

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO YOSHIO MATSUBARA

**ESTUDO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM HORIZONTE DO  
PERFIL GEOTÉCNICO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA**

**2015**

GUSTAVO YOSHIO MATSUBARA

**ESTUDO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PERFIL  
GEOTÉCNICO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba, sede Ecoville, como requisito parcial de obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo

**CURITIBA**

**2015**

Dedico este trabalho à memória de meu avô materno que em toda minha vida foi exemplo de inspiração, me mostrando que é possível ir mais longe com dedicação e crença nos seus ideais.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me proporcionado em todo esse percurso experiências boas e ruins que me possibilitou crescer como pessoa.

Agradeço a toda a minha família, em especial a minha irmã Denise, pelo qual sempre me deu apoio e companhia em praticamente todo esse percurso. Agradeço profundamente também aos meus pais, tios, avôs e avós que sempre me deram todo apoio incondicional.

Aos meus amigos da educação básica, que por mais distantes que estamos hoje, sempre me apoiaram e acreditaram em mim, com agradecimentos especialmente à Eduardo Kawamoto, Tiago Kussakariba, Rafael Xavier, Fernanda Yamamoto e Camila Macedo.

Aos meus amigos da universidade pelo qual me proporcionaram os melhores momentos dentro e fora da universidade e sempre me receberam de braços abertos nos momentos de dificuldade. Em especial a André Fardin, Adriano Vasconcelos, Guilherme Cunha, Thiago Vidotto, Alexandre dos Reis, Rodolfo Roque, Igor Nadu, Caio Schlogel, Matheus Palu, Thiago Deicke, Yuiti Fujiyama e Wagner Teixeira.

A todos os meus professores e não professores que me passaram conhecimentos com todos os ensinamentos que carregarei por toda vida, em especial a meus orientadores de iniciação científica e monitorias, Antônio Amilcar, Adalberto Matoski, Ronaldo Izzo e Daniella Durski. Não esquecendo também de Amanda Dalla Rosa Johann, Rogério Puppi e Juliana Rose que se propuseram a me ajudar e me apoiar nos momentos difíceis no decorrer desse trabalho. O apoio de vocês foi fundamental para conclusão desse trabalho.

Por fim gostaria de agradecer a todos que não foram mencionados que me ajudaram direta ou indiretamente a chegar à conclusão desse curso. Muito obrigado por acreditarem em mim.

O insucesso é apenas uma oportunidade para  
recomeçar com mais inteligência.

(Henry Ford)

## RESUMO

MATSUBARA, Gustavo Yoshio. **Estudo da curva característica de um horizonte da formação Guabirota**. 2015. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A mecânica dos solos não saturados ainda é uma área pouco estudada em comparação à mecânica dos solos clássica. Este trabalho tem o intuito de contribuir ainda mais para o desenvolvimento dessa área. O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi determinar a curva característica de um solo da Formação Guabirota, analisando-o em um horizonte. O solo deste perfil foi caracterizado como sendo uma areia argilosa com baixa porcentagem de matéria orgânica. A curva característica deste solo foi analisada correlacionando-a com algumas equações conhecidas. Concluiu-se que o modelo que melhor representa essa curva é a curva unimodal descrita por Van Genuchten.

**Palavras-chave:** Curva característica. Formação Guabirota. Equação da curva característica. Solos não saturados.

## **ABSTRACT**

**MATSUBARA, Gustavo Yoshio. Study of soil-water characteristic curve of one horizon of Guabirotuba Formation.** 2015. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The unsaturated soil mechanics is a neglected studied area compared to the classical soil mechanics. This work aims to contribute to the development of this area. The objective of this conclusion project of college was to determine the characteristic curve of a soil by analyzing a horizon of the Guabirotuba Formation. The soil of this profile was characterized as a loamy sand with low percentage of organic matter. The characteristic of this soil was analyzed by correlating it with some known equations. It was concluded that the model that best represents this curve is a unimodal curve described by Van Genuchten.

**Keywords:** Soil-water characteristic curve. Guabirotuba Formation. Equation of soil-Water water characteristic curve. Unsaturated soil.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de fases dos solos não saturados.....	19
Figura 2 - Ângulo de contato entre o líquido e o sólido.....	20
Figura 3 - Tipos de formas que a membrana contráctil pode assumir .....	20
Figura 4 - Demonstração do fenômeno capilar em um vaso comunicante .....	21
Figura 5 - Detalhe do líquido capilar.....	22
Figura 6 - Ascensão capilar com altura h .....	22
Figura 7 - Água capilar e adsorvida.....	23
Figura 8 - Retenção de água pelos solos após a drenagem.....	23
Figura 9 - Componentes da sucção .....	25
Figura 10 - Ilustração da definição de sucção .....	26
Figura 11 - exemplo de curva característica com a presença da histerese .....	27
Figura 12 - Curva de retenção típica com seus principais componentes.....	28
Figura 13 - Curva característica unimodal separada por estágios .....	29
Figura 14 - Provável variação de área da água nos estágios da curva característica unimodal de secagem.....	29
Figura 15 - Exemplo de curva com divisão de seus estágios .....	31
Figura 16 - Provável variação da área de água nos estágios da curva característica bimodal .....	32
Figura 17 - Esboço da curva de retenção de água com a variação do tipo de solo ..	33
Figura 18 - Esquema do aparelho de translação de eixos.....	36
Figura 19 – Exibição de dois Horizontes em um mesmo talude exposto .....	38
Figura 20 - Representação das bancadas de trabalho feita nos taludes coletados ..	39
Figura 21 - Posicionamento do tubo de PVC no corte da bancada de trabalho.....	39
Figura 22 - Armazenamento dos horizontes indeformados coletados .....	39
Figura 23 - Amostra deformada coletada em sacos plásticos .....	40
Figura 24 - Cápsulas sendo pesadas logo após a coleta para determinação da umidade <i>in situ</i> de um dos horizontes .....	41
Figura 25 - Ensaio de Granulométrico.....	42
Figura 26 – Ensaio de sedimentação .....	42
Figura 27 – Ensaio de limite de liquidez realizados .....	43
Figura 28 – Ensaio do limite de plasticidade .....	43
Figura 29 - Ensaio GS com utilização da bomba de vácuo .....	44

Figura 30 – Corpo de prova talhado com molde metálico .....	44
Figura 31 – Esquema do Becker utilizado no ensaio já drenado .....	45
Figura 32 – Pedra porosa sendo saturada dentro da dessecadora .....	45
Figura 33 – Detalhe do corpo de prova posicionado dentro do equipamento .....	46
Figura 34 – Detalhe final do equipamento montado .....	46
Figura 35 – Esquema simplificado do ensaio .....	47
Figura 36 – Extensômetro utilizado no ensaio.....	47
Figura 37 – Exemplo de entrada de dados do software Scidavis .....	48

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de medidas de sucção.....	34
Tabela 2 – Equações para curvas características unimodais com formato “S”.....	37
Tabela 3 – Valores de Interpolação para encontrar o valor de D10.....	50
Tabela 4– Valores de Interpolação para encontrar o valor de D30.....	50
Tabela 5 – Valores de Interpolação para encontrar o valor de D60.....	50
Tabela 6 – Ensaio realizados da densidade real dos grãos.....	51
Tabela 7 – Dados do ensaio do limite de plasticidade.....	52
Tabela 8 – Parâmetros encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese unimodal de trecho único.....	58
Tabela 9 - Parâmetros encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese unimodal de trecho duplo .....	59
Tabela 10 - Parâmetros encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese bimodal para os dois trechos equacionados .....	59

## LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica do solo estudado .....	49
Gráfico 2 – Gráfico obtido em laboratório do limite de liquidez do solo estudado .....	52
Gráfico 3 – Curva característica de secagem obtida .....	53
Gráfico 4 – Ajustes do modelo de Gardner (1958) .....	55
Gráfico 5 - Ajustes do modelo de Van Genutchen (1980) .....	56
Gráfico 7 - Ajustes do modelo de William et. all (1983) .....	56
Gráfico 8 - Ajustes do modelo de Mckee e Bumb (1984) .....	57
Gráfico 9 - Ajustes do modelo de Mckee e Bumb (1987) .....	58

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	OBJETIVOS .....	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos .....	15
1.2	JUSTIFICATIVA .....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	FORMAÇÃO GUABIROTUBA .....	17
2.2	MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADA.....	18
2.2.1	Fases constituintes do solo não saturado .....	19
2.2.2	Tensão superficial.....	19
2.2.3	Capilaridade.....	20
2.2.4	Adsorção.....	22
2.2.5	Retenção de água pelos solos .....	23
2.2.6	Estados de energia e potencial da água nos solos .....	24
2.2.7	Sucção no solo .....	25
2.3	CURVA CARACTERÍSTICA OU CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	26
2.3.1	Curva característica unimodal.....	27
2.3.2	Curva característica bimodal.....	29
2.3.3	Fatores que influenciam a curva característica .....	32
2.3.4	Determinação da curva característica .....	33
2.3.5	Método por translação de eixos .....	35
2.3.6	Equações existentes para curva característica .....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
3.1	HORIZONTES COLETADOS .....	38
3.1.1	Coleta das amostras indeformadas.....	38
3.1.2	Coleta de amostras deformadas .....	40
3.1.3	Teores de umidade <i>in situ</i> .....	40
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	41
3.2.1	Análises granulométricas dos solos .....	41
3.2.2	Determinação do limite de liquidez do solo .....	43
3.2.3	Determinação do limite de plasticidade do solo .....	43
3.2.4	Determinação da massa específica real dos grãos .....	43

3.3	MEDIÇÃO DA SUCÇÃO COM A TÉCNICA DE TRANSLAÇÃO DE EIXOS .....	44
3.4	CORRELAÇÃO DAS EQUAÇÕES EXISTENTES .....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
4.1	ENSAIO GRANULOMÉTRICO .....	49
4.2	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS ( $G_s$ ) .....	51
4.3	LIMITES DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE.....	51
4.4	CURVA CARACTERÍSTICA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA .....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	60
5.1	CONCLUSÃO .....	60
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

# 1 INTRODUÇÃO

Os solos possuem características próprias relacionadas à sua formação geológica. O estudo dos vários tipos de solos possibilita mapear comportamentos e desenvolver teorias com intuito de definir e equacionar suas variáveis para resolução de problemas geotécnicos.

Das (2011, p. 207) atribui o princípio da tensão efetiva desenvolvido por Terzaghi como sendo talvez o conceito mais importante da engenharia geotécnica, devido a fatores como compressibilidade e resistência ao cisalhamento apresentarem dependência em grande parte com esse parâmetro. Com o valor de tensão efetiva é possível resolver problemas como capacidade de carga dos solos, recalques de fundações, estabilidade de taludes de terra, como também pressão lateral de terra em estruturas de contenção, porém, esse princípio leva em consideração o solo totalmente saturado. Pinto (2002, p. 334) afirma que o comportamento em argilas saturadas difere das argilas não saturadas, portanto não se pode aplicar simplesmente a equação da tensão efetiva de Terzaghi em solos não saturados.

Cruz Junior et al. (2014, p. 1) destacam que um número muito grande de projetos geotécnicos levam em consideração o solo saturado como uma forma de simplificação da mecânica dos solos, como consequência disso, há o superdimensionamento de muitas dessas estruturas e, com isso, o aumento desnecessário do custo final. No Brasil, por exemplo, várias obras são executadas no regime não saturado devido à grande existência de espessas camadas de solo acima da zona de saturação. Até mesmo os solos compactados, que são comumente utilizados como solução geotécnica, desde que não associados a obras destinadas a reservas de água, poderão manter sua condição de não saturação durante a vida útil da obra independente da região que foi construída (FREITAS NETO, 2008, p. 1).

Para o estudo desses problemas, Feuerharmel (2003, p. 2) propõe que uma das principais relações constitutivas da resposta de um solo não saturado é observado através da sua curva característica, sendo que vários estudos propõem que propriedades como resistência ao cisalhamento, fluxo em solo não saturado e suas variações volumétricas podem ser previstas através da interpretação da curva característica.

O estudo das mais variadas curvas características tem grande importância no desenvolvimento de novos conhecimentos e teorias sobre os solos não saturados e, com isso, podem melhorar ou até mesmo reformular algumas teorias da mecânica dos solos clássica e moderna para se aproximar ainda mais do conhecimento dos solos para situações cada vez mais precisas.

Em função disto, este trabalho tem por objetivo determinar a curva característica do solo de um dos horizontes da Formação Guabirotuba presente na região metropolitana de Curitiba (PR).

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desse trabalho de conclusão de curso é determinar a curva característica de um solo da Formação Guabirotuba analisando-o em um horizonte.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para cumprimento dos objetivos gerais foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o ensaio de sucção baseado no princípio da translação de eixos;
- Caracterizar geotecnicamente o horizonte do solo coletado;
- Verificar através dos ensaios de caracterização a validade da curva obtida;
- Verificar se algumas das equações mais conhecidas se encaixam na curva adquirida testando a hipótese de uma curva unimodal ou bimodal.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Tendo em vista que em quase todas as obras de engenharia o solo é utilizado como base, o estudo dos mesmos proporciona ao engenheiro um conhecimento importante quando se fala de materiais que se encontram no subsolo, muitas vezes fora da superfície visível do homem. Esse conhecimento proporciona uma visão importante que pode levar a uma maior segurança na estabilidade da obra.

Para a estabilidade de uma obra, a umidade tem grande influência nas tensões efetivas do solo, sendo essa a base para grande parte dos cálculos utilizados na

mecânica dos solos, porém, o comportamento de cada solo com relação à retenção de umidade é muito variado, visto que materiais similares se comportam diferentemente quando em contato com água, em virtude de características peculiares de cada material.

O estudo da curva característica do solo da Formação Guabirota proporciona uma análise de como se dá a variação de sucção com a variação da umidade e, posteriormente, pode ser utilizado para uma análise mais precisa de como isso pode influenciar a estabilidade das obras evitando superdimensionamentos e desperdício de recursos.

Kormann (2002, p. 3) lembra, também, que a formação geológica de Curitiba denominada Formação Guabirota possui características que podem ser relacionadas com outras bacias sedimentares brasileiras como, por exemplo, as de São Paulo (SP), Taubaté (SP), Resende (RJ) e Volta Redonda (RJ), ampliando assim a importância de se estudar essa formação não mais apenas em interesse regional, mas também para o entendimento das propriedades geotécnicas de outros centros urbanos e industriais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Kormann (2002, p. 1) menciona que a região metropolitana de Curitiba se encontra sobre uma bacia sedimentar que em sua maior parte é preenchida pela unidade geológica denominada Formação Guabirota. Essa formação, segundo Salamuni (1998, p. 63), é formada predominantemente de argilitos e siltitos esverdeados com intercalações de areias arcólicas e, mais raramente, de conglomerados de oligmíticos com predominância de seixos de quartzos.

Ainda segundo Kormann (2002, p. 2), as argilas rijas e duras da Formação Guabirota são conhecidas popularmente como “sabão de caboclo”, esse nome se deve porque esse material se apresenta bastante duro em seu estado natural, porém, torna-se liso e escorregadio quando umedecido. Em casos onde esse solo é exposto à atmosfera, se manifesta um processo de ressecamento acompanhado de uma redução volumétrica, entretanto, se esse solo for novamente umedecido ocorre uma rápida desagregação favorecendo o aparecimento de processos erosivos. Durante a escavação desse tipo de solo, ele se apresenta potencialmente instável até mesmo em taludes com inclinações reduzidas, como 1:3 e 1:4, sendo comum o desprendimento de blocos de solo que trazem sérios riscos a implantação de tubulões e estacas escavadas que em regiões como Curitiba é usualmente utilizado.

Felipe (2011, p. 28) cita que as argilas alteradas e cinza-esverdeadas da Formação Guabirota são expansivas, retrativas e higroscópicas, o que lhe atribui característica de alta erodibilidade.

Pereira (2004, p. 1) define variação volumétrica como expansão ou contração de materiais potencialmente expansivos pelo ganho ou perda de água, criando assim, pressões indesejáveis nas estruturas das obras de engenharia.

Soto (2004, p. 10) lembra que as trajetórias das curvas de sucção podem ser caracterizadas e equacionadas, sendo possível, posteriormente, utilizar como vínculo ao comportamento dos solos não saturados como, por exemplo, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e mudanças de volume.

## 2.2 MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADA

A engenharia geotécnica tradicionalmente esteve focada em resolver problemas relacionados à deformação, percolação e resistência, que são fundamentadas na Mecânica dos Solos Clássica e leva em consideração o solo totalmente seco ou saturado (SILVA, 2005, p. 3).

Gomes (2007, p. 1) relembra que a teoria clássica da mecânica dos solos ocupa-se da descrição do comportamento de solos arenosos, siltosos e argilosos em condições saturada, ou, eventualmente, areia seca. Restringe-se então para materiais bifásicos. Freitas Neto (2008, p. 36) enfatiza que inúmeros pesquisadores tentaram aplicar o princípio da tensão efetiva obtidos por Terzaghi (1936) em modelos de solos não saturados sem sucesso, uma vez que os solos não saturados são mais complexos por apresentarem poros preenchidos por ar e água, e não somente por água, como é o caso dos solos saturados.

Na natureza, é bastante comum a incidência de solos que apresentam vazios preenchidos por água e ar e que, por esse motivo, possuem comportamento diverso daqueles previstos para solos saturados (GOMES, 2007, p. 1).

Segundo Georgetti (2010, p. 23), em áreas de clima tropical e subtropical são encontrados espessos perfis de solos acima da zona de saturação, o que ocasiona a execução de várias obras em solos não saturados, como é o caso de fundações, taludes de aterros e cortes, estradas e muros de contenção. O desempenho dessas obras está condicionado às características de resistência, compressibilidade e permeabilidade de solos não saturados, que se diferenciam das características dos solos saturados, por esse motivo, requerem estudo específico. Oliveira (2004, p. 1) reforça, ainda, que grande parte da superfície da Terra encontra-se em regiões áridas nas quais a evaporação excede as precipitações anuais, e que em torno de 60% da população mundial vivem nessas regiões.

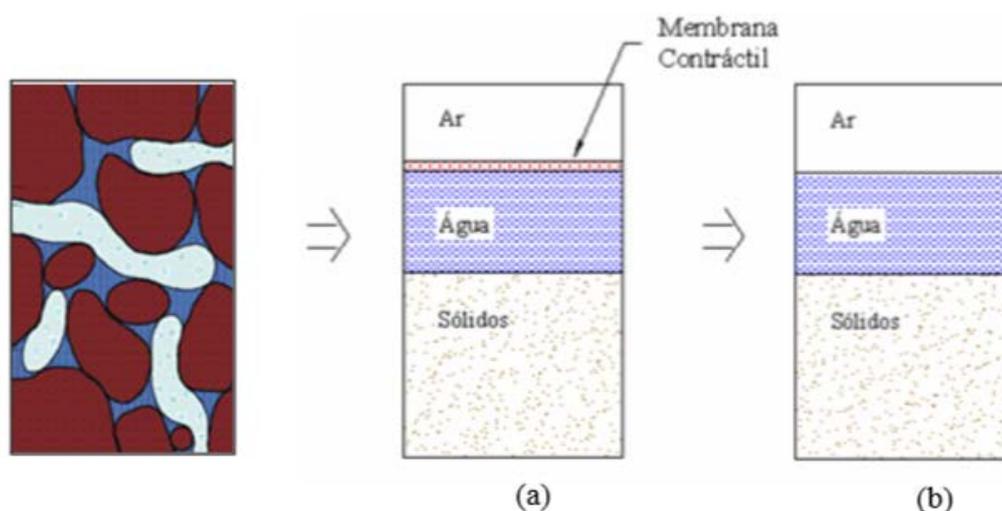
Existem três motivos significantes, segundo Feuerharmel (2003, p.5), pelos quais há essa ênfase nos solos saturados: (1) solos saturados formam sistemas bifásicos com grãos sólidos e água, o que torna mais fácil sua análise do que em um sistema multifásico, como o solo não saturado com duas fases adicionais: a fase gasosa e a camada "contráctil"; (2) a mecânica dos solos é mais avançada em regiões de clima temperado, onde o nível freático é frequentemente superficial, e, praticamente, todo solo é encontrado em condição saturada; (3) os ensaios em solos

não saturados consomem mais tempo e os procedimentos para execução ainda estão em desenvolvimento.

### 2.2.1 Fases constituintes do solo não saturado

Freitas Neto (2008, p. 5) caracteriza o solo não saturado pela ocorrência de ar em seus vazios. Silva (2005, p. 4) complementa, ainda, que o solo é constituído de três fases (sólido, líquido e gás), de tal forma que os seus espaços vazios (poros) são capazes de armazenar líquidos e gases. Porém, Fredlund e Rahardjo (1993, p. 20), adicionam às três fases uma membrana contráctil, justificando que no caso da fase ar ser contínua, a membrana contráctil passa a influenciar no comportamento mecânico dos solos. Para o caso das relações massa-volume, devido ao fato da espessura dessa membrana contráctil ser muito fina, ela pode ser desprezada.

Na Figura 1 observa-se, esquematicamente, o diagrama de solos não saturados, sendo o esquema (a) levando em consideração a membrana contráctil, e o esquema (b), simplificada, não considerando a presença da membrana contráctil.



**Figura 1 - Diagrama de fases dos solos não saturados**  
**Fonte: Silva (2005, p.4)**

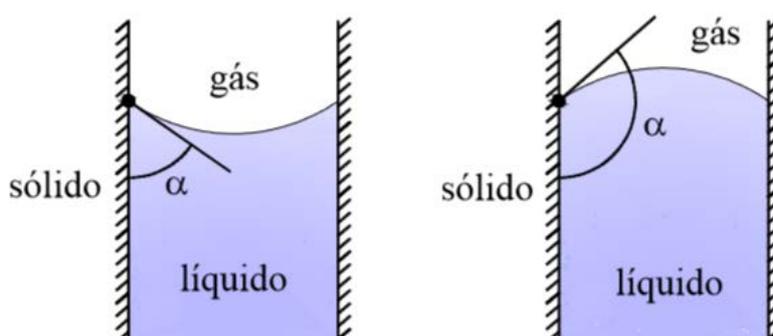
### 2.2.2 Tensão superficial

Libardi (2012, p. 17) define tensão superficial de um líquido como sendo o trabalho por unidade de área gasto para distender a superfície desse líquido. Sua medida é dada em  $N.m^{-1}$  (SILVA, 2005, p. 5).

Quando se coloca água pura em um copo de vidro limpo, consegue-se perceber que próximo da superfície da parede a água se encurva para cima. Porém, se substituirmos o líquido por mercúrio, a tendência é que o líquido se afaste do vidro.

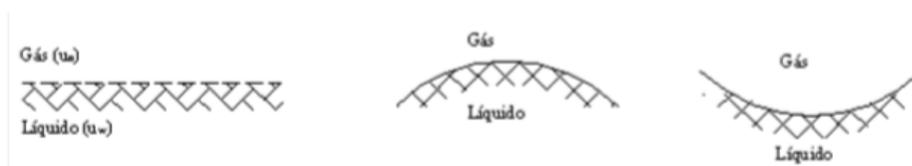
Esse fenômeno se deve a resultantes de forças moleculares das forças de coesão do líquido e a resultantes forças de adesão entre o líquido e o sólido (LIBARDI, 2005, p. 19).

Georgetti (2010, p. 30) reforça que com as forças moleculares do líquido e do meio circundante é possível determinar o ângulo que se forma entre a tangente da superfície líquida e a parede do sólido, podendo esse ângulo ser agudo, reto ou obtuso, dependendo das forças de adsorção entre as moléculas do fluido e a parede do sólido. Observa-se na Figura 2 um esquema representativo entre o ângulo que se forma tangente à superfície do líquido (representado por  $\alpha$ ) e a parede do sólido.



**Figura 2 - Ângulo de contato entre o líquido e o sólido**  
 Fonte: Georgetti (2010, p. 30)

Reichardt (1985 apud SILVA, 2005, p.9) acrescenta que em superfícies planas não existem diferenças entre os pontos imediatamente superiores e inferiores à interface líquido-gás. No caso de superfícies curvilíneas passa a existir uma diferença de pressão responsável pelos fenômenos capilares. Demonstra-se na Figura 3 os tipos de formas que a membrana contráctil pode assumir.



**Figura 3 - Tipos de formas que a membrana contráctil pode assumir**  
 Fonte: Silva (2005, p. 7)

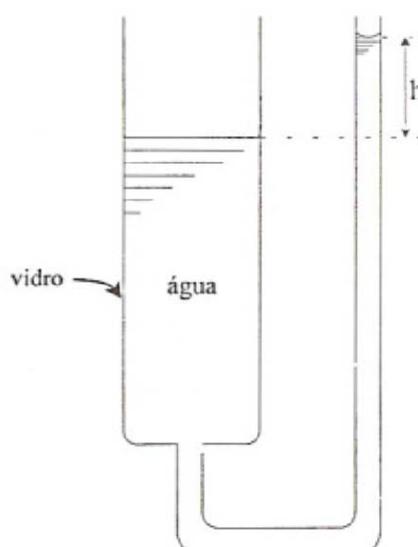
### 2.2.3 Capilaridade

Silva (2005, p. 9) diz que devido à tensão superficial a superfície contrai e deixa de ser plana, gerando um diferencial de pressão entre as duas faces, produzindo o

fenômeno de capilaridade, fazendo com que ocorra uma ascensão capilar de forma a equilibrar as forças na direção vertical.

Sabe-se da hidrostática que quando se preenche vários vasos comunicantes com um determinado líquido, este sempre atinge a mesma altura em todos os ramos. Porém, para tubos de pequenos diâmetros, chamados de tubos capilares, esta afirmação não é verdadeira devido aos fenômenos relacionados com a tensão superficial do líquido em contato com a parede sólida, denominado fenômenos capilares (LIBARDI, 2005, p. 27).

Demonstra-se na Figura 4 a diferença de altura, simbolizada pela letra  $h$ , devido aos fenômenos capilares.



**Figura 4 - Demonstração do fenômeno capilar em um vaso comunicante**

**Fonte: Libardi (2005, p. 27)**

Libardi (2012, p. 27) lembra que os fenômenos capilares são explicados pela fórmula de Laplace. Para o caso específico de superfícies tridimensionais esféricas, a equação de Laplace fornece a equação (1):

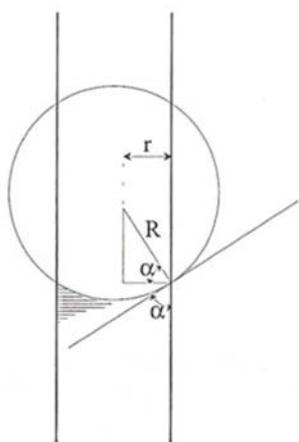
$$\rho = 2\sigma/R \quad (1)$$

Em que  $\rho$  é o diferencial de pressão,  $\sigma$  é a tensão superficial, que depende do líquido e da temperatura, e  $R$  é o raio de curvatura da superfície.

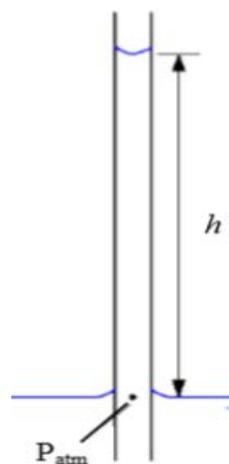
A ascensão capilar pode ser obtida pelo equilíbrio de forças verticais atuantes na água interna ao tubo (GEORGETTI, 2010, p. 30). Assumindo a curvatura do menisco como esférica tem-se a equação (2):

$$h = \frac{2\sigma \cos\alpha}{(\rho_1 - \rho_2)gr} \quad (1)$$

Em que  $h$  é altura de ascensão capilar,  $\sigma$  é tensão superficial,  $\alpha$  é o ângulo de contato entre o sólido e o líquido,  $\rho_1$  é a massa específica do líquido,  $\rho_2$  é a massa específica do meio em que o líquido está imerso,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $r$  é o raio do tubo capilar. Se o meio líquido for água, e o meio em que a água está imersa for o ar, a densidade do ar se torna muito pequena em relação a da água, portanto, pode ser desprezada (LIBARDI, 2012, p. 30). Observa-se na Figura 5 o detalhe do líquido capilar, e na Figura 6 a ascensão capilar, com altura chamada de  $h$ .



**Figura 5 - Detalhe do líquido capilar**  
Fonte: Libardi (2012, p. 29)

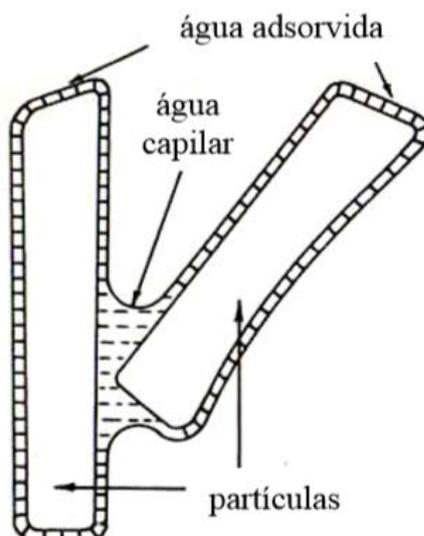


**Figura 6 - Ascensão capilar com altura  $h$**   
Fonte: Georgetti (2010, p.31)

#### 2.2.4 Adsorção

A adsorção é um processo de retenção de água nos solos como filmes presos a ele. É importante reforçar que, nesses casos, essa película de água adsorvida, representa uma energia potencial extra, uma vez que se afastarmos uma determinada porção dessa película, a uma distância dentro do raio de ação destas forças, e abandonarmos, ela voltará a posição original (LIBARDI, 2012, p. 42).

Observa-se na Figura 7 a partícula sólida retendo água por adsorção e capilaridade.

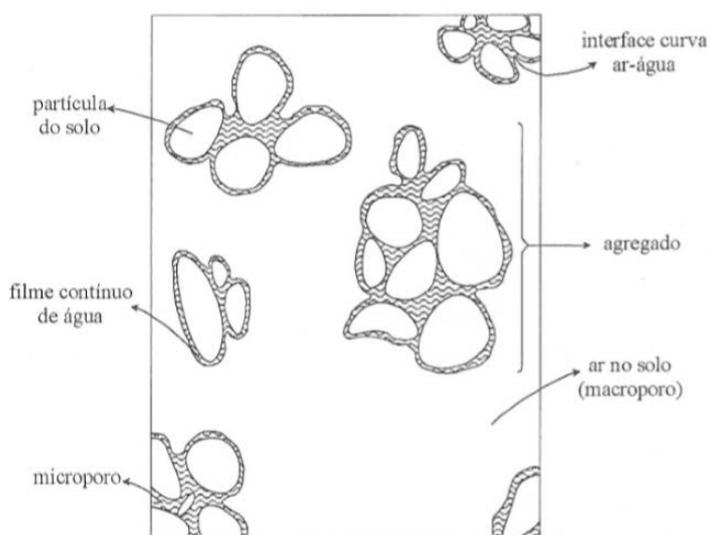


**Figura 7 - Água capilar e adsorvida**  
**Fonte: Hillel ,1971 (apud GEORGETTI, 2010, p. 32)**

#### 2.2.5 Retenção de água pelos solos

Quando o solo é drenado, o ar entra para substituir os espaços porosos, formando, assim, o solo não saturado. Esta saída de água dos poros faz com que ocorra a formação de interfaces ar-água resultantes de processos de retenção da água pela matriz do solo (LIBARDI, 2005, p. 41).

Nota-se na Figura 8 a retenção de água no solo após a drenagem.



**Figura 8 - Retenção de água pelos solos após a drenagem**  
**Fonte: Libardi (2005, p. 42)**

Verifica-se, então, que há dois tipos principais de forças que operam na matriz do solo para retenção de água: as forças capilares e de adsorção, que juntas são chamadas de forças mátricas que darão origem ao potencial matricial. Dessa maneira, é possível expressar a afinidade do solo pela água como equivalente a uma altura de ascensão capilar da água num tubo capilar (LIBARDI, 2005, p.43).

#### 2.2.6 Estados de energia e potencial da água nos solos

A água no solo pode ser caracterizada por um estado de energia, assim como qualquer corpo na natureza, podendo ser esta determinada de diferentes formas e quantidades (SILVA, 2005, p. 12).

Ainda, Silva (2005 p. 12) relembra que a física clássica reconhece duas formas principais de energia, sendo elas a cinética e potencial, porém, como o movimento da água no solo é, em geral, muito lento, pode-se desprezar a energia cinética.

Soto (2004, p. 4) afirma que o potencial de água em um solo pode ser definido em termos de energia por unidade de massa ( $J \cdot kg^{-1}$ ). Sendo o potencial total dado pela equação (3):

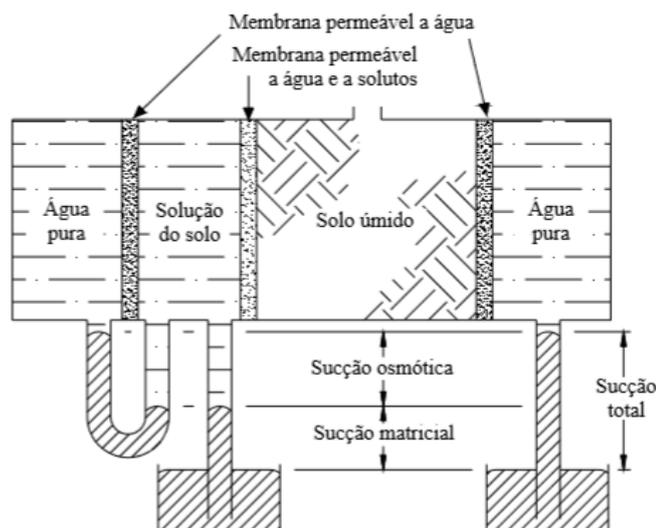
$$\Phi = \Phi_g + \Phi_p + \Phi_{osm} + \Phi_m \quad (2)$$

Onde  $\Phi$  é o potencial total,  $\Phi_g$  é o potencial gravitacional,  $\Phi_p$  é o potencial pneumático,  $\Phi_{osm}$  é potencial osmótico,  $\Phi_m$  representa o potencial matricial.

Com isso, Soto (2004, p. 5) define os potenciais como:

- Potencial gravitacional como sendo energia potencial equivalente do campo gravitacional, que é medido a partir de um referencial de posição;
- Potencial pneumático é originado de pressões externas de gás diferentes da pressão atmosférica;
- Potencial osmótico derivado da diferença de composição entre sais minerais e substâncias orgânicas da água no solo e da água pura;
- Potencial Matricial decorre do efeito combinado das forças capilares e de adsorção.

Pode-se analisar na Figura 9 um esquema geral dos componentes da sucção no solo.



**Figura 9 - Componentes da sucção**  
**Fonte: Hillel (1971 apud GEORGETTI, 2010, p. 28)**

### 2.2.7 Sucção no solo

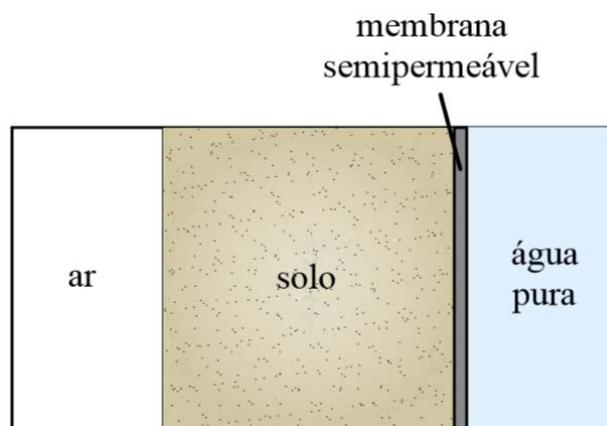
Freitas Neto (2008, p. 9) define sucção do solo como sendo a pressão manométrica negativa que deve ser aplicada a um reservatório de água pura de forma que se mantenha o equilíbrio, através de uma membrana semipermeável, entre a água do reservatório e a água do solo.

Ao se admitir que não haja nenhum processo de adensamento, e que o ar no interior dos poros está ligado com a atmosfera, os potenciais pneumático e gravitacional podem ser desprezados no âmbito geotécnico (FREITAS NETO, 2008 p. 9). Silva (2005, p. 16), então, menciona que nesses casos em que o potencial gravitacional e pneumático não interfere no comportamento dos solos, a sucção total é a soma das parcelas matricial e osmótica.

A sucção matricial está diretamente ligada à estrutura do solo, pois representa a afinidade por água que o solo manifesta na ausência de gradiente de concentração de sais (GOMES, 2007, p. 23).

Weber (2013, p. 25) lembra que a sucção matricial é basicamente uma quantidade de energia que avalia a capacidade do solo de reter água. Quando a água livre migra pelo interior do solo não saturado a água será retida ou adsorvida, e para desprender essa água é preciso aplicar uma força externa. O valor dessa energia por unidade de volume de água é a sucção. Silva (2005, p. 16) reforça, ainda, que para um solo saturado, a sucção matricial e a adsorção são nulas.

Constata-se na Figura 10 a definição de sucção.



**Figura 10 - Ilustração da definição de sucção**  
**Fonte: Georgetti (2010, p. 29)**

### **2.3 CURVA CARACTERÍSTICA OU CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA**

Feuerharmel (2003, p. 6) define a curva característica como uma função que correlaciona o volume de água dentro dos poros do solo com a energia necessária para retirada dessa água.

Na visão de Santos (2004, p. 6), a curva característica é a relação entre a sucção e o teor de umidade ou grau de saturação do solo. Podendo esse teor de umidade ser o gravimétrico, que é a relação entre a massa de água e a massa de solo seco, ou volumétrico, pelo qual ocorre a relação entre o volume de água e o volume total de solo.

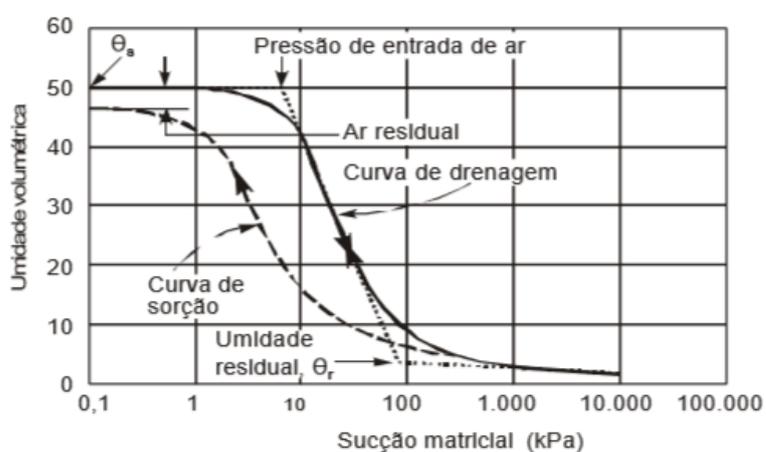
Georgetti (2010, p. 33) explica que a curva de retenção de água é obtida a partir de trajetórias típicas de umedecimento e secagem das amostras dos solos. Na secagem, a amostra é saturada e submetida a potenciais matriciais crescentes, diminuindo, assim, a umidade do solo. Já no umedecimento, a amostra seca é submetida a potenciais matriciais decrescentes do solo, causando um aumento na umidade do solo. Quando se compara curvas de retenção obtidas por ambos os procedimentos para um mesmo solo, a curva de secagem apresenta umidades mais elevadas em relação à curva de umedecimento, para uma mesma sucção.

Cândido et al. (2014, p. 2) reforçam que a curva de retenção obtida em laboratório, seguindo trajetórias de umedecimento e/ou secagem, proporcionam curvas não coincidentes devido à histerese presente nas curvas de sucção.

A explicação do fenômeno da histerese pode ser atribuída, segundo Hillel (1971 apud SILVA, 2005, p. 32) e Reichart (1985 apud SILVA, 2005, p. 32), à alguns motivos principais, que seriam:

- Geometria não uniforme dos poros devido a suas formas irregulares e interconectadas;
- Efeito do ângulo de contato que pode ser causado por uma superfície rugosa, presença e distribuição de alguma impureza adsorvida na superfície do solo, e pelo mecanismo no qual as moléculas de líquidos são adsorvidas ou drenadas quando a interface é deslocada;
- Ar ocluso que são as bolhas que permanecem nos macroporos causando decréscimo do teor de umidade;
- Fenômenos de expansão que resultam em mudanças diferenciais na estrutura do solo, dependendo do histórico de umedecimento e secagem do solo.

A Figura 11 é um exemplo de curva característica na qual pode ser observado o fenômeno da histerese.

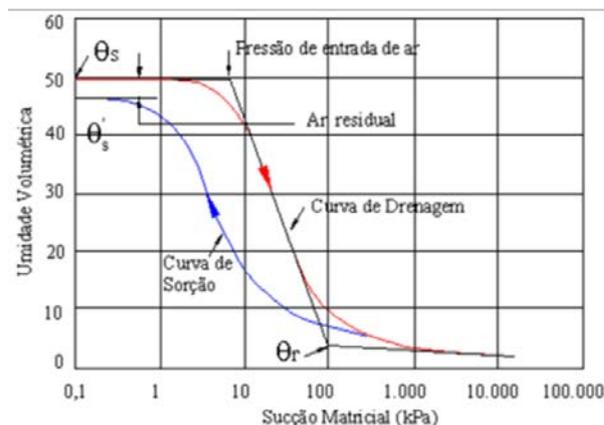


**Figura 11 - exemplo de curva característica com a presença da histerese**  
**Fonte: Santos (2004, p. 20)**

### 2.3.1 Curva característica unimodal

Feuerharmel (2007, p. 41) afirma que a maioria das curvas características na literatura geotécnica apresentam forma unimodal, ou seja, curva formada por um formato em “S”.

Fredlund e Xing (1994 apud SILVA, 2005, p. 24) apresentam, na Figura 12, uma curva de retenção unimodal típica com seus principais componentes.



$\theta_s$  – Teor de umidade volumétrica de saturação obtida através do processo de drenagem;

$\theta'_s$  – Teor de umidade volumétrica de saturação obtida pelo processo de umedecimento;

$(\theta_s - \theta'_s)$  – conteúdo de ar residual entre processos de drenagem e umedecimento;

$\theta_r$  – teor de umidade volumétrica residual, pelo qual o efeito de sucção para causar drenagem adicional na fase líquida diminui e a remoção de água requer migração do vapor;

Pressão de entrada de ar - representa o diferencial de pressões entre água e o ar necessário para causar drenagem do maior poro do solo.

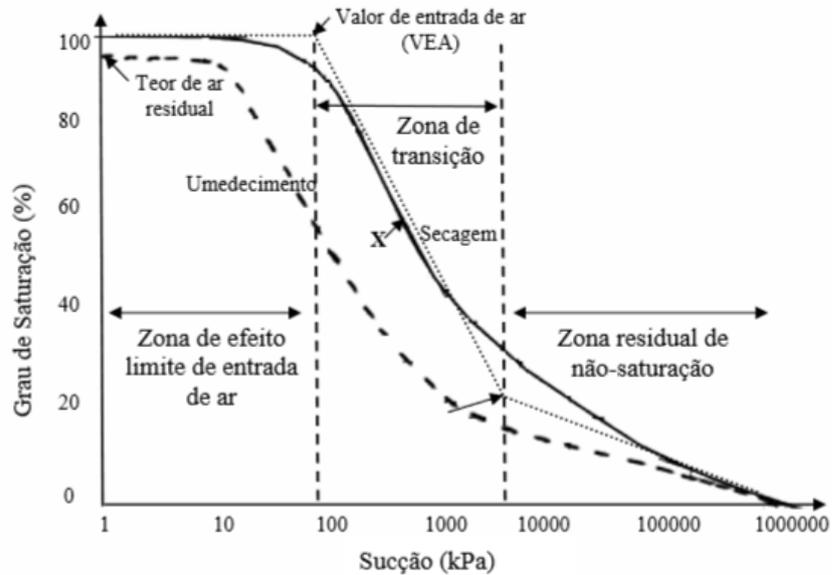
**Figura 12 - Curva de retenção típica com seus principais componentes**

Fonte: Fredlund e Xing (1994 apud SILVA, 2005)

Segundo Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999, p. 145), a curva característica unimodal pode ser dividida em três estágios de secagem que podem ser observados na curva de retenção:

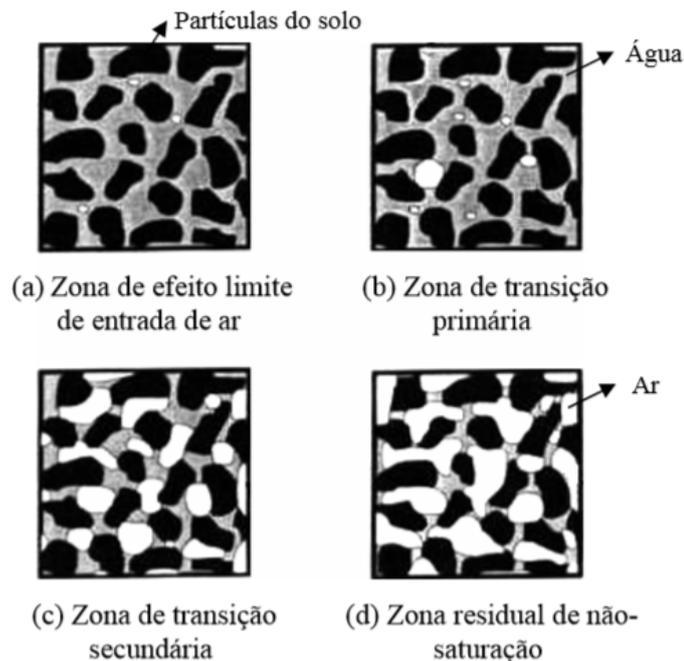
- Primeiro estágio: chamado de zona de efeito limite de entrada de ar. Tem como significado o valor de entrada de ar, e é onde todos os poros estão preenchidos por água;
- Segundo estágio: chamado também de fase de transição, que é quando se tem o fluxo de água em fase líquida, ocorrendo o aumento da sucção aplicada e, assim, ocorre a drenagem do solo. Fuerharmel (2007, p. 42) divide essa fase em zona de transição primária e secundária, sendo essa divisão feita a partir do ponto de inflexão da reta na zona de transição (simbolizado como X Figura 13);
- Terceiro estágio: chamado de fase residual de drenagem ou zona residual de não saturação, onde a continuidade da água nos vazios é bastante reduzida e descontínua, fazendo com que um aumento na sucção leve a pequenas mudanças no grau de saturação do solo.

Verifica-se na Figura 13 a curva característica de secagem dividida por estágios.



**Figura 13 - Curva característica unimodal separada por estágios**  
**Fonte: Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999)**

Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999) demonstram, na Figura 13, a possível variação de áreas nos estágios da curva característica de secagem.



**Figura 14 - Provável variação de área da água nos estágios da curva característica unimodal de secagem**  
**Fonte: Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999)**

### 2.3.2 Curva característica bimodal

A forma da curva característica de secagem (dessaturação) de grande parte dos solos de origem residual ou sedimentar encontrado em regiões de clima tropical e subtropical sugere uma distribuição bimodal de tamanho de poro, devido à sua

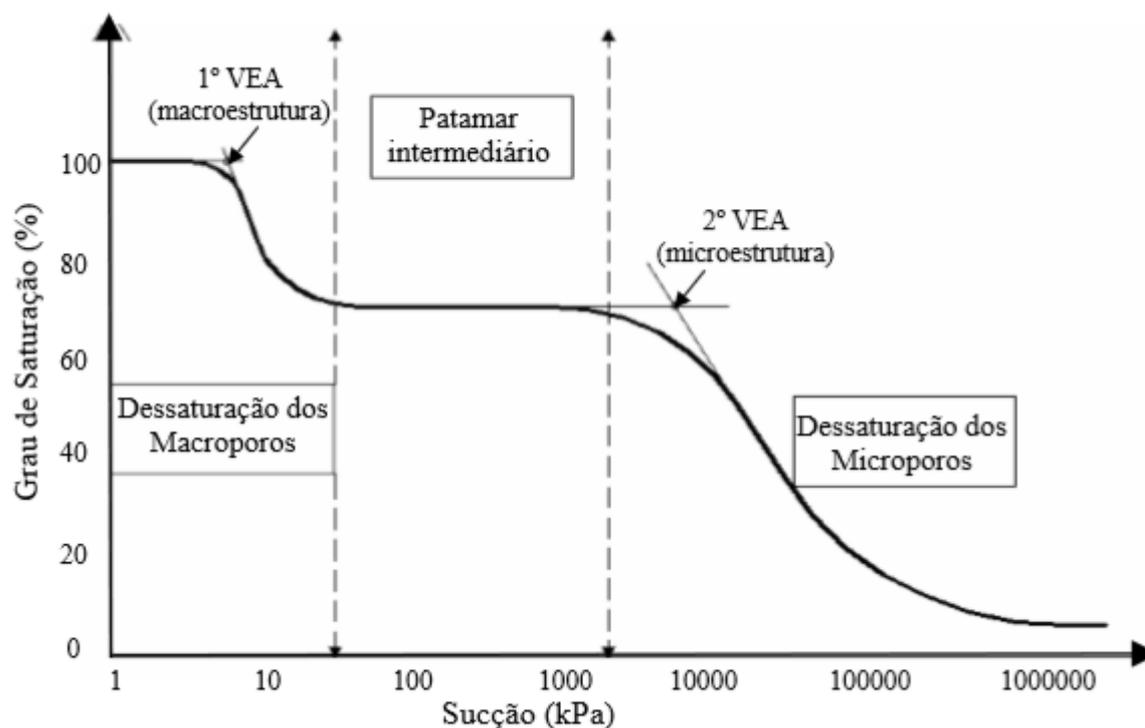
macroestrutura e microestrutura bem definidas (FEUERHARMEL et al., 2006 apud FEUERHARMEL, 2007, p.44).

Para Feuerharmel (2005 apud FEUERHARMEL, 2007, p. 44) esse tipo de curva característica sugere uma distribuição bimodal de tamanho de poros, sendo macroporos entre os grãos de argila e os microporos no interior deles.

Feuerharmel (2007, p. 45) divide esse tipo de curva característica em três estágios, sendo eles:

- Estágio de secagem (dessaturação) dos macroporos: nesse estágio, os macroporos e os microporos se encontram em condição saturada até que se atinja o primeiro valor de entrada de ar (1° VEA) que identifica o momento em que o ar começa a penetrar nos macroporos, sendo que no final desse trecho a estrutura se encontra não saturada com a água remanescente dentro dos agregados de argila;
- Patamar intermediário: nesse estágio, o teor de umidade permanece, aproximadamente, constante com o acréscimo de sucção. Esse patamar é associado à ausência de poros intermediários nesse tipo de solo, como mostrado na Figura 15. Esse estágio chega ao fim no momento em que a sucção excede a capacidade de retenção de água dos microporos;
- Estágio de secagem (dessaturação) dos microporos: essa zona se inicia com valor de sucção próximo ao segundo valor de entrada de ar (2° VEA) o qual está associado a entrada de ar nos microporos. A contínua redução que é observada está associada à remoção de água do interior dos agregados de argila.

A Figura 15 demonstra um exemplo de curva bimodal de drenagem dividida em estágios.



**Figura 15 - Exemplo de curva com divisão de seus estágios**  
 Fonte: Feuerharmel et al., 2006 (apud FEUERHARMEL, 2007, p. 44)

Feuerharmel et al. (2005 apud FEUERHARMEL, 2007, p.45) apresentam, na Figura 16, as prováveis distribuições na área de água nos estágios da curva característica bimodal.

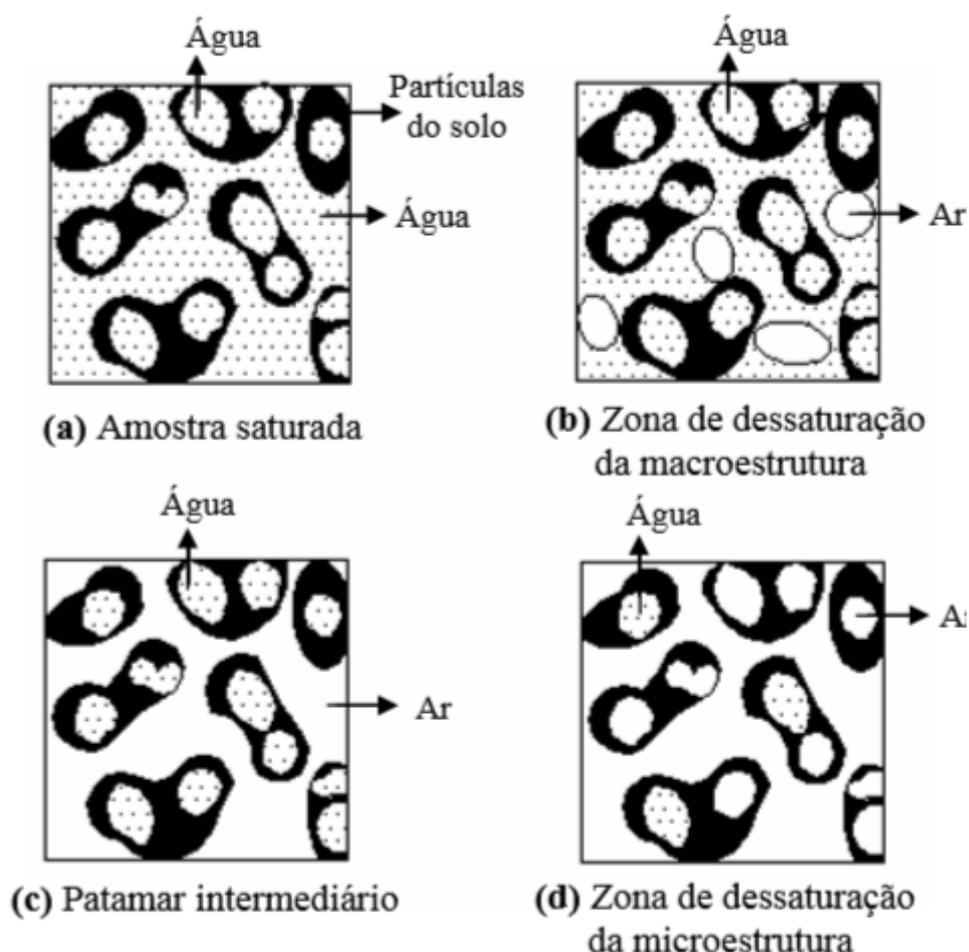


Figura 16 - Provável variação da área de água nos estágios da curva característica bimodal

Fonte: Feuerharmel et al.,2006 (apud FEUERHARMEL, 2007, p. 44)

### 2.3.3 Fatores que influenciam a curva característica

Estudos de Vanpalli, Fredlund e Pufahl (1999, p. 158) demonstraram que para o caso de solos mais secos a sucção será controlada pela macroestrutura, e para solos mais úmidos, a sucção terá maior influência da microestrutura, sendo a microestrutura mais resistente à secagem, exigindo assim sucções mais altas. Amostras com maiores teores de umidade inicial apresentarão inclinações mais suaves quando comparadas com amostras moldadas com umidade abaixo da umidade ótima.

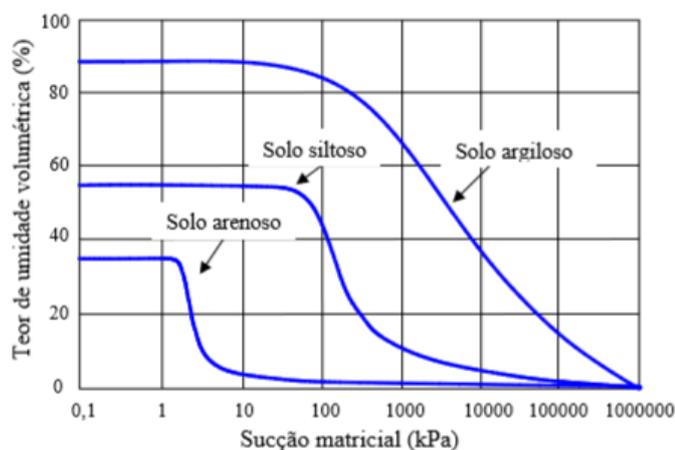
De uma forma em geral, a geometria dos poros, magnitude e composição mineralógica da fração fina são de suma importância na posição relativa, inclinação e forma da curva de retenção (Soto, 2004, p. 10).

No caso da compactação, Silva (2005, p. 28) menciona que a sucção aumenta com o decréscimo do tamanho dos poros, com isso, com o aumento no esforço de

compactação, ocorre uma diminuição do tamanho dos poros levando a curva de retenção às porções superiores no gráfico.

Para solos de granulometria mais grossa, como areias e pedregulhos, que contêm grandes poros interconectados, apresentam uma brusca variação no grau de saturação, ou seja, a curva de retenção apresenta-se mais íngreme. Já os solos com teor maior de argilas, existe a tendência de apresentar uma curva mais suave e, conseqüentemente, uma capacidade maior de armazenar água. No caso dos solos siltsos, estes possuem um comportamento intermediário (Feuerharmel, 2003, p. 13).

A posição relativa da curva de retenção obedece geralmente à ordem da plasticidade do solo, sendo que os que têm maior plasticidade estão acima dos solos de menor plasticidade, como mostrado na Figura 17. Esse pode ser então, um indicativo da fração de argila (Silva, 2005, p. 26).



**Figura 17 - Esboço da curva de retenção de água com a variação do tipo de solo**

Fonte: Fredlund e Xing, 1994 (apud FEUERHARMEL, 2004, p. 20)

#### 2.3.4 Determinação da curva característica

Existem várias técnicas para determinação da curva característica, existindo equipamentos que fazem medidas diretas e indiretas de sucção.

A vantagem da medição de sucção por métodos diretos é ter a capacidade de medir pressões negativas e positivas. Já as medidas indiretas de sucção são normalmente realizadas com a utilização de um tensiômetro, sendo que essas se baseiam na calibração de um parâmetro prontamente disponível e a sucção do solo (FREITAS NETO, 2008, p. 14).

São expostos na Tabela 1 os métodos de medidas, faixa de medida, tipo de sucção medida e algumas observações sobre os métodos mais usuais para a determinação da curva característica.

**Tabela 1 - Métodos de medidas de sucção**

<b>Método de Medida/ Tipo de Sucção</b>	<b>Faixa de Medida (kPa)</b>	<b>Observações</b>
		(Continua)
Blocos porosos (matricial)	10 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos como gesso, fibra de vidro e etc., bem como da resistência elétrica (ohms x Sucção);</li> <li>• Desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções;</li> <li>• Tempo de Equilíbrio: Semanas.</li> </ul>
Equilíbrio da fase vapor (total)	Toda a faixa acima de 400	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solução com concentração conhecida; Umidade relativa; sucção total;</li> <li>• Amostras de solo em dessecador sem contato com a solução até o equilíbrio de peso;</li> <li>• Tempo de equilíbrio demorado</li> </ul>
Extrato da solução do solo (osmótica)	Todos os valores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condutividade elétrica do extrato da solução;</li> <li>• Concentração de solutos;</li> <li>• Extratos + psicômetros: Resultados precários</li> </ul>
Funil de pedra porosa (matricial)	0 a 90	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sucção aplicada diretamente à amostra</li> <li>• Indicado para determinar baixas sucções (Libardi, 1995); Tempo de Equilíbrio: Horas</li> </ul>
Membrana de pressão	até 10000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emprega a técnica da translação de eixos;</li> <li>• Emprega membrana de celulose</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Dias</li> </ul>
Papel filtro com e sem contato (matricial/total)	30 a 30000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende do contato com o solo, que, por sinal deve ser garantido;</li> <li>• Necessita calibração do papel;</li> <li>• Evitar formação de fungos nos papéis mais umedecidos</li> <li>• Pesagem com precisão de 0,0001g;</li> <li>• Tempo de equilíbrio de 7 a 30 dias</li> </ul>
Placa de pressão (matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emprega a técnica de translação de eixos;</li> <li>• Depende da pressão de entrada de ar na pedra porosa;</li> <li>• Continuidade da fase ar;</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Horas</li> </ul>
Princípios osmóticos (matricial)	200 a 1600 (peg 20000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva;</li> <li>• Solução de Polietileno Glicol (PEG), peso molecular 20000;</li> <li>• Útil para instalar e controlar sucção em ensaios;</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Horas.</li> </ul>

(continuação)

<b>Método de Medida/ Tipo de Sucção</b>	<b>Faixa de Medida (kPa)</b>	<b>Observações</b>
Psicrômetros (total/osmótica)	100 a 8000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de rigoroso controle de temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório;</li> <li>• Sucção osmótica: mede sucção de extrato da solução do solo (Confiabilidade precária)(Fredlund; Rahardjo, 1993);</li> <li>• Tempo de Equilíbrio: Minutos.</li> </ul>
Tensiômetro padrão (matricial)	0 a 100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de resposta: Depende da condutância da pedra porosa e sensibilidade do elemento de medida;</li> <li>• Existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos;</li> <li>• Tempo de equilíbrio: Minutos.</li> </ul>
Tensiômetro de alta capacidade (tac) * (matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medem sucção abaixo de - 1atm; até uma sucção de 1500kPa;</li> <li>• Tiram partido da elevada resistência à tração da água (Ridley; Burland, 1993) e tem curto tempo de resposta.</li> </ul>

**Fonte: Adaptado de Vilar, 2006 (apud FREITAS NETO, 2008, p. 15)**

Nesta revisão bibliográfica será dada ênfase no método placa de pressão (matricial), mencionado como sendo o sétimo método da Tabela 1 pelo qual serão realizados os ensaios, além de ser, segundo Freitas Neto (2008, p. 15) uma das técnicas mais difundidas no âmbito de medidas de sucção em solos não saturados.

### 2.3.5 Método por translação de eixos

A essência dessa técnica está na mudança de referencial de pressão, ou seja, consegue-se aumentar a pressão do ar que, conseqüentemente, faz com que ocorra o aumento de pressão da água, com isso, a sucção permanece constante e faz com que ambos os valores sejam elevados a valores mensuráveis dos equipamentos de medidas (FREITAS NETO, 2008, p. 20).

Para realização desse ensaio é necessário contar com placas porosas que permitem fluxo de água, porém não de ar. A sucção máxima a ser aplicada é dependente da pressão de entrada de ar das placas porosas, e pode atingir pressões de até 1500 kPa (SOTO, 2004, p. 14). Essa técnica previne a ocorrência de poro-pressão menor que o zero absoluto, evitando assim a cavitação da água no sistema (FEUERHARMEL, 2007, p. 57).

Soto (2004, p.16) ressalta que o corpo de prova é colocado em contato direto com placa porosa, e ambos se encontram saturados para o processo de secagem.

Para cada estágio é imposto uma pressão de ar equivalente à sucção desejada, assim, após eliminação parcial de água da amostra através da placa porosa é atingido um equilíbrio de sucção do solo. A variação de umidade em cada estágio da sucção é registrada pela medida de uma bureta graduada.

O equipamento possui controle de temperatura de forma a evitar a variação do volume da água que ocasionaria um aumento ou diminuição nos diâmetros dos poros, afetando assim a sucção.

Observa-se na Figura 18 um esquema das partes componentes do método da translação de eixos.

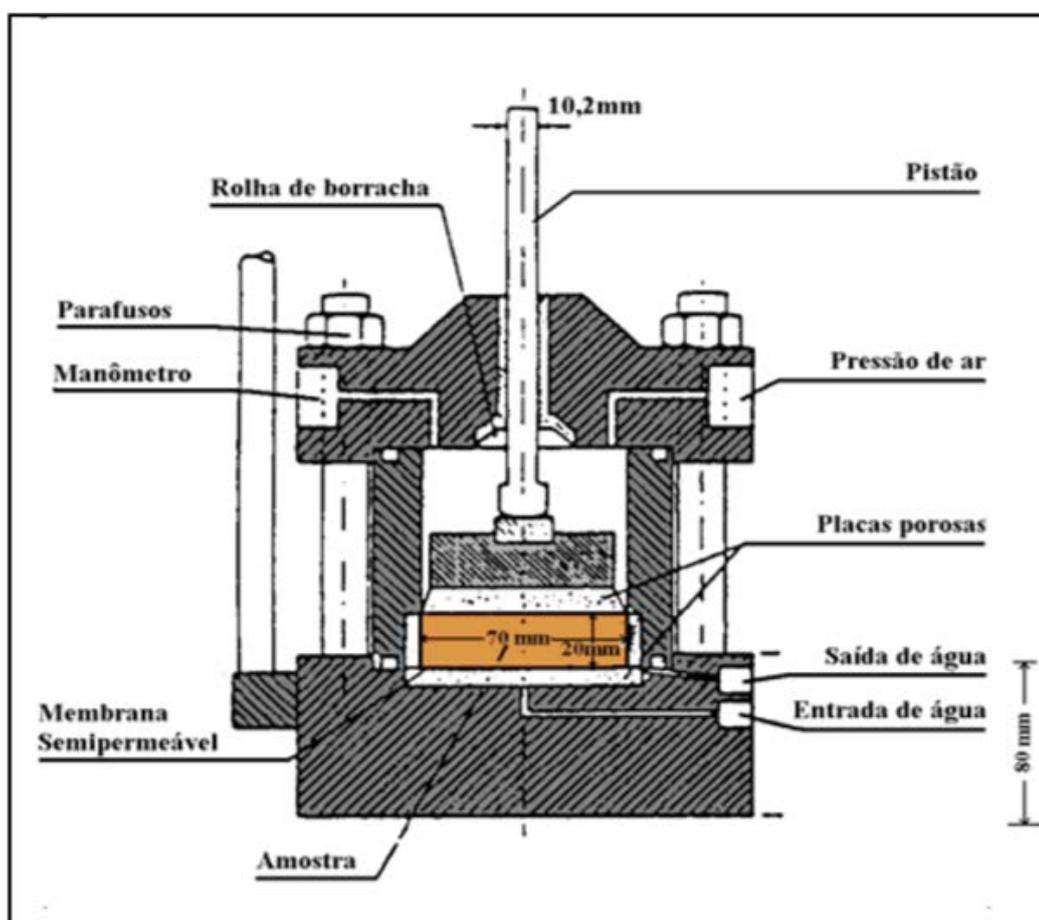


Figura 18 - Esquema do aparelho de translação de eixos  
Fonte: Escario (1969 apud SOTO, 2004, p. 20)

### 2.3.6 Equações existentes para curva característica

Feuerharmel (2007, p. 58) afirma que várias equações empíricas foram propostas na literatura e, com isso, Leong e Rahardjo (1997 apud FEUERHARMEL, 2007, p. 58) criaram uma tabela de equações que demonstram as principais

existentes, sempre lembrando que as equações foram feitas para solos específicos com formatos particulares de curvas, intervalo de sucção limitado e só apresentam a trajetória de secagem.

São apresentadas na Tabela 2 as principais curvas de secagem da literatura.

**Tabela 2 – Equações para curvas características unimodais com formato “S”**

Referência	Equação	Descrição das variáveis
Gardner (1958)	$S = \frac{1}{(1+a\Psi^n)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S = Grau de saturação;</li> <li>• <math>\Psi</math> = Sucção;</li> <li>• a, n = Parâmetros de ajuste.</li> </ul>
Van Genutchen (1980)	$S = \left[ \frac{1}{1+a\Psi^n} \right]^m$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S = Grau de saturação;</li> <li>• a, n, m = Parâmetros de ajuste.</li> </ul>
William et al. (1983)	$\ln(\Psi) = a + b \cdot \ln(\theta)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Psi</math> = Sucção;</li> <li>• a, b = Parâmetros de ajuste;</li> <li>• <math>\theta</math> = Teor de umidade volumétrico</li> </ul>
Mckee e Bumb (1984)	$S = \exp\left(\frac{a-\Psi}{n}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a, n = Parâmetros de ajuste;</li> <li>• <math>\Psi</math> = Sucção.</li> </ul>
Mckee e Bumb (1987)	$S = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{a-\Psi}{n}\right)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a, n = Parâmetros de ajuste</li> </ul>

**Fonte: Autoria Própria (2015)**

Existem alguns modelos que tentam descrever a histerese, porém, as equações são complexas, e os dados necessários para calibração dos mesmos envolvem a determinação de pontos experimentais em baixos e altos valores de sucção (FEUERHARMEL, 2007, p. 58).

No caso de curvas bimodais de secagem que apresentam “Duplo S”, Burger e Shackelford (2001 apud FEUERHARMEL, 2007, p.60) sugerem dividir as curvas bimodais de forma que sejam ajustadas por duas funções unimodais distintas. Sendo o ponto de divisão equivalente ao ponto de inflexão entre as duas curvas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 HORIZONTES COLETADOS

A amostra foi coletada em um horizonte de um talude exposto em uma obra localizada na cidade de Curitiba-PR. O talude exposto, observado na Figura 19, localiza-se dentro da obra na qual o material foi retirado para análise. Também na Figura 19, pode ser observado o horizonte coletado, demarcado em vermelho.

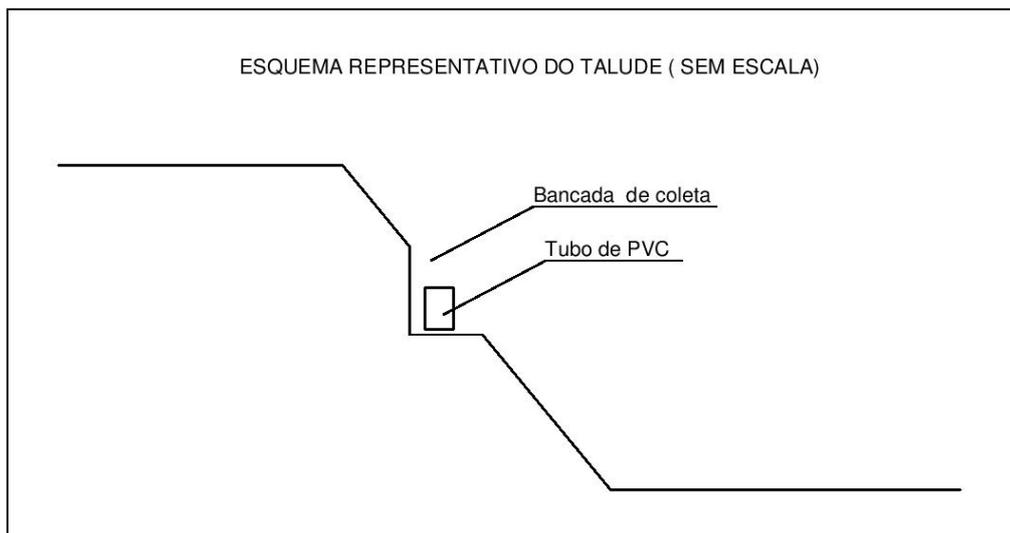


**Figura 19 – Exibição de dois Horizontes em um mesmo talude exposto**  
**Fonte: Autoria própria (2014)**

##### 3.1.1 Coleta das amostras indeformadas

Para a coleta foram feitos cortes nos taludes de forma a se obter bancadas de coleta, aproximadamente, horizontais como mostrado no esquema representativo da Figura 20 (desenhado fora de escala). Foram coletadas 4 amostras do horizonte de interesse dentro de tubos de PVC de 100 mm de diâmetro por 15 cm de altura, sendo enrolados, logo em seguida, em papel PVC com o intuito de preservar a umidade *in situ*, como pode ser observado na Figura 21 e na Figura 22.

Os tubos de PVC foram introduzidos cuidadosamente no solo de forma a evitar danificar os tubos e não deformar o solo. Após a colocação dos tubos foram talhados o excesso de solo em sua volta até que se conseguisse retirar totalmente os tubos.



**Figura 20 - Representação das bancadas de trabalho feita nos taludes coletados**  
Fonte: Autoria própria (2014)



**Figura 21 - Posicionamento do tubo de PVC no corte da bancada de trabalho**  
Fonte: Autoria própria (2014)



**Figura 22 - Armazenamento dos horizontes indeformados coletados**  
Fonte: Autoria própria (2014)

### 3.1.2 Coleta de amostras deformadas

As coletas de amostras deformadas foram feitas nos mesmos dias e nos mesmos pontos da coleta das amostras indeformadas.

Foram retirados cerca de 5 cm superficialmente do terreno de modo a evitar possíveis sujeiras adquiridas durante o corte dos taludes ou durante a sua exposição ao ar livre, tendo assim um solo com menos interferências externas. Assim, posteriormente descrito acima, as amostras deformadas foram coletadas e armazenadas em sacos plásticos fechados com elásticos (Figura 23).



**Figura 23 - Amostra deformada coletada em sacos plásticos**  
**Fonte: Autoria própria (2014)**

### 3.1.3 Teores de umidade *in situ*

As determinações dos teores de umidade foram realizadas segundo a norma ME 213 (DEPARTAMENTO..., 1994), sendo feitas no mesmo dia da coleta das amostras (Figura 24).



Figura 24 - Cápsulas sendo pesadas logo após a coleta para determinação da umidade *in situ* de um dos horizontes  
Fonte: Autoria própria (2014)

### 3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A preparação das amostras para os ensaios de análise granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade foram feitas segundo a NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO..., 1986). Para a preparação da amostra da massa específica dos grãos foi seguida a norma ME 041 (DEPARTAMENTO..., 1994).

#### 3.2.1 Análises granulométricas dos solos

Os ensaios de granulometria fina e grossa foram realizados segundo a NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO..., 1984) (Figura 25).



**Figura 25 - Ensaio de Granulométrico**  
Fonte: Autoria própria (2015)

O ensaio de sedimentação foi realizado segundo a NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO...,1984) (Figura 26).



**Figura 26 – Ensaio de sedimentação**  
Fonte: Autoria própria (2015)

### 3.2.2 Determinação do limite de liquidez do solo

A determinação do limite de liquidez foi realizada segundo a NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO...,1984).



**Figura 27 – Ensaio de limite de liquidez realizados**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

### 3.2.3 Determinação do limite de plasticidade do solo

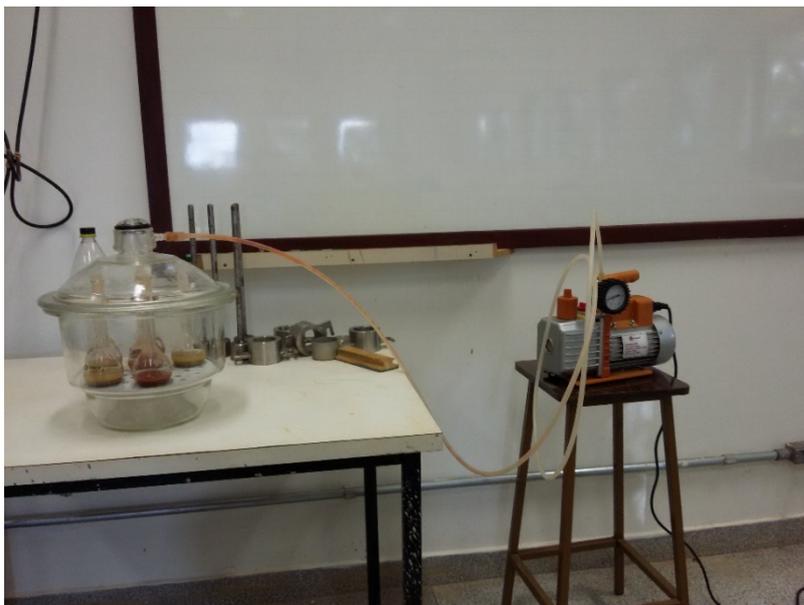
A determinação do limite de plasticidade foi realizada segundo a NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO...,1984).



**Figura 28 – Ensaio do limite de plasticidade**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

### 3.2.4 Determinação da massa específica real dos grãos

A determinação da massa específica real dos grãos foi feita segundo a ME 093 (DEPARTAMENTO..., 1994), com a substituição do bico de gás pela bomba de vácuo, que foi acionada durante 15 minutos, com capacidade de criar vácuo equivalente a 88 kPa, ligado a um dessecador de vidro com 6 picnômetros no seu interior (Figura 29).



**Figura 29 - Ensaio GS com utilização da bomba de vácuo**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

### **3.3 MEDIÇÃO DA SUCÇÃO COM A TÉCNICA DE TRANSLAÇÃO DE EIXOS**

O corpo de prova não deformado é moldado, como mostrado na Figura 30. Esse corpo é submerso em um Becker com água destilada por um período de uma semana com suas extremidades isoladas com pedras porosas e uma sobrecarga visando evitar a expansão do solo, sendo posteriormente colocado um plástico e lacrado com elástico para evitar a evaporação e entrada de sujeiras, podendo ser observado o detalhe do esquema adotado na Figura 31. Nesse mesmo período é saturada a pedra porosa em uma dessecadora com vácuo aplicado em períodos de 12 horas para evitar danificar a bomba de vácuo, sendo demonstrado na Figura 32.



**Figura 30 – Corpo de prova talhado com molde metálico**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**



**Figura 31 – Esquema do Becker utilizado no ensaio já drenado**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**



**Figura 32 – Pedra porosa sendo saturada dentro da dessecadora**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

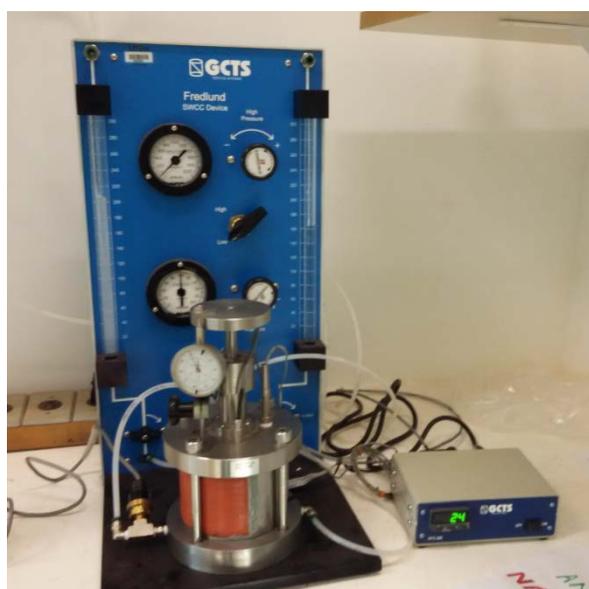
Após o período de saturação, a pedra porosa saturada foi posicionada no fundo da câmara e é interligada a uma coluna de água controlada de forma a não faltar nem exceder a quantidade de água para o ensaio. É através da pedra porosa pelo qual passa a água perdida do corpo de prova para a bureta. Essa pedra porosa só permite a entrada de água, não permitindo, portanto, a passagem de ar.

O passo seguinte consiste em posicionar o corpo de prova dentro da câmara de pressão em cima da pedra porosa como pode ser observado na Figura 33. Após esses procedimentos, a câmara é lacrada. Pode ser visualizado, na Figura 34, o esquema final do ensaio.

Após a montagem do equipamento aplica-se uma pressão inicial de 1kPa fazendo-se a leitura diária até que se estabilize a variação da coluna de água na bureta. Com a leitura da estabilização é possível, através de correlações matemáticas utilizando o volume do corpo de prova, densidade real dos grãos, peso do anel e da amostra após o processo da saturação mencionado anteriormente, consegue-se estimar a saturação do corpo de prova e o percentual de água perdida através da aplicação da pressão escolhida.

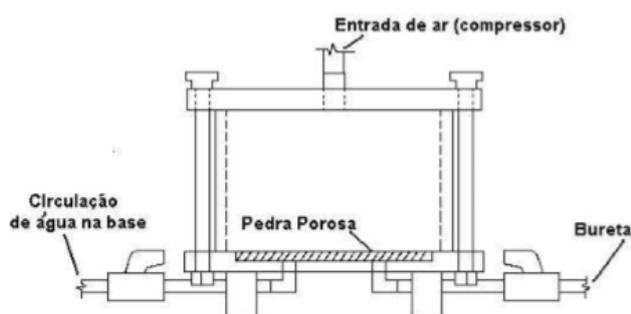


**Figura 33 – Detalhe do corpo de prova posicionado dentro do equipamento**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**



**Figura 34 – Detalhe final do equipamento montado**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

O esquema simplificado do interior da câmara pode ser verificado na Figura 35.



**Figura 35 – Esquema simplificado do ensaio**  
**Fonte: Oliveira (2004)**

A curva característica baseia-se em determinar a variação da sucção com a variação da umidade, ou seja, a umidade é encontrada com procedimentos discutidos anteriormente, e a sucção é conseguida através da aplicação ajustada pelo aparelho, sendo possível ter uma variação de pressão de 0,1 kPa até 2000 kPa.

Para se ter um valor mais real da estimativa de umidade do solo, é utilizado um extensômetro com objetivo de corrigir variações de altura do corpo de prova. Observa-se, na Figura 36, uma leitura feita pelo extensômetro utilizado, tendo uma precisão de 0,01mm.



**Figura 36 – Extensômetro utilizado no ensaio**  
**Fonte: Aatoria própria (2015)**

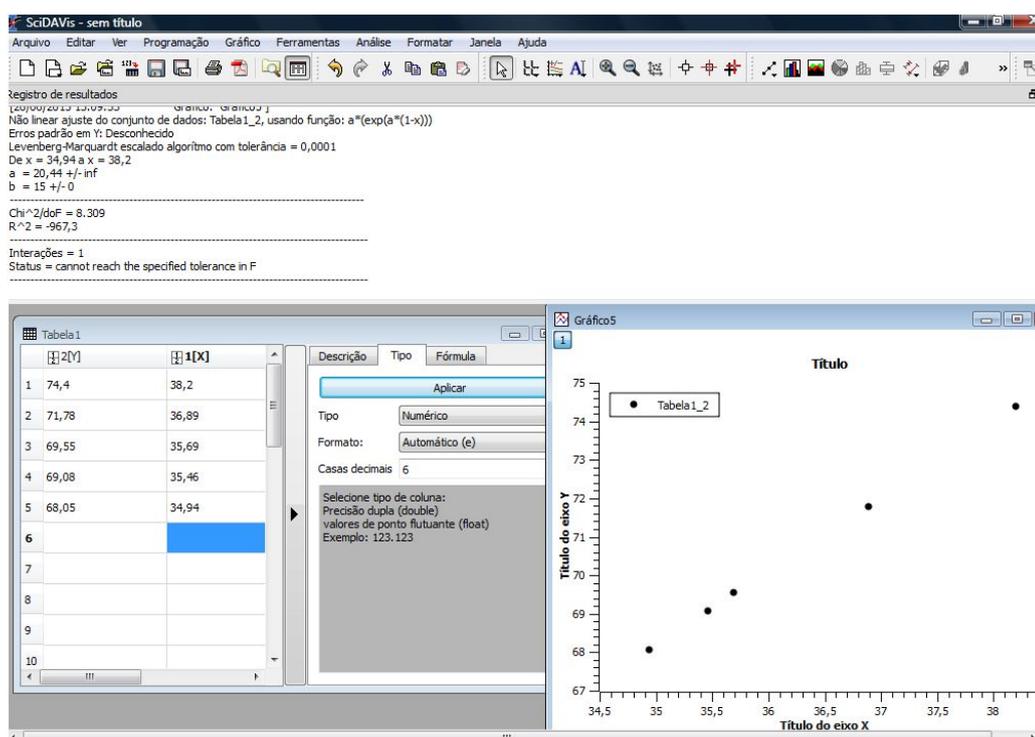
O tempo final para aplicação de um novo estágio do ensaio depende de muitas variáveis como, por exemplo, número de pontos, pressão aplicada e tipo de solo. Além disso, o ensaio só pode dar continuidade quando a coluna de água na bureta se estabilizar.

A sucção controlada pelo aparelho é a sucção matricial, porém ainda permite a movimentação de soluto através da placa. A medição do ensaio dá o valor da sucção matricial.

### 3.4 CORRELAÇÃO DAS EQUAÇÕES EXISTENTES

Para a determinação das correlações dos dados adquiridos experimentalmente, foi utilizado o software Scidavis, que possui uma ferramenta capaz de ajustar curvas de equações conhecidas através de iterações, e permite analisar a consistência dos dados em relação a curva teórica pelo coeficiente de determinação.

O layout do software utilizado pode ser observado na Figura 37.



**Figura 37 – Exemplo de entrada de dados do software Scidavis**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

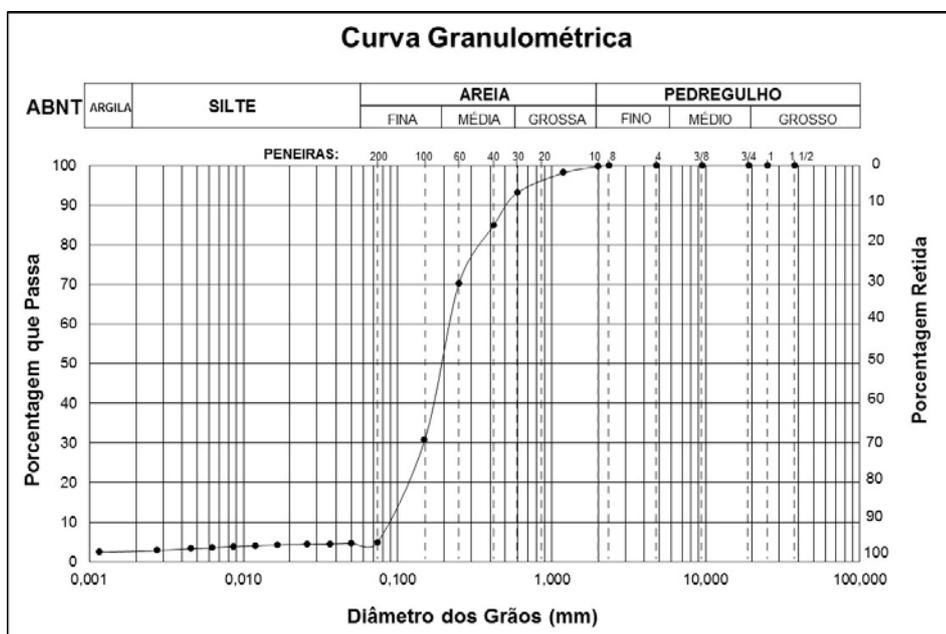
Foram testadas as equações de Gardner (1958), Farrel e Larson (1972), Van Genuchten (1980), Mckee e Bumb (1987), William et.al (1983) e Mckee e Bumb (1984), que estão entre as mais citadas em trabalhos científicos do assunto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios de caracterização dos solos fornecem parâmetros importantes a serem utilizados em qualquer análise de solos. A caracterização dá suporte para possíveis explicações das diferenças de comportamentos mecânicos de solos variados baseados em parâmetros numéricos como coeficiente de curvatura, densidade real dos grãos, coeficiente de não uniformidade, limite de plasticidade, limite de liquidez, entre outros.

### 4.1 ENSAIO GRANULOMÉTRICO

A curva granulométrica obtida através dos ensaios laboratoriais pode ser observada no Gráfico 1.



**Gráfico 1 – Curva Granulométrica do solo estudado**  
 Fonte: Autoria própria (2015)

Existem parâmetros matemáticos utilizados pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos, chamados de coeficiente de não uniformidade e coeficiente de curvatura, pelo qual é possível verificar a uniformidade dos grãos do solo analisado de forma numérica.

Para o solo estudado, através da curva granulométrica, chegou-se a um valor de coeficiente de não uniformidade no valor de 2,52, e coeficiente de curvatura de 1,08. Todas as interpolações adotadas podem ser observadas na Tabela 3, na Tabela 4 e na Tabela 5.

**Tabela 3 – Valores de Interpolação para encontrar o valor de D10**

<b>%Passante</b>	<b>Abertura (mm)</b>
31%	0,150
10%	0,089
5%	0,075

**Fonte: Autoria própria (2015)**

**Tabela 4– Valores de Interpolação para encontrar o valor de D30**

<b>%Passante</b>	<b>Abertura (mm)</b>
31%	0,150
30%	0,147
5%	0,075

**Fonte: Autoria própria (2015)**

**Tabela 5 – Valores de Interpolação para encontrar o valor de D60**

<b>%Passante</b>	<b>Abertura (mm)</b>
70%	0,250
60%	0,224
31%	0,15

**Fonte: Autoria própria (2015)**

Pinto (2006, p. 54) menciona que quanto maior o coeficiente de não uniformidade mais bem graduado será a areia. Entende-se como bem graduado aqueles solos que apresentam diversos diâmetros, contendo assim um menor índice de vazios devido sua maior amplitude de grãos. O solo em estudo apresenta coeficiente de não uniformidade maior que 2, sendo considerado, portanto, mal graduado.

Outro coeficiente que poderia ser utilizado para analisar a granulometria do solo é o coeficiente de curvatura, pelo qual identifica melhor as eventuais descontinuidades, ou concentração muito elevada de grãos mais grossa no conjunto. A análise do solo estudado, através desse coeficiente, é considerada como um solo bem graduado, pelo fato do coeficiente de curvatura se encontrar entre 1 e 3.

Através desses coeficientes consegue-se obter que o solo é arenoso não uniforme, bem graduado e argiloso.

## 4.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS ( $G_s$ )

O tipo de solo também influencia nas medidas de sucção. Para essa finalidade, o ensaio de densidade real dos grãos é uma ferramenta importante.

Segundo ensaios de densidade real dos grãos realizados, obteve-se um valor adimensional equivalente médio de 2,61. O valor de densidade real dos grãos encontrado apresenta valores próximos de alguns minerais como caulinita, clorita, feldspato sódico e cálcico. Esse valor pode ser menor em casos de solos com maiores quantidades de matéria orgânica e maior em casos de solos com maiores quantidades de minerais pesados.

Solos com maiores quantidades de matéria orgânica são mais compressíveis, com isso, pode-se ter uma grande variação no seu volume para cálculo da estimativa de saturação do corpo de prova. No ensaio de sucção realizado foram feitas as correções de volume com a ajuda de um extensômetro, sendo que para esse ensaio não detectou grande presença de matéria orgânica devido sua baixa variação volumétrica da ordem de menos de 0,4% do seu volume.

Os ensaios podem ser verificados na Tabela 6.

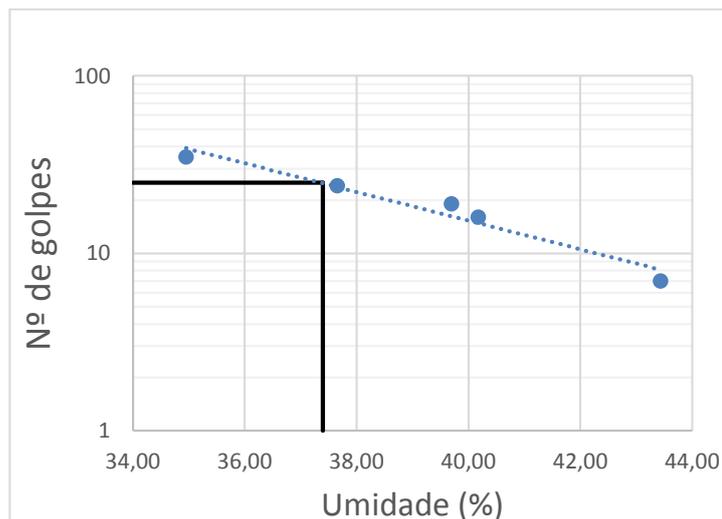
**Tabela 6 – Ensaios realizados da densidade real dos grãos**

$G_s$	k (correção)	$G_s$ Corrigido
2,612	0,9989	2,609
2,607	0,9989	2,604

**Fonte: Autoria própria (2015)**

## 4.3 LIMITES DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE

São apresentados no Gráfico 2 os dados obtidos através do ensaio de limite de liquidez do solo estudado.



**Gráfico 2 – Gráfico obtido em laboratório do limite de liquidez do solo estudado**

**Fonte: Autoria própria (2015)**

O limite de liquidez é obtido através da umidade equivalente a 25 golpes, variando através de um ajuste linear do número de golpes pela umidade do solo. Consegue-se observar, através do Gráfico 2, um limite de liquidez no valor de 37,72%. O coeficiente de determinação para esse ensaio foi de 0,9547, sendo assim considerado satisfatório.

Para o limite de plasticidade pode ser observado os dados válidos dos ensaios na Tabela 7.

**Tabela 7 – Dados do ensaio do limite de plasticidade**

Ensaio	Umidade (%)
1	25,53
2	23,08
3	25,42
Média	24,68

**Fonte: Autoria própria (2015)**

Para o limite de plasticidade do solo analisado, conseguiu-se um valor médio de 24,68%.

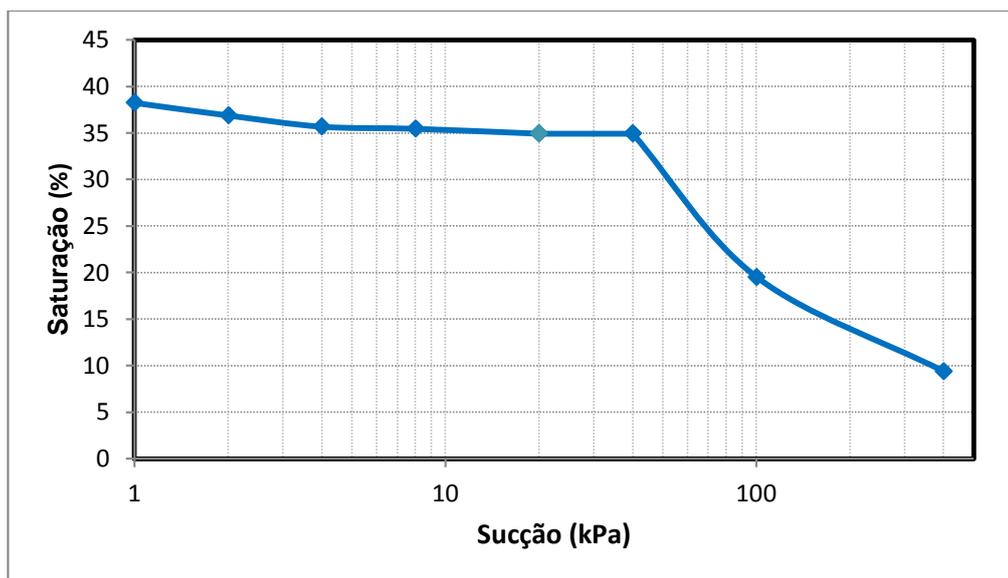
A partir de Pinto (2006, p. 14), pode-se concluir que os valores de limite de liquidez e índice de plasticidade encontrados nos ensaios são coerentes com um solo residual de arenito (solos arenosos finos). Obteve-se o índice de plasticidade encontrado no valor de 13,04%.

Skempton (1953 apud Das, 2011, p. 73) observou que o índice de plasticidade aumenta linearmente com a porcentagem de fração de argila. Saber a quantidade de argila é de fundamental importância na análise da curva característica, visto que as argilas são responsáveis por uma parcela significativa de água adsorvida em volta dos seus grãos. Para eliminação da água adsorvida, são necessários valores maiores de pressão, conseqüentemente, tem influência na zona residual de não saturação da curva característica.

Segundo método desenvolvido por Casagrande (1932 apud Das, 2011, p. 76), com uma correlação entre o índice de plasticidade e limite de liquidez conseguiu-se identificar em sua composição a presença de argilas inorgânicas de média plasticidade que podem ser as principais responsáveis pela plasticidade do solo, o que reforçaria a presença de argila indicada na classificação do sistema unificado.

#### 4.4 CURVA CARACTERÍSTICA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

A curva característica de secagem pode ser observada no Gráfico 3.



**Gráfico 3 – Curva característica de secagem obtida**  
Fonte: Autoria própria (2015)

Um detalhe importante a ser verificado na curva obtida é que ela se apresenta praticamente constante nas sucções anteriores à 40 kPa, o que lhe confere uma característica aparentemente unimodal, porém, a hipótese bimodal é interessante de ser analisada, pois o solo em estudo se encaixa no perfil mencionado por Feuerharmel

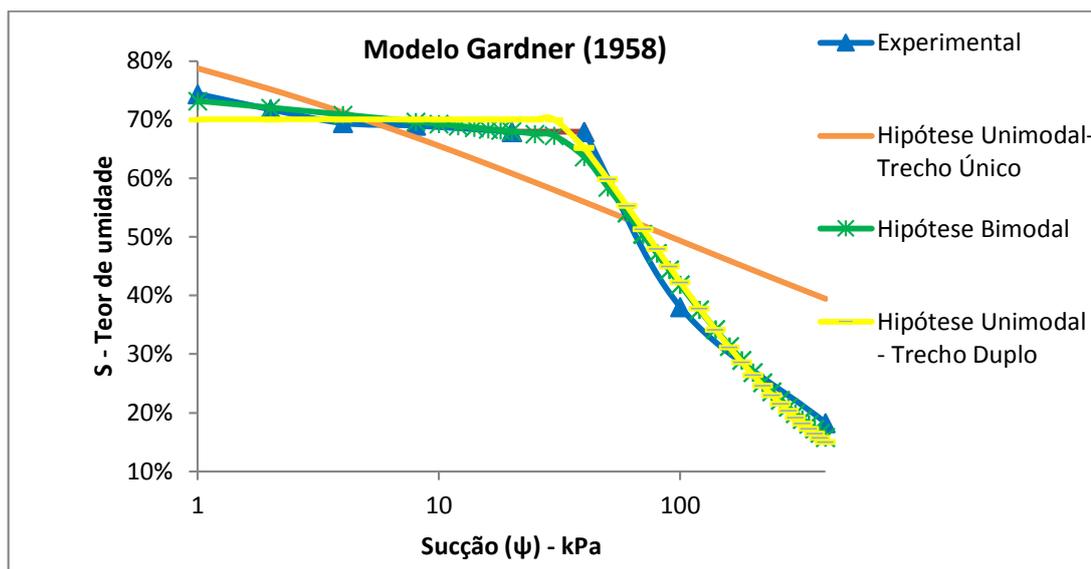
(2007, p.44) que fala que grande parte dos solos residuais ou sedimentares de regiões tropicais e subtropicais sugere uma distribuição bimodal de poros.

Os ensaios foram compreendidos nas sucções de 1 kPa até 400 kPa. Para melhor embasamento da hipótese unimodal foi ajustado as equações de Gardner (1958), Van Genutchen (1980), William et.al (1983), Mckee e Bumb (1984) e Mckee e Bumb (1987), que são encontrados em grande parte das publicações relacionados da área e verificando a possibilidade de a curva ser bimodal ou unimodal através do encaixe das curvas.

Na hipótese unimodal com trecho único foi levado em consideração o ajuste da equação desde a origem até os 400 kPa, porém, no ajuste unimodal com trecho duplo foi considerado uma reta horizontal de sucção constante equivalente ao valor médio dentre as sucções anteriores a 40 kPa, sendo depois ajustado as equações que foram analisadas para valores posteriores a 40 kPa. Não foi calculado o coeficiente de determinação para reta horizontal de valores anteriores à 40 kPa do método unimodal de trecho duplo, pois considerou-se o trecho com variação quase desprezível de forma a tender a uma reta horizontal. Para critérios de comparação, no método bimodal foi separado em dois trechos considerados não lineares e analisados de forma a verificar se essa simplificação utilizada no método unimodal de trecho duplo é coerente.

Na hipótese bimodal, foi seguido a sugestão de Burger e Shackelford (2001 apud FEUERHARMEL, 2007, p.60), pelo sugerem o equacionamento das curvas bimodais em duas curvas unimodais diferentes separadas pelo seu ponto de inflexão.

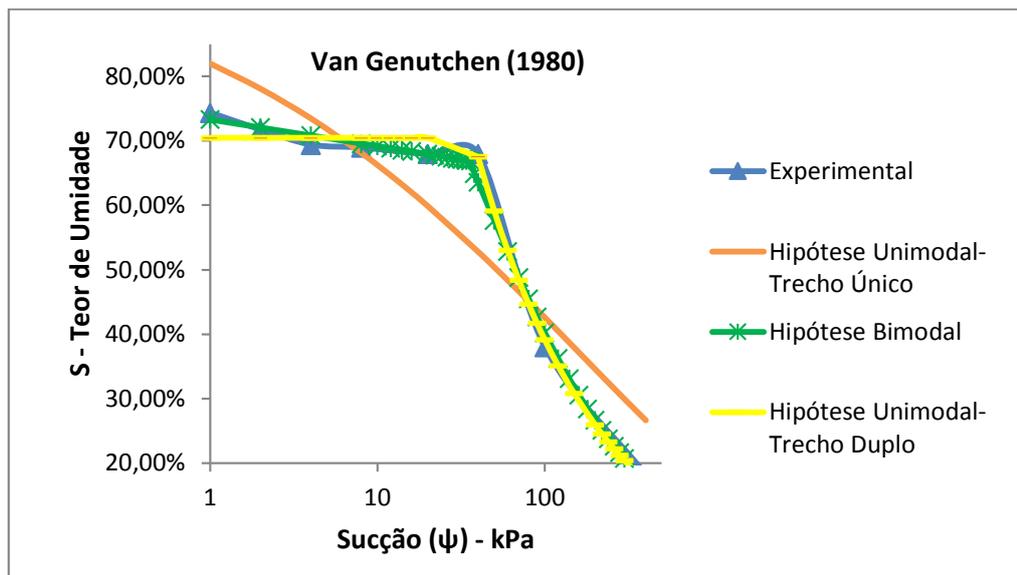
A equação de Gardner foi uma das mais antigas dentre as equações encontradas, sendo formulada em 1958. O ajuste pode ser observado no Gráfico 4, pelo qual observa-se os dados experimentais, a hipótese unimodal e bimodal traçados no mesmo quadro de forma a facilitar a comparação visual das três hipóteses.



**Gráfico 4 – Ajustes do modelo de Gardner (1958)**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

Para o método de Gardner (1958), conseguiu-se um coeficiente de determinação no valor de 0,7906 na hipótese unimodal de trecho único, no caso da hipótese unimodal de trecho duplo conseguiu-se 0,9711 de coeficiente de determinação e na hipótese bimodal conseguiu-se para o primeiro trecho um coeficiente de determinação de 0,8653 e para o segundo trecho um coeficiente de determinação de 0,9759 e no caso da hipótese unimodal de trecho duplo conseguiu-se 0,9711 de coeficiente de determinação. Através desse equacionamento conseguiu-se perceber tanto visualmente e através do coeficiente de determinação que a curva se ajusta melhor é o da hipótese bimodal e unimodal de trecho duplo para esse método.

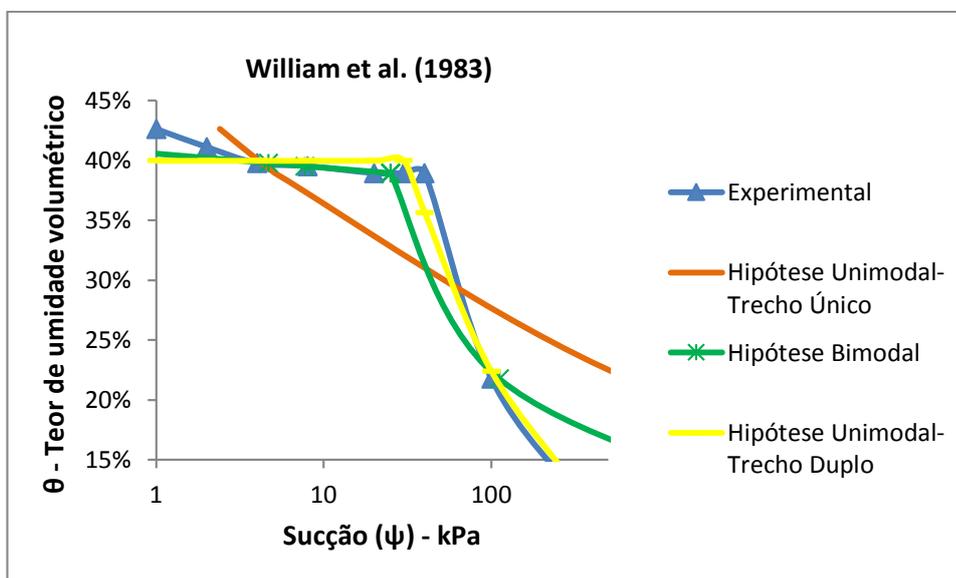
Van Genutchen em 1980 apresentou uma equação que para o solo estudado apresentou resultados bons resultados para hipótese unimodal de trecho duplo, porém para o caso das hipóteses bimodal e unimodal de trecho único apresentou resultados razoáveis. O Gráfico 5 apresenta os resultados obtidos através do equacionamento pelo método de Van Genutchen.



**Gráfico 5 - Ajustes do modelo de Van Genutchen (1980)**  
 Fonte: Autoria própria (2015)

O coeficiente de determinação encontrado pelo método de Van Genutchen com hipótese unimodal de trecho único foi de 0,8245, no caso da unimodal de trecho duplo conseguiu-se 0,9979 e na hipótese bimodal para o primeiro trecho foi de 0,8768 e para o segundo trecho foi de 0,9808. Esse método foi o que melhor se encaixou no ajuste feito para hipótese unimodal de trecho duplo dentre as equações analisadas.

Um método criado por William et. al em 1983 apresentou bons resultados de ajustes tanto para hipótese unimodal de trecho duplo quanto para hipótese bimodal, sendo que para hipótese unimodal de trecho único foi considerado ruim. Observa-se no Gráfico 6 os ajustes feitos.

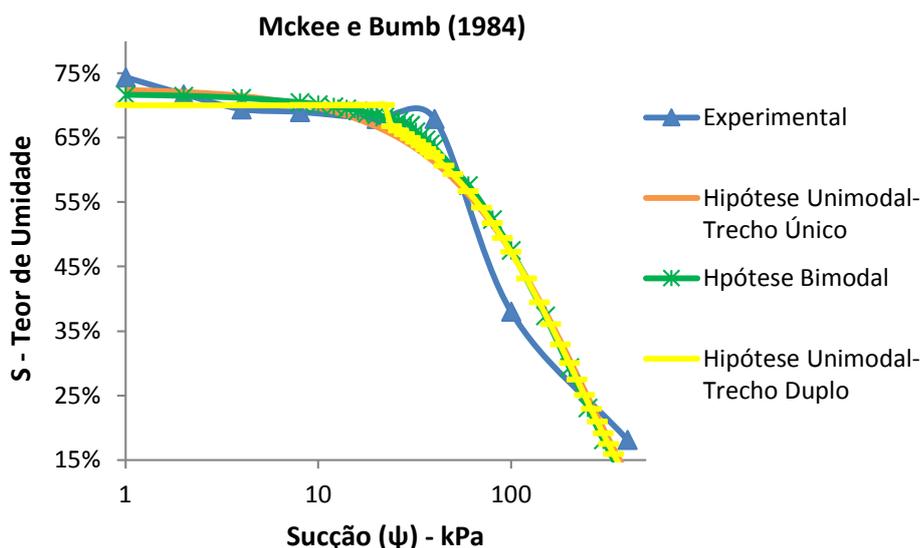


**Gráfico 6 - Ajustes do modelo de William et. all (1983)**  
 Fonte: Autoria própria (2015)

O método de William et.al foi o que melhor se encaixou na hipótese bimodal para equações analisadas, sendo o único que obteve nos dois trechos, coeficientes de determinações maiores que 0,9. Para essa hipótese foi encontrado um coeficiente de 0,9203 para o primeiro trecho e 0,9726 para o segundo trecho. Para hipótese unimodal de trecho único obteve-se um coeficiente de 0,5972 e para hipótese unimodal de trecho duplo obteve-se um bom coeficiente de determinação no valor de 0,9710.

No teste do método de Mckee e Bumb criado em 1984, apresentou bons resultados para a hipótese bimodal apenas para o segundo trecho, obtendo-se um coeficiente de determinação no valor de 0,5734 para o primeiro trecho e 0,9099 para o segundo trecho, entretanto, apresentou resultados razoáveis para a hipótese unimodal de trecho único e duplo, conseguindo-se um coeficiente de 0,8904 para a hipótese unimodal de trecho único e 0,8087 para hipótese unimodal de trecho duplo.

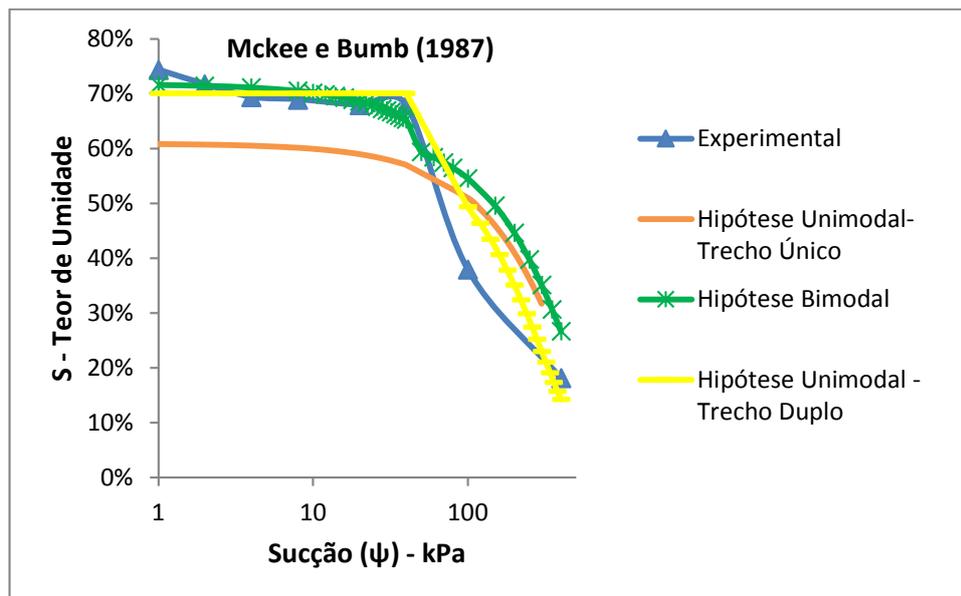
Pode ser observado no Gráfico 7 os ajustes feitos através de Mckee e Bumb (1984).



**Gráfico 7 - Ajustes do modelo de Mckee e Bumb (1984)**

**Fonte: Autoria própria (2015)**

Mckee e Bumb, em 1987, fizeram uma correção na formulação apresentada em 1984, porém, para o solo analisado, essa correção não melhorou significativamente a qualidade do ajuste comparado com o método de 1984. Demonstra-se os ajustes desse método através do Gráfico 8.



**Gráfico 8 - Ajustes do modelo de Mckee e Bumb (1987)**  
**Fonte: Autoria própria (2015)**

O coeficiente de determinação para hipótese unimodal de trecho único foi de 0,8904 e para unimodal de trecho duplo de 0,8087. No caso da hipótese bimodal, para o primeiro trecho conseguiu-se coeficiente de determinação no valor de 0,5734 e para o segundo um coeficiente de 0,6670.

Observa-se na Tabela 8 o resumo dos parâmetros de ajustes encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese unimodal de trecho único.

**Tabela 8 – Parâmetros encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese unimodal de trecho único**

<b>Autor</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Gardner (1958)	a = 0,27 n = 0,29	0,7906
Van Genuchten (1980)	a = 9,7513E-09 n = 0,3177 m = 69,9208	0,8245
William et al. (1983)	a = -6,2570 b = -8,3606	0,5972
Mckee e Bumb (1984)	a = -73,8912 n = 231,9227	0,9411
Mckee e Bumb (1987)	a = 109,9264 n = -248,4000	0,8904

**Fonte: Autoria própria (2015)**

Na Tabela 9 é apresentado um resumo dos parâmetros de ajustes encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese unimodal de trecho duplo.

**Tabela 9 - Parâmetros encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese unimodal de trecho duplo**

<b>Autor</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Gardner (1958)	a = 0,0122 n = 1,0255	0,9711
Van Genutchen(1980)	a = 0,0484 n = 20,7724 m = 0,0286	0,9979
William et al.(1983)	a = -6,2570 b = -8,3606	0,971
Mckee e Bumb (1984)	a = -65,1795 n = 220,3750	0,8752
Mckee e Bumb (1987)	a = 95,8799 n = 169,4797	0,8087

**Fonte: Autoria própria (2015)**

A Tabela 10 mostra o resumo dos parâmetros e coeficientes de determinações encontrados para hipótese bimodal separado por 2 trechos.

**Tabela 10 - Parâmetros encontrados e seus respectivos coeficientes de determinações para hipótese bimodal para os dois trechos equacionados**

<b>Autor</b>	<b>Trecho 1 Parâmetros</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>Trecho 2 Parâmetros</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Gardner (1958)	a = 0,3666 n = 0,08358	0,8653	a = 0,0161 n = 0,9687	0,9759
Van Genutchen(1980)	a = 15040 n = 20,7724 m = 0,1706	0,8768	a = 0,037 n = 1,4615 m = 0,4441	0,9808
William et al.(1983)	a = -71,1242 b = -78,804	0,9203	a = -3,9731 b = -5,6979	0,9726
Mckee e Bumb (1984)	a = -140,8093 n = 425,6619	0,5587	a = -54,3295 n = 207,3350	0,9099
Mckee e Bumb (1987)	a = 124,3543 n = -133,4	0,5734	a = 145,8 n = -251,3	0,667

**Fonte: Autoria própria (2015)**

Segundo a análise dos resumos dos resultados apresentados acima, consegue-se perceber que dentre os métodos analisados, o que melhor se encaixa para ajuste unimodal de trecho único é o método de Mckee e Bumb (1984). Para a hipótese de unimodal de trecho duplo, o que apresentou melhor ajuste foi o método de Van Genutchen (1980) e para hipótese bimodal o que apresentou melhor ajuste foi o método de William et al.(1983), pois foi o único dos métodos analisados que apresentou coeficientes maiores que 0,9 para os dois trechos.

Dentre as hipóteses unimodal de trecho único, hipótese unimodal de trecho duplo e hipótese bimodal, a que apresentou resultados mais consistentes, ou seja, com menos variações de valores entre os coeficientes de determinações e que em todos os métodos analisados se manteve num intervalo de bom à razoável foi o método unimodal de trecho duplo. Porém, vale observar que a hipótese bimodal obteve também de boas à razoáveis correlações para maioria dos casos, porém, devido a continuidade dos seus grãos identificado na granulometria, praticamente excluiria a possibilidade de um patamar intermediário e é possível também ver visualmente que as quedas de variação dos valores anteriores a 40 kPa são suaves o suficiente para não ocasionar uma segunda curva unimodal, excluindo assim o efeito de curva bimodal.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 CONCLUSÃO**

O solo em estudo é um solo arenoso argiloso não uniforme e bem graduado, sendo os valores de limite de plasticidade, liquidez e densidade real dos grãos apresentaram valores coerentes com um solo de baixa quantidade de matéria orgânica, fato esse reforçado com a constatação da baixa variação volumétrica no ensaio de sucção, sendo uma variação máxima de 0,40% do seu volume, visto que solos orgânicos são altamente compressíveis.

A equação que melhor se encaixou foi a de Van Genutchen (1980) pelo qual apresentou coeficiente de determinação no valor de 0,9979 para hipótese unimodal de trecho duplo, ou seja, foi considerado uma reta horizontal com valor médio até os 40 kPa, pelo qual posteriormente a esse ponto começa a apresentar queda brusca e é iniciado o equacionamento a partir desse ponto.

A curva do solo estudado apresentou formato predominantemente unimodal dentre as equações analisadas, pois apesar da hipótese bimodal também apresentar bons resultados para maioria das equações analisadas, a granulometria acusou que o solo tem grande variedade de diâmetros de grãos, o que ocasionaria o não aparecimento de um patamar intermediário e é possível ver visualmente que a queda de variação nos primeiros 40 kPa de sucção são praticamente constantes, caracterizando assim uma curva unimodal.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

De forma a aprofundar e/ou continuar a pesquisa realizada neste trabalho, são sugestões de trabalhos futuros:

- Analisar outros horizontes da Formação Guabirota.
- Analisar a influência da sucção em outros comportamentos mecânicos do solo não saturado com a utilização da curva característica.
- Estudar mais sobre a influência da caracterização nos valores de sucção, um exemplo é o estudo da compactação e dentre outros ensaios não mencionados aqui.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BONDER, B. H. **Curvas de retenção de água de um solo coluvionar de Campinas obtidas mediante técnicas de laboratório e de campo**. 130 f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

CÂNDIDO, E. S.; AZEVEDO, R. F.; TEIXEIRA, E. K. C.; SOUZA, T. S. C.; GUIMARÃES, L. M.; MESQUISTA, L. C. Determinação de curvas características utilizando uma pequena centrífuga e o método do papel filtro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17, 2014, Goiânia, Goiás. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2014. 1 CD-ROM

CRUZ JUNIOR, A. J.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; SALES, M. M.; VIANA, P. M. F. Determinação do perfil de sucções a partir de amostras de SPT, e verificação de correlações entre sucção, NSPT, e PANDA para solos argilosos superficiais da cidade de Goiânia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17, 2014, Goiânia, Goiás. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2014. 1 CD-ROM.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7.ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 041**: preparação de amostra para ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **ME 093**: determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **ME 231**: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 1994.

FELIPE, R. da S. **Características geológica-geotécnicas na formação guabirota erosão-movimentos gravitacionais de massa**. 1.ed. Curitiba: MINEROPAR, 2011.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do comportamento não saturado de dois solos coluvionares**. 127 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. Nova Iorque: John Wiley and Sons, 1993.

FREITAS NETO, O. F. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. 150 f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. 108 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GITIRANA JUNIOR, G. de F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve equation with independent properties. **J. Geotech. Geoenviron Eng**, v. 130, n. 2, p. 209-212, feb. 2004.

GOMES, J. E. da S. **Estudo de fatores que influenciam a acurácia do método do papel - filtro**. 94 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento geomecânico da formação Guabirotuba: estudo de campo e laboratório**. 429 f. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2012.

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. 330 f. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PEREIRA, A. C. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 227 f. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SALAMUNI, E. **Tectônica da bacia sedimentar de Curitiba**. 211 f. 1998. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

SANTOS, C. R. **Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado**. 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 125 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SILVA, P. V. C. **Estudo de Infiltração na Camada de Cobertura do Aterro do Morro do Céu, Niterói-RJ**. 73 f. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso – COPPE UFRJ, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SOARES, A. B. **Fluxo de água em talude arenoso: modelagem física e numérica**. 233 f. 2006. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 206 f. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

TERZAGHI, K. The shear resistance of saturated soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge, Massachusetts, EUA. **Proceedings...** Londres: ISSMGE, SIMSG, 1936. p. 54-56.

TREVISAN, B. P. **Avaliação da tensão superficial, parâmetros reológicos e atenuação acústica de suspensões de aço**. 114 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

VANAPALLI., S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. **Géotechnique**, n. 49, n. 2, p. 143-159, 1999.

WEBER, R. C. **Avaliação das trajetórias de umedecimento e secagem na deformabilidade elásticas de solos compactados**. 139 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.