



Parâmetros de resistência de um solo não saturado da região da Serra do Mar – trecho PR-SP

Jordana Furman

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, jorfurman@gmail.com

Vítor Pereira Faro

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitorpereirafaro@gmail.com

RESUMO: Este trabalho teve como principal objetivo avaliar as variações nos parâmetros de resistência de um solo da região da Serra do Mar Paranaense, divisa com o estado de São Paulo, frente às diferentes condições de saturação. Para isto foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras com diferentes teores de umidade e na condição inundada. Desse modo foi possível obter a envoltória de resistência para as diferentes condições de saturação. A relação sucção-umidade, fundamental para determinar o nível de sucção ao qual as amostras estavam submetidas, foi determinada pelo método do papel filtro. O ângulo de atrito praticamente não foi alterado pela variação da sucção. Em contrapartida, o intercepto coesivo teve um crescimento significativo. Os resultados deste estudo mostram a importância de se analisar as variações nos parâmetros de resistência em condições não saturadas para subsidiar projetos de engenharia que envolvam solos com variações relevantes de saturação.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência ao cisalhamento, cisalhamento direto, solos não saturados.

1 INTRODUÇÃO

O ramo da Geotecnia vem se esforçando nos últimos anos no sentido de compreender o comportamento dos solos não saturados, com o intuito de aperfeiçoar os projetos de engenharia e possibilitar a realização de obras mais arrojadas e menos onerosas.

A mecânica dos solos clássica, usualmente exercida, foi desenvolvida com base em conceitos e modelos para os estados seco ou saturado, não considerando os efeitos da não saturação do solo. Entretanto a prática de projetos de considerar solos não saturados como saturados muitas vezes não retrata a condição de campo e acaba por fornecer soluções de engenharia antieconômicas.

Desse modo, o interesse no estudo dos solos não saturados tem aumentado significativamente para compreender os

processos que influenciam o seu comportamento mecânico.

O objetivo deste trabalho é contribuir para o conhecimento acerca do comportamento mecânico de um solo não saturado da região da Serra do Mar Paranaense, divisa com o estado de São Paulo. Para isto foram realizados ensaios de laboratório para determinação da curva característica de retenção do solo e a resistência ao cisalhamento do solo em diferentes graus de saturação. A partir dos resultados obtidos verificou-se a adequabilidade do método de Vilar (2006), proposto para prever a resistência ao cisalhamento de solos não saturados.

2 OS SOLOS NÃO SATURADOS

A resistência ao cisalhamento dos solos não saturados está diretamente relacionada com a



sucção ou pressão neutra negativa, a qual é um efeito decorrente da capilaridade e das forças de adsorção desenvolvidas na água presente nos poros do solo. Este processo depende da estrutura e da composição do solo e refere-se quantitativamente a diferença entre a poropressão de água (μ_w) e a poropressão de ar (μ_a), tendendo a desaparecer com a saturação do solo.

A sucção do solo pode ser obtida através de técnicas em laboratório, como a do papel filtro, por exemplo. Esta técnica é um método indireto de aferir a sucção de um solo em determinado teor de umidade. A simplicidade do método, seu baixo custo e a possibilidade de medir a sucção total ou mátrica em largos limites (30 - 30000 kPa) são as vantagens observadas para essa técnica, entretanto se faz necessário extremo cuidado na execução do procedimento e na análise dos resultados (FEUERHARMEL, 2003).

Uma das primeiras equações para avaliar a resistência ao cisalhamento de solos não saturados foi desenvolvida por Bishop *et al.* (1960). A partir de então, várias outras equações foram propostas e os critérios de ruptura de solos não saturados passaram a ser amplamente discutidos.

A equação proposta por Fredlund *et al.* (1978) é uma das mais conhecidas e utilizadas até hoje, sendo expressa por:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - \mu_a) \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi_b \quad (1)$$

Onde: τ_f = resistência ao cisalhamento na ruptura na condição não saturada; c' e φ' = parâmetros efetivos de resistência do solo saturado; $(\sigma_n - \mu_a)$ = tensão normal líquida; $(\mu_a - \mu_w)$ = sucção matricial; φ_b = parâmetro que quantifica o aumento na resistência devido o aumento na sucção.

A equação (1) é uma extensão da equação de resistência dos solos saturados. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), quando o solo aproxima-se do estado saturado, a pressão na

água (μ_w) aproxima-se do valor da pressão no ar (μ_a) e o termo $(\mu_a - \mu_w)$ tende a zero. Desse modo, a equação para solos não saturados reverte-se para a equação de solos saturados.

O terceiro termo da equação (1) refere-se ao aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da sucção matricial.

Fredlund e Rahardjo (1993) indicam que a matriz de sucção pode alterar o intercepto coesivo (c) da equação de resistência ao cisalhamento, fundamentada pelo critério de Mohr-Coulomb, passando, assim, a apresentar duas componentes:

$$c = c' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi_b \quad (2)$$

Alguns modelos de ajuste do intercepto de coesão em função da sucção podem ser encontrados na literatura. Vilar (2006) apresenta um modelo capaz de prever as variações de resistência de um solo não saturado com base na curva característica do material e nos seus parâmetros de resistência para as condições saturada e de umidade higroscópica. A equação proposta pelo autor é dada por:

$$c = c' + \frac{\psi}{(a + b\psi)} \quad (3)$$

Em que: c' = intercepto coesivo efetivo na condição saturada; ψ = sucção no solo para a condição de interesse; a e b = parâmetros de ajuste definidos pelas equações (4) e (5).

$$a = \frac{1}{\tan \varphi'_m} \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{c_{ult} - c'} \quad (5)$$

Sendo φ'_m a média dos ângulos de atrito efetivos para as condições de total saturação e umidade higroscópica e c_{ult} e c' são os interceptos coesivos nas condições de umidade higroscópica e saturada, respectivamente.



Esse modelo é considerado por diversos autores como o mais adequado para representação do comportamento de solos tropicais (FERNANDES, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo situa-se na cadeia montanhosa da Serra do Mar Paranaense, divisa com o estado de São Paulo. O local escolhido para amostragem é um talude de aproximadamente 230 m de altura e 45° de inclinação, o qual apresenta evidências de processos de rastejo, além de cicatrizes que indicam deslizamentos pretéritos.

Neste local, no terço superior do talude, foi coletada uma amostra de solo indeformada (Figura 1), a qual foi utilizada para a campanha de ensaios desenvolvidos neste trabalho.



Figura 1. Coleta do bloco indeformado.

A fim de conhecer as características geotécnicas da amostra, foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização física, determinação da curva característica e cisalhamento direto (inundado e não saturado).

Os ensaios de caracterização seguiram as recomendações das normas brasileiras específicas para cada ensaio. As curvas granulométricas foram obtidas com e sem o uso de defloculante. A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

As curvas granulométricas determinadas com e sem o uso de defloculante apresentaram grande variação dos percentuais de argila. No

ensaio sem agente defloculante, praticamente não houve percentual de argila. Isto ocorre principalmente porque as partículas agrupadas sedimentam mais rapidamente, indicando diâmetros maiores, que não são das partículas propriamente ditas, mas sim das agregações existentes dos elementos do solo de granulometria fina.

Tabela 1. Resumo dos resultados de caracterização física.

Propriedades	Com	Sem	
	defloculante	defloculante	
Granulometria	Pedregulho ($2 < \Phi \leq 60$ mm)	11,0	14,0
	Areia ($0,06 < \Phi \leq 2$ mm)	57,5	65,0
	Silte ($0,002 < \Phi \leq 0,06$ mm)	12,0	19,5
	Argila ($\Phi \leq 0,002$ mm)	19,5	1,5
	Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,58	
Massa específica natural (g/cm^3)	1,57		
Teor de umidade natural	18,6%		
LL	30		
LP	NP		
IP	-		

3.1 Determinação da sucção – método do papel filtro

A determinação da sucção pelo método do papel filtro seguiu as recomendações da norma ASTM D5298/2003 e as sugestões propostas por Feuerharmel (2003).

A partir do bloco indeformado coletado em campo, foram moldados 16 corpos de prova com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, tomando-se a umidade de cada amostra ao final das moldagens. Em seguida, os CPs foram deixados na estufa a 60°C por um período de 24 horas ou até a constância de massa. Após a secagem, os CPs foram umedecidos em diferentes teores de umidade com o auxílio de um conta-gotas e balança com precisão de 0,0001 g. Durante o umedecimento, esperou-se aproximadamente 1 hora para a continuidade do



ensaio para garantir que a água penetrasse na amostra.

Com dois papéis filtro do tipo Whatman nº42 (um no topo e outro na base), previamente secos e pesados, os CPs foram lacrados, com auxílio de plástico filme e papel alumínio, e acondicionados em uma caixa de isopor lacrada por um período de 15 dias, de modo a possibilitar as trocas gasosas entre a amostra e o papel filtro até atingir o equilíbrio.

Após esse período de equalização, os CPs foram abertos e os papéis filtro pesados, de modo a obter a umidade dos mesmos. Com a respectiva curva de calibração, obtiveram-se os valores de sucção associadas às respectivas umidades encontradas nos ensaios.

3.2 Cisalhamento direto

Normalmente os ensaios de resistência ao cisalhamento em solos não saturados são realizados em equipamentos que permitem manter a sucção controlada. No entanto, neste trabalho os ensaios de resistência foram realizados em amostras indeformadas variando o grau de saturação e utilizando uma prensa de cisalhamento direto convencional. A correlação com a sucção matricial foi obtida por meio da curva característica do solo.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados seguindo as recomendações de Head (1986) e da norma britânica BS 1377-7/1990, com exceção dos ensaios não saturados, que foram conduzidos sem a fase de inundação dos corpos de prova. Estes últimos foram realizados com as amostras em diferentes graus de saturação: $S=1\%$ (umidade higroscópica - $w=0,4\%$); $S=35\%$; $S=50\%$ (umidade natural - $w=18,6\%$); e $S=65\%$. Esta gama de ensaios permitiu obter a equação proposta por Vilar (2006) e ainda confrontar a validade da mesma para o solo em estudo.

Os corpos de prova foram moldados a partir do bloco indeformado em anéis metálicos com 50 mm de lado e 20 mm de altura. De modo a

seguir o mesmo procedimento realizado para os corpos de prova do ensaio de sucção, os CPs foram secos em estufa e posteriormente umedecidos até o teor de umidade desejado. Em seguida, foram lacrados e deixados em repouso por um período mínimo de 24 horas, para possibilitar o equilíbrio na distribuição da umidade interna. Deste modo, todos os ensaios seguirão a trajetória de umedecimento da curva de retenção.

Nos ensaios saturados, os CPs ficaram inundados por um período de 24 horas. A cada carregamento, observou-se um período de 24 horas de adensamento, para então proceder-se a fase de cisalhamento. De modo a estabelecer a condição de carregamento drenado, a velocidade adotada foi de 0,15 mm/min, condizente com as características do material, com deformações horizontais levadas até próximas de 10%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva Característica de Retenção de Água

O ensaio de sucção pela técnica do papel filtro permitiu definir a curva característica de retenção de água do material avaliado.

Através dos dados experimentais, observou-se que a curva apresentou dois pontos de inflexão, sugerindo uma distribuição bimodal dos poros, caso típico de solos tropicais. Deste modo, os dados amostrais obtidos foram ajustados utilizando-se a equação proposta por Gitirana & Fredlund (2004) para um intervalo de sucção variando entre 0 e 100000 kPa. A Figura 2 apresenta a curva de retenção do material para a trajetória de umedecimento.

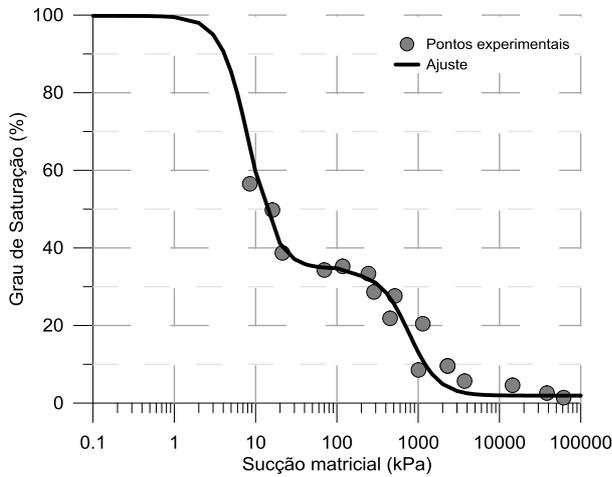


Figura 2. Curva característica de retenção de água.

O formato da curva indica três trechos distintos. Inicialmente o solo apresenta um primeiro ponto de entrada de ar, em torno de 3,5 kPa, que corresponde ao início da dessaturação dos macroporos, e um valor de umidade residual dos macroporos de 20 kPa. Depois se observa um patamar entre 50 e 200 kPa onde o grau de saturação praticamente não varia. Por último, a curva apresenta um segundo valor de entrada de ar de aproximadamente 350 kPa, correspondente a dessaturação dos microporos, e um valor de umidade residual em torno de 2000 kPa, a partir do qual a remoção de água requer o fluxo de vapor.

Para confirmar os aspectos microestruturais e as características de distribuição dos poros do solo estudado, foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em uma amostra indeformada composta por aglomerados de solo com aproximadamente 5 mm de diâmetro. A metalização da amostra foi executada empregando carbono e ouro. Na Figura 3 é apresentada uma imagem com ampliação de 1000 vezes. Observa-se claramente a formação dos microagregados que definem a distribuição bimodal dos poros.

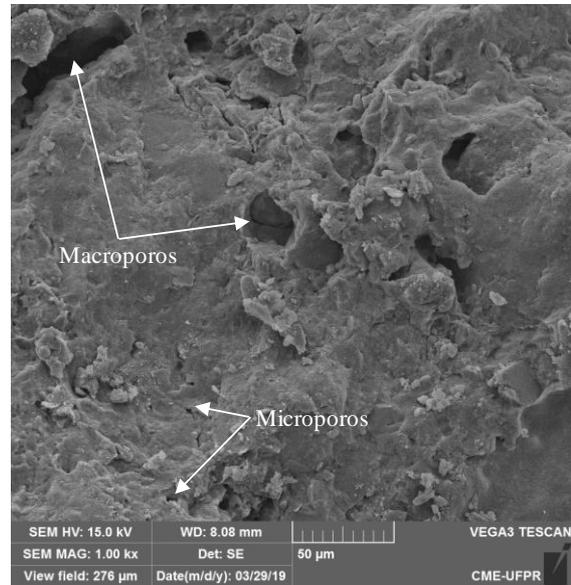


Figura 3. Imagem de MEV do solo estudado (ampliação de 1000x).

4.1 Ensaios de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos em amostras inundadas e em amostras sob diferentes graus de saturação. As Figuras 4 a 8 apresentam os gráficos com as variações de tensão cisalhante e deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal imposto pela caixa de cisalhamento ao longo do ensaio.

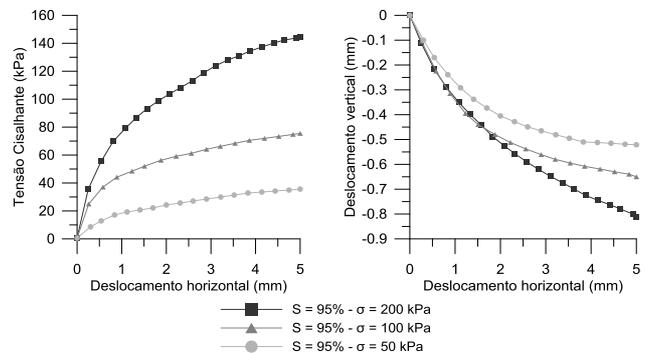


Figura 4. Variação da tensão cisalhante em relação ao deslocamento horizontal e variação do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal - S=95%.

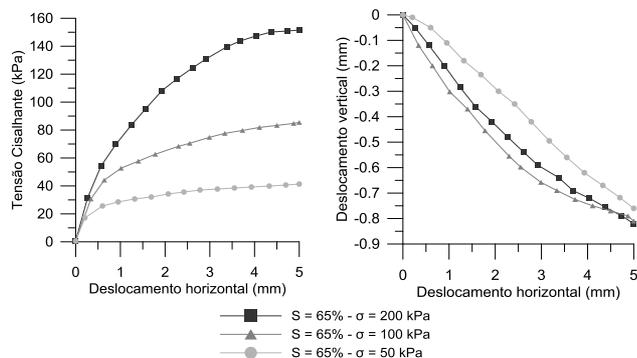


Figura 5. Variação da tensão cisalhante em relação ao deslocamento horizontal e variação do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal - S=65%.

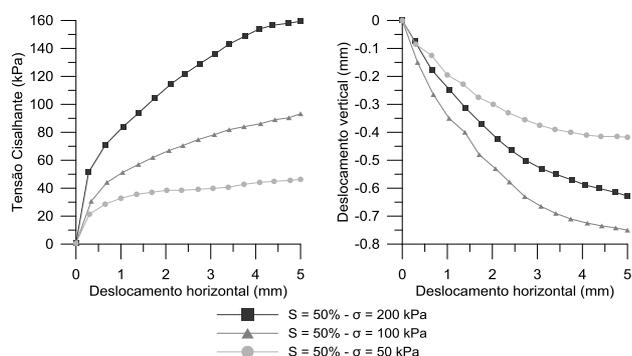


Figura 6. Variação da tensão cisalhante em relação ao deslocamento horizontal e variação do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal - S=50%.

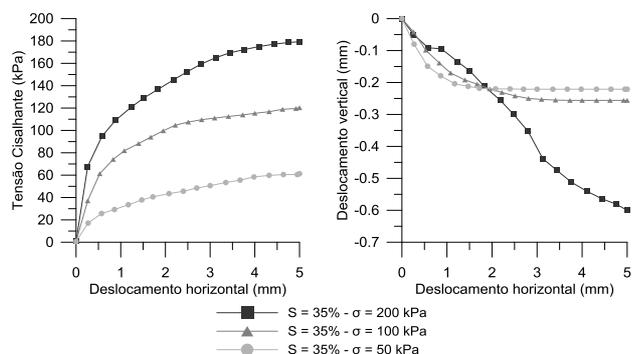


Figura 7. Variação da tensão cisalhante em relação ao deslocamento horizontal e variação do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal - S=35%.

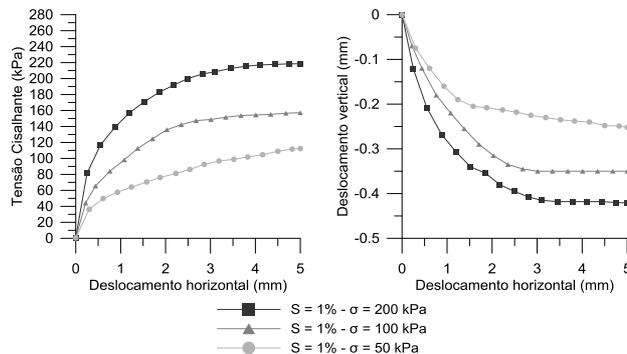


Figura 8. Variação da tensão cisalhante em relação ao deslocamento horizontal e variação do deslocamento vertical em relação ao deslocamento horizontal - S=1%.

Todas as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal apresentaram comportamento semelhante entre si. Com base nas curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal observou-se que as amostras apresentaram comportamento de compressão para todas as tensões normais avaliadas.

Os materiais ensaiados mostraram-se de comportamento dúctil, com tensão cisalhante crescente tendendo a um valor assintótico, não apresentando evidências de pico. Nesses casos, adotaram-se como tensões cisalhantes máximas aquelas referentes ao máximo deslocamento horizontal obtido (5 mm).

Na Figura 9, a envoltória de resistência das amostras inundadas (sucção matricial nula) é comparada com as envoltórias das amostras com saturação na ruptura de 65, 50, 35 e 1%. Os parâmetros de resistência foram obtidos considerando a tensão cisalhante máxima, correspondente a máxima deformação. As envoltórias foram ajustadas através de uma função linear, tendo-se obtido coeficientes de determinação próximos a 1.

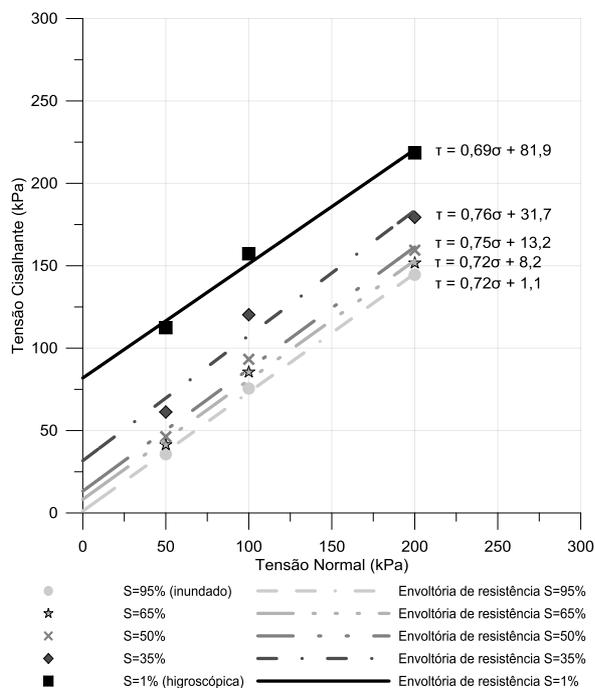


Figura 9. Envolvórias de resistência ao cisalhamento.

Analisando as envoltórias de resistência observou-se que nos ensaios inundados o solo perdeu a coesão aparente que apresentou nos ensaios não saturados. Por outro lado, o intercepto de coesão total (c') aumentou com o decréscimo da saturação, o que é explicado pelo aumento da sucção matricial na amostra. O ângulo de atrito interno praticamente não variou.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos com os ensaios de cisalhamento direto. Com base no grau de saturação final médio das amostras ensaiadas e da curva característica obtida com o método do papel filtro, fez-se uma estimativa dos valores de sucção (ψ) para cada envoltória de resistência. Deve-se destacar que a estimativa da sucção dos corpos de prova com base no teor de umidade tem suas limitações, pois existe variação de umidade dos corpos de prova no decorrer do ensaio, que consequentemente altera a sucção atuante. Contudo, para fins práticos, esta é uma alternativa razoável de se determinar a sucção nas amostras de solo.

Tabela 2. Resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

S (%)	σ_n (kPa)	τ (kPa)	c' (kPa)	Φ' (°)	ψ (kPa)
95	200	144,5	1,1	35,8	0
	100	75,5			
65	50	35,6	8,2	35,9	8
	200	151,6			
50	100	85,4	13,2	36,5	15
	50	41,3			
35	200	159,4	39,2	38,5	700
	100	93,3			
1	50	46,3	81,9	34,7	>10000
	200	179,4			
1	100	120,3	81,9	34,7	>10000
	50	61,3			
1	200	218,5	81,9	34,7	>10000
	100	157,3			
1	50	112,5	81,9	34,7	>10000
	200	218,5			

Considerando a proposta de Vilar (2006) para avaliar as alterações nos parâmetros de resistência mediante a sucção, traçou-se o gráfico apresentado na Figura 10, que relaciona a variação do intercepto coesivo com a sucção mátrica (em escala logarítmica).

Este gráfico foi obtido através da equação (3), sendo que os parâmetros de ajuste foram obtidos a partir dos dados experimentais correspondentes aos ensaios inundados e de saturação de 1%.

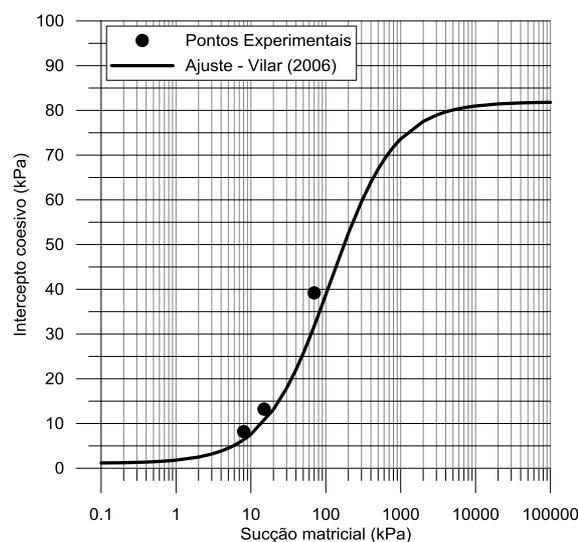


Figura 10. Variação do intercepto coesivo em relação a sucção mátrica.



Neste mesmo gráfico foram plotados os valores de intercepto de coesão *versus* sucção mátrica para as umidades intermediárias. Observa-se que os valores experimentais aproximam-se bastante da curva de ajuste, indicando que o método é válido para o solo em estudo.

É possível averiguar, por meio do gráfico apresentado, que há grande alteração do intercepto coesivo para sucções entre 10 e 1000 kPa. Para esta faixa de valores, o intercepto coesivo pode variar de 7 a 73 kPa. Esta diferença é muito relevante em diversas análises geotécnicas e o seu valor deve ser avaliado com rigor.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os resultados de uma campanha de ensaios de laboratório numa amostra de solo não saturado da região da Serra do Mar, entre os estados de São Paulo e Paraná.

Com base nesses resultados, observou-se que a curva característica apresentou comportamento bimodal, com dois pontos de entrada de ar. O primeiro correspondente à dessaturação dos macroporos e o segundo refere-se à dessaturação dos microporos.

Analisando as envoltórias de resistência ao cisalhamento, observou-se que o solo perdeu a coesão aparente quando inundado. Por outro lado, o ângulo de atrito pouco variou conforme a alteração do grau de saturação das amostras.

Com o decréscimo da saturação, o intercepto coesivo aumentou devido o acréscimo da sucção mátrica.

A equação proposta por Vilar apresentou-se válida para a análise deste solo.

Fica evidente a necessidade de se avaliar as variações nos parâmetros de resistência em condições não saturadas, de modo a subsidiar projetos de engenharia que envolvam solos com variações relevantes de saturação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS

- Fernandes, J. B., Saab, A. L., Rocha, B. P, Rodrigues, R.A., Giacheti, H. L. (2016). Resistência de um perfil de solo tropical não saturado. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Belo Horizonte.
- Feuerharmel, C. (2003). Aspectos do comportamento não saturado de dois solos coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 148 f.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. e Widger, R. A. (1978). Shear Strength of Unsaturated Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (3), p. 313-321.
- Fredlund, D. G. e Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley Inter-Science, New York.
- Gitirana Jr, G. de F. N.; Fredlund, D. G. (2004). A soil water characteristic curve equation with independent properties, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130-2, p. 209-213.
- Head, K. H. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol 3, Pentech Press Limited, London.
- Vilar, O. M. (2006). A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 8 p. 1088-1095.