

Modelagem numérica da infiltração unidirecional em interfaces não saturadas solo-geotêxteis

Uilian da Rocha Albino

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, uilian.geotec@gmail.com

Julie Miyuki Kuahara

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, juliekuahara@gmail.com

Fernando Henrique Martins Portelinha

Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, fportelinha@ufscar.br

Marcos Massao Futai

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, futai@usp.br

RESUMO: Barreiras capilares desenvolvidas na interface não saturada solo-geossintéticos tem sido estudadas para diferentes aplicações. No entanto, este tipo de barreira pode ser quebrada a depender da sucção e do regime de infiltração. A sucção de quebra da barreira é dependente de diferentes fatores tais como a umidade inicial do solo, tipo de geotêxtil, configurações e outros. Portanto, não só o entendimento deste fenômeno, mas, principalmente, métodos e ferramentas para análises em projetos com uso de geossintéticos. Como ferramentas, pode-se sugerir o uso de métodos computacionais de fluxo. Com isso, este trabalho visa contribuir com o entendimento de barreiras capilares por meio de simulações numéricas de fluxo unidimensional com uso de programa computacional. Para isso, foi desenvolvido em laboratório um sistema de colunas de infiltração, com monitoramento de teor de umidade ao longo do tempo, que possibilita a verificação da barreira capilar e a calibração do modelo numérico de fluxo. A modelagem numérica da coluna de infiltração foi conduzida com o uso do programa computacional SEEP/GEOSTUDIO considerando as curvas de retenção de ambos os materiais determinadas por ensaios de laboratório (coluna suspensa e papel filtro) e a condição unidirecional de fluxo. Após calibração do modelo numérico, efetuou-se a parametrização das curvas de retenção do solo e do geotêxtil, buscando estudar as melhores condições de formação de barreira. Resultados mostraram uma boa concordância entre modelo experimental e numérico, além de coerentes resultados comparativos de barreiras capilares. Uma vez inseridas as curvas de retenção dos materiais, o contraste entre as duas formas das curvas de retenção do solo e geotêxtil foram devidamente captadas pelo programa computacional e a barreira capilar foi evidenciada.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Numérica; Muro de Contenção, Geotêxtil, Não-Saturado.

1 INTRODUÇÃO

As barreiras capilares são utilizadas para bloqueio do fluxo de água e são formadas na interface entre dois materiais de diferentes porosidades e permeabilidades em condições não saturadas, tais como interfaces entre solos de diferentes porosidades, ou em interfaces entre solos e geotêxteis. Os geotêxteis, embora não se

caracterizem como materiais particulados, apresentam uma matriz porosa, desde que estes apresentem comportamento de retenção de água semelhante aos materiais granulares. O fenômeno de formação de barreiras capilares tem sido sugerido para compor sistemas alternativos de baixo custo para diferentes finalidades de engenharia, tais como para camada de cobertura de aterros sanitários e mineração, drenagem de

estruturas de pavimentos e outros. No entanto, muitas vezes, a barreira capilar é estudada no intuito de evitá-la, como é o caso de filtros de geotêxteis em drenagem.

Estas barreiras naturais são formadas quando a permeabilidade do geotêxtil se torna menor que a permeabilidade do solo, para um determinado nível de sucção, promovendo uma restrição temporária da infiltração (Zornberg et al. 2010). A quebra da barreira capilar e posterior retomada do avanço da frente de infiltração é alcançada quando o efeito do umedecimento reduz a sucção a um valor em que as permeabilidades dos materiais se tornam iguais (Stormont e Anderson, 1999; Rowe and Iryo, 2005). Este valor de sucção é dependente do formato da curva de retenção de água do material granular.

Embora a formação de barreira capilar em interfaces solo-geotêxteis tenha sido intensamente relatada na literatura (Zornberg et al. 2010), poucos são os estudos que simulam numericamente a formação de barreiras capilares neste tipo de interface não saturada (Rowe and Iryo 2005), o que possibilita o entendimento deste fenômeno frente diferentes variáveis.

Thoug et. al. (2015) realizou a simulação numérica de uma coluna de infiltração ensaiada por McCartney e Zornberg (2010) para validação de modelos que utilizam a formulação de fluxo transiente bi-dimensional em meio não saturado derivada por Richards (1931) e da equação da continuidade, cuja solução é apresentada na Equação (1) abaixo.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

Onde k_x e k_y representam a permeabilidade nas direções x e y, e h representa a carga total disponível para fluxo.

Após confirmar que com a formulação de Richards (1931) é possível capturar a formação da barreira capilar e simular o fluxo com resultados satisfatórios, Thou et. al. (2015) realizaram simulações de infiltração em taludes reforçados com geotêxtil não tecido envolvido por uma camada de areia. Os autores concluíram que o material arenoso envolto do geotêxtil reduziu significativamente a formação da barreira capilar.

Rowe and Iryo (2005) utilizaram-se de uma

ferramenta de simulação numérica, no intuito de analisar o comportamento de taludes reforçados com geotêxteis não tecidos, em condições não saturadas, quando submetidos à infiltração. Além disso, os autores também analisaram o comportamento do mesmo talude para diferentes configurações do geotêxtil (espaçamento e quantidade). Ao fim do estudo, foi concluído que geotêxteis retardam o fluxo de água quando a poro pressão excede o limite para o qual o geotêxtil é menos permeável que o solo.

O artigo consistiu em simular numericamente a infiltração baseadas no método de elementos finitos, na busca de capturar a formação de barreira capilar em interfaces solo-geotêxteis. A modelagem baseou-se no comportamento hidráulico de uma coluna de infiltração. A pesquisa objetivou também identificar o efeito do tipo de geotêxtil não tecido na formação da barreira capilar. Para isso foram realizadas 5 simulações, sendo uma a calibração da coluna de infiltração de laboratório, e outras três com o uso de geotêxteis não tecidos com gramaturas de 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m². E por fim uma quinta simulação da infiltração em camadas estratificadas de solo e geotêxteis, no intuito de simular a infiltração em uma estrutura de solo reforçado.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

O solo utilizado na execução da coluna de infiltração consiste em uma areia argilosa de condutividade hidráulica saturada de 1,4x10⁻⁴ cm/s. A Tabela 1 resume as propriedades características do solo.

Tabela 1. Propriedades do solo.

Propriedades	Normas	Valores
Argila (%)		34
Silte (%)	NBR7181	4
Areia (%)		62
δ (kN/m ³)	NBR 6508	26,6
LL (%)	NBR 6459	30,3
IP (%)		9,6
γ _s ^{máx} (kN/m ³)	NBR 7182	18,7
h _{ótima} (%)		14,4

Para a execução das colunas em laboratório foi utilizado um geotêxtil não tecido agulhado de

filamentos curto de poliéster. Para a caracterização dos materiais foram realizados ensaios de gramatura (NBR 12568, 2003), espessura (NBR 12569, 2003), permissividade (ASTM D4491, 2009) e abertura de filtração (AFNOR G38017, 1983). As propriedades características dos geotêxteis são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades do geotêxtil não tecido.

Propriedades	Unidade	Normas	Valores
Gramatura	(g/m ²)	NBR 12568	300
Espessura nominal	(mm)	NBR 12569	2,69
Permissividade	(s ⁻¹)	ASTM D 4491	1,96
Abertura de filtração	(μm)	AFNOR G 38017	93

As curvas de retenção e de condutividade hidráulica do solo são apresentadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente. A curva de retenção foi obtida com o uso das técnicas de papel filtro e colunas suspensas, conforme a ASTM 5298-10.

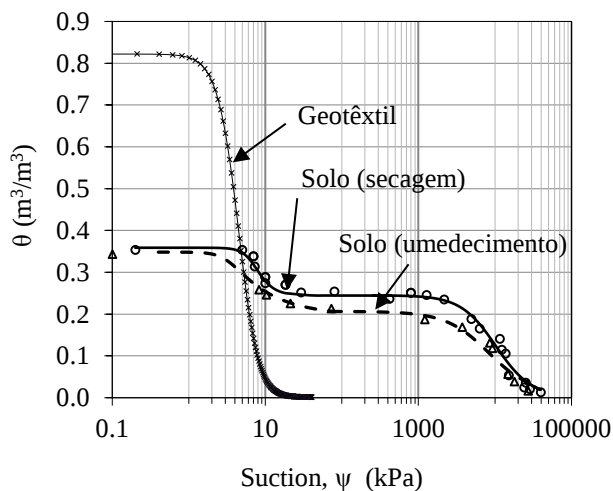


Figura 1. Curva de umidade volumétrica do solo e do geotêxtil não tecido.

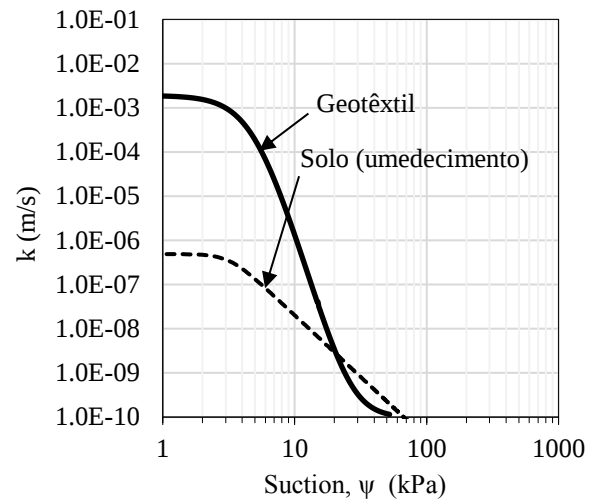


Figura 2. Curva de condutividade hidráulica do solo e do geotêxtil não tecido.

Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de van Genuchten, enquanto a curva de condutividade hidráulica foi obtida com o uso do modelo de van Genuchten Mualen. As curvas apresentadas na Figura 1 foram obtidas por processos de umedecimento e secagem do solo.

Os parâmetros associados às curvas de retenção hidráulica apresentadas na Figura 1, estão resumidos na tabela abaixo.

Tabela 3. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água do solo e do geotêxtil.

Processo	Sucção (kPa)	Parâmetros do modelo de van Genuchten			
		θ_r	θ_s	α (kPa ⁻¹)	n
Umedecimento	<200	0,2560	0,375	0,1400	4,740
Umedecimento	>200	0,0220	0,256	0,0001	2,630
Secagem	<200	0,2150	0,350	0,3130	5,300
Secagem	>200	0,0183	0,215	0,0001	1,796
Geotextil (300 g/m ²)		0,0010	0,820	0,2000	3,000

2.2 Ensaio de infiltração 1D

O ensaio de coluna, com layout apresentado na Figura 3, consistiu no monitoramento das alterações nas leituras de umidade volumétrica ao longo da altura da coluna durante o avanço de umedecimento da água. Estes ensaios foram conduzidos por Portelinha e Trovatto (2014).

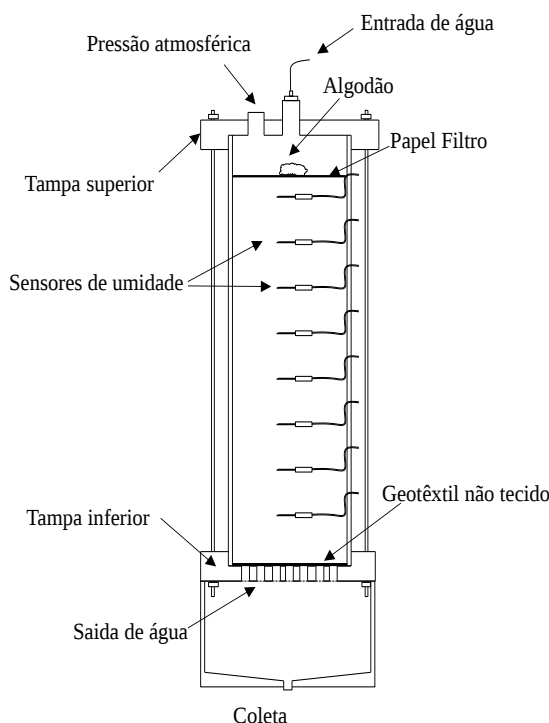


Figura 3. Layout do ensaio de coluna (Portelinha e Trovatto, 2014).

Segundo Portelinha e Trovatto (2014), para evitar a formação de lâmina de água e carga hidráulica, a vazão da água de entrada deve proporcionar uma taxa de avanço da água menor que a permeabilidade saturada do solo. Neste experimento, a taxa de avanço foi de 1×10^{-4} cm/s, 1,4 vezes menor que a permeabilidade do solo saturado. A coluna foi moldada com grau de compactação (GC) de 90% em relação ao peso específico seco máximo do ensaio de Proctor de Energia Normal e no teor de umidade ótimo de compactação (Portelinha e Trovatto, 2014).

3 MODELAGEM NUMÉRICA

3.1 Calibração do modelo numérico

As análises numéricas foram realizadas com uso do software SEEP/W (Geo-Slope 2007) baseado em elementos finitos. O programa resolve a equação (1) de fluxo transiente bi-dimensional em meio não saturado derivada por Richards (1931) da Lei de Darcy e da equação da continuidade.

A partir dos resultados dos ensaios físicos notou-se que a umidade volumétrica inicial é de aproximadamente 21% que corresponde a uma sucção inicial de aproximadamente 38 kPa.

A coluna foi modelada utilizando 2435 nós com elementos retangulares de 0,01 m de altura global e espessura de 0,002 m nas proximidades do geotêxtil.

A infiltração foi simulada com fluxo unitário de $q=1 \times 10^{-6}$ m/s na parte superior, zero fluxo horizontal e $q=0$ m/s na parte inferior da coluna. A partir do momento que a poro pressão passou a ser positiva em qualquer um dos nós da superfície inferior, as condições de contorno da superfície inferior foram alteradas para carga total igual a zero.

3.2 Simulações numéricas

Após a modelagem da coluna de infiltração de laboratório, avaliou-se o efeito da porosidade do geotêxtil na formação de barreiras capilares. O parâmetro adotado para avaliação da formação das barreiras capilares foram as curvas de retenção de água e condutividade hidráulica de geotêxteis de diferentes gramaturas.

Os geotêxteis utilizados foram aqueles caracterizados no trabalho de Lima (2014). Na Tabela 4 são mostrados alguns parâmetros destes geotêxteis, enquanto as curvas de retenção de água são apresentadas na Figura 4. Na Figura 5 são mostradas as curvas de condutividade hidráulica dos geotêxteis.

Tabela 4. Propriedades do geotêxtil não tecido (Lima, 2014).

Nomenclatura	Gramatura (g/m ²)	d _f (mm)	k _{sat} (m/s)
G1	200	0,027	0,4
G2	300	0,027	0,4
G3	400	0,027	0,4

Os parâmetros das curvas de retenção de água apresentadas na Figura 4, estão resumidos na tabela abaixo.

Tabela 5. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água do geotêxtil. (Lima, 2014)

Geotextil	Parâmetros do modelo de van Genuchten			
	θ_r	θ_s	α (kPa ⁻¹)	n
G1 (200 g/m ²)	0,002	0,823	0,9091	6,0
G2 (300 g/m ²)	0,012	0,887	0,8330	3,7
G3 (400 g/m ²)	0,013	0,887	0,6500	7,0

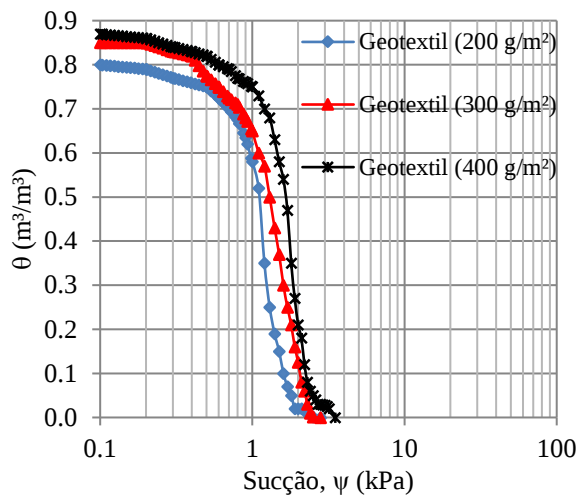


Figura 4. Curva de umidade volumétrica dos geotêxteis não tecidos estudados (Adaptado de Lima, 2014).

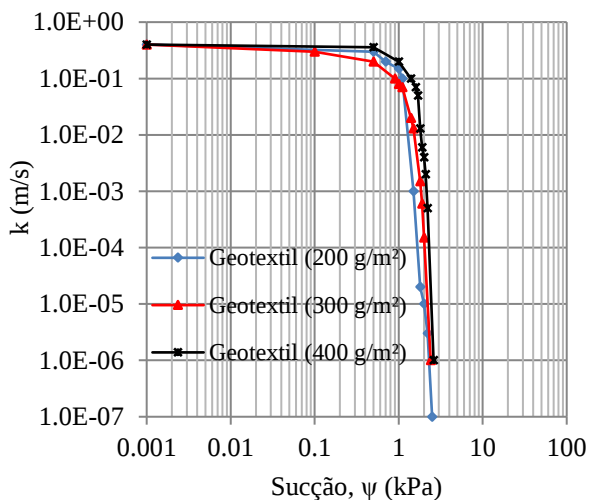


Figura 5. Curva de condutividade hidráulica do geotêxtil não tecido de 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m² (Adaptado de Lima, 2014)

4 RESULTADOS

4.1 Calibração do modelo numérico

Na Figura 6 são comparados os avanços dos valores de umidade volumétrica no tempo de duração do ensaio de laboratório e da simulação numérica. Na Figura 7 são comparados os avanços da umidade volumétrica ao longo da profundidade da coluna de infiltração.

De modo geral, os resultados da simulação apresentados na Figura 6 se mostraram bem condizentes com as medições realizadas durante o ensaio de laboratório com diferença máxima de aproximadamente 3% da curva medida para a curva prevista pela simulação.

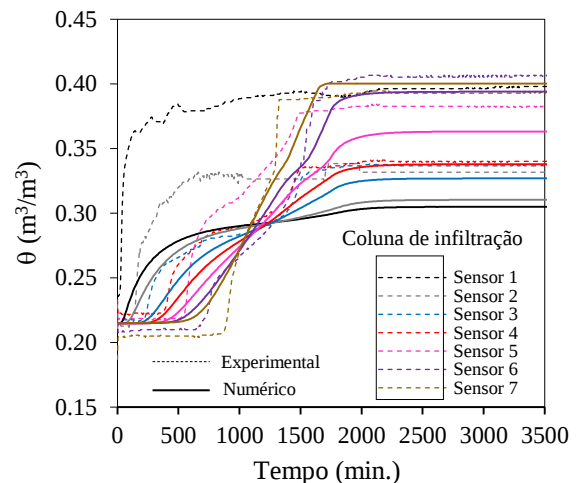


Figura 6. Comparação da umidade volumétrica medida em ensaio e prevista pela simulação ao longo do tempo.

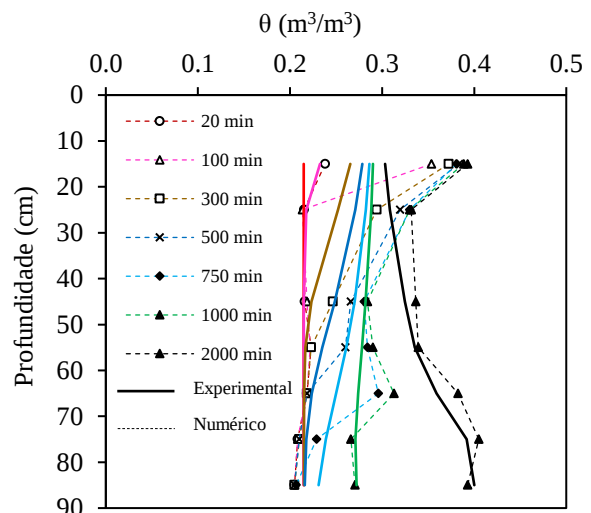


Figura 7. Comparação da umidade volumétrica medida em ensaio e prevista pela simulação ao longo da profundidade da coluna.

No entanto, os resultados dos sensores 1 e 2 do ensaio foram totalmente diferentes dos valores obtidos pela simulação. Tal diferença denota que pode ter havido problemas nas leituras dos sensores durante o ensaio, ou, houve o acúmulo de água nas proximidades do sensor provocando tais leituras.

Da mesma forma que para a Figura 6, na Figura 7 os pontos próximos aos sensores 1 (profundidade de 15 cm) e o sensor 2 (profundidade 25 cm) do ensaio físico apresentaram valores bem diferentes da simulação.

4.2 Efeito da capacidade de retenção de geotêxteis

Na Figura 8 serão apresentadas as comparações entre os geotêxteis de diferentes propriedades de retenção de água sendo: (a) gramatura 200 g/m², (b) 300 g/m² e (c) 400 g/m².

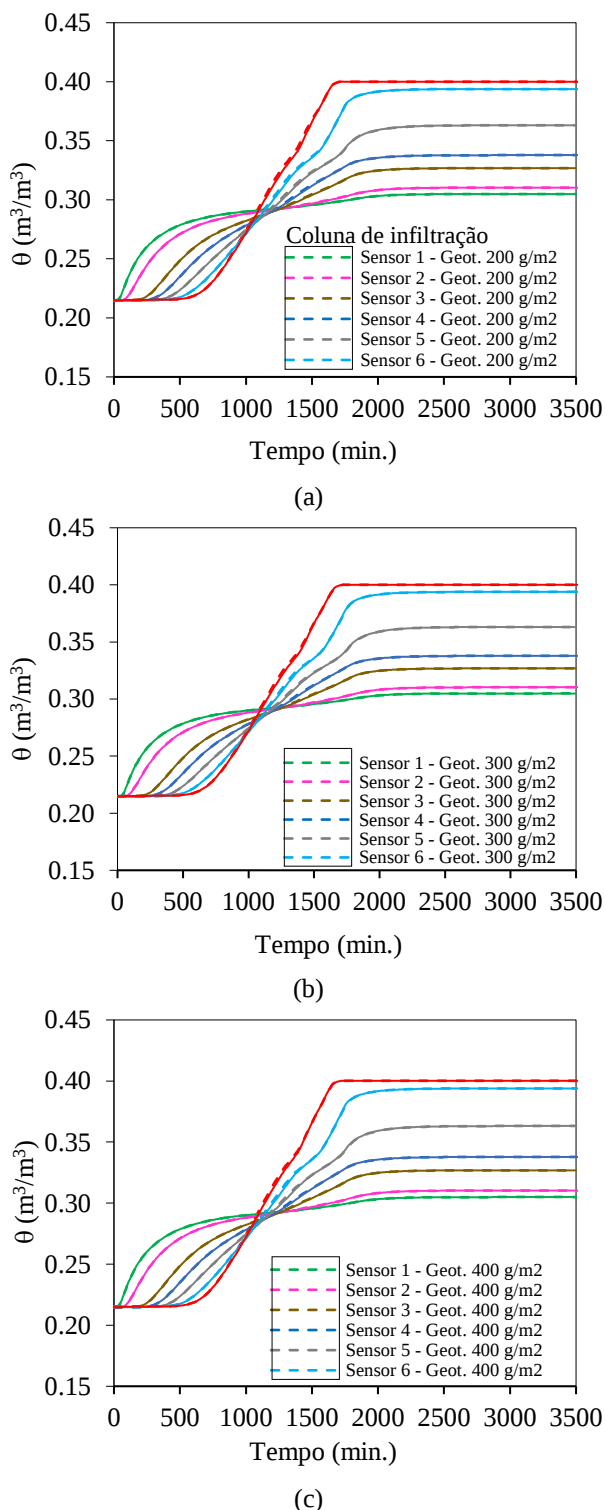


Figura 8. Avanço do umedecimento com o tempo para interfaces com geotêxteis: (a) 200 g/m²; (b) 300 g/m² e (c) 400 g/m².

Os resultados mostram que não houve diferença significativa na formação da barreira capilar entre os geotêxteis avaliados.

4.3 Coluna de infiltração com estratificação de geotêxteis

Nesta simulação foram adotados os mesmos parâmetros que foram utilizados na modelagem do ensaio físico. No entanto, foram acrescentadas mais duas camadas de geotêxtil não tecido de forma que houvesse um espaçamento de 30 cm entre geotêxteis. Essa configuração visou simular uma condição comum em estruturas de solo reforçado com geossintéticos. A estratificação modelada é apresentada na Figura 9.

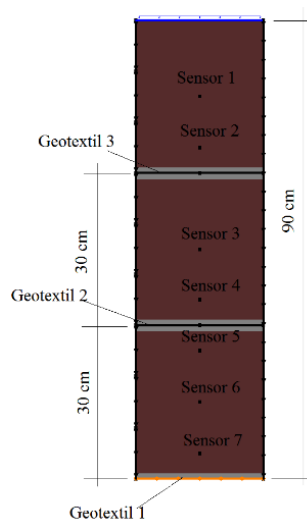


Figura 9. Coluna de infiltração modelada com três geotêxteis espaçados a cada 30 cm.

Os resultados da simulação serão apresentados de forma comparativa com os resultados da simulação anterior, a fim de avaliar se a presença de mais camadas de geossintético influencia no avanço da umidade volumétrica ao longo do tempo, como também se afeta o avanço da umidade volumétrica ao longo da profundidade da coluna.

Como pode ser visto na Figura 10 não houve diferença significativa no avanço da umidade volumétrica para uma situação onde existe mais de uma camada de geotêxtil.

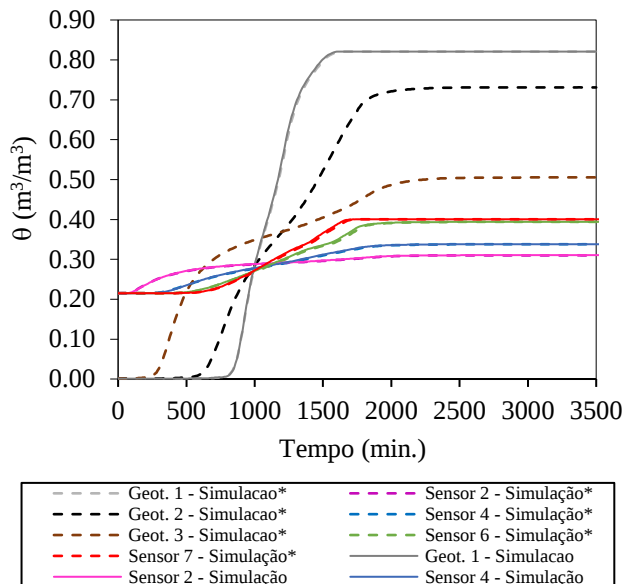


Figura 10. Comparação da umidade volumétrica ao longo do tempo para uma coluna com apenas um geotêxtil na superfície inferior (simulação) e uma coluna com camadas estratificadas de geotêxtil (Simulação*).

No entanto, os geotêxteis que foram adicionados (Geot. 2 e Geot. 3) apresentaram umidade final superior ao sensor 7 que se encontra 5 cm acima do geotêxtil instalado na face inferior da coluna. Também foi notado que houveram dois estágios durante o aumento da umidade volumétrica do Geotextil 3. Um deles entre 600 e 1200 minutos e outro de 1200 a 2100 minutos quando começou a estabilizar. O primeiro acúmulo deve-se a formação da barreira capilar acima do próprio geotêxtil (Geot. 3) e o segundo estágio deve-se a barreira capilar formada acima do Geot. 2.

O geotêxtil situado na face inferior da coluna se comportou de maneira idêntica à quando a coluna foi simulada segundo o ensaio físico.

Na Figura 11 é apresentado o avanço da umidade volumétrica ao longo da profundidade da coluna. Note que neste caso a umidade volumétrica das camadas de geossintético só são alteradas a partir do momento que a poro pressão se torna próxima de um valor positivo.

Como pode ser visto na Figura 11 nas profundidades de 30 cm (Geot. 3) e 60 cm (Geot. 2) ocorrem variações consideráveis na umidade volumétrica em relação a pontos acima e abaixo destes. Isto ocorre pela baixa permeabilidade do geotêxtil quando submetido a sucção. Além disso, a formação da barreira capilar provoca o acúmulo de água acima do geotêxtil, que

consequentemente tende a aumentar a poro pressão acima deste e também a umidade volumétrica.

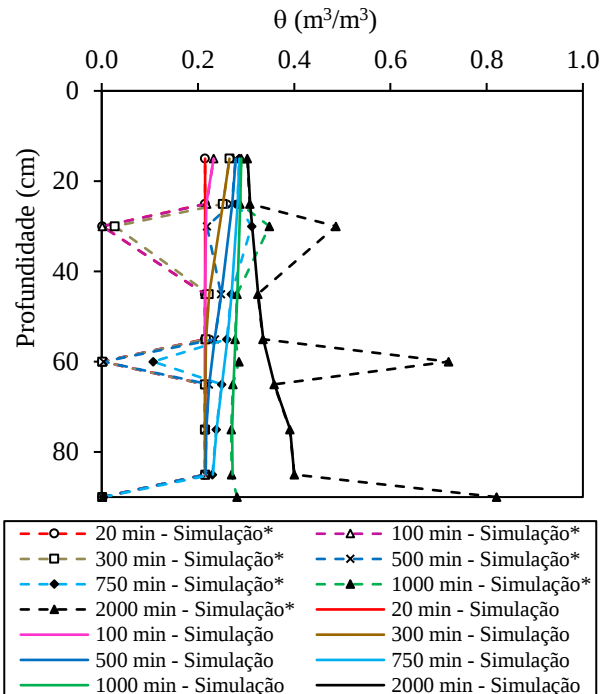


Figura 11. Avanço da umidade ao longo da profundidade para uma coluna com apenas um geotêxtil na superfície inferior (Simulação) e para a coluna estratificada (Simulação*).

5 CONCLUSÃO

Análises numéricas foram conduzidas com o intuito de avaliar a eficiência de modelos numéricos no comportamento de solos não saturados com geotêxteis não tecidos. Para isto foram realizadas 5 análises, onde uma foi a reprodução de um ensaio físico, passando a ser considerada a análise de referência. As demais análises tiveram o objetivo de identificar o comportamento de diferentes configurações da coluna de infiltração, onde foram acrescentadas camadas de geotêxtil não tecido ou alterado o tipo de geotêxtil não tecido utilizado. As conclusões obtidas são apresentadas abaixo.

- As análises numéricas através do Software SEEP/W (Geoslope 2007) se mostraram bem consistentes com os resultados do ensaio físico. Com exceção dos sensores 1 e 2, os demais apresentaram resultados bem similares com diferença máxima da ordem de 3%.
- Os resultados da análise da coluna, para

geotêxteis com diferentes gramaturas utilizadas neste estudo, mostrou que o tipo de geotêxtil usado pouco influência na formação e permanência da barreira capilar. Desde que as curvas de condutividade hidráulica dos diferentes geotêxteis sejam próximas, como as utilizadas neste estudo. Portanto, a formação e permanência da barreira capilar é mais dependente da umidade inicial do solo que está diretamente ligada a sucção inicial, conforme evidenciado por Portelinha e Trovato (2014) ao realizar uma série de ensaios para diferentes níveis de umidade. Os autores perceberam que a umidade inicial tem grande influência no tempo de armazenamento de água e também no tempo para quebra da barreira capilar.

- A simulação da coluna com camadas de geotêxtil espaçadas a cada 30 cm não apresentou diferença de comportamento quanto ao avanço da umidade volumétrica pelo tempo em relação ao ensaio físico. No entanto, as camadas de geotêxtil adicionais (Geot. 2 e Geot. 3), ao fim da simulação, possuíam uma umidade volumétrica bem acima do solo em seu entorno. Além disso, é evidente que o Geotêxtil 3 apresentou dois estágios de aumento da umidade volumétrica, o primeiro entre 600 e 1200 minutos e outro de 1200 a 2100 minutos quando começou a estabilizar. O primeiro acúmulo deve-se a formação da barreira capilar acima do próprio geotêxtil (Geot. 3) e o segundo estágio deve-se a barreira capilar formada acima do Geot. 2.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984a). NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 6 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984b). NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984a). NBR 7181/84: Solo – Análise Granulométrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984d). NBR 6508/84: Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986b). NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação. Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12568/1992: Geotêxteis – Determinação da Gramatura, Rio de Janeiro, 1992, 2p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12569/1992: Geotêxteis – Determinação da Espessura, Rio de Janeiro, 1992, 2p.
- ASTM 4491 (2009). Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity. American Society of Testing Materials, p. 6.
- AFNOR G38-017 (1986). FOS from hydrodynamic sieving. French committee on geotextiles, p. 10.
- Lima, M.J. (2014). Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. Tese de Doutorado, Publicação GTD - 095/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.
- McCartney, J and Zornberg, J. G. (2010). Effects of infiltration and evaporation on geosynthetic capillary barrier performance. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, p. 1201-1213.
- Portelinha, F. H., e Trovato, A. (2014). Avaliação de barreira capilar em interface não saturada solo-geossintético. *Cobramseg*.
- Rowe, R. K., and Iryo, T. (2005). Infiltration into an embankment reinforced by nonwoven geotextiles. *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 1145-1159.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1: 318-333.
- Stormont, J.C. e Anderson, C.E. (1999). Capillary Barrier effect from underlying coarser soil layer, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, p. 641-648.
- Thou, J. N., Yang, K. H. and Huang, C. C. (2015). Infiltration into unsaturated reinforced slopes with nonwoven geotextile drains sandwiched in sand layers. *Geosynthetics International*, 22, No. 6, 457-474. [<http://dx.doi.org/10.1680/jgein.15.00026>]
- Zornberg, J. G.; Bouazza, A., McCartney, J. S. (2010). Geosynthetic capillary barriers: current state of knowledge. *Geosynthetics International*, Vol. 17, p. 273-300.