^m} \right\} \quad (1)$$

Em que, w_r e w_s são umidades residual e de saturação; α , m e n são parâmetros de forma da curva de retenção; e s é a sucção.

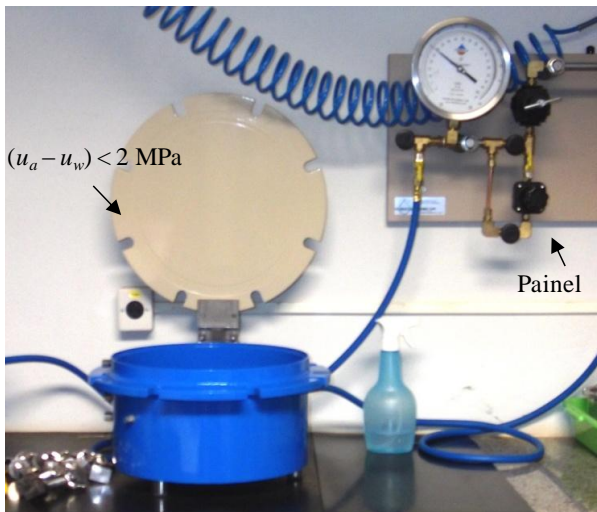


Figura 1 – Câmara de pressão (UNESP/Bauru).

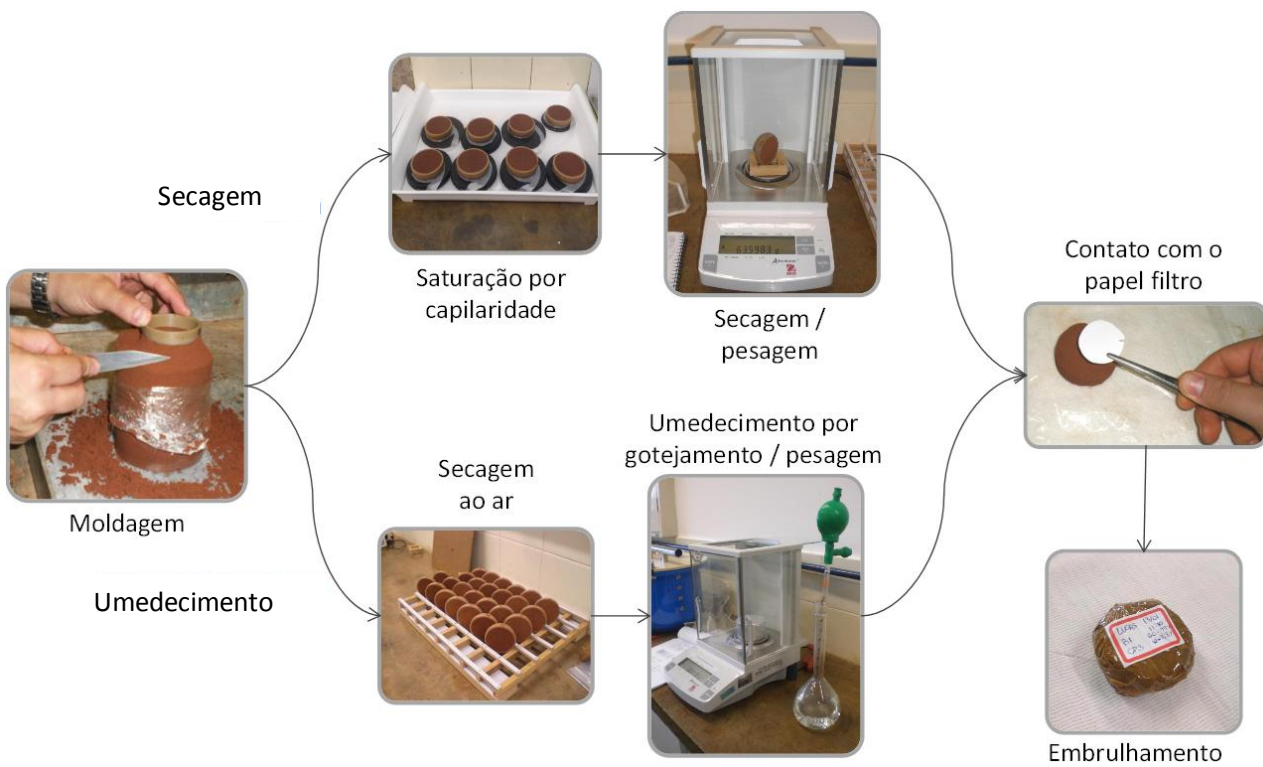


Figura 2 – Método do papel filtro (UNESP/Bauru).

Monitoramento da Umidade do Solo

Nesta pesquisa, campanhas de amostragem com coleta de solo até 7,75 m de profundidade foram realizadas para determinação da umidade. As campanhas ocorreram durante o período de junho de 2011 a outubro de 2012. Os ensaios foram dispostos em torno de pontos de referência e devidamente locados e o solo foi coletado por meio de um penetrômetro multi-função (Figura 3).



Figura 3 – Penetrômetro multi-função (UNESP/Bauru).

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

A área estudada situa-se na cidade de Bauru-SP, onde predominam na porção superior solos com elevada porosidade e baixo grau de saturação. 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), recobrendo as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral que afloram em direção ao vale do Rio Tietê.

Os solos superficiais são compostos por areia fina pouco argilosa de compactidade fofa a compacta, de coloração predominante marrom avermelhado. As curvas granulométricas do solo obtidas em água destilada e em solução defloculante à base de hexametáfosfato de sódio mostram que o solo possui finos em estado agregado. Trata-se de uma areia argilosa marrom, com 80% de areia, 6% de silte e 14% de argila (Figura 4).

Na Tabela 1 são mostradas as principais características do solo a 1 m de profundidade.

Tabela 1 – Índices físicos do solo a 1 m de profundidade.

Propriedades índice	Símbolo	Unidade	Valor
Umidade gravimétrica	w	(%)	5,46
Massa específica dos sólidos	ρ_s	(g/cm ³)	2,649
Massa específica do solo	ρ	(g/cm ³)	1,590
Massa específica seca	ρ_d	(g/cm ³)	1,508
Índice de Vazios	e	-	0,757
Porosidade	n	(%)	43,08
Grau de Saturação	S_r	(%)	19,11

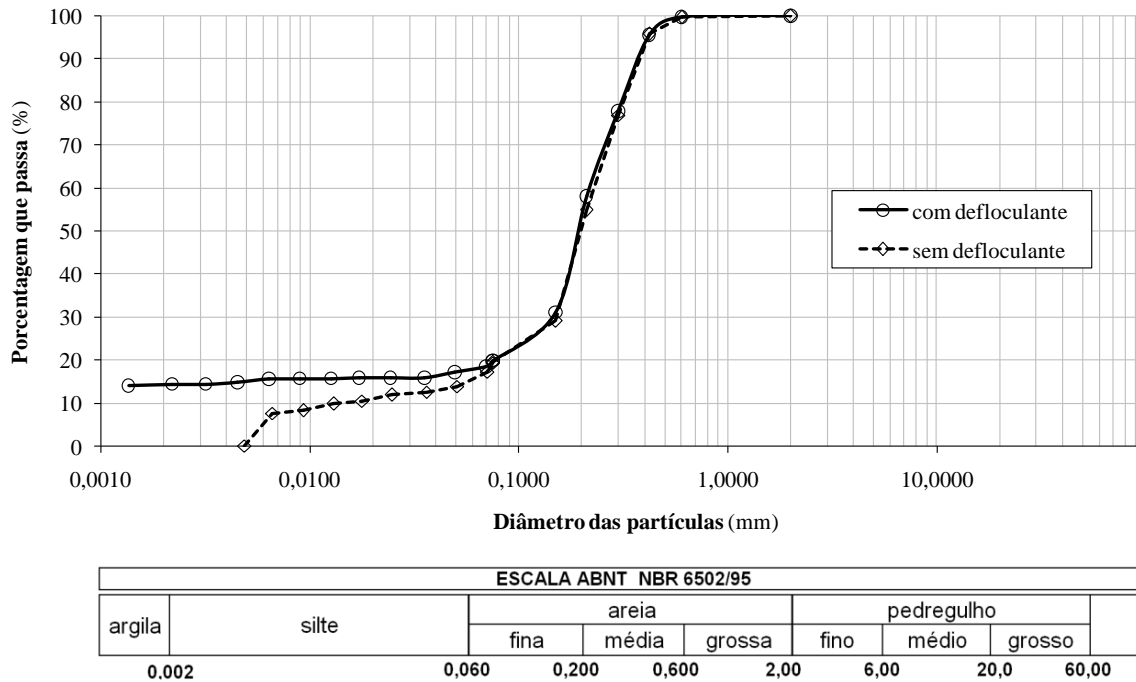


Figura 4 – Curvas granulométricas obtidas em ensaios com e sem o uso de defloculante.

Curva de retenção de água no solo

A Figura 5 mostra os resultados dos ensaios para determinação da curva de retenção de água no solo, juntamente com equação de Van Genuchten (1980) ajustada aos dados experimentais.

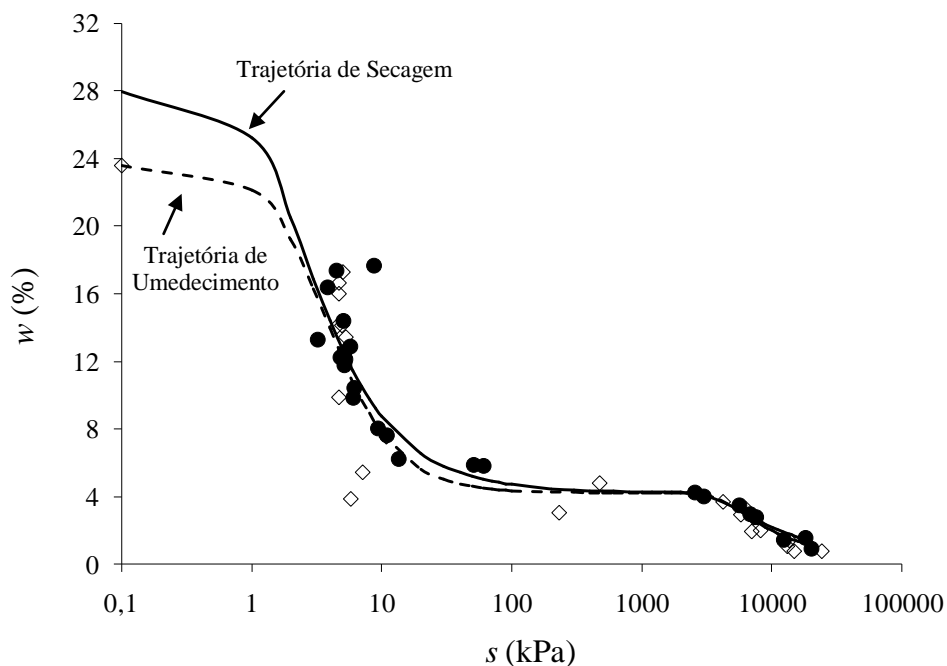


Figura 5 – Curvas de retenção de água ajustadas de acordo com a equação de Van Genuchten (1980).

A relação entre sucção e umidade do solo obtida pela curva de retenção de água no solo ou curva característica solo-água é apresentada neste trabalho com a sucção matricial no eixo das abscissas em escala logarítmica e a umidade gravimétrica no eixo das ordenadas em escala linear.

O intervalo de sucção medido pelo método de papel de filtro mostra uma curva de retenção típica dos solos arenosos com distribuição de poros bimodal. Observa-se também baixa capacidade de retenção de água, uma vez que grande parte da variação de umidade está associada a uma pequena variação de sucção, entre 1 e 20 kPa.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten (1980) que mostram coeficientes de ajuste acima de 0,86.

Tabela 2 – Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten (1980).

Ajuste	w_s (%)	w_r (%)	α (kPa ⁻¹)	m	n	r^2
1: secagem	28,2	4,2	0,5458	0,484	2,005	0,926
2: secagem	4,2	0,8	0,0002	0,524	2,506	0,937
1: umedecimento	23,6	4,3	0,3056	0,769	1,869	0,867
2: umedecimento	4,3	0,5	0,00018	0,635	2,835	0,918

Umidade de Campo e Dados Pluviométricos

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados dados pluviométricos e perfis de umidade gravimétrica obtidos de junho de 2011 a outubro de 2012. Os resultados das umidades foram determinados por horizontes, considerando como ponto de referência o centro da camada.

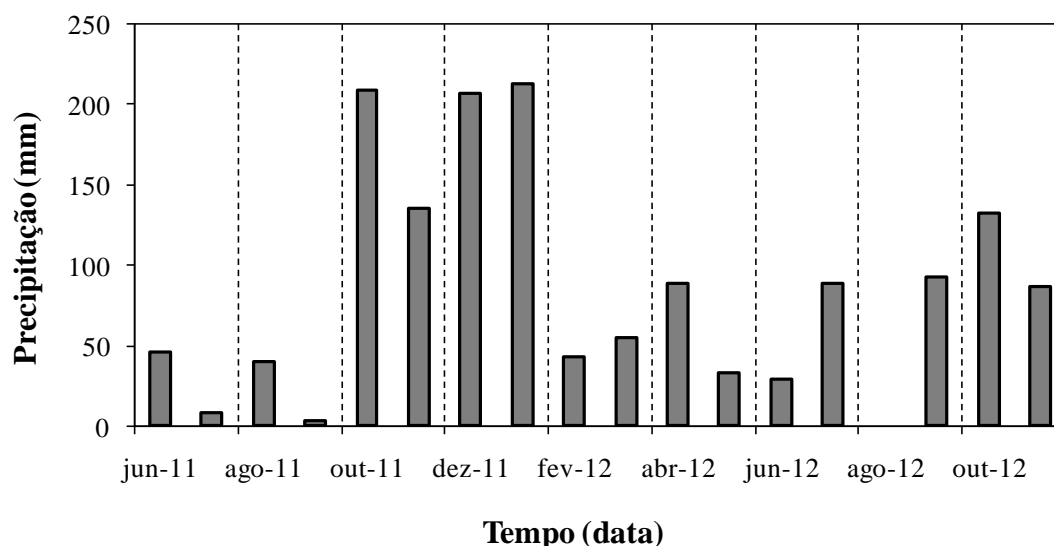


Figura 6 – Dados pluviométricos do período de estudo.

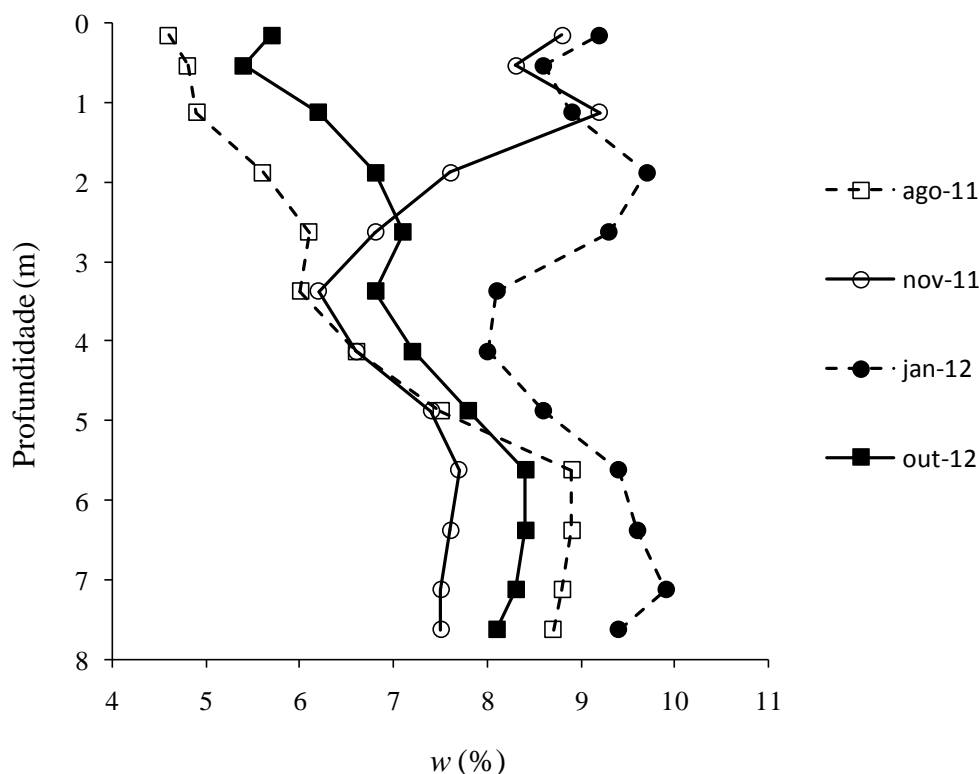


Figura 7 – Perfis de umidade do solo.

Como pode ser visto, a maior variação da umidade ocorre próximo à superfície do terreno, onde o solo interage com a atmosfera, e diminui com o aumento da profundidade. Os resultados mostram que a porção de solo, onde o perfil de umidade é influenciado pelas mudanças climáticas, tem em torno de 4,0 m de profundidade.

A variação da umidade limita-se a um intervalo que mantém o solo em condição não saturada ao longo do tempo com umidades, em geral, inferiores a 10%. Este comportamento, associado ao fato do solo possuir grandes vazios e baixa capacidade de retenção de água, pode explicar a razão pelo qual nos períodos mais úmidos não se têm sucções iguais a zero na superfície do terreno. Assim, o solo necessita de uma grande quantidade de água para ser saturado, pois para reduzir a sucção de 10 kPa para 0 kPa, por exemplo, é necessário aumentar a umidade de 10% para aproximadamente 25%, conforme pode ser visto na Figura 5.

Em relação à redistribuição de água no perfil do solo, nota-se que a umidade da curva nov-11 é elevada na superfície do terreno, devido ao início das chuvas na região. Já a curva jan-12 mostra que a umidade continua elevada próximo à superfície, e que a água percola mais profundamente no perfil devido à continuidade das precipitações no período. Já nas curvas ago-11 e out-12, as precipitações são menos intensas e a redistribuição é afetada pela evaporação.

Em geral, nota-se que a umidade varia consideravelmente ao longo da profundidade e do tempo. Blight (2003), Cui *et al.* (2008), Caruso e Jommi (2010), constatarem o mesmo comportamento.

Na região estudada grande parte do solo superficial quando é umedecido diminui a capacidade de carga, tornando inviável o uso de fundações que se apoiam nas camadas mais superficiais. Este comportamento tem afetado o desempenho de muitas construções assentes neste solo, especialmente o das edificações de pequeno e médio porte. Como a umidade do solo varia inversamente com a sucção e esta tem sido apontada como uma importante variável no estudo dos solos não saturados, seria de grande importância que dados contínuos de monitoramento de

umidade e de sucção fossem levantados em diferentes regiões cobertas por solos não saturados porosos para confirmação do comportamento relatado neste artigo.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa consistiu em um estudo de fluxo de água em solo não saturado poroso baseado em ensaios de retenção de água e monitoramentos da umidade no campo. Com base nas informações obtidas, a seguinte conclusão é delineada.

- As maiores variações da umidade ocorrem próximo à superfície do terreno, onde o solo interage com a atmosfera, e diminui com o aumento da profundidade.
- A variação da umidade limita-se a um intervalo que mantém o solo em condição não saturada ao longo do tempo com umidades inferiores a 10%. O fato de o solo possuir grandes vazios e baixa capacidade de retenção pode explicar a razão pelo qual nos períodos mais úmidos não se têm sucções iguais a zero ou o solo completamente saturado na superfície do terreno.
- Os resultados demonstram a necessidade de monitoramento contínuo da umidade e da sucção para fins geotécnicos, uma vez que na região estudada grande parte do solo superficial quando umedecido perde a capacidade de carga, tornando inviável o uso de fundações mais superficiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelas concessões das bolsas de Iniciação Científica (Processos 2011/11558-7 e 2012/00120-3) e do Projeto de Auxílio à Pesquisa (Processo 2011/09031-0).

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, 1987.
- BLIGHT, G.E. (1997). Interactions between the atmosphere and the Earth. *Géotechnique*, 47, no. 4, 715-767 (Rankine Lecture).
- BLIGHT, G.E. (2003). The vadose zone soil-water balance and transpiration rates of vegetation. *Géotechnique*, 53, no. 1, 55-64.
- CARUSO, M & JOMMI, C. (2010). A prototype soil column to calibrate numerical models accounting for soil-atmosphere interaction. In: Fifth International Conference on Unsaturated Soils, 2010, Barcelona/Spain. Proceedings of the Fifth International Conference on Unsaturated Soils. London: Taylor & Francis Group, 2010. p. 1121-1126.
- CUI, Y.J., LU, Y.F., DELAGE, P. & RIFFARD, M. (2005). Field simulation of *in situ* water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions. *Géotechnique*, 55, no. 7, 557-567.
- CUI, Y.J., TANG, A.M, MANTHO, A.T. & DE LAURE, E. (2008). Monitoring field soil suction using a miniature tensiometer. *Geotechnical Testing Journal*, 31, no. 1, 95-100.
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, p.892-898.