

Estudo das Curvas Características de Dois Horizontes da Formação Guabirotuba

André Fardin Rosa
UTFPR, Curitiba, Brasil, andrerosaa@gmail.com

Gustavo Yoshio Matsubara
UTFPR, Curitiba, Brasil, gustavoyoshiooo@gmail.com

Juliana Lundgren Rose
UTFPR, Curitiba, Brasil, julrose@gmail.com

Carlos Nakashima
UTFPR, Curitiba, Brasil, nakashima_480@hotmail.com

Ronaldo Luis dos Santos Izzo
UTFPR, Curitiba, Brasil, ronaldoizzo.utfpr@gmail.com

RESUMO: A mecânica dos solos não saturados ainda é um meio pouco estudado em comparação à mecânica dos solos clássica. Este trabalho tem o intuito de contribuir para a abordagem não saturada dos solos. O estudo da relação entre o grau de saturação de um maciço terroso e a sucção mátrica, que é uma das principais componentes do estado de tensões dos solos não saturados, se dá por meio da curva característica de sucção. O presente trabalho consiste na análise de dois horizontes de solo presentes na formação Guabirotuba (típica da região de Curitiba), sendo o primeiro um solo areno-argiloso e o segundo areno-siltoso, ambos não uniformes e bem graduados. O equipamento utilizado para a obtenção das curvas características é o SWC-150, da CGTS. Os dados obtidos experimentalmente são analisados no software SciDAVis, onde são plotados e comparados com equações presentes na literatura, por meio do coeficiente de determinação.

PALAVRAS-CHAVE: Curva Característica de Sucção, Guabirotuba, Sucção.

1 INTRODUÇÃO

É notável que a análise dos solos em sua condição não saturada é muito recente, porém de extrema importância para a Mecânica dos Solos moderna. No Brasil, o ano tomado como referência para o estudo de solos não saturados é 1991, ano no qual foi realizado o 1º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Carvalho *et al.* (2015) ressalta que em regiões tropicais com clima semiárido, como o caso de algumas regiões do Brasil, a condição não saturada é muito significativa, pois a variação do grau de saturação modifica o comportamento mecânico,

hidráulico e volumétrico do solo presente em maciços terrosos.

A sucção mátrica é uma das principais componentes do estado de tensões efetivas em solos não saturados, ela ocorre pois a água preenche parcialmente os vazios do solo, gerando tensões negativas provenientes dos fenômenos de capilaridade e adsorção. A sucção mátrica se relaciona com o grau de saturação dos solos por meio da curva de retenção de água, também conhecida como curva característica de sucção. Por sua vez, a capacidade que o solo tem de reter água é atribuída à formação de micro e macroporos

(FEUERHARMEL, 2007).

Tendo em vista a influência que a capacidade de retenção de água no solo tem no seu estado de tensões e dada a importância que o conceito de tensões efetivas tem para a Geotecnia e, conseqüentemente, para as obras geotécnicas como um todo, este trabalho tem como intuito o estudo das curvas características de dois solos que constituem o perfil geotécnico da Formação Guabirota (formação geológica típica da região de Curitiba), a fim de auxiliar na análise da estabilidade de obras na referida região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Coleta de Amostras dos Horizontes

Para o presente trabalho foram coletadas amostras indeformadas e deformadas de dois horizontes de um talude (Figura 1) exposto em uma obra localizada na cidade de Curitiba-PR.



Figura 1. Talude do qual foi coletado o solo.

Para a coleta das amostras indeformadas, foram utilizados tubos de PVC com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Foram coletadas 4 amostras de cada horizonte, cravando o tubo de PVC no solo, retirando o excesso de solo ao redor do tubo e removendo o tubo com a amostra, envolvendo-o em papel PVC para preservar a amostra. A coleta de uma amostra indeformada pode ser observada na Figura 2.



Figura 2. Coleta de amostra indeformada.

Do mesmo local de onde foram retiradas as amostras indeformadas, foram retiradas também no mesmo dia amostras deformadas para os ensaios de caracterização do solo, estas amostras foram colocadas em sacos plásticos fechados com elásticos.

2.2 Ensaios de Caracterização

O preparo das amostras deformadas para os ensaios de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade foi realizado segundo a NBR 6457. Para a análise granulométrica foi utilizada a NBR 7181. A determinação do limite de liquidez (LL) foi feita de acordo com a NBR 6459. A determinação do limite de plasticidade (LP) foi conduzida de acordo com a NBR 7180. Foi feito também o ensaio para a determinação da massa específica real dos grãos (GS), segundo a ME 093, com a substituição do bico de gás por uma bomba de vácuo capaz de aplicar um vácuo de 88 kPa para a remoção do ar aderente às partículas de solo, ligada a um dessecador de vidro com os picnômetros em seu interior (Figura 3).



Figura 3. Ensaio GS com a utilização da bomba de vácuo.

A classificação do solo foi realizada de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

2.3 Medição da Sucção com a Técnica de Translação de Eixos (SWC-150, GCTS)

Para a determinação das curvas características de cada um dos dois horizontes, utilizou-se o técnica de Translação de Eixos, por meio do equipamento SWC-150 da GCTS. Para esse ensaio foi talhado de uma amostra indeformada um corpo de prova com 5,8 cm de diâmetro e 3,2 cm de altura, utilizando um molde metálico para envolver o corpo de prova (Figura 4).



Figura 4. Amostra indeformada sendo talhada.

Após ser talhado, o corpo de prova foi submerso em um Becker com água destilada por um período de 7 dias, envolvido por pedras porosas para que a entrada de água fosse permitida sem que fosse possível a perda de material. Passados os 7 dias, o corpo de prova foi levado para o interior da câmara de ensaio, onde foi posicionado sobre uma pedra porosa saturada (Figura 5), a câmara foi lacrada e o equipamento montado pode ser observado na Figura 6.



Figura 5. Amostra posicionada sobre a pedra porosa dentro da câmara de ensaio.

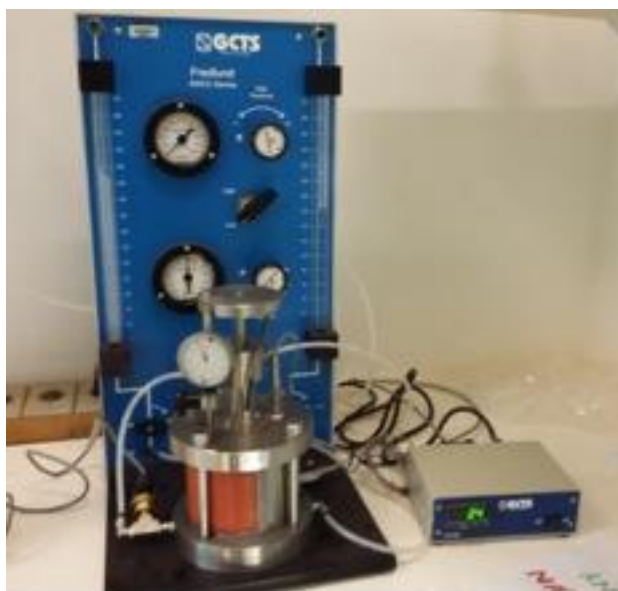


Figura 6. Equipamento SWC-150 montado.

Na câmara foi aplicada inicialmente a pressão de 1 kPa para o primeiro horizonte e 10 kPa para o segundo horizonte, esta pressão foi mantida até que não houvesse mais variação da coluna de água na bureta do equipamento. Quando o nível de água se estabilizou, indicando que não havia mais entrada nem saída de água no corpo de prova, fez-se a leitura final do nível de água em equilíbrio na bureta e do extensômetro para obter a variação de volume do corpo de prova. Após o equilíbrio, a pressão foi aumentada e foram feitas novas leituras até o equilíbrio ser atingido novamente. O processo se repetiu aumentando a pressão gradativamente

até 400 kPa. Com a leitura da estabilização, foi possível, através de correlações matemáticas utilizando o volume do corpo de prova, a densidade real dos grãos, o peso do anel e o peso da amostra, estimar o grau de saturação do corpo de prova e o percentual de água perdida devido à aplicação das pressões escolhidas.

2.4 Correlação com Equações Existentes

Para fazer a correlação dos dados adquiridos experimentalmente, foi utilizado o software SciDAVis, que possui ferramentas para ajuste de equações conhecidas através de iterações, permitindo analisar a consistência dos dados em relação às curvas teóricas pelo coeficiente de determinação (R^2).

Para a análise dos dados experimentais com as equações da literatura, partiu-se de uma hipótese unimodal, adotada devido à grande variedade de diâmetros dos grãos acusada pelo ensaio de granulometria.

As equações testadas foram retiradas da tese de Feuerharmel (2007) e foram propostas por Gardner (1958) (Equação 1), Van Genuchten (1980) (Equação 2), William *et al.* (1983) (Equação 3) e Mckee e Bumb (1984) (Equação 4). Essas equações estão entre as mais citadas em trabalhos científicos no assunto. Nas equações são definidos S como o grau de saturação da amostra, Y como a sucção, q o teor de umidade volumétrico e a , b , n e m são parâmetros de ajuste das equações.

$$S = \frac{1}{(1 + aY^n)} \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{1 + aY^n} \quad (2)$$

$$\ln(Y) = a + b \ln(q) \quad (3)$$

$$S = \exp\left(\frac{a - Y}{n}\right) \quad (4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do Horizonte 1

A partir dos ensaios de caracterização do primeiro horizonte analisado, o solo foi classificado como areno-argiloso não uniforme e bem graduado. Apresentando um limite de liquidez de 37,72%, limite de plasticidade de 24,68% e massa específica real dos grãos de 2,61.

3.2 Caracterização do Horizonte 2

A partir dos ensaios de caracterização do segundo horizonte analisado, o solo foi classificado como areno-siltoso não uniforme e bem graduado. Apresentando um limite de liquidez de 58,21%, limite de plasticidade de 48,06% e massa específica real dos grãos de 2,53.

3.3 Curva Característica de Sucção do Horizonte 1

Os pontos experimentais obtidos do ensaio de sucção para o Horizonte 1 podem ser observados na Figura 7.

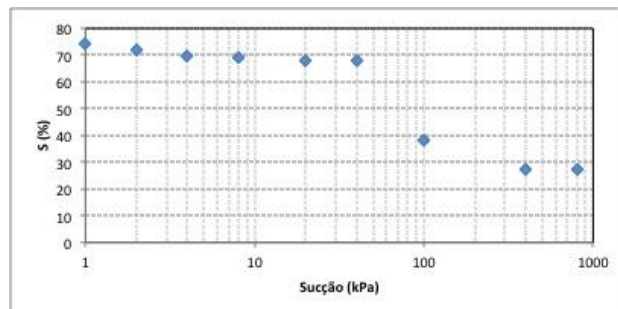


Figura 7. Pontos experimentais da curva característica de sucção, Horizonte 1.

É notável que para valores sucção inferiores à 40 kPa (ponto de inflexão), houve uma baixa variação no grau de saturação da amostra, o que é característico de curvas unimodais. Partindo da hipótese unimodal, foi considerado o trecho de 1 até 40 kPa como constante, sendo traçada uma reta passando pelo grau de saturação médio neste intervalo. Para os pontos de 40 kPa até 400 kPa, foram testadas as equações

apresentadas anteriormente, com os valores dos parâmetros encontrados e o coeficiente de determinação de cada equação apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros e coeficientes de determinação obtidos para o Horizonte 1.

Referência	Parâmetros	Coeficiente de determinação (R^2)
Gardner	$a = 0,0122$ $n = 1,0255$	0,9711
Van Genutchen	$a = 0,0484$ $n = 20,7724$ $m = 0,0286$	0,9979
William <i>et al.</i>	$a = -6,2570$ $b = -8,3606$	0,9710
Mckee e Bumb	$a = -65,1795$ $n = 220,3750$	0,8752

A partir dos coeficientes de determinação obtidos, pode-se afirmar que a equação que melhor representa os dados experimentais obtidos no laboratório é a equação proposta por Van Genutchen (1980). Na Figura 8 podem ser observados os pontos experimentais e a equação de Van Genutchen (1980) com os parâmetros apresentados na Tabela 1.

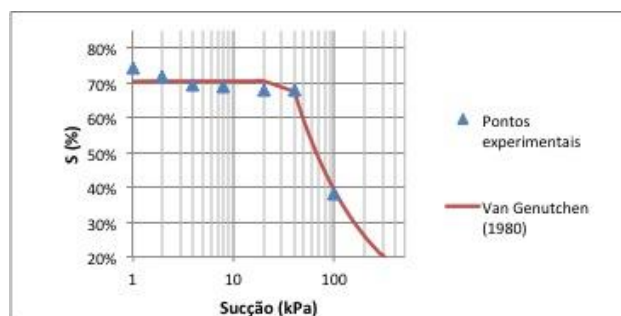


Figura 8. Equação de Van Genutchen para os pontos experimentais do Horizonte 1.

3.3 Curva Característica de Sucção do Horizonte 2

Os pontos experimentais obtidos do ensaio de sucção para o Horizonte 2 podem ser observados na Figura 9.

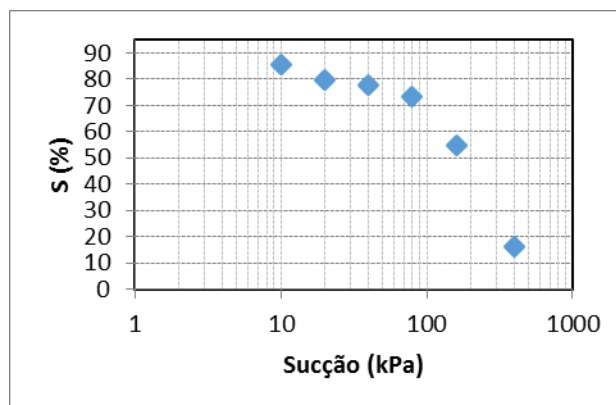


Figura 9. Pontos experimentais da curva característica de sucção, Horizonte 2.

Para o Horizonte 2, assim como para o Horizonte 1, os valores até 40 kPa foram representados por uma reta, dada a baixa variação do grau de saturação no trecho inicial. Partindo de uma hipótese unimodal para o trecho entre 40 kPa e 400 kPa, foram testadas as equações apresentadas anteriormente considerando todos os pontos obtidos, resultando nos parâmetros e coeficientes de determinação apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros e coeficientes de determinação obtidos para o Horizonte 2.

Referência	Parâmetros	Coeficiente de determinação (R^2)
Gardner	$a = 0,0013$ $n = 1,3260$	0,9408
Van Genutchen	$a = 0,0000$ $n = 0,9801$ $m = 2635,0000$	0,9718
William <i>et al.</i>	$a = 0,7343$ $b = -0,3871$	0,8360
Mckee e Bumb	$a = -11,8110$ $n = 257,7346$	0,9700

De acordo com a Tabela 2, é possível observar que a equação que melhor se relacionou com os pontos experimentais foi a proposta por Van Genutchen (1980) (Figura 10), porém, a equação proposta por Mckee e Bumb (1984) apresentou um coeficiente de determinação muito próximo ao da equação de Van Genutchen (1980).

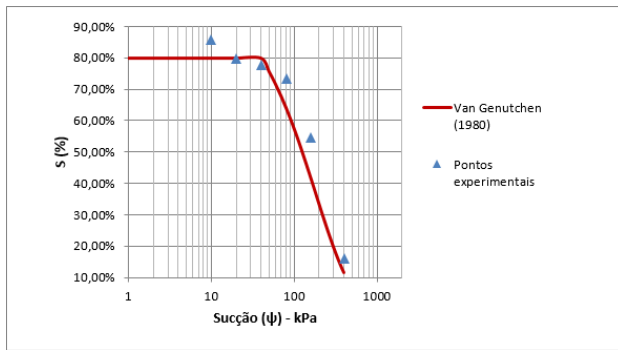


Figura 10. Equação de Van Genutchen para os pontos experimentais do Horizonte 2.

5 CONCLUSÃO

A equação que melhor representou as curvas analisadas foi a de Van Genutchen (1980), apresentando o maior coeficiente de determinação para os dois horizontes do perfil geotécnico analisado.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: *preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. NBR 6459: *determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. NBR 7180: *determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. NBR 7181: *análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.
- FEUERHARMEL, C. *Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral*. 2007. 330 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
- DE CARVALHO, J.C.; JUNIOR, G.F.N.G.; MACHADO, S.L; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C.. *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 2015.