

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

ANDRÉ FARDIN ROSA

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

ANDRÉ FARDIN ROSA

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

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento
Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. D.Sc. Ronaldo Luis dos Santos Izzo

CURITIBA

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM HORIZONTE DO PERFIL GEOTÉCNICO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Por

ANDRÉ FARDIN ROSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 23 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Ronaldo Luis dos Santos Izzo, Dr.

UTFPR

Profa. Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.

UTFPR

Prof. Rogério Francisco Küster Puppi, Dr.

UTFPR

Dedico este trabalho aos meus pais, Gilmar Antônio Rosa e Aneci Fardin Rosa, que além de me orientarem durante toda a vida, também me deram ferramentas e não pouparam esforços para que fosse possível eu seguir os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer profundamente a todos meus familiares, em especial aos meus pais Gilmar e Aneci, minha irmã Rafaela e meus avós maternos Elvis e Neiva Fardin. Pelo apoio que me forneceu uma base sólida para a formação do meu caráter.

Agradeço também à minha namorada Leticia Cardoso de Oliveira, por compartilhar dos momentos bons e ruins ao meu lado, sempre me incentivando a seguir em frente.

Aos meus amigos de infância e adolescência, Kaio Zandavalli, Gabriel Lopes, Matheus Marcondes e Rogério Garcia, que fizeram parte da formação do meu gosto pela música, hobby que levarei comigo para sempre. Agradeço também em especial aos meus amigos de banda Eduardo Rodrigues e Iorge Nobre, que compartilharam da música comigo durante a universidade.

Aos meus amigos de universidade, em especial ao Gustavo Yoshio Matsubara, Thiago Vidoto, Guilherme Cunha, Alexandre dos Reis, Wagner Teixeira, Daniel Valença, Rodolfo Roque, Lucas Oliveira e Alexandre Esper, que estiveram ao meu lado dentro e fora da universidade, me acompanhando de perto durante a graduação.

Aos professores que acompanharam a minha formação acadêmica e me passaram seu conhecimento para que eu pudesse crescer profissionalmente e como ser humano, em especial ao meu orientador do trabalho de conclusão de curso e de monitoria em Mecânica dos Solos, Ronaldo Luis dos Santos Izzo. Também agradeço à professora Amanda Dalla Rosa Johann, ao professor Rogério Francisco Küster Puppi e à professora Juliana Lundgren Rose, por toda a ajuda durante a execução deste trabalho e durante a minha formação acadêmica. Ao meu orientador de iniciação científica Adalberto Matoski e ao meu orientador de monitoria em Cálculo III, Carlos Magno. À mestrandia Vanessa Corrêa Andrade, com quem tive o prazer de aprender, acompanhando suas pesquisas na área de solos.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que de alguma forma fizeram parte da minha vida e ajudaram na minha formação. Muito obrigado.

“Experiência não é o que acontece com um homem; é o que um homem faz com o que lhe acontece.”

(Aldous Huxley)

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação do solo não saturado.....	18
Figura 2 – Interações intermoleculares	19
Figura 3 – Resultante das forças de adesão e coesão	20
Figura 4 – Fenômeno capilar.....	21
Figura 5 – Forças atuantes em um menisco	22
Figura 6 – Altura de equilíbrio para diferentes raios	22
Figura 7 – Altura de equilíbrio para diferentes raios	23
Figura 8 – Esquema ilustrativo da sucção.....	24
Figura 9 – Curva característica típica de um solo siltoso	27
Figura 10 – Curvas características típicas para diferentes tipos de solo.....	28
Figura 11 – Curvas características para solos com diferentes granulometrias	28
Figura 12 – Fatores que influenciam a curva característica	29
Figura 13 – Zonas de dessaturação em curva unimodal.....	30
Figura 14 – Provável variação da água nos estágios de dessaturação do solo.....	31
Figura 15 – Curva característica bimodal.....	32
Figura 16 – Provável dessaturação de um solo com curva característica bimodal ...	33
Figura 17 – Curvas granulométrica de argissolo vermelho-amarelo	37
Figura 18 – Curva característica do argissolo vermelho-amarelo	38
Figura 19 – Curva granulométrica do solo areno-argiloso.....	39
Figura 20 – Curva característica de sucção do solo areno-argiloso.....	39
Figura 21 – Horizonte exposto em um talude.....	41
Figura 22 – Representação da bancada de trabalho feita no talude coletado	42
Figura 23 – Processo de coleta de amostra indeformada	42
Figura 24 – Ensaio de peneiramento	43
Figura 25 – Ensaio de sedimentação	44
Figura 26 – Ensaio de limite de liquidez.....	45
Figura 27 – Ensaio de limite de plasticidade	45
Figura 28 – Ensaio GS com utilização da bomba de vácuo	46
Figura 29 – Corpo de prova talhado em molde 5,8 x 3,2 cm.....	46
Figura 30 – Amostra e pedra porosa sendo saturadas	47
Figura 31 – Corpo de prova e pedra porosa posicionados na câmara de ensaio	47
Figura 32 – Câmara de ensaio fechada	48
Figura 33 – Esquema representativo do interior da câmara de sucção	48

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de medida de sucção.....	34
Tabela 2 – Equações para curvas unimodais em formato “S”	36
Tabela 3 – Interpolação para determinação dos diâmetros D_{10} e D_{60}	51
Tabela 4 – Dados do ensaio do limite de plasticidade	52
Tabela 5 – Resultados da determinação da massa específica real dos grãos.....	54
Tabela 6 – Resultados para hipótese unimodal com trecho único	63
Tabela 7 – Resultados para hipótese unimodal com trecho inicial em reta.....	64
Tabela 8 – Resultados para hipótese bimodal	65

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica.....	50
Gráfico 2 – Gráfico do limite de liquidez.....	52
Gráfico 3 – Gráfico de plasticidade	53
Gráfico 4 – Pontos experimentais do ensaio de sucção.....	55
Gráfico 5 – Modelo de Burdine (1953)	56
Gráfico 6 – Modelo de Gardner (1958).....	56
Gráfico 7 – Modelo de Brooks e Corey (1964)	57
Gráfico 8 – Modelo de Brutsaert (1966)	57
Gráfico 9 – Modelo de Farrel e Larson (1972).....	58
Gráfico 10 – Modelo de Mualem (1976).....	58
Gráfico 11 – Modelo de van Genutchen (1980).....	59
Gráfico 12 – Modelo de William <i>et al.</i> (1983).....	59
Gráfico 13 – Modelo de McKee e Bumb (1984)	60
Gráfico 14 – Modelo de McKee e Bumb (1987)	60
Gráfico 15 – Modelo de Kosigi (1994).....	61
Gráfico 16 – Obtenção da sucção de entrada de ar.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 FORMAÇÃO GUABIROTUBA	16
2.2 MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS	17
2.2.1 Fases constituintes do sistema de um solo não saturado.....	17
2.2.2 Tensão superficial	19
2.2.3 Capilaridade	20
2.2.4 Adsorção	23
2.2.5 Estados de energia e potencial da água nos solos	23
2.2.6 Sucção no solo.....	24
2.3 CURVA CARACTERÍSTICA OU CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	25
2.3.1 Fatores que influenciam a curva característica.....	27
2.3.2 Curvas características unimodais e bimodais	30
2.3.3 Determinação da curva característica.....	33
2.3.4 Técnica da translação de eixos.....	35
2.3.5 Determinação da curva característica.....	35
2.3.6 Curvas características na literatura.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 HORIZONTES COLETADOS	41
3.1.1 Coleta de amostras indeformadas	41
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	42
3.2.1 Análise granulométrica.....	43
3.2.2 Determinação do limite de liquidez	44
3.2.3 Determinação do limite de plasticidade.....	45
3.2.4 Determinação da massa específica real dos grãos.....	45
3.3 MEDIÇÃO DA SUCÇÃO COM A TÉCNICA DE TRANSLAÇÃO DE EIXOS	46
3.4 CORRELAÇÃO COM EQUAÇÕES EXISTENTES	49
4 RESULTADOS	50
4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	50
4.2 DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE	51
4.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	53

4.4 CORRELAÇÕES COM EQUAÇÕES DA LITERATURA.....	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
5.1 CONCLUSÕES.....	67
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

RESUMO

ROSA, André Fardin. **Determinação da curva característica de um horizonte do perfil geotécnico da formação Guabirotuba**. 2016. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Embora seja de extrema importância para a Mecânica dos Solos, a análise dos solos em seu estado não saturado ainda é recente e está em desenvolvimento. Este trabalho visa o melhor entendimento dos solos não saturados e a relação entre o seu grau de saturação e a sucção, parcela importante no estado de tensões do solo e significativa na estabilidade de obras de terra. O estudo desta relação é realizado por meio da curva característica de sucção, que neste trabalho é obtida experimentalmente por meio do equipamento SWC-150 da GCTS. Após a obtenção da curva característica de sucção experimental, é necessário equacionar esta curva, para que seja possível a sua aplicação. A classificação e compreensão da estrutura do solo é determinante na obtenção do melhor ajuste matemático para a curva obtida experimentalmente. O solo estudado neste trabalho, que foi coletado da formação Guabirotuba em Curitiba, é um silte inorgânico bem graduado e de alta compressibilidade, a equação que apresentou o melhor ajuste para a curva característica foi a de van Genuchten (1980), com coeficiente de determinação igual a 0,99.

Palavras-chave: Curva característica de sucção. Formação Guabirotuba. Solos não saturados. Método da translação de eixos.

ABSTRACT

ROSA, André Fardin. **Determination of the characteristic curve of a geotechnical profile horizon of the Guabirota formation**. 2016. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Although it is of extreme importance for the Soil Mechanics, soil analysis in its unsaturated state is still recent and is under development. This work aims a better understanding of unsaturated soils and the relationship between their degree of saturation and suction, an important part in the state of soil stresses and significant in the stability of earthworks. The study of this relationship is performed by means of the suction stress characteristic curve (SSCC), which in this work is obtained experimentally through the SWC-150 GCTS's equipment. After obtaining the experimental soil-water characteristic curve, it is necessary to equate this curve, so that it is possible to be applied. The classification and understanding of the soil structure is determinant in obtaining the best mathematical fit for the curve obtained experimentally. The soil studied in this work, which was collected from the Guabirota Formation in Curitiba, is a well graded inorganic silt with high compressibility. The equation that presented the best fit for the characteristic curve was van Genuchten (1980), with coefficient of determination equal to 0.99.

Keywords: Soil-water characteristic curve. Guabirota Formation. Unsaturated soil. Axis translation technique.

1 INTRODUÇÃO

A Mecânica dos Solos tem grande importância para o Engenheiro Civil, dentre suas aplicações pode-se citar o estudo de fundações, estruturas de contenção, estabilidade de taludes, escavações e aterros, entre outras.

A base do conhecimento em Mecânica dos Solos teve como marco inicial o trabalho desenvolvido por Karl von Terzaghi, em 1925. Segundo Ortigão (2007, p. 58), no trabalho de Terzaghi o conceito de tensão efetiva, considerado uma das maiores contribuições à engenharia geotécnica, é apresentado em uma abordagem do solo saturado, a partir de observações do seu comportamento quanto à compressibilidade e à resistência ao cisalhamento.

Com sua base na análise de solos saturados, a Mecânica dos Solos se desenvolveu muito desde 1925. Fredlund (2012, p. 15) cita que ainda na década de 1940, época na qual as ferramentas para solução de problemas matemáticos eram muito limitadas, muitos autores se dedicaram a simplificar problemas complexos tridimensionais e envolvendo propriedades variáveis do solo. Nessa época foi desenvolvido o Método das Fatias para a análise bidimensional da estabilidade de taludes, bem como o cálculo de redes de fluxo para a análise bidimensional do escoamento da água por um meio isotrópico, homogêneo e contínuo. Com o passar dos anos, os avanços tecnológicos e matemáticos possibilitaram o desenvolvimento de métodos mais sofisticados para a análise de solos, bem como a maior compreensão do solo em seu estado não saturado.

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, p. 9) ressalta que em regiões tropicais com clima semiárido, como o caso de algumas regiões do Brasil, a condição não saturada é muito significativa, pois modifica o comportamento mecânico, hidráulico e volumétrico do solo presente em maciços terrosos.

No estudo dos solos não saturados, os vazios do solo estão preenchidos com água e ar misturados, podemos então chamar o sistema composto por solo, água e ar de sistema trifásico. Feuerharmel (2007, p. 40) comenta que é necessário aplicar uma sucção a este sistema para que as moléculas de água se soltem das partículas

de solo, na relação entre a sucção e a distância entre as moléculas de água e as partículas de solo está o conceito de energia. Sendo assim, a sucção avalia basicamente a capacidade que o solo tem de reter água e é uma parcela de grande importância para a análise do estado de tensões de um maciço terroso. A relação entre a sucção e o teor de umidade ou grau de saturação é a chamada curva característica do solo.

Segundo Villar (2002, p. 265), a curva característica de sucção de um solo, ou curva de retenção de água pode ser utilizada para auxiliar na descrição do comportamento de um solo não saturado, fornecendo estimativa de parâmetros como a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e a variação de volume. Georgetti (2010, p. 35) acrescenta que alguns pesquisadores sugerem o equacionamento da curva, para simplificar a sua utilização na previsão de propriedades do solo.

Neste trabalho será abordada a curva característica de um horizonte de solo da formação Guabirotuba, presente em vasta área no município de Curitiba.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é encontrar a equação na literatura que melhor represente a curva característica de um horizonte de solo da Formação Guabirotuba, e determinar os seus parâmetros de ajuste.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o cumprimento do objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar geotecnicamente o horizonte de solo coletado por meio de ensaios de caracterização;
- Realizar o ensaio de sucção no equipamento SWC-150 da GCTS, utilizando a técnica de translação de eixos;
- Plotar os pontos obtidos no ensaio de sucção e fazer ajustes no software SciDAVis para as principais equações encontradas na literatura, comparando o coeficiente de determinação obtido a partir de cada ajuste para determinar a equação que melhor represente o solo estudado;

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo do solo da região de Curitiba pode trazer benefícios para a cidade, como obras de terra mais seguras, diminuição de gastos com situações não previstas em projeto e dimensionamento adequado de estruturas.

Segundo Kormann (2002, p.2), a maior parte da bacia sedimentar de Curitiba é preenchida pela Formação Guabirotuba, as argilas rijas desta formação são um material bastante duro em seu estado natural, mas que torna-se liso e escorregadio quando entra em contato com umidade, sendo frequente a ocorrência de acidentes em obras que envolvem fundações, escavações e taludes. Sabe-se que a estabilidade de um maciço de terra está intimamente ligada ao estado de tensões que o solo se encontra, este estado é alterado significativamente pela variação da umidade presente no maciço, por meio da influência na parcela de sucção. Villar (2002, p. 265) acrescenta que a sucção é um dos parâmetros mais importantes para o conhecimento do comportamento dos solos não saturados e que quanto mais secos os solos, maior a sucção.

De acordo com Feuerharmel (2007, p. 26), a sucção frequentemente é analisada a partir da curva característica de sucção, e esta descreve a capacidade que o solo tem de armazenar água quando submetido a diferentes valores de sucção. A autora acrescenta que vários estudos demonstram que o comportamento mecânico de um solo não saturado pode ser previsto a partir de parâmetros desta curva, mas para que a curva possa ser empregada é preciso que ela primeiro seja testada e calibrada para uma gama maior de solos.

Este trabalho visa contribuir para o melhor entendimento dos solos não saturados, bem como a determinação da curva característica e o melhor modelo matemático da literatura que a represente, para que a curva possa no futuro fazer parte de um banco de curvas da região, o que possibilitaria a aplicação dos solos não saturados na prática da engenharia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Segundo Cunha (2011, p. 7), a Formação Guabirota é a unidade estratigráfica que preenche em maior parte a Bacia Sedimentar de Curitiba. Felipe (2011, p. 11) menciona que grande parte dos sedimentos dessa formação foram originados a partir da decomposição química das rochas Pré-Cambrianas e estão distribuídos desde o município de Campo Largo até o município de Quatro Barras, abrangendo Curitiba e podendo atingir espessuras na ordem de 60 a 80 metros.

Salamuni (1998, p. 43) cita que a litologia principal da Formação Guabirota é composta por depósitos argilíticos pouco consolidados, areias arcossianas, depósitos rudáceos com matriz areno-argilosa, lentes de areia quartzosas e depósitos carbonáticos restritos (calcretes e caliches).

Kormann (2002, p. 1) cita que os sedimentos da Formação Guabirota são constituídos principalmente de argilas siltosas e siltes argilosos, mas possuem também materiais granulares. Ainda de acordo com Kormann (2002, p. 2-3), as argilas rijas e duras da formação são conhecidas como “sabão de caboclo”, por serem bastante duras em seu estado natural mas se tornam escorregadias e desagregarem quando umedecidas, tal comportamento torna frequente a ocorrência de acidentes em obras na região, ocasionando até mesmo a instabilidade de taludes de corte com inclinações reduzidas como 1:3 ou 1:4. Ribeiro (2007, p. 9) atribui a fácil desagregação do solo da formação à presença de argilas expansivas, encontradas em grande quantidade nos depósitos lamíticos da região, que caracterizam um princípio de laterização do solo. Segundo Zhan (2007, p. 2-5), a estabilidade de taludes constituídos por argilas expansivas está intimamente relacionada à interação entre o solo não saturado e a água, envolvendo os ciclos de expansão e contração e a variação da parcela de sucção no estado de tensões do solo.

Kormann (2002, p. 3-5) comenta que, tendo em vista os problemas com os solos da Formação Guabirota, uma caracterização aprofundada por meio de ensaios como o de adensamento, cisalhamento direto, triaxial e sucção é necessária para a melhor compreensão dos solos da região de Curitiba.

2.2 MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS

Segundo Georgetti (2010, p. 23), em áreas de clima tropical e subtropical, como no caso do Brasil, diversas obras de engenharia são executadas em solos não saturados, nos espessos perfis de solo acima de zona de saturação. O desempenho destas obras está condicionado às características dos solos não saturados. De acordo com Oliveira (2004, p. 1), nos ciclos de umedecimento e secagem os solos apresentam variações volumétricas e de resistência, sendo essas variações responsáveis por diversos deslizamentos de taludes como os ocorrem na Serra do Mar – SP em épocas de chuva.

Tendo em vista a importância da mecânica dos solos não saturados para o Brasil, o país se tornou um ambiente muito fértil para os estudos científicos na área. O ano tomado como referência do estudo dos solos não saturados no Brasil é 1991, quando foi realizado o 1º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados (1º ÑSAT), realizado em Brasília. Após o 1º ÑSAT, foram realizados o 2º ÑSAT (1994), em Recife, 3º ÑSAT (1997), em Rio de Janeiro, 4º ÑSAT (2001), em Porto Alegre, 5º ÑSAT (2004), em São Carlos, 6º ÑSAT (2007), em Salvador, 7º ÑSAT (2011) em Goiânia, e o 8º ÑSAT (2015), em Fortaleza. O número de autores e de trabalhos foi crescente com o passar dos anos (CARVALHO *et al.*, 2015, p. 9).

2.2.1 Fases constituintes do sistema de um solo não saturado

Custódio (2009, p. 5) explica que por definição, os solos não saturados são aqueles que possuem grau de saturação menor que 1, nesta condição os solos são constituídos por um sistema trifásico composto por solo, água e ar.

Os solos não saturados podem ser classificados em função da forma e continuidade com que as fases água e ar estão presentes. Na Figura 1, observa-se: (1) baixo grau de saturação, com a fase ar contínua e a fase água descontínua; (2) grau de saturação intermediário, com as fases ar e água contínuas; (3) alto grau de saturação, com a fase água contínua e a fase ar descontínua.

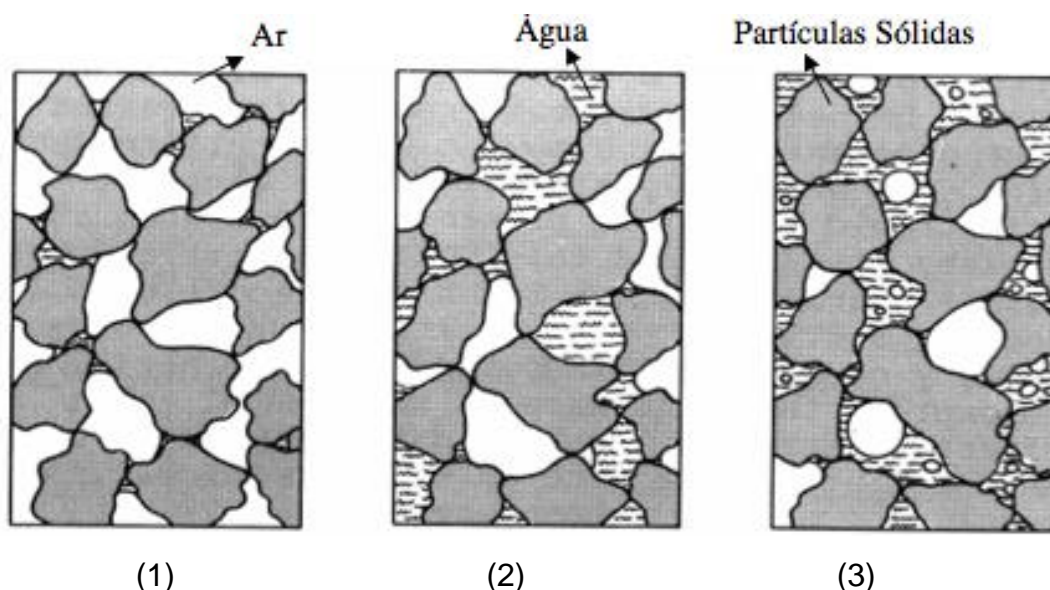


Figura 1 – Classificação do solo não saturado
Fonte: Wroth e Houlby (1985, apud FEUERHARMEL, 2007, p. 37)

Oliveira (2004, p. 5) cita que os problemas que envolvem os solos em sua condição não saturada são mais complexos, por envolverem dois fluídos no preenchimento (água e ar) que devido à tensão superficial entram em equilíbrio a pressões diferentes. Segundo Georgetti (2010, p. 23), as interações entre o solo, a água e o ar geram uma pressão negativa na água intersticial, que pode ser expressa como sucção quando tomada como referencial a pressão de gás externa ao solo. De acordo com Fredlund *et al.* (2012, p. 48), a interface entre a água e o ar pode ser considerada como uma quarta fase em respeito ao estado de tensões do sistema, esta fase é denominada membrana contrátil, já em termos da relação massa-volume, esta quarta fase pode ser considerada como parte da fase da água e o sistema pode ser considerado trifásico.

Bonder (2008, p. 6-7) apresenta detalhadamente as fases de um sistema composto por solo, ar e água, como segue:

- A fase sólida é constituída por partículas minerais, com grãos que variam de forma, tamanho, textura, composição mineralógica e configuração cristalográfica. A forma e o tamanho das partículas são determinantes para o comportamento físico e mecânico do solo;
- A fase líquida é composta por água, sais minerais e ar dissolvido. A água pode ser classificada como gravitacional, capilar e adsorvida. A água gravitacional é a água que está livre entre os poros, sob a ação apenas da gravidade. A água capilar é aquela que permanece no solo devido às forças

desenvolvidas no contato água – partículas sólidas, pelo fenômeno de capilaridade, que só existe quando o solo encontra-se na condição não saturada. A água adsorvida é a água que adere à superfície da partícula, devido à existência de cargas elétricas negativas nesta superfície;

- A fase gasosa é constituída pelo ar livre e pelo vapor de água, ocupando o espaço poroso que não está sendo ocupado pela água;
- A fase da membrana contrátil está na fronteira entre a água e a fase ar não dissolvido, comportando-se como uma membrana elástica submetida a uma tensão (tração).

2.2.2 Tensão superficial

Segundo Flühler e Roth (2004, p. 89), a interface entre o ar e a água presente nos solos é de grande importância para o melhor entendimento das interações entre as fases presentes em um solo não saturado. De acordo com Behring *et al.* (2003, p. 1), a tensão superficial surge na interface dos líquidos devido à diferença entre as forças que agem sobre as moléculas da superfície àquelas que se encontram no interior de uma solução, as moléculas de um líquido que se encontram na interface entre líquido-ar realizam um número menor de interações intermoleculares, como apresentado na Figura 2.

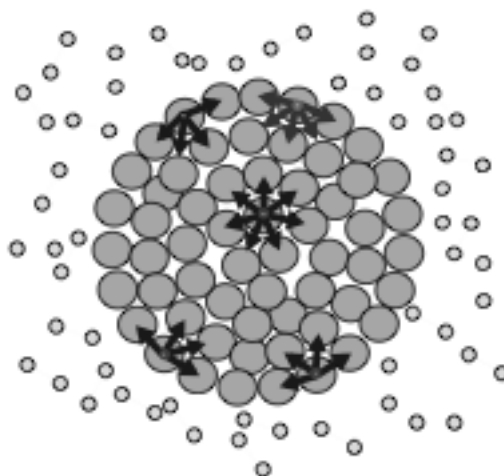


Figura 2 – Interações intermoleculares
Fonte: Flühler e Roth (2004, p.89)

Carvalho *et al.* (2015, p. 85) comentam que as moléculas dos líquidos em geral apresentam forças de atração de curto alcance (forças de Van der Waals), quando

estas forças se desenvolvem entre moléculas de um mesmo fluido, são denominadas de forças de coesão, quando se desenvolvem entre as moléculas de um fluido e de uma superfície sólida, são denominadas de forças de adesão. Além disso, Carvalho *et al.* citam que a resultante das forças de adesão e coesão define se o líquido tenderá ou não a molhar a superfície de contato do sólido com o líquido, como pode ser observado na Figura 3.

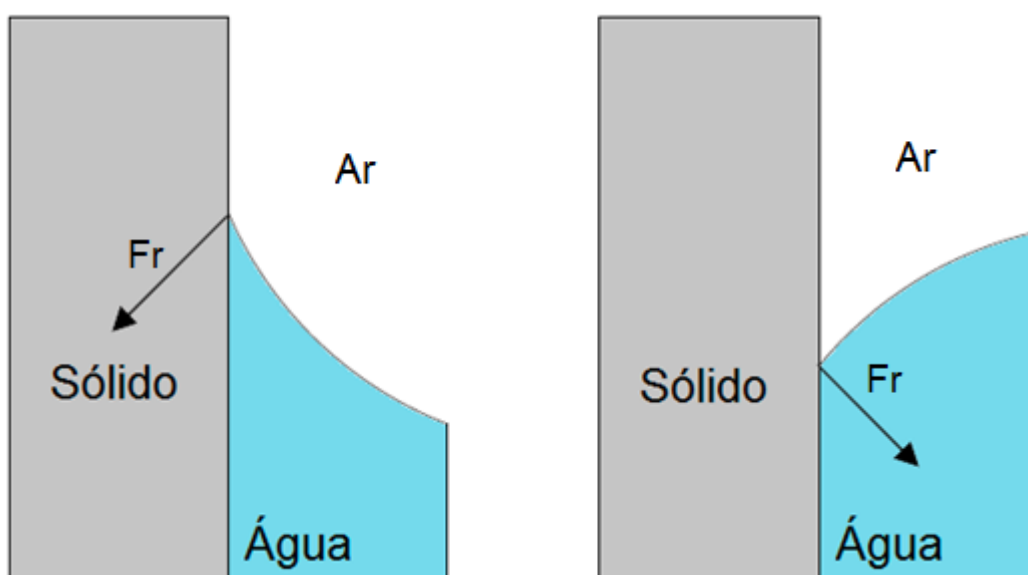


Figura 3 – Resultante das forças de adesão e coesão
Fonte: Carvalho (2015, p. 86)

2.2.3 Capilaridade

Segundo Libardi (2012, p. 27), quando se preenchem vasos comunicantes com um determinado líquido, estes atingem a mesma altura em todos os ramos, porém para tubos de diâmetros reduzidos (tubos capilares) a tensão superficial do líquido em contato com a parede sólida origina fenômenos capilares que interferem na altura de equilíbrio do líquido. Na Figura 4, onde h é a diferença de altura entre os vasos comunicantes, é possível observar o fenômeno capilar em um tubo de pequeno diâmetro.

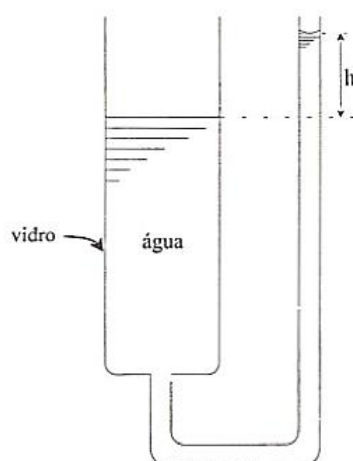


Figura 4 – Fenômeno capilar
Fonte: Libardi, 2012, p.27

De acordo com Flühler e Roth (2004, p. 107-108), considerando esférico o menisco na interface entre dois fluidos, o equilíbrio acontece entre as forças atuantes para cima (equação 1) e as forças atuantes para baixo (equação 2). A equação da altura de equilíbrio é apresentada na equação 3 e é possível observar na Figura 5 a representação das forças atuantes no sistema.

$$F = 2\pi r \sigma_{wa} \cos \gamma \quad (1)$$

$$F = -\rho_w \pi r^2 h_m g \quad (2)$$

$$h_m = -\frac{2\sigma_{wa} \cos \gamma}{r \rho_w g} \quad (3)$$

Nas equações, r é o raio do capilar, $\sigma_{wa} \cos \gamma$ é a componente vertical da resultante das forças de adesão e coesão, ρ_w o peso específico do líquido, h_m a altura da água no capilar e g a gravidade.

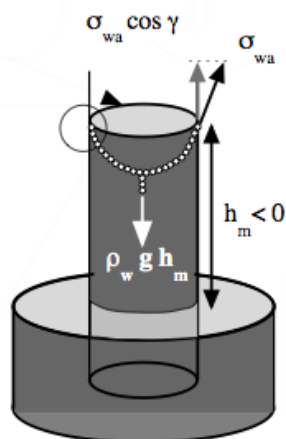


Figura 5 – Forças atuantes em um menisco
 Fonte: Flühler e Roth (2004, p.108)

Gomes (2007, p. 4) comenta que os vazios intergranulares comportam-se como uma rede de canalículos nos quais é possível a instauração do fenômeno de ascensão capilar. Como pode-se observar nas equações apresentadas anteriormente, a altura de equilíbrio nos capilares é inversamente proporcional ao raio do tubo, é possível observar na Figura 6 a esta relação nos capilares formados entre partículas de solo.

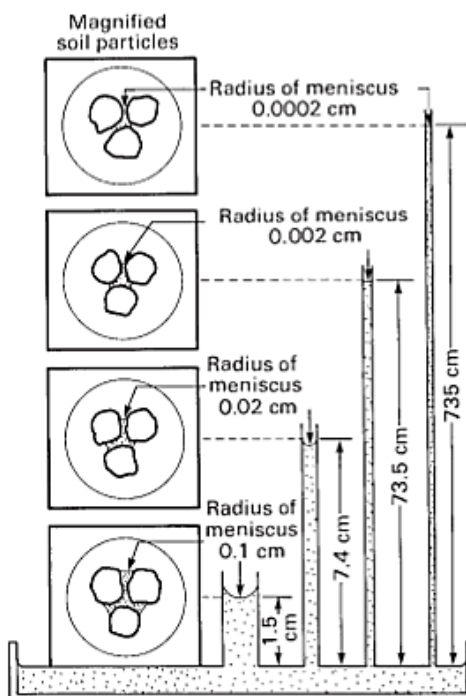


Figura 6 – Altura de equilíbrio para diferentes raios
 Fonte: Janssen e Dempsey (1980, *apud* Fredlund *et al.* 2004, p.111)

2.2.4 Adsorção

O processo de adsorção de água na superfície dos sólidos do solo ocorre com a formação de uma película, que possui uma energia potencial extra devido as forças de adsorção. Sendo assim, ao afastarmos uma porção da película da partícula de solo, ela voltará para a posição original e as forças de adsorção realizarão um trabalho (LIBARDI, 2012, p. 42).

Segundo Bonder (2008, p. 7), enquanto a água capilar faz parte da água livre no sistema do solo em estado não saturado, a água adsorvida adere à superfície das partículas de solo devido à existência de cargas eletronegativas presentes nela, não podendo ser separada por forças hidrodinâmicas. Song (2012, p. 3), a capacidade de adsorção das argilas é maior que a das siltes e areias devido a sua superfície específica e as suas cargas superficiais. A Figura 7 apresenta a água capilar e a água adsorvida em um solo não saturado.

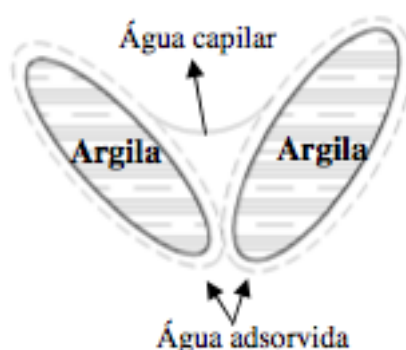


Figura 7 – Altura de equilíbrio para diferentes raios
 Fonte: Feuerharmel (2007, p. 35)

2.2.5 Estados de energia e potencial da água nos solos

Reis (2004, p. 53-54) afirma que a energia potencial da água no solo, em relação a um estado padrão de referência arbitrado, possui as componentes osmótica, matricial, gravitacional e pneumática. Ainda de acordo com Reis (2004, p. 54-55) as componentes do potencial total da água no solo são melhor explicadas abaixo:

- O Potencial Gravitacional traduz a componente de posição da água, ou seja, a cota que a água do solo está em relação a uma cota de referência;

- O Potencial Osmótico reflete a influência da presença de solutos na água do solo, este potencial equivale ao Potencial Total para um solo saturado no qual a água encontra-se na cota tomada como referência;
- O Potencial Pneumático é de grande importância para ensaios de placa de pressão ou a técnica de translação de eixos, ele ocorre quando o solo está sujeito a uma pressão diferente da pressão atmosférica;
- O Potencial Matricial é um potencial de pressão que resulta do efeito combinado de forças capilares e de adsorção.

Segundo Soto (2004, p. 4-5) os potenciais da água no solo podem ser expressos em termos de energia por unidade de massa e o potencial total pode ser expresso como:

$$\phi = \phi_g + \phi_p + \phi_{osm} + \phi_m \quad (4)$$

Onde ϕ é o potencial total, ϕ_g é o potencial gravitacional, ϕ_p é o potencial pneumático, ϕ_{osm} é o potencial osmótico e ϕ_m é o potencial matricial.

2.2.6 Sucção no solo

Quando um solo não saturado é colocado em contato com um reservatório de água através de uma membrana semipermeável, o solo absorve água exercendo uma sucção até que a pressão na água do solo seja a mesma pressão na água livre do reservatório, como pode ser observado no esquema da Figura 8 (GEORGETTI, 2010, p. 29).

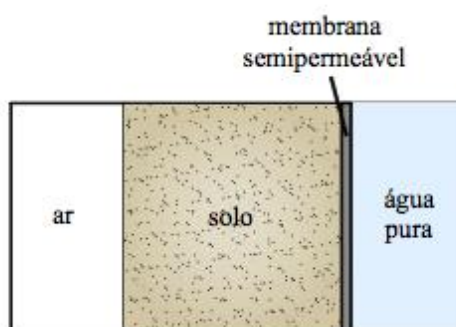


Figura 8 – Esquema ilustrativo da sucção
 Fonte: Georgetti (2010, p. 29)

A sucção total do solo é definida como a pressão manométrica negativa que deve ser aplicada a um reservatório de água pura para manter o equilíbrio entre água no reservatório e a água do solo (SOTO, 2004, p. 7).

Segundo Reis (2004, p. 56), a sucção total corresponde ao potencial total, quando os potenciais gravitacional e pneumático podem ser desprezados, neste caso a sucção total possui duas componentes, a osmótica e a matricial (ou mátrica), sendo que a primeira corresponde ao potencial osmótico e a segunda ao potencial matricial.

De acordo com Feuerharmel (2007, p. 36), a sucção matricial é definida pela diferença entre a poro-pressão de ar (u_a) e a poro-pressão de água (u_w), sendo controlada pelas forças capilares e as forças de adsorção, que são mecanismos presentes apenas em solos não saturados e são experimentalmente inseparáveis. Já a sucção osmótica é influenciada pelas condições químicas e térmicas do solo, podendo ocorrer tanto em solos não saturados como saturados, e é definida como a tensão adicional necessária para remover uma molécula de água, devido à presença de sais dissolvidos.

2.3 CURVA CARACTERÍSTICA OU CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

De acordo com Feuerharmel (2007, p. 162) a curva característica é uma das principais relações utilizadas para entender e interpretar o comportamento dos solos não saturados. A curva descreve a capacidade do solo de reter água quando submetido a diferentes valores de sucção, em trajetórias de umedecimento e/ou secagem, podendo a quantidade de água contida nos vazios do solo ser representada pelo teor de umidade ou pelo grau de saturação. Segundo Fredlund *et al.* (1997, *apud* Villar, 2002, p. 265), a curva característica pode ser utilizada para fornecer uma estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento de um solo não saturado, como a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e a variação de volume.

Dentre os parâmetros que podem ser obtidos a partir de uma curva característica, Menegotto (2004, p. 42) destaca:

- O valor de entrada de ar, que corresponde à sucção matricial onde o ar começa a entrar nos poros maiores do solo;
- A umidade volumétrica residual, que é a umidade que exige uma grande mudança da sucção para ser removida do solo;
- A umidade volumétrica do solo saturado, que é a umidade que o solo se encontra no seu estado inicial ou final, dependendo se o processo adotado foi de secagem ou umedecimento, respectivamente.

Pode-se observar na Figura 9 a curva característica típica de um solo siltoso, com os parâmetros citados.

Nota-se que o ponto final da curva de umedecimento pode diferir do ponto inicial da curva de secagem, devido à presença de ar retido no solo (MENEGOTTO, 2004, p. 42). Freitas Neto (2008, p. 12) comenta que a curva característica que segue a trajetória de umedecimento não se sobrepõe à curva que segue a trajetória de secagem, apresentando uma diferença denominada histerese. O autor cita que além do processo de umedecimento e secagem, outros fatores como o tipo de solo (composição granulométrica), o teor de umidade na moldagem do corpo de prova, os efeitos da estrutura do solo, os fenômenos de expansão e ressecamento e o histórico de tensões podem causar histerese.

A Figura 9 se refere a uma curva característica unimodal, em formato S. Gitirana e Fredlund (2004, p. 2) comentam que em solos com distribuição granulométrica aberta, ou solos com determinadas estruturas, é possível obter no ensaio de sucção uma curva bimodal, ou seja, em duplo S. Em curvas bimodais, são observados 2 valores de entrada de ar e 2 valores de teor de umidade residual. As características de curvas unimodais e bimodais serão descritas nas próximas seções.

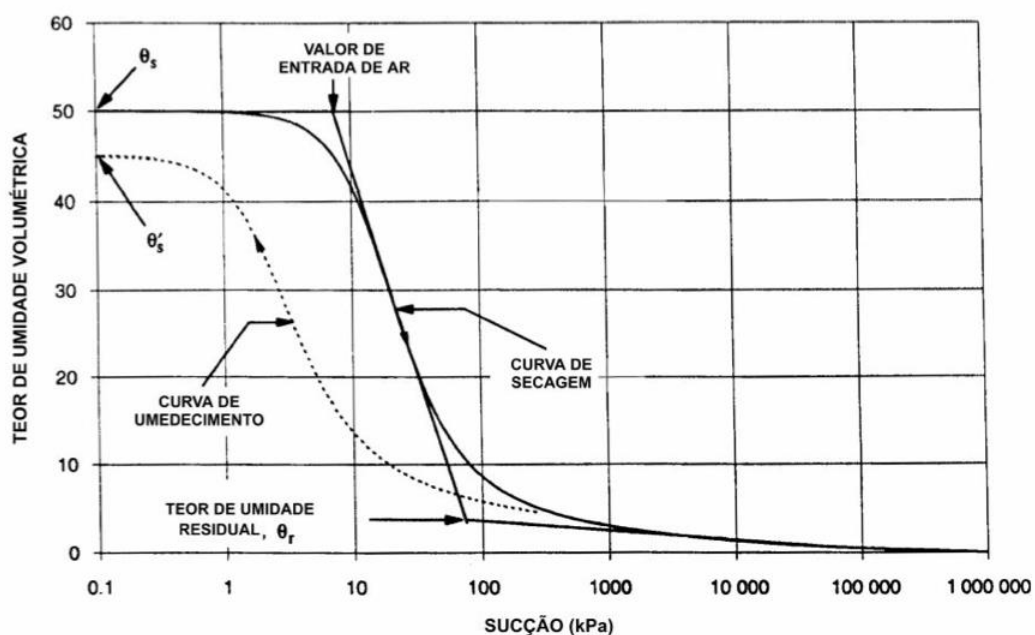


Figura 9 – Curva característica típica de um solo siltoso
 Fonte: Fredlund; Xing (1994, *apud* Menegotto, 2004, p. 34)

2.3.1 Fatores que influenciam a curva característica

As características de posição, inclinação e forma da curva de retenção de água são influenciadas principalmente pela granulometria, estrutura e mineralogia do solo (GEORGETTI, 2010, p. 34).

As curvas de retenção são diferentes para solos argilosos, siltosos e arenosos, isto ocorre pela influência da granulometria nas forças capilares e de adsorção. Para solos mais finos, como no caso de solos argilosos, há a formação de finíssimos capilares, que induzem o aparecimento de meniscos com curvaturas acentuadas, indicando maior diferença de pressão na interface líquido–ar. Além disso, o mecanismo de adsorção ocorre de forma mais intensa em solos de textura mais fina, pois solos mais finos terão maior superfície específica e assim, maiores serão as forças de adsorção na superfície das partículas (PEREIRA, 2004, p. 37). É possível observar nas Figuras 10 e 11 a relação da curva de retenção de água com o tipo de solo e com diferentes distribuições granulométricas respectivamente.

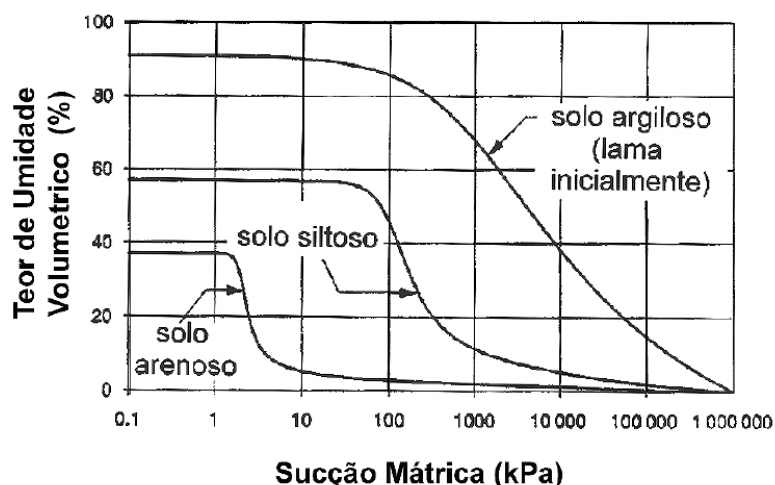


Figura 10 – Curvas características típicas para diferentes tipos de solo
 Fonte: Fredlund; Xing (1994, *apud* Villar, 2002, p. 272)

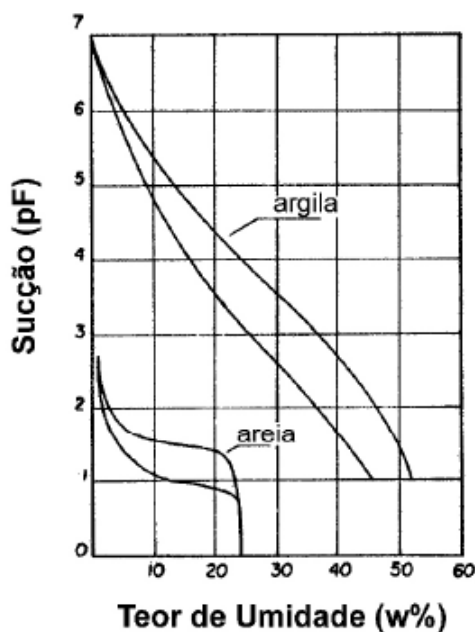


Figura 11 – Curvas características para solos com diferentes granulometrias
 Fonte: De Campos *et al.* (1992, *apud* Villar, 2002, p. 272)

Além do tipo de solo e da granulometria, outros fatores como o teor de umidade inicial, o esforço de compactação, o índice de vazios e o estado de tensões também têm influência sobre a curva característica (FEUERHARMEL, 2007, p. 48-50). Esses fatores são apresentados na Figura 12 (a-e), sendo o índice de vazios em c expresso pelo volume específico ($v = 1 + e$).

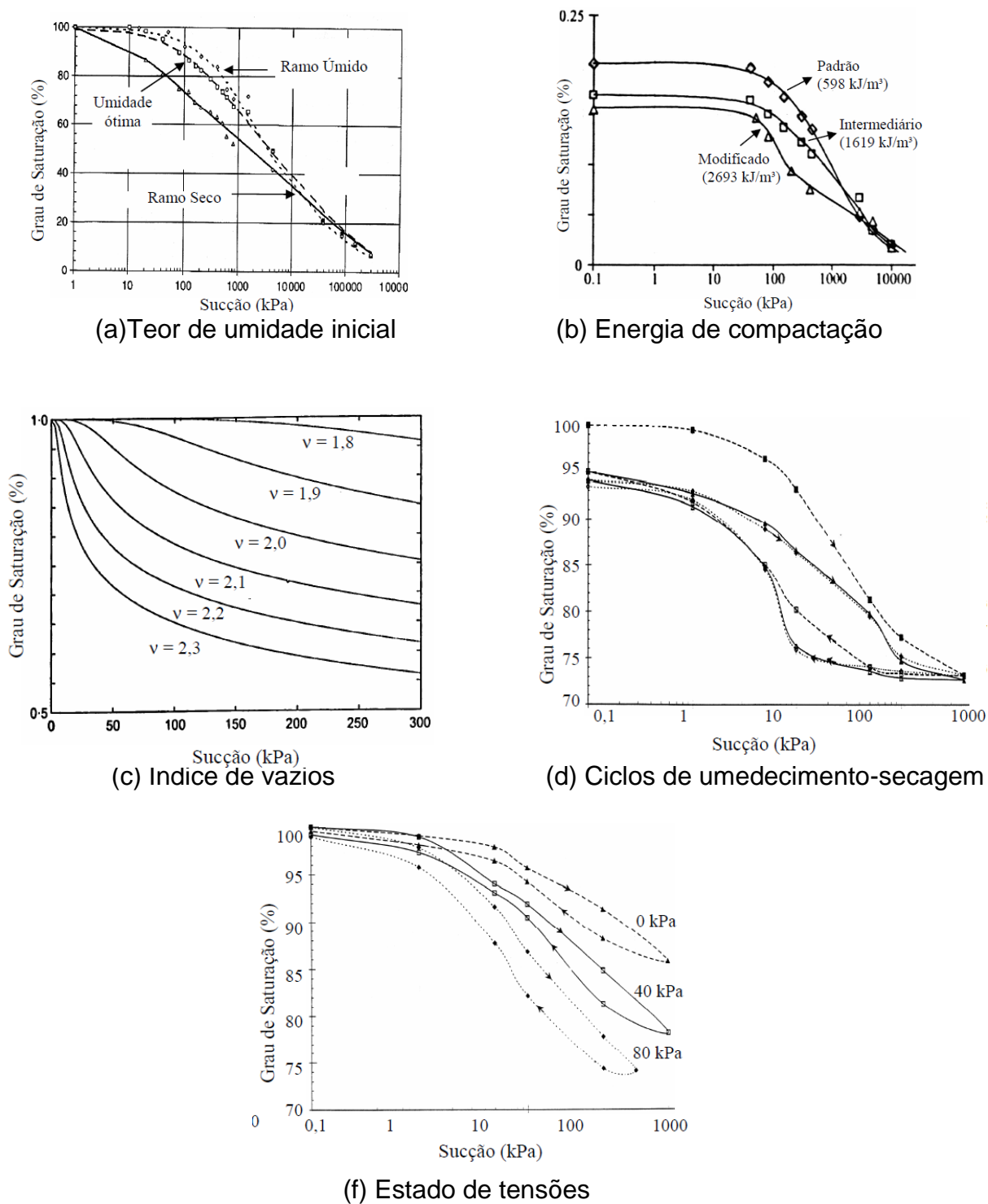


Figura 12 – Fatores que influenciam a curva característica
 Fonte: (a) Vanapalli *et al.* (1999), (b) Leong e Rahardjo (2002), (c) Galipolli *et al.* (2003), (d) e (e) Ng e Pang (2000) (*apud* Feuerharmel, 2007, p. 49)

2.3.2 Curvas características unimodais e bimodais

As curvas características de retenção de água podem ser classificadas na literatura como unimodais ou bimodais.

Segundo Feuerharmel (2007, p. 41-44), as curvas unimodais predominam dentre as curvas características publicadas na literatura geotécnica, estas curvas podem ser divididas em três zonas de dessaturação, como apresentado na Figura 13.

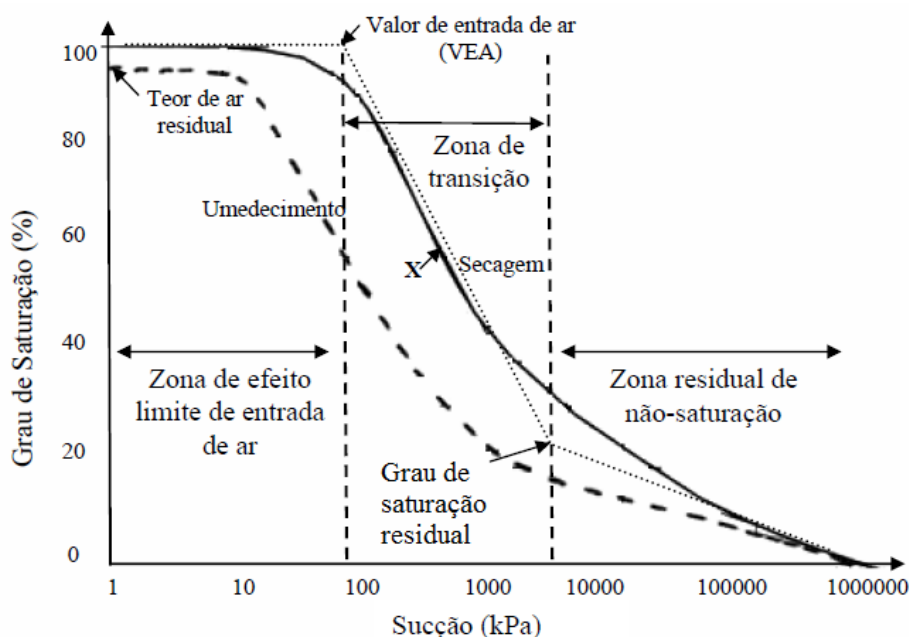


Figura 13 – Zonas de dessaturação em curva unimodal
 Fonte: Adaptado de Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999)

Pode-se observar na Figura 13 que a trajetória de secagem da curva característica do solo em questão partiu de um ponto de saturação 100%, o exemplo é utilizado para ilustrar os trechos de dessaturação. Segundo Weber (2013), a zona de efeito limite de entrada de ar para o solo em questão corresponde ao estágio onde todos os poros estão preenchidos por água, nesta zona os conceitos da mecânica dos solos clássica são válidos. Seguindo a partir do valor de entrada de ar (VEA), na zona de transição ocorre uma redução significativa do grau de saturação com o aumento da sucção e a água começa a perder a sua continuidade no interior dos poros. Por fim, a partir do grau de saturação residual, a zona residual é caracterizada pelo fluxo da água apenas em forma de vapor, sendo necessários grandes valores de sucção para remover a água presente dos poros. Ainda de acordo com Weber (2013), o grau

de saturação residual nem sempre é bem definido. A Figura 14 (a-d) ilustra a possível variação da água nos poros do solo passando pelos estágios de dessaturação.

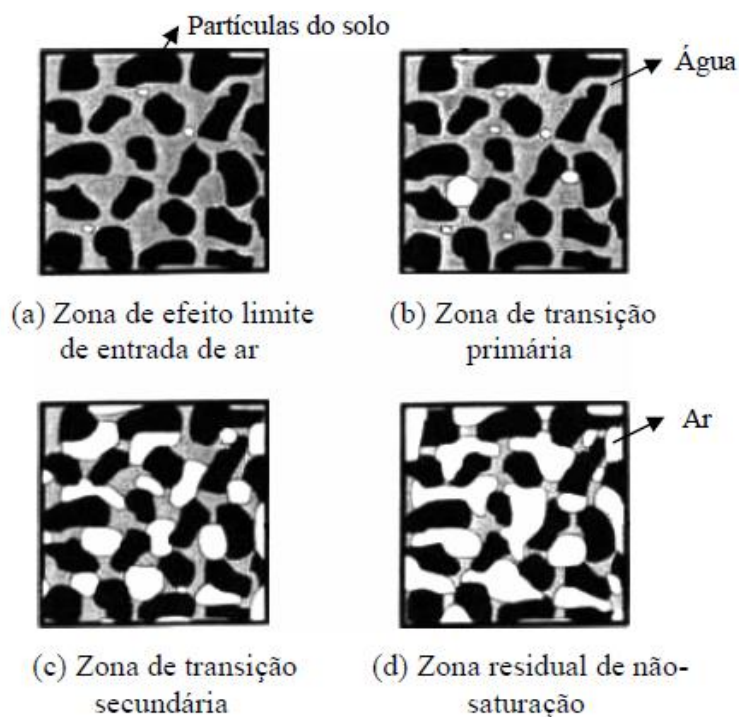


Figura 14 – Provável variação da água nos estágios de dessaturação do solo
 Fonte: Adaptado de Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999)

Embora as curvas características de retenção para a maioria dos solos estudados na literatura possuam formato unimodal, as curvas em formato de duplo “S” ou bimodais representam o comportamento de dessaturação de solos de origem residual ou sedimentar, com macroestrutura e microestrutura bem definidas, encontrados em regiões de clima tropical e subtropical (FEUERHARMEL, 2007, p. 44). A representação de uma curva bimodal e seus parâmetros pode ser observada na Figura 15.

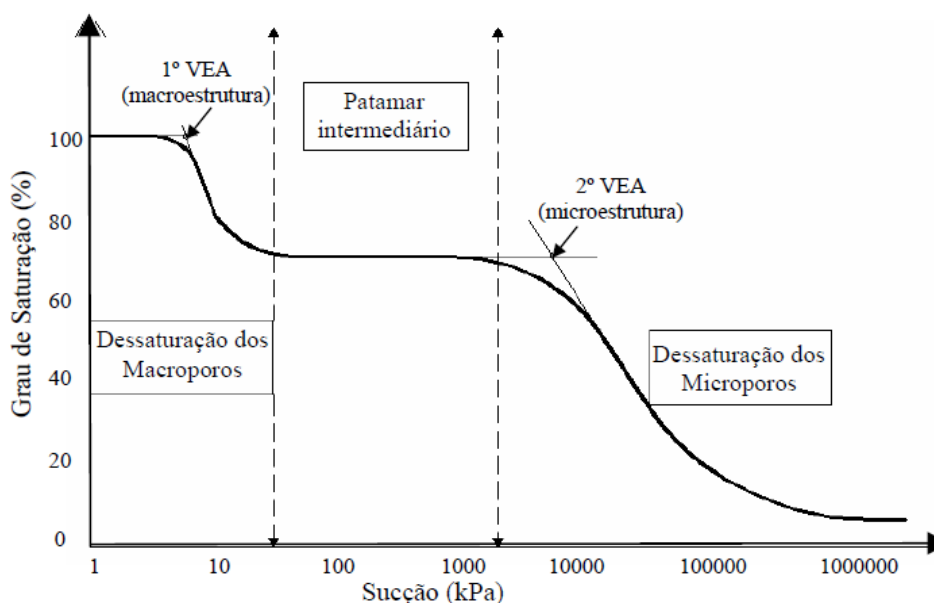


Figura 15 – Curva característica bimodal

Fonte: Feuerharmel *et al.*, 2005 (*apud* Feuerharmel, 2007, p. 44)

Nota-se na Figura 15 que para este tipo de curva característica existem 2 valores de entrada de ar (VEA), além disso, existe uma divisão de trechos para a dessaturação dos macroporos e a dessaturação dos microporos.

Solos com macroestrutura e microestrutura bem definidas sugerem uma distribuição bimodal de poros, frequentemente relacionada com a má graduação da curva granulométrica do material, mas podendo também estar relacionada com algumas estruturas de solos (Campus de Carvalho *et al*, 2002, *apud* Bonder, 2008, p. 25).

Feuerharmel (2007, p. 44) comenta que a formação bem definida de macroestrutura e microestrutura no solo pode ocorrer, por exemplo, pela aglomeração de partículas de argila, de tal forma que o tamanho do aglomerado se assemelhe ao tamanho de partículas de silte ou areia. Neste caso os macroporos são formados entre os agregados de argila e os microporos são formados no interior deles. A Figura 16 ilustra uma provável dessaturação para este tipo de solo.

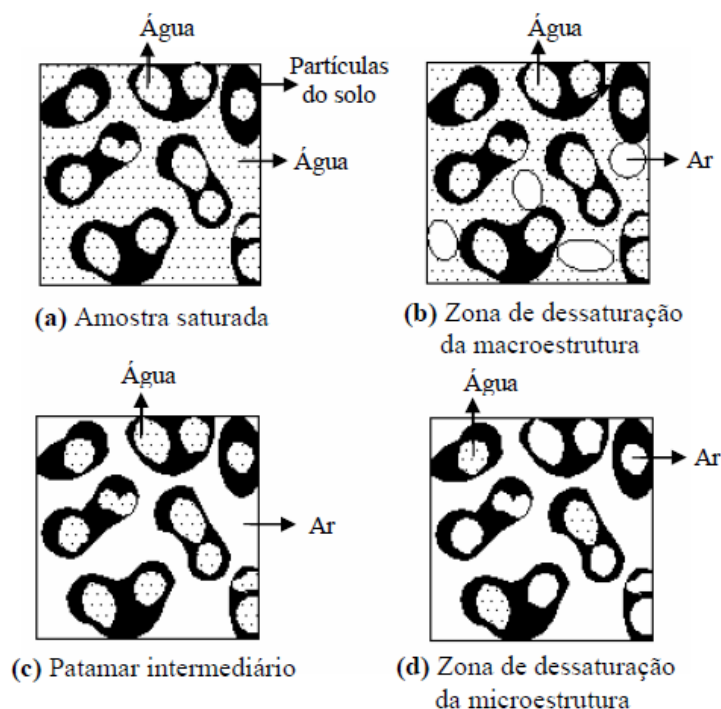


Figura 16 – Provável dessaturação de um solo com curva característica bimodal
Fonte: Feuerharmel et al., 2005 (apud Feuerharmel, 2007, p. 45)

2.3.3 Determinação da curva característica

Machado e Dourado (2001, p. 325) comentam que a importância da curva característica no estudo do fluxo de água e na estimativa de parâmetros de resistência em solos não saturados serviu como estímulo ao desenvolvimento de novas técnicas para a sua determinação.

Os métodos de medição da sucção para a obtenção da curva característica podem ser divididos em diretos e indiretos. Um método é considerado direto quando a sucção é medida diretamente, e indireto quando a sucção é estimada a partir de correlações com outras propriedades ou parâmetros do solo (FEUERHARMEL, 2007, p. 51).

A Tabela 1 apresenta algumas das técnicas utilizadas para medir a sucção dos solos, com suas respectivas faixas de medidas. Neste trabalho será dado destaque à técnica de translação de eixos pelo método da placa de pressão, que foi o método utilizado para medir a sucção da amostra em questão.

Tabela 1 – Métodos de medida de sucção

Método de Medida/ Tipo de Sucção	Faixa de Medida (kPa)	Observações
Blocos porosos (matricial)	10 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> • Baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos como gesso, fibra de vidro e etc., bem como da resistência elétrica (ohms x Sucção); • Desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções; • Tempo de Equilíbrio: Semanas.
Equilíbrio da fase vapor (total)	Toda a faixa acima de 400	<ul style="list-style-type: none"> • Solução com concentração conhecida; Umidade relativa; sucção total; • Amostras de solo em dessecador sem contato com a solução até o equilíbrio de peso; • Tempo de equilíbrio demorado
Extrato da solução do solo (osmótica)	Todos os valores	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade elétrica do extrato da solução; • Concentração de solutos; • Extratos + psicômetros: Resultados precários
Funil de pedra porosa (matricial)	0 a 90	<ul style="list-style-type: none"> • Sucção aplicada diretamente à amostra • Indicado para determinar baixas sucções (Libardi, 1995); Tempo de Equilíbrio: Horas
Membrana de pressão	até 10000	<ul style="list-style-type: none"> • Emprega a técnica da translação de eixos; • Emprega membrana de celulose • Tempo de equilíbrio: Dias
Papel filtro com e sem contato (matricial/total)	30 a 30000	<ul style="list-style-type: none"> • Depende do contato com o solo, que, por sinal deve ser garantido; • Necessita calibração do papel; • Evitar formação de fungos nos papéis mais umedecidos • Pesagem com precisão de 0,0001g; • Tempo de equilíbrio de 7 a 30 dias
Placa de pressão (matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Emprega a técnica de translação de eixos; • Depende da pressão de entrada de ar na pedra porosa; • Continuidade da fase ar; • Tempo de equilíbrio: Horas
Princípios osmóticos (matricial)	200 a 1600 (PEG 20000)	<ul style="list-style-type: none"> • Solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva; • Solução de Polietileno Glicol (PEG), peso molecular 20000; • Útil para instalar e controlar sucção em ensaios; • Tempo de equilíbrio: Horas.
Psicômetros (total/osmótica)	100 a 8000	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de rigoroso controle de temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório; • Sucção osmótica: mede sucção de extrato da solução do solo (Confiabilidade precária) (Fredlund; Rahardjo, 1993); • Tempo de Equilíbrio: Minutos.

(Continua)

(Continuação)

Método de Medida/ Tipo de Sucção	Faixa de Medida (kPa)	Observações
Tensiômetro padrão (matricial)	0 a 100	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de resposta: Depende da condutância da pedra porosa e sensibilidade do elemento de medida; • Existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos; • Tempo de equilíbrio: Minutos.
Tensiômetro de alta capacidade (tac) * (matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Medem sucção abaixo de - 1atm; até uma sucção de 1500kPa; • Tiram partido da elevada resistência à tração da água (Ridley; Burland, 1993) e tem curto tempo de resposta.

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

2.3.4 Técnica da translação de eixos

A técnica da translação de eixos consiste na mudança de referencial de pressão atmosférica, aumentando artificialmente a pressão de ar (u_a) existente nos poros. A pressão de água (u_w) é aumentada também, mantendo constante a sucção ($u_a - u_w$) até que os valores de pressão sejam mensuráveis nos equipamentos de medida. Para a aplicação dessa técnica, é necessário utilizar placas porosas especiais que permitam o fluxo de água e não permita o fluxo de ar, como o fluxo de solutos também é permitido através da pedra porosa, a variável controlada neste ensaio é a sucção matricial (FREITAS NETO, 2008, p. 20).

Segundo Feuerharmel (2007, p. 57), o procedimento utilizado na técnica da translação de eixos não interfere na curvatura da interface ar-água e permite que a poro-pressão da água seja mantida positiva, eliminando o risco de ocorrer cavitação. Ainda segundo a autora, a ocorrência de cavitação poderia prejudicar a medição do volume de água e causar erros na poro-pressão, com a formação de bolhas de ar ocluso acumuladas abaixo do compartimento do disco de alto valor de entrada de ar. Soto (2004, p. 15) cita que a técnica é viável desde que exista uma continuidade da fase de ar através da amostra de solo. Além disso, a técnica não é recomendada para sucções menores que 10 kPa e para solos com graduação fina.

2.3.5 Determinação da curva característica

Segundo Georgetti (2010 p. 35), alguns pesquisadores sugerem o equacionamento da curva de retenção para simplificar o seu emprego na previsão de propriedades do solo.

Feuerharmel (2007, p. 58) cita que Leong e Rahardjo (1997) e Sillers *et al.* (2001) apresentam uma revisão das principais expressões matemáticas encontradas na literatura para descrever curvas características, destacando que a maior parte dessas equações foram desenvolvidas para solos específicos, com curva unimodal e com apenas a trajetória de secagem modelada. Na Tabela 2 são apresentadas as principais equações, que serão utilizadas neste trabalho, com apenas as equações que não dependem da trajetória de umedecimento.

Tabela 2 – Equações para curvas unimodais em formato “S”

Referência	Equação	Descrição das Variáveis
Burdine (1953)	$S = \frac{1}{(1 + (a\Psi)^n)^m}$	S = grau de saturação; Ψ = sucção a, n e m = parâmetros de ajuste (m = 1 – 2/n)
Gardner (1958)	$S = \frac{1}{1 + a\Psi^n}$	a e n = parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$S = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda$	Ψ_b = sucção de entrada de ar λ = índice de distribuição de tamanho de poros
Brutsaert (1966)	$S = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Psi}{\Psi_b}\right)^n}$	Ψ_b = sucção de entrada de ar n = parâmetro relacionado à distribuição de tamanho de poros
Farrel e Larson (1972)	$S = \Psi_b \cdot \exp[a(1 - \theta)]$	Ψ_b = sucção de entrada de ar a = parâmetro de ajuste
Mualem (1976)	$S = \frac{1}{(1 + (a\Psi)^n)^m}$	Similar ao modelo de Burdine (1953), mas com m = 1 – 1/n
van Genuchten (1980)	$S = \left[\frac{1}{1 + (a\Psi)^n}\right]^m$	a, n e m = parâmetros de ajuste
William <i>et al.</i> (1983)	$\ln\Psi = a + b\ln\theta$	a e b = parâmetros de ajuste
McKee e Bumb (1984)	$S = \exp\left(\frac{a - \Psi}{n}\right)$	a e n = parâmetros de ajuste
McKee e Bumb (1987)	$S = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Psi - a}{n}\right)}$	a e n = parâmetros de ajuste
Kosigi (1994)	$S = \left(1 + \frac{a - \Psi}{a - n}\right) \cdot \exp\left(-\frac{a - \Psi}{a - n}\right)$	a e n = parâmetros de ajuste Modificação do modelo de Tani (1982)

Fonte: Adaptado de Feuerharmel (2007, p. 59-60)

As equações de Farrel e Larson (1972) e William et al. (1983) utilizam em suas equações a variável umidade volumétrica (θ), que é por definição o volume de água dividido pelo volume total da amostra, ou seja, a quantidade em volume de água presente em um volume conhecido de amostra.

2.3.6 Curvas características na literatura

Dentre as curvas características de solos encontrados na literatura, pode-se destacar para este trabalho as curvas obtidas por dois autores, Feuerharmel (2007) e Matsubara (2015).

Um dos solos que foi objetivo de estudo de Feuerharmel (2007), foi o Argissolo Vermelho-Amarelo da Formação Serra Geral. Em seus estudos, Feuerharmel (2007) constatou que o referido solo poderia ser classificado como areia, caso o ensaio de granulometria fosse realizado sem a utilização de defloculante. Por outro lado, poderia ser classificado como argila, com a utilização de defloculante. A diferença de classificação é devida ao aglomeramento das partículas de argila, que quando agregadas se assemelham em tamanho às partículas de silte e areia. A curva granulométrica para este solo pode ser observada na Figura 17.

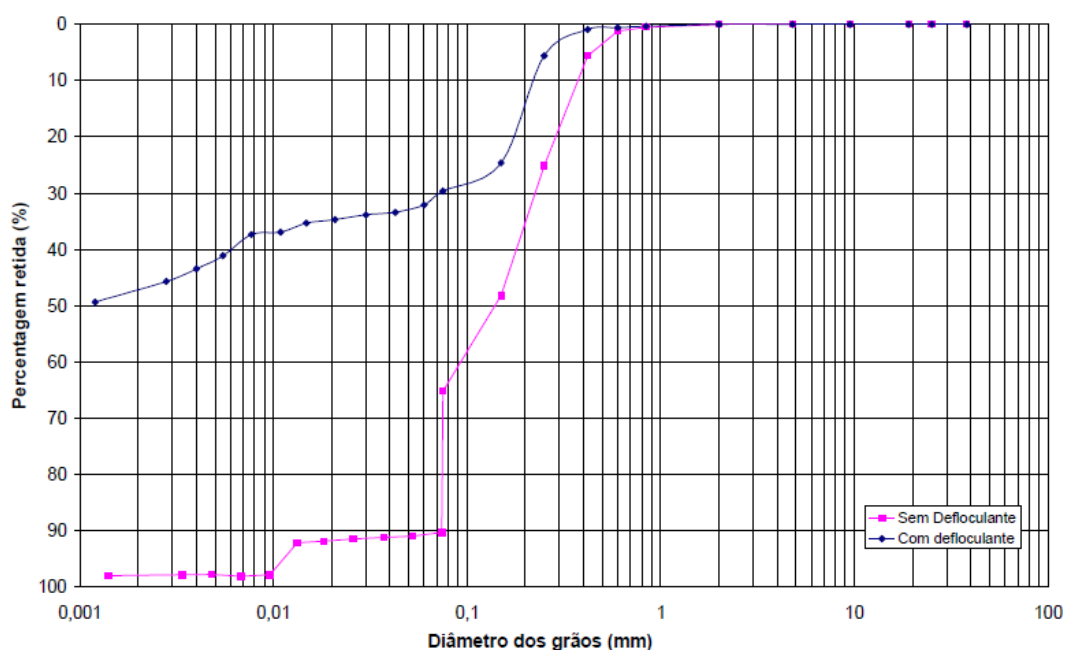


Figura 17 – Curvas granulométrica de argissolo vermelho-amarelo
Fonte: Feuerharmel (2007, p. 144)

Para o solo em questão, Feuerharmel (2007) realizou o ensaio de sucção pelo método da placa de sucção, para sucções inferiores a 5 kPa e o método do papel filtro

para sucções entre 5 e 30000 kPa. A curva característica de sucção obtida para a amostra indeformada através dos dois métodos, nas trajetórias de secagem e umedecimento, pode ser observada na Figura 18.

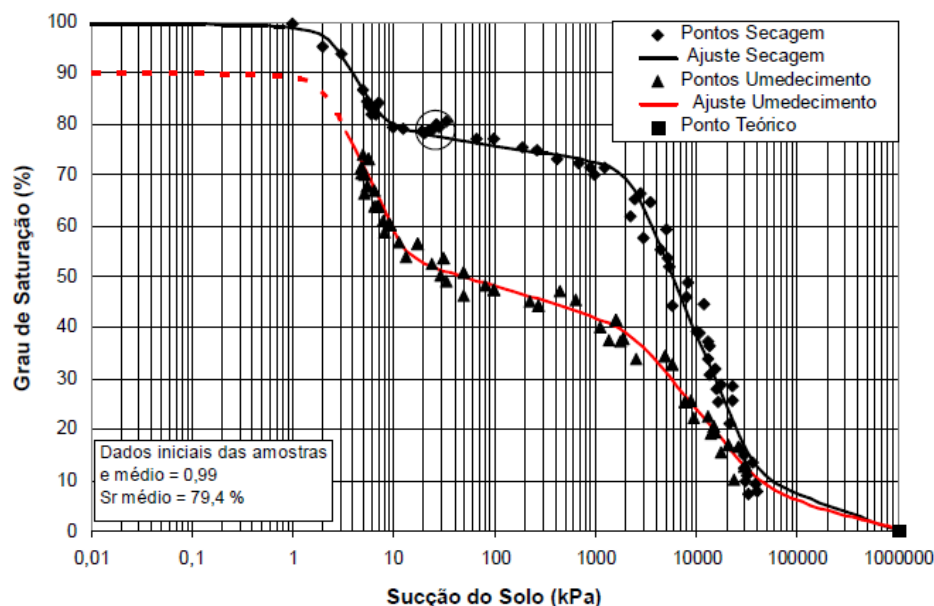


Figura 18 – Curva característica do argissolo vermelho-amarelo
Fonte: Feuerharmel (2007, p. 166)

A partir da Figura 18 é possível observar que a curva característica de sucção para o solo de Feuerharmel (2007) apresenta formato bimodal. Como a amostra utilizada no ensaio estava indeformada, pode-se dizer que o formato da curva característica é devido ao formato da curva granulométrica sem defloculante, da Figura 17. A falta de grãos de determinados diâmetros resultou na formação de macroporos e microporos, bem como na ausência de poros com tamanhos intermediários.

Matsubara (2015) estudou um solo da Formação Guabirotuba coletado na região de Curitiba e classificado como areno-argiloso pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos. A curva granulométrica do solo pode ser observada na Figura 19.

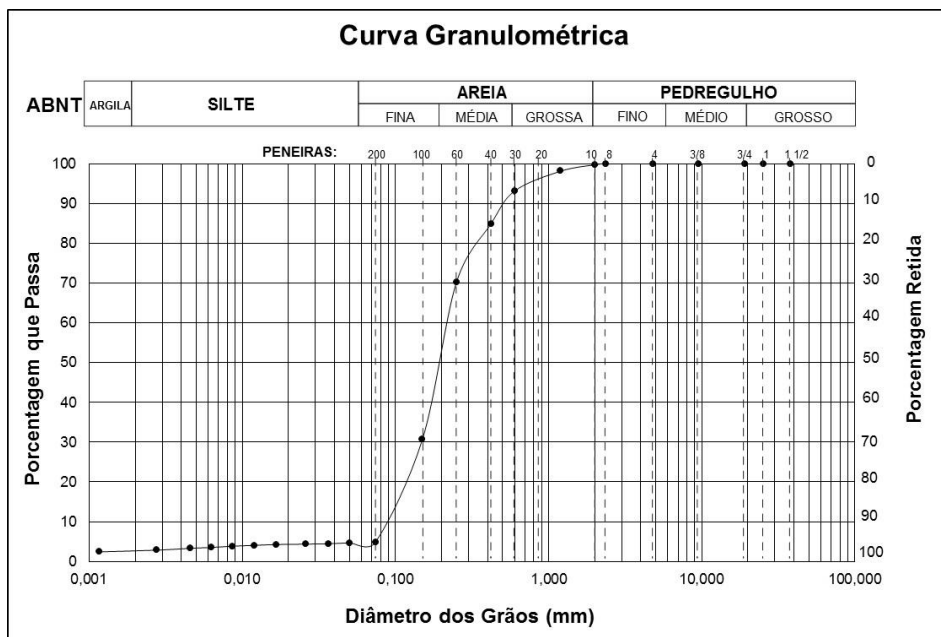


Figura 19 – Curva granulométrica do solo areno-argiloso
 Fonte: Matsubara (2015, p. 48)

Por meio da análise dos coeficientes de curvatura e de não uniformidade, Matsubara (2015) constatou que o solo é bem graduado. Para a determinação da curva característica de sucção na trajetória de secagem, Matsubara (2015) utilizou o método da translação de eixos, os pontos experimentais foram plotados e ajustados pela equação de van Genuchten (1980), o resultado pode ser observado na Figura 20.

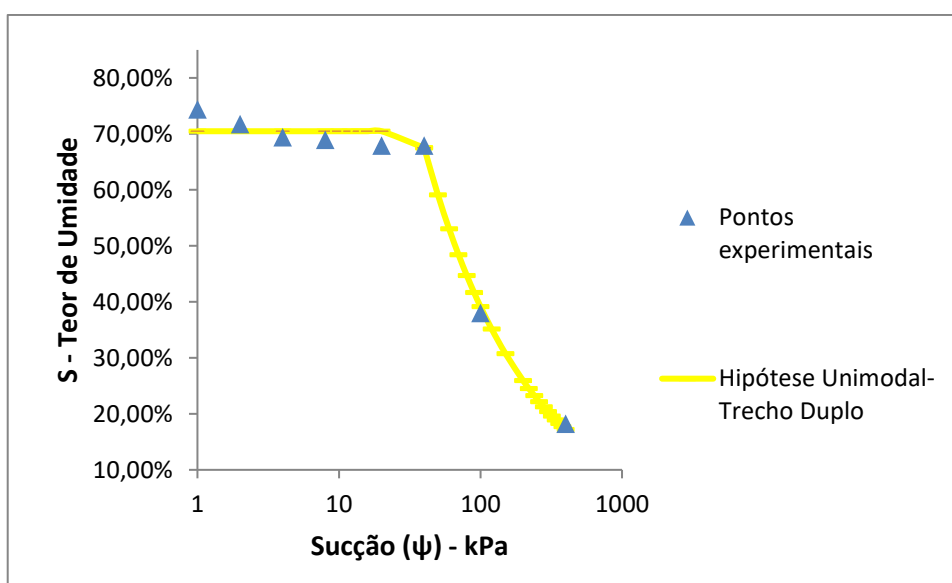


Figura 20 – Curva característica de sucção do solo areno-argiloso
 Fonte: Adaptado de Matsubara (2015, p. 55)

Nota-se que a curva característica de sucção para o solo areno-argiloso de Matsubara (2015) tem formato unimodal, o que é justificado também pela distribuição granulométrica que indica que o solo é bem graduado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 HORIZONTES COLETADOS

A amostra ensaiada foi coletada de um horizonte exposto em um talude na cidade de Curitiba-PR, no bairro Campo Comprido. Pode ser observado na Figura 21 o local onde foi realizada a coleta.



Figura 21 – Horizonte exposto em um talude
Fonte: Autoria própria (2016)

3.1.1 Coleta de amostras indeformadas

Para a coleta de amostras indeformadas foram feitos cortes no solo do talude de modo a remover o material depositado na superfície do solo e deixar a superfície horizontal, em forma de bancada, para facilitar a coleta. O esquema da bancada para coleta é representado na Figura 22 (fora de escala).

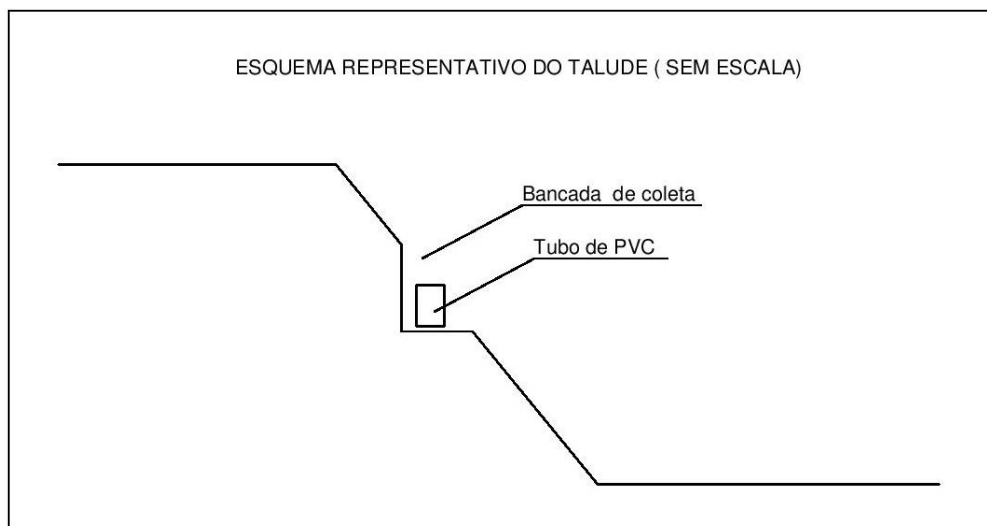


Figura 22 – Representação da bancada de trabalho feita no talude coletado
Fonte: MATSUBARA (2014)

Para a coleta foram utilizados tubos de PVC com 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura. Foram coletadas 4 amostras, cravando o tubo de PVC cuidadosamente 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 e a umidade *in situ*. A Figura 23 (a-c) ilustra o processo.



(a)



(b)



(c)

Figura 23 – Processo de coleta de amostra indeformada
Fonte: MATSUBARA (2014)

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

O solo utilizado para esses ensaios foi a sobra da amostra indeformada utilizada no ensaio de sucção. As amostras para os ensaios de granulometria, limite

de liquidez e limite de plasticidade foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO..., 1986). A amostra para o ensaio de massa específica real dos grãos foi preparada segundo a norma ME 041 (DEPARTAMENTO..., 1994).

3.2.1 Análise granulométrica

Para o ensaio de granulometria, foram realizados o peneiramento grosso, o peneiramento fino e a sedimentação da amostra, em suas frações de acordo com a NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO..., 1984). As Figuras 24 (a-b) e 25 (a-b) ilustram o processo.



(a)



(b)

Figura 24 – Ensaio de peneiramento
Fonte: Autoria Própria (2016)

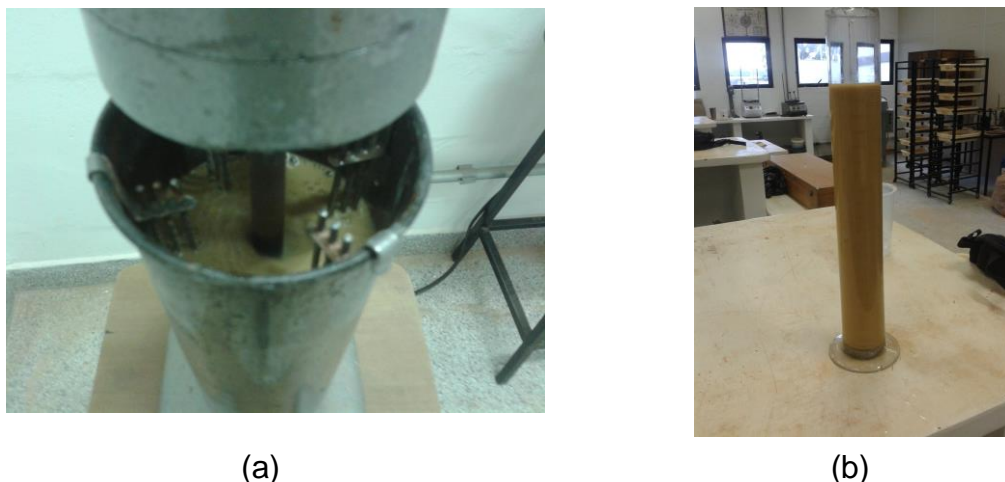


Figura 25 – Ensaio de sedimentação
Fonte: Autoria própria (2016)

De acordo com a NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO...,1984), o peneiramento fino é realizado após a sedimentação. O processo descrito pela norma consiste na lavagem do material da sedimentação na peneira #200 (0,075 mm), secagem deste material e realização do peneiramento fino.

Como a norma consultada não descreve detalhadamente o procedimento de lavagem do material na peneira #200, apenas explica que deve ser realizada com água potável em baixa pressão, adotou-se o procedimento descrito por Rigo (2005, p. 117-120). O procedimento consiste na lavagem do material retido na peneira com abertura de malha de 0,075 mm sem o manuseio do solo pelo operador, ou seja, sem o contato das mãos com o solo durante a lavagem, realizando apenas movimentos circulares de peneiramento. O processo de lavagem levou em torno de 30 minutos.

3.2.2 Determinação do limite de liquidez

O ensaio para a determinação do limite de liquidez foi realizado segundo a NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO...,1984). Os materiais utilizados no ensaio são apresentados na Figura 26.



Figura 26 – Ensaio de limite de liquidez
Fonte: Autoria própria (2016)

3.2.3 Determinação do limite de plasticidade

O ensaio para a determinação do limite de plasticidade foi realizado segundo a NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO..., 1984). A Figura 27 ilustra o ensaio.



Figura 27 – Ensaio de limite de plasticidade
Fonte: Autoria Própria (2016)

3.2.4 Determinação da massa específica real dos grãos

A determinação da massa específica real dos grãos foi feita de acordo com a ME 093 (DEPARTAMENTO..., 1994), porém foi feita 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, como ilustrado na Figura 28. A bomba foi acionada por 15 minutos durante o ensaio.



Figura 28 – Ensaio GS com utilização da bomba de vácuo
Fonte: Autoria Própria (2016)

3.3 MEDIÇÃO DA SUCÇÃO COM A TÉCNICA DE TRANSLAÇÃO DE EIXOS

Para a determinação da curva característica, utilizou-se a técnica da Translação de Eixos, feita no 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. O procedimento é ilustrado na Figura 29 (a-b).



(a) Corpo de prova sendo talhado



(b) Corpo de prova talhado

Figura 29 – Corpo de prova talhado em molde 5,8 x 3,2 cm
Fonte: Autoria própria (2016)

Após ser talhado, o corpo de prova foi submerso junto à uma pedra porosa em água destilada por um período de 7 dias, dentro de uma dessecadora, com uma bomba de vácuo sendo ativada por curtos intervalos de tempo no primeiro dia. Durante este período, o corpo de prova permaneceu com um papel filtro em sua face inferior e

uma sobrecarga na sua face superior, para evitar a expansão do solo, como mostrado na Figura 30.

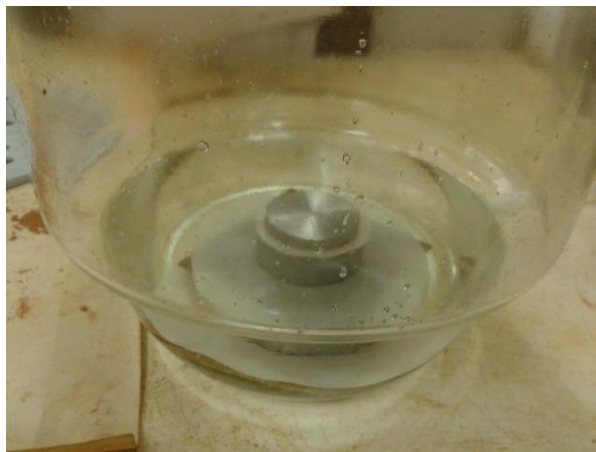


Figura 30 – Amostra e pedra porosa sendo saturadas
Fonte: Autoria própria (2016)

Após o período de 7 dias, o corpo de prova com a sobrecarga e a pedra porosa saturada foram levados para o interior da câmara de ensaio. A pedra porosa foi posicionada na base do equipamento e o corpo de prova foi posicionado sobre ela, como mostrado na Figura 31.

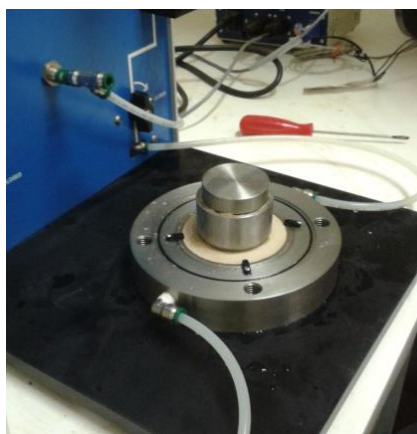


Figura 31 – Corpo de prova e pedra porosa posicionados na câmara de ensaio
Fonte: Autoria própria (2016)

Foi realizada então a montagem da câmara. O equipamento montado pode ser visto na Figura 32. Um esquema do interior da câmara é apresentado na Figura 33.

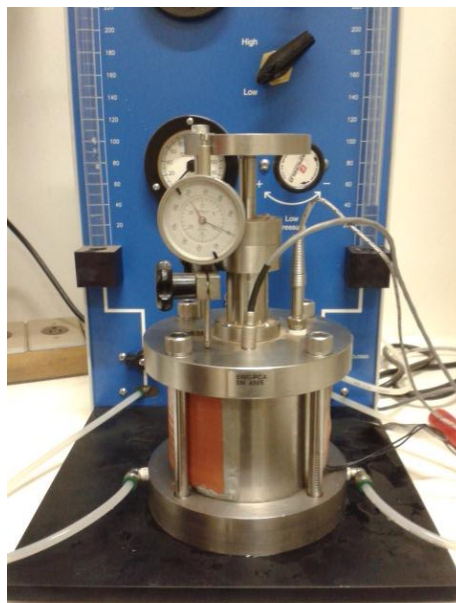


Figura 32 – Câmara de ensaio fechada
Fonte: Autoria própria (2016)

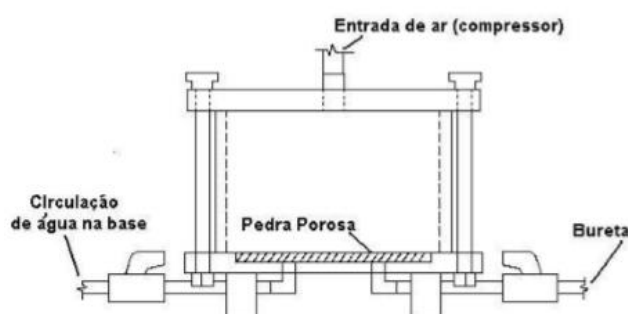


Figura 33 – Esquema representativo do interior da câmara de sucção
Fonte: OLIVEIRA (2004)

É através da pedra porosa que a água passa para a bureta, a pedra porosa saturada impede a passagem de ar, permitindo apenas a passagem de água.

Na câmara é aplicada então a pressão inicial de 10 kPa, 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 do corpo de prova, fez-se a leitura final do nível de água em equilíbrio na bureta e do extensômetro (com precisão de 0,01 mm) ligado ao corpo de prova para obter a sua variação de volume. Após o equilíbrio, a pressão foi aumentada e foram feitas novas leituras até que o equilíbrio fosse atingido novamente. O processo se repetiu aumentando a pressão gradativamente até 800 kPa. Com cada leitura de estabilização, foi possível, através de correlações matemáticas utilizando o volume do corpo de prova corrigido pela leitura do extensômetro, obter 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 perdido devida à aplicação das pressões escolhidas.

3.4 CORRELAÇÃO COM EQUAÇÕES EXISTENTES

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

No software foram plotados os valores de sucção aplicados no equipamento em x, e o grau de saturação ou teor de umidade da amostra em y, de acordo com os modelos teóricos. As equações testadas foram apresentadas na Tabela 2 do capítulo 2.3.4, na revisão bibliográfica.

A correlação dos dados experimentais com as equações da literatura foi realizada com base em três hipóteses:

- A primeira hipótese é denominada hipótese unimodal com trecho único. Nesta hipótese, todos os pontos obtidos experimentalmente foram utilizados para a correlação com uma única equação, com parâmetros únicos.
- A segunda hipótese é denominada hipótese unimodal com trecho inicial em reta, nela foi traçada uma reta do início da curva característica de sucção até o ponto a partir do qual o solo começa a ter uma perda de grau de saturação mais acentuada para uma variação na sucção. Um segundo trecho foi determinado a partir do ponto final da reta, para ele foi feita uma correlação das equações da literatura até o ponto final obtido experimentalmente.
- A terceira hipótese, denominada hipótese bimodal, consistiu em dividir a curva característica de sucção em dois trechos, o trecho inicial foi delimitado a partir do ponto inicial do ensaio até o ponto final da reta da segunda hipótese, o trecho final foi considerado a partir deste ponto até o último ponto experimental obtido. Cada um dos dois trechos foi correlacionado com as equações da literatura, obtendo parâmetros distintos para cada trecho.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os dados obtidos a partir do ensaio de peneiramento e sedimentação podem ser observados na curva granulométrica apresentada no Gráfico 1.

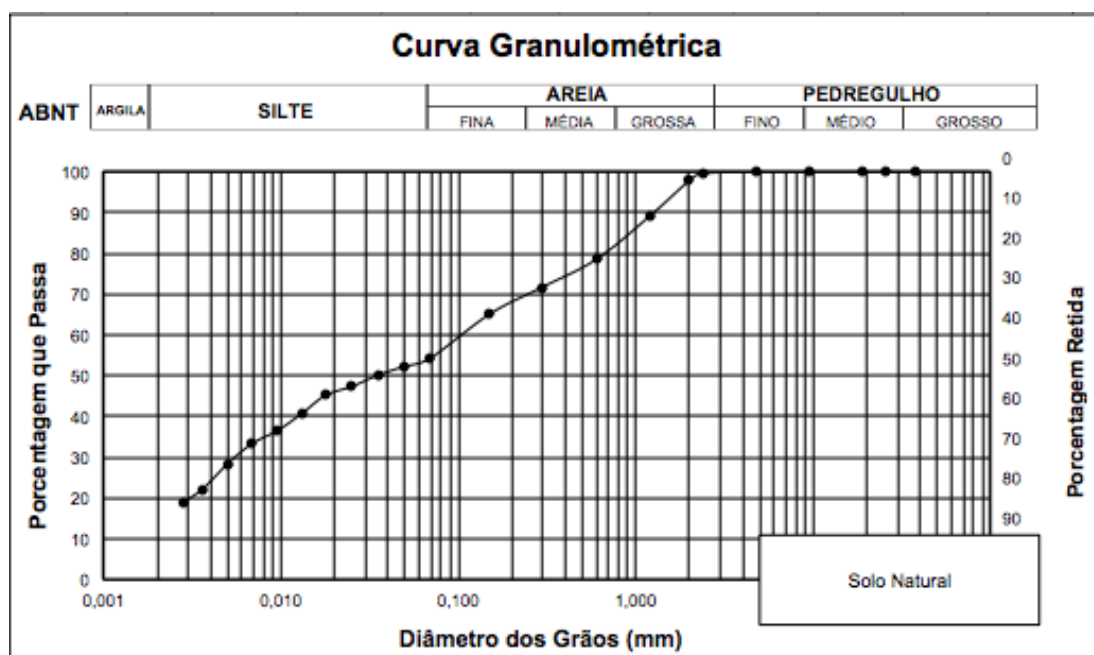


Gráfico 1 – Curva Granulométrica
Fonte: Autoria própria (2016)

A curva granulométrica apresenta parâmetros que permitem a determinação do tamanho das partículas presentes em um solo, em frações expressas como uma porcentagem do peso seco total da amostra ensaiada. De acordo com os parâmetros para cálculo de composição granulométrica da NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO...,1995), o solo em questão é composto por 2% de pedregulho, 19% de areia grossa, 11% de areia média, 14% de areia fina, 38% de silte e 15% argila. Além da composição granulométrica, um outro parâmetro importante que se relaciona com a inclinação e o formato da curva é o coeficiente de não uniformidade apresentado na equação 4.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

Onde D_{10} , também denominado diâmetro efetivo, indica o diâmetro no qual passa 10% em massa da amostra e D_{60} é o diâmetro no qual passa 60% da amostra. O cálculo desses diâmetros é feito por meio de interpolação linear, limitando o intervalo de análise com diâmetros utilizados nos ensaios e a porcentagem de massa

passante em cada um deles. O processo de interpolação para a obtenção dos valores de D_{10} e D_{60} é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Interpolação para determinação dos diâmetros D_{10} e D_{60}

%Passante	Abertura (mm)
9,17	0,0012
<u>10</u>	<u>0,0013</u>
18,86	0,0028
54,23	0,0692
<u>60</u>	<u>0,0740</u>
61,27	0,0750

Fonte: Aatoria própria (2016)

O coeficiente de não uniformidade, calculado com base nos dados da Tabela 3, é igual a aproximadamente 57. Um solo pode ser considerado de granulometria uniforme quando grande parte dos seus grãos possui aproximadamente o mesmo diâmetro. Segundo Pinto (2006, 53-55), para solos granulares, quanto maior for o coeficiente de não uniformidade, mais bem graduado é o solo. Solos arenosos com coeficientes menores que 2 podem ser chamados de areias uniformes. Sendo assim, o solo estudado neste trabalho pode ser considerado não uniforme.

Além do coeficiente de não uniformidade, pode-se observar visualmente que na curva granulométrica existem grãos para todas as faixas de diâmetros, e não há a formação de um patamar intermediário na curva. Sendo assim é adotado que o solo é bem graduado.

4.2 DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Os dados obtidos no ensaio de limite de liquidez foram plotados em um gráfico com a umidade no eixo linear das ordenadas e o número de golpes no eixo logarítmico das abcissas. Com uma regressão logarítmica feita para os pontos de ensaio, encontrou-se o teor de umidade equivalente a 25 golpes no aparelho de Casagrande de 57.75%. A regressão logarítmica apresentou coeficiente de determinação igual a 0.93, ou seja, 93% dos pontos do ensaio podem ser explicados pela regressão, o que é satisfatório para o ensaio. O resultado obtido pode ser observado no Gráfico 2.

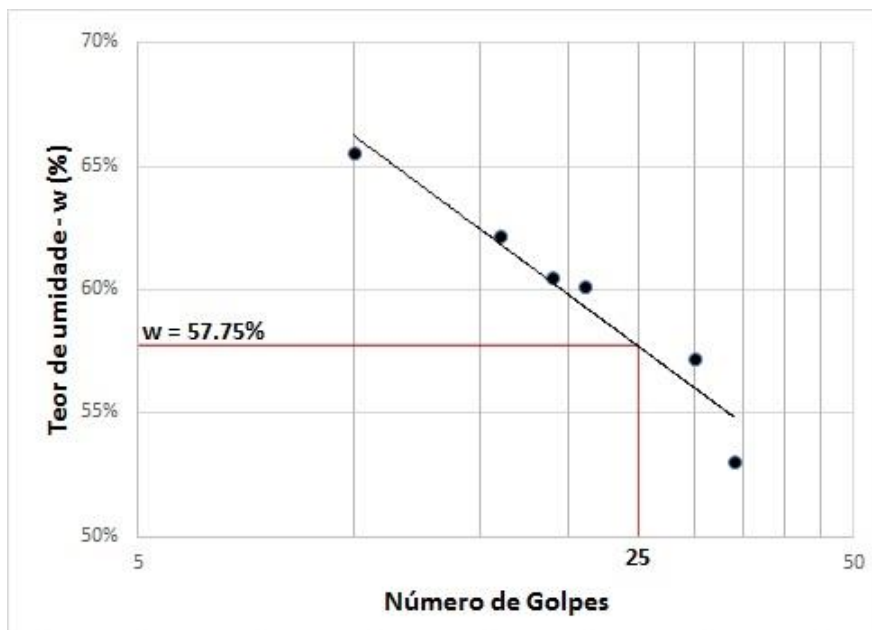


Gráfico 2 – Gráfico do limite de liquidez
Fonte: Autoria própria (2016)

Para o limite de plasticidade, adotou-se a média dos teores de umidade obtidos no ensaio, os dados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do ensaio do limite de plasticidade

Ensaio	Umidade (%)
1	51,11
2	47,22
3	45,83
Média	48,06

Fonte: Autoria própria (2016)

O índice de plasticidade é definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Este índice é muito importante na classificação de solos granulares finos, sendo utilizado no gráfico de plasticidade de Casagrande, que é utilizado como base do Sistema Unificado de Classificação de Solos. O índice de plasticidade para o solo estudado é 9,69%, o Gráfico 3 representa o gráfico de plasticidade, com o ponto experimental plotado.

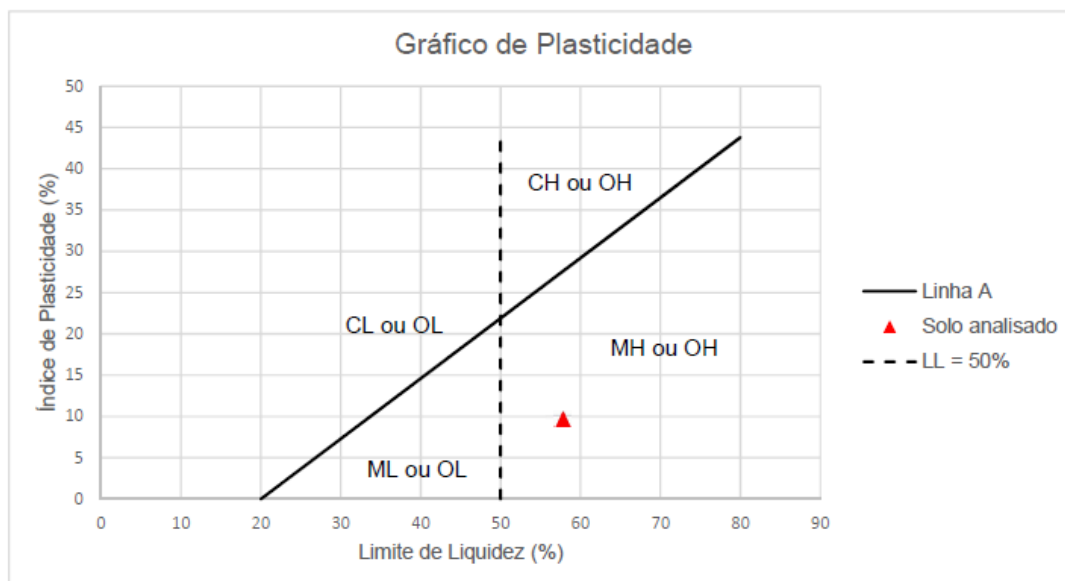


Gráfico 3 – Gráfico de plasticidade
Fonte: Autoria própria (2016)

De acordo com o Gráfico 3, o solo pode ser classificado por um par de letras. A letra C é referente à argila, a M ao silte, a O aos solos orgânicos e a L e H aos solos com baixa e alta compressibilidade respectivamente.

Com base nos dados obtidos do ensaio de granulometria, junto aos dados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade, obteve-se que o solo é classificado como silte inorgânico bem graduado de alta compressibilidade.

4.3 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

A massa específica real dos grãos ou peso específico relativo do solo em relação à água, é determinado de acordo com a ME 093 (DEPARTAMENTO..., 1994) como a média entre pelo menos dois resultados obtidos em laboratório que não estejam distantes em mais de 0,009. Sendo assim, os resultados obtidos do ensaio são apresentados na Tabela 5, levando em consideração a correção relacionada à temperatura de ensaio.

Tabela 5 – Resultados da determinação da massa específica real dos grãos

G_s	Temperatura °C	G_s Corrigido
2,6093	22,0	2,6035
2,6079	22,0	2,6021
Média		2,6028

Fonte: Aatoria própria (2016)

A massa específica real dos grãos, além de ser muito utilizada em várias relações matemáticas da Mecânica dos Solos, também pode indicar a presença de alguns minerais no solo. Para o solo deste trabalho, com cor clara e massa específica real dos grãos de aproximadamente 2,60 (adimensional), pode-se dizer que há a presença de quartzo em grande quantidade. Além disso, a massa específica real dos grãos pode servir de indicativo da presença ou não de matéria orgânica em grande quantidade. Solos com muita matéria orgânica costumam apresentar valores baixos de G_s . Para o solo analisado, pode-se dizer que há pouca presença de matéria orgânica, o que era previsto pelos ensaios de granulometria e limites de Atterberg.

O G_s determinado foi utilizado para o cálculo do índice de vazios e o grau de saturação iniciais do ensaio.

4.4 CORRELAÇÕES COM EQUAÇÕES DA LITERATURA

Os pontos obtidos no ensaio de sucção foram plotados no Gráfico 4, utilizando no eixo das abcissas a sucção aplicada e no eixo das ordenadas o grau de saturação calculado após a estabilização do nível de água na bureta do equipamento.

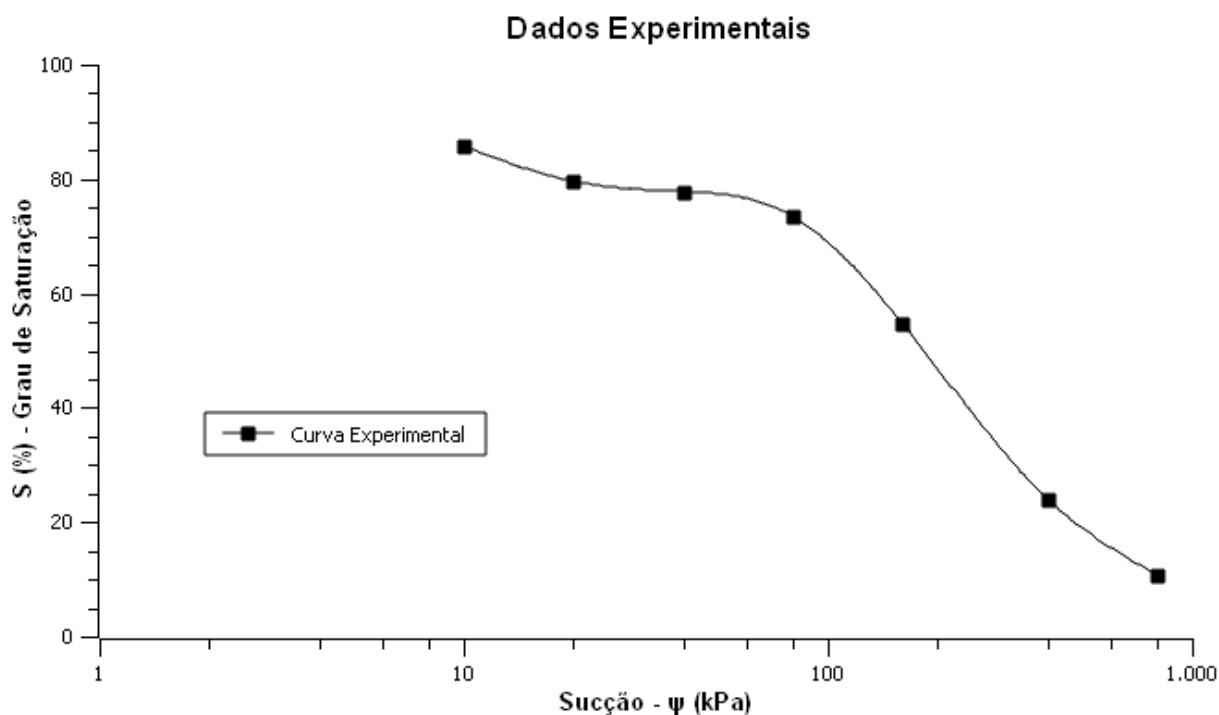


Gráfico 4 – Pontos experimentais do ensaio de sucção
Fonte: Autoria própria (2016)

De acordo com o Gráfico 4, pode-se dizer que os pontos de sucção iniciais até 80 kPa não foram muito significativos para a perda do grau de saturação da amostra. No entanto pode-se observar entre os pontos relativos à 10 kPa e 20 kPa que existe uma tendência de valores maiores para o grau de saturação nos pontos de sucção inferiores a 10 kPa. Apesar desta tendência, não se pode afirmar que a curva apresenta formato bimodal, pois não fica clara a existência de dois valores para entrada de ar no solo. Além disso, a análise granulométrica indicando que o solo é bem graduado indica que o formato da curva característica de sucção deve ser unimodal, pela relação da granulometria com a formação dos poros no solo.

Mesmo com a dubitabilidade da hipótese bimodal, neste trabalho foram testadas as equações da literatura para as três hipóteses citadas na seção 3.4.

A seguir, do Gráfico 5 ao Gráfico 15, são apresentados os resultados das regressões para cada um dos modelos de equações.

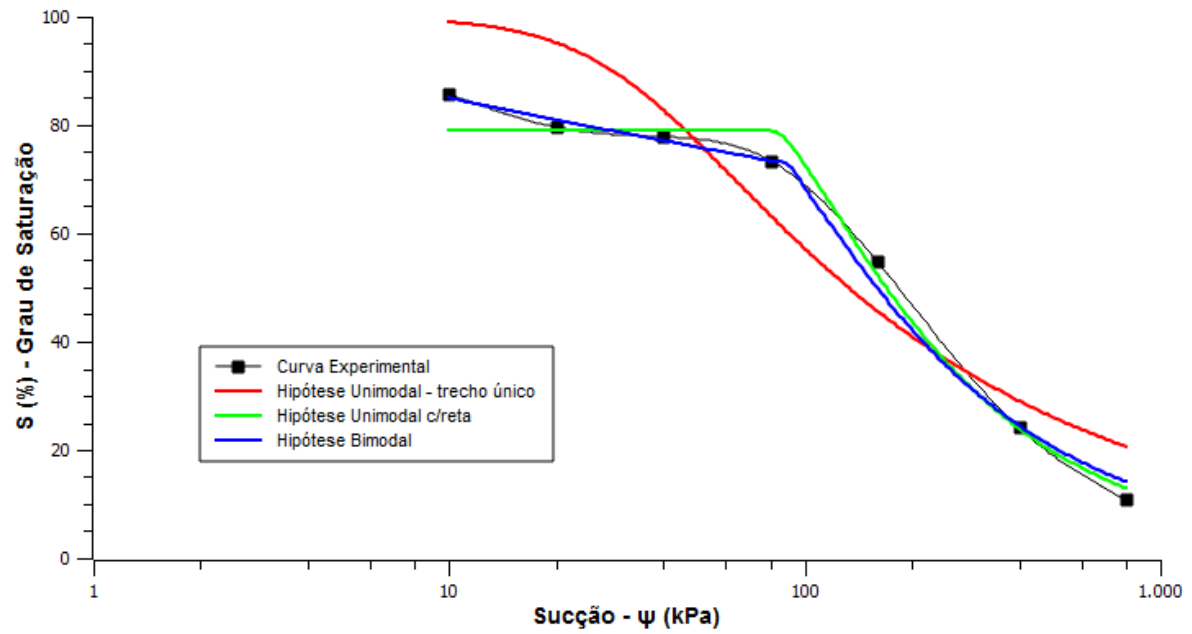


Gráfico 5 – Modelo de Burdine (1953)
 Fonte: Autoria própria (2016)

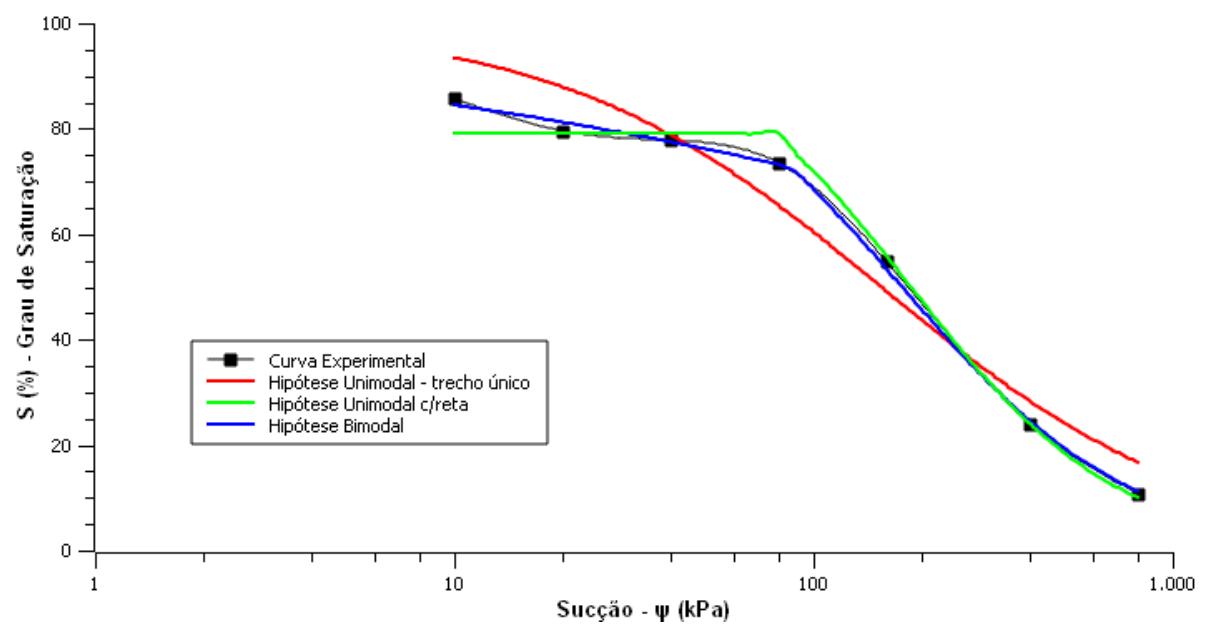


Gráfico 6 – Modelo de Gardner (1958)
 Fonte: Autoria própria (2016)

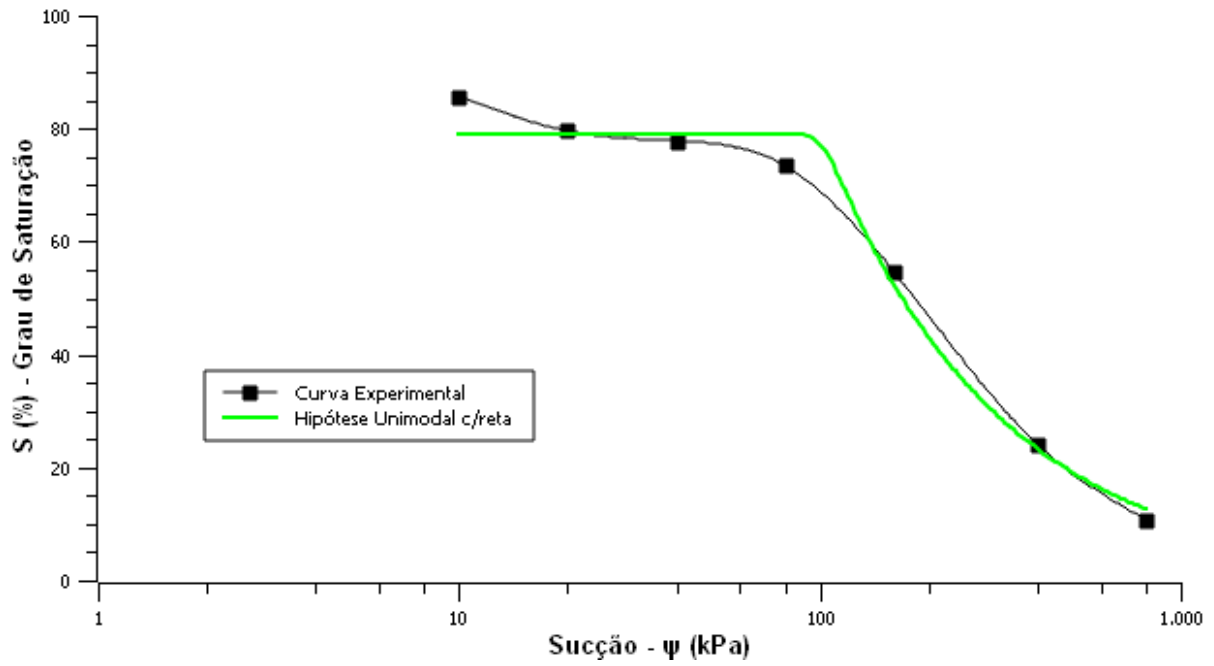


Gráfico 7 – Modelo de Brooks e Corey (1964)
 Fonte: Autoria própria (2016)

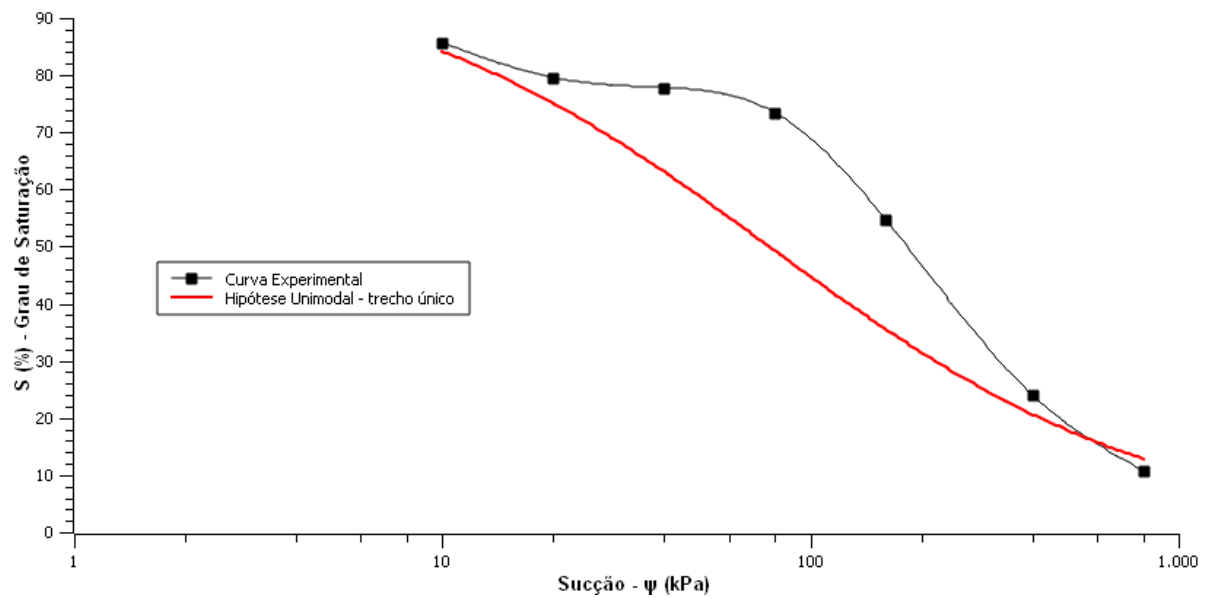


Gráfico 8 – Modelo de Brutsaert (1966)
 Fonte: Autoria própria (2016)

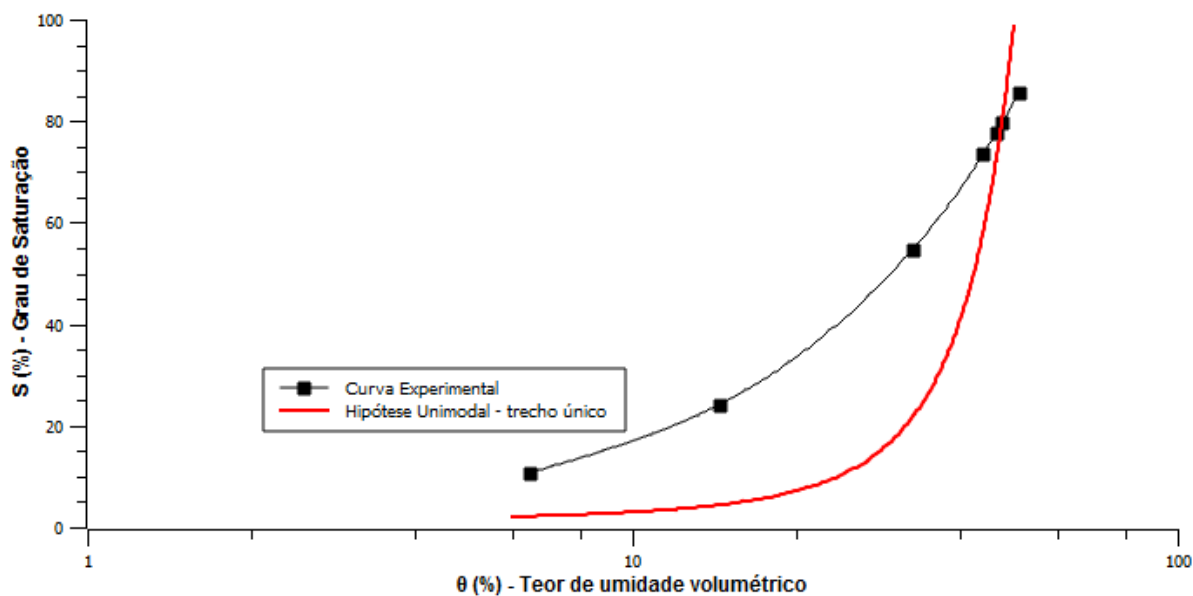


Gráfico 9 – Modelo de Farrel e Larson (1972)
Fonte: Autoria própria (2016)

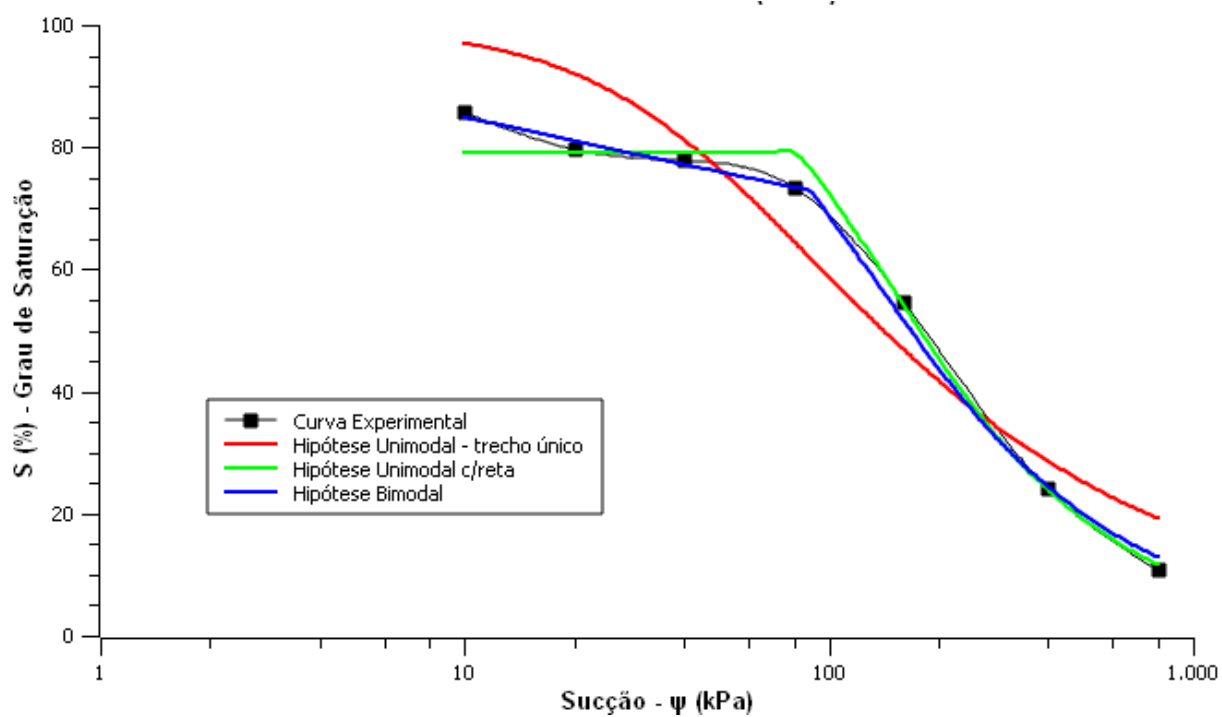


Gráfico 10 – Modelo de Mualem (1976)
Fonte: Autoria própria (2016)

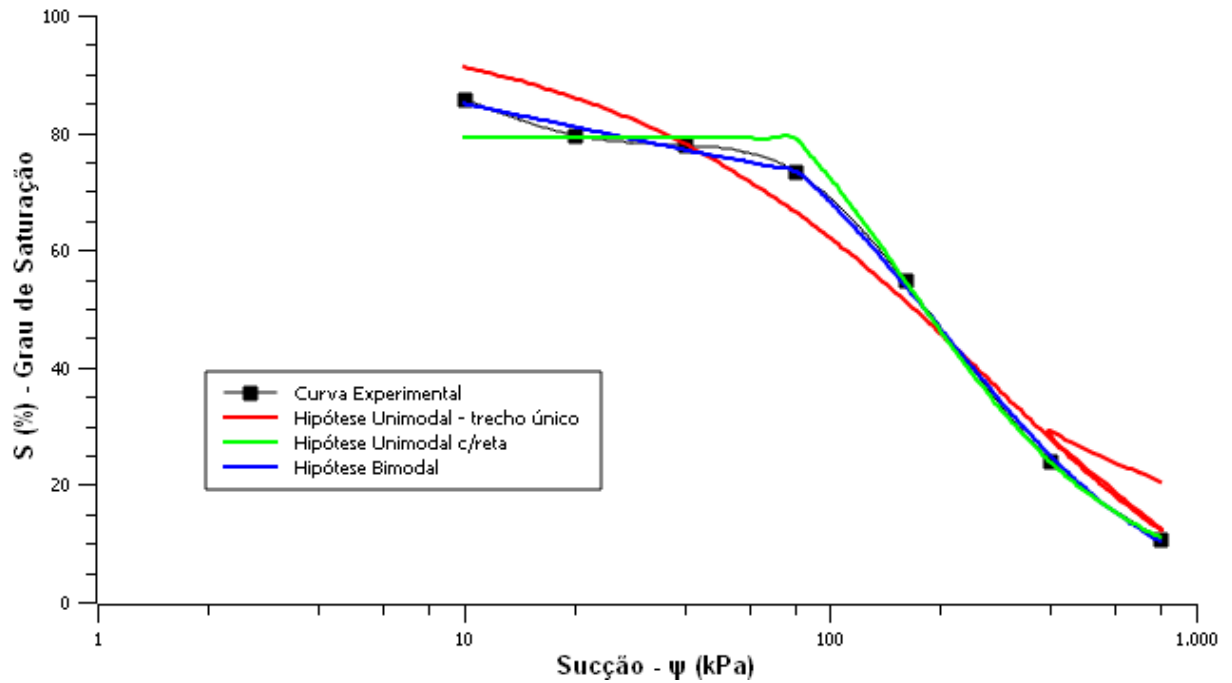


Gráfico 11 – Modelo de van Genuchten (1980)
Fonte: Autoria própria (2016)

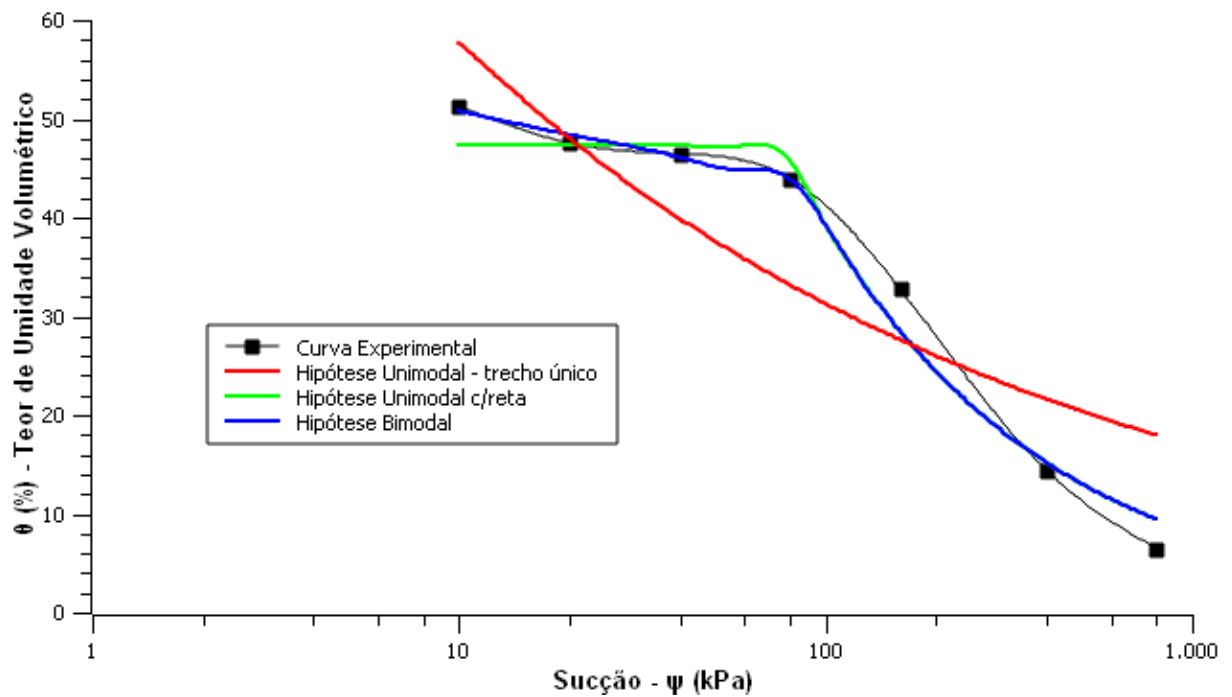


Gráfico 12 – Modelo de William *et al.* (1983)
Fonte: Autoria própria (2016)

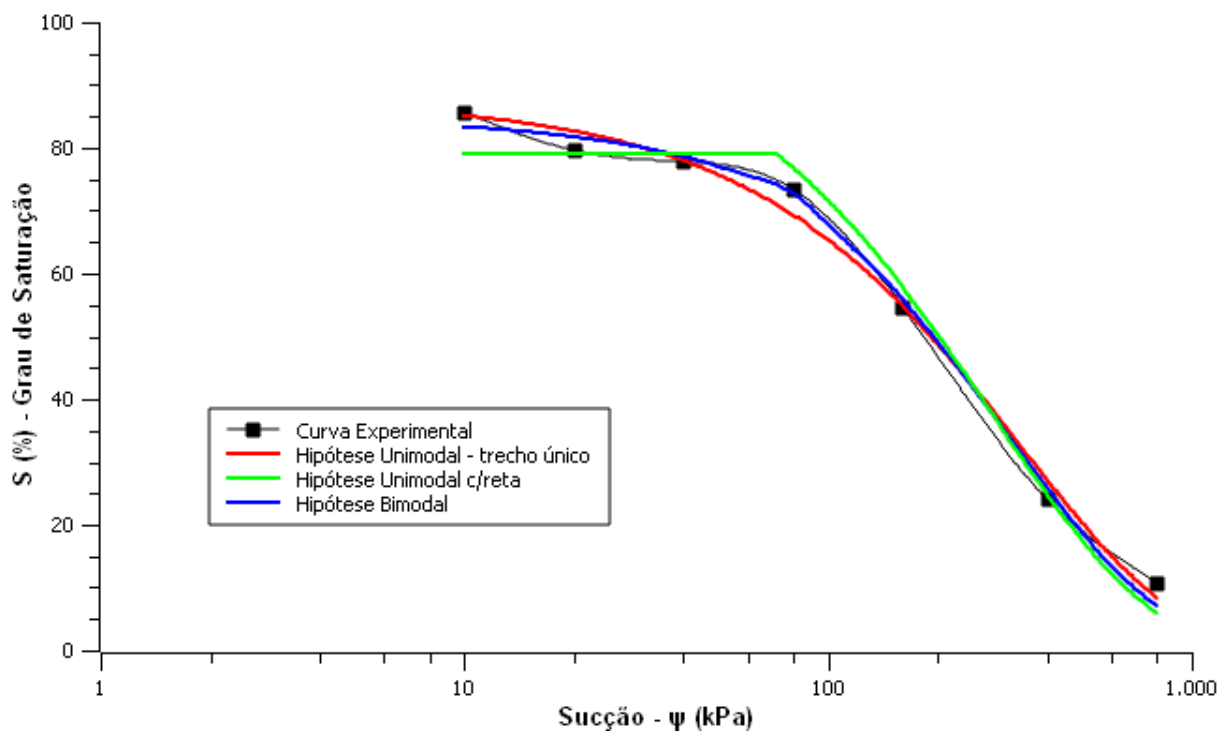


Gráfico 13 – Modelo de McKee e Bumb (1984)

Fonte: Autoria própria (2016)

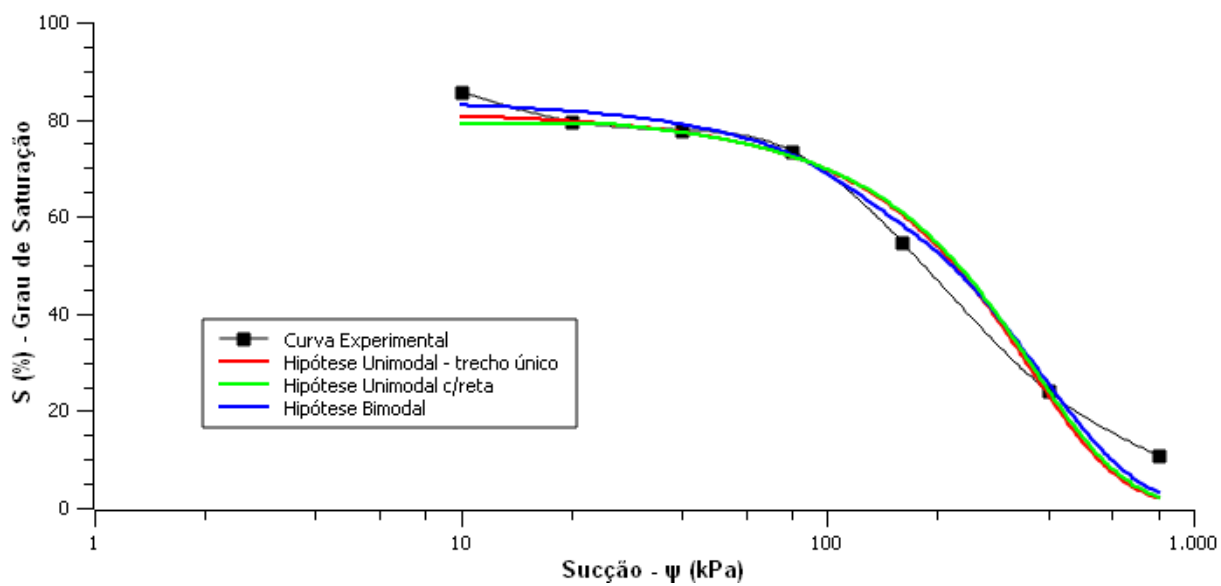


Gráfico 14 – Modelo de McKee e Bumb (1987)

Fonte: Autoria própria (2016)

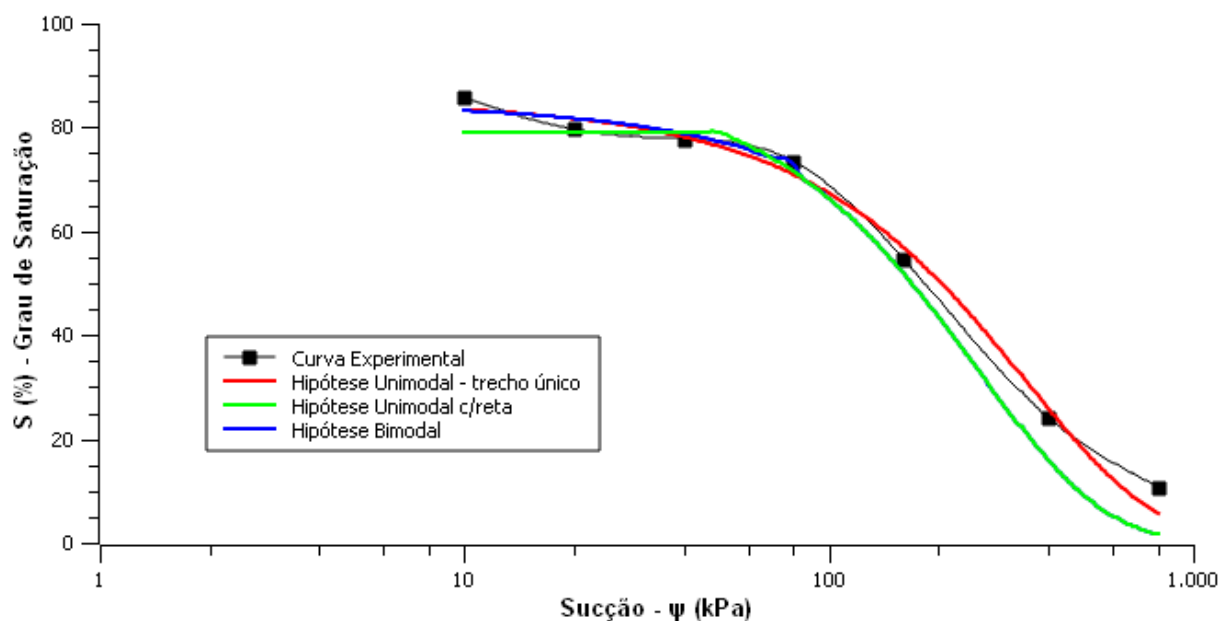


Gráfico 15 – Modelo de Kosigi (1994)
Fonte: Autoria própria (2016)

O modelo de Burdine (1953), que foi a primeira equação testada e a mais antiga, apresentou seu maior coeficiente de determinação igual a 0,9947, para a curva unimodal com trecho inicial em reta. Semelhante à equação de Burdine (1953), mas com a adição do parâmetro “m” dependente de “n”, as equações de Gardner (1958) e Mualem (1976) apresentaram para a mesma hipótese coeficientes de determinação iguais a 0,9991 e 0,9994 respectivamente.

As equações de Brooks e Corey (1964), Brutsaert (1966) e Farrel e Larson (1972) utilizaram como um de seus parâmetros a sucção de entrada de ar. Como não se sabe da existência de uma sucção de entrada de ar antes da obtida experimentalmente, a hipótese bimodal não é considerada. A determinação da sucção de entrada de ar é apresentada no Gráfico 16.

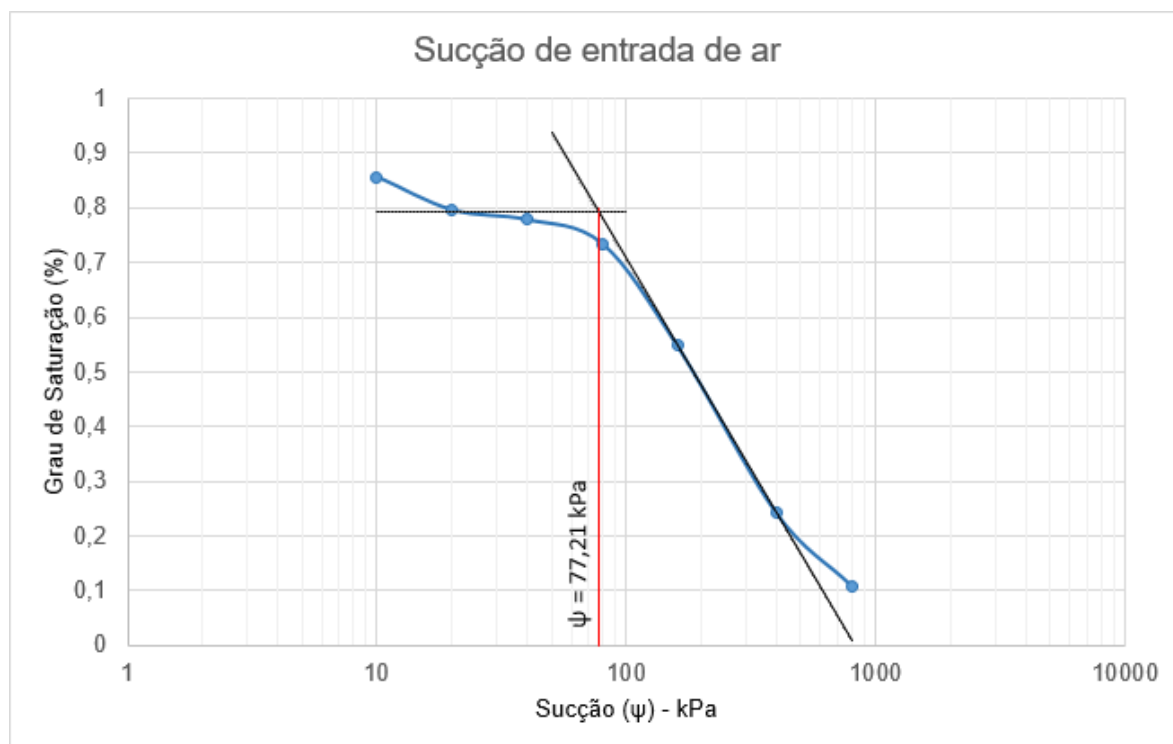


Gráfico 16 – Obtenção da sucção de entrada de ar
Fonte: Autoria própria (2016)

Para o modelo de Brooks e Corey (1964), só houve convergência para a hipótese unimodal com trecho inicial em reta. Para o de Brutsaert (1966) e Farrel e Larson (1972), só houve convergência para a hipótese unimodal em trecho único. Os três modelos apresentaram baixos coeficientes de determinação, sendo o de Brooks e Corey (1964) igual a 0,8857, o de Brutsaert (1966) igual a 0,7697 e o de Farrel e Larson (1972) igual a 0,5492. A equação de Farrel e Larson (1972) é um caso em particular pois relaciona o grau de saturação como variável dependente do teor de umidade volumétrico.

O modelo que apresentou o maior coeficiente de determinação para a hipótese unimodal com trecho único foi a de Kosigi (1994). Para a hipótese unimodal com trecho inicial em reta, o modelo mais representativo foi o de van Genutchen (1980). Para a hipótese bimodal, van Genutchen (1980) também apresentou o maior coeficiente de determinação

Em resumo, os parâmetros determinados e os coeficientes de determinação para cada hipótese são apresentados nas tabelas 6 (unimodal com trecho único), 7 (unimodal com trecho inicial em reta) e 8 (bimodal).

Tabela 6 – Resultados para hipótese unimodal com trecho único

Autor	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a = 0,0300 n = 2,4967	0,8568
Gardner (1958)	a = 0,0074 n = 0,9736	0,9465
Brooks e Corey (1964)	-	-
Brutsaert (1966)	$\Psi_b = 77,21$ n = 0,8175	0,7697
Farrel e Larson (1972)	$\Psi_b = 77,21$ n = -8,7235	0,5492
Mualem (1976)	a = 0,0210 n = 1,5837	0,8999
van Genutchen (1980)	a = 6,11E-08 n = 0,7140 m = 2515,8200	0,9724
William <i>et al.</i> (1983)	a = 0,2403 b = -3,7556	0,5972
McKee e Bumb (1984)	a = -44,9019 n = 341,1896	0,9921
McKee e Bumb (1987)	a = 223,3399 n = 148,9991	0,9742
Kosigi (1994)	a = -138,0310 n = 65,4027	0,9903

Fonte: Aatoria própria (2016)

Em geral, as equações que melhor representaram a curva experimental para a hipótese unimodal com trecho único foram as de McKee e Bumb (1984) e Kosigi (1994), com coeficientes de determinação igual a 0,9921 e 0,9903 respectivamente.

Tabela 7 – Resultados para hipótese unimodal com trecho inicial em reta

Autor	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a = 0,0123 n = 2,8946	0,9947
Gardner (1958)	a = 0,0004 n = 1,5065	0,9991
Brooks e Corey (1964)	$\Psi_b = 77,21$ $\lambda = 0,8845$	0,8857
Brutsaert (1966)	-	-
Farrel e Larson (1972)	-	-
Mualem (1976)	a = 0,0093 n = 2,0646	0,9994
van Genutchen (1980)	a = 0,0075 n = 1,7693 m = 0,6862	0,9999
William <i>et al.</i> (1983)	a = 3,2400 b = -1,4602	0,9644
McKee e Bumb (1984)	a = 5,3306 n = 283,5435	0,9866
McKee e Bumb (1987)	a = 227,7260 n = 152,8415	0,9458
Kosigi (1994)	a = -71,5900 n = 71,7141	0,9233

Fonte: Autorial própria (2016)

Na hipótese unimodal com trecho inicial em reta, desconsiderou-se o R² do trecho inicial em reta, pois foi considerado que não aconteceu uma queda significativa no grau de saturação pela variação da sucção, considerou-se então apenas um trecho em reta passando pela média do grau de saturação dos 4 pontos. Para o trecho a partir de 80 kPa, as equações que melhor representaram a curva de sucção experimental foram as de Burdine (1953), Gardner (1958), Mualem (1976) e van Genutchen (1980), com coeficientes de determinação igual a 0,9947, 0,9991, 0,9994 e 0,9999 respectivamente. Em um olhar geral, todas as equações que convergiram apresentaram bons resultados, mas o coeficiente de determinação para a de van Genutchen (1980) indica que a equação por ele proposta representa em quase 100% os valores obtidos no ensaio.

Tabela 8 – Resultados para hipótese bimodal

Autor	Parâmetros trecho inicial	R ²	Parâmetros trecho final	R ²
Burdine (1953)	a = 1,0005 n = 2,0704	0,9631	a = 0,0144 n = 2,8011	0,9804
Gardner (1958)	a = 0,0851 n = 0,3325	0,9439	a = 0,0008 n = 1,3679	0,9984
Brooks e Corey (1964)	-	-	-	-
Brutsaert (1966)	-	-	-	-
Farrel e Larson (1972)	-	-	-	-
Mualem (1976)	a = 0,8706 n = 1,0726	0,9607	a = 0,0108 n = 1,9488	0,9912
van Genutchen (1980)	a = 1,0000 n = 6,3957 m = 0,0110	0,9634	a = 0,0032 n = 1,1700 m = 1,6300	0,9993
William <i>et al.</i> (1983)	a = -7,3314 b = -14,2319	0,9626	a = 3,2400 b = -1,4602	0,9644
McKee e Bumb (1984)	a = -83,0328 n = 512,4866	0,8520	a = -20,1336 n = 309,9636	0,9922
McKee e Bumb (1987)	a = 195,6930 n = 117,3377	0,8181	a = 218,0975 n = 171,9738	0,9625
Kosigi (1994)	a = -168,6290 n = 74,6981	0,8393	a = -71,5903 n = 71,7141	0,9335

Fonte: A autoria própria (2016)

Para a hipótese bimodal, as equações que melhor representaram os pontos experimentais foram as de Burdine (1953), Mualem (1976), van Genutchen (1980) e William *et al.* (1983) para o primeiro trecho, com coeficientes de determinação iguais a 0,9631, 0,9607, 0,9634 e 0,9626. As que melhor representaram o segundo trecho foram as de Gardner (1958), Mualem (1976), van Genutchen (1980) e McKee e Bumb (1984), com coeficientes de determinação iguais a 0,9984, 0,9912, 0,9993 e 0,9922 respectivamente.

Com base nos resultados obtidos e no ensaio de granulometria e sucção, pode-se afirmar que o solo é bem graduado e a sua curva de retenção de água possui formato unimodal. A equação que melhor representou os pontos experimentais para esta hipótese é a de van Genutchen (1980), com 0,9999 de coeficiente de determinação, ou seja, muito próximo a 1.

A equação proposta por van Genutchen (1980) também foi a que melhor representou a hipótese unimodal com trecho inicial em reta para Matsubara (2015), o

autor obteve um coeficiente de determinação igual a 0,9979. Como o solo de Matsubara (2015) foi coletado na mesma região do solo analisado neste trabalho, pode-se concluir que o modelo de van Genutchen (1980) representa bem os solos da região até o momento analisados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O solo estudado neste trabalho é composto em 2% por pedregulho, 19% por areia grossa, 11% areia média, 14% areia fina, 38% silte e 15% argila. Com base na análise granulométrica e nos resultados obtidos de limite de liquidez, limite de plasticidade e massa específica real dos grãos, o solo é classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos como silte inorgânico bem graduado de alta compressibilidade.

O ensaio de sucção utilizando a técnica de translação de eixos forneceu um intervalo de pontos relacionando o grau de saturação com a sucção aplicada entre 10 kPa e 800 kPa. Os pontos foram plotados e ajustados para algumas das equações mais citadas na literatura. Pelo fato do solo ser considerado bem graduado, adotou-se a hipótese unimodal com trecho inicial em reta como a mais representativa do formato da curva característica de sucção. A equação que melhor representou essa hipótese foi a proposta por van Genuchten (1980), que apresentou coeficiente de determinação igual a 0,9999.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

São apresentadas a seguir algumas propostas para futuras pesquisas que darão continuidade ao estudo proposto por este trabalho.

- Analisar a influência da sucção na estabilidade de obras da região de Curitiba, utilizando a equação proposta por este trabalho.
- Estudar como a curva característica de sucção é influenciada por fatores como o grau de compactação, a aplicação de sobrecarga e os processos de secagem e umedecimento.
- Determinar a curva característica de sucção para outros solos da Formação Guabirota.
- Elaborar um banco de curvas características de sucção e um software que relacione o tipo de solo analisado com a melhor curva sugerida para ele.

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 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7180**: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181**: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

BEHRING, J. L. *et al.* **Adaptação no método do peso da gota para determinação da tensão superficial: um método simplificado para a quantificação da CMC de surfactantes no ensino da química**. 4 p. Quim. Nova, Vol. 27, No 3, p. 492-495. 2003.

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

CARVALHO, J. C. D. *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico**. [S.L.: s.n.], 2015.

CUNHA, P. V. de C. **Gênese de calcretes da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba, Paraná**. 85 p. 2011. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

CUSTÓDIO, G. S. **Estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados**. 187 p. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

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.

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

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral**. 2007. 330 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

FLÜHLER, Hannes; ROTH, Kurt. **Physik der ungesättigten Zone**. [S.L.: s.n.], 2004. 433 p.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D.. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. [S.L.]: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

FREITAS NETO, O. F. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. 150 p. 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 p. 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 p. 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 p. 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.

MACHADO, S. L.; DOURADO, K. A. **Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo**. 4º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, p. 325-336, mar, 2001.

MATSUBARA, G. Y. **Estudo da curva característica de um horizonte do perfil geotécnico da formação Guabirotuba**. 66 p. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MENEGOTTO, M. L. **Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. 246 p. 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

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

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3 ed. [S.L.]: TERRATEK, 2007.

PEREIRA, A. C. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 227 p. 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.

REIS, R. M. **Comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de Gnaisse**. 222 p. 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.

RIBEIRO, N. C. **Avaliação da impermeabilização e ocorrência de inundações na bacia do rio Bacacheri**. 123 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RIGO, M. L. **Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas da formação Serra Geral**. 349 p. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

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

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

SONG, Y. *et al.* **A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions**. 8 p. ELSEVIER, Engineering Geology, p. 90-97, 2012.

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

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUF AHL, 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.

VILLAR, L. F. de S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 367 p. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ZHAN, L. **Soil-water interaction in unsaturated expansive soil slopes**. 6 p. Higher Education Press and Springer-Verlag, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, p. 198-204, 2007.