

Caracterização microestrutural de um perfil de solo não saturado em conjunto com sensores de umidade na Baixada Santista - SP

João Vitor Almeida Leite

Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, jva.leite@unesp.br

Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Professora Assistente Doutora, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, mariana.motta@unesp.br

Jhonathan dos Santos Pacheco

Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, jhonathan.santos@unesp.br

Vinícius Samahá Salles

Aluno do curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, vinicius.samaha@unesp.br

Márcio Roberto Magalhães de Andrade

Pesquisador, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil, marcio.andrade@cemaden.gov.br

Daniel Metodiev

Bolsista, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil, daniel.metodiev@cemaden.gov.br

RESUMO: Nos dias atuais, devido ao um crescente número de ocorrências de deslizamentos de terra em diversas regiões do país, ganham importância os estudos geotécnicos para a compreensão da dinâmica da água no solo. Muitas pessoas habitam áreas de risco, como encostas íngremes, como na Baixada Santista-SP, sujeitas a deslizamentos durante chuvas. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo a caracterização microestrutural de um perfil de solo não saturado no município de Guarujá - SP, monitorado pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), de modo a auxiliar na determinação de faixas de umidade de risco, garantindo assim maior refinamento nas emissões de alerta. A microestrutura do solo foi avaliada a partir do ensaio de Porosimetria por Injeção de Mercúrio (MIP), obtendo-se a distribuição dos poros e a estimativa da curva de retenção de umidade. Os horizontes foram classificados, em geral, como arenosos, variando a porcentagem de finos ao longo da profundidade, o que impactou na microporosidade dos materiais. Verificou-se que a região mais superficial apresenta característica bimodal, com presença de microporos em maior quantidade. Entretanto, com a profundidade, o material tornou-se unimodal, com presença significativa de macroporos.

PALAVRAS-CHAVE: Deslizamentos, Solos não saturados, Microestrutura, Porosimetria por Injeção de Mercúrio, Curva de retenção.

ABSTRACT: In the present day, due to an increasing number of occurrences of landslides in various regions of the country, geotechnical studies for understanding the dynamics of water in the soil have gained importance. Many people inhabit risk areas, such as steep slopes, like in Baixada Santista-SP, which are subject to landslides during rain. In this context, the present study focus the microstructural characterization of an unsaturated soil profile in the municipality of Guarujá - SP, monitored by CEMADEN (National Center for Monitoring and Natural Disaster Alerts), in order to assist in determining risk humidity ranges, thus ensuring greater refinement in alert emissions. The soil microstructure was evaluated from the Mercury Injection Porosimetry (MIP) test, obtaining the pore distribution and the estimate of the moisture retention curve. From the results, the horizons were generally classified as sandy, varying the percentage of fines along the depth, which impacted the microporosity of the materials. It was found that the most superficial region presents a bimodal characteristic, with the presence of micropores, in greater quantity, and macropores. However, with depth, the material became unimodal with a significant presence of macropores.

KEYWORDS: Landslides, Unsaturated Soils, Microstructure, Mercury Injection Porosimetry, Retention Curve.

1 INTRODUÇÃO

A compreensão das características de um solo não saturado é fundamental para a análise da possibilidade de deslizamentos de terra em áreas de risco. Camapum (2005) afirma que no Brasil, os solos frequentemente estão na condição não saturada, com a oscilação do teor de umidade devido às condições climáticas instáveis. Esse processo de secagem e umedecimento, para Motta (2016), acarretam mudanças na resistência do solo, influenciando, por exemplo, na estabilidade de taludes, colocando a população que ocupa as encostas em perigo. Isso é explicado uma vez que a infiltração de água reduz a sucção do solo, fazendo com que a resistência diminua devido à redução da coesão aparente do material. A Região Metropolitana da Baixada Santista, em São Paulo, combina esse cenário com fatores topográficos e geológicos, resultando em uma extensa lista de ocorrências de deslizamentos de terra.

Devido à sua complexidade, é importante a compreensão aprofundada sobre solos tropicais, uma vez que estão presentes em muitos problemas geotécnicos. De acordo com Marinho (2005), os solos não saturados são caracterizados por um sistema multifásico, composto por fase sólida, líquida e gasosa. A fase gasosa – formada pelo ar livre – presente nos poros, é resultado da sucção na estrutura do solo, modificando seu comportamento mecânico e hidráulico. A combinação dos efeitos de capilaridade, de adsorção e de osmose compõe essa sucção em solos não saturados. Ela pode ser dividida em matricial – advinda das forças de adsorção e de capilaridade – e osmótica – originada da força osmótica. A sucção total, portanto, é a soma das duas parcelas supracitadas. É possível entender também a sucção como sendo a energia necessária para desprender a água adsorvida às partículas sólidas (Lee e Wray, 1995). A sucção mátrica é fortemente influenciada pelo contexto onde o solo é encontrado, pois as mudanças nas condições climáticas podem provocar flutuações na pressão dos poros, resultando na modificação da sucção. A capacidade de ajustar a sucção capilar diante dessas variações é denominada permeabilidade (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Para entender o comportamento dos solos não saturados, uma das principais relações constitutivas usadas é a sua curva de retenção. Pode ser expressa por diferentes relações, apresentando formatos diferentes utilizando umidade gravimétrica, grau de saturação, sucção matricial ou sucção total (Gitirana Junior, Marinho e Soto, 2023). Ela permite determinar as principais propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo não saturado. A curva expressa a relação entre a quantidade de água retida no solo e a sucção do solo pode expressar aspectos associados à natureza e ao estado do solo. Nesse sentido, os autores também relacionam a granulometria do material com a facilidade de drenagem de água.

A granulometria está fortemente ligada a porosidade. A literatura menciona que os solos possuem famílias predominantes dependendo de suas características, sendo unimodais, com uma única concentração de tamanho de poros, bimodais, duas concentrações, entre outros que não são o foco de análise. Segundo Farias *et al.* (2011), solos que sofreram intensamente o processo de intemperismo, formados em regiões tropicais, apresentam microporos em seu interior e macroporos entre eles. Então, é fato que a sucção tem uma variação significativa com as mudanças na porosidade e diminui com o aumento da porosidade (Liu *et al.*, 2020). Ademais, de acordo com Romero & Simms (2009), algumas propriedades macroscópicas do solo são evidenciadas com a observação microestrutural do mesmo – tamanho, forma, distribuição e conectividade dos poros, arranjo e contato entre partículas.

Investigações microestruturais contribuem para entender o comportamento do solo. A Porosimetria por Injeção de Mercúrio fornece uma distribuição de tamanho de poro que pode ser usada para estimar a curva de retenção. Alguns autores estudam as relações presentes entre as curvas características e a distribuição dos poros, como por exemplo, Delcourt *et al.* (2022) e Mendes e Marinho (2020), fazendo ainda a correlação desses parâmetros com o intemperismo e a mineralogia da região.

Por esses motivos, o presente artigo busca analisar um horizonte de solo existente na região da Serra do Guararu, monitorado em uma Plataforma de Coleta de Dados – PCD Geotécnica (pluviômetro e sondas com 6 sensores de umidade do solo em cada), uma das 15 instaladas pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) no programa REDEGEO. Para isso, o estudo tem como objetivo caracterizar o comportamento microestrutural desse perfil de solo, a partir da análise de amostras deformadas e indeformadas e seus ensaios, principalmente a Porosimetria por Injeção de Mercúrio (MIP) e correlacionar com a curva de retenção estimada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Perfil de Solo Estudado

O solo utilizado nos ensaios foi coletado no município de Guarujá-SP, sendo as amostras deformadas e indeformadas retiradas ao longo da profundidade em um talude no Condomínio “Jardim Albamar”. Para ambas, adotou-se como ponto de origem o horizonte onde estava instalado o sensor de umidade (Figura 1d). Na data de instalação da sonda, foram coletadas seis amostras deformadas, com o auxílio de um trado, mas para esse estudo, optou-se por analisar três, correspondentes às faixas de profundidade entre 0,2m a 0,7m, entre 1,3m a 1,8m, e entre 2,8m a 3,3m, a fim de realizar a caracterização granulométrica conforme a NBR 7181 (2016) (Tabela 1) juntamente com o ensaio de densidade dos grãos, seguindo a NBR 6458 (2016), pois esses intervalos demonstraram diferenças relevantes na análise tátil-visual. Ainda, nas amostras deformadas, foram realizados os ensaios dos Limites de Atterberg do solo, de acordo com a NBR 6459 (2016).

A Figura 1a ilustra a classificação tátil-visual realizada no momento da instalação. Em relação às amostras indeformadas, destinadas ao ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio (MIP) e determinação dos índices físicos, foram retiradas nas seguintes profundidades: +0,5 m, 0 m, -0,5 m e -2 m (Figura 1b e Figura 1c).

A caracterização física dos solos, apresentada na Tabela 1, Tabela 2 e na Tabela 3, demonstra que o perfil é tipicamente arenoso, porém com frações de material fino variando ao longo da profundidade, indo de areia argilosa para silte de baixa plasticidade e, por fim, areia silteosa.

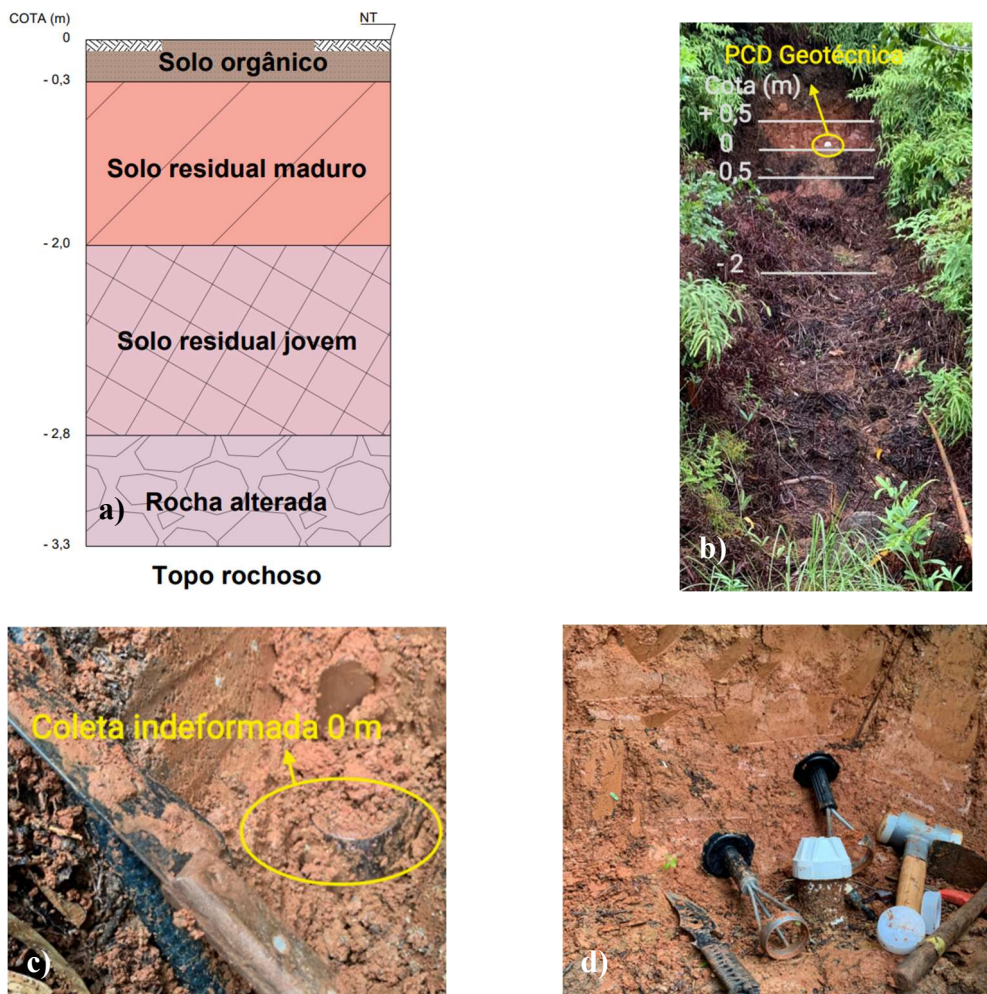


Figura 1. Perfil de solo estudado. a) Representação tátil-visual. b) Perfil de solo com as marcações de coleta de amostras indeformadas. c) Coletagem de amostra. d) Local de instalação da PCD Geotécnica.

Tabela 1. Análise granulométrica dos horizontes estudados.

Fração	0,2 – 0,7 m (%)	1,3 – 1,8 m (%)	2,8 – 3,3 m (%)
Pedregulho	1,1	0,38	1,1
Areia grossa	16,8	13,6	24,1
Areia média	18,0	12,8	22,6
Areia fina	24,1	18,6	36,4
Silte	18,1	38,9	14,8
Argila	22,0	15,6	1,0
Classificação SUCS	SC	ML	SM

Tabela 2. Limites de consistência dos solos.

Profundidade (m)	W _L (%)	W _P (%)	IP (%)
0,2 – 0,7	31,0	25,6	5,4
1,3 – 1,8	-	NP	-
2,8 – 3,3	-	NP	-

Tabela 3. Índices físicos dos solos.

Profundidade (m)	ρ_a (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	e	S (%)	η (%)
+ 0,5	1,32	2,66	1,01	89,35	50,20
0	1,49	2,66	0,78	93,69	43,83
- 0,5	1,42	2,66	0,88	84,59	46,70

2.2 Porosimetria por Injeção de Mercúrio (MIP)

A representação quantitativa da microestrutura do solo é obtida no ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio, por meio da interligação dos poros no solo. Com ele, é possível determinar a distribuição da dimensão dos poros, além da curva de distribuição acumulativa dos poros do solo (Motta, 2016). O mercúrio apenas penetrará nos poros se uma pressão for aplicada, uma vez que ele se comporta como um fluido não molhante em relação ao restante das substâncias. Para isso, inicialmente a amostra deve ser seca ao ar. De forma gradual, mede-se o volume de mercúrio infiltrado. Posto isso, poros de maior diâmetro possuem menor pressão registrada, e à medida que a pressão aumenta, há predomínio de diâmetros menores. A partir do volume de poros penetrados com a respectiva pressão aplicada, traça-se uma curva porosimétrica. Com essas informações, o comportamento hidráulico do solo pode ser traduzido (Hajnos et al., 2006; Moncada, 2008; Boszczowski, 2008; Romero e Simms, 2009; Carvalho, 2012; Motta, 2016; Delcourt *et al.*, 2022; Mendes e Marinho, 2020).

Para o ensaio, foi utilizado o porosímetro 9320 V2.04, variando a pressão para as seguintes profundidades: + 0,5 m [0,6068 – 25,0555 psi], 0 m [0,4907 – 25,7316 psi], - 0,5 m [0,6952 – 25,2766 psi] e - 2 m [0,5550 – 25,1547 psi]. Além disso, o total de volume injetado, em mL/g, foi, respectivamente de: 0,1793; 0,1932; 0,1656; 0,2110.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Distribuição do tamanho dos poros no solo

A Figura 3a mostra os resultados obtidos da Porosimetria por Injeção de Mercúrio (MIP) das quatro profundidades do solo. Nessa figura, são observadas variações entre os materiais, principalmente entre a profundidade de -2m e as demais profundidades mais superficiais. Essas variações refletem a heterogeneidade que está tipicamente associada aos horizontes de solos intemperizados, em grande maioria quimicamente, em diferentes períodos, como é o caso do talude analisado, pois apresenta característica de solo maduro na superfície e jovem quanto mais próximo da rocha matriz (Delcourt *et al.*, 2022).

A NBR 6502 (2022) estabelece valores para o tamanho dos grãos, e considerando o diâmetro do poro aproximadamente dez vezes menor que o diâmetro dos grãos, assumiu-se que os microporos estão relacionados à fração de argila ($\Phi < 0,2 \mu\text{m}$), o mesoporo à fração silte ($0,2 \mu\text{m} < \Phi < 6 \mu\text{m}$) e o macroporo à fração areia do solo ($\Phi > 6 \mu\text{m}$).

Por outro lado, a Figura 3a também expressa o grau de intemperismo, uma vez que na profundidade de -2m há uma predominância de macroporos, já nas demais profundidades estudadas, de microporos. Todavia, é importante ressaltar que as amostras próximas à superfície possuem característica bimodal, representada pelos picos e abaulamentos em duas faixas de poros. Entretanto, interpretando a Figura 3b, é notório apenas um ponto de inflexão da profundidade de -2m, na área dos macroporos, sendo portanto, uma curva unimodal.

Tais observações são coerentes com as frações granulométricas expressas na Tabela 1, em que os horizontes são classificados, predominantemente, como areias. Porém, o teor de material fino (argila e silte) possui relevância nos dois metros de profundidade do solo. Isto é, a distribuição dos poros está relacionada com o diâmetro dos grãos, com elevado teor de microporos na faixa de maior concentração de material fino, e a partir dos dois metros, os macroporos são predominantes, visto que os grãos de areia são muito superiores a argila e silte. De acordo com Gitirana Junior, Marinho e Soto (2023), para as areias, a granulometria do material determina a distribuição e tamanho de poros, e consequentemente, a sua curva de retenção. Então, é possível afirmar que a curva de retenção do material será um reflexo da distribuição de tamanho de poros. A relação com a curva de retenção será abordada posteriormente.

Os dados da Tabela 4 elucidam a característica bimodal dos horizontes próximos à superfície e unimodal para profundidades mais elevadas. Ademais, a tabela traz um comparativo entre a porosidade total derivada dos índices físicos e aquela obtida a partir dos ensaios de porosimetria (MIP), com uma diferença em cerca de 12% a 17%. Romero *et al.* (1999) explicam esta diferença pela existência de poros isolados ou oclusos dependendo da profundidade estudada, não permitindo o preenchimento por mercúrio dos poros nos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio (MIP).

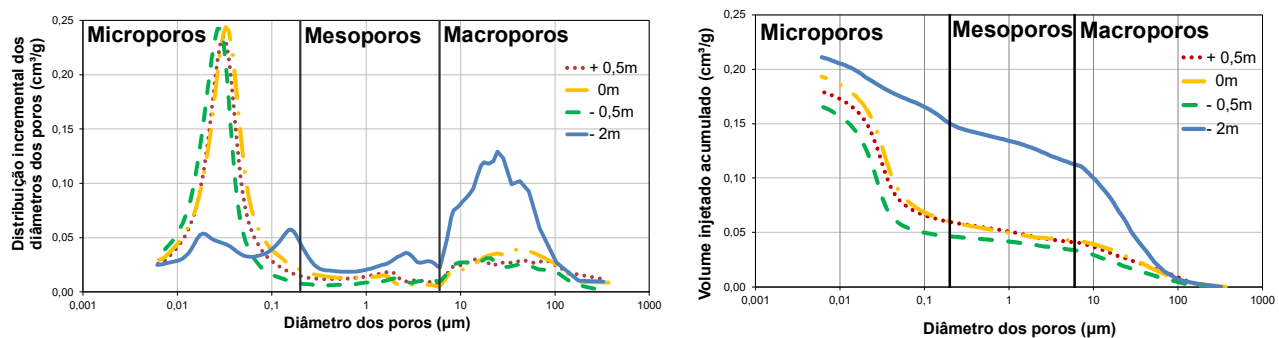


Figura 3. Resultados do ensaio de Porosimetria por Injeção de Mercúrio (MIP). a) Distribuição dos poros b) Volume injetado acumulado

Tabela 4. Dados obtidos dos ensaios de porosimetria (MIP) e índices físicos.

Profundidade (m)	Microporos (%)	Mesoporos (%)	Macroporos (%)	Porosidade	Porosidade
	$\Phi < 0,2\text{mm}$	$0,2\text{mm} < \Phi < 6\text{mm}$	$\Phi > 6\text{mm}$	Total (%)	MIP (%)
+ 0,5m	66,74	10,45	22,81	50,20	36,20
0m	68,89	9,06	22,05	43,83	37,75
- 0,5m	71,98	7,73	20,29	46,70	34,69
- 2m	28,91	17,77	53,32	55,00	38,13

3.2 Curva de retenção Solo-Água

Como dito anteriormente, a curva característica é uma ferramenta de análise da estrutura do solo. Sua obtenção se deu por meio dos dados do ensaio de Porosidade por Injeção de Mercúrio (Figura 4). Pode-se notar que os três materiais próximos à superfície mostram um tipo de curva de dupla estrutura ou dupla porosidade (Gens *et al.*, 1995; Khalili e Valliappan, 1996; Koliji *et al.*, 2006), com dois valores de entrada de ar. Por outro lado, a parcela mais profunda apresenta porosidade única, resultados condizentes com os testes do MIP, que

indicaram predominância de microporos e macroporos para o primeiro caso, e apenas macroporos para o segundo.

Em complemento, com os pontos de inflexão das curvas da Figura 4, foi possível obter os valores de entrada de ar, em kPa, e suas respectivas umidades volumétricas. Esses dados estão contidos na Tabela 5.

Os resultados confirmam o que Gitirana Junior, Marinho e Soto (2023) estudam, afirmando que, quando o solo é submetido a um aumento de sucção, os poros maiores são os primeiros a sofrer drenagem. Além do mais, os autores também comentam que materiais com granulometria mais fina irão exigir maiores valores de sucção para serem drenados do que materiais relativamente mais granulares, o que fica evidente na tabela para os valores elevados na segunda entrada de ar dos solos com presença significativa de finos. Por outro lado, é importante salientar que para a primeira entrada de ar, não há relação significativa entre o grau de intemperismo das amostras.

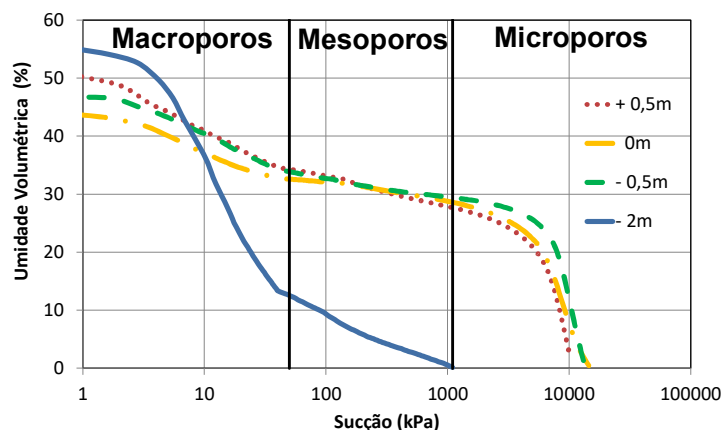


Figura 4. Curva de retenção solo-água.

Tabela 5. Valores de sucção e umidade volumétrica referentes às entradas de ar.

	+ 0,5 m		0 m		- 0,5 m		-2,0 m	
	Entrada de Ar (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Entrada de Ar (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Entrada de Ar (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Entrada de Ar (kPa)	Umidade Volumétrica (%)
Primeira	3,3	49,2	5,7	42,3	3,4	46,5	6,1	57,5
Segunda	9400	24,0	9252	25,6	9595	26,7	-	-

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou um perfil de uma encosta na região do Guarujá-SP, por meio de ensaios de caracterização física e estrutural. Pelos resultados foi possível concluir que o perfil é composto predominantemente por solo arenoso, porém as características microestruturais são alteradas pela presença de argila e silte em teores relevantes próximos à superfície.

Analisando o perfil de estudo, nota-se que nas profundidades de + 0,5m e - 0,5m o material possui comportamento bimodal, contendo elevada quantidade de microporos quando comparada aos macroporos. Todavia, com o aumento da profundidade, os horizontes passam a ter característica unimodal e a proporção entre microporos e macroporos se inverte. É importante observar que a diferença na quantidade de microporos e macroporos é a mesma para ambos os casos, mas o comportamento da curva se altera, representado pelas inflexões da curva de volume injetado acumulado.

Por fim, vale ressaltar que esse estudo é o início de um trabalho que está em andamento, e pretende-se correlacionar esses dados com a curva de retenção obtida por métodos de ensaio em laboratório, para verificar sua aplicabilidade, além de correlacionar as umidades da PCD Geotécnica com os valores de sucção. Isso servirá de base para melhorar a compreensão dos processos envolvidos e contribuir para futuras melhorias nas técnicas de monitoramento e emissão de alertas pelo CEMADEN.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), com a concessão de bolsa de Iniciação Científica, processo nº 2023/13949-0, e Projeto de Pesquisa Regular, processo nº 2023/04461-4. Também agradecem ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) pela parceria nesta pesquisa, e em conjunto ao Projeto REDEGEO pelo apoio, através da Carta Convite MCTI/FINEP/FNDCT 01/2016, Instrumento contratual código N° 0.1.16.0068.00.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6502. *Solos e Rochas – Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Boszczowski, R. B (2008). *Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba*, PR. 577f. Tese de Doutorado, PUC, Rio de Janeiro, 2008.
- Camapum J.C. (2005). *Relato: Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados*. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, SP. 597-616.
- Gens, A., Alonso, E.E., Surlol, J., Llorent, A., (1995). *Effect of structure on the volumetric behavior of a compacter soil*. In: *Unsaturated Soils: Proc, 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils/UNSAT*, Paris, pp. 83-88.
- Gitirana, F. N. G. Carvalho, J. C., Ferreira, S. R. M., Mascarenha, M. M. A. (2012) *O comportamento de solos não saturados submetidos à infiltração*. In: *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais*. Brasília, Cap.9, pp. 157-182.
- Delcourt, R. T., de Campos, T. M. P., Antunes F. S. (2022) *Interrelationship among weathering degree, pore distribution and water retention in an unsaturated gneissic residual soil*. *Engineering Geology*.
- Farias, W.M., Camapum de Carvalho, J., Silva, G.F., Campos, I.C.O., Santos Neto, P.M. (2011). *Influência da Compactação nos Micro e Mesoporos Nanoestruturados e na Área Superficial Específica de um solo Laterítico*. VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v. 1, Pinerópolis – GO, Kelps, pp. 169-175.
- Freitas, A. A., Oda, P. S. S., Teixeira, D. L. S., Silva, P. N., Mattos, E. V., Bastos, I. R. P., Nery, T. D., Metodiev, D., Santos, A. P. P., Gonçalves, W. A. (2020) *Meteorological conditions and social impacts associated with natural disaster landslides in the Baixada Santista region from March 2nd–3rd*. *Urban Climate*, 42 p.
- Fredlund, D. G., Rahardjo H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York.: Wiley & Sons.
- Gitirana Jr, G. F. N.; Marinho, F. A. M.; Soto, M. A. A. (2015). *A curva de retenção de água de materiais porosos*. In: Camapum de Carvalho, J. et al. (Org.). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. ABMS, São Paulo, Cap. 10, p. 205-229.

- Hajnos, M., Lipiec, J., Swieboda, R., Sokolowska, Z., Witkowska-Walczak, B. (2006) *Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods*. Geoderma, 135, p. 307-314.
- Khalili, N., Valliappan, S., (1996). *Unified theory of flow and deformation in double porous media*. European Journal of Mechanics Series a Solids, v 15, 321-336.
- Koliji, A., Laloui, L., Cusinier, O., Vulliet, L. (2006). *Suction Induced Effects on the fabric of a Structured Soil*. Transp. Porous Media 64, 261.
- Lee, H.C., Wray, W.K. (1995). *Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil variable*. Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils (edited by E.E. Alonso and P. Delage), Paris, 2, pp. 615–621.
- Liu, C., Tong F., Yan L., Zhou H., Hao S. (2020) *Effect of porosity on soil-water retention curves: theoretical and experimental aspects*. Geofluids, vol. 2020.
- Marinho, F. A. M. (2005) *Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados*. 201f. Livre Docência, USP, São Paulo, 2005.
- Motta, M. F. B. (2016) *Caracterização Físico-Hídrico-Estrutural e Efeito do Aumento da Pressão do Ar na Resistência de Solos Tropicais Não Saturados*. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, 350 p.
- Moncada, M. P. H. (2008) *Avaliação de propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados*. 2008. 324f. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Romero, E., Gens, A., Llorent, A. (1999) *Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay*. Eng. Geol., 54, pp. 117-127.
- Romero, E., Simms, P. H. (2009) *Microstructure investigation in unsaturated soil: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy*. In: Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils. Tarantino et al. (eds), p. 93-115.
- Mendes, R.M., Marinho, F.A.M. (2020) *Soil Water Retention Curves for Residual Soils Using Traditional Methods and MIP*. Geotech Geol Eng. 11p.