

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Luana Martins Leitão

**ANÁLISE DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO POR DIFERENTES
MÉTODOS DE ENSAIO**

Macaé

2021

Luana Martins Leitão

ANÁLISE DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO POR DIFERENTES
MÉTODOS DE ENSAIO

Trabalho de conclusão de curso submetida
à Universidade Federal do Rio de Janeiro
– Campus Macaé como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Professora Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Orientador: Dr. Mário Guilherme Garcia Nacinovic

Macaé

Novembro 2021

Nome: LEITÃO, Luana Martins.

**ANÁLISE DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO POR DIFERENTES
MÉTODOS DE ENSAIO**

Trabalho de conclusão de curso submetida
à Universidade Federal do Rio de Janeiro
– Campus Macaé como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
de bacharel em Engenharia Civil.

Macaé, 18 de novembro de 2021

Profa. Graziella Maria Faquim Jannuzzi, D.Sc.(UFRJ)

Mario Guilherme Garcia Nacinovic, D.Sc.(UFRJ)

Camila Rosa Bezerra Coelho, D.Sc. (UFRJ)

Prof. Conrado Vidotte Plaza, M.Sc. (UFRJ)

Prof. Rafael Malheiro Da Silva Do Amaral Ferreira, D.Sc. (UFRJ)

Profa. Raquel Jahara Lobosco, D.Sc.(UFRJ)

MACAÉ – RIO DE JANEIRO, BRASIL

NOVEMBRO DE 2021

Leitão, Luana Martins

Análise da Curva Característica do Solo Por Diferentes Métodos de Ensaio / Luana Leitão. – Macaé: UFRJ/ Campus Macaé, 2021.

Orientadora: Graziella Maria Faquim Jannuzzi

Orientador: Mário Guilherme Garcia Nacinovic

Projeto de Graduação – UFRJ/ Campus Macaé/Curso de Engenharia Civil, 2019. Referências Bibliográficas: p. 73 - 76.

1. Câmara de Richards. 2. Ensaio de Papel Filtro. 3. Método de evaporação de analisador HYPROP. Curva Característica.

I. Jannuzzi, G. M. F., F. A. B. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus avós, que me ensinaram tudo que sei, sou e serei: Avó, Angelamara Martins Coelho, e Avô, Walter Martins Coelho Filho. E ao José Mateus Rodrigues Rangel, pelo apoio e incentivo durante o trabalho. Minha eterna gratidão. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por segurar minha mão e me carregar em seu colo nos momentos mais difíceis da minha vida, me moldando e me guiando até o presente momento, sem sua presença eu nada seria.

À minha família pelo incondicional apoio em todas as etapas da minha vida, sem o qual jamais chegaria até aqui.

A meus orientadores, professora Graziella Jannuzzi e ao professor Mario Nacinovic, por toda ajuda, orientação e apoio no presente trabalho, seus ensinamentos me iluminaram e me guiaram em todo o caminho perante a vida acadêmica, e por isso serei eternamente grata.

À Camila Rosa Bezerra Coelho, por sua orientação e condução dos ensaios, seu profissionalismo com os ensaios fez ser possível o presente trabalho.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Geotecnia.

Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental, que tornou possível realizar os ensaios.

A minha mentora de estágio que se tornou minha grande amiga Isabela Nunes Ribeiro Franco, e me apoiou durante todo o processo com seus conselhos.

Aos meus pais, Danielle Martins e Cleilson Leitão, por terem me dado a vida.

À minha tia Marcela Martins e sua família, que me amparou durante toda minha vida, me guiou nos momentos de dificuldade, e comemorou a cada passo dado na direção certa, como uma mãe faz com seus filhos.

A todos os meus amigos, que me auxiliaram durante toda a graduação, em especial a Luma Mikaelly, que me guiou com seus conselhos nos momentos de dificuldade e vibrou de felicidade em todas as minhas vitórias, palavras seriam poucas para expressar minha gratidão por sua eterna amizade.

Aos meus avós, Neli Rodrigues e Norival Leitão, por seu apoio.

Aos meus tios, Cristina Leitão e Jorge Prodanoff, por seu apoio.

Aos meus irmãos, Carolline Martins, Caíque Martins, Cauã Martins e Bernardo Leitão, que compreenderam minha ausência em muitos encontros de família por eu estar estudando em outra cidade, e me tiveram como exemplo para continuar seus estudos.

À Luiza Martins e Vinícius Martins, por serem mais que meus primos, meus irmãos, e irem me visitar em Macaé todas as vezes que a saudade falou mais alto que a distância.

RESUMO

LEITÃO, Luana Martins. Análise da Curva Característica do Solo por Diferentes Métodos de Ensaio. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2021.

RESUMO: É fundamental para um maior entendimento do comportamento do solo não saturado, a determinação de sua curva característica, pois ela representa a capacidade do solo de reter água em diferentes valores de sucção. Foi proposto uma análise crítica sobre os resultados experimentais de diferentes métodos de ensaio para a determinação da curva característica do solo, com o intuito de contribuir para o estudo da mecânica dos solos não saturados. O presente trabalho foi realizado com amostras indeformadas do solo do Instituto de Engenharia Nuclear, localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Foram utilizados três métodos para obter a curva característica: Papel filtro, Câmara de Richards e método de evaporação pelo analisador HYPROP®. Apesar de a câmara de Richards ser o principal método utilizado por engenheiros agrônomos e pesquisadores para se obter a curva característica, devido a sua confiabilidade e altos níveis de pressão, o método necessita de um longo tempo de espera para obter os resultados satisfatórios; o que motivou os estudos da aplicação dos outros dois métodos. Concluiu-se, portanto, que o ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® junto ao ensaio de papel filtro é uma boa opção para determinação da curva característica.

Palavras-chave: Solo não Saturado, Curva Característica, Câmara de Richards, Papel Filtro, Analisador HYPROP®.

ABSTRACT

LEITÃO, Luana Martins. Análise da Curva Característica do Solo por Diferentes Métodos de Ensaio. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2021.

Abstract of Undergraduate Project presented to UFRJ Macaé as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

ABSTRACT: The determination of the characteristic curve is essential for a better understanding of unsaturated soil behavior as it represents the capacity of the soil to retain water at different suction values. A critical analysis of the experimental results of different test methods for the determination of the soil characteristic curve was proposed, in order to contribute to the study of unsaturated soils mechanics. The present work was accomplished with undisturbed soil samples from the Institute of Nuclear Engineering, situated in the campus of the Federal University of Rio de Janeiro in Brazil. Three methods were used to obtain the characteristic curve: Filter paper, Richards pressure chamber and evaporation method by the HYPROP® analyzer. Although the Richards chamber is the main method used by agronomists and researchers to obtain the characteristic curve, due to its reliability and high pressure levels, the method requires long waiting times to obtain satisfactory results; which motivated the studies on the application of the other two methods. Therefore, it was concluded that the evaporation test by the HYPROP® analyzer, together with the filter paper test, is a good option for determining the characteristic curve.

Keywords: Unsaturated Soil, Characteristic Curve, Richards Chamber, Filter Paper, Analyser HYPROP®.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema do elemento do solo não saturado com uma fase de ar contínua (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).	20
Figura 2.2 - Esquema de um solo não saturado (a) sistema de quatro fases (b) sistema trifásico (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).	20
Figura 2.3 - Variáveis do estado de tensões para um solo saturado (extraído de Fredlund e Rahardjo, 1993).....	22
Figura 2.4 - Variáveis do estado de tensões para um solo não saturado (extraído de Fredlund e Rahardjo, 1993).....	23
Figura 2.5 - Círculo de Mohr-Coulomb para um solo saturado (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).....	24
Figura 2.6 - Envoltória de Resistência ao Cisalhamento dos Solos não Saturados (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).	26
Figura 2.7 - Modelo físico do fenômeno da capilaridade (Fredlund e Rahardjo., 1993).	28
Figura 2.8 - Tensiômetro analógico (Site Agrosmart)	30
Figura 2.9 - Corpo acrílico e pedra cerâmica porosa de 15 bar (Nacinovic, 2009)...	30
Figura 2.10 - Zonas de Curva Característica (adaptado Vanapalli et al., 1999).	33
Figura 2.11 - Curvas características para diversos solos (Koorevaar et al., 1983)...	34
Figura 2.12 - Representação da Câmara de Richards(adaptado de Silva, 2005). ...	35
Figura 2.13 – (a) Ensaio com o papel filtro em contato direto com a amostra de solo para medir a sucção matricial; (b) Ensaio em que o papel filtro não entra em contato com a amostra do solo, com o propósito de medir a sucção total (Nacinovic, 2009).	37
Figura 2.14 - Representação de ensaio Papel Filtro (Nacinovic, 2009).....	37
Figura 2.15 - Comparativo de calibração para os papéis filtro Whatman nº 42 e Schleicher & Schuell nº 589 (adaptado de Marinho, 1994).	38
Figura 2.16 - Representação do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP (adaptado de Schindler et al., 2010).	39
Figura 3.1 – Anel volumétrico de 100cm ³	42
Figura 3.2 - Coleta da amostra indeformada do solo.....	42
Figura 3.3 - Amostragem do solo com martelo de borracha.....	42
Figura 3.4 - Corte em bisel nos anéis para auxiliar na coleta das amostras.....	43
Figura 3.5 – Amostras de solo coletadas para a realização do ensaio do papel filtro.	46
Figura 3.6 – Papel filtro deteriorado referente ao primeiro ensaio realizado.	46
Figura 3.7 – Disposição dos três papéis filtro na amostra do solo.....	46
Figura 3.8 – Plástico zipado com papel filtro sendo pesado na balança de precisão.	47
Figura 3.9 – Pesagem do papel filtro junto ao plástico zipado na realização do ensaio de papel filtro.....	47
Figura 3.10 – Papel filtro na estufa por um dia.	48
Figura 3.11 – Papel filtro na estufa.....	48
Figura 3.12 - Papel filtro Whatman®.	49
Figura 3.13 – Câmara de Richards.....	50
Figura 3.14 – Amostras sendo saturadas por elevação gradual.....	51
Figura 3.15 – Placa cerâmica porosa utilizada dentro da câmara de Richards.	51
Figura 3.16 – Amostras saturadas sobre a placa porosa para realização do ensaio.	51

Figura 3.17 - Amostra de solo indeformado sendo saturada para a realização do ensaio.....	53
Figura 3.18 - Mini tensiômetro sendo saturado com água destilada.	53
Figura 3.19 - Mini tensiômetro saturado no equipamento para realização do ensaio.	54
Figura 3.20 – Realização de furos na amostra para inserir dois mini-tensiômetros.	54
Figura 3.21 – Mini-trado para furar a amostra para inserção dos mini-tensiômetros.	55
Figura 3.22 – Saturação do tensiômetro para realização do ensaio.....	55
Figura 3.23 – Instalando a amostra na base sensora.....	56
Figura 3.24 – Realização do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP®.....	56
Figura 4.1 - Limite de Liquidez pelo método de Casagrande.	58
Figura 4.2 - Curva Granulométrica do solo.....	58
Figura 4.3 - Textura do solo pelo triângulo de classe textural.	59
Figura 4.4 - Curvas características do solo pelo ensaio de papel filtro.....	61
Figura 4.5 - Curva característica do solo pelo ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP®.	63
Figura 4.6 - Curvas características do solo pelo ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP e pelo ensaio de papel filtro e representação de sua histerese.	64
Figura 4.7 - Parâmetros de Van Genuchten utilizados para obtenção da curva característica do ensaio da câmara de Richards.....	68
Figura 4.8 - Curva característica do solo pelo ensaio da câmara de Richards pelo software SWRC FIT®.....	68
Figura 4.9 - Curvas características do solo pelo ensaio da câmara de Richards, ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® e pelo ensaio de papel filtro.....	70
Figura 4.10 - Curva característica do solo pelo ensaio da câmara de Richards e ensaio de evaporação pelo ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® gerado pelo programa SWRC® Fit.	70
Figura 4.11 – Relação entre as curvas características do solo.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Técnicas de medição e seus respectivos intervalos de tempo (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993; Marinho, 1997).....	29
Tabela 2-2 - Equações de ajuste da curva característica (adaptado de Fredlund e Xing, 1994; Gerscovich, 2001).	31
Tabela 2-3 - Equações de ajuste da curva característica (Continuação) (adaptado de Fredlund e Xing, 1994; Gerscovich, 2001).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 2-4 - Tempo de equilíbrio sugerido para o papel filtro na medida de sucção total (adaptado de Marinho, 1994).	36
Tabela 2-5 - Equações que relacionam o teor de umidade do papel filtro com a sucção (adaptado de Marinho, 1994).	38
Tabela 4-1 - Resumo dos resultados granulométricos do solo.	57
Tabela 4-2 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do primeiro ensaio do papel filtro.....	60
Tabela 4-3 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do segundo ensaio do papel filtro.....	60
Tabela 4-4 -Parâmetros de VAN GENUCHTEN utilizados para obtenção da curva característica referente ao primeiro ensaio papel filtro.....	60
Tabela 4-5 - Parâmetros de VAN GENUCHTEN utilizados para obtenção da curva característica referente ao segundo ensaio papel filtro.	60
Tabela 4-6 -Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP.	62
Tabela 4-7 - Parâmetros de VAN GENUCHTEN utilizados para obtenção da curva característica do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP.....	62
Tabela 4-8 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 14.	66
Tabela 4-9 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 13.	66
Tabela 4-10 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 19.	66
Tabela 4-11 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 25.	67
Tabela 4-12 - Parâmetros de Van Genuchten utilizados para obtenção da curva característica do ensaio da câmara de Richards.....	67

SUMÁRIO

RESUMO	8	
ABSTRACT	9	
LISTA DE TABELAS	12	
SUMÁRIO.....	13	
1	INTRODUÇÃO.....15	
1.1	Contextualização	15
1.2	Objetivos e Metodologia.....	16
1.3	Motivação.....	16
1.4	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Considerações Gerais.....	18
2.2	O Solo Não Saturado.....	18
2.3	Comportamento Mecânico de um Solo	20
2.4	Resistência ao Cisalhamento.....	24
2.5	Sucção	26
2.6	Medidas de Sucção	28
2.7	Curva Característica	30
2.8	Métodos de Obtenção da Curva Característica	34
2.8.1	Método da Câmara de Richard	32
2.8.2	Método do Papel Filtro.....	35
2.8.3	Ensaio de Evaporação por Analisador HYPROP®	38
2.9	Ensaio de Caracterização	39
2.9.1	Granulometria	36
2.9.2	Limite de Liquidez e Plasticidade	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Coleta de Amostras	41
3.2	Ensaio de papel filtro	43
3.3	Ensaio da Câmara de Richards	49
3.4	Ensaio de Evaporação pelo analisador HYPROP®.....	52
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	Ensaio de Caracterização do Solo	57
4.2	Ensaio do Papel Filtro	55
4.3	Discussões do Ensaio do Papel Filtro	57
4.4	Ensaio de Evaporação pelo Analisador HYPROP	58
4.5	Discussões do Ensaio de Evaporação pelo Analisador HYPROP	59
4.6	Comparativo e Análise da Curva Característica através do ensaio de Papel Filtro e do Ensaio de Evaporação pelo Analisador HYPROP.....	60
4.7	Ensaio da Câmara de Richards	61
4.8	Discussões do Ensaio da Câmara de Richards	64
4.9	Comparativo e Análise das Curvas Características Obtidas Pelo Ensaio da Câmara de Richards e do Ensaio de Evaporação pelo Analisador HYPROP	64

5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A condição não saturada requereu uma reavaliação de conceitos e teorias iniciais da Mecânica dos Solos Clássica. Por isso, surgiu, a necessidade de desenvolver os conceitos básicos da Mecânica dos Solos Não Saturados, visando solucionar os inúmeros problemas geotécnicos existentes que envolvem a condição não saturada dos solos.

A queda da resistência ao cisalhamento do solo é classificada como um dos principais problemas geotécnicos dos solos não saturado, e uma correta análise das características do solo, é capaz de evitar inúmeros desastres naturais relacionados a ruptura do solo, e solucionar, problemas existentes na construção civil. Por isso, tornou-se importante o desenvolvimento dos estudos aplicados a mensuração de sucção dos solos não saturados, para a determinação da resistência ao cisalhamento do solo.

Muitas técnicas podem ser utilizadas para a determinação da curva característica do solo, que relaciona a quantidade de água contida no solo a uma determinada sucção, capaz de fornecer importantes estimativas de parâmetros para a determinação do comportamento dos solos não saturados, tais como a resistência ao cisalhamento do solo, permeabilidade e variação do volume. Foram utilizados neste trabalho os métodos da Câmara de Richards, o Método do Papel Filtro e o Método de evaporação pelo analisador HYPROP®, a fim de determinar a curva característica do solo não saturado e estabelecer um comparativo entre os métodos aplicados, analisando-os através de seus resultados.

Foram coletadas amostras indeformadas de solo não saturado no talude do Instituto de Engenharia Nuclear – IEN, localizado na UFRJ – Rio de Janeiro e através dos métodos apresentados foi possível obter a curva característica desse solo. Dessa forma, através dos resultados experimentais obtidos e da análise da curva característica, foi possível analisar quanto ao melhor método a ser aplicado para a determinação da curva característica, de maneira a se obter resultados confiáveis e satisfatórios.

1.2 Objetivos e Metodologia

O objetivo do presente trabalho é medir a sucção do solo, através de diferentes métodos e contribuir para a melhoria dos procedimentos experimentais da mecânica dos solos não saturados. Adicionalmente, apresentar um estudo de caso direcionado da análise dos métodos de ensaio e resultados para obtenção da curva característica dos solos.

Visando analisar as variáveis envolvidas no processo, interpretou-se os resultados experimentais e o procedimento aplicado para os diferentes métodos de ensaio. Analisou-se as variáveis que podem influenciar os resultados experimentais e, portanto, a curva característica do solo.

A metodologia baseou-se em realizar três ensaios distintos: método da Câmara de Richards, o método do papel filtro e o método de evaporação pelo analisador HYPROP®, a fim de determinar a curva característica do solo não saturado e estabelecer um comparativo entre os métodos aplicados, analisando-os através de seus resultados.

1.3 Motivação

O interesse pelo conhecimento do comportamento dos solos não saturados é muito importante para a área da geotecnia, e, é um tema que precisa ser estudado principalmente no que diz respeito a resistência ao cisalhamento, considerando o efeito de sucção e a heterogeneidade do maciço. Neste sentido, o presente trabalho visa contribuir para determinação da sucção empregando diferentes métodos e avaliando a potencialidade de cada um e a obtenção da curva característica do solo.

1.4 Estrutura do Trabalho

Após a Introdução, segue o capítulo 2 que se refere à fundamentação teórica dos solos não saturados, no qual, é descrito uma breve teoria sobre o assunto do presente trabalho. Na primeira parte são apresentados os conceitos básicos dos solos não saturados e, adicionalmente, é apresentado um breve resumo teórico dos procedimentos realizados em ensaios e os diferentes métodos de ajuste da curva característica.

O capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios correlacionando os métodos de obtenção da curva característica.

Já no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras. E em seguida encontram-se listadas as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

O solo não saturado é classificado como um sistema trifásico, constituído por partículas sólidas, água e ar. Entretanto, o solo não saturado deve ser considerado como um sistema de quatro fases, devido à presença da membrana contrátil. E por esse motivo, os parâmetros geotécnicos convencionais da Mecânica dos Solos Clássica não podem ser aplicados aos estudos de caso dos solos não saturados. Surgindo então, a necessidade de criação da Mecânica dos Solos Não Saturados, destinada ao desenvolvimento de teorias e conceitos básicos de solos não saturados.

Grande parte dos problemas geotécnicos são derivados da falta de conhecimento adequado quanto ao comportamento dos solos não saturados. Tais quais, podem causar danos irreversíveis ao ser humano, como deslizamento de taludes, capacidade de sustentação de fundações superficial e profunda, construções de barragens, e outros. Dito isto, é de suma importância para a Engenharia Civil e Geotecnia, o desenvolvimento da Mecânica dos Solos Não Saturados, com o objetivo de evitar os problemas geotécnicos apresentados.

As principais áreas de interesse de desenvolvimento geotécnico para solos não saturados podem ser definidas por: fluxo de água no meio poroso, resistência ao cisalhamento e comportamento de mudanças de volume. Onde para o presente trabalho, foi desenvolvido o estudo de caso referente a resistência ao cisalhamento do solo com o intuito de contribuir para o estudo da Mecânica dos Solos Não Saturados.

2.2 O Solo Não Saturado

O grau de saturação de um solo (S) é dado pela equação 2.1:

$$S = V_w(100)/V_v \quad (2.1)$$

Onde:

V_w – Volume de água;

V_v – Volume de vazios.

O grau de saturação determinará a sua condição:

- $S = 0\%$ → Solo seco;
- $S = 100\%$ → Solo saturado;
- $0\% < S < 100\%$ → Solo não saturado;
- $S < 80\%$ → Solo não saturado com fase de ar contínua;
- $S > 90\%$ → Solo não saturado com bolhas de ar oclusas;
- $80 < S < 90\%$ → Solo não saturado em zona de transição entre fase de ar contínua e bolhas de ar oclusas.

Segundo Lambe e Whitman (1969), o solo não saturado é considerado um sistema trifásico, constituído por: líquido, sólido e gás. No entanto, de acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), o solo não saturado deve ser considerado como um sistema de quatro fases: sólida, líquida, gasosa e interface ar-água ou membrana contrátil ou, película contráctil ou, menisco.

A principal característica sobre a existência da membrana contrátil está ligada ao fato dela exercer uma tensão superficial e comportar-se como uma membrana elástica. Isso acontece devido ao fato das moléculas da água na membrana contrátil, possuírem forças não equilibradas voltadas para o interior da água, gerando um tracionamento e acarretando uma agregação das partículas do solo.

A Figura 2.1 representa o esquema de um solo não saturado, segundo Fredlund e Rahardjo (1993). A Figura 2.2 representa o sistema trifásico, segundo Lambe e Whitman (1969), e de quatro fases de um solo não saturado, segundo Fredlund e Rahardjo (1993).

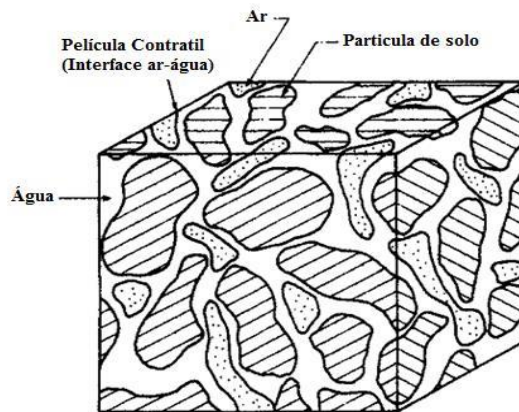


Figura 2.1 - Esquema do elemento do solo não saturado com uma fase de ar contínua (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

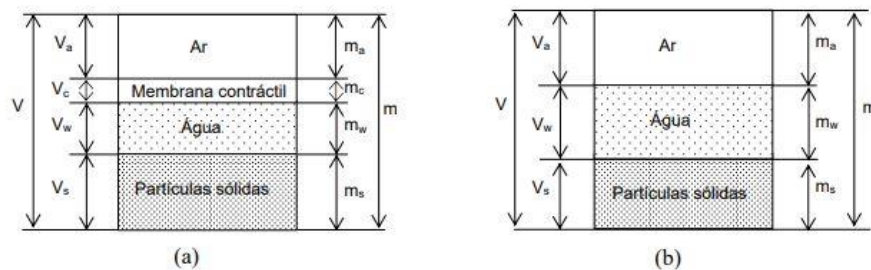


Figura 2.2 - Esquema de um solo não saturado (a) sistema de quatro fases (b) sistema trifásico (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

2.3 Comportamento Mecânico de um Solo

O comportamento mecânico de um solo (i.e., mudança de volume e resistência ao cisalhamento) pode ser descrito pelo estado de tensão do solo. O estado de tensão em um solo consiste em certas combinações de variáveis de tensões que podem ser referenciadas como variáveis do estado de tensões. Estas variáveis são independentes das propriedades físicas do solo. A quantidade de variáveis do estado de tensões depende principalmente do número de fases do solo.

A tensão efetiva ($\sigma - u_w$) para solos saturados tem sido considerada como uma lei da física. A tensão efetiva é uma variável do estado de tensão, que pode ser usada para descrever o comportamento de um solo saturado independente das propriedades do solo.

Terzaghi (1936) descreveu os princípios das tensões efetivas como:

- As tensões em qualquer ponto de uma seção de uma massa de solo que podem ser calculadas pelas tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 ;
- Caso os vazios do solo estejam preenchidos com água sob uma tensão “ u_w ”, então as tensões totais principais consistem de 2 partes:
 - Poro-pressão ou pressão neutra (u_w) que atua na água e no sólido com igual intensidade em todas as direções;
 - A parcela remanescente, atua no esqueleto sólido dos solos e é denominada de tensão efetiva: $\sigma_1' = \sigma_1 - u_w$, $\sigma_2' = \sigma_2 - u_w$ e $\sigma_3' = \sigma_3 - u_w$. Todos os efeitos mensuráveis oriundos da variação do estado de tensão, como compressão, distorção e mudança na resistência ao cisalhamento são devidas exclusivamente a variações nas tensões efetivas σ_1' , σ_2' e σ_3' .

A variável do estado de tensão para um solo saturado tem sido descrita como a tensão efetiva expressa pela seguinte equação 2.2:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.2)$$

Onde,

σ' = tensão normal efetiva;

σ = tensão normal total; e

u_w = poro-pressão da água.

Somente uma variável do estado de tensão [i.e., $(\sigma - u_w)$] é necessária para descrever o comportamento mecânico de um solo saturado (Rendulic, 1936; Bishop e Eldin, 1950; Laughton, 1955; Skempton, 1961). Uma descrição mais completa consiste em discriminar as tensões efetivas e tensões cisalhantes para cada um dos três eixos ortogonais (Figura 2.3).

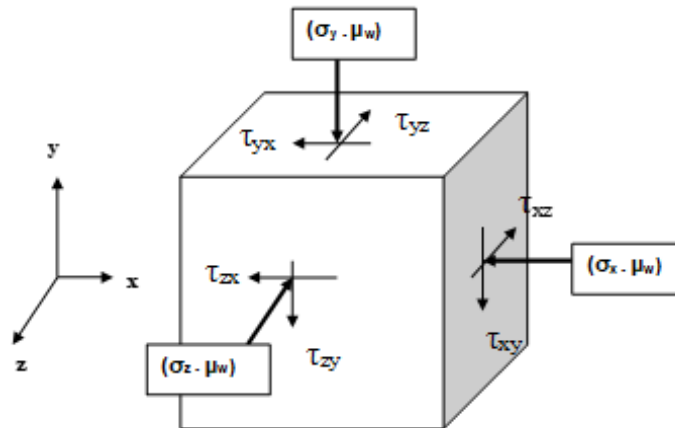


Figura 2.3 - Variáveis do estado de tensões para um solo saturado (extraído de Fredlund e Rahardjo, 1993).

Notas:

$(\sigma_y - \mu_w)$ = Tensão efetiva na direção y;

τ_{yx} = Tensão cisalhante no plano “yx” na direção x;

τ_{yz} = Tensão cisalhante no plano “yz” na direção z;

$(\sigma_x - \mu_w)$ = Tensão efetiva na direção x;

τ_{xz} = Tensão cisalhante no plano “xz” na direção z;

τ_{xy} = Tensão cisalhante no plano “xy” na direção y;

$(\sigma_z - \mu_w)$ = Tensão efetiva na direção z;

τ_{zy} = Tensão cisalhante no plano “zy” na direção y;

τ_{zx} = Tensão cisalhante no plano “zx” na direção x;

A condição de equilíbrio para uma determinada parcela de solo não saturado implica no equilíbrio das quatro fases do solo: líquido, sólido, gasosa e membrana contrátil. Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram, dada a dificuldade de relacionar o conceito de tensões efetivas com a condição do solo não saturado, a utilização de variáveis de estado de tensões independentes, expresso por: $(\sigma - \mu_a)$ e $(\mu_a - \mu_w)$ (Figura 2.4).

Onde:

σ = Tensão normal;

μ_a = Poro pressão do ar;

μ_w = Poro pressão da água.

$(\sigma - \mu_a) =$ Tensão normal líquida;

$(\mu_a - \mu_w) =$ Sucção.

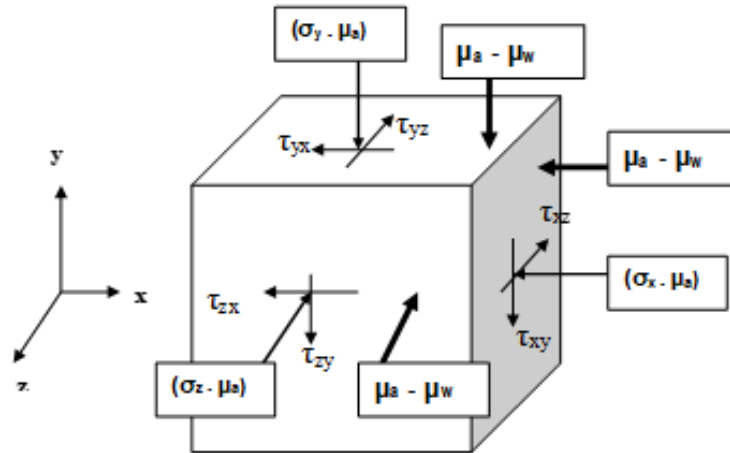


Figura 2.4 - Variáveis do estado de tensões para um solo não saturado (extraído de Fredlund e Rahardjo, 1993).

Notas:

$(\mu_a - \mu_w) =$ Sucção;

τ_{-} = Tensões cisalhantes nos respectivos planos e direções (vide notas da figura 2.3);

$(\sigma_y - \mu_a) =$ Tensão normal líquida na direção y;

$(\sigma_x - \mu_a) =$ Tensão normal líquida na direção x;

$(\sigma_z - \mu_a) =$ Tensão normal líquida na direção z.

De acordo com Terzaghi (1936) para os solos saturados, apenas a tensão normal efetiva (σ'), é suficiente para determinar o estado de tensão do solo e seu respectivo comportamento. No entanto, para os solos não saturados não é possível aplicar os mesmos conceitos desenvolvidos por Terzaghi, devido ao surgimento de uma poro-pressão negativa no solo, denominado por sucção. A poro-pressão negativa altera diretamente o comportamento mecânico dos solos não saturados e as mudanças em seu comportamento.

Dessa forma, tornou-se essencial o desenvolvimento da Mecânica dos Solos Não Saturados, de maneira a desenvolver novos conceitos e teorias direcionados exclusivamente ao conhecimento do comportamento dos solos não saturados.

2.4 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento do solo pode ser definida como capacidade do solo em suportar diferentes cargas sem ocorrer a sua ruptura, e está diretamente ligado as variáveis de tensão do solo, sendo elas a tensão normal e sucção matricial do solo. Dito isto, é de suma importante para os avanços geotécnicos o desenvolvimento dos estudos da resistência ao cisalhamento para solos não saturados considerando altos valores de sucção.

A envoltória de ruptura clássica de Mohr-Coulomb é capaz de descrever a resistência ao cisalhamento apenas para solos saturados, de acordo com Terzaghi (1936).

Para solos saturados (equação 2.3):

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)_f \tan \varphi' \quad (2.3)$$

Onde,

τ_{ff} = Resistência ao cisalhamento no plano de ruptura na condição de ruptura

c' = Intercepto de coesão efetiva

$(\sigma_f - u_w)_f$ = Tensão normal efetiva no plano de ruptura na condição de ruptura

σ_{ff} = Tensão normal no plano de ruptura na condição de ruptura

u_{wf} = Poro-pressão da água na ruptura

φ' = Ângulo de atrito interno efetivo

Nota: ff é uma abreviação em inglês para “failure plane at failure”

A Figura 2.5 representa as envoltórias de Mohr-Coulomb para solos saturados.

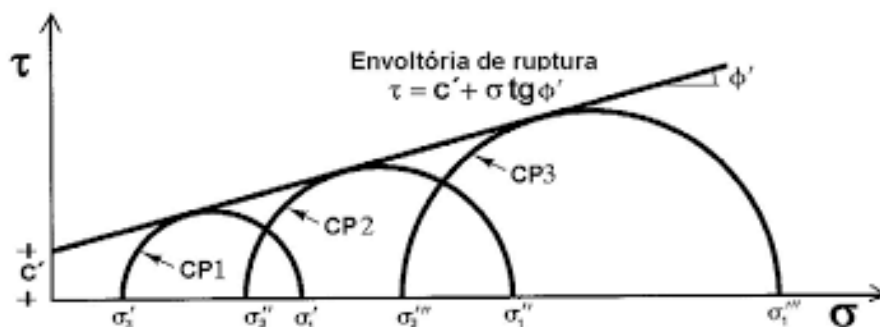


Figura 2.5 - Círculo de Mohr-Coulomb para um solo saturado (adaptado de Fredlund e Rahardio, 1993).

Em solos não saturados, é importante mensurar ou controlar as poro-pressões do ar e da água para conhecer a tensão normal e a sucção matricial na ruptura. A resistência ao cisalhamento aumenta com acréscimos de sucção mátrica de até certo valor limite. Fredlund et al. (1978), estabeleceram a equação 2.4, referente a resistência ao cisalhamento para solos não saturados.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2.4)$$

Onde:

τ_{ff} – Resistência ao cisalhamento;

c' – Coesão efetiva;

σ_f – Tensão normal;

u_a – Poro pressão do ar;

$(\sigma_f - u_a)_f$ – Estado de tensão normal líquida no plano de ruptura na condição de ruptura;

ϕ' – Ângulo de atrito interno efetivo associado à variável de estado de tensão normal líquida no plano de ruptura na condição de ruptura $(\sigma_f - u_a)_f$;

u_w – Poro pressão da água;

$(u_a - u_w)_f$ – Sucção matricial no plano de ruptura na condição de ruptura;

ϕ^b – Ângulo indicando a taxa de aumento da resistência ao cisalhamento devida à sucção matricial. Ângulo de envoltória de resistência com o eixo $(\sigma_a - u_w)$.

Para um solo não saturado, duas variáveis do estado de tensões são necessárias para determinar a resistência ao cisalhamento; enquanto que somente uma variável de estado de tensão é utilizada em solos saturados [i.e., $(\sigma_f - u_a)_f$, tensão normal efetiva]. O aumento da resistência ao cisalhamento devido ao acréscimo de tensão normal líquida é dado pelo ângulo de atrito (ϕ'). O aumento da resistência ao cisalhamento devido ao acréscimo de sucção matricial é dado pelo ângulo ϕ^b .

As variáveis do estado de tensões podem ser usadas como a variável de tensão efetiva é usada para solos saturados. Perfis para cada componente das tensões podem ser traçados, e suas variações no tempo e no espaço analisadas em relação a resistência ao cisalhamento e mudança de volume para problemas de, por exemplo, instabilidade de encostas e recalque. O diagrama de Mohr deve ser estendido para ilustrar o efeito da sucção matricial (Figura 2.6).

A distribuição dos componentes de tensão permite a computação de perfis in situ para a tensão normal líquida ($\sigma - u_a$) e a sucção mátrica ($u_a - u_w$). Com a saturação do solo há uma reversão para o perfil clássico de tensão efetiva ($\sigma - u_w$).

Parâmetros de resistência ao cisalhamento:

1. Intercepto de coesão;
2. Ângulo de atrito interno efetivo (ϕ');
3. Ângulo indicando a taxa de aumento da resistência ao cisalhamento devida à sucção matricial. Ângulo de envoltória de resistência com o eixo ($\sigma_a - u_w$), ϕ^b .

Fatores relacionados com os parâmetros de resistência ao cisalhamento:

1. Densidade;
2. Índice de vazios;
3. Grau de saturação;
4. Composição mineral;
5. Histórico de tensões; e
6. Taxa de deformação.

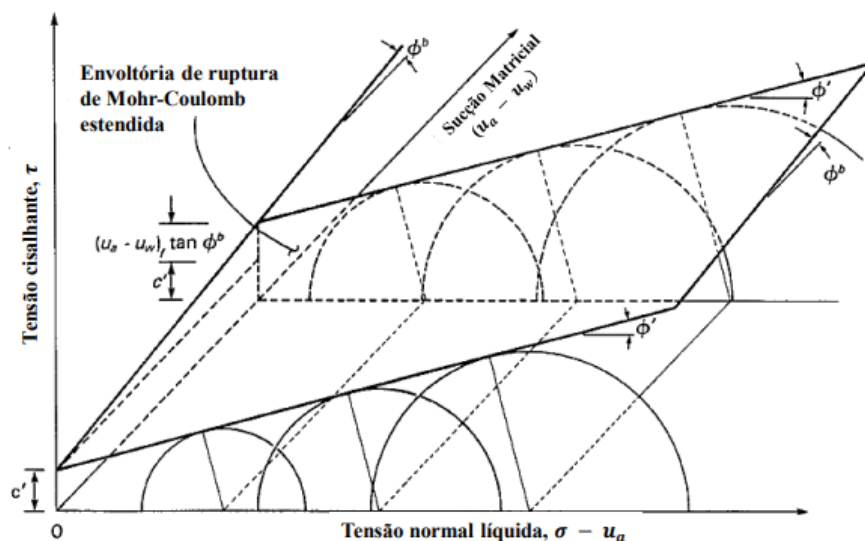


Figura 2.6 - Envoltória de Resistência ao Cisalhamento dos Solos não Saturados (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

2.5 Sucção

A sucção pode ser definida como uma tensão proveniente de efeitos capilares que atuam como um aumento na força de ligação entre as partículas (Ridley e Burland, 1995). Lee e Wray (1995) definiram a sucção como a energia aplicada por unidade de volume de água.

Em termos de potencial, a sucção pode ser classificada em dois tipos de potencial, que é respectivamente equivalente a sucção osmótica (π) e a sucção mátrica ($u_a - u_w$). A sucção osmótica é definida como a contra pressão de forma a evitar o fluxo d'água por entre a membrana contrátil. E a sucção mátrica, é definida como a diferença de pressão entre ar e água inserida nos vazios do solo, porém como a pressão do ar é considerada como igual a pressão atmosférica, tem se que a sucção mátrica será uma pressão negativa da água. Portanto, a sucção total (Ψ) pode ser obtida pela equação 2.5:

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.5)$$

Onde:

Ψ = Sucção Total;

π = Sucção Osmótica;

$(u_a - u_w)$ = Sucção Mátrica;

Vale ressaltar que os valores de sucção osmótica podem variar de acordo com as condições químicas e térmicas do solo. E de acordo com a quantidade de água disponível em um determinado solo não saturado, a sucção pode admitir valores iguais a zero, o que caracterizaria o solo como um solo totalmente saturado.

A sucção matricial é comumente associada ao fenômeno da capilaridade relativa à tensão superficial da água, que é resultante das forças intermoleculares atuantes na membrana contrátil. Os poros do solo com seus raios minúsculos agem como tubos capilares. A água capilar possui uma pressão negativa em relação a pressão do ar, que é, geralmente, atmosférica (i.e., $u_a = 0$) no campo. Em graus de saturação baixos, as poro-pressões da água podem atingir valores muito negativos na faixa de 7000 kPa (Olson e Langfelder, 1965).

Um modelo físico do fenômeno da capilaridade está ilustrado na Figura 2.7. A água sobe pelo tubo capilar devido a tensão superficial na membrana contrátil e pelas propriedades higroscópicas da água. A tensão superficial (T_s) atua em toda a circunferência do menisco em um ângulo, α , em relação a vertical (ângulo de contato), que varia de acordo com a adesão entre as moléculas da membrana contrátil e o material adjacente. Na Figura 2.7, $R_s = r$ (raio do poro do solo) $\rightarrow \alpha = 0$ (ângulo de contato). Quanto menor o raio do poro do solo, maior será a sucção do solo. A tensão superficial mantém suspensa a coluna d'água em um tubo capilar. A tensão superficial

associada a membrana contrátil resulta em uma força de reação na parede do tubo capilar, cuja componente vertical produz tensões de compressão na parede do tubo. O peso da coluna d'água é transferido para o tubo através da membrana contrátil. No caso de um solo com uma zona capilar, a membrana contrátil produz um aumento de compressão na estrutura do solo, e, como consequência, a sucção matricial aumenta a resistência ao cisalhamento do solo.

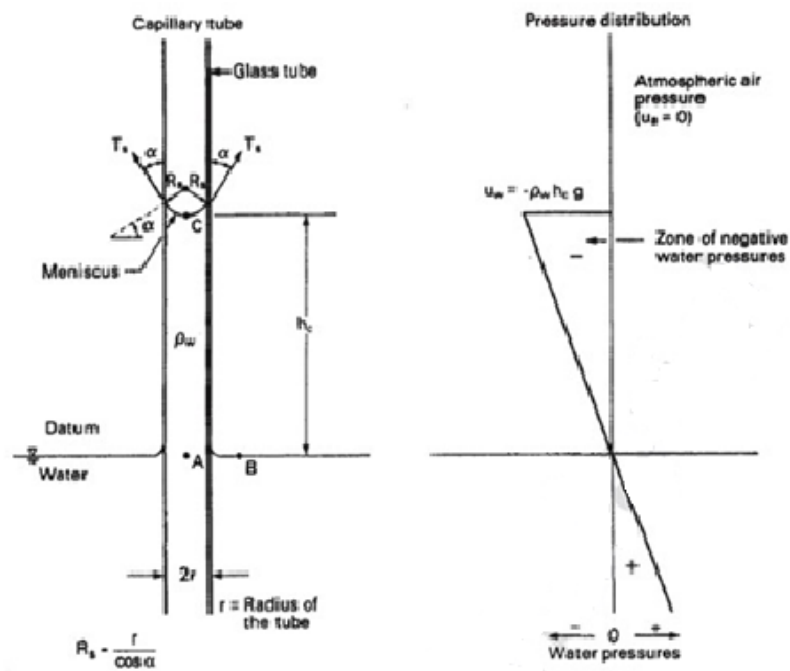


Figura 2.7 - Modelo físico do fenômeno da capilaridade (Fredlung e Rahardjo., 1993).

Nota – Tradução:

- Capillary tube – tubo capilar;
- Glass tube – tube de vidro;
- Meniscus – menisco;
- Datum Water – nível d'água;
- Radius of the tube – raio do tubo;
- Pressure distribution – Distribuição das pressões;
- Atmospheric air pressure – Pressão atmosférica;
- Zone of negative water pressure – zona de poro-pressões negativas da água;
- Water pressures – pressões da água.

2.6 Medidas de Sucção

Com o passar dos anos, diversos métodos foram desenvolvidos para obtenção dos valores de sucção do solo, onde cada método é mais adequado para uma determinada faixa de sucção, devido a suas limitações.

Os métodos podem ser classificados em direto ou indireto, onde o método direto estabelece valores para a energia necessária para remover a água dos poros, e o método indireto obtém um parâmetro para estabelecer a sucção do solo a ser analisado.

As principais técnicas utilizadas por pesquisadores podem ser apresentadas na Tabela 2-1, e os valores de sucção são expressos, comumente, como unidade de pressão, com as seguintes unidades: kPa, bar, atm, cm H₂O e pF.

Conforme apresentado, para o presente trabalho foram utilizados os métodos de Papel Filtro, Câmara de Richards e evaporação pelo analisador HYPROP, que utilizam a medida de sucção mátrica para determinação da curva característica.

Tabela 2-1 - Técnicas de medição e seus respectivos intervalos de tempo (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993; Marinho, 1997).

Técnica Para Medição	Medida de Sucção	Intervalo(kPa)	Tempo de Equilíbrio
Psicrômetro	Total	De 100 à 71000	Minutos
Papel Filtro (Sem contato)	Total	De 400 à 30000	De 7 a 14 dias
Papel Filtro (Com contato)	Mátrica	De 30 à 30000	7 dias
Bloco Poroso	Mátrica	De 30 à 30000	Semanas
Sensor de Condutividade Térmica	Mátrica	De 0 à 300	Semanas
Placa de Sucção	Mátrica	De 0 à 90	Horas
Placa de Pressão	Mátrica	De 0 à 1500	Horas
Tensiômetro Padrão	Mátrica	De 0 à 100	Minutos
Tensiômetro Osmótico	Mátrica	De 0 à 1500	Horas
Tensiômetro Tipo Imperial College	Mátrica	De 0 à 1800	Minutos

O tensiômetro é um equipamento amplamente utilizado por engenheiros agrônomos para medir diretamente a sucção mátrica (Figura 2.8). Este equipamento é constituído basicamente por uma pedra porosa, um transdutor e de um corpo acrílico. O tensiômetro de alta capacidade possui uma pedra porosa de elevado valor de pressão de entrada de ar (15 bar ou 1500 kPa), que permite somente o fluxo de água até esta específica pressão, impedindo a entrada de ar e, evitando, assim, o fenômeno da cavitação (Diene e Mahler, 2007) (Figura 2.9). O tensiômetro de alta capacidade possui limitações no seu uso em campo por períodos prolongados devido a dessaturação da pedra porosa, e por isso possui pouco tempo de funcionamento.



Figura 2.8 - Tensiômetro analógico (Site Agrosmart¹)



Figura 2.9 - Corpo acrílico e pedra cerâmica porosa de 15 bar (Nacinovic, 2009).

2.7 Curva Característica

A curva característica ou curva de retenção de água, normalmente, relaciona a quantidade de água no solo e a energia necessária para remover esta água. Na abordagem direta, mede-se uma série de pares de teores de água e de pressões e, em seguida, feito o ajuste dos dados há uma função específica, que é representada em um gráfico semilog devido a elevada faixa de valores de sucção. A correta compreensão da curva característica é de suma importância para o entendimento do comportamento dos solos não saturados, sendo capaz de desenvolver novos

¹ Disponível em: < <https://agrosmart.com.br/blog/tensiometro-tecnologias-monitorar-umidade-do-solo/>>. Acesso em 24 ago. 2021.

conhecimentos e teorias sobre os solos não saturados, onde cada tipo de solo possui uma específica curva de retenção de água.

No decorrer dos anos, pesquisadores desenvolveram diferentes equações de ajuste para a curva característica. A Tabela 2-2 e a Tabela 2-3 representa uma revisão das principais equações desenvolvidas. Para o presente trabalho foi utilizado a equação de Van Genuchten (1980) para a determinação da curva característica.

Tabela 2-2 - Equações de ajuste da curva característica (adaptado de Fredlund e Xing, 1994; Gerscovich, 2001).

Referência	Equação	Descrição das Variáveis
Garder (1858)	$\theta = \frac{1}{1+q\psi^n}; \theta = \frac{(\theta-\theta_s)}{(\theta_s+\theta_r)}$	Θ = Teor de umidade normalizado; $\theta, \theta_s, \theta_r$ = Respectivamente os teores de umidade volumétrico, residual e saturado; Ψ = Sucção; n e q = Parâmetros de ajuste.
Brooks e Corey (1964)	$\theta = \left(\frac{\Psi b}{\Psi}\right)^\lambda$	λ = Índice de distribuição de diâmetro de vazios; Ψb = Sucção correspondente ao valor de entrada de ar.
Visser (1966)	$\psi = \frac{a(\theta_s - \theta)^b}{\theta^c}$	a, b e c = Parâmetros de ajuste.
Farrel e Larson (1972)	$\Psi = \Psi_b e^{\alpha(1-\theta)}$	α = Parâmetros de ajuste
Roger e Hornberger (1978)	$\Psi = a(S_s - b)(S_s - 1)$	$S_s = \theta/\theta_s$; a e b = Parâmetros de ajuste.
Van Genuchten (1980)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n}\right]^m$	α, n e m = Parâmetros de ajuste.
William et al. (1983)	$\ln\Psi = a + b\ln\theta$	a e b = Parâmetros de ajuste
Mckee e Bumb (1984)	$\theta = e^{\frac{-(\Psi-a)}{b}}$	a e b = Parâmetros de ajuste

Tabela 2-3 - Equações de ajuste da curva característica (Continuação) (adaptado de Fredlund e Xing, 1994; Gerscovich, 2001).

Referência	Equação	Descrição das Variáveis
Haverkamp e Parlange (1986)	$\theta = \frac{n}{1+\lambda} \left(\frac{\Psi b}{\Psi}\right)^{\lambda};$ $\theta = n \left[1 - \left(\frac{\lambda}{(1+\lambda)}\right) \left(\frac{\Psi b}{\Psi}\right)\right]$ $\Theta = \theta_s$ <p>Secagem</p> $\theta = n \left(\frac{\Psi b}{\Psi}\right)^{\lambda} \left[1 - \frac{\Psi b}{\Psi} \left(1 - \frac{\theta_s}{n}\right)\right]$	<p>n = Porosidade;</p> <p>λ = Parâmetro de ajuste relacionado à distribuição de tamanho de poro;</p> <p>θ_s = Teor de umidade saturado;</p> <p>Ψb e Ψb^* = Sucção correspondente ao valor de entrada de ar para as curvas de secagem e de umedecimento, respectivamente.</p>
Makee e Bumb (1987)	$\theta = \frac{1}{1 + e^{(\Psi - a)/b}}$	a e b = Parâmetro de ajuste.
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C v \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \frac{\Psi}{a}\right]\right]^m}$	<p>$\Psi_o = 10^6$ kPa;</p> <p>Ψ_r = Sucção correspondente ao ponto de saturação residual;</p> <p>e = Base do log neperiano (e=2,718);</p> <p>a, m e n = Parâmetros de ajuste</p> <p>a = Ψ_i;</p> <p>m = $3,67 \ln\left(\frac{\theta_s}{\theta_i}\right)$;</p> <p>n = $\frac{1,31^{m+1}}{m \theta_s} 3,72 s \Psi_i$;</p> <p>s = Inclinação</p>
Aubertin et al. (1998)	$S_r = S_r + S_r(1 - S_r)$ $S_r = 1 \left[\left(\frac{hco}{\Psi}\right)^2 + 1 \right] e^{-m \left(\frac{hco}{\Psi}\right)^b}$ $S_r = C v \frac{a}{e^{1/3} \Psi^{1/6}} \Psi_o^{2/3}$ $C v = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)}{\ln \left(1 + \frac{\Psi_o}{\Psi_r}\right)}$	<p>a, hco e m = Parâmetros de ajuste;</p> <p>hco = 1 a 2,5 Ψb (cm H₂O)</p> <p>$S_r = \theta/\theta_s$</p> <p>a \approx 0,006 (curva de dessaturação)</p> <p>$\Psi_o = 10^7$ cm H₂O</p> <p>$\Psi_r = 15 \times 10^3$ cm H₂O</p> <p>e = índice de vazios.</p>
Gallipoli et al. (2003)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \Psi)^n} \right]^m$ $A = \phi (v-1)^{\Psi}$	<p>v = Volume específico;</p> <p>ϕ, Ψ = Constantes do Solo.</p>

A curva característica apresenta caminhos diferentes na saturação e perda de saturação da amostra de solo, e por isso pode ser classificada como curva característica histerética, onde a histerese ocorre pela desuniformidade dos poros, ar aprisionado, expansão e contração que podem afetar a estrutura do solo, principalmente pela presença de bolhas oclusas no solo. A Figura 2.10 ilustra a separação da curva característica em zonas, onde é possível determinar a diferença entre secagem, umedecimento, entrada de ar, histerese e outros. O tipo de solo define o formato da curva característica, uma vez que suas características granulométricas, mineralógicas e estruturais refletem o padrão de distribuição do tamanho de poros, o que irá refletir na amplitude de valores de sucção (necessários para remover a água) e declividade da curva (perdendo quantidade de água mais rápido ou não, em um determinado intervalo de sucção (Figura 2.11).

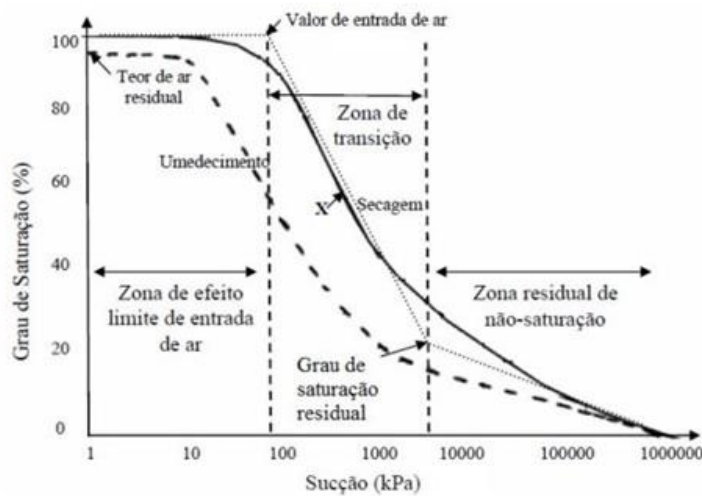


Figura 2.10 - Zonas de Curva Característica (adaptado Vanapalli et al., 1999).

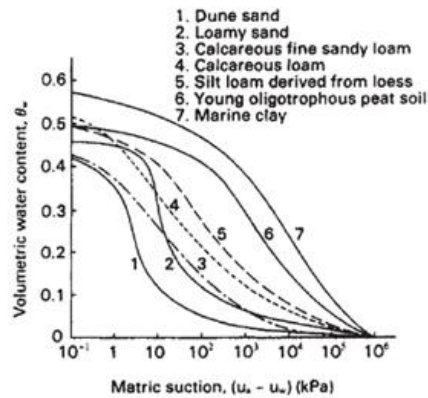


Figura 2.11 - Curvas características para diversos solos (Koorevaar et al., 1983).

Nota: Tradução da imagem:

1. Areia de dunas;
2. Areia franca;
3. Calcário fino franco arenoso;
4. Calcário franco;
5. Solo franco siltoso;
6. Turfa oligotrófica jovem;
7. Argila marinha.

2.8 Métodos de Obtenção da Curva Característica

A curva característica pode ser obtida através da realização de ensaios de campo e/ou laboratoriais com amostras indeformadas do solo, através de diferentes equipamentos.

Os ensaios podem ser classificados em direto, quando a sucção é medida diretamente ou indireto, quando é medida por um parâmetro. Para o presente trabalho foi utilizado três métodos de ensaio laboratorial, os quais são: Câmara de Richards (método direto), Papel Filtro (método indireto) e analisador HYPROP® (método indireto).

2.8.1 Método da Câmara de Richards

O método da Câmara de Richards é o principal método utilizado por engenheiros agrônomos e foi desenvolvido para quantificar a retenção de água no solo na faixa disponível para plantas. Isso acontece devido aos altos valores de pressão que esse método pode alcançar, no entanto, esse método possui algumas

limitações, além de necessitar de um longo tempo de espera para obtenção de seus resultados.

O método consiste na utilização de amostras indeformadas dentro de uma câmara de pressão hermética, onde a amostra é colocada sobre uma placa cerâmica porosa. Em seguida, é aplicada uma determinada pressão à câmara, fazendo com que a água dos poros flua em direção a placa porosa, que permanece saturada, e seja drenada para fora da câmara. A condição de equilíbrio é estabelecida por pesagem das amostras. Ou seja, quando o peso da amostra permanece constante em uma dada pressão ao longo do tempo.

Diferentes pressões são aplicadas, com o intuito de se obter uma ampla faixa de sucção, abrangendo as diferentes zonas da curva de retenção.

A Figura 2.12 ilustra o processo de utilização da Câmara de Richards, de forma a representar o funcionamento da mesma.

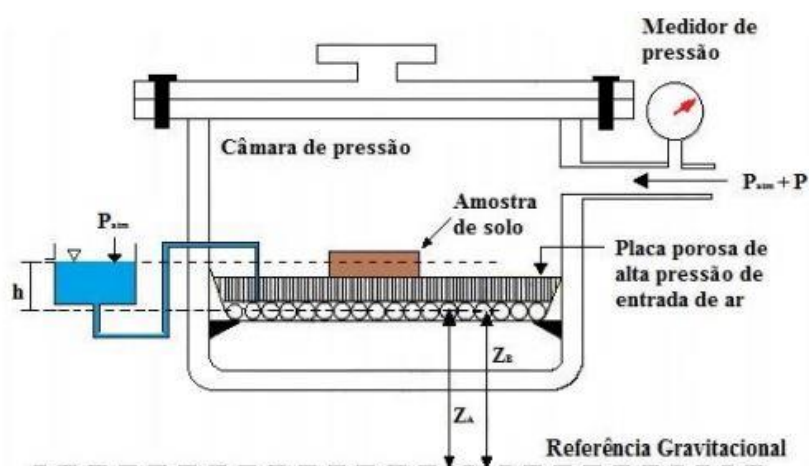


Figura 2.12 - Representação da Câmara de Richards(adaptado de Silva, 2005).

2.8.2 Método do Papel Filtro

O método do papel consiste na obtenção de equilíbrio de pressão de certa amostra através do contato direto ou indireto do papel filtro com a amostra indeformada, onde a amostra possui a habilidade de perder ou absorver determinada quantidade de água. Com isso, através da obtenção da umidade do papel filtro, é possível determinar o valor da sucção por meio de uma equação de ajuste.

É importante ressaltar que o método do papel filtro é bastante utilizado para se obter a curva característica, e suas principais vantagens estão ligadas ao fato de

necessitar menor tempo para se obter os resultados, além de seu baixo custo para realização do ensaio. No entanto, a execução do procedimento do ensaio exige extremo cuidado, solicitando bastante atenção quanto a interpretação de seus resultados.

A Tabela 2-4 apresenta o tempo aproximado para obtenção dos resultados de equilíbrio do papel filtro sem contato direto com a amostra.

Tabela 2-4 - Tempo de equilíbrio sugerido para o papel filtro na medida de sucção total, sem contato com a amostra(adaptado de Marinho, 1994).

Nível de Sucção	Tempo de Equilíbrio (dias)
0 - 100	Indeterminado, >30
100 -250	30
250 - 1000	15
>1000	7
Obs: Distância entre o papel e a fonte de água: 8mm	

A sucção medida pode ser total (sucção osmótica + sucção mátrica) ou somente a sucção mátrica, dependendo do tipo de contato do papel filtro com a água do solo. Quando colocamos algum anteparo (e.g., um disco de PVC perfurado) entre a água do solo e papel filtro, a transferência de água será via vapor e, sendo assim, mediremos a sucção total (Figura 2.13). No caso do contato direto da água do solo

com o papel filtro, a sucção mensurada será a matricial, o qual foi realizado no presente trabalho (Figura 2.14).

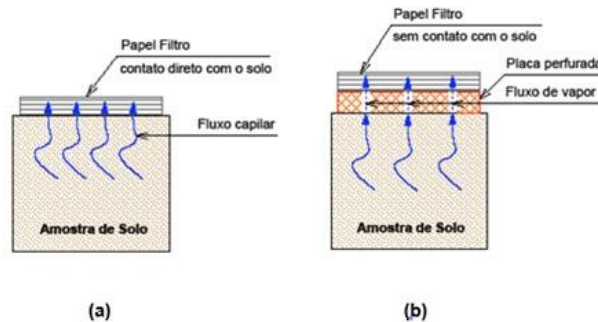


Figura 2.13 – (a) Ensaio com o papel filtro em contato direto com a amostra de solo para medir a sucção matricial; (b) Ensaio em que o papel filtro não entra em contato com a amostra do solo, com o propósito de medir a sucção total (Nacinovic, 2009).



Figura 2.14 - Representação de ensaio Papel Filtro (Nacinovic, 2009).

Os principais papéis filtro utilizados para esse tipo de ensaio são o Whatman nº 42 e o Schleicher & Schuell nº 589, por razões de calibração. Porém, o Whatman nº 42 é mais recomendado por apresentar resultados melhores, além de possuir poros menores e espessura maior se comparado ao Schleicher & Schuell nº 589. Por esses motivos, visando resultados melhores, para o presente trabalho foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42.

A Tabela 2-5 apresenta as equações que relacionam o teor de umidade do papel filtro com a sucção, através de um comparativo de papéis filtro. E a Figura 2.15 apresenta um comparativo das curvas de calibração entre os dois tipos de papéis filtros apresentados acima.

Tabela 2-5 - Equações que relacionam o teor de umidade do papel filtro com a sucção (adaptado de Marinho, 1994).

Papel Filtro	Faixa de Umidade	Equação
Whatman nº 42 (Chandler e Gutierrez, 1986)	$w \leq 47\%$	$Sucção (kPa) = 10^{(4,84 - 0,0622 \times \log w)}$
	$w > 47\%$	$Sucção (kPa) = 10^{(6,05 - 2,48 \times \log w)}$
Schleicher & Schuell nº 589 (ASTM D5298-92)	$w \leq 54\%$	$Sucção (kPa) = 10^{(5,056 - 0,0688 \times \log w)}$
	$w > 54\%$	$Sucção (kPa) = 10^{(1,882 - 0,01202 \times \log w)}$

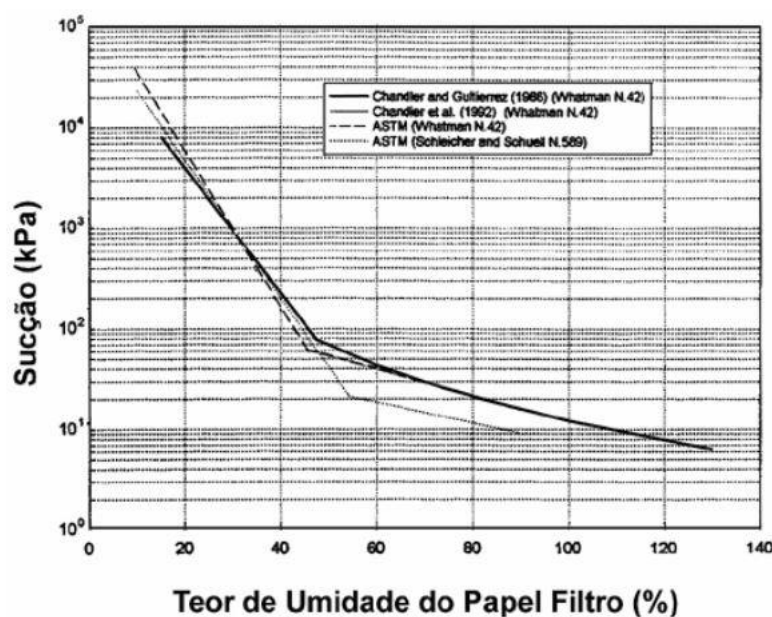


Figura 2.15 - Comparativo de calibração para os papéis filtro Whatman nº 42 e Schleicher & Schuell nº 589 (adaptado de Marinho, 1994).

2.8.3 Ensaio de Evaporação por Analisador HYPROP®

O ensaio de evaporação por analisador HYPROP® utiliza mini-tensiômetros para medição dos valores de potencial hídrico em diferentes níveis dentro de uma amostra saturada do solo, enquanto a amostra repousa sobre uma balança altamente calibrada. Com isso, é possível relacionar a mudança de potencial mátrico e o peso variável da amostra, simultaneamente. Dessa forma, o programa HYPROP® FIT é capaz de calcular o teor de umidade a partir das medições de peso e apresentar a curva característica relacionando o teor de umidade com o potencial mátrico da amostra.

O método de ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® (Figura 2.16) realiza medições de sucções a cada minuto durante a primeira hora e de 10 em 10 minutos até o final do ensaio, apresentando medições precisas, além de 99 pontos em sua curva característica. A duração do ensaio depende do tipo de amostra de solo, podendo durar alguns dias ou pouco mais de 1 semana. O equipamento HYPROP® apresenta uma faixa ótima de medição de 100 kPa, podendo alcançar valores próximos de 300 kPa.

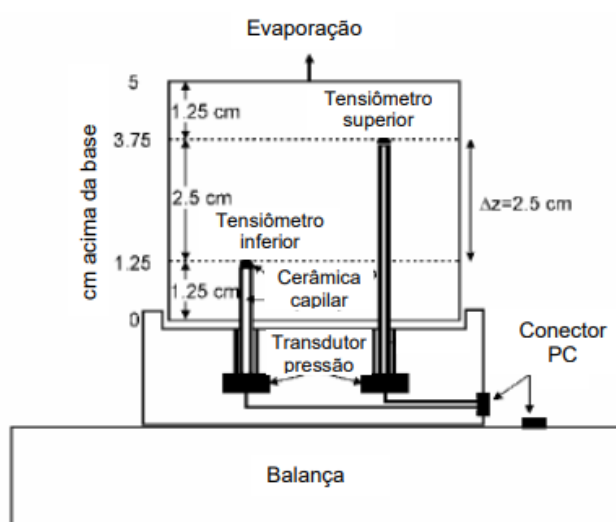


Figura 2.16 - Representação do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP (adaptado de Schindler et al., 2010).

2.9 Ensaios de Caracterização

Foram realizados, para o presente trabalho, ensaios de caracterização granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade.

2.9.1 Granulometria

O objetivo da análise granulométrica do solo é definir os diâmetros das partículas que compõem determinado solo, representando-a em uma curva, classificando o solo em porcentagens de silte, argila, areia (grossa, média e fina) e pedregulho.

O ensaio permite obter a real textura do solo ensaiado, determinando o modelo de curva característica que o solo ensaiado deve seguir. O ensaio foi realizado conforme as recomendações da ABNT NBR 7181(2016). A preparação das amostras

com secagem rápida foi realizada conforme as recomendações da ABNT NBR 6457(2016), o qual determina a obtenção de uma amostra representativa de solo seco ao ar e destorroado para a análise granulométrica. As partículas mais grosseiras foram retiradas manualmente.

2.9.2 Limite de Liquidez e Plasticidade

O limite de plasticidade indica o teor de água que marca a passagem do estado semissólido do solo para o estado plástico, enquanto o limite de liquidez indica o teor de água que marca a passagem do estado plástico para o estado líquido do solo. O ensaio de limite de liquidez e de plasticidade permitem realizar uma estimativa do comportamento do solo sob determinado carregamento, onde solos com elevado limite de liquidez são mais deformáveis.

O limite de liquidez é determinado pelo método de Casagrande, obtido segundo a norma ABNT NBR 6459(2016) e o limite de plasticidade é obtido segundo a norma ABNT NBR 7180(2016). A preparação da amostra foi realizada segundo a norma ABNT NBR 6457(2016), em que se obtém uma amostra representativa do solo seco ao ar e destorroado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta de Amostras

O presente estudo foi conduzido com amostras indeformadas a partir do solo coletado no IEN - Instituto Nuclear de Engenharia, Rio de Janeiro – Ilha do Fundão, no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coordenadas: 43° 14' 45" Oeste e 22° 53' 10" Sul.

As amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos de 100 cm³ (Figura 3.1), a uma profundidade de 30 cm. Foram coletadas um total de doze amostras indeformadas do solo (Figura 3.2), para obtenção das curvas características a partir de três diferentes métodos de ensaio: papel filtro, câmara de Richards e evaporação por analisador HYPROP®.

Para que se obtenha amostras indeformadas de excelente qualidade, é importante ter cuidados especiais no momento da coleta das amostras, tais como: utilização de martelo de borracha de forma a amortecer a batida e reduzir a perturbação da amostra (Figura 3.3), corte em bisel nos anéis para auxiliar a penetração do solo (Figura 3.4), assim como evitar que a amostra do solo não chegue ao final do batente do amostrador, impedindo sua deformação.

Após serem coletadas, as amostras de solo foram acondicionadas em filme plástico de PVC e papel alumínio, de forma a preservar a umidade original do solo e proteger o solo de choques mecânicos durante seu transporte ao laboratório.

Além das amostras indeformadas de solo, foi coletada uma amostra representativa para realização dos ensaios físicos de caracterização.



Figura 3.1 – Anel volumétrico de 100cm³.



Figura 3.2 - Coleta da amostra indeformada do solo.



Figura 3.3 - Amostragem do solo com martelo de borracha.



Figura 3.4 - Corte em bisel nos anéis para auxiliar na coleta das amostras.

3.2 Ensaio de papel filtro

O ensaio teve início com o umedecimento das amostras indeformadas de solo. Uma modelagem eficaz de curva requer um espaçamento proporcional das umidades volumétricas das amostras. O umedecimento pode ser feito saturando completamente as amostras, onde as bolhas de ar oclusas são expulsas; ou por um umedecimento gradual, que foi o método escolhido neste trabalho. Foi coletada uma amostra indeformada em um anel volumétrico de aproximadamente 100 cm^3 que foi seca em estufa de 60°C (para não queimar a matéria orgânica) para obter a massa específica seca do solo, que foi aferida em $1,397 \text{ g cm}^{-3}$. Multiplicando este parâmetro pelo volume de cada anel volumétrico obteve-se a massa seca aproximada de cada amostra de solo. A seguir, foi estipulado teores de umidade com valores espaçados proporcionalmente. Para obter estes teores de umidade, um determinado volume de água foi adicionado ou diminuído por evaporação. Estes valores multiplicados pelas massas secas e divididos pelos volumes dos anéis deram as umidades volumétricas utilizadas nos ensaios de papel filtro. A metodologia do ensaio de papel filtro é discriminada a seguir.

Para a obtenção da curva característica, foram utilizados ao todo onze amostras indeformadas, coletadas com anéis volumétricos de 100 cm^3 a uma profundidade de 30cm (Figura 3.5). Foram realizados dois ensaios do papel filtro, onde o primeiro ensaio utilizou seis amostras indeformadas para obtenção da curva característica apenas com dois papéis filtro em contato com a amostra, isso ocorreu

devido à falta de papéis disponíveis no laboratório para a realização do ensaio. No entanto, após 24 dias na estufa, observou-se que alguns papéis filtro estavam deteriorados (Figura 3.6), alterando significativamente os resultados obtidos, dessa forma foi necessário realizar um segundo ensaio seguindo estritamente a norma técnica ASTM D5298 (2003). O segundo ensaio foi realizado com cinco amostras indeformadas, onde a norma ASTM D5298 (2003) estabelece necessariamente a disposição de três papéis filtro em contato direto com cada lado da amostra do solo no anel (Figura 3.7). Os seis papéis filtros foram dispostos em cada amostra com anel volumétrico e envolvidos em papel plástico de PVC e papel alumínio. Vale ressaltar que o papel filtro foi manuseado com luvas cirúrgicas e pinças para impedir a contaminação do papel filtro com a gordura das mãos. As amostras de solo envolvidas adequadamente em papel plástico e papel alumínio foram colocadas em uma câmara úmida a 20 ± 1 °C por um período de 25 dias, dessa forma, foi possível obter a equalização da umidade do solo com o papel filtro. A importância da utilização da câmara úmida para o ensaio, é referente a utilização da mesma de forma a impedir que a amostra sofra influência de mudanças de temperatura e umidade. Em seguida, após o período de equalização, as amostras foram retiradas da câmara úmida e os papéis filtro do meio, que estavam protegidos pelos outros dois papéis filtro evitando assim o contato direto com a amostra de solo e contaminação por impurezas, foram colocados rapidamente dentro de um plástico zipado, sem que houvesse perda de umidade e pesado em uma balança com precisão de 0,1 mg (Figura 3.8 e Figura 3.9). O plástico zipado foi pesado previamente, para que fosse possível descontar do valor final medido junto ao papel filtro obtendo-se o peso do papel filtro úmido. Os demais dois papéis filtro que serviram de proteção foram descartados. Dessa forma, logo após a pesagem do papel filtro úmido, o mesmo era retirado do plástico zipado e posto em uma estufa para secagem a 100 ± 5 °C, por um período de um dia, conforme estabelecido por norma (Figura 3.10 e Figura 3.11). Após o período de secagem de um dia, o papel filtro foi colocado rapidamente dentro do plástico zipado, para que o papel filtro não absorvesse nenhuma umidade. O papel filtro e o plástico zipado foram pesados, e como o peso do plástico zipado tinha sido previamente pesado, foi possível obter o peso do papel filtro seco. Subtraindo o peso do papel filtro úmido do papel filtro seco, calculou-se a umidade do papel filtro. O papel filtro utilizado para o presente trabalho para determinação da curva característica, foi o Whatman ® nº 42. Chandler

et al. (1992) estabeleceu a curva de calibração (sucção x umidade) para o papel filtro apresentado, caracterizado pela equação 3.1 e equação 3.2 (Figura 3.12):

$$\Psi = 10^{(6,05-2,48 \log wp)} \quad \text{para } wp > 47\% \quad (3.1)$$

$$\Psi = 10^{(4,84-0,0622wp)} \quad \text{para } wp \leq 47\% \quad (3.2)$$

Onde, Ψ – sucção e wp – umidade do papel filtro (%)

Por conseguinte, afim de obter a curva característica, foi utilizado a equação de Van Genuchten (1980) (Equação 3.3, equação 3.4 e equação 3.5). Para obter o ajuste e os devidos parâmetros de Van Genuchten (1980) referente a curva característica do solo analisado foi utilizado o software SWRC® FIT².

$$\theta = \left(\frac{1}{1+\alpha^n \Psi^n} \right)^m \quad (3.3)$$

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3.5)$$

Onde,

Ψ – sucção;

θ – umidade volumétrica normalizada;

θ_r – umidade volumétrica residual;

θ_s – umidade volumétrica na saturação;

α , m , n – parâmetros Van Genutchen (1980).

² Disponível em: <https://seki.webmasters.gr.jp/swrc/>

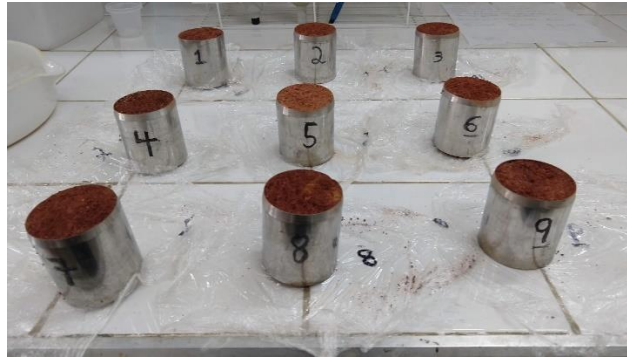


Figura 3.5 – Amostras de solo coletadas para a realização do ensaio do papel filtro.



Figura 3.6 – Papel filtro deteriorado referente ao primeiro ensaio realizado.



Figura 3.7 – Disposição dos três papéis filtro na amostra do solo.



Figura 3.8 – Plástico zipado com papel filtro sendo pesado na balança de precisão.

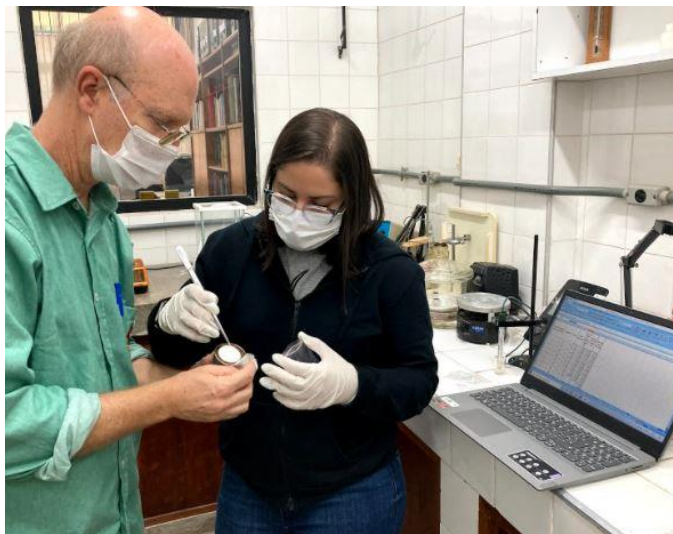


Figura 3.9 – Pesagem do papel filtro junto ao plástico zipado na realização do ensaio de papel filtro.



Figura 3.10 – Papel filtro na estufa por um dia.



Figura 3.11 – Papel filtro na estufa.



Figura 3.12 - Papel filtro Whatman®.

3.3 Ensaio da Câmara de Richards

Foram utilizados, ao todo, dez amostras indeformadas para a obtenção da curva característica, através do método da Câmara de Richards (Figura 3.13). As amostras indeformadas foram as mesmas utilizadas no ensaio do papel filtro, que foram coletadas em anéis volumétricos de 100 cm³ a uma profundidade de 30 cm. E para que o ensaio pudesse ser iniciado, houve a necessidade de alguns cuidados especiais, os quais as amostras foram saturadas com água destilada em uma bandeja de metal por elevação gradual de uma lâmina d'água de até 2/3 de altura do cilindro da amostra por um período de aproximadamente 48 horas (Figura 3.14). A placa cerâmica porosa (Figura 3.15) que fica em contato com as amostras dentro da câmara de Richards, foi saturada com água destilada por um período de 48 horas. Após o período de saturação das amostras e placa porosa, as amostras foram postas sobre a placa cerâmica dentro da câmara de Richards, e submetidas a uma pressão de 10 kPa (Figura 3.16). Em seguida, após as amostras terem atingido a drenagem máxima de água contida em seus poros alcançando um estado de equilíbrio, a câmara foi aberta e as amostras foram pesadas obtendo os respectivos pesos totais úmidos. Subtraindo o peso total úmido da tara do anel volumétrico obteve-se a massa úmida da amostra de solo (mh). Este processo foi repetido para sucessivas aplicações de pressões de 20 – 30 – 40 - 60 – 80 - 100 e 1.000 kPa. Para determinar a umidade volumétrica foi necessário secar as amostras em estufa a 100 ±5°C por um período

de 72 horas para obter os pesos totais secos, que subtraído das taras dos anéis volumétricos davam as massas secas (m_s). A umidade volumétrica foi calculada pela equação 3.6, equação 3.7 e equação 3.8. Em resumo o ensaio da câmara de Richards permite que através da sucção previamente conhecida, o teor de umidade da amostra seja calculado em função da variação de volume d'água na amostra.

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} \quad 3.6$$

$$V_w = mh - m_s \quad 3.7$$

$$\theta_w = \frac{mh - m_s}{V} \quad 3.8$$

Onde:

θ_w = Umidade volumétrica;

V_w = Volume de água;

V = Volume total da amostra contida no anel volumétrico;

mh = Massa úmida da amostra de solo;

m_s = massa seca da amostra de solo.



Figura 3.13 – Câmara de Richards.



Figura 3.14 – Amostras sendo saturadas por elevação gradual.



Figura 3.15 – Placa cerâmica porosa utilizada dentro da câmara de Richards.



Figura 3.16 – Amostras saturadas sobre a placa porosa para realização do ensaio.

3.4 Ensaio de Evaporação pelo analisador HYPROP®

Para o presente trabalho, foi necessário coletar uma amostra do solo indeformado utilizando um anel de 250 mL, com 8 cm de diâmetro e 5cm de altura. O método de ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® consistiu em monitorar a sucção matricial através de dois tensiômetros posicionados a uma altura de 1,25 e 3,75 cm dentro da amostra previamente saturada, sendo correlacionadas as mudanças de peso da amostra com as medições de potencial matricial nas amostras durante o período de secagem, causadas pela evaporação.

Primeiramente a amostra foi saturada com água deionizada e desaerada a vácuo, de forma a reduzir ao máximo a incidência de bolhas de ar que possam interferir na medição dos tensiômetros. A amostra foi posta em uma bandeja de plástico e saturada por meio de elevação gradual de uma lâmina d'água de até 2/3 de altura do cilindro da amostra por um período de aproximadamente 48 horas (

Figura 3.17). Dois tensiômetros, previamente saturados com água deionizada e desaerada a vácuo (Figura 3.18 e Figura 3.19), foram acoplados a uma base sensora provida de transdutores de pressão (Figura 3.20, Figura 3.21 e Figura 3.22), e pôde-se então crava-los ao anel saturado, a uma altura de 1,25 e 3,75 cm, tendo como referência a base do anel (Figura 3.23). A amostra junto aos tensiômetros já instalados, foram postos em cima de uma balança de precisão de 0,1 mg onde as medidas de sucção foram mensuradas a cada minuto durante uma hora, e seguidos por um intervalo de dez minutos até o final do ensaio (Figura 3.24), que ocorreu ao ser atingido o limite dos tensiômetros, sendo medidos ao todo 99 pontos para gerar e ajustar a curva característica.

Os dados obtidos foram processados pelo programa HYPROP® FIT, que permite estimar os parâmetros da curva de retenção de água, além de calcular a curva característica da amostra ensaiada.



Figura 3.17 - Amostra de solo indeformado sendo saturada para a realização do ensaio.



Figura 3.18 - Mini tensiômetro já saturado com água deionizada e desaerada, em bomba a vácuo por 24 horas, com sucções de 5 minutos cada hora.



Figura 3.19 - Mini tensiômetro saturado acoplado a unidade sensora para realização do ensaio.



Figura 3.20 – Realização de furos na amostra para inserir dois mini-tensiômetros.



Figura 3.21 – Mini-trado para furar a amostra para inserção dos mini-tensiômetros.



Figura 3.22 – Manutenção da saturação do tensiômetro durante todo o processo de realização do ensaio.



Figura 3.23 – Instalando a amostra na base sensora.



Figura 3.24 – Realização do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP®.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização do solo e ensaios experimentais Papel Filtro, Câmara de Richards e Evaporação pelo analisador HYPROP® e as discussões pertinentes.

4.1 Ensaios de Caracterização do Solo

A Tabela 4-1 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o ensaio de granulometria. A Figura 4.1 representa os resultados para os limites de liquidez e plasticidade e índice de plasticidade. A

Figura 4.2 representa o resultado da curva granulométrica. A Figura 4.3 representa a o triângulo de classe textural.

Tabela 4-1 - Resumo dos resultados granulométricos do solo.

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
27	15	13	26	14	5

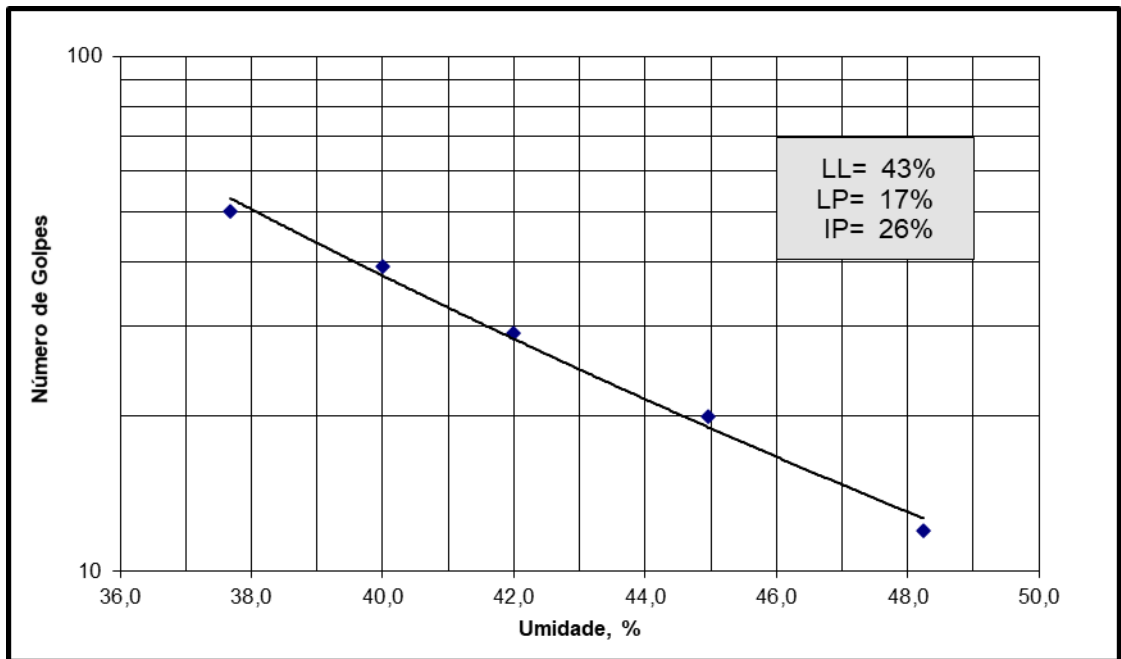


Figura 4.1 - Limite de Liquidez pelo método de Casagrande.

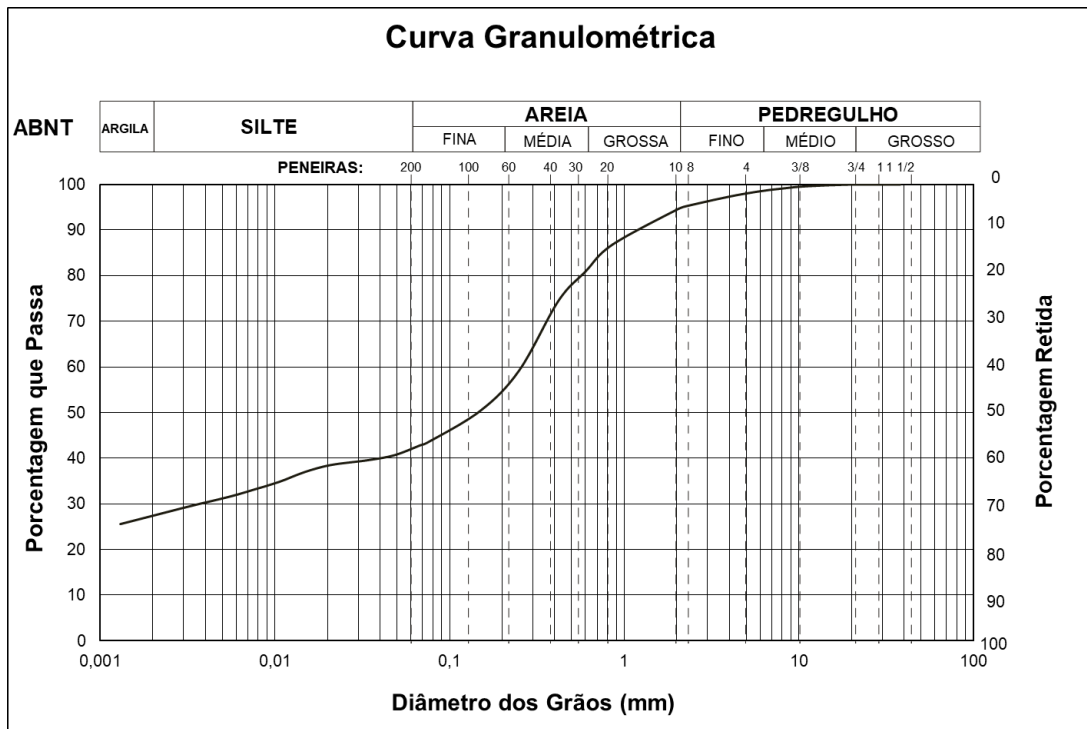


Figura 4.2 - Curva Granulométrica do solo.

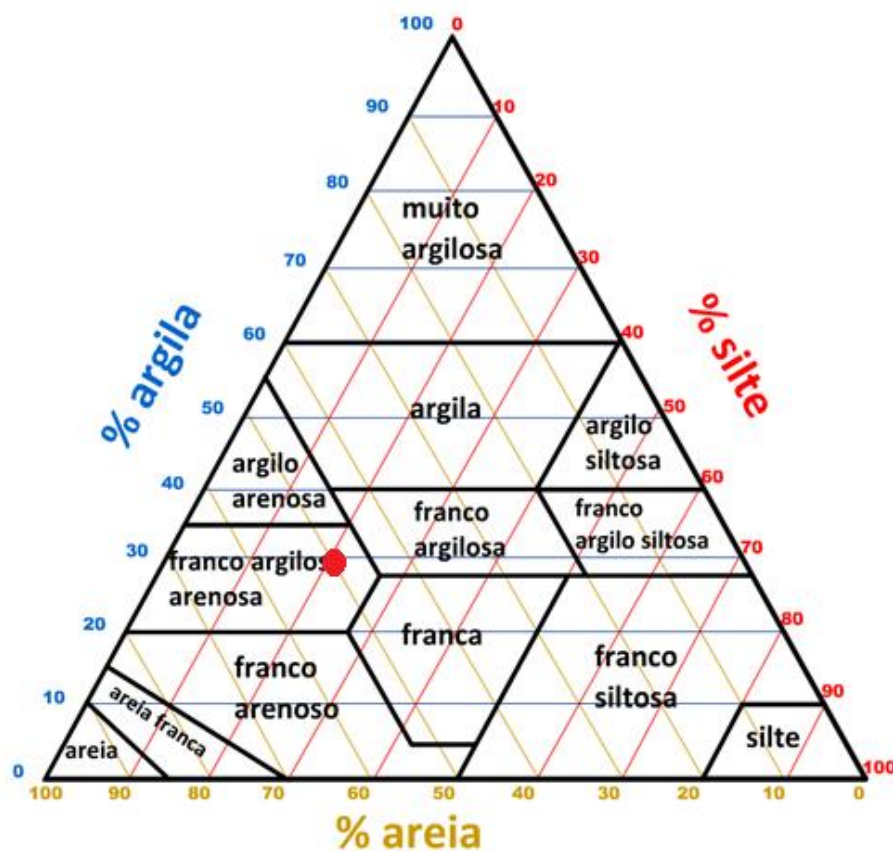


Figura 4.3 - Textura do solo pelo triângulo de classe textural.

Através da análise dos resultados obtidos pelos ensaios caracterização, é possível classificar o solo ensaiado como sendo um solo franco argiloso arenoso. Os ensaios de caracterização é importante pois para cada tipo de solo existente, existe um modelo de curva característica mais adequado a sua classificação. Os resultados de 43% de limite de liquidez (LL), 17% de limite de plasticidade (LP) e 26% de índice de plasticidade (IP) condizem com um solo de textura média com um teor médio de argila de 27%.

4.2 Ensaio do Papel Filtro

Os resultados do primeiro ensaio do papel filtro do solo estão apresentados na Tabela 4-2. Os resultados do segundo ensaio do papel filtro do solo estão apresentados na Tabela 4-3. Os parâmetros de Van Genuchten (1980) utilizados para a obtenção das curvas características foram obtidos pelo programa SWRC® Fit e estão apresentados na Tabela 4-4 e Tabela 4-5, referente ao primeiro e segundo ensaio

respectivamente. As curvas características do solo do IEN obtidas através do primeiro e segundo ensaio do papel filtro estão apresentadas na Figura 4.4.

Tabela 4-2 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do primeiro ensaio do papel filtro.

Amostra	Ψ		θ	
	kPa	cm H2O	cm ³ /cm ³	%
C13	15	153,0	0,340	34,0
C9	7,2	73,2	0,391	39,1
C12	803	8188	0,182	18,2
C5	4,7	47,9	0,433	43,3
C14	7,3	74,3	0,307	30,7
C15	14	143,8	0,252	25,2

Tabela 4-3 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do segundo ensaio do papel filtro.

Amostra	Ψ		θ	
	kPa	cm H2O	cm ³ /cm ³	%
14	51,3	523	0,298	29,8
25	57,3	585	0,214	21,4
C16	4735	48283	0,098	9,8
C2	162	1653	0,249	24,9
C20	2,8	28	0,528	52,8

Tabela 4-4 -Parâmetros de VAN GENUCHTEN utilizados para obtenção da curva característica referente ao primeiro ensaio papel filtro.

Parâmetros de Ajuste da Curva por van Genuchten						
θ_s	θ_r	θ	Θ	α	n	m
0,45425	0,13791	0,260	0,386	0,02088	1,4596	0,31

Nota: Coeficiente de regressão linear – R² = 0,7416

Tabela 4-5 - Parâmetros de VAN GENUCHTEN utilizados para obtenção da curva característica referente ao segundo ensaio papel filtro.

Parâmetros de Ajuste da Curva por van Genuchten						
θ_s	θ_r	θ	Θ	α	n	m
0,57652	0,00001	0,260	0,451	0,03571	1,2359	0,19

Nota: Coeficiente de regressão linear – R² = 0,9411

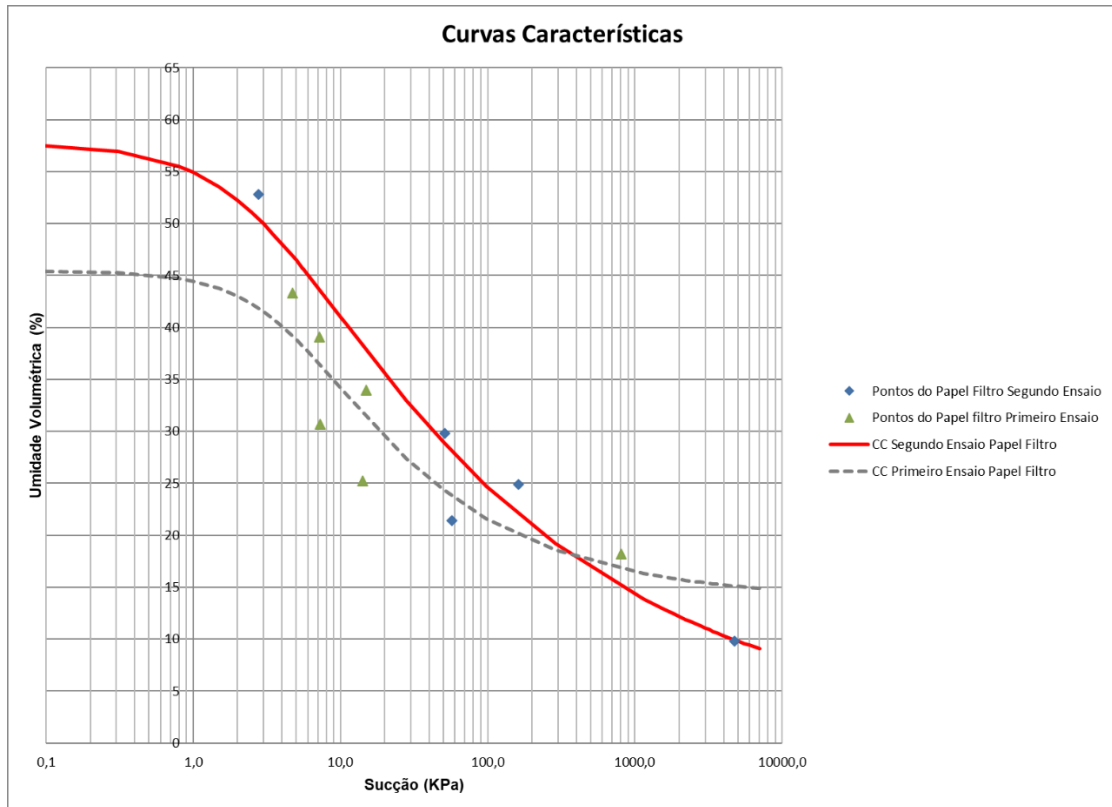


Figura 4.4 - Curvas características do solo pelo ensaio de papel filtro.

4.3 Discussões do Ensaio de Papel Filtro

Pode-se observar que o primeiro ensaio, onde foram utilizados apenas dois papéis filtro, apresentam alguns pontos que não possuem resultados confiáveis, devido ao papel filtro ter se deteriorado, ficando difícil realizar o procedimento de pesagem da maneira correta. Ficou evidente que o procedimento estabelecido pela ASTM D5298 (2003) deve ser seguido sem quaisquer alterações, e que o ensaio se não seguido da maneira correta pode apresentar resultados errôneos sobre o comportamento do solo. No segundo ensaio foi seguido estritamente as normas ASTM D5298 (2003), e foi possível obter resultados mais próximos da realidade do comportamento do solo através da análise da curva característica, confirmando a confiabilidade do ensaio e de seus resultados, muito embora necessite de aproximadamente 24 dias para obtenção dos resultados. Outro ponto positivo a se considerar referente a esse método de ensaio, é referente ao baixo custo necessário para a realização do mesmo.

4.4 Ensaio de Evaporação pelo Analisador HYPROP®

Dentre os noventa e nove pontos obtidos pelo ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® foram selecionados alguns pontos de acordo com a Tabela 4-6. Os parâmetros de van Genuchten (1980) utilizados para a obtenção da curva característica foram obtidos pelo programa SWRC Fit e estão apresentados na Tabela 4-7. A curva característica do solo não saturado do IEN obtida através do método de evaporação pelo analisador HYPROP® está apresentada na Figura 4.5.

Tabela 4-6 -Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP.

Evaporação pelo analisador Hyprop			
Ψ		θ	
kPa	cm H ₂ O	cm ³ /cm ³	%
0,31	3,16	0,507	50,7
0,80	8,16	0,467	46,7
1,21	12,34	0,434	43,4
1,51	15,40	0,420	42
2,07	21,11	0,397	39,7
4,21	42,93	0,346	34,6
5,35	54,55	0,332	33,2
6,85	69,85	0,321	32,1
9,25	94,32	0,309	30,9
10,81	110,27	0,304	30,36
12,56	128,08	0,299	29,88
14,45	147,39	0,295	29,47
16,67	170,01	0,291	29,06
19,36	197,46	0,286	28,62
22,80	232,53	0,282	28,17
27,48	280,20	0,277	27,7
33,73	343,93	0,272	27,23
41,30	421,18	0,268	26,81
49,77	507,54	0,265	26,45
59,98	611,61	0,261	26,05
70,96	723,56	0,256	25,60

Tabela 4-7 - Parâmetros de VAN GENUCHTEN utilizados para obtenção da curva característica do ensaio de evaporação pelo software SWRC.

Parâmetros de Ajuste da Curva por van Genuchten						
θ_s	θ_r	θ	Θ	α	n	m
0,52836	0,2364	0,260	0,081	0,1210	1,5661	0,36

Nota: Coeficiente de regressão linear – R² = 0,9995

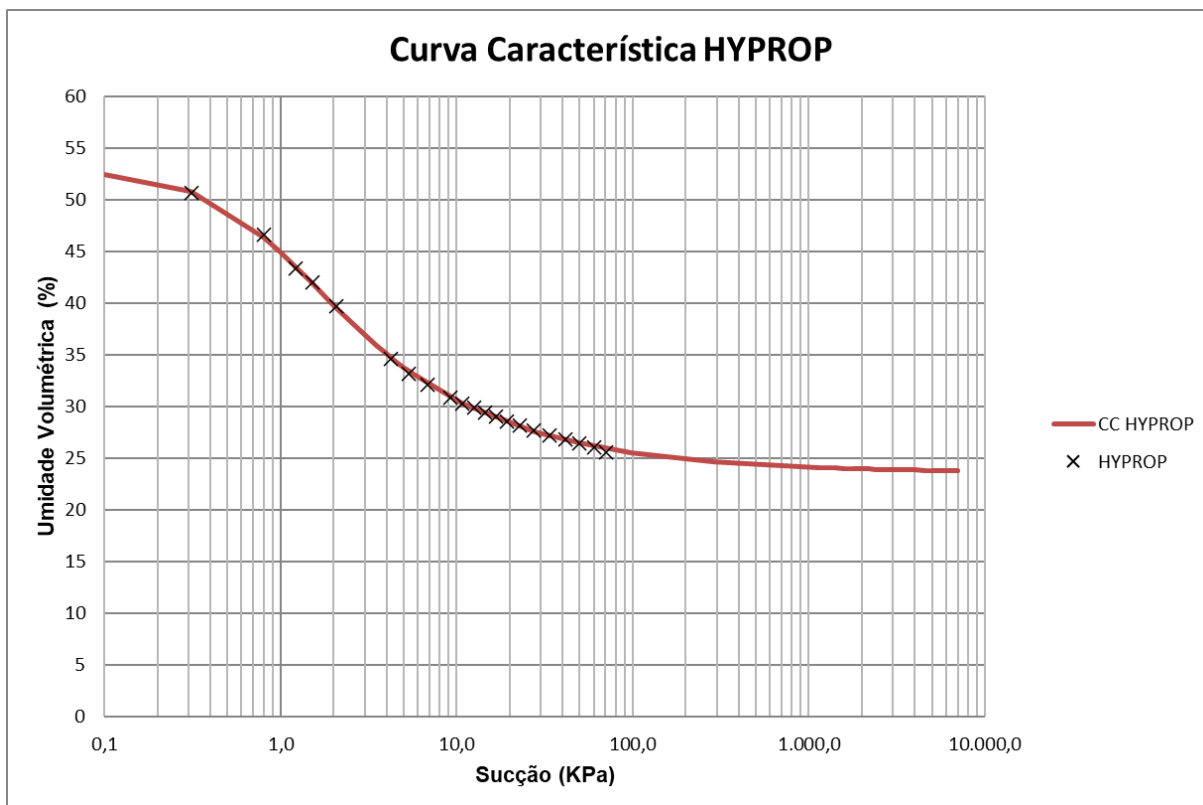


Figura 4.5 - Curva característica do solo pelo ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP®.

4.5 Discussões do Ensaio de Evaporação pelo analisador HYPROP®

Pôde-se observar que o ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® apresentou valores confiáveis para valores de sucção de até 100 kPa. Observou-se, também, a rapidez na obtenção dos resultados, onde foram necessários em torno de sete dias para a obtenção dos mesmos. O equipamento possui elevado custo de aquisição, o que faz com que o ensaio não se torne acessível se comparado aos outros métodos e possui difícil manuseio. Entretanto, apesar de apresentar bons resultados, possui um limitador referente a faixa ótima do equipamento, de 100 kPa, o que pode ser considerado um valor muito baixo se comparado aos outros métodos de ensaio. Além disso, é importante ressaltar que a curva característica para valores acima de 100 kPa é uma estimativa dos possíveis valores que seriam obtidos em condições não saturada em campo, tornando a curva característica para valores entre 100 kPa a 10.000 kPa não tão confiáveis quanto os outros métodos.

Este método de ensaio pode ser considerado um ótimo método ensaio quando para obtenção de valores referentes a baixa sucção, apresentando altos níveis de confiabilidade, uma vez que apresenta também uma análise estatística entre os

valores medidos e os da curva de ajuste, estimada a partir dos dados medidos. Esta análise estatística se dá pelo RMSE (erro quadrático médio) e rapidez em seus resultados. Além disso, a determinação mais precisa do conteúdo de água saturado, que é importante, uma vez que os pequenos erros nessas condições podem gerar erros maiores nos ajustes.

O ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® pode ser indicado por apresentar resultados para a curva característica mais próxima a saturação em menos tempo com maior confiabilidade, apesar do elevado custo de aquisição do equipamento. E apresentar resultados ainda melhores com a adição de pontos de sucção complementares realizados por outros métodos, como o WP4 e até mesmo a câmara de Richards.

4.6 Comparativo e Análise da Curva Característica através do ensaio de Papel Filtro e do Ensaio de Evaporação pelo Analisador HYPROP®

A Figura 4.6 representa a curva característica para os ensaios de evaporação pelo analisador HYPROP® e pelo ensaio de papel filtro.

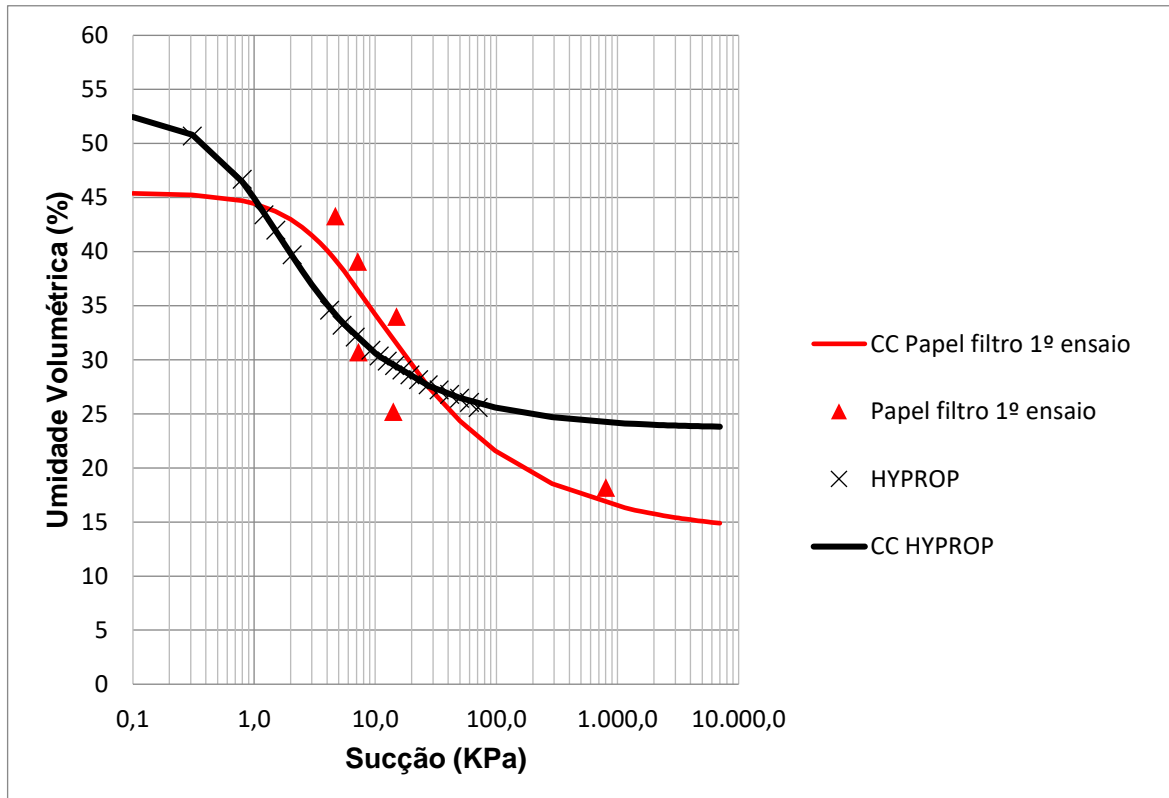


Figura 4.6 - Curvas características do solo pelo ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP e pelo ensaio de papel filtro e representação de sua histerese.

Através do comparativo realizado entre as curvas características obtidas pelo ensaio de papel filtro e ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP®, é possível verificar que os dados obtidos até 100 kPa, são condizentes, o que faz com que os resultados obtidos pelos dois métodos até 100 kPa possuam um elevado valor de confiabilidade. Entretanto, como o ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP teve um limite máximo de 100 kPa neste ensaio, os valores obtidos para sua curva característica após esse valor se tornam estimado, fazendo com que a análise comparativa entre os métodos acima de 100 kPa se torne diferente do esperado.

Dito isto, uma possível solução para se obter a curva característica com elevada confiabilidade para todos os seus valores, seria utilizar os dois métodos em conjunto, de forma a analisar o solo não saturado pelo método de ensaio evaporação pelo analisador HYPROP® para valores de sucção até 100 a 200 kPa, e realizar o ensaio de papel filtro para valores acima de 200 kPa até 7.000 kPa.

Podemos notar o efeito da histerese para valores acima de 100 kPa na Figura 4.6 e para um mesmo valor de sucção matricial, o teor de umidade será diferente em um solo em processo de saturação do que em relação à secagem. A presença de bolhas de ar oclusas são as causas principais da histerese.

4.7 Ensaio da Câmara de Richards

Os resultados do ensaio da câmara de Richards estão apresentados na Tabela 4-8 até a Tabela 4-11, de acordo com a referente amostra. Os parâmetros de Van Genuchten (1980) utilizados para a obtenção das curvas características foram obtidos pelo programa SWRC® Fit e estão apresentados na Tabela 4-12. As curvas características do solo do IEN obtidas para o ensaio da câmara de Richards estão apresentadas na Figura 4.7. As curvas características do solo do IEN obtidas para o ensaio da câmara de Richards pelo programa SWRC® Fit estão apresentadas na Figura 4.8.

Tabela 4-8 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 14.

Amostra	Ψ		θ	
	kPa	cm H ₂ O	cm ³ /cm ³	%
14	10	101,97	0,28337	28,34
14	20	203,94	0,26777	26,78
14	30	305,91	0,26244	26,24
14	40	407,88	0,25444	25,44
14	60	611,82	0,24803	24,80
14	80	815,76	0,24408	24,41
14	100	1019,70	0,23697	23,70
14	1000	10197,00	0,22028	22,03
14	0,3	3,06	0,40324	40,32

Tabela 4-9 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 13.

Amostra	Ψ		θ	
	kPa	cm H ₂ O	cm ³ /cm ³	%
13	10	101,97	0,29120	29,12
13	20	203,94	0,27325	27,32
13	30	305,91	0,26713	26,71
13	40	407,88	0,25850	25,85
13	60	611,82	0,24947	24,95
13	80	815,76	0,24265	24,27
13	100	1019,70	0,23573	23,57
13	1000	10197,00	0,18909	18,91
13	0,3	3,06	0,44849	44,85

Tabela 4-10 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 19.

Amostra	Ψ		θ	
	kPa	cm H ₂ O	cm ³ /cm ³	%
19	10	101,97	0,32349	32,35
19	20	203,94	0,30422	30,42
19	30	305,91	0,29643	29,64
19	40	407,88	0,28875	28,87
19	60	611,82	0,27880	27,88
19	80	815,76	0,27286	27,29
19	100	1019,7	0,26579	26,58
19	1000	10197,00	0,23145	23,14
19	0,3	3,06	0,41103	41,10

Tabela 4-11 - Dados de Sucção (Ψ) vs umidade volumétrica (θ) do ensaio da câmara de Richards para a amostra 25.

Amostra	Ψ		θ	
	kPa	cm H ₂ O	cm ³ /cm ³	%
25	10	101,97	0,29715	29,72
25	20	203,94	0,27882	27,88
25	30	305,91	0,27196	27,20
25	40	407,88	0,26449	26,45
25	60	611,82	0,25722	25,72
25	80	815,76	0,25220	25,22
25	100	1019,70	0,24677	24,68
25	1000	10197,00	0,21350	21,35
25	0,3	3,06	0,47696	47,70

Tabela 4-12 - Parâmetros de Van Genuchten utilizados para obtenção da curva característica do ensaio da câmara de Richards.

Parâmetros de Ajuste da Curva por van Genuchten						
θ_s	θ_r	θ	Θ	α	n	m
0,49173	0,17998	0,260	0,257	0,3266	1,266	0,21

Nota: Coeficiente de regressão linear – R² = 0,8801

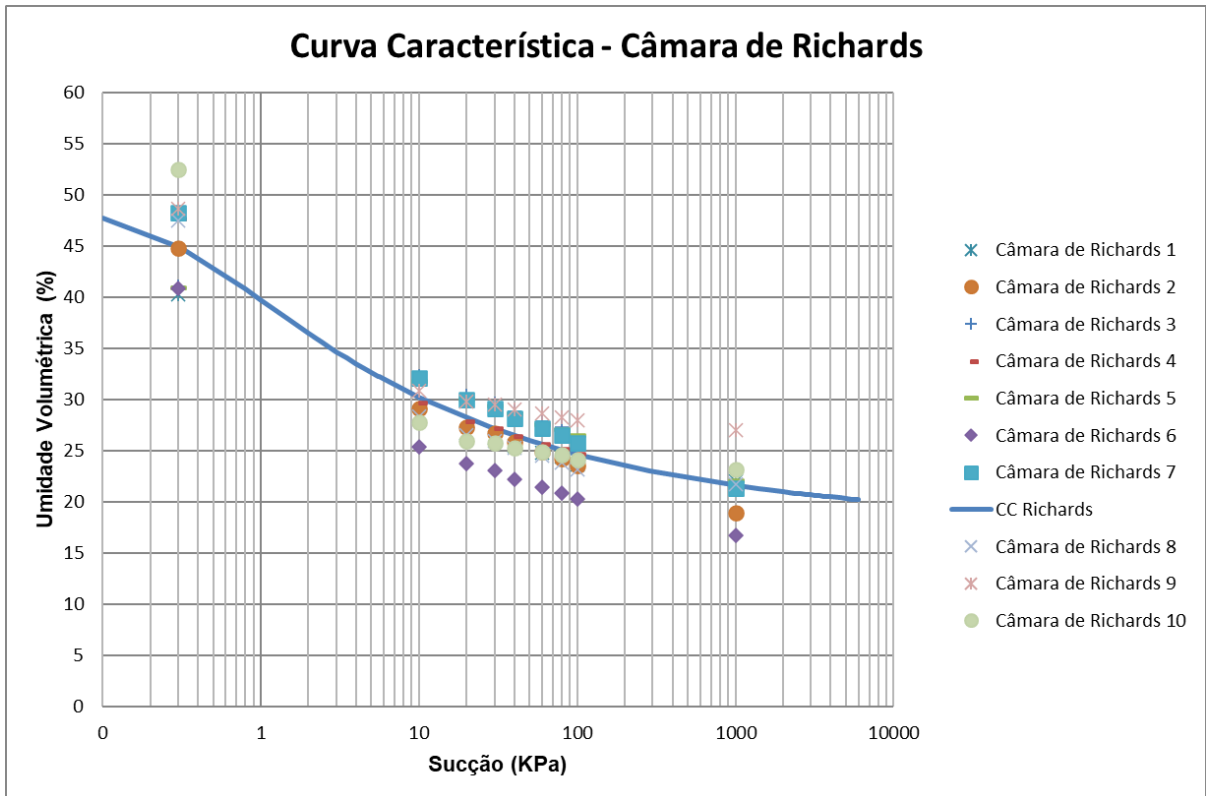


Figura 4.7 - Parâmetros de Van Genuchten utilizados para obtenção da curva característica do ensaio da câmara de Richards.

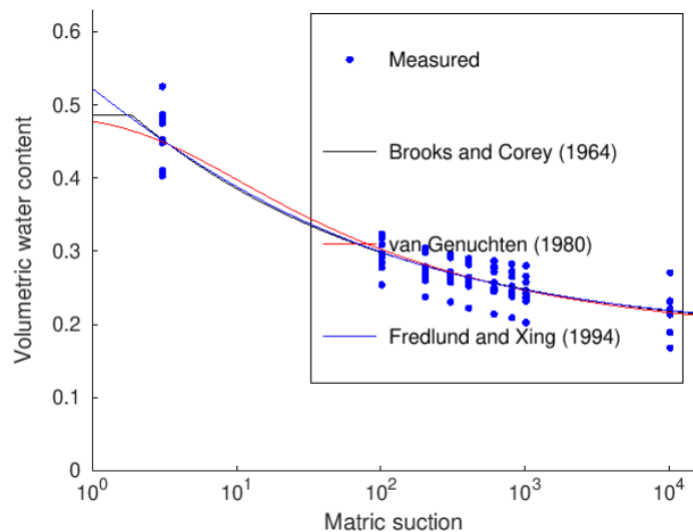


Figura 4.8 - Curva característica do solo pelo ensaio da câmara de Richards pelo software SWRC FIT®.

4.8 Discussões do Ensaio da Câmara de Richards.

Observou-se que o ensaio da câmara de Richards apresentou valores confiáveis e satisfatórios sobre o comportamento do solo analisado, necessitando de poucos cuidados para a realização do ensaio. E embora a câmara de Richards tenha apresentado os melhores resultados se comparado aos outros métodos de ensaio realizados pelo presente trabalho, o equipamento possui limitações como o demorado tempo de espera para obtenção dos resultados, além do alto valor de investimento necessário para obtenção do equipamento, muito embora seja menor que o investimento necessário para obtenção do equipamento HYPROP®.

Apesar do longo tempo de espera para obtenção dos resultados, notou-se que é possível obter curvas características para cada amostra ensaiada, além de ser possível realizar o ensaio para diferentes tipos de solo ao mesmo tempo. Por isso, para analisar o melhor método de ensaio para obtenção da curva característica, é necessário analisar todas as variáveis existentes e considerar a melhor opção, considerando o tempo e o custo de aquisição do equipamento.

4.9 Comparativo e Análise das Curvas Características Obtidas Pelo Ensaio do Papel Filtro, da Câmara de Richards e do Ensaio de Evaporação pelo Analisador HYPROP®.

A Figura 4.9 representa o comparativo entre os métodos de ensaio do papel filtro, da câmara de Richards e do ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP®, onde é possível identificar os pontos obtidos pelos ensaios. A Figura 4.10 representa a curva característica dos ensaios do papel filtro, da câmara de Richards e ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® através do software SWRC® Fit.

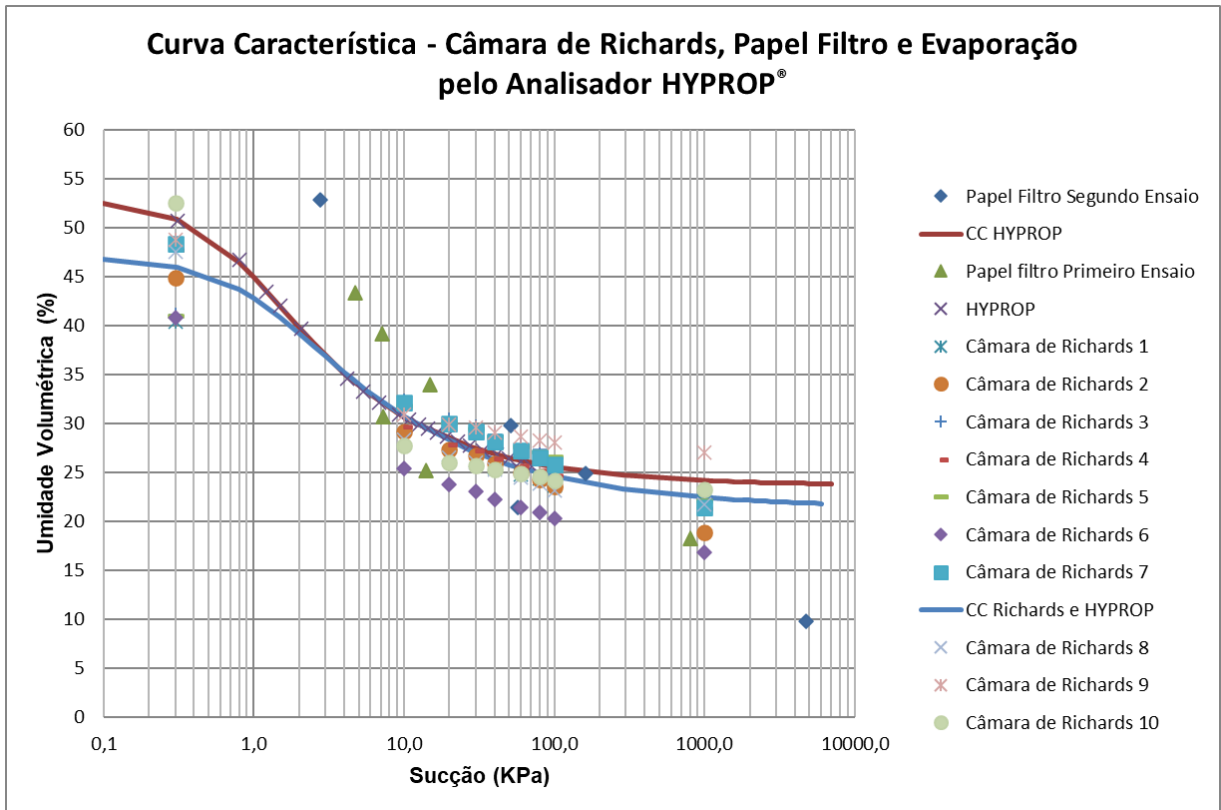


Figura 4.9 - Curvas características do solo pelo ensaio do papel filtro, ensaio da câmara de Richards, ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® e pelo ensaio de papel filtro.

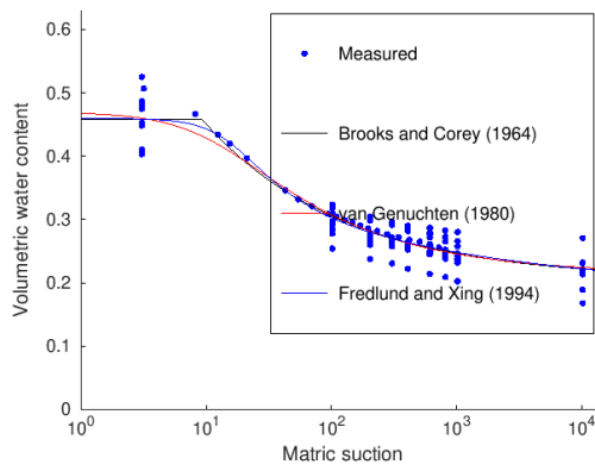


Figura 4.10 - Curva característica do solo pelo ensaio do papel filtro, ensaio da câmara de Richards e ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® gerado pelo programa SWRC® Fit.

Através do comparativo realizado entre as curvas características obtidas pelo ensaio da câmara de Richards e ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP®, é possível verificar que os dados obtidos são muito próximos, definindo ainda mais que os resultados obtidos através dos ensaios possuem precisão. Embora o ensaio e

evaporação pelo analisador HYPROP® só chegue até 100 kPa neste ensaio, sua curva ajustada possui valores próximos a curva característica do ensaio da câmara de Richards, e mesmo para valores acima de 100 kPa suas curvas possuem uma diferença relativamente baixa quanto aos valores medidos e ajustados. É importante ressaltar a confiabilidade do método de evaporação pelo analisador HYPROP®, pois o método necessitou de aproximadamente 7 dias para obtenção dos resultados, enquanto o ensaio da câmara de Richards necessitou de 3 meses.

A finalidade o qual o ensaio é proposto, é decisório na escolha do método mais adequado para obtenção da curva característica, e por isso não é possível escolher um único método a ser aplicado.

4.10 Análise da Estrutura do Solo

A estrutura do solo determina a geometria dos poros, que influencia na permeabilidade e na retenção de água. A diferença entre as curvas de retenção, tanto dos dados medidos quanto dos ajustes pela equação analítica, encontra-se tanto na parte mais próxima da saturação que está associada aos macroporos, ou seja, estrutura e textura do solo, quanto na parte da curva da zona de transição para frente, (relacionada aos microporos). E como as amostras foram retiradas do mesmo talude, possuem uma estrutura do solo semelhantes. Quanto maior a retenção de água de um solo mais suave é a queda da curva característica. Através da análise comparativa entre as diferentes curvas características dos solos e a curva característica obtida através do ensaio da câmara de Richards e ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® é possível verificar que o solo analisado de textura franco argiloso arenoso é similar ao tipo de solo franco argiloso, obtendo uma curva próxima a realidade desse tipo de solo (**Figura 4.11**).

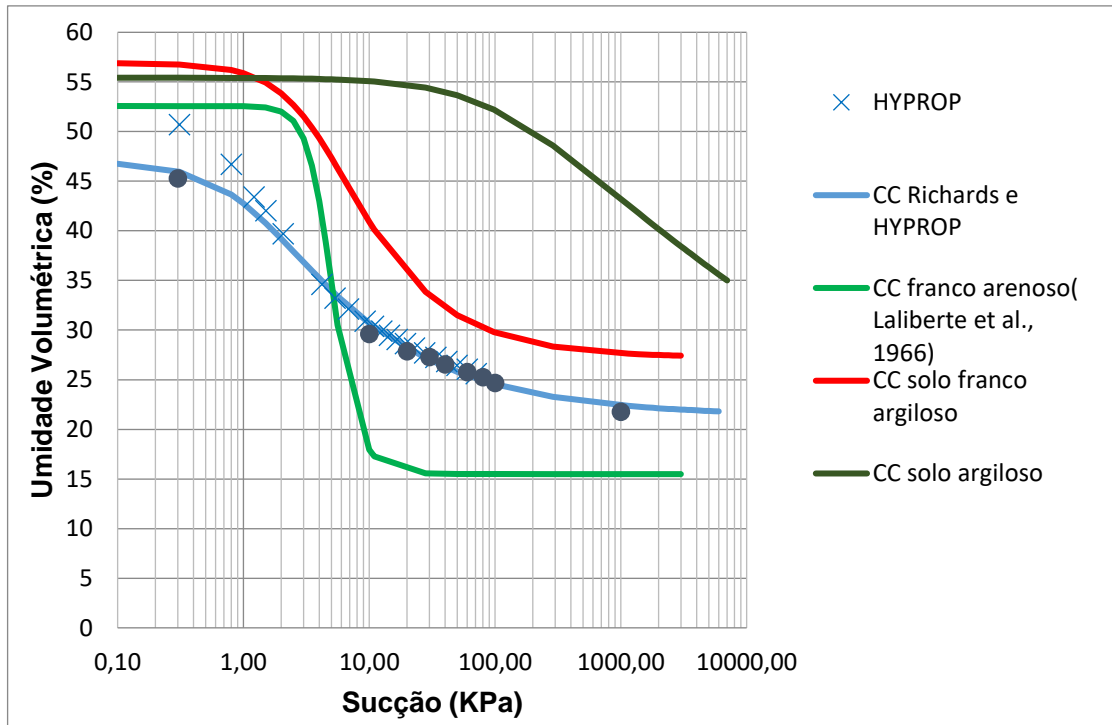


Figura 4.11 – Relação entre as curvas características do solo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Os resultados apresentados no presente trabalho foram capazes de demonstrar a eficiência dos métodos de ensaio aplicados para determinação da curva característica. Os ensaios de evaporação pelo analisador HYPROP®, câmara de Richards e papel filtro demonstraram concordância nos resultados obtidos e em suas curvas características. A câmara de Richards é considerada o principal método de ensaio utilizado por engenheiros agrícolas, e apresentou resultados coerentes com a realidade do comportamento do solo, podendo ser realizado com diferentes tipos de solo ao mesmo tempo, e embora necessite de um longo tempo de espera para obtenção dos resultados e elevado custo de aquisição do equipamento, não necessita de muitos cuidados, facilitando a realização do ensaio. O ensaio de papel filtro apresentou resultados satisfatórios quando realizado seguindo estritamente a norma ASTM D5298 (2003), entretanto, qualquer variável na execução do ensaio pode comprometer o resultado, necessitando atenção na execução por parte do operador, além disso possui baixo custo de aquisição e realização, apesar de necessitar aproximadamente um mês para obtenção dos resultados, alcançando altos valores de sucção. O ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® apresentou valores confiáveis e condizentes com a realidade do comportamento do solo ensaiado, e necessita de pouco tempo de espera para obtenção dos resultados, onde foram necessários aproximadamente sete dias. Entretanto, apesar da confiabilidade e rapidez, o equipamento possui elevado custo de aquisição, além do limitador da faixa ótima de 100 kPa.

Por isso, concluiu-se que o ensaio de papel filtro junto ao ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® é uma boa opção para determinação da curva característica, pois exigem um tempo de retorno relativamente baixo, principalmente se comparado ao ensaio da câmara de Richards. O ensaio de evaporação pelo analisador HYPROP® possui um limitador em sua análise de sucção, pois só é capaz de obter resultados até 100 a 200 kPa enquanto o papel filtro é capaz de analisar valores de sucção maiores e por isso realizar os ensaios em conjunto pode ser uma ótima maneira de verificar os resultados e determinar uma curva característica coerente com a realidade do comportamento do solo.

5.2 Sugestões Para Pesquisas Futuras

Aprofundar os estudos dos métodos de ensaio para obtenção da curva característica obtendo novos comparativos entre diferentes métodos de ensaio.

Estudar e/ou desenvolver sistemas de contenção sustentáveis de barragens utilizando a curva característica do solo para leitura do comportamento do solo.

Utilizar o método da mini-centrífuga para obtenção da curva característica.

Estudar e/ou desenvolver o modelo de curva característica mais adequado para o tipo de solo franco argiloso arenoso.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT NBR 6457, 2016 – Amostras de Solo – **Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6459, 1984, **Determinação do Limite de Liquidez**, Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro.

ABNT NBR 7180, 1984, **Determinação do Limite de Plasticidade**, Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro.

ABNT NBR 7181, 2016 – Solo – **Análise Granulométrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro.

ASTM D5298, 2003, **“Standard Test method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper”**. West Conshohocken, USA.

BISHOP, A.W., ELDIN, A.K.G., 1950, **“Undrained Triaxial Tests on Saturated Sands and Their Significance in the General Theory of Shear Strength.”** Geotechnique. Vol. 2, pp. 13-32.

CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G., 1992. **"A Low Cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low-Rise Buildings"**. Proceedings of the Institute of Civil Engineering, n.2, pp. 82-89.

DIENE, A. A.; MAHLER, C. F., 2007. **Um instrumento para medida de potencial matricial nos solos sem ocorrência de cavitação**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 31, p. 1261-1270.

FREDLUND, D. G., 1979. **Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate Concepts and Tecnology for Unsaturated Soils**. Canadian Geotechnical Journal 16(1), p. 121-139.

FREDLUND, D. G., XING, A., 1994. **Equations for Soil-Water Characteristic Curve.** Canadian Geotechnical Journal, v. 33. p. 379-392.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H., 1993, **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.** New York: John Wiley & Sons, 517 pp.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R., 1977. **Stress state variable for unsaturated soils.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol 103, GT5, p. 447 – 466.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R.; WIDGER, R.A., 1978. **The Shear Strength for Unsaturated Soils.** Canadian Geotechnical Journal, 15, p. 313-312.

GERSCOVICH, D.M.S., 2001. **Equações para modelagem da curva característica aplicada a solos brasileiros.** In: 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT01, Porto Alegre, Anais... v. 1, p. 76-92.

KOOREVAAR, P., MENELIK, G., DIRKSEN, C., 1983. **Elements of Soil Physics.** Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 228 pp.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V., 1969. **Soil Mechanics.** New York: John Wiley and Sons, 547 pp.

LAUGHTON, A.S., 1955, “**The Compaction of Ocean Sediments,**” Ph.D. dissertation, Univ. of Cambridge, Cambridge, England.

LEE, H. C., WRAY, W. K., 1995. **Techniques to Evaluate Soil Suction – A Vital Unsaturated Soil Water Variable.** Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soil, v. 2. Paris, France. Balkema. p. 615-622.

MARINHO, F.A.M., 1994. **Shrinkage behaviour of some plastic soils.** PhD thesis – Imperial College, University of London.

MARINHO, F.A.M., 1997. **Medição de sucção em solos.** In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT97, Rio de Janeiro, Anais... p. 373-397, 21-25 abr. 1997.

NACINOVIC, M. G. G., 2009. **Estudo de Erosão pela Análise de Sucção e Escoamento Superficial na Bacia do Córrego Sujo (Teresópolis, RJ).** Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLSON, R.E., LANGFELDER, L.J., 1965. **“Pore-Water Pressures in Unsaturated Soils,”** J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Eng., vol. 91, SM4, pp. 127-160.

RENDULIC, L., 1936. **“Relation Between Void Ratio and Effective Principal Stresses for a Remoulded Silty Clay,”** in Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. (Cambridge, MA), vol. 3, pp. 48-51.

RIDLEY, A.M.; BURLAND, J.B., 1995. **Measurement of suction in materials which swell.** Mechanics of Swelling. Appl Mech Ver, Edited by Theodoros K. Koralis, v. 48, n.10, p. 727-732.

SCHINDLER, U., DURNER, W., VON UNOLD, G., MÜLLER, L. 2010. **Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range.** Soil Science Society of America Journal, 74, 1071 – 1083.

SILVA, A. M., 2005. **Banco de Dados de Curvas de Retenção de Água de Solos Brasileiros.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SKEMPTON, A.W., 1961. **“Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks,”** in Proc. Conf. Pore Pressure. London: Butter-worths, p. 4-16.

TERZAGHI, K., 1936. **The Shear Resistance of Saturated Soils.** Proc. 1st Int. Conf. Soil. Mech. Found. Eng. Vol. 1, pp. 54-56.

VAN GENUCHTEN, M. Th., 1980. **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.** Soil Science Society of American Journal. v.44, pp. 892-898.

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