

Resistência de um Perfil de Solo Tropical Não Saturado

Jeferson Brito Fernandes

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Bauru/SP, Brasil
jefersonbfengenheiro@gmail.com

Alfredo Lopes Saab

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Bauru/SP, Brasil
alfredo.saab@hotmail.com

Breno P. Rocha

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos/SP, Brasil
brenop@sc.usp.br

Roger A. Rodrigues

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Bauru/SP, Brasil
roger_ar@feb.unesp.br

Heraldo Luiz Giacheti

Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Bauru/SP, Brasil
giacheti@feb.unesp.br

RESUMO: A variação da sucção e consequentemente dos parâmetros de resistência é um fator preponderante na caracterização geomecânica dos perfis de solos, posto que a mobilização das tensões na grande maioria das obras de engenharia localizadas em regiões tropicais ocorre com maior frequência na zona não saturada. O objetivo deste artigo é apresentar a variação da sucção no tempo para até 5m de profundidade de um perfil de solo tropical não saturado e, em função dessa variável, discutir as diferenças nas medidas na resistência de ponta do cone (q_c) e nos parâmetros de resistência (c e ϕ') determinados por meio de ensaios triaxiais saturados e não saturados. As análises dos resultados mostram que a média dos teores de umidade e das sucções nos meses mais secos do ano variaram entre 5% ($s = 1450\text{kPa}$) e 8% ($s = 700\text{kPa}$), respectivamente para 1 e 5m de profundidade e, nos meses mais úmidos, entre 8% ($s = 8\text{kPa}$) e 9% ($s = 15\text{kPa}$), para as mesmas profundidades. Em função dos valores médios de sucção referentes aos períodos seco e úmido, constatou-se uma variação significativa nos parâmetros de resistência determinados por meio de resultados de ensaios de campo (CPT) e laboratório (triaxial).

PALAVRAS-CHAVE: Solo Não Saturado, Sucção, Parâmetros de Resistência, CPT, Triaxial.

1 INTRODUÇÃO

O estudo da variação da resistência em solos tropicais vem ganhando espaço entre os grupos de pesquisa de solos não saturados devido à problemas geotécnicos de origem estrutural recorrentes nesses locais. A partir do clima característico dessas regiões, assumimos que há uma maior probabilidade da origem desses

problemas estarem relacionadas às variações de umidade do solo. Fisicamente sabemos que essa umidade depende das condições atmosféricas, assumindo um padrão caótico de variação no tempo. Paralelamente, sabemos que a variação de umidade do solo implica diretamente em variações na sucção devido a sua relação direta com o conteúdo de água entre as partículas. Contudo, em solos não saturados a sucção deve

ser tratada como uma variável de tensão. Por sua vez, essa componente pode ser relacionada à resistência do material por contribuir diretamente com as forças de atrito entre as suas partículas.

Resultados de ensaios de campo e de laboratório mostram que a mobilização da resistência dos solos não saturados varia em relação às características de origem do material, ao nível de confinamento aplicado e ao conteúdo de água presente em sua estrutura. Para essa última variável dá-se o nome de teor de umidade e ao seu valor pode-se associar a capacidade do solo em reter a água líquida entre suas partículas. Para a capacidade de retenção da água definida anteriormente dá-se o nome de sucção mátrica, que é representada pela pressão negativa da água no solo (Figura 1). Fisicamente a sucção pode ser entendida como a força que atua na estrutura solo no sentido de provocar o contato entre as partículas. Logo, surgiram modelos matemáticos capazes de fornecer a resistência do solo em função da sucção. As propostas Bishop *et al.* (1960) e Fredlund *et al.* (1979) levam sempre em consideração as componentes da sucção nas variações da resistência ao cisalhamento. Dessa forma, entendemos que a contribuição da sucção para a resistência é um fenômeno de atrito, ou seja, a resistência aumenta com o aumento da tensão entre as partículas e este aumento é devido ao aumento da sucção.

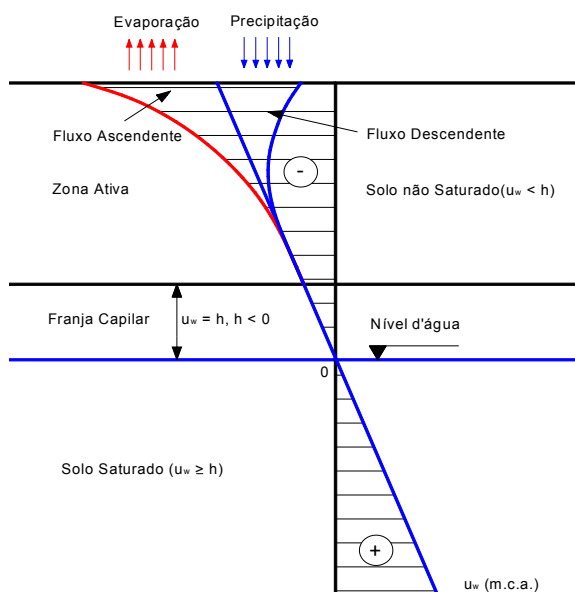


Figura 1. Distribuição das poropressões de um perfil de solo não saturado (FREDLUND & RAHARDJO, 1993)

2 BREVE REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Monitoramento da Sucção

Os processos naturais de secagem e umedecimento dos solos localizados sobre o nível da água (Figura 1) são intensificados pela incidência das variáveis atmosféricas e pelo tipo de cobertura existente, tendendo a manter um fluxo contínuo da água na forma de vapor ou líquida por sua estrutura. Dessa forma, o monitoramento periódico da sucção nessa porção do perfil é necessário por fornecer as diretrizes para realização dos estudos de resistência. Esse procedimento permite obter-se o perfil de sucção com a profundidade ao longo do tempo, como mostra o exemplo da Figura 2.

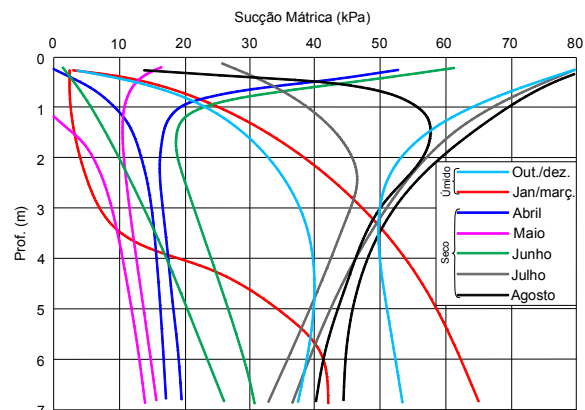


Figura 2. Leituras mensais de sucção em um talude de solo residual (VIEIRA e MARINHO, 2001)

No monitoramento ilustrado na Figura 2 Vieira e Marinho (2001) mostram que para uma mesma profundidade ocorrem valores de sucção máximos, mínimos e intermediários, de acordo com o período considerado. Para realização dessas medidas de sucção utilizam-se métodos diretos como os tensiômetros (Figura 3) ou indiretos, como determinação do teor de umidade a partir de amostragem e posterior correlação com a curva de retenção da água do material.

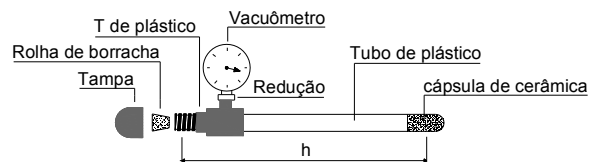


Figura 3. Modelo de tensiômetro convencional

2.2 Curva de Retenção da Água no Solo

A curva de retenção de água de um solo relaciona a quantidade de água presente, em termos da umidade ou grau de saturação, com a sucção. Vanapalli *et al.* (1996) explicam que o formato da curva de retenção depende da matriz e processo de formação dos solos, podendo ser classificado como unimodal (em formato de S) ou bimodal (em formato de sela). As curvas características unimodais - Figura 4. (a) - constituem o formato mais comum em solos compactados. Enquanto que as curvas bimodais - Figura 4. (b) - são recorrentes em amostras indeformadas de solos residuais e coluvionares de regiões tropicais e subtropicais.

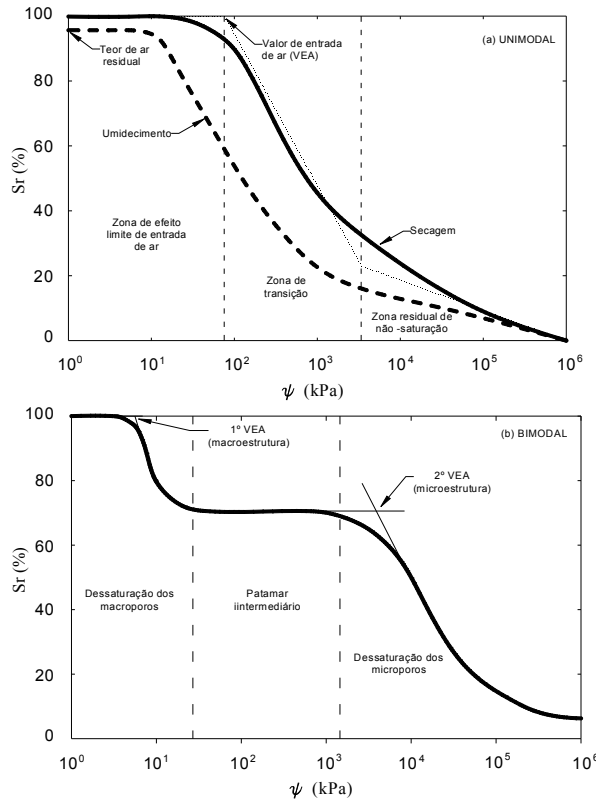


Figura 4. Curvas de retenção (a) unimodal e (b) bimodal (VANAPALLI *et al.* 1996)

A histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento representada na Figura 4. (a) é um fenômeno que depende de fatores como a geometria dos poros, variação do ângulo do menisco capilar devido à rugosidade das partículas e à quantidade de ar aprisionada nos poros do solo. Para determinação da curva de retenção dos solos são coletados os pares ordenados sucção e umidade por meio de

técnicas diretas como placa de sucção, indiretas como o método do papel filtro ou ainda por translação de eixos. A relação matemática que melhor se ajusta aos pontos obtidos experimentalmente pode aproximada a partir de modelos de ajuste apropriados como o de van Genuchten (1980):

$$w(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + (p\psi)^n]^{(m)}} \quad (1)$$

onde:

$w(\psi)$ - umidade gravimétrica em função da sucção (ψ);

m, n e p - parâmetros de ajuste do solo;

w_s e w_r - teores de umidade gravimétricos saturado e residual, respectivamente.

2.3 Resistência ao Cisalhamento

Atualmente a solução amplamente aceita pela comunidade geotécnica assume que a tensão de cisalhamento dos solos é uma função das variáveis independentes do estado de tensão (FREDLUND *et al.*, 1979):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

onde:

τ - tensão de cisalhamento;

c' - intercepto de coesão efetivo;

ϕ - ângulo de atrito interno relativo à tensão normal líquida ($\sigma - u_a$);

ϕ^b - ângulo de atrito interno relativo à sucção mátrica ($u_a - u_w$).

Dessa relação, muitos pesquisadores têm assumido com base em ensaios de laboratório que $\phi \cong \phi^b$. Os autores dessa proposta verificam que a relação entre τ e as variáveis de tensão pode ser aproximada para um plano, sendo que a inclinação desse plano é direcionada pelos ângulos de atrito do material (Figura 5). No entanto, é de conhecimento que a expressão do intercepto de coesão em função da sucção - Equação (3) - pode assumir comportamentos distintos dada a não linearidade de ϕ^b :

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

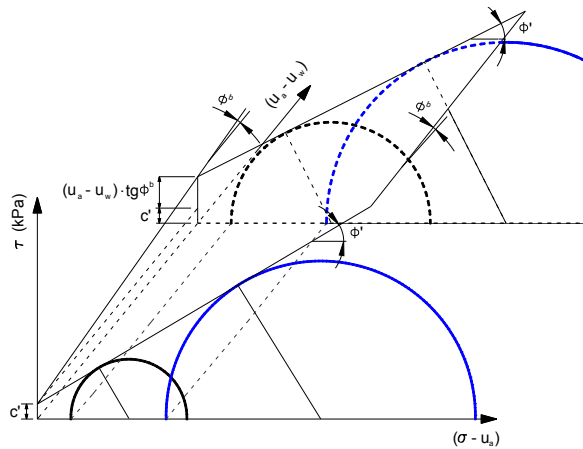


Figura 5. Envolvória de resistência para solos não saturados (FREDLUND *et al.*, 1979)

Modelos de ajuste do intercepto de coesão em função da sucção podem ser encontrados na literatura. Contudo, o modelo de Vilar (2007) é considerado por diversos autores como o mais adequado para representação do comportamento de solos tropicais:

$$c = c' + \frac{(u_a - u_w)}{a + b \cdot (u_a - u_w)} \quad (4)$$

As constantes a e b da Equação (4) podem ser obtidas em função dos parâmetros efetivos de resistência (c' , ϕ'), da sucção máxima de interesse $(u_a - u_w)_m$ assim como do intercepto de coesão correspondente à sucção máxima de interesse (c_m). Alternativamente a constante b pode ser obtida em função da coesão última (c_{ult}), que ocorre quando o solo apresenta umidade residual, ou seja, quando $(u_a - u_w) \rightarrow \infty$.

$$a = \frac{1}{\tan \phi'} \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{c_m - c'} - \frac{1}{\tan \phi' \cdot (u_a - u_w)_m} \quad (6)$$

$$b = \frac{1}{c_{ult} - c'} \quad (7)$$

3 O SOLO ESTUDADO

3.1 Localização

A coleta de amostras indeformadas e os

ensaios CPT foram realizados no campo de experimental da Faculdade de Engenharia da Unesp de Bauru. A Figura 6 ilustra a imagem de satélite com a localização da área.

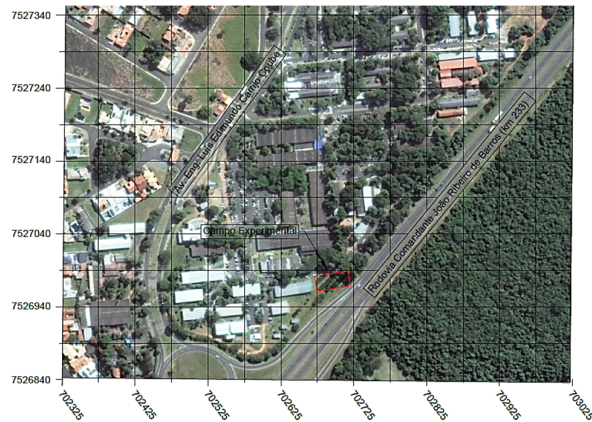


Figura 6. Campo experimental da Unesp de Bauru/SP - zona UTM 22, SAD 69 (GOOGLE MAPS, 2015)

De Mio (2005) caracteriza desse local como sendo uma areia fina a média, pouco argilosa, de origem coluvionar até 13 m de profundidade. Vitalli (2011) cita que o perfil desse solo apresenta comportamento laterítico até essa profundidade.

3.2 Amostragem

As amostras indeformadas foram coletadas por meio de um poço de amostragem nas profundidades e com as dimensões indicadas na Figura 7. Num raio de até 5m do poço foram realizados ensaios CPT além de amostragem deformada de solo por meio de trado helicoidal, obtendo-se, ao mesmo tempo, os perfis de q_c e w . Os perfis de q_c e w em função do mês de realização da amostragem ou do ensaio CPT serão apresentados e discutidos mais adiante.

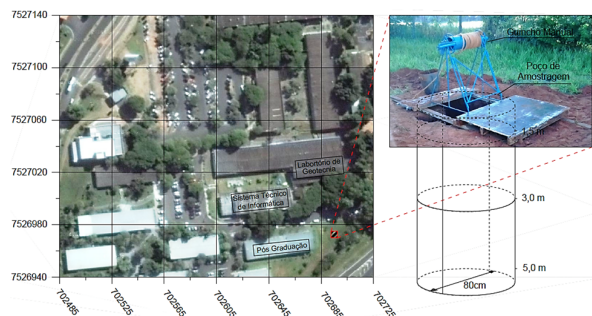


Figura 7. Local de amostragem - zona UTM 22, SAD 69 (GOOGLE MAPS, 2015).

4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Caracterização e Classificação

Os resultados dos ensaios de caracterização física, assim como a classificação das amostras de solo ao longo do perfil encontram-se na Tabela 1:

Tabela 1. Caracterização e classificação (USCS) das amostras do perfil em estudo

Profundidade (m)		1,5	3,0	5,0
Areia	Média (%)	40,0	39,0	40,5
	Fina (%)	41,0	41,5	38,5
Finos	Silte (%)	4,0	4,5	4,0
	Argila (%)	15,0	15,0	17,0
Limites de Atterberg	LL (%)	18,0	19,5	21,3
	LP (%)	-	-	-
	IP (%)	-	-	-
Índices Físicos	ρ_s (g/cm ³)	2,70	2,68	2,69
	w (%)	7,89	9,36	10,27
	ρ (g/cm ³)	1,58	1,64	1,77
	ρ_a (g/cm ³)	1,47	1,50	1,61
Propriedades Físicas	e	0,84	0,79	0,67
	n (%)	45,7	44,1	40,1
	S _r (%)	25,3	31,8	41,0
Classificação Unificada	Finos	ML	ML	ML
	Grupo	SM	SM	SM

Por meio dos resultados dos ensaios de granulometria pode-se considerar que as amostras coletadas ao longo do perfil possuem grande homogeneidade na constituição. Observa-se que há uma redução do índice de vazios com o aumento da profundidade. Contudo, no trecho do perfil estudado, o material indeformado apresenta uma estrutura frágil e muito porosa. A fragilidade do material pode ser atribuída também à pouca cimentação entre as partículas, à baixa plasticidade da fração fina e à pobre graduação da fração areia.

4.2 Curva de Retenção da Água no Solo

As trajetórias de secagem das curvas de retenção (Figura 8) foram obtidas das amostras indeformadas das profundidades de 3,0 e 5,0m. A curva de retenção para a profundidade de 1,5 m foi realizada por Fagundes (2014). Os pares ordenados sucção e umidade gravimétrica (ψ , w) foram determinados por meio dos ensaios de papel filtro e placa de sucção. Para ajuste dos pontos experimentais foi utilizado o modelo de

van Genuchten (1980), resultando em curvas de comportamento bimodal:

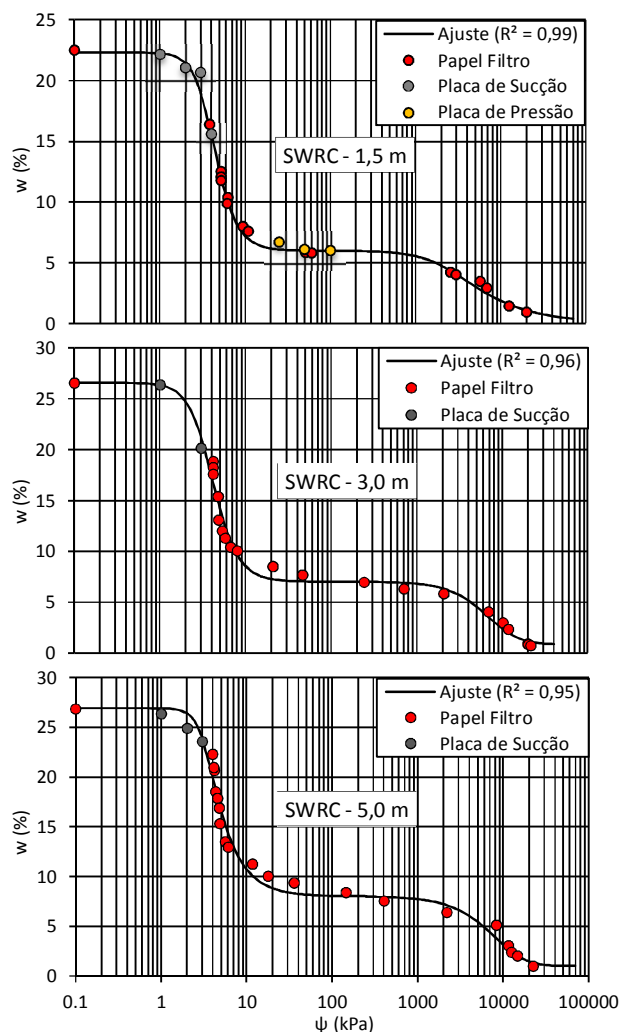


Figura 8. Curvas de retenção da água no solo ao longo do perfil (SWRC - Soil Water Retention Curve)

Observa-se, por meio da Figura 8, que o teor de umidade de saturação para a amostra de 1,5 m de profundidade apresenta um valor inferior àqueles obtidos para as curvas de retenção de 3,0 e 5,0 m de profundidade.

A Tabela 2 reúne os parâmetros de ajuste (n, m e p) da Equação (1), assim como os valores de entrada de ar (VEA) e teores de umidade residual (w_r) e saturado (w_s) das curvas ilustradas na Figura 8. Observa-se, por meio dos coeficientes de determinação (R^2), que o modelo de van Genuchten (1980) resultou em ajustes de boa qualidade para as curvas de retenção da água ao longo do perfil. Dessa forma, essas curvas podem ser utilizadas como ferramenta para estimativa da sucção a partir do

teor de umidade de amostras coletadas em campo.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste das curvas de retenção da água do perfil

P. (m)	ψ (kPa)	VEA (kPa)	w_s (%)	w_r (%)	p	n	m
1,5	< 100	2	22,3	6,0	0,2542	3,7552	0,7337
	≥ 100	1000	-	0,0	0,0004	1,8122	0,4482
3,0	< 250	2	26,6	7,0	0,2592	3,1438	0,8398
	≥ 250	1500	-	0,8	0,0001	1,7723	2,0001
5,0	< 250	2	26,9	8,0	0,3042	5,1039	0,3394
	≥ 250	2000	-	1,0	0,0001	1,5165	3,9011

4.3 Ensaios CPT e Determinação do Perfil de Teor de Umidade

Os ensaios CPT, assim como as amostragens de solo a trado, foram realizadas nos anos de 2011, 2012 e 2015. A Figura 9 ilustra os perfis com os valores de teor de umidade gravimétrico (w), resistência de ponta do cone (q_c) e sucção estimada (ψ) ao longo do perfil do subsolo. Devido à compactação do solo superficial, verifica-se uma variação significativa nos valores de q_c para profundidades inferiores a 1,0m. Essa região foi delimitada nas Figuras que seguem por uma linha tracejada.

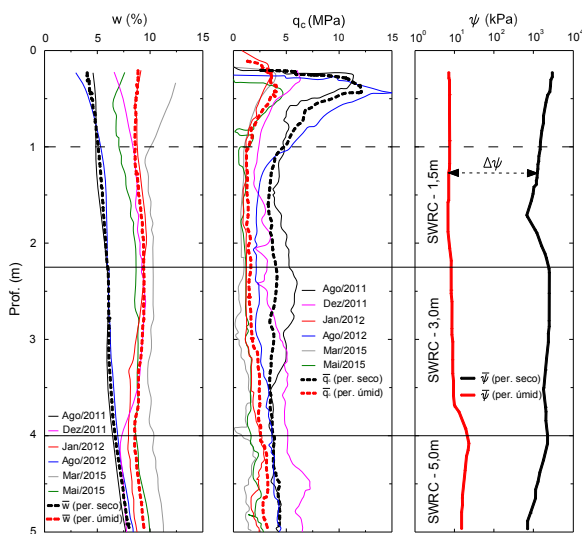


Figura 9. Resultados de ensaios CPT e de amostragens de solo com trado helicoidal (adaptado de BEZERRA, 2016).

A Figura 9 mostra que com o aumento de w durante os ensaios ocorreu uma redução de q_c . As médias dos dados referentes ao período seco

foram obtidas dos meses de ago/2011 e ago/2012, enquanto que para o período úmido dos meses de dez/2011, jan/2012, mar/2015 e mai/2015. Os perfis de ψ referentes aos períodos seco e úmido foram estimados indiretamente por meio de w e das trajetórias de secagem das curvas de retenção ao longo do perfil, desconsiderando o efeito da histerese da sucção em campo. Por meio desses perfis estima-se que a maior e a menor variação de ψ ocorra para a superfície e para a profundidade de 5,0m, sendo de 3000kPa e 700kPa, respectivamente. Na Figura 10 observa-se a tendência de aproximação das médias de w e q_c referentes aos períodos seco e úmido para profundidades inferiores a 3m. No entanto, constatou-se que até mesmo para 5m de profundidade o coeficiente de variação (C_v - que expressa o desvio padrão de uma variável como porcentagem da média) de q_c apresenta um valor elevado, acima de 50%. Deste modo, para o caso estudado os altos valores de C_v mostram a grande variabilidade entre resultados de q_c obtidos em diferentes épocas do ano.

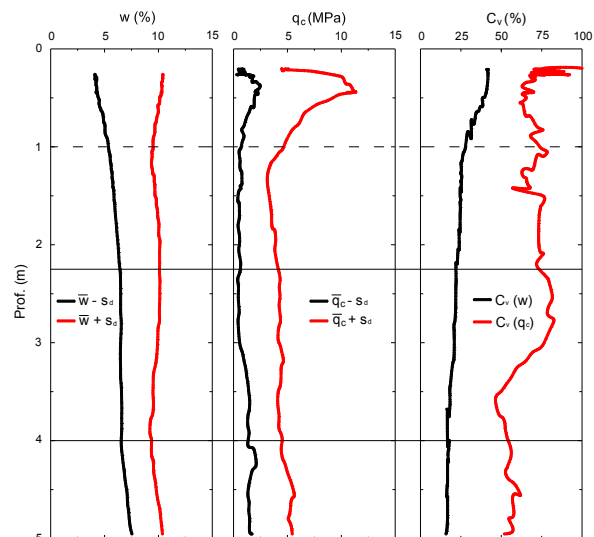


Figura 10. Distribuição das médias de w e $q_c \pm$ desvio padrão (S_d) e coeficiente de variação (C_v) ao longo da profundidade.

4.4 Estimativa dos Parâmetros de Resistência do Perfil com Base em Ensaios Triaxiais

A estimativa dos parâmetros de resistência a partir da sucção em campo pode ser realizada

por meio dos resultados obtidos em ensaios triaxiais saturados e não saturados associados aos modelos matemáticos de resistência. Neste estudo, foram realizados ensaios triaxiais do tipo consolidado drenado com a utilização de corpos de 50 mm de diâmetro por 120 mm de altura. O controle da sucção dos CPs durante os ensaios foi estabelecido através de translação de eixos para os níveis de sucção variando de 0 a 400 kPa. Foram realizados ensaios para determinação dos parâmetros de resistência saturados e não saturados das amostras retiradas das profundidades de 3,0 e 5,0 m. Os parâmetros de resistência do material coletado na profundidade de 1,5 m foram obtidos por Fagundes (2014). Para previsão da resistência não saturada das profundidades de 1,5, 3,0 e 5,0 m foi utilizado o modelo de ajuste hiperbólico de Vilar (2007) - Equação (4). Esses ajustes permitiram a extrapolação da resistência para as sucções do período seco que ocorrem em campo. As curvas obtidas para o perfil de solo estudado mostram que as taxas de variação da resistência são decrescentes em relação à sucção e que a coesão se mantém praticamente constante para sucções acima de 2500 kPa. Contudo, os perfis de ψ referentes aos períodos seco e úmido (Figura 11; Tabela 3) mostram que as médias das sucções máxima e mínima ocorrem respectivamente próximo às profundidades de 2,5 m ($\psi = 2450$ kPa) e 1,5 m ($\psi = 7$ kPa).

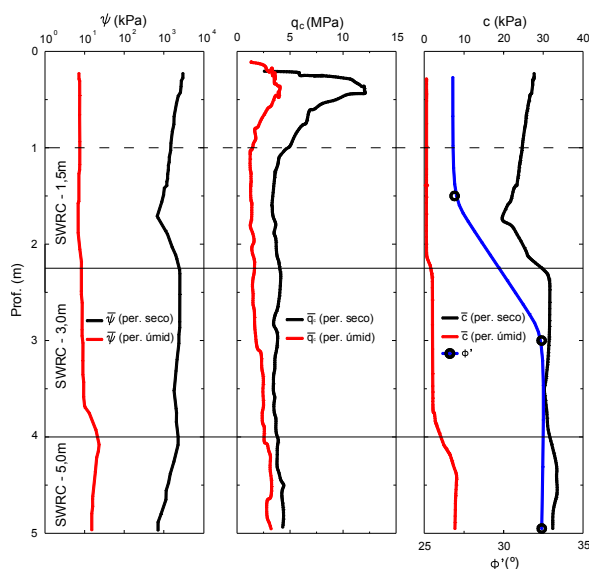


Figura 11. Estimativa dos perfis de sucção e dos parâmetros de resistência do perfil de solo estudado

A Tabela 3, assim como a Figura 11, mostram que a menor resistência do perfil ocorre para profundidades próximas à 1,5 m, tanto para o período úmido como para o período seco. Analogamente, estima-se que a maior resistência ocorra para profundidades próximas a 4,0 m. Observa-se também uma variação significativa em ϕ' entre as profundidades de 1,5 e 3,0 m, passando de 26,8° para 32,6°.

Tabela 3. Valores de ψ , q_c e c para os períodos seco e úmido assim como de ϕ' ao longo do perfil estudado

P. (m)	ϕ' (°)	Período úmido			Período seco		
		ψ (kPa)	q_c (MPa)	c (kPa)	ψ (kPa)	q_c (kPa)	c (kPa)
SWRC 1,5m	1,0	26,8	7,5	1,5	0,6	1450	5,0
	1,5	26,8	7,0	1,3	0,6	950	2,2
	2,0	26,8	7,3	1,5	0,6	1500	3,6
SWRC 3,0m	2,5	32,6	8,3	1,5	2,1	2450	4,1
	3,0	32,6	8,8	1,8	2,1	2350	3,5
	3,5	32,6	9,3	2,6	2,2	1750	3,4
SWRC 5,0m	4,0	32,4	20,9	2,5	8,7	2200	3,7
	4,5	32,4	17,2	3,3	8,0	1200	3,8
	5,0	32,4	14,7	3,2	7,7	700	4,3

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os teores de umidade (w) e as curvas de retenção da água permitiram obter-se a variação da sucção (ψ) para os períodos seco e úmido do ano ao longo do perfil de solo estudado. A análise dos perfis de resistência de ponta do cone (q_c) em diferentes períodos do ano mostra que o coeficiente de variação (C_v) entre 1,0 e 3,0 m de profundidade é de aproximadamente 75%, enquanto que para profundidades abaixo de 3,5 m C_v reduz para aproximadamente 50%. Diante do exposto, e sabendo-se que existe uma grande homogeneidade dos materiais ao longo das profundidades analisadas, é aceitável afirmar-se que a grande tendência na variação dos valores de q_c para uma mesma cota está relacionada sobretudo à variação sazonal da sucção.

Os resultados dos ensaios de caracterização e classificação realizados para as três profundidades mostraram que o material ao longo do perfil possui comportamento de uma areia não plástica. Contudo, a determinação dos parâmetros de resistência (c e ϕ') por meio de ensaios triaxiais saturados e não saturados ao

longo do perfil mostrou que a coesão pode ser empregada para compor a resistência, sendo ela mais significativa abaixo de 4,0m de profundidade, até mesmo para o período úmido. Já, as variações de ϕ' podem ser atribuídas à redução da porosidade do material ao longo do perfil.

AGRADECIMENTOS

A FAPESP (Proc. No. 2010/50650-3, 2014/23767-8 e 2015/16270-0); ao CNPq e a CAPES. Agradecem também aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da Unesp de Bauru, Gustavo Pinheiro e Sérgio Gimenez, ao aluno de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Unesp, Fábio Soares e ao ex-aluno de graduação em Engenharia Civil, Renan Bezerra.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, R. C. (2016). Interpretação de Resultados de Ensaio CPT Considerando a Influência da Condição Não Saturada. Relatório de Iniciação Científica, FAPESP. 37 p.
- BISHOP, A. W.; ALPAN, G. E.; DONALD, B. I. (1960). Factors Controlling the Shear Strength of Partly Saturated Cohesive Soils. *In: Research Conference of Shear Strength of Cohesive Soils*. Boulder. Proceedings. ASCE, p. 503-532.
- De MIO, G. *Condicionantes Geológicas na Interpretação de Ensaio de Piezocone para Identificação Estratigráfica na Investigação Geotécnica e Geoambiental*. 2005. 348p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. São Carlos, 2005.
- FAGUNDES, L. S. *Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de um Solo Tropical não Saturado*. 2014. 102p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB/UNESP. Bauru, 2014.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. (1979). The Shear Strength for Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), p. 121 - 139.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 517p.
- GOOGLE MAPS. [Imagens de Satélite da Unesp de Bauru]. 2015. Disponível em: <<http://maps.google.com>>. Acesso em fevereiro de 2015.
- van GENUCHTEN, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of a Unsaturated Soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 44. p. 892 - 898.
- VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. (1996). The Relationship Between the Soil - Water Characteristic Curve and the Unsaturated Shear Strength of a Compacted Glacial Till. *Geotechnical Testing Journal*, 19(3), p. 259-268.
- VIEIRA, A. M.; MARINHO, F. A. M. (2001). Variação Sazonal de Sucção em um Talude de Solo Residual em São Paulo. *In: III Conferência Brasileira de Encostas*, COBRAE, Rio de Janeiro. p. 287 - 295.
- VILAR, O. M. (2007). An expedite Method to Predict the Shear Strength of Unsaturated Soil. *Soils & Rocks*, AMBS – ABGE, 30(1), p. 51-62.
- VITALI, O. P. M. *Desenvolvimento de um Sistema para Realização de Ensaio Sísmicos Down-Hole em Conjunto com CPT*. 2011. 100f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. São Carlos, 2011.