

ESTUDO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS
NÃO SATURADOS ATRAVÉS DE AMOSTRAS CENTRIFUGADAS

LEANDRO REZENDE CORTEZE FREITAS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

NOVEMBRO – 2024

ESTUDO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS
NÃO SATURADOS ATRAVÉS DE AMOSTRAS CENTRIFUGADAS

LEANDRO REZENDE CORTEZE FREITAS

“Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

ORIENTADOR: RODRIGO MARTINS REIS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

NOVEMBRO – 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

F866

Freitas, Leandro Rezende Corteze.

ESTUDO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUÇÃO DE SOLOS NÃO SATURADOS ATRAVÉS DE AMOSTRAS CENTRIFUGADAS / Leandro Rezende Corteze Freitas. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

104 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2024.

Orientador: Rodrigo Martins Reis.

1. Solos não saturados. 2. Curva característica de sucção de solos. 3. Método centrífugo. 4. Sucção. 5. Duplo van Genuchten. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

ESTUDO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS NÃO SATURADOS ATRAVÉS DE AMOSTRAS CENTRIFUGADAS

LEANDRO REZENDE CORTEZE FREITAS

“Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Aprovado em 28 de novembro de 2024.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente



ROGER AUGUSTO RODRIGUES
Data: 28/11/2024 15:25:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Roger Augusto Rodrigues (D.Sc. – FEB/UNESP)

Documento assinado digitalmente



CLAUDIO ROBERTO MARCIANO
Data: 28/11/2024 19:09:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Claudio Roberto Marciano (D.Sc. – UENF)

Documento assinado digitalmente



SERGIO TIBANA
Data: 29/11/2024 09:44:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Sérgio Tibana (D.Sc. – UENF)

Documento assinado digitalmente



RODRIGO MARTINS REIS
Data: 28/11/2024 13:38:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Rodrigo Martins Reis (Orientador, D.Sc. – UENF)

“À Deus e Minha Família”

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente a Deus por todas as bênçãos e oportunidades durante a jornada acadêmica, pela força em momentos desafiadores onde a fé se mostrou um poderoso recurso de suporte.

Aos meus pais, Ivone e Sérgio, expresso minha gratidão pelo apoio constante, que desde a minha infância se tornou crucial para a minha formação educacional. A minha gratidão perpétua a vocês por todo o esforço realizado em todos os momentos para que os meus sonhos se concretizassem.

À minha irmã Lívia por todo o suporte e apoio, sempre me guiando e auxiliando com conselhos e compartilhando experiências vividas.

À minha namorada Yara pelo companheirismo durante a elaboração deste projeto e pelo suporte e compreensão nos momentos de adversidade.

Ao meu orientador Rodrigo pelos conhecimentos compartilhados e por todas as horas dedicadas ao desenvolvimento deste trabalho, demonstrando sempre muita solicitude e disponibilidade.

A todos outros docentes da UENF com quem tive a chance de aprender e trabalhar, seja no LECIV ou em outros laboratórios, cada um teve um papel crucial para elaboração deste trabalho e ampliação de meus conhecimentos.

Aos técnicos de laboratórios, que nunca mediram esforços para me ajudar nos ensaios e avaliações, passando ensinamentos e apoio.

A todos os amigos que estiveram presentes neste processo, especialmente aos da minha turma de pós-graduação na UENF, com quem passei uma parte significativa do meu período de mestrado, tanto nos momentos de felicidade quanto nos de adversidade.

Por fim, agradeço a UENF – FAPERJ, pelo suporte indispensável à conclusão desta pesquisa.

RESUMO

A curva característica de sucção de solos (CCSS), ou curva de retenção de água no solo (CRAS), é essencial no estudo de solos não saturados, fazendo a relação entre o teor de água e a tensão de sucção no solo. Ela descreve a distribuição de água nos poros do solo sob diferentes níveis de umidade, influenciando sua a resistência e deformabilidade, fatores essenciais para a estabilidade e dimensionamento de obras geotécnicas, uma vez que a presença de água nos poros do solo afeta o comportamento mecânico e hidráulico do material. A sua determinação experimental é, geralmente, demorada e onerosa, fazendo com que profissionais recorram a simplificações que podem comprometer os projetos. Neste sentido, desenvolveu-se neste trabalho um procedimento de determinação da CCSS utilizando uma centrífuga de bancada comercialmente disponível aplicando rotações entre 300 e 3500 rpm de velocidade angular, sendo estudados dois solos em dois estados distintos (remoldado e indeformado). As amostras trabalhadas foram centrifugadas nas alturas de 20 mm (com e sem discos cerâmicos de alto fluxo) e de 50 mm (sem discos cerâmico). Assim, propõe-se a obtenção de curvas características de sucção por meio do método centrífugo, com alguns pontos adicionais obtidos através da técnica do papel filtro para altas pressões de sucção e com amostra seca ao ar livre. O ponto final da curva é determinado pelo ponto de referência do solo para o na condição seca, com uma pressão de sucção de 10^6 kPa e umidade de zero por cento. A utilização de métodos convencionais, como o funil de placa porosa, a câmara de pressão de Richards e o papel filtro, que são bem mais demorados e complexos, foi feita de maneira comparativa. Foi empregado o modelo duplo van Genuchten para ajuste das curvas características. Os resultados obtidos mostraram que foi possível determinar a CCSS completa, de forma rápida e eficiente, de todos os solos estudados através do método centrífugo, com amostras de 20 mm e 50 mm concomitantemente, fazendo-se uso do papel filtro para obtenção de pontos altas sucções e do ponto de referência. A metodologia mostrou excelente concordância com as técnicas tradicionais utilizadas.

PALAVRAS-CHAVE: solos não saturados, curva característica de sucção de solos, método centrífugo, sucção, duplo van Genuchten.

ABSTRACT

The soil suction characteristic curve (SSCC), or soil water retention curve (SWRC), is essential in the study of unsaturated soils, establishing the relationship between moisture content and soil suction stress. It describes the distribution of water in soil pores under different moisture levels, influencing soil strength and deformability, essential factors for the stability and design of geotechnical works, since the presence of water in soil pores affects the mechanical and hydraulic behavior of the material. Its experimental determination is generally time-consuming and expensive, causing professionals to resort to simplifications that can compromise projects. In this sense, a procedure for determining SWRC was developed in this work using a commercially available benchtop centrifuge applying rotations between 300 and 3500 rpm of angular speed. Two soils were studied in two different states (remolded and undeformed). The samples were centrifuged to a thickness of 20 mm (with and without high-flow ceramic discs) and 50 mm (without ceramic discs). Thus, it is proposed to obtain suction characteristic curves by means of the centrifugal method, with some additional points obtained through the filter paper technique for high suction pressures and with the sample dried in the open air. The end point of the curve is determined by the soil reference point for dry soil, with a suction pressure of 10^6 kPa and zero percent humidity. The use of conventional methods, such as the porous plate funnel, the Richards suction chamber and filter paper, which are much more time-consuming and complex, was done in a comparative manner. The double van Genuchten model was used to fit the characteristic curve. The results obtained showed that it was possible to determine the complete CCSS, quickly and efficiently, of all the soils studied through the centrifugal method, with samples of 20 mm and 50 mm simultaneously, using filter paper to obtain high suction points and the reference point. The methodology showed excellent agreement with the traditional techniques used.

KEYWORDS: unsaturated soils, soil suction characteristic curve, centrifugal method, suction, double van Genuchten.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS	4
2.1.1 PROBLEMAS ENVOLVENDO SOLOS NÃO SATURADOS	6
2.1.1.1 PROBLEMAS RELACIONADOS À VARIAÇÃO DE SUCÇÃO.....	6
2.1.1.2 PROBLEMAS DE INSTABILIDADE E EROSÃO.....	6
2.1.1.3 PROBLEMAS DE DESMORONAMENTO E RECALQUE.....	7
2.1.2 FASES CONSTITUINTES DOS SOLOS NÃO SATURADOS	7
2.1.3 A RETENÇÃO DE ÁGUA PELO SOLO E A SUCÇÃO	9
2.1.4 ÍNDICES FÍSICOS EM SOLOS NÃO SATURADOS	10
2.1.4.1 RELAÇÃO ENTRE MASSAS	11
2.1.4.2 RELAÇÃO ENTRE VOLUMES.....	11
2.1.4.3 RELAÇÃO ENTRE MASSA E VOLUME	12
2.1.5 PRESSÕES NA ÁGUA NO SOLO NÃO SATURADO	13
2.1.5.1 POTENCIAL TOTAL DA ÁGUA NO SOLO	14
2.1.5.2 POTENCIAL MÁTRICO.....	15
2.1.5.3 POTENCIAL GRAVITACIONAL	15
2.1.5.4 POTENCIAL OSMÓTICO.....	16
2.1.6 SUCÇÃO	16
2.1.6.1 TÉCNICAS DE MEDIDA DA SUCÇÃO	17
2.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS	18
2.2.1 IMPORTÂNCIA DA CURVA DE SUCÇÃO EM OBRAS GEOTÉCNICAS.....	20

2.2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM A CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS	21
2.2.3	MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS	24
2.2.2.1	ASPECTOS DO MODELO DE VAN GENUCHTEN (1980).....	26
2.2.2.2	ASPECTOS DO MODELO DUPLO DE VAN GENUCHTEN.....	27
2.3	MÉTODO DA CENTRÍFUGA PARA OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	PRINCÍPIO BÁSICO DA CENTRÍFUGA.....	35
3.2	ESQUEMA DOS ENSAIOS CENTRÍFUGOS	37
3.2.1	CÁLCULO DA SUCÇÃO DAS AMOSTRAS CENTRIFUGADAS.....	38
3.3	COMPONENTE EXPERIMENTAL	40
3.4	METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO.....	44
3.4.1	MÉTODOS CONVENCIONAIS.....	44
3.4.1.1	FUNIL DE PLACA POROSA.....	45
3.4.1.2	MÉTODO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE RICHARDS.....	46
3.4.1.3	MÉTODO DO PAPEL FILTRO	48
3.4.2	MÉTODO DA CENTRÍFUGA.....	51
3.4.3	CÁLCULO DA UMIDADE REFERENTE A CADA SUCÇÃO	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO	56
4.1.1	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUCÇÃO DO SOLO COLUVIONAR REMOLDADO.....	58
4.1.2	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUCÇÃO DO SOLO COLUVIONAR INDEFORMADO.....	63
4.1.3	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUCÇÃO DO SOLO JOVEM RESIDUAL REMOLDADO.....	68
4.1.4	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUCÇÃO DO SOLO JOVEM RESIDUAL INDEFORMADO.....	73
5	CONCLUSÕES	78
5.1	PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS.....	79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Visualização da mecânica dos solos generalizada (Fredlund,1996)...	5
Figura 2.2 - Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua (adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977).....	8
Figura 2.3 - Perfil de solo, diferentes formas de presença de água e graus de saturação (Vilar, 2021).....	9
Figura 2.4 - Fases de um solo não saturado. (a) Sistema com quatro fases, incluindo a membrana contráctil; (b) Sistema trifásico (Fredlund e Rahardjo, 1993).	10
Figura 2.5 - Perfil de solo não saturado e pressões na água intersticial (Vilar,2021).	13
Figura 2.6 - Ilustração do potencial total de água no solo (Rodrigues, 2007).	14
Figura 2.7 - Esquema representando as componentes da sucção (Marinho, 1997)..	17
Figura 2.8 - Forma típica de uma curva de retenção de água por um solo quando representada em escala semi-logarítmica (Vilar, 2021).	20
Figura 2.9 - Curvas características típicas para solos arenosos, siltosos e argilosos (Fredlund e Xing, 1994).....	22
Figura 2.10 - Variação da crus com o índice de vazios do solo. Guizelini (2011). 22	
Figura 2.11 - Efeito da histerese na curva característica de sucção (Hillel, 1971).23	
Figura 2.12 - Modelo sugerido de ajuste da função duplo van Genuchten para a curva de retenção de água no solo, com as localizações dos parâmetros associados ao modelo (adaptado de Carducci <i>et al.</i> , 2011).....	28
Figura 2.13 - Conca and Wright (1994): (a) esquema do permeâmetro; (b) centrífuga In McCartney (2007).....	32
Figura 2.14 - Ilustração do princípio básico da centrífuga de pequena escala adotado por Reis <i>et al.</i> (2011) e Sterck (2011).	33
Figura 2.15 - Ilustração do esquema da centrífuga de pequena escala utilizado por Rahardjo <i>et al.</i> (2018).....	34
Figura 3.1 - Vista interna (a) e externa (b) da centrífuga de pequena escala Cientec CT 6000.....	35
Figura 3.2 - Ilustração do princípio básico da centrífuga utilizado.....	36
Figura 3.3 – Talude e extração do solo coluvionar indeformado.....	41
Figura 3.4 – Talude e extração do solo jovem residual indeformado.	42

Figura 3.5 – Destorroamento e peneiramento dos solos coluvionar e jovem residual.	43
Figura 3.6 – Curva granulométrica dos solos coluvionar e jovem residual	43
Figura 3.7 - Funil de placa porosa (Reichardt, 1985).	45
Figura 3.8 – Montagem e execução do ensaio funil de placa porosa.....	46
Figura 3.9 – Montagem e execução do ensaio câmara de pressão de Richards. .47	
Figura 3.10 – Disposição das amostras ensaiadas na câmara de pressão de Richards.	48
Figura 3.11 - Configurações do ensaio com papel filtro. (a) Sucção total; (b) Sucção matricial (adaptado de Marinho, 1994).....	49
Figura 3.12 - Etapas do ensaio de papel filtro. (a) Saturação das amostras; (b) Secagem das amostras ao ar; (c) Embrulho das amostras com os papéis, os geotêxteis e filme de PVC; (d) corpos de provas embalados sendo colocados na câmara úmida.	50
Figura 3.13 – Amostras de 20 e 50 mm sendo saturadas.....	52
Figura 3.14 – Vista interna da centrífuga CT 6000, onde: (a) Centrífuga somente com os papéis filtro na base; (b) Inserção das amostras centrifugadas e os caps de proteção; (c) Inserção da proteção de alumínio para a execução do ensaio.	52
Figura 3.15 - Detalhamento do conjunto da amostra apoiada diretamente sobre a placa drenante.....	53
Figura 3.16 - Detalhamento do conjunto da amostra apoiada sobre o disco cerâmico de 24 mm de altura.	53
Figura 3.17 - Detalhamento do conjunto da amostra apoiada diretamente sobre o disco cerâmico de 48 mm.....	54
Figura 4.1 – CCSS do Solo Coluvionar na condição remoldada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	59
Figura 4.2 – CCSS do Solo Coluvionar na condição remoldada considerando todos os métodos (Centrífuga (com e sem disco), Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	60
Figura 4.3 – CCSS do Solo Coluvionar na condição remoldada considerando o método da Centrífuga (com e sem disco) e do Papel Filtro: (a) em função do teor de água gravimétrico; (b) em função do teor de água volumétrico.	61

Figura 4.4 – CCSS do Solo Coluvionar na condição remoldada considerando o método da Centrífuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.....	62
Figura 4.5 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	64
Figura 4.6 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando todos os métodos (Centrífuga (com e sem disco), Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	65
Figura 4.7 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando o método da Centrífuga (com e sem disco) e do Papel Filtro: (a) em função do teor de água gravimétrico; (b) em função do teor de água volumétrico.....	66
Figura 4.8 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando o método da Centrífuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.....	67
Figura 4.9 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição remoldada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	69
Figura 4.10 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição remoldada considerando todos os métodos (Centrífuga (com e sem disco), Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	70
Figura 4.11 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição remoldada considerando o método da Centrífuga (com e sem disco) e do Papel Filtro: (a) em função do teor de água gravimétrico; (b) em função do teor de água volumétrico.....	71
Figura 4.12 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição remoldada considerando o método da Centrífuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	72
Figura 4.13 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.	74
Figura 4.14 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando todos os métodos (Centrífuga (com e sem disco), Papel Filtro, Câmara de Richards e	

Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.75

Figura 4.15 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando o método da Centrifuga (com e sem disco) e do Papel Filtro: (a) em função do teor de água gravimétrico; (b) em função do teor de água volumétrico.....76

Figura 4.16 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando o método da Centrifuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Técnicas para a medição da sucção em solos (Adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993; Marinho, 1997; Vilar, 2002).....	18
Tabela 2.2 - Exemplos de modelos matemáticos de curvas de retenção (Adaptado de Vilar, 2021).....	25
Tabela 3.1 - Velocidade equivalente a sucção no centro das amostras de 20 mm de altura.	38
Tabela 3.2 - Velocidade equivalente a sucção no centro das amostras de 50 mm de altura.	39
Tabela 3.3 - Velocidade equivalente à sucção média das amostras de 20 mm de altura.	40
Tabela 3.4 - Velocidade equivalente à sucção média das amostras de 50 mm de altura.	40
Tabela 3.5 – Características dos solos coluvionar e jovem residual.	44
Tabela 3.6 - Índices físicos médios dos solos ensaiados.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

g	Aceleração da gravidade
R^2	Coefficiente de correlação
L	Comprimento da amostra de solo
ρ_w	Densidade da água
G	Densidade relativa dos grãos
i	Gradiente hidráulico
S_r	Grau de saturação
S_{rs}	Grau de saturação de campo
$S_e = (S_r - S_{ru}) / (S_{rs} - S_{ru})$	Grau de saturação efetiva
S_{ru}	Grau de saturação residual
e	Índice de vazios
M_w	Massa de água
M_w	Massa de água
M_s	Massa de sólidos
$n_1, m_1, \alpha_1, n_2, m_2, \alpha_2$	Parâmetros de ajuste - Duplo van Genuchten
γ_w	Peso específico da água
γ	Peso específico do solo
γ_g	Peso específico real dos grãos
γ_d	Peso específico seco
n	Porosidade
Ψ_g	Potencial gravitacional
Ψ_m	Potencial mátrico
Ψ_o	Potencial osmótico
ψ	Potencial total da água no solo
h	Potencial total do solo
P_{atm}	Pressão atmosférica
u_w	Pressão da água
u_a	Pressão do ar
r_0	Raio da centrífuga
r_2	Raio do eixo da centrífuga à superfície de gotejamento
r_1	Raio do eixo da centrífuga ao centro da amostra de solo
Ψ	Sucção do solo

Ψ_1	Sucção residual
ψ	Sucção total da água no solo
T_s	Tensão superficial
w	Teor de água gravimétrico
Θ_w	Teor de água volumétrico
Θ_s	Umidade volumétrica de saturação
Θ_i	Umidade volumétrica intermediária
$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$	Umidade volumétrica normalizada
Θ_r	Umidade volumétrica residual
Δu	Variação de pressão
ω	Velocidade angular
V_w	Volume de água
V_W	Volume de água
V_a	Volume de ar
V_s	Volume de sólidos
V_v	Volume de vazios
V	Volume total

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A curva característica de sucção de solos não saturados é um parâmetro fundamental na geotecnia e tem sido objeto de estudo e pesquisa devido à sua relevância na compreensão do comportamento dos solos não saturados em diversas aplicações práticas. O entendimento da relação entre o teor de água do solo e a tensão é essencial para prever o comportamento das estruturas de engenharia civil, como fundações, barragens e estradas, que interagem diretamente com o solo.

Ela é tradicionalmente obtida por meio de ensaios de retenção de água, nos quais o potencial matricial é variado e a umidade correspondente é medida. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), esses ensaios permitem a coleta de pontos que delimitam a curva de sucção, elucidando comportamentos relacionados à estrutura e à porosidade do solo.

A interpretação dos mecanismos subjacentes à curva de sucção é crucial para uma análise precisa do comportamento dos solos não saturados. Ridley *et al.* (2005) ressaltam a influência de fatores como a tensão interfacial, a tensão capilar e a distribuição do tamanho de poros na capacidade de retenção de água do solo e na velocidade de drenagem sob diferentes potenciais matriciais.

Em projetos de engenharia, é comum assumir que o solo não saturado está saturado. Quando se trata de questões de resistência, esta simplificação é razoável, mas levar em consideração a não saturação em alguns problemas de fluxo pode aumentar os gradientes, o que, dependendo do problema, pode ser a favor da segurança. Portanto, para desenvolver projetos com procedimentos mais seguros e racionais, o engenheiro deve aprender cada vez mais sobre o comportamento do fluxo em meios não saturados.

Tanto em laboratório quanto em campo, as medidas de sucção enfrentam vários desafios experimentais, e o uso de várias técnicas de ensaio é frequentemente necessário para determinar o potencial matricial dentro de uma gama ampla que seja suficiente para uso prático. Os tensiômetros, o papel filtro, as placas de pressão e sucção e a centrifugação são alguns dos métodos utilizados para obter a curva característica de sucção de um solo. Exceto a técnica de centrifugação, que produz uma curva em horas ou em poucos dias, estes métodos são demorados, podendo

levar meses para que seja obtida a curva característica.

O uso da rotação do equipamento para aumentar a força gravitacional e atingir uma velocidade de Darcy maior nas amostras não saturadas é uma vantagem do método da centrífuga. Por causa disso, as curvas de sucção são alcançadas mais rapidamente que com procedimentos convencionais. Isso leva algumas horas para solos com textura mais grossa e muitas horas ou mesmo pouco mais de um dia para solos finos (McCartney & Zornberg, 2005).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é obter e avaliar a curva característica de sucção de diferentes solos não saturados em distintos estados. A fim da obtenção das curvas de maneira rápida e eficaz as amostras trabalhadas são centrifugadas em uma centrífuga de bancada pequena, sendo utilizadas amostras de 20 mm de altura (com e sem discos cerâmicos de alto fluxo) e amostras de 50 mm altura (sem discos cerâmico). Desta forma, se tem o propósito de obter curvas características de sucção utilizando majoritariamente pontos obtidos através do método centrífugo, com alguns pontos complementares a partir da técnica do papel filtro para altos valores sucção e com amostra seca a sombra, além da utilização do ponto de referência de final da curva referente ao solo no valor de sucção de 10^6 kPa e 0% de umidade. Para o cálculo da sucção das amostras centrifugadas são utilizadas duas formulações: a medição pontual da sucção no meio amostra, empregada nas amostras de 20 mm, e a medição da sucção média, usada nas amostras de 50 mm. Os métodos tradicionais (funil de placa porosa, câmara de pressão de Richards e papel filtro), que são bem mais demorados que o método centrífugo, são utilizados de forma comparativa. Para a determinação das curvas é utilizado no trabalho o modelo duplo Van Genuchten. Espera-se assim que a metodologia empregada apresente boa concordância entre as técnicas utilizadas para obtenção dos valores de sucção e que não haja interferência significativa nos dados em relação a utilização de diferentes alturas das amostras.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este estudo está organizado em 6 capítulos e é apresentado da seguinte maneira:

Neste primeiro capítulo são apresentados a introdução e o objetivo central da pesquisa.

O capítulo 2 é constituído pela revisão bibliográfica, sendo feitas as considerações iniciais a respeito dos solos não saturados, assim como problemas típicos relacionados a solos nestas condições e passíveis de aplicação de conceitos envolvidos. Também são mostradas as fases constituintes, a retenção de água pelo solo e a sucção, índices físicos e pressões na água, propriedades e relações entre as fases, que são fundamentais na compreensão do comportamento dos solos não saturados. Além disso, são apresentados os conceitos de potencial total, mátrico e gravitacional da água no solo, além da sucção. A curva de retenção de água no solo (relação sucção versus teor de umidade) recebe destaque especial ao final deste capítulo, sendo destacada a importância das curvas de sucção em obras geotécnicas e fatores que as influenciam. Por fim, procedimentos para determinação da curva e técnicas experimentais para a sua avaliação são mostrados, sendo destacado o método da centrífuga.

No capítulo 3, materiais e métodos, é apresentado o princípio básico utilizado no trabalho, o cálculo da sucção das amostras centrifugadas, a componente experimental, além da metodologia para determinação da curva característica de sucção, tanto dos métodos convencionais como do método centrífugo.

O capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa assim como as discussões pertinentes.

As conclusões são listadas no capítulo 5. No mesmo também são propostas sugestões para futuros trabalhos.

As referências bibliográficas utilizadas para a realização desta pesquisa estão dispostas no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS

A compreensão do comportamento mecânico dos solos não saturados é fundamental para diversas áreas da engenharia geotécnica, como a estabilidade de taludes, fundações e obras de contenção. No entanto, o estudo dos solos não saturados apresenta desafios particulares devido à presença simultânea de ar e água nos vazios do solo. A interação entre esses dois fluidos, juntamente com a influência da pressão de sucção, afeta significativamente as propriedades mecânicas e o comportamento do solo.

De acordo com Vilar (2021), os solos são compostos de partículas sólidas entremeadas de poros preenchidos com água no caso saturado e com ar, quando seco. Entre esses extremos ocorrem diferentes combinações entre os conteúdos de água e de ar, dando origem à condição de não saturação e à presença de interfaces entre sólidos, ar e água com importantes repercussões sobre o comportamento do solo. Um solo não saturado é capaz de atrair e reter água junto às partículas, graças a uma série de processos físico-químicos. Uma implicação desse fato é que a água se encontra em uma condição de energia potencial inferior à da água livre sob pressão atmosférica, ou seja, negativa, característica fundamental de todo solo não saturado.

Como afirmado por Fredlund e Rahardjo (1993), desde sua instituição como uma ciência de engenharia, os estudos que envolvem solos não saturados são de extremo interesse para a mecânica do solo. Esse interesse é dado em razão da existência de várias obras de engenharia que envolvem solos não saturados, como aterros, barragens e estabilização de taludes. Além disso, esta condição de não saturação ocorre em quase todas as partes do planeta, pois cerca de 60% dos países estão situados em regiões de clima árido e semi-árido, e em países tropicais, como o Brasil, ocorrem períodos prolongados de seca que causam a dessaturação do solo.

A condição insaturada ou parcialmente saturada, quando associada a alterações na estrutura dos solos residuais gera alterações no comportamento geotécnico e mecânico destes solos, que não são bem explicados pelos parâmetros geotécnicos usuais, tornando assim a descrição dos solos menos condizente com a realidade (Fredlund e Rahardjo, 1993).

A presença de água em solos não saturados, mudanças no teor de água,

devido às mudanças climáticas, modificam propriedades como capilaridade e sucção do solo, interferindo em seu comportamento (Camapum *et al.*, 2015).

A área de estudo da mecânica dos solos pode ser dividida em duas categorias: uma voltada para os solos saturados e outra para os solos não saturados. Um solo saturado é um sistema bifásico, constituído por água e minerais, enquanto um solo não saturado é um sistema trifásico, formado por ar, água e minerais. A presença destes componentes num solo não saturado faz com que ocorram diferentes interfaces e interações. Em decorrência da presença de ar nos vazios do solo, a água intersticial encontra-se sempre sujeita a pressões inferiores à atmosférica. Tais pressões decorrem de fenômenos capilares e de adsorção, responsáveis pela sucção matricial, e de fenômenos osmóticos, devido à presença de solutos na água do solo, responsáveis pela sucção osmótica.

Fredlund (1996), através da Figura 2.1, ilustra o aumento de complexidade ao se ultrapassar o nível da água, alcançando pressões negativas e culminando na sucção matricial, componente do estado de tensões capaz de descrever o comportamento de solos não saturados. O princípio da tensão efetiva não é mais suficiente para descrever a tensão a qual fica exposto o esqueleto sólido do solo.



Figura 2.1 - Visualização da mecânica dos solos generalizada (Fredlund, 1996).

2.1.1 PROBLEMAS ENVOLVENDO SOLOS NÃO SATURADOS

2.1.1.1 PROBLEMAS RELACIONADOS À VARIAÇÃO DE SUCCÃO

As barragens construídas em solos não saturados ou que incorporam esse material em sua estrutura são particularmente vulneráveis à alteração da sucção matricial. Esta variação é crucial para a estabilidade da barragem, pois impacta a coesão e a resistência ao cisalhamento do solo. Fredlund *et al.* (2012) indicam que as flutuações de sucção em barragens de terra construídas com solos não saturados afetam significativamente a estabilidade dessas estruturas, podendo provocar colapsos em situações de rápida saturação do solo.

Adicionalmente, o recalque diferencial representa outro desafio significativo em barragens de terra, especialmente quando o solo não saturado se aproxima do ponto de saturação total, causando deformações não uniformes na estrutura. Pereira (2015) destaca que em barragens de pequeno porte, erguidas em áreas com solos suscetíveis à erosão, uma saturação repentina pode provocar recalques consideráveis e prejudicar a integridade do projeto.

2.1.1.2 PROBLEMAS DE INSTABILIDADE E EROSÃO

A instabilidade de taludes é uma das questões mais comuns em solos não saturados, particularmente quando há alterações no nível de umidade por causa de precipitações intensas. A entrada de água diminui a sucção matricial, levando a uma queda considerável na resistência ao cisalhamento, um elemento crucial para a ocorrência de deslizamentos. Alonso *et al.* (1990) ressaltam que a diminuição da sucção em taludes naturais e em cortes de estradas pode resultar em falhas súbitas. Isso ocorre porque a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados é fortemente dependente da manutenção de sua tensão matricial.

Ademais, a erosão superficial é uma questão frequente em taludes expostos, particularmente em solos de baixa coesão, que rapidamente perdem sua integridade devido ao escoamento superficial de água. De acordo com Ng e Menzies (2007), a erosão em solos não saturados de taludes acontece quando não há proteção superficial, levando à perda de material e à redução gradual da estabilidade. Isso

destaca a importância de aplicar sistemas apropriados de drenagem e controle de erosão em projetos geotécnicos.

2.1.1.3 PROBLEMAS DE DESMORONAMENTO E RECALQUE

Em escavações em terrenos não saturados, um dos desafios mais significativos é a possibilidade de colapso das paredes da escavação, particularmente em solos que apresentam alta sensibilidade à mudança de umidade. A elevação da umidade do solo ao redor da escavação pode diminuir a sucção, o que reduz a resistência ao cisalhamento e facilita a queda das paredes. Conforme Fredlund *et al.* (2012), a realização de escavações profundas em solos não saturados requer um acompanhamento constante do nível de umidade, já que a saturação pode resultar em colapsos súbitos, representando um risco para a construção.

Ademais, em solos parcialmente saturados, podem ocorrer recalques diferenciais devido ao alívio de tensões provocado pela escavação, causando deslocamentos que comprometem a integridade das estruturas adjacentes. Lu e Likos (2006) sugerem que solos insaturados próximos a escavações profundas podem sofrer recalques consideráveis, resultando no deslocamento lateral das paredes da escavação e exigindo reforços extras para prevenir desmoronamentos.

As fundações realizadas em solos não saturados também enfrentam desafios ligados a recalques e possíveis colapsos, especialmente em solos expansivos ou facilmente colapsáveis. Pereira (2015) argumenta que fundações em solos colapsáveis têm um alto risco de recalques diferenciais quando submetidos a ciclos de secagem e saturação, o que pode levar a graves falhas estruturais.

2.1.2 FASES CONSTITUINTES DOS SOLOS NÃO SATURADOS

Os solos não saturados são uma categoria de solos que apresentam tanto água quanto ar em seus poros, diferenciando-se dos solos saturados, que estão completamente preenchidos por água. Essa distinção é fundamental para compreender o comportamento mecânico desses solos e para a aplicação de conceitos da mecânica dos solos na engenharia geotécnica.

O estado de tensão de um solo não saturado é diretamente influenciado por sua mistura de fases. Assim, é fundamental conhecer a quantidade de fases

constituintes de um solo não saturado, bem como suas características. Um solo não saturado é caracterizado como um sistema trifásico, com três fases: líquido (água), gasoso (ar) e sólido (partículas de minerais), segundo Lambe e Whitman (1969).

Fredlund & Morgenstern (1977) não consideram o solo não saturado como um sistema trifásico, mas sim como um sistema composto por quatro fases: líquida; gasosa, sólida e membrana contráctil, sendo esta última devida a um importante papel da interface ar-água. A Figura 2.2 ilustra um elemento cúbico de solo não saturado com base nestas quatro fases. Em termos práticos, contudo, costuma-se resumir as fases líquida e membrana contráctil como uma única fase.

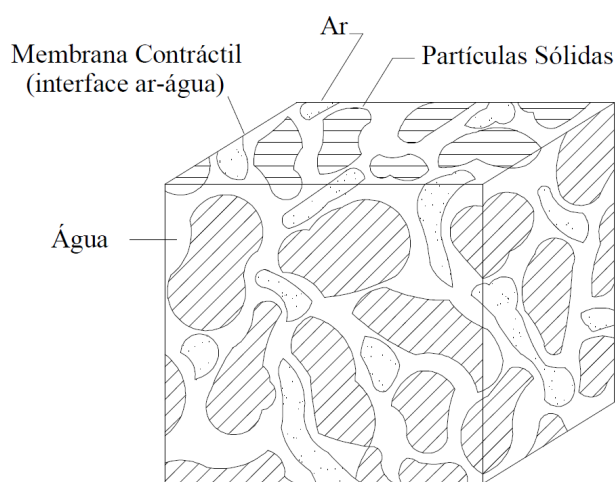


Figura 2.2 - Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua (adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977).

A capacidade da membrana contráctil de exercer tensão de tração sobre materiais contíguos é sua característica mais importante. Essa capacidade é conhecida como tensão superficial. Como resultado dessa tensão, a interface entre ar e água se comporta como uma membrana elástica. Tal membrana interage com as partículas sólidas quando a fase gasosa permanece, alterando o comportamento mecânico do solo.

Existindo água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo, diz-se que o meio multifásico não é mais um meio contínuo. Assim, o solo não saturado pode ser analisado como um sistema bifásico, como os solos saturados, desde que se assume que um fluido compressível preencha os poros (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Do ponto de vista comportamental, o solo não saturado pode ser considerado um sistema de duas fases que entram em equilíbrio (partículas de solo e membrana contráctil) e outras duas que fluem (ar e água) ao se aplicar um gradiente de tensão.

Como o volume da interface ar-água é muito pequeno, sua massa pode ser considerada parte da massa de água, tornando-o um sistema trifásico nas correlações massa-volume. No entanto, a interface ar-água deve funcionar como uma fase separada ao analisar o estado de tensão de um sistema multifásico contínuo (Fredlund e Rahardjo, 1993).

2.1.3 A RETENÇÃO DE ÁGUA PELO SOLO E A SUCÇÃO

Segundo Vilar (2021), a retenção de água pelo solo e a sucção são fenômenos fundamentais no estudo da mecânica dos solos não saturados. A compreensão desses processos é crucial para diversas áreas da engenharia geotécnica, como a estabilidade de encostas, o dimensionamento de fundações e a análise de obras de contenção.

A quantidade de água retida no solo acima do nível de água durante o processo de ascensão é mostrada na Figura 2.3, que mostra o perfil do solo e os graus de saturação associados a cada cota.

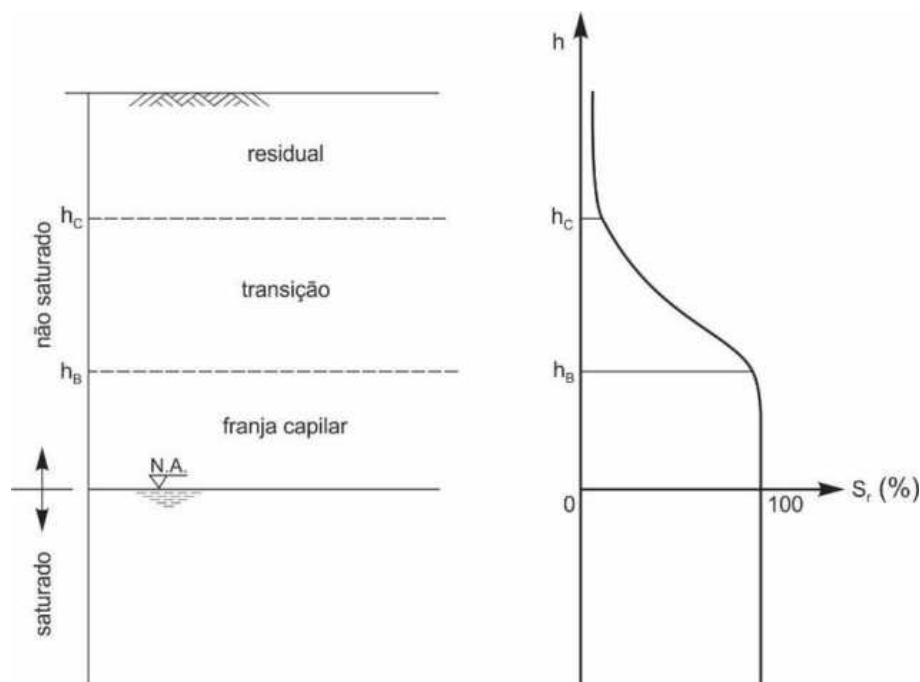


Figura 2.3 - Perfil de solo, formas de presença de água e graus de saturação (Vilar, 2021).

O solo está saturado abaixo do nível de água ou freático. Uma porção de água é retida acima do nível de água durante o processo de ascensão, tornando o solo saturado ou quase saturado até uma altura determinada, h_B . Essa franja capilar recebe

seu nome do fato de que os poros do solo se assemelham a tubos capilares. Como a água não pode deslocar todo o ar e ocupar os poros de maior diâmetro, o grau de saturação diminui com a altura.

A água retida permanece em equilíbrio, mas não cobre toda a seção de poros disponível e aumenta em alguns poros contínuos ou "capilares" de diâmetro menor enquanto o grau de saturação diminui até atingir sua altura máxima, h_c . Acima dessa altura, há uma área onde não há uma relação clara entre a altura e o grau de saturação. Isso não ocorre até que se atinge o residual, uma condição em que a fase ar está em total continuidade.

2.1.4 ÍNDICES FÍSICOS EM SOLOS NÃO SATURADOS

Os índices físicos são parâmetros utilizados na caracterização dos solos, auxiliando na compreensão das propriedades e comportamentos geotécnicos desses materiais. No contexto de solos não saturados, esses índices são especialmente relevantes, uma vez que influenciam diretamente nas condições de fluxo de água e transporte de gases. Os conceitos de índices físicos se constituem em relações entre massas e/ou volumes das fases do solo.

Na Figura 2.4 é ilustrado um elemento de solo, com suas fases expressas em termos de massas e volumes. Para finalidades práticas, a massa de ar é assumida como nula.

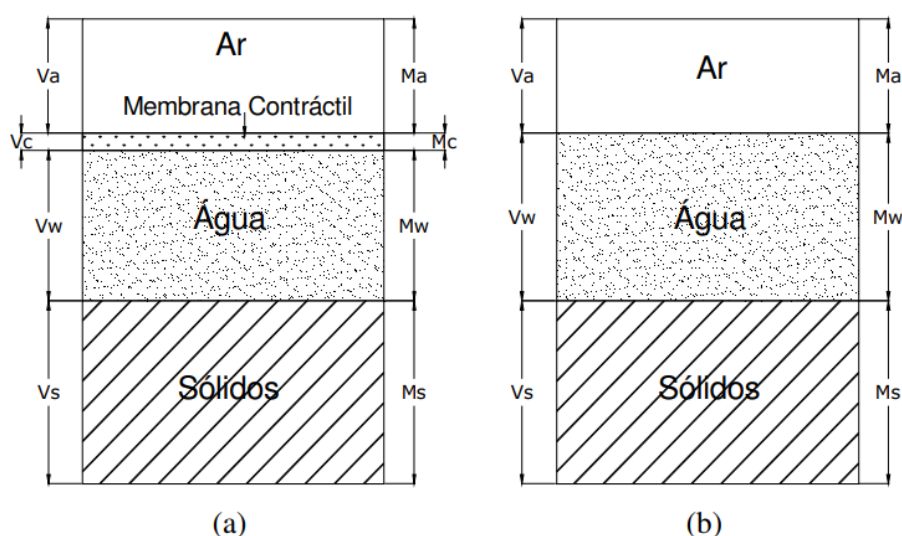


Figura 2.4 - Fases de um solo não saturado. (a) Sistema com quatro fases, incluindo a membrana contrátil; (b) Sistema trifásico (Fredlund e Rahardjo, 1993).

O volume de um solo não saturado está relacionado às características de sua estrutura, composição e distribuição de poros. Quando ocorrem variações no teor de umidade, o volume do solo também é afetado, levando a alterações nas suas propriedades físicas. Portanto, é importante compreender a relação entre o volume e os índices físicos, a fim de prever o comportamento do solo em diferentes condições.

2.1.4.1 RELAÇÃO ENTRE MASSAS

A relação entre a massa de água (M_w) e a massa de sólidos (M_s), correspondente a um mesmo volume de solo, é conhecida como o teor de água gravimétrico (w) do solo, conforme é mostrado na Equação 2.1.

$$W = \frac{M_w}{M_s} \quad (2.1)$$

2.1.4.2 RELAÇÃO ENTRE VOLUMES

Porosidade, índice de vazios e grau de saturação são os três índices físicos normalmente encontrados nas relações volumétricas. A porosidade (n) representa a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total do solo (V), que é expresso em porcentagem. Nogueira (1998) diz que qualquer mudança no volume de um solo é acompanhada de uma mudança no volume de seu vazio, pois os sólidos são considerados incompressíveis e estão dentro do intervalo de tensões normalmente usados em projetos de engenharia comuns. Como resultado, o denominador e o numerador da Equação 2.2 variarão no mesmo sentido. Devido à porosidade, não podemos observar a mudança no volume do solo ao longo do tempo quando submetido a um carregamento.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.2)$$

A relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume de sólidos (V_s) para o mesmo volume de solo é o índice de vazios (e), mostrado na Equação 2.3. Esse parâmetro mostra a mudança no volume do solo com o tempo e com o uso de cargas externas. Como o volume do sólido é constante, as mudanças no volume são

causadas pela variação do índice de vazios. Seu limite inferior tem um valor maior que zero e seu limite superior não é claro porque depende da estrutura do solo.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.3)$$

O grau de saturação (S_r) mostra a relação entre o volume de água (V_w) e o volume de vazios (V_v) para o mesmo volume de solo em percentagem. Esse índice físico tem um intervalo de variação de 0 a 100%. O solo seco está no extremo inferior e o solo saturado está no extremo superior. Como resultado, o estado de solo não saturado está entre esses dois extremos.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.4)$$

Usar a ideia de umidade volumétrica (θ_w), que representa a relação entre o volume de água (V_w) e o volume total do solo (V), é uma maneira adicional de determinar o teor de água de um solo. A Equação 2.5 mostra esse método.

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} \quad (2.5)$$

2.1.4.3 RELAÇÃO ENTRE MASSA E VOLUME

A relação entre a massa do solo (M) e o volume do solo (V), expressa em g/cm^3 , é conhecida como massa específica do solo (ρ), que se refere a um teor de água distinto dos extremos que distinguem os solos secos e saturados.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.6)$$

A massa específica do solo seco (ρ_d) corresponde ao ponto mais baixo da umidade. O solo seco, cujo grau de saturação é nulo, é a representação desse tipo de solo. Em certos casos, o índice mencionado é necessário para resolver alguns

problemas de geotecnia. Existe a relação entre a massa do solo seco (M_s) e o volume do solo (V), que são expressos em g/cm.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (2.7)$$

2.1.5 PRESSÕES NA ÁGUA NO SOLO NÃO SATURADO

Os problemas geotécnicos relacionados a solos não saturados têm chamado a atenção da comunidade geotécnica nas últimas décadas. Os solos tropicais não saturados, lateríticos e saprolíticos geralmente têm perfis não saturados até grandes profundidades, baixa umidade nos horizontes superficiais e a ação de ciclos alternados de umedecimento e secagem. A Figura 2.5 mostra as principais características da variação da pressão de água em alguns destes solos.

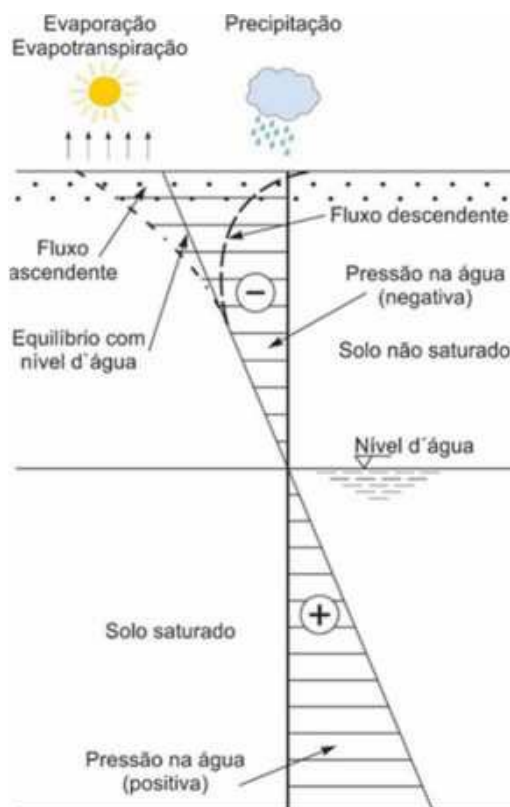


Figura 2.5 - Perfil de solo não saturado e pressões na água intersticial (Vilar, 2021).

Na Figura 2.5, um segmento do perfil do solo acima do lençol freático é conhecido como "zona vadosa". A primeira área, imediatamente acima do nível

d'água, é chamada de franja ou zona capilar e permanece saturada invariavelmente mesmo com pressões neutras negativas. A segunda área, chamada de zona ativa, é a área onde o grau de saturação do solo tende a se equilibrar. A pressão na água diminui quando o teor de água diminui, tendo evaporação ou evapotranspiração, enquanto a pressão aumenta quando o teor de água aumenta, ocorrendo infiltração (Rodrigues, 2007).

Este comportamento pode ser explicado pelo estado energético da água que está presente nos vazios do solo. Em física, as duas formas tradicionais de energia são a energia cinética e a energia potencial. Considerando a velocidade reduzida de fluxo d'água que normalmente ocorre no solo, a energia cinética pode ser desprezada e a energia potencial é a que surge da interação da água com seus campos de força ou potenciais.

2.1.5.1 POTENCIAL TOTAL DA ÁGUA NO SOLO

O potencial total da água no solo (ψ) é expresso em termos de energia por unidade de volume de água e representa o trabalho útil necessário para transportar uma quantidade mínima de água pura, reversível e isotérmica, desde um reservatório em condições padrão (Ponto A) até a água no solo na cota de interesse (Ponto B) e sob pressão u_b como mostrado na Figura 2.6.

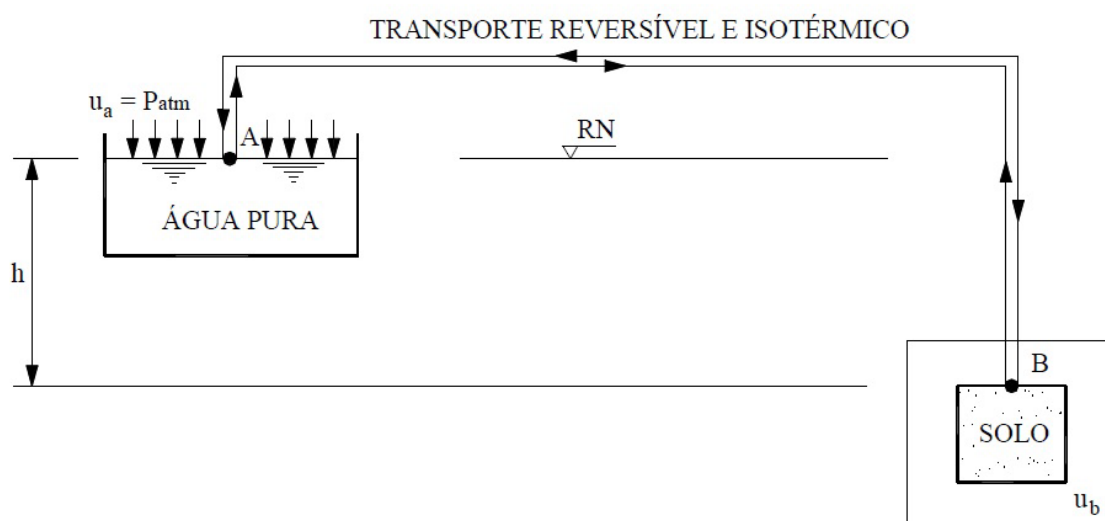


Figura 2.6 - Ilustração do potencial total de água no solo (Rodrigues, 2007).

Conforme Fredund & Rahardjo (1993), a partir de uma perspectiva geotécnica, os elementos mais relevantes do potencial total de água no solo não saturado são: potencial mátrico, potencial osmótico e potencial gravitacional.

$$\psi_t = \psi_m + \psi_g + \psi_o \quad (2.8)$$

Onde:

ψ_t - Potencial total da água no solo;

ψ_m - Potencial mátrico;

ψ_g - Potencial gravitacional.

ψ_o - Potencial osmótico;

2.1.5.2 POTENCIAL MÁTRICO

O potencial mátrico, também conhecido como potencial de sucção, é uma medida da energia necessária para extrair água de um solo não saturado. É influenciado por uma série de fatores, como a textura do solo, a distribuição do tamanho dos poros e a umidade do solo. O conhecimento preciso do potencial mátrico é essencial para entender o transporte de água no solo e para avaliar o comportamento mecânico, a estabilidade e a taxa de deformação dos solos não saturados.

Quando o solo não está completamente saturado, mas possui um nível adequado de umidade, o potencial mátrico se eleva, sendo a capilaridade o fenômeno que mais contribui para a valorização do seu valor. A importância da capilaridade para as forças de adsorção diminui à medida que a umidade do solo diminui. Portanto, a disposição dos grãos, a textura e a composição mineral afetam significativamente o potencial mátrico. Para Fredlund (1979), Edil & Motan (1984) e Alonso *et al.* (1987), o potencial matricial é o mais importante e suficiente parâmetro para o estudo dos solos não saturados.

2.1.5.3 POTENCIAL GRAVITACIONAL

O potencial gravitacional traduz o componente de posição, isto é, quando a única diferença entre a água no solo e a água do reservatório padrão é a diferença de cotas entre elas (Vilar, 2006). É um dos fatores que influenciam o fluxo de água em

solos não saturados, desempenhando um papel fundamental na redistribuição da água no perfil do solo.

De acordo com Smith *et al.* (2002), o potencial gravitacional é responsável pelo movimento vertical da água no solo, sendo influenciado principalmente pela diferença de altura entre os diferentes pontos do perfil do solo.

2.1.5.4 POTENCIAL OSMÓTICO

Röhm (1997) afirma que a água no solo não é pura, o que explica a existência do potencial osmótico. Como resultado, as moléculas dos solutos tendem a se hidratarem, o que exige trabalho no sistema para remover a água da interação com a molécula. Assim, esse elemento é negativo.

Os solos com alto teor de água geralmente tem componente osmótico desprezível. Esse elemento é muito importante nos casos em que o solo tem uma concentração salina significativa ou um teor de água muito baixo (Reichardt, 1985).

2.1.6 SUCCÃO

A sucção é uma medida da energia necessária para extrair água de um solo não saturado. Essa propriedade é fundamental para entender o fluxo de água e o comportamento mecânico dos solos não saturados.

Marinho (2005) define sucção como a energia com a qual um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. O autor ainda destaca que essa avidéz por água depende basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo.

Para Vilar (2002) a sucção total do solo é a pressão manométrica negativa da pressão externa do gás sobre a água do solo. Isso deve ser aplicado a um reservatório de água pura (com a mesma cota e temperatura) para manter o equilíbrio. Isso é feito por meio de uma membrana semipermeável entre a água do reservatório e a água do solo.

A sucção total em solos não saturados é composta pela sucção mátrica e a sucção osmótica, duas componentes importantes a serem consideradas. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), a sucção mátrica é associada à tensão interfacial entre a água retida nos poros do solo e o ar circundante. Ela desempenha um papel crucial na capacidade de retenção de água do solo não saturado e influencia seu

comportamento mecânico. Por outro lado, a sucção osmótica é referente aos efeitos químicos resultantes da presença de íons dissolvidos na solução do solo. Assim, a sucção total (Ψ_T) é expressa como a soma da sucção mátrica (Ψ_M) e a sucção osmótica (Ψ_o), conforme a Equação 2.9.

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o \quad (2.9)$$

No esquema apresentado na Figura 2.7, considerando um sistema em equilíbrio, a sucção osmótica é a diferença de pressão através de uma membrana semipermeável separando água pura e uma solução do solo. A sucção mátrica, no mesmo esquema, é a diferença de pressão através de uma membrana permeável à solução, mas não a partículas sólidas ou ar, de uma solução de solo e o solo natural.

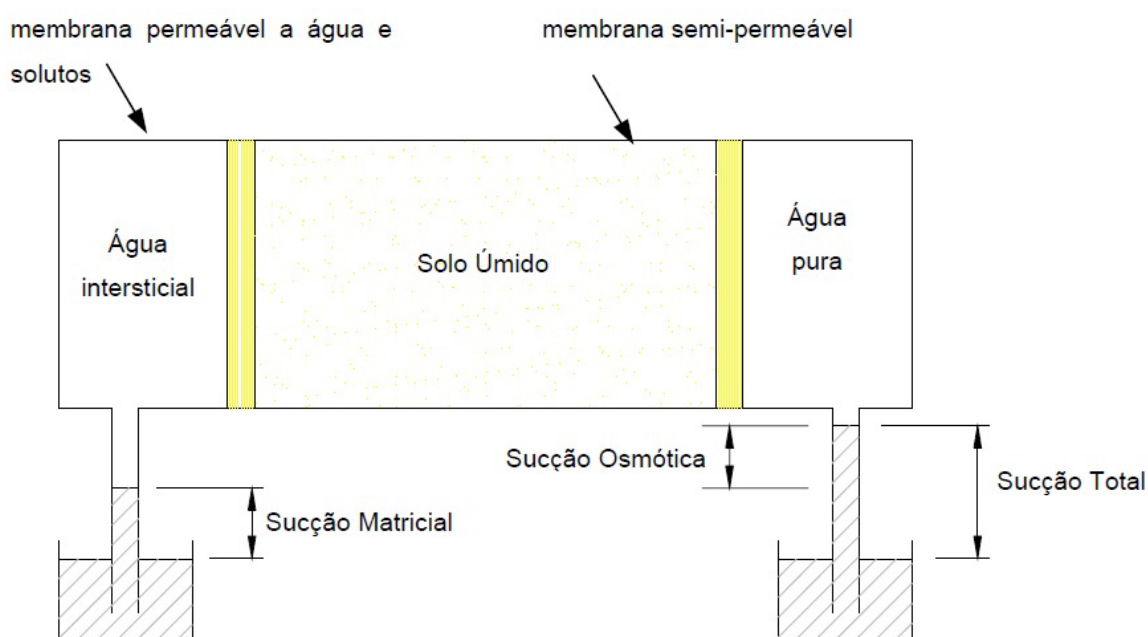


Figura 2.7 - Esquema representando as componentes da sucção (Marinho, 1997).

2.1.6.1 TÉCNICAS DE MEDIDA DA SUCÇÃO

A determinação precisa e confiável da sucção em solos é fundamental para uma ampla gama de aplicações geotécnicas. Nesse sentido, diversos métodos de medição têm sido desenvolvidos e aprimorados ao longo dos anos. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993) a sucção dos solos pode ser medida usando técnicas diretas ou indiretas. Os métodos diretos são aqueles que medem a energia da água

dos poros, já nos métodos indiretos se obtém um parâmetro a ser correlacionado com a sucção do solo através de uma calibração, por exemplo, saturação relativa, resistividade ou condutividade elétrica.

A medição da sucção pode ser feita através de vários métodos. É importante destacar que a escolha da técnica de medição adequada depende das características do solo, do objetivo do estudo e das restrições práticas. Em muitos casos, a combinação de diferentes técnicas é necessária para obter uma avaliação abrangente da sucção em solos. As técnicas mais utilizadas na engenharia geotécnica estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Técnicas para a medição da sucção em solos (Adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993; Marinho, 1997; Vilar, 2002).

Técnica	Medida de sucção	Intervalo (kPa)	Tempo de equilíbrio
Papel Filtro (com contato)	mátrica	30 a 30.000	7 dias
Papel Filtro (sem contato)	total	400 a 30.000	7 a 14 dias
Funil de pedra porosa	mátrica	0 a 70	horas
Placa de Pressão	mátrica	0 a 1.500	horas
Membrana de Pressão	mátrica	0 até 10.000	dias
Tensiômetro	mátrica	0 a 70	minutos
Blocos Porosos	mátrica	10 a 1.000	minutos
Psicômetro	total/osmótica	100 a 8.000	minutos
Equilíbrio da fase vapor	total	Acima de 400	dias
Princípio osmóticos	mátrica	200 a 1.600	horas

2.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS

A curva característica de sucção de solos, também conhecida como curva de retenção de água em solos, é um parâmetro crucial na mecânica dos solos não saturados, influenciando diretamente seu comportamento hidráulico e mecânico. De acordo com Wheeler *et al.* (2003), a curva característica é fundamental para a modelagem e a previsão de fenômenos como o fluxo de água e o transporte de solutos em solos não saturados. Essa curva descreve a relação entre o teor de água no solo e o potencial de sucção, permitindo a estimativa da condutividade hidráulica e da capacidade de armazenamento de água do solo.

Fredlund e Xing (1994) também destacam o uso da curva característica de sucção de solos na mecânica dos solos não saturados. Os escritores sustentam que a curva de retenção de água é fundamental para o estudo e o planejamento de fundações, taludes e estruturas subterrâneas. Ela possibilita a análise do impacto da alteração do conteúdo de água no comportamento geotécnico dos solos, abrangendo sua resistência, deformação e estabilidade.

Além disso, a curva de retenção de água também desempenha um papel importante na análise de processos de secagem e reumidificação dos solos não saturados. Segundo Delage e De Boer (1996), a curva de retenção de água é essencial para a compreensão dos mecanismos de contração e expansão dos solos durante esses processos.

De acordo com Mualem (1976), a curva de retenção de água é essencial para a compreensão dos processos de fluxo e transporte de água em solos não saturados. O autor destaca a importância de caracterizar essa curva para determinar parâmetros relevantes, como a condutividade hidráulica e a capacidade de armazenamento de água do solo.

Uma curva característica de sucção de solos é mostrada qualitativamente na Figura 2.8, em um gráfico semilogarítmico, que é usado para englobar a ampla gama de sucções possíveis em um solo. Considerando que a curva foi formada por um processo de drenagem a partir do solo inicialmente saturado, esta é a forma normal de representação na geotecnia e apresenta alguns pontos distintos. A primeira fase ocorre quando o solo permanece saturado e atinge a sucção de entrada de ar, s_b . Em seguida, ocorre uma fase de transição entre o estado saturado e o estado residual. Na fase de transição, o grau de saturação diminui enquanto a sucção aumenta, o que varia de acordo com o tipo de solo. A continuidade da fase ar é formada quando apenas a água adsorvida permanece junto às partículas na condição residual.

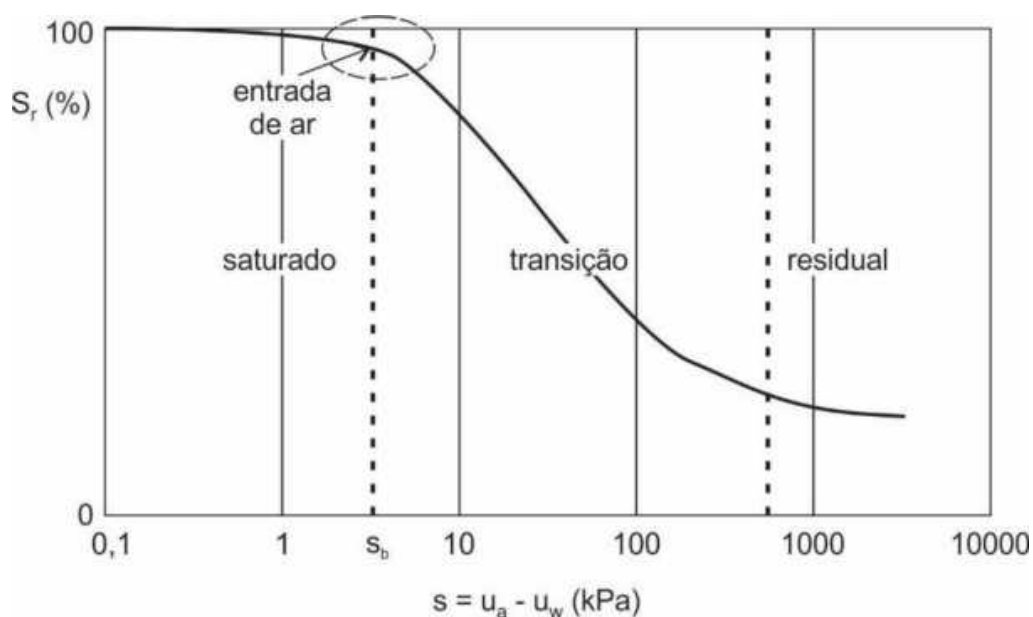


Figura 2.8 - Forma típica de uma curva de retenção de água por um solo quando representada em escala semi-logarítmica (Vilar, 2021).

2.2.1 IMPORTÂNCIA DA CURVA DE SUÇÃO EM OBRAS GEOTÉCNICAS

A curva de retenção de água no solo é crucial para o estudo e uso de solos não saturados, particularmente em projetos geotécnicos. Ela é crucial para a avaliação de várias construções geotécnicas, tais como barragens, taludes, fundações, aterros e estradas, onde o solo nem sempre está totalmente preenchido.

Na estabilidade de estruturas como barragens, a distribuição de água no interior da barragem e nas fundações é diretamente influenciada. A CCSS é empregada para compreender o fluxo de água pelos poros do solo, auxiliando na previsão da estabilidade da estrutura em variados níveis de água no reservatório. De acordo com Van Genuchten (1980), o modelo de retenção de água no solo é um instrumento essencial para se prever a infiltração e o comportamento da água em ambientes porosos.

A estabilidade de encostas, sejam elas naturais ou artificiais, é determinada pela interação entre a água e o terreno. A água pode diminuir a resistência do solo ao cisalhamento, resultando em instabilidade e, em situações extremas, no desmoronamento do talude. A CCSS possibilita a estimativa de como a água se distribui após ocorrências de chuva ou irrigação, tornando-se, assim, crucial para a avaliação da estabilidade em solos não saturados (Lu *et al.*, 2010).

A variação de umidade pode impactar significativamente o comportamento de solos em fundações superficiais e profundas. A análise da capacidade de suporte e

as deformações causadas por alterações no teor de água do solo são usadas para garantir um projeto mais seguro e econômico. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), a curva de retenção pode ter um impacto significativo no comportamento de fundações em solos não saturados, especialmente em solos expostos a ciclos de umedecimento e secagem.

Nos projetos de aterros, as variações na umidade impactam diretamente na compactação e estabilidade do terreno. A drenagem insuficiente e o acúmulo de água em pavimentos rodoviários podem resultar na deterioração das camadas de base, sub-base e subleito. A CCSS possibilita antecipar a resposta do solo a alterações de umidade, auxiliando no dimensionamento mais adequado das camadas do pavimento e dos sistemas de escoamento.

2.2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A CURVA CARACTERÍSTICA DE SUÇÃO DE SOLOS

Georgetti (2010) destaca que os principais fatores que influenciam a forma da curva característica de sucção de solos são a granulometria, sua estrutura e mineralogia. Assim, a forma da curva de retenção de umidade do solo depende de diversas características, como a composição mineralógica, a distribuição granulométrica, a textura, a estrutura e o índice de vazios, entre outros. A Figura 2.9 apresenta a variação da curva de retenção para diferentes tipos de solo.

Observa-se assim que solo arenoso tem uma entrada de ar menor, uma zona capilar menor e um decaimento de umidade mais acentuado com o aumento da sucção. Os solos com granulometria mais fina têm maior zona capilar e maior valor de entrada de ar, pois o fenômeno da capilaridade é inversamente proporcional ao tamanho do poro. Como resultado da drenagem mais lenta dos poros em solos mais finos, o decaimento da curva é mais suave com a diminuição do tamanho dos poros. A umidade residual é atingida apenas em solos argilosos quando a sucção é muito alta. As curvas também mostram que o solo mais fino teoricamente tem um valor de umidade volumétrica na saturação maior. No entanto, outros fatores, como tensões históricas e processos de compactação, também influenciam na retenção de umidade do solo.

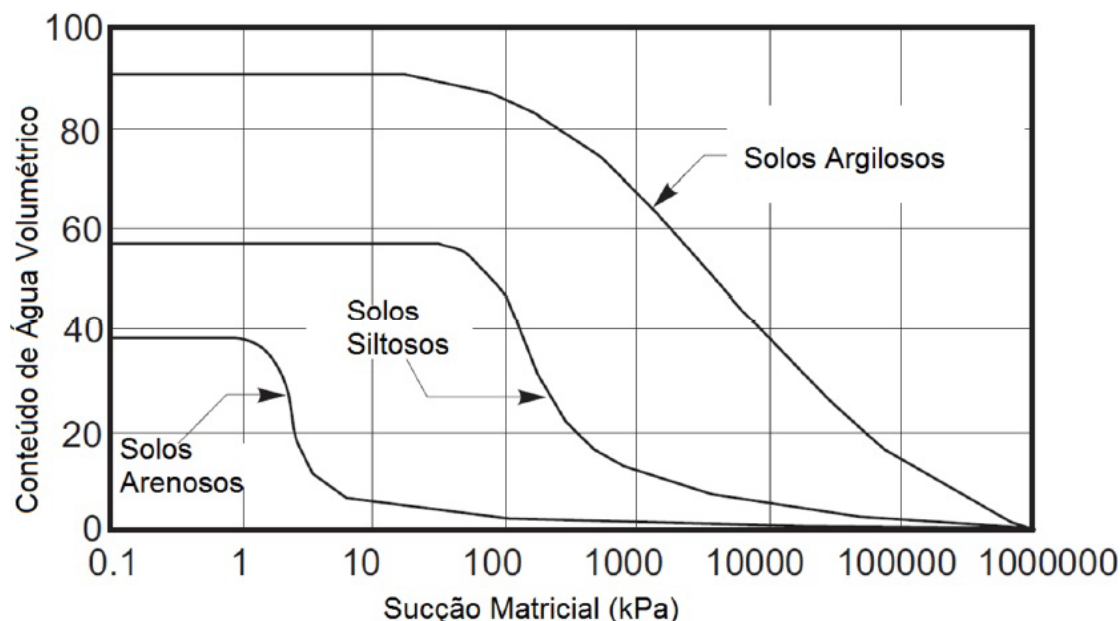


Figura 2.9 - Curvas características típicas para solos arenosos, siltosos e argilosos (Fredlund e Xing, 1994).

O índice de vazios para um solo específico é outra variação significativa da curva característica de sucção que deve ser examinada. Esta variação é mostrada na Figura 2.10, mostrando que a porosidade aumenta com o índice de vazios inicial e , portanto, a umidade volumétrica na saturação aumenta. O valor de entrada de ar é alterado pelas variações no índice de vazios inicial, mas isso não afeta muito a região residual, pois as curvas convergem após o valor de entrada de ar.

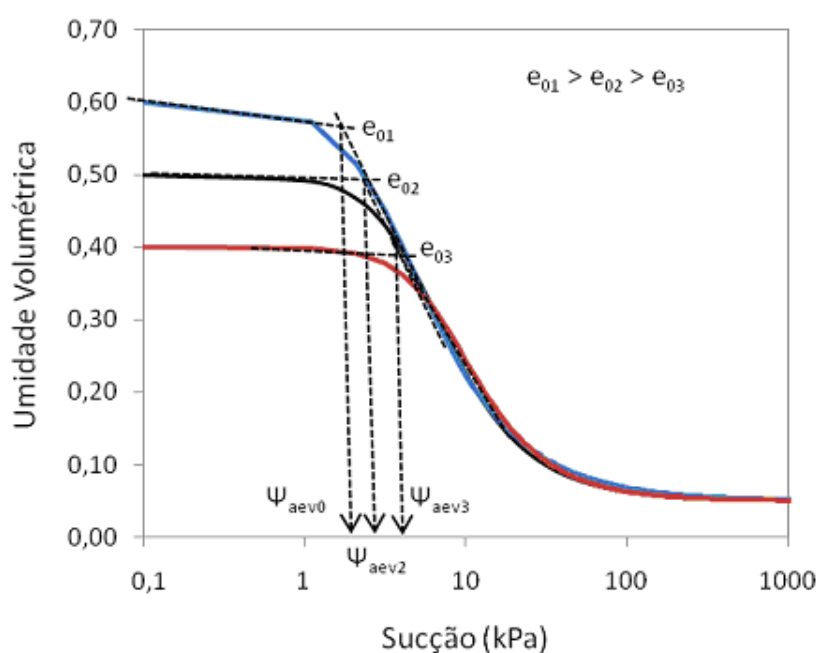


Figura 2.10 - Variação da CCSS com o índice de vazios do solo. Guizelini (2011).

Para obter a curva de retenção do solo, existem dois métodos diferentes: a secagem, onde a amostra de solo inicialmente saturada é drenada até alcançar o teor de água remanescente, e o umedecimento, onde a amostra de solo inicialmente seco é progressivamente umedecido até atingir a saturação. A relação entre a sucção e a umidade do solo é caracterizada por não linearidade e histerese, ou seja, o comportamento entre as variáveis depende do processo antecedente de umedecimento ou secagem. A histerese na curva característica da sucção é causada pela trajetória de umedecimento e secagem, como demonstrado experimentalmente (Hillel, 1971; Presa, 1982; entre outros). A quantidade de água retida durante o processo de secagem é geralmente maior do que durante o processo de umedecimento. Esse impacto em uma curva característica típica é ilustrado na Figura 2.11. A causa dessa histerese são alguns fatores tais como a geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais; influência do ângulo de contato solo-água que varia segundo o avanço ou recuo do menisco devido à rugosidade da superfície do grão; ocorrência de ar aprisionado nos poros, reduzindo o teor de água no processo de umedecimento; história de secagem e umedecimento do material; liberação gradual do ar dissolvido na água (Presa, 1982).

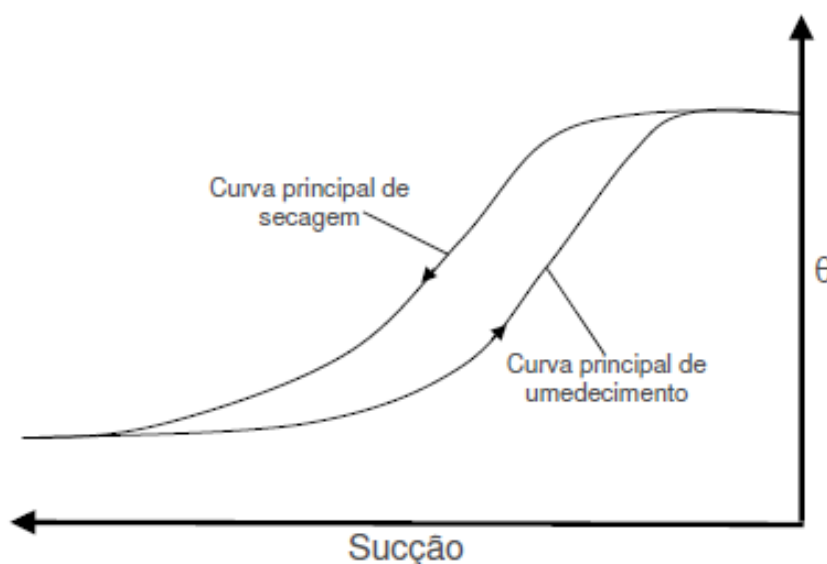


Figura 2.11 - Efeito da histerese na curva característica de sucção (Hillel, 1971).

2.2.3 MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCCÃO DE SOLOS

Segundo Vilar (2021) a curva característica de sucção de solos tem várias aplicações como na caracterização do solo quanto às suas possibilidades de retenção de água, auxiliar em cálculos associados ao fluxo e armazenamento de água em solos e ainda de servir na previsão de propriedades de determinação experimental mais complexa, como a função condutividade hidráulica e a resistência ao cisalhamento. Para esses propósitos é comum necessitar-se de uma descrição matemática e diversos modelos têm sido propostos para representar a curva de retenção de água pelos solos. Alguns desses modelos são analíticos e, em geral, se apoiam na descrição do tamanho e distribuição de poros, enquanto outros são equações de ajuste estatístico.

A Tabela 2.2 sintetiza diversos modelos matemáticos que servem ao ajuste da curva de retenção.

Tabela 2.2 - Exemplos de modelos matemáticos de curvas de retenção (Adaptado de Vilar, 2021).

Modelo	Equação	Parâmetros
Gardner ⁽¹⁾ (1958)	$\Theta = \frac{1}{1 + (q \cdot s)^n}$	q – parâmetro de ajuste; n – relacionado à inclinação do ponto de inflexão da curva.
Brooks & Corey (1964)	$\Theta = \left(\frac{s_b}{s}\right)^\lambda \quad p/ s > s_b$ $\Theta = 1 \quad p/ s < s_b$	s_b – pressão de entrada de ar; λ – índice de distribuição de poros.
Williams et al. (1983)	$\ln \Theta = a_1 + b_1 \cdot \ln s$	a_1 e b_1 – parâmetros de ajuste.
McKee & Bumb (1987)	$\Theta = \frac{1}{1 + A \cdot e^{(a \cdot s - B)}}$	A , a e B – parâmetros de ajuste.
van Genuchten (1980) ⁽²⁾	$\Theta = \left[1 + (\alpha_v \cdot s)^n\right]^m$	α_v – parâmetro de ajuste; m – parâmetro associado às condições residuais; n – parâmetro associado à drenagem de água para $s > s_b$.
Fredlund & Xing (1994)	$\Theta = C(s) \cdot \theta_s \left\{ \frac{1}{\ln[e + (s/a)^n]} \right\}^m$ $C(s) = 1 - \frac{\ln[1 + (s/S_r)]}{\ln[1 + (10^6/S_r)]}$	a – parâmetro de ajuste; m – parâmetro associado às condições residuais; n – parâmetro associado à drenagem de água (inclinação da curva) para $s > s_b$.
Groenevelt & Grant (2004)	$\Theta = 1 - \exp \left[- \left(\frac{k}{s} \right)^r \right]$	k e r – parâmetros de ajuste.
Gitirana & Fredlund (2004) ⁽³⁾	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b1} \cdot \psi_{resi}})^{d_1}} +$ $+ \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{resi} \cdot \psi_{b2}})^{d_2}} +$ $+ \frac{S_3 - S_4}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{resi}})^{d_3}} + S_4$	$\psi = s - \text{sucção}$ (notação original); ψ_{bi} – sucções de entrada de ar dos diferentes trechos da curva; ψ_{resi} – sucções residuais; S_i – grau de saturação; d_i – fatores de ponderação (ver detalhes na publicação original).
Dexter et al. (2008) ⁽⁵⁾	$\theta = C + A_1 \cdot e^{\frac{-s}{s_1}} + A_2 \cdot e^{\frac{-s}{s_2}}$	C – umidade residual; A_1 e s_1 – parâmetros associados aos poros inter – granulares; A_2 e s_2 – parâmetros associados aos poros intra – granulares.

Onde:

$\theta = (\theta - \theta_r / \theta_s - \theta_r)$ - umidade volumétrica normalizada, equivalente ao grau de saturação efetiva, S_e .

O parâmetro m de van Genuchten é comumente assumido como função do parâmetro

n : $m = (1 - 1/n)$ (Mualem) ou $m = (1 - 2/n)$ (Burdine).

2.2.2.1 ASPECTOS DO MODELO DE VAN GENUCHTEN (1980)

Na descrição do comportamento físico-hídrico de solos, o modelo de ajuste proposto por van Genuchten (1980) tem sido adotado universalmente e permite relacionar, com alto poder de predição, a energia de retenção e disponibilidade hídrica (Dexter, 2004). Dentre as suas características, está o fato de que ela tem um formato praticamente simétrico e permite uma transição suave próximo à sucção de entrada de ar e próximo à umidade residual. Nessas duas regiões ela se torna praticamente horizontal. A equação depende de três parâmetros (α , m e n) e mostra uma boa flexibilidade para acomodar dados experimentais de uma grande variedade de solos. Os parâmetros são determinados por técnicas de regressão e podem ser cinco, caso se deseje determinar também as umidades saturada e a residual na análise de regressão. Na procura de uma equação exata para a função condutividade hidráulica, van Genuchten (1980) propôs uma dependência entre os parâmetros n e m , sendo $m = (1 - 1/n)$, de acordo com uma proposta de Mualem, a mais utilizada, por se ajustar a uma grande variedade de solos, além de $m = (1 - 1/2n)$.

$$\theta_\psi = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha_1 \psi)^n]^m} \quad (2.10)$$

Onde:

θ_r , θ_w e θ_s são os teores de umidade volumétrica a uma sucção (ψ), $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$;

ψ é a sucção para qual se deseja obter a umidade;

α , m e n são parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) – $[\alpha] = 1/\text{kPa}$.

De acordo com Vilar (2021), o parâmetro n traduz a distribuição de poros, mais contínua nos baixos valores e com um único diâmetro de poros preponderante à medida que n aumenta. Assim, baixos n conduzem a uma curva mais distribuída, com maior variação de sucção entre a região de saturação e a condição residual, enquanto

elevados n , implicam quase a total drenagem do solo para uma reduzida faixa de sucção. Em relação ao parâmetro m , tem-se que valores menores de m tendem a suavizar as curvas, com redução das pressões de entrada de ar e ampliação do intervalo entre a pressão de entrada de ar e as condições residuais. Já maiores m implicam bruscas reduções de umidade desde a pressão de entrada de ar até as condições residuais.

2.2.2.2 ASPECTOS DO MODELO DUPLO DE VAN GENUCHTEN

Apesar da sua extensa utilização em relação aos demais modelos de ajuste disponíveis (Dourado Neto *et al.*, 2001), o modelo de ajuste proposto por van Genuchten (1980) não se ajusta adequadamente a solos com distribuição bimodal de poros, isto é, solos que apresentam duas classes de poros contrastantes, classificados em poros estruturais e texturais (Dexter & Richard, 2009). Em razão disso, têm sido propostas modelagens utilizando equações capazes de identificar esse comportamento, em que essas classes de poros são quantificadas por meio de dois pontos de máximo, obtidos a partir da derivação da curva de retenção de água (Dexter *et al.*, 2008); (Alfaro Soto *et al.*, 2008), e, conseqüentemente, dois pontos de inflexão.

Assim, para lidar com solos que possuem duas distribuições distintas de poros, foi proposto o modelo Duplo de Van Genuchten. Esse modelo é uma combinação de duas funções de Van Genuchten, cada uma representando uma população de poros, como observado por Durner (1994). Essa abordagem considera que os solos podem ter macroporos e microporos, cada qual com suas propriedades hidrodinâmicas distintas. A equação para o modelo duplo é descrita como:

$$\theta_{\psi} = \theta_r + \frac{(\theta_i - \theta_r)}{[1 + (\alpha_2 \psi)^{n_2}]^{m_2}} + \frac{(\theta_s - \theta_i)}{[1 + (\alpha_1 \psi)^{n_1}]^{m_1}} \quad (2.11)$$

Onde:

θ_{ψ} – Teor de água volumétrico ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$);

θ_r – Teor de água residual ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$);

θ_i – Teor de água intermediário ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$);

θ_s – Teor de água saturado ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$);

α_1 , n_1 e m_1 – Parâmetros do primeiro trecho;

α_2 , n_2 e m_2 – Parâmetros do segundo trecho;

ψ – Sucção para qual se deseja obter a umidade (kPa).

Estudos experimentais, como o de Durner (1994), mostraram que o ajuste de curvas de retenção com o modelo duplo oferece uma descrição mais precisa dos fenômenos de retenção de água em solos com grande variação de tamanhos de poros.

Essa equação permite ajustar curvas de retenção de solos com porosidade bimodal, melhorando significativamente a representação do comportamento do solo sob uma ampla gama de condições de sucção, como destacado por Seki (2007). Ele afirma que o modelo duplo é particularmente eficaz para descrever solos com forte heterogeneidade estrutural.

Carducci *et al.* (2011) obtiveram as estimativas da inclinação nos dois pontos de inflexão por meio da derivada da curva ajustada conforme fórmulas propostas por Dexter & Bird (2001). Para o cálculo do parâmetro de estimativa de primeira inclinação usou-se n_1 , o teor volumétrico de saturação e o teor volumétrico intermediário, já para parâmetro de estimativa de segunda inclinação utilizou-se n_2 , o teor volumétrico intermediário e o teor volumétrico residual.

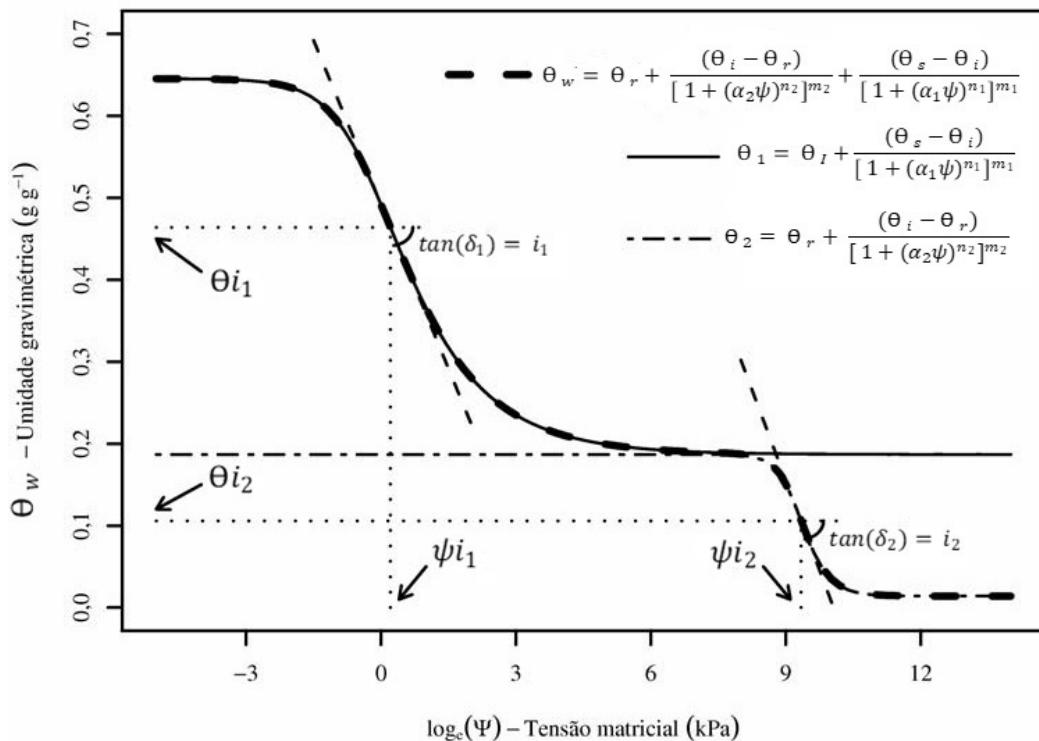


Figura 2.12 - Modelo sugerido de ajuste da função duplo van Genuchten para a curva de retenção de água no solo, com as localizações dos parâmetros associados ao modelo (adaptado de Carducci *et al.*, 2011).

Em seu estudo, Carducci *et al.* (2011) apontou que o modelo duplo van Genuchten ajusta-se adequadamente aos dados experimentais com alto poder preditivo.

O modelo Duplo de Van Genuchten é amplamente aceito por sua capacidade de representar sistemas de solo complexos, como observado por Assouline (2013), que sugere que a bimodalidade na distribuição de poros é comum em muitos tipos de solos e deve ser considerada para previsões precisas de fluxo de água e transporte de solutos.

2.3 MÉTODO DA CENTRÍFUGA PARA OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO DE SOLOS

As metodologias baseadas no fluxo centrífugo, que são propostas para avaliar a curva característica de sucção em solos não saturados, estão gradualmente atraindo mais a atenção dos engenheiros envolvidos em projetos geotécnicos, devido ao tempo reduzido necessário para a estimativa da curva de retenção.

Não é novidade o emprego de uma centrífuga para gerar um estado não saturado em uma amostra de solo. Os testes que utilizam drenagem centrífuga do solo são amplamente reconhecidos como um método confiável e eficiente para a determinação da curva característica de sucção. Briggs e McLane (1907) e Russell e Richards (1938) sugeriram métodos para calcular a curva de retenção utilizando a centrífuga. Em essência, o procedimento envolve a indução de uma gravidade específica para drenar um solo que já se encontrava saturado.

De acordo com Fredlund e Xing (1994), a centrífuga possibilita a simulação de condições de aceleração gravitacional elevada, o que agiliza a drenagem da água e diminui o tempo necessário para atingir o equilíbrio hidráulico. A força de sucção do solo aumenta à medida que a umidade do solo diminui. A metodologia tem sido utilizada extensivamente com êxito para a obtenção da curva de retenção de água e da condutividade hidráulica em solos não saturados.

Corey (1977) examinou amostras de solo com drenagem livre. Ele observou que, como a força centrífuga impulsiona o fluxo de água na direção contrária (para fora), o gradiente de pressão negativa induzido na amostra de solo se move para dentro. Freitas Júnior e Silva (1984) estudaram o impacto do período de centrifugação em amostras de Latossolo Vermelho do Cerrado. Eles propuseram que o tempo

necessário para equilibrar a umidade no solo é de três horas. Esses estudos mostram que a questão do período de centrifugação necessário para o equilíbrio ainda precisa ser estudada. Em particular, eles devem levar em consideração as variações dessa resposta dependendo do tipo de solo.

Além disso, o método da centrífuga tem sido empregado para estudar a influência de fatores como a estrutura do solo e a compactação na curva de retenção de água. De acordo com Ghanbarian-Alavijeh *et al.* (2013), a centrífuga permite aplicar diferentes níveis de aceleração gravitacional e investigar como esses fatores afetam a retenção de água em solos não saturados. Esses estudos contribuem para uma compreensão mais abrangente das propriedades hidráulicas dos solos e auxiliam no desenvolvimento de modelos e métodos de previsão mais precisos.

Khantzode *et al.* (2002) utilizaram uma centrífuga de pequena escala, testaram várias amostras de solo com altura de 15 mm anexadas a discos cerâmicos de diferentes alturas para identificar a curva de retenção de água no solo com rotações de até 2500 rpm. Os resultados centrífugos de Khantzode *et al.* (2002) foram muito bons, evidenciando que havia coerência entre os valores de teor de água e sucções aplicadas; no entanto, eles não foram precisos quando comparados aos resultados obtidos por meio de uma placa de pressão e uma célula de tempo. Os autores concluem que existe uma concordância razoavelmente boa entre os resultados experimentais obtidos usando procedimentos convencionais nos solos estudados e frisam que os resultados do estudo foram encorajadores para engenheiros geotécnicos que usam curvas características solo-água para interpretar ou prever o comportamento de engenharia de solos não saturados. Também destacam que mais estudos precisam ser realizados para determinar a influência das forças de gravidade aumentadas nas amostras de solo e que se deve ter mais cuidado para garantir que a densidade inicial e as condições de teor de água são as mesmas para amostras testadas usando a centrífuga e os outros métodos.

Dell'Avanzi *et al.* (2004) analisaram soluções analíticas de fluxo centrífugo não saturado, concluindo que a relação entre o comprimento da amostra e o raio da centrífuga determina o comprimento da amostra quando submetida a um fluxo não saturado sob um gradiente hidráulico unitário. Se a extensão da amostra exceder um décimo do diâmetro da centrífuga, a sucção do solo será reduzida na região próxima à parte superior da amostra. Isso acontece porque a força centrífuga se altera

conforme o raio da centrífuga se estende. Portanto, para determinar a extensão da amostra submetida a um fluxo centrífugo sob um gradiente hidráulico unitário, o teste deve incluir a instrumentação adequada em voo que permita medir a sucção mátrica e o nível de umidade durante o procedimento. É necessário dispor de instalações consideravelmente grandes e equipamentos centrífugos caros e sofisticados para suprir essa demanda.

Caputo e Nimmo (2005) utilizaram um método centrífugo em estado quase permanente para estudar as propriedades hidráulicas de solos não saturados. Foi conduzido um experimento utilizando amostras de solo argiloso, obtendo uma curva de retenção precisa e detalhada. Eles observaram que o método centrífugo permitiu a medição de baixos potenciais matriciais, o que era difícil de ser alcançado com as abordagens convencionais. Além disso, o método mostrou-se capaz de preservar o equilíbrio do solo durante os ensaios, minimizando possíveis perturbações.

McCartney (2007) utilizou uma nova abordagem experimental para determinar as características hidráulicas de solos não saturados usando um permeâmetro centrífugo, mostrado na Figura 2.13, onde ele foi utilizado para determinar a curva de retenção de água. Os objetivos por trás do desenvolvimento do permeâmetro centrífugo foram um tempo de teste razoável, medição de todas as variáveis relevantes para o fluxo de água em solos não saturados e uma metodologia que permite interpretação de dados experimentais para determinar as características hidráulicas. O fluxo de água em estado estacionário permite uma interpretação direta e repetível dos resultados da instrumentação, condições de contorno e dados de fluxo para determinar as características hidráulicas. Foi observado que durante o fluxo de água em estado estacionário na centrífuga, a sucção e o teor de água foram relativamente uniformes ao longo do eixo longitudinal do permeâmetro, e o limite de saída teve uma influência desprezível no perfil de sucção. No geral, a determinação rápida e direta das características hidráulicas de solos não saturados foi obtida com sucesso usando a tecnologia de centrifugação. Consequentemente, a abordagem do permeâmetro centrífuga ajuda a promover o uso de características hidráulicas de solos insaturados num projeto de engenharia geotécnica.

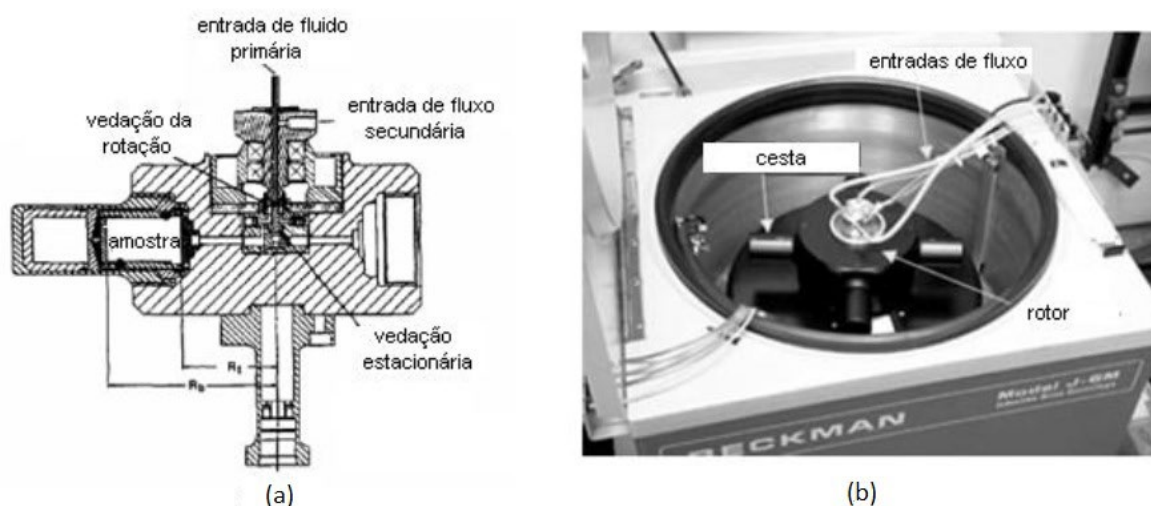


Figura 2.13 - Conca and Wright (1994): (a) esquema do permeâmetro; (b) centrífuga In McCartney (2007).

Reatto (2008) realizou uma série de experimentos em diferentes solos tropicais em amostras de 50 mm impostas a rotações de até 9200 rpm sem utilização de disco cerâmico, os resultados obtidos pelo método de centrifugação foram comparados com outros métodos amplamente utilizados, como o método da placa de pressão e o método da tensão de entrada e saída. Os resultados indicaram que, em geral, o método de centrifugação forneceu resultados consistentes e comparáveis aos obtidos pelos métodos de referência. O método de centrifugação proposto por Reatto (2008) baseia-se na aplicação de uma força centrífuga para avaliar a curva característica de retenção de água do solo. Essa técnica permite a determinação dos teores de umidade do solo em diferentes potenciais matriciais, fornecendo informações importantes sobre a disponibilidade de água e a capacidade de armazenamento do solo.

Reis *et al.* (2011) usaram uma pequena centrífuga de bancada para encontrar as curvas características de sucção e as funções de condutividade hidráulica em solos não saturados moldados em cilindros de 20 mm submetidos a um fluxo transiente de rotações de até 3500 rpm. Para isso, eles usaram amostras remoldadas e indeformadas de um solo residual maduro e de um solo jovem de gnaisse, ambos com o mesmo perfil. Os resultados da curva de retenção de água no solo apresentaram uma boa concordância com as curvas obtidas pelos métodos convencionais de funil de placa porosa, câmara de pressão e papel filtro.

É fundamental comparar os ensaios com discos cerâmicos com os ensaios sem discos cerâmicos para determinar a interferência dos discos. Isso se deve

principalmente aos ensaios de determinação da função de condutividade hidráulica, pois um disco inadequado pode interferir no fluxo, interferindo assim na medida da condutividade hidráulica do solo. Além disso, nestes trabalhos não há estudo mais aprofundado da técnica com o objetivo de sugerir que é possível obter a curva de retenção de água no solo de forma completa. Em outras palavras, eles não exploraram a metodologia com o objetivo de estimar de forma confiável a curva característica de sucção a partir dos valores de sucção do solo saturado até os valores de sucção do solo totalmente seco. Um esquema do princípio fundamental da centrífuga usado por Reis *et al.* (2011) é apresentado na Figura 2.14.

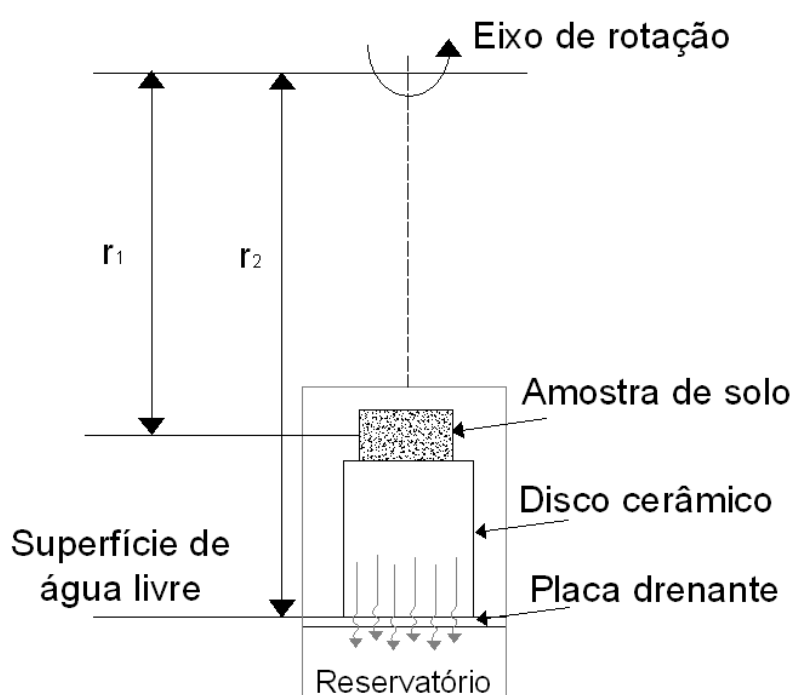


Figura 2.14 - Ilustração do princípio básico da centrífuga de pequena escala adotado por Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011).

No estudo de Rahardjo *et al.* (2018), é demonstrado que o método centrífugo pode ser usado para criar uma curva de retenção de água no solo para um solo arenoso, para uma areia argilosa e uma argila arenosa sem discos com rotações até 3900 rpm e complementação através do método do WP4. As amostras foram apoiadas diretamente sob a placa drenante e as sucções começaram em 0,66 kPa e chegaram a 250,19 kPa. Os autores decidiram usar o método do potenciômetro de orvalho (WP4C) para completar a curva quando as sucções eram superiores a 250 kPa. O esquema de ensaio para a centrífuga utilizada por Rahardjo *et al.* (2018) está ilustrado na Figura 2.15.

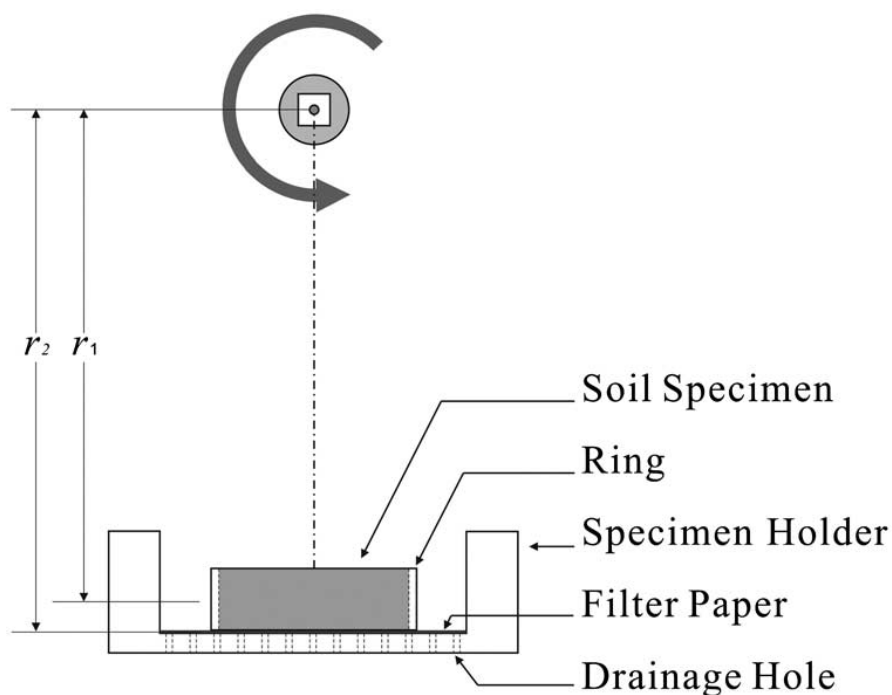


Figura 2.15 - Ilustração do esquema da centrífuga de pequena escala utilizado por Rahardjo *et al.* (2018).

Lozano *et al.* (2020) apresentam um estudo de obtenção curvas de retenção de água no solo utilizando uma centrífuga de bancada com rotores de ângulo fixo de solos de diferentes composições texturais. Foram comparados os resultados obtidos pelo método da centrífuga com o método da câmara de pressão (Richards, 1941), onde foram apontadas maiores divergências no resultado para altas sucções (acima de 100 kPa). Segundo os autores, para os solos trabalhados, o tempo de centrifugação de 60 min foi adequado para extração de solução do solo, no entanto, esse período precisa ser aumentado para garantir que o equilíbrio real seja alcançado. Eles concluem que o método oferece uma abordagem eficiente para extrair a solução do solo e determinar as curvas de retenção de água, sendo o sistema proposto capaz de extrair soluções do solo de forma rápida, repetível e simples.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste capítulo é apresentar os fundamentos da centrifuga de pequena escala que foi utilizada neste trabalho para obtenção da curva característica de sucção de solos não saturados. Ele também descreve o componente experimental, incluindo os solos estudados, suas características e os métodos utilizados para obter a curva característica de sucção tanto pelo método da centrifuga quanto pelos métodos convencionais (funil de placa porosa, câmara de Richards e papel filtro).

Para a realização dos ensaios e a obtenção da curva característica de sucção foram escolhidos dois solos distintos que foram estudados de diferentes maneiras, por meio de amostras remoldadas e indeformadas. Para classificação dos solos foram realizados ensaios de caracterização de solos (granulometria conjunta, limites de consistência, massa específica dos sólidos) seguindo as normas técnicas da ABNT.

3.1 PRINCÍPIO BÁSICO DA CENTRÍFUGA

O programa de ensaios neste trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). A centrifuga de pequena escala Cientec CT 6000, especialmente adaptada, com quatro cestas é mostrada na Figura 3.1.

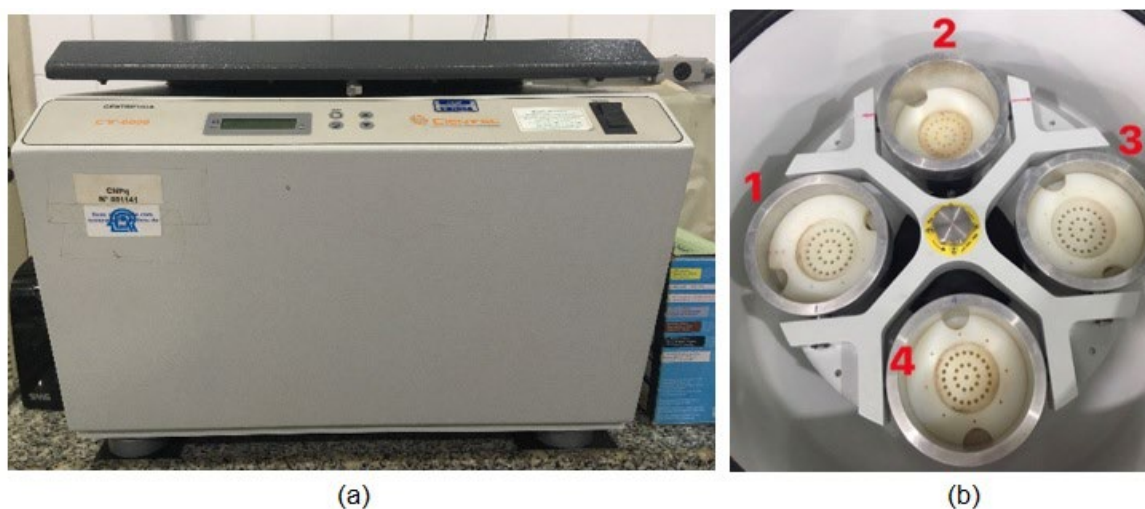


Figura 3.1 - Vista interna (a) e externa (b) da centrifuga de pequena escala Cientec CT 6000.

A cesta centrifuga é feita de um reservatório para acumular a água que sai da amostra, posicionado sob uma placa de drenagem, e discos cerâmicos de alto fluxo

colocados em várias cestas sobre a placa de drenagem. Foram trabalhadas amostras de 20 mm e 50 mm de altura inseridas em anéis metálicos. As amostras de 20 mm de altura também são ensaiadas sobre discos cerâmicos, onde para evitar a perda de partículas de solo durante o ensaio, um papel filtro saturado é colocado entre o disco e a amostra de solo. Os conjuntos foram colocados na centrífuga de pequena escala, que foi especialmente projetada para aceitar quatro amostras simultaneamente. A placa de drenagem induz uma superfície de drenagem livre na base do disco cerâmico para que toda a água que flui da amostra de solo seja completamente transmitida para o reservatório de coleta localizado abaixo do disco cerâmico.

O princípio fundamental de centrifugação utilizado nesta pesquisa é ilustrado na Figura 3.2. Um papel filtro saturado sempre é colocado diretamente sobre a amostra tanto quando ela é ensaiada diretamente sobre a placa drenante como quando é colocada sobre o disco cerâmico. A placa de drenagem induz uma superfície de drenagem livre na base do disco cerâmico para que toda a água que flui da amostra de solo seja completamente transmitida para o reservatório de coleta localizado abaixo do disco cerâmico.

No método centrífugo utilizado o raio (r_1) é a distância entre o centro de rotação e metade da altura da amostra de solo, que é alterada pela variação da altura dos discos cerâmicos. A distância do centro de rotação até a placa drenante, a superfície de gotejamento que é mantida durante o ensaio, é o raio (r_2). A centrífuga possui dois conjuntos de cestas com diferentes raios em seu eixo, desta forma, foram chamadas de cestas 1 e 3 as que têm um r_2 de 0,13965 m, enquanto foram denominadas cestas 2 e 4 as que possuem um r_2 de 0,16385 m.

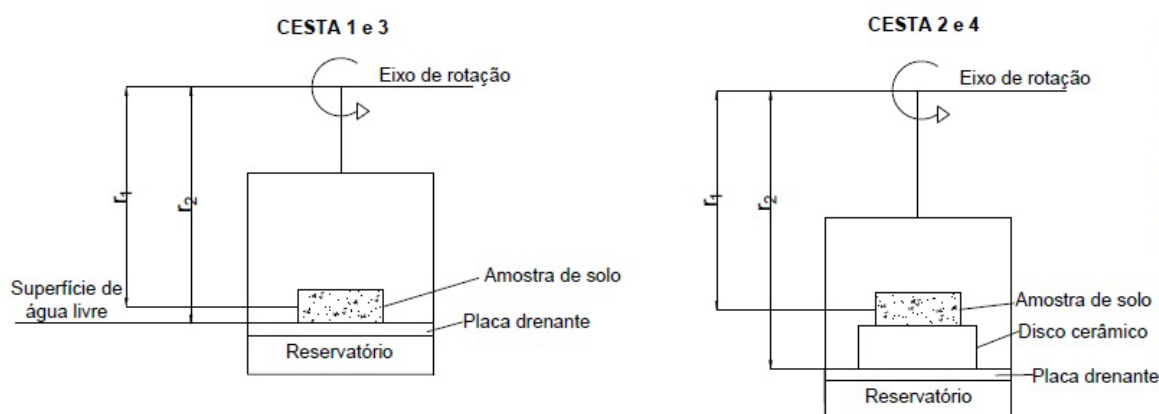


Figura 3.2 - Ilustração do princípio básico da centrifugação utilizado.

3.2 ESQUEMA DOS ENSAIOS CENTRÍFUGOS

O esquema dos ensaios centrífugos do trabalho é dado com a utilização amostras de 20 mm de altura e as amostras de 50 mm, sendo todas as amostras, sejam elas remoldadas ou indeformadas, preparadas e saturadas cuidadosamente com os índices físicos bem próximos.

Os ensaios foram feitos em determinadas etapas, onde em cada etapa foram utilizadas rotações diferentes (sempre em ordem crescente). Cada etapa teve duração de cerca de 2 horas e 30 minutos, onde num primeiro momento a centrífuga rodou por 90 minutos diretamente, sendo aferidos os pesos de cada amostra úmida, e foram submetidas mais duas rotações de 30 minutos, onde se era novamente aferidos os pesos das amostras, constatando equilíbrio através da repetição do valor obtido na pesagem das amostras. Assim, as quatro etapas são apresentadas:

Na primeira etapa, a centrifugação ocorreu com amostras de 20 mm nos cestos 1 e 3 e as de 50 mm nos cestos 2 e 4 nas rotações de 300, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 rpm sem utilização de discos cerâmicos.

Na segunda etapa, a centrifugação foi feita somente com amostras de 50 mm, também sem discos, nos cestos 2 e 4 na rotação de 3500 rpm, onde ela foi submetida a máxima rotação do equipamento trabalhado, com o fim desta etapa houve a finalização do uso das amostras de 50 mm de altura. Durante a execução da segunda etapa, as amostras de 20 mm foram enroladas em papel filme e embaladas com fitas e ficaram guardadas dentro de uma caixa de isopor em câmara úmida, após o término desta etapa, estas amostras foram pesadas e se verificou que não houve perda de umidade nas mesmas.

Na terceira etapa, a centrifugação foi realizada amostras de 2 cm nos cestos 1 e 3 apoiadas agora nos discos cerâmicos de 24 mm com rotações de 2000 e 3000 rpm.

Na quarta etapa, centrifugação ocorreu com amostras de 2 cm nos cestos 1 e 3 apoiadas agora no discos cerâmicos de 48 mm com rotações de 3000 e 3500 rpm.

Com a finalização de todas as etapas, as amostras centrifugadas foram pesadas e colocadas em estufa a 105 °C por 24 horas para determinação do peso seco real de cada amostra ensaiada.

3.2.1 CÁLCULO DA SUCCÃO DAS AMOSTRAS CENTRIFUGADAS

O cálculo da sucção das amostras centrifugadas é apresentado através de duas formas. A primeira forma de medição da sucção é feita através de uma medição pontual da sucção na amostra, onde este cálculo é utilizado tanto para os ensaios realizados com discos cerâmicos como para os realizados diretamente na placa drenante. Assim, para calcular a sucção em qualquer ponto da amostra, é usada a equação proposta por Corey (1977) e é expressa por:

$$\psi = \frac{\gamma_w \omega^2}{2g} (r_2^2 - r_1^2) \quad (3.1)$$

onde:

ψ = a sucção na amostra de solo;

r_1 = a distância específica medida a partir do centro de rotação;

r_2 = a distância do centro de rotação até a superfície de gotejamento;

γ_w = peso específico do fluido;

ω = é a velocidade angular (em radianos por segundo);

g = é a aceleração da gravidade.

A equação proposta por Corey (1977) é utilizada para todos os ensaios realizados, onde são consideradas as devidas distâncias específicas medidas a partir do centro de rotação e as distâncias do centro de rotação até a superfície de gotejamento. Assim, na Tabela 3.1 temos as previsões das sucções a serem obtidas no centro da amostra para cada situação dos ensaios com as amostras de 20 mm de altura e na Tabela 3.2 para as amostras de 50 mm de altura.

Tabela 3.1 - Velocidade equivalente a sucção no centro das amostras de 20 mm de altura.

Cestos Opostos		1 e 3	2 e 4	
Disco Cerâmico		Sem Disco	24 mm	48 mm
W (rpm)	W (rad/s)	Sucção no Centro (kPa)		
300	31,42	1,35		
500	52,36	3,76		
1000	104,72	15,05		
1500	157,08	33,87		

2000	209,44	60,21	223,25	
2500	261,80	94,08		
3000	314,16	135,47	502,32	786,88
3500	366,52			1071,03

Tabela 3.2 - Velocidade equivalente a sucção no centro das amostras de 50 mm de altura.

Cestos Opostos		1 e 3
W (rpm)	W (rad/s)	Sucção no Centro (kPa)
300	31,42	3,81
500	52,36	10,57
1000	104,72	42,30
1500	157,08	95,17
2000	209,44	169,19
2500	261,80	264,36
3000	314,16	380,67
3500	366,52	518,14

A segunda forma de medição da sucção é feita a partir da medição média da sucção na amostra. A medida da sucção média das amostras centrifugadas é realizada para os ensaios com as amostras apoiadas diretamente na placa drenante, sem a utilização dos discos cerâmicos. Para o cálculo da sucção média na amostra é utilizada uma readaptação da equação proposta por Freitas Júnior *and* Silva (1984):

$$\psi = \frac{1}{6} \frac{\gamma_w \omega^2}{g} L (3r_2 - L) \quad (3.2)$$

Onde:

ψ = a sucção média na amostra de solo;

L = altura da amostra;

r_2 = a distância do centro de rotação até a superfície de gotejamento;

γ_w = peso específico do fluido;

ω = é a velocidade angular (em radianos por segundo);

g = é a aceleração da gravidade.

O cálculo da sucção média da amostra ensaiada é realizado somente para os ensaios realizados sem os discos cerâmicos, levando em consideração as devidas alturas das amostras ensaiadas e as distâncias do centro de rotação até a superfície de gotejamento. Assim, na Tabela 3.3 temos as previsões das sucções médias a

serem obtidas para os ensaios com as amostras de 20 mm de altura e na Tabela 3.4 para as amostras de 50 mm de altura.

Tabela 3.3 - Velocidade equivalente à sucção média das amostras de 20 mm de altura.

Cestos Opostos		1 e 3
W (rpm)	W (rad/s)	Sucção Média (kPa)
300	31,42	1,34
500	52,36	3,72
1000	104,72	14,87
1500	157,08	33,45
2000	209,44	59,46
2500	261,80	92,91
3000	314,16	133,79
3500	366,52	182,10

Tabela 3.4 - Velocidade equivalente à sucção média das amostras de 50 mm de altura.

Cestos Opostos		1 e 3
W (rpm)	W (rad/s)	Sucção Média (kPa)
300	31,42	3,70
500	52,36	10,28
1000	104,72	41,13
1500	157,08	92,55
2000	209,44	164,53
2500	261,80	257,08
3000	314,16	370,19
3500	366,52	503,88

A partir da obtenção das previsões das sucções para cada velocidade angular imposta na centrifugação e a avaliação das formulações empregadas, foi constatado pouca variação nos valores de sucção obtidos a partir das duas fórmulas utilizadas. Assim, foi definido que para as amostras de 20 mm a formulação empregada é a da medição pontual no centro da amostra, devido a utilização dos discos cerâmicos, já nas amostras de 50 mm a equação usada é a da sucção média, em razão de melhor empregabilidade desta nas amostras de maior tamanho.

3.3 COMPONENTE EXPERIMENTAL

O programa de ensaio foi conduzido na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), sendo os ensaios centrífugos realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV), assim como os ensaios de papel filtro. Já os

ensaios de câmara de pressão de Richards e de funil de placa porosa foram feitos no Laboratório de Solos (LSOL), que pertence ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA), também na UENF.

Para a execução e estudo das curvas de retenção de água, foram trabalhados dois solos distintos, um se caracterizando como coluvionar que foi coletado de um talude na Região da Lagoa de Cima, localizada em Campos dos Goytacazes – RJ e um solo residual jovem de gnaiss, coletado na mesma região. Os solos foram moldados nas condições remoldadas e indeformadas. A Figura 3.3 mostra o talude de solo coluvionar, assim como sua moldagem em campo para retirada das amostras suas indeformadas, e a Figura 3.4 o solo jovem residual, assim como sua moldagem em campo para retirada das suas amostras indeformadas.



Figura 3.3 – Talude e extração do solo coluvionar indeformado.



Figura 3.4 – Talude e extração do solo jovem residual indeformado.

Para preparação das amostras remoldadas, foi retirada uma quantidade de solo de ambos os taludes onde uma certa porção foi destorroadada e passada na peneira número 4, como mostrado na Figura 3.5. Posteriormente a remoldagem foi realizada nos respectivos anéis sob condições específicas para garantir a total uniformidade entre cada amostra. Para a execução do processo, calculou-se a massa do solo correspondente ao volume de cada anel em um determinado nível de umidade. Então, a massa de solo foi dividida em camadas e um compactador pequeno foi empregado para apenas assentar essas camadas até atingir o volume total do anel. Este método foi implementado para reduzir as heterogeneidades comumente encontradas em amostras não modificadas, possibilitando uma comparação mais aprofundada entre os métodos tradicionais e a metodologia alternativa que utiliza a centrifuga.



Figura 3.5 – Destorroamento e peneiramento dos solos coluvionar e jovem residual .

Para ambos os solos foram feitos ensaios de granulometria segundo a norma da ABNT NBR 7181. A Figura 3.6 mostra as curvas de distribuição granulométrica dos solos coluvionar e jovem residual.

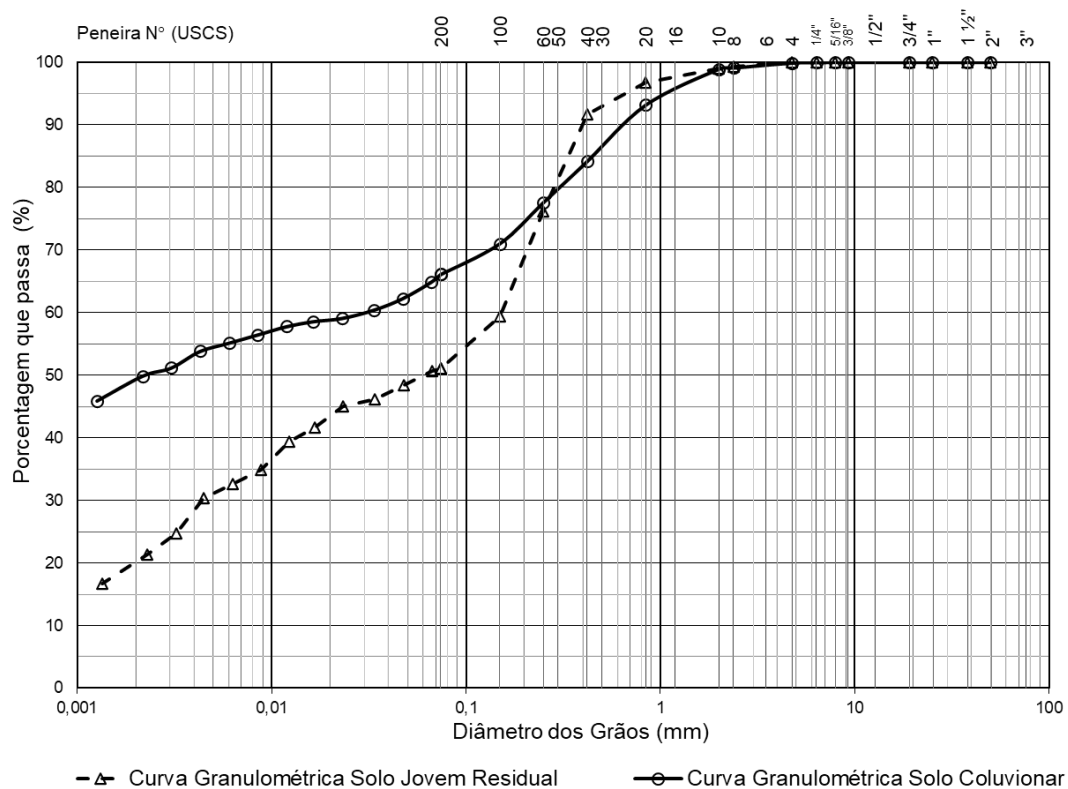


Figura 3.6 – Curva granulométrica dos solos coluvionar e jovem residual .

A Tabela 3.5 apresenta importantes características dos solos obtidos através do ensaio de caracterização. É possível observar-se que o solo coluvionar possui em sua constituição 35% de areia, 15% de silte e 49% de argila, já o solo jovem residual tem 49% de areia, 30% de silte e 20% de argila.

Tabela 3.5 - Características solos coluvionar e jovem residual.

Solo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ASTM 2003
Colúvio	35	15	49	50,0	28,1	22,0	CL
Jovem	49	30	20	33,0	19,2	13,7	ML

Já a Tabela 3.6 apresenta os índices físicos médios das amostras ensaiadas dos solos coluvionar e jovem residual tanto no estado remoldado como no indeformado.

Tabela 3.6 - Índices físicos médios dos solos ensaiados

Solo	W (%)	γ kN/m ³	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	e	n (%)	Sr (%)
Colúvio Remoldado	17,7	14,9	26,3	12,7	1,1	47,9	46,8
Colúvio Indeformado	17,6	14,2	26,3	12,1	1,2	47,8	46,6
Jovem Remoldado	16,0	16,0	26,5	13,8	0,9	48,0	46,8
Jovem Indeformado	9,4	15,4	26,5	14,0	0,9	47,9	46,2

3.4 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCCÃO

3.4.1 MÉTODOS CONVENCIONAIS

A curva característica de sucção é dada pela relação entre o teor de água (gravimétrico ou volumétrico) do solo e a sucção. Com as curvas sendo obtidas por meio da trajetória de secagem, inicialmente as amostras foram saturadas, onde o atingimento do estado de saturação depende do teor de água de cada amostra de solo. Através da medição dos pesos das amostras frequentemente foi verificada essa condição.

São apresentados assim três métodos convencionais de determinação da curva de retenção: o funil de placa porosa, a câmara de pressão de Richards e o

método do papel filtro. Esses métodos se destacam por serem amplamente utilizados e exigirem recursos e equipamentos laboratoriais relativamente simples. Em relação à faixa de sucções possível em cada método, essas técnicas também podem ser consideradas complementares entre si em algumas situações. O funil de placa porosa é usado para medir e verificar sucções baixas, a técnica da câmara de Richards é realizada para as intermediárias, enquanto para sucções mais altas, o método do papel filtro é usado.

3.4.1.1 FUNIL DE PLACA POROSA

Este procedimento é aplicado em sucções matriciais até aproximadamente 20 kPa, utilizando equipamentos básicos. A sucção matricial desejada é realizada na amostra de solo através de uma placa porosa, impulsionada por uma determinada coluna de água. O corpo de prova é colocado em um funil de placa porosa ligado a uma pipeta graduada, que serve para identificar os pontos das curvas características de sucção por meio do método.

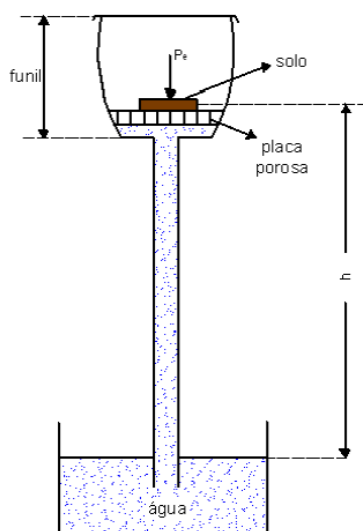


Figura 3.7 - Funil de placa porosa (Reichardt, 1985).

Para a execução do ensaio, as amostras foram previamente preparadas e saturadas em índices físicos próximos, sendo utilizadas uma amostra de 20 mm e uma de 50 mm para cada solo em cada estado (remoldado ou indeformado). Assim, todas amostras foram colocadas nos funis com a placa porosa que permite a passagem da água da amostra através de um sistema de tubos, succionando a amostra com a

intensidade a partir da altura desde o final do tubo de gotejamento até a altura da placa drenante. Desta forma foram utilizadas as alturas de 10, 30, 60 e 100 cm, para que em cada etapa do ensaio os volumes de água liberados atrás da coluna d'água fossem medidos para as sucções aplicadas de 1, 3, 6 e 10 kPa.



Figura 3.8 – Montagem e execução do ensaio funil de placa porosa.

As amostras foram pesadas para determinação do referido peso úmido a partir do equilíbrio em cada estágio, ou seja, no momento que parasse o gotejamento em cada altura estabelecida. Após a aplicação da sucção final no término do ensaio, cada amostra de solo foi retirada e pesada, e posteriormente levada para a estufa por mais de 24 horas para calcular o peso seco e medir o teor de umidade. Como resultado, os valores de teor de água gravimétrico e volumétrico de cada sucção aplicada serão encontrados, convertidos em volume e plotados para obter os pontos iniciais da curva de retenção de água no solo.

3.4.1.2 MÉTODO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE RICHARDS

O método câmara de pressão de Richards é frequentemente empregado para avaliar as tensões de retenção de água no solo. Contudo, possui as limitações de seu alto custo de compra e por ser extremamente lento. O procedimento foi criado para

alcançar sucções superiores às obtidas pelo método do funil de placa porosa. O dispositivo é composto por uma câmara que precisa ser hermeticamente vedada e que abriga, em seu interior, uma placa cerâmica porosa de alta pressão para entrada de ar. Este sistema possibilita o gerenciamento da sucção através da técnica de translação de eixos.

O controle a sucção é feito a partir do sistema de pressão, com manômetros, controladores, filtros de ar e compressor de ar, que é responsável por captar o ar atmosférico, comprimindo este ar criando o ambiente pressurizado dentro da câmara vedada. Este ar comprimido passa pela amostra retirando a água que está nos poros que vai para a placa drenante e sai através do cano que interliga a parte interna da câmara à externa com um bico, onde a o gotejamento. Quando a saída de água, ou seja, o gotejamento pelo bico, é cessada, é constatado o equilíbrio para a pressão trabalhada.



Figura 3.9 – Montagem e execução do ensaio câmara de pressão de Richards.

O método foi utilizado para a obtenção de pontos das curvas de retenção correspondentes de valores intermediários da curva de sucção, foram pré-definidos os seguintes valores de pressão do ar a serem aplicados na câmara: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1500 kPa. Para realizar o ensaio, as amostras foram previamente preparadas e saturadas com índices físicos próximos. Foram usadas três amostras de

20 mm e uma de 50 mm para cada solo, independentemente do seu estado (remoldado ou indeformado).



Figura 3.10 – Disposição das amostras ensaiadas na câmara de pressão de Richards.

As amostras ensaiadas foram removidas da câmara a cada sucção aplicada em ordem crescente quando se constatou o equilíbrio entre a sucção realizada e a umidade associada. A partir do equilíbrio, constatado a partir do final do gotejamento pelo bico da câmara, as amostras foram pesadas e retornaram à câmara de pressão, onde foram ajustadas a próxima sucção aplicada. Depois da aplicação de todas as sucções programadas, sendo atingido o equilíbrio em cada estágio, foi feita a determinação da densidade aparente e da massa seca da amostra de solo. Após a secagem da massa, calculou-se a umidade do solo em todos os pontos trabalhados.

3.4.1.3 MÉTODO DO PAPEL FILTRO

O método do papel filtro, que foi inicialmente sugerido por Gardner (1937) é um dos métodos convencionais mais utilizados para medir a sucção do solo. A técnica envolve o uso de papéis filtro como instrumentos de medida para quantificar

indiretamente a sucção do solo matricial. A água retida em uma amostrase moverá do solo para o papel até que o equilíbrio seja alcançado.

A sucção total é aferida quando o papel não fica em contato com o solo diretamente, onde é necessário aguardar que ocorra um fluxo de vapor d'água do solo para o papel. Já a sucção matricial é obtida quando o papel filtro é colocado diretamente sobre o solo, com o fluxo de água do solo para o papel ocorre por capilaridade. Na Figura 3.11 é mostrado como ocorre os dois tipos de fluxos do solo para o papel filtro, estimando a sucção total e a matricial.

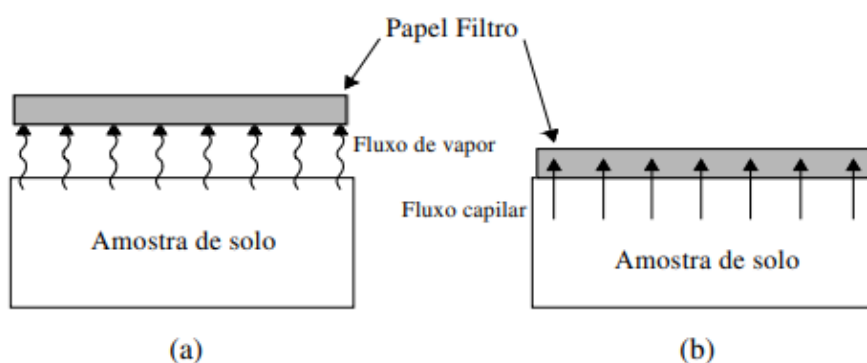


Figura 3.11 - Configurações do ensaio com papel filtro. (a) Sucção total; (b) Sucção matricial (adaptado de Marinho, 1994).

No presente trabalho objetivou-se apenas medir a sucção matricial, o papel filtro é colocado diretamente sobre a superfície da amostra para que entre em contato com a água dos poros. Nesse caso, o fluxo é apenas devido a fenômenos capilares, portanto, não haverá qualquer diferença nas características osmóticas da água transferida ao papel e da água do solo.

A sucção do solo pode ser calculada usando a curva de calibração, que é a relação entre sucção e umidade do material poroso (papel filtro). O estado de equilíbrio produz sucção idêntica no solo e no material poroso em cada uma das diferentes umidades. Para obter a sucção correta, o tempo de equilíbrio é de no mínimo 7 dias, independentemente do nível de sucção a ser medido.

O procedimento foi empregado para identificar pontos na curva de retenção que correspondem a sucções superiores a 100 kPa. O método do filtro de papel se mostra eficaz para aprimorar a definição do ramo seco em áreas onde a câmara de pressão Richards não avalia (superior a 1500 kPa).

Assim, para a realização do ensaio foram utilizadas amostras de 20 mm, que foram previamente preparadas em anéis, tanto no estado remoldado como

indeformado. Em seguida, as amostras foram saturadas até chegaram no grau de saturação de próximo de 100%, como mostrado na Figura 3.12 (a). A partir desse ponto todas as amostras foram deixadas secar ao ar em diferentes intervalos de tempo (Figura 3.12 (b)), obtendo distintas umidades. Em cada um dos corpos de prova foi colocada, tanto no topo quanto na base, uma lâmina circular de o papel filtro Whatman 42, onde conjunto papel filtro, solo e anel, foi envolvido com filme de PVC impermeável junto a um geotêxtil no topo e um na base (Figura 3.12 (c)), posteriormente foi feito o embalamento com fita e o conjunto embalado foi levado à câmara úmida dentro de uma caixa térmica por mais de 7 dias (Figura 3.12 (d)).

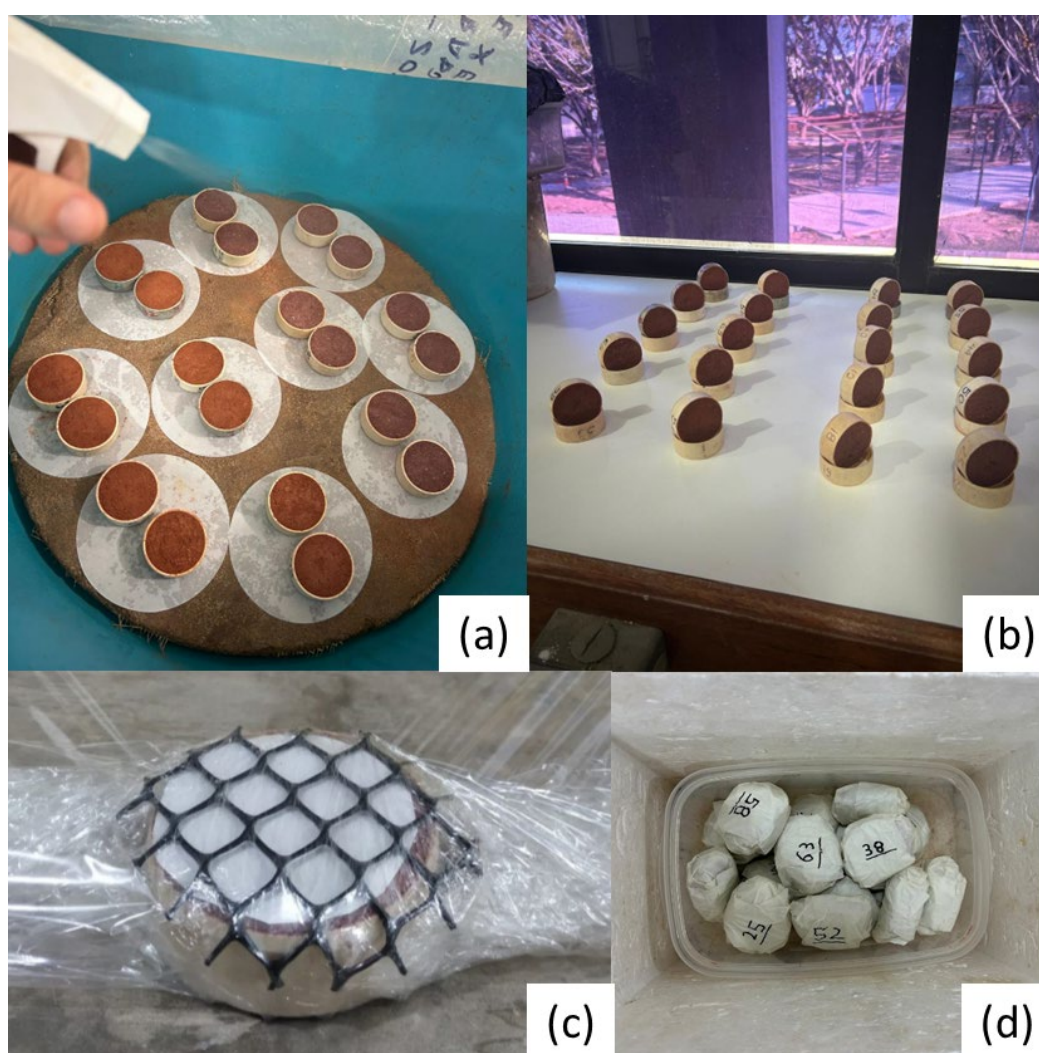


Figura 3.12 - Etapas do ensaio de papel filtro. (a) Saturação das amostras; (b) Secagem das amostras ao ar; (c) Embrulho das amostras com os papéis, os geotêxteis e filme de PVC; (d) corpos de provas embalados sendo colocados na câmara úmida.

Com o equilíbrio atingido, toda a massa de solo de cada amostra foi retirada do anel e pesada para se obter o peso úmido do solo ensaiado. Essa massa foi levada

para estufa à 105 °C por pelo menos 24 horas, obtendo-se assim o peso seco e posteriormente a umidade referente a cada amostra ensaiada.

Simultaneamente, com a abertura de cada amostra após o tempo de equilíbrio, os papéis foram retirados com auxílio de uma pinça para determinação do teor de água do papel e do solo ensaiado. O papel foi retirado foi pesado rapidamente em uma balança com resolução de 0,0001 g para obtenção do peso úmido dele. A retirada do papel exige extremo cuidado, onde deve ser transferido para um saco plástico auto selante em menos de 4 segundos. Prontamente, o papel foi colocado na estufa para secagem por duas horas, sendo esse procedimento extremamente importante. Após o tempo de equilíbrio, os papéis foram retirados com a pinça com muito cuidado para verificar peso do papel seco, permitindo posteriormente o cálculo da umidade do papel.

O cálculo da umidade do papel filtro é feito com base na sua massa seca e úmida. O valor da sucção do papel filtro, que na equalização é idêntica à das amostras é, determinado a partir de sua umidade, segundo a calibração, apresentada nas Equações 3.3 e 3.4, proposta por Chandler *et al.* (1992).

$$\psi = 10^{6,05-2,48 \cdot \log(w_p)}, w_p > 47\% \quad (3.3)$$

$$\psi = 10^{4,84-0,0622 \cdot w_p}, w_p \leq 47\% \quad (3.4)$$

Onde:

ψ – sucção matricial;

w_p – umidade do papel filtro.

3.4.2 MÉTODO DA CENTRÍFUGA

O método da centrífuga seguiu a trajetória de secagem, assim como os métodos convencionais. Os discos cerâmicos utilizados nas respectivas etapas foram submetidos à água destilada durante 48 horas antes de serem centrifugados para evitar as bolhas de ar.

Todos os corpos de prova utilizados foram preparados com índices físicos bem próximo, passando pelo processo de saturação. As amostras de 20 mm foram inseridas em um disco protetor junto a um pano permeável, para evitar perda de solo na centrifugação, já as amostras de 50 mm foram enroladas com fita e dois elásticos para prender o pano permeável, evitando a perda de solo. Assim, foi feita a saturação

das duas amostras de ambas as alturas, chegando até o estado de encharcamento, como mostra a Figura 3.13.



Figura 3.13 – Amostras de 20 e 50 mm sendo saturadas.

As amostras encharcadas foram colocadas nas cestas e ajustadas para evitar desbalanceamento durante o voo junto ao papel filtro na base, um plástico filme no topo e o cap de proteção. A execução de ensaio ocorreu com as amostras centrifugadas nas gravidades de 300, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 e 3500 rpm, como ilustrado no item 3.1. Ao fim do ensaio amostras foram transportadas para a estufa para secagem, onde a massa seca e o teor de água final foram determinados, sendo possível a plotagem da curva de retenção. A Figura 3.14 mostra o processo de montagem do conjunto de ensaio.

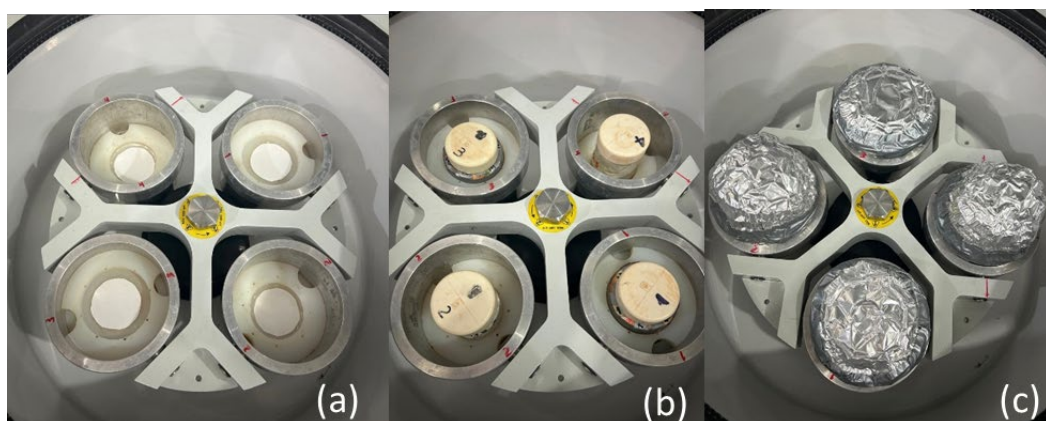


Figura 3.14 – Vista interna da centrífuga CT 6000, onde: (a) Centrífuga somente com os papéis filtro na base; (b) Inserção das amostras centrifugadas e os caps de proteção; (c) Inserção da proteção de alumínio para a execução do ensaio.

A Figura 3.15 apresenta o detalhe do conjunto com a amostra apoiada

diretamente sobre a placa drenante. Esta configuração foi utilizada nas etapas 1 e 2, onde na primeira etapa foram centrifugadas tanto as amostras de 20 mm como as de 50 mm nas rotações entre 300 e 3000 rpm, já na segunda etapa foi utilizada somente as amostras de 50 mm na rotação de 3500 rpm.

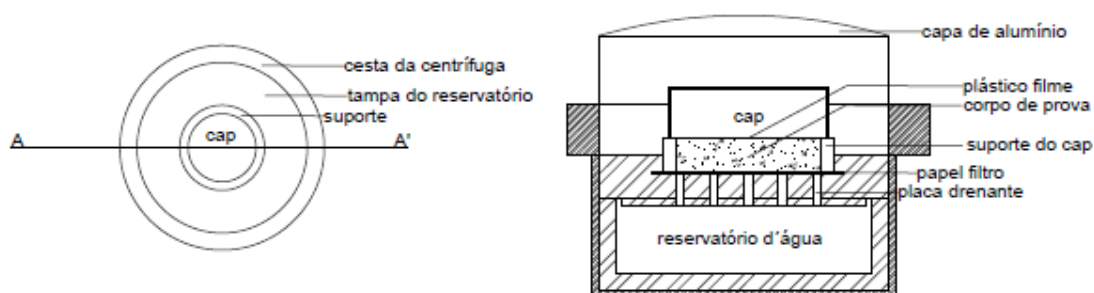


Figura 3.15 - Detalhamento do conjunto da amostra apoiada diretamente sobre a placa drenante.

Já a Figura 3.16 mostra o conjunto apoiado sobre o disco de 24 mm de altura, configuração esta que foi utilizada na etapa 3, centrifugando somente as amostras de mm junto aos discos cerâmicos nas rotações de 2000 e 3000 rpm.

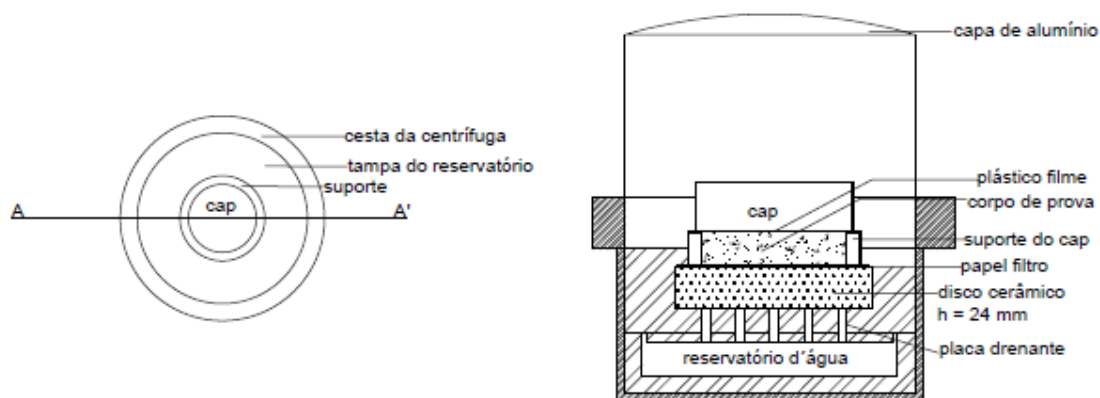


Figura 3.16 - Detalhamento do conjunto da amostra apoiada sobre o disco cerâmico de 24 mm de altura.

A Figura 3.17 apresenta o detalhe do conjunto com a amostra de 20 mm apoiada sobre o disco de 48 mm utilizado na quarta etapa do ensaio para velocidades angulares de 3.000 e 3500 rpm.

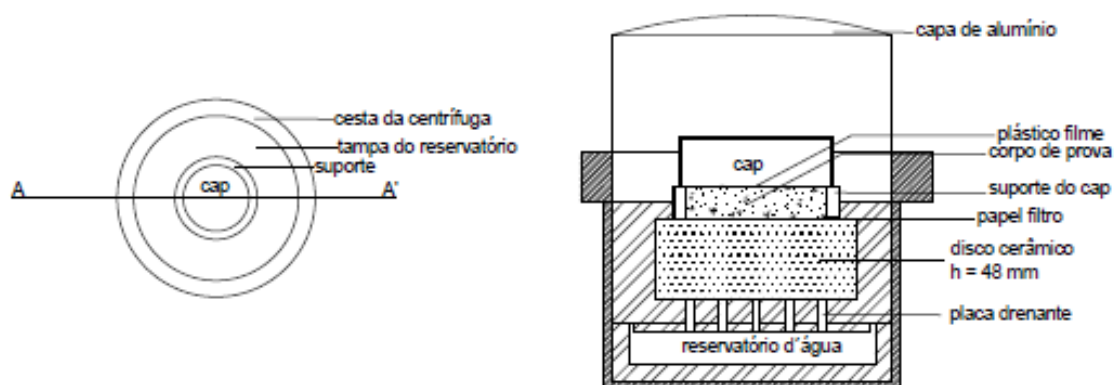


Figura 3.17 - Detalhamento do conjunto da amostra apoiada diretamente sobre o disco cerâmico de 48 mm.

Com todas as etapas concluídas, foram realizados doze voos que duraram cerca de 2 horas e 30 minutos, totalizando cerca de 30 horas de ensaio. Como para cada altura de corpo de prova foram ensaiadas duas amostras, para um resultado preciso foi-se considerada a sucção média obtida.

A disposição dos conjuntos sugeridos possibilita a análise da repetibilidade dos dados, já que as amostras de solo em discos cerâmicos de altura equivalente estão sujeitas às mesmas forças de sucção. Portanto, devem apresentar variações de umidade equivalentes para um determinado estágio do experimento (confirmadas por variações similares no peso das amostras). Por falta de instrumentação durante o voo, a verificação da condição de equilíbrio foi realizada por meio de paradas na centrífuga e medição do peso das amostras. O equilíbrio é estabelecido quando se observa a estabilidade no peso das amostras, o que foi feito com as pausas realizadas.

3.4.3 CÁLCULO DA UMIDADE REFERENTE A CADA SUCÇÃO

Para o cálculo da umidade referente a cada sucção aplicada nos métodos utilizados foram utilizadas duas equações. Sendo calculado primeiramente o teor de água gravimétrico a partir da Equação 3.5, e posteriormente o teor de água volumétrico, fazendo-se a multiplicação da umidade gravimétrico pela divisão entre a densidade do solo e da água como é mostrado na Equação 3.6.

$$W = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} \quad (3.5)$$

Onde:

W – Umidade relativa com base em massa (g/g);

P_u - Peso do solo úmido (g);

P_s - Peso do solo seco (g).

$$\theta_w = W \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (3.6)$$

Onde:

θ_w - Umidade relativa com base em volume (cm³/cm³);

W - Umidade relativa com base em massa (g/g);

ρ_d - Densidade do solo (g/cm³);

ρ_w - Densidade da água (g/cm³).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante da metodologia apresentada, foram utilizados as técnicas convencionais e o método da centrífuga para obtenção de pontos de umidade por sucção, sendo assim possível a plotagem da curva de retenção de água no solo. Em relação a execução dos ensaios, as técnicas convencionais foram bem mais demoradas que a técnica da centrífuga. Na comparação de métodos teve-se como mais demorada a técnica da câmara de pressão de Richards que levou cerca de 60 dias para obtenção de todos os pontos referentes a pressão de 25, 50, 200, 400, 800 e 1500 kPa. Já o funil de placa porosa, também utilizado com intuito de comparação, demorou cerca de 15 dias para atingir o equilíbrio e se ter a obtenção dos pontos de 1, 3, 6 e 10 kPa. O papel filtro, que foi realizado para comparação e para complementação de curva do método do papel filtro, levou cerca de 4 dias de processo de secagem e cerca de 7 dias em equilíbrio, totalizando cerca de 11 dias. Já o método da centrífuga, se mostrou eficiente e rápido, sendo obtidos no final da centrifugação onze pontos experimentais médios relativos às amostras de 20 mm, onde em sete não se fez uso do disco cerâmico e em quatro os discos foram utilizados, e oito pontos experimentais relativos às amostras de 50 mm, todos sem utilização de discos. Assim, no total foram obtidos dezenove pontos de sucção pelo método da centrífuga para cada solo e estado, com quinze não utilizando a disco, obtendo sucção de 1,34 kPa até 530,48 kPa, e quatro com a utilização de discos, obtendo sucção de até 1071,03 kPa. Levando em conta somente os ensaios centrífugos sem o disco cerâmico, feitos nas etapas 1 e 2, levou-se cerca de 20 horas para se atingir o equilíbrio final. Já nas etapas 3 e 4, que se fez uso os discos, levou-se mais 8 horas para o equilíbrio, totalizando 30 horas de centrifugação.

4.1 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE SUCÇÃO

Por serem mais demorados, foram realizados primeiramente os ensaios de câmara de pressão de Richards e de funil de placa porosa para os dois solos estudados e nas diferentes condições estabelecidas. Posteriormente foram realizados de forma concomitante os ensaios centrífugos e os ensaios com papel filtro, isso possibilitou numa maior agilidade e se mostrou eficaz para boa execução da metodologia, pois enquanto foi feita a centrifugação, os solos ensaiados com papel

filtro ficaram secando ao ar, sendo posteriormente embalados nas umidades desejadas. As CCSS foram estabelecidas por meio das seguintes relações: teor de água gravimétrico e teor de água volumétrico. A determinação da CCSS em relação ao teor de água gravimétrico foi feita com base no peso das amostras no equilíbrio em cada fase de sucção, o que possibilitou a identificação de suas respectivas umidades. Por outro lado, a umidade volumétrica é influenciada pela mudança de volume das amostras durante o ensaio. Como no método da centrífuga se tem uma considerável aplicação de gravidade durante sua execução nos estágios finais, a centrifugação foi avaliada quanto às variações de volume a partir dos estágios com velocidades angulares a partir de 2500 rpm. Fazendo-se essa verificação com paquímetro, se constatou que a deformação volumétrica máxima foi de cerca de 5% nas aplicações de velocidades de 3500 rpm. Desta forma, a densidade seca inicial foi considerada para o cálculo do teor de água volumétrico em razão de não se ter alterações significativas de variações volumétricas. Para todas as curvas, foi utilizado o ponto de referência para o solo totalmente seco, com o valor de sucção de 10^6 kPa para o teor de água igual a 0%, onde este ponto auxiliou na obtenção da CCSS completa. Os pontos obtidos foram ajustados, através de planilha eletrônica, utilizando a equação duplo van Genuchten, onde se foram obtidas as curvas ajustadas através do modelo a partir dos parâmetros que melhor ajuste de regressão.

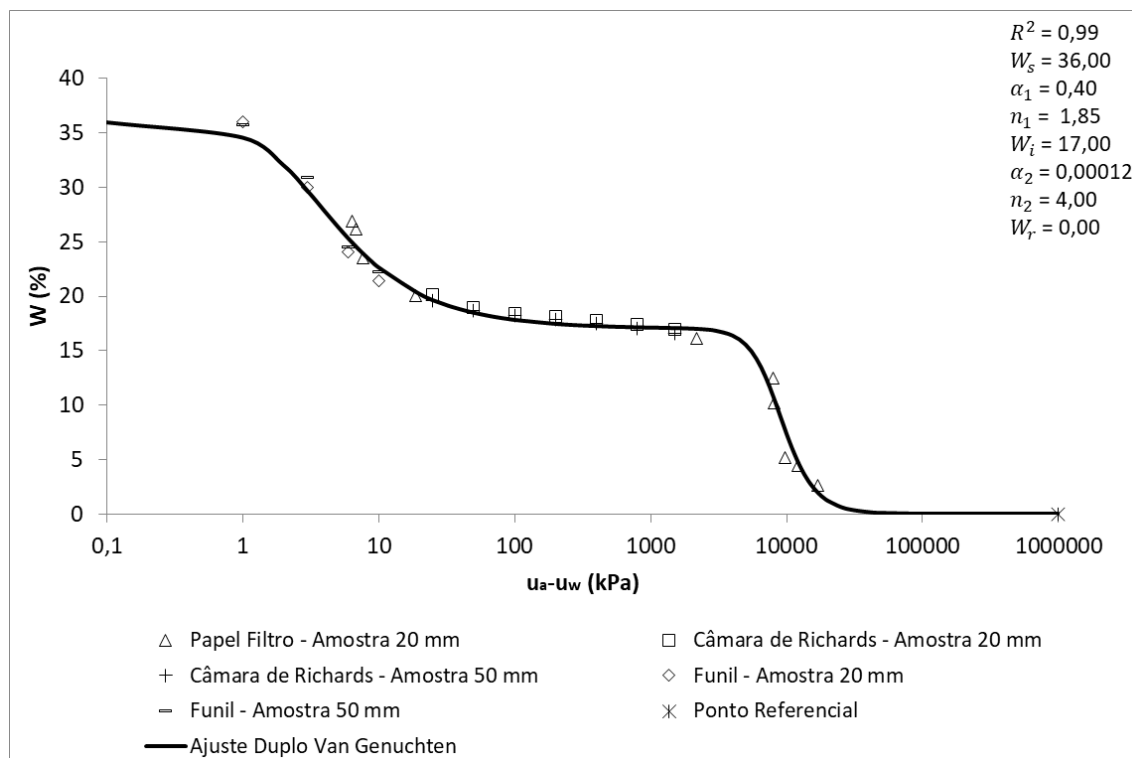
Para verificação da metodologia, foram elaboradas curvas características dos solos de diferentes maneiras. Assim, para cada solo em cada tipo de moldagem foram confeccionadas quatro curvas. Sendo a primeira ajustada contendo somente os métodos tradicionais empregados, a segunda ajustada com todos os pontos obtidos no método centrífugo (com e sem utilização de pedra) junto com os métodos tradicionais, a terceira ajustada com todos os pontos de centrifugação e todos os pontos de papel filtro e a última ajustada contendo os pontos de centrifuga que não se fez a utilização de discos com a complementação dos pontos obtidos da técnica do papel filtro para final da curva. Todas as curvas elaboradas com seus respectivos parâmetros de ajustes utilizados são apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.16.

4.1.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUÇÃO DO SOLO COLUVIONAR REMOLDADO

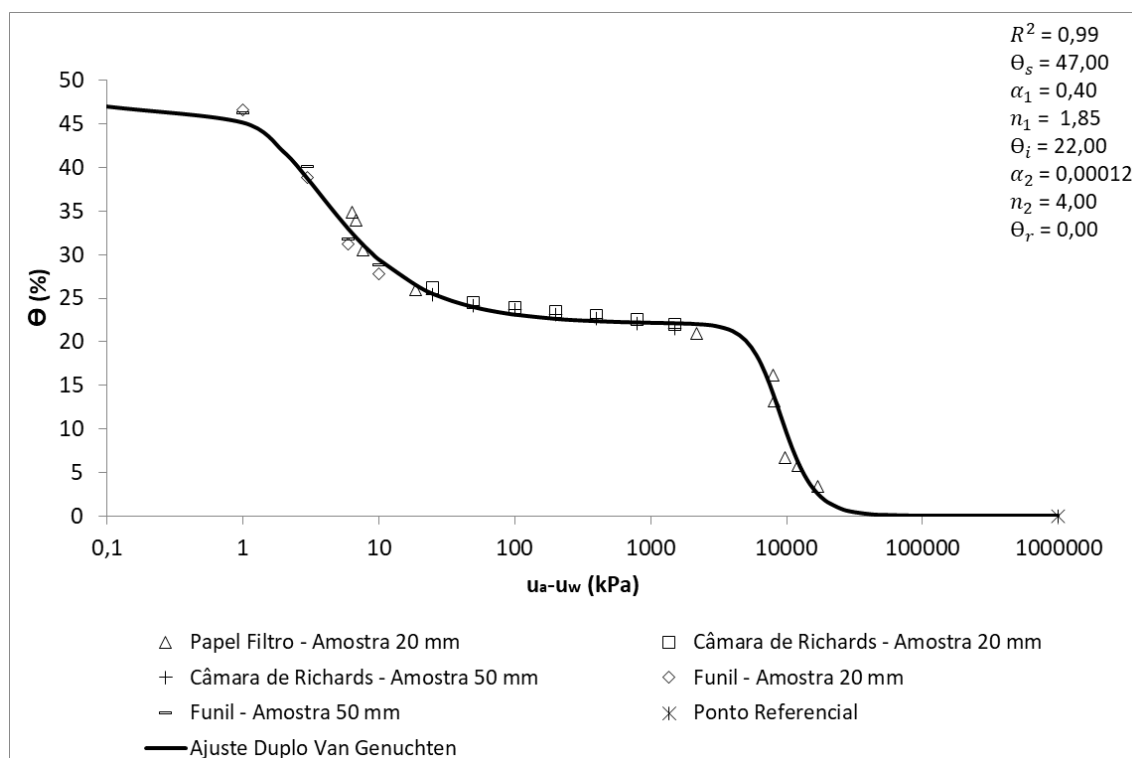
As Figuras 4.1 a 4.4 mostram as CCSS do solo coluvionar no estado remoldado. São considerado os métodos convencionais (papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.1, todos os métodos (centrífuga (com e sem disco cerâmico), papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.2, o método da centrífuga (com e sem disco cerâmico) e do papel filtro na Figura 4.3 e o método da centrífuga (sem a utilização de disco cerâmico) com a complementação de alguns pontos de papel filtro para altas sucções na Figura 4.4.

Nota-se nestas figuras que todas as CCSS determinadas apresentaram um comportamento bimodal, que tem relação com a curva da distribuição incremental dos poros, caracterizado por duas famílias de pico, tendo duas entradas de ar bem definidas.

É destacado que os parâmetros de ajuste do modelo Duplo de Van Genuchten foram iguais para todas as quatro curvas, sendo definidos: $\alpha_1 = 0,40$, $n_1 = 1,85$, $\alpha_2 = 0,00012$ e $n_2 = 4,00$. Além disso, o coeficiente de determinação que indica a qualidade do ajuste de uma linha de regressão (R^2) ficou estabelecido entre 0,98 e 1,00, mostrando que todos os métodos empregados tiveram grande concordância para o solo coluvionar no estado remoldado.

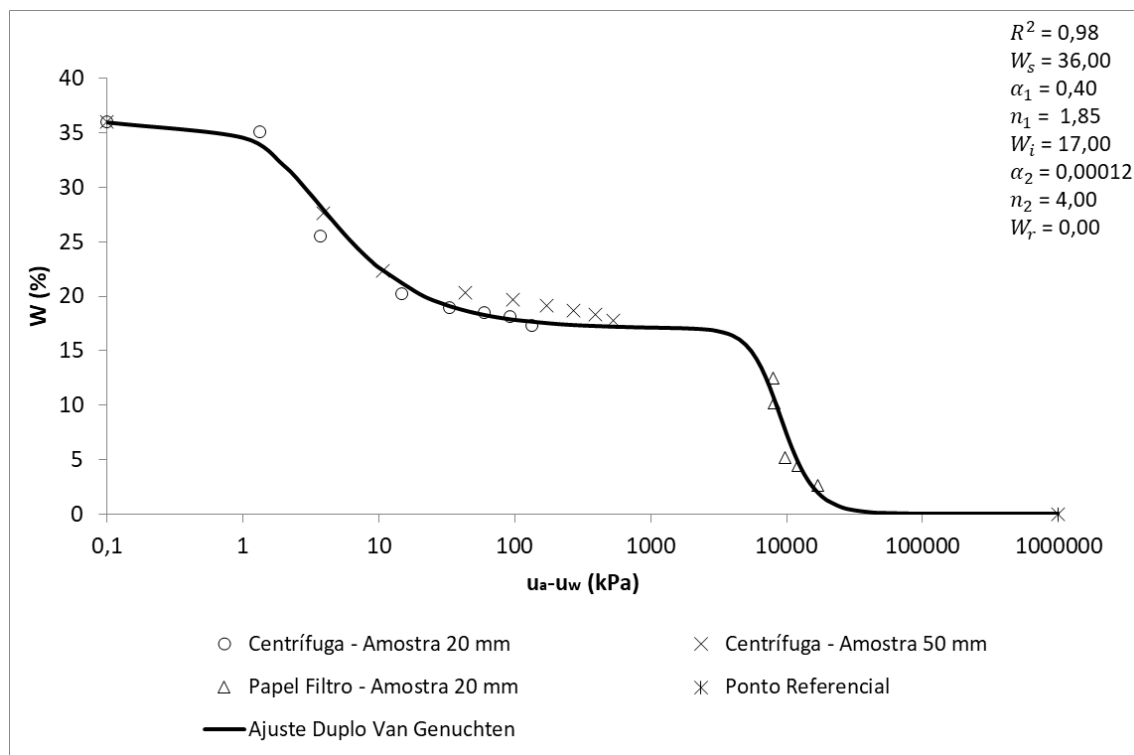


(a)

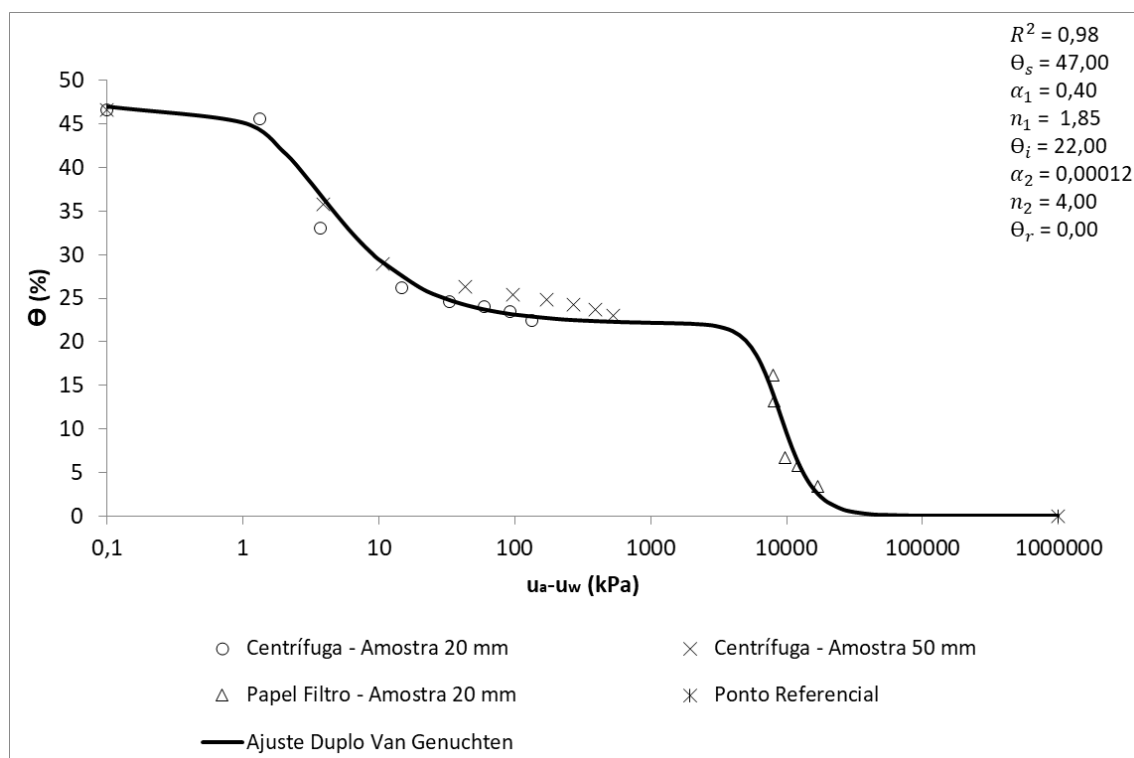


(b)

Figura 4.1 – CCSS do Solo Coluvionar na condição remoldada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.



(a)



(b)

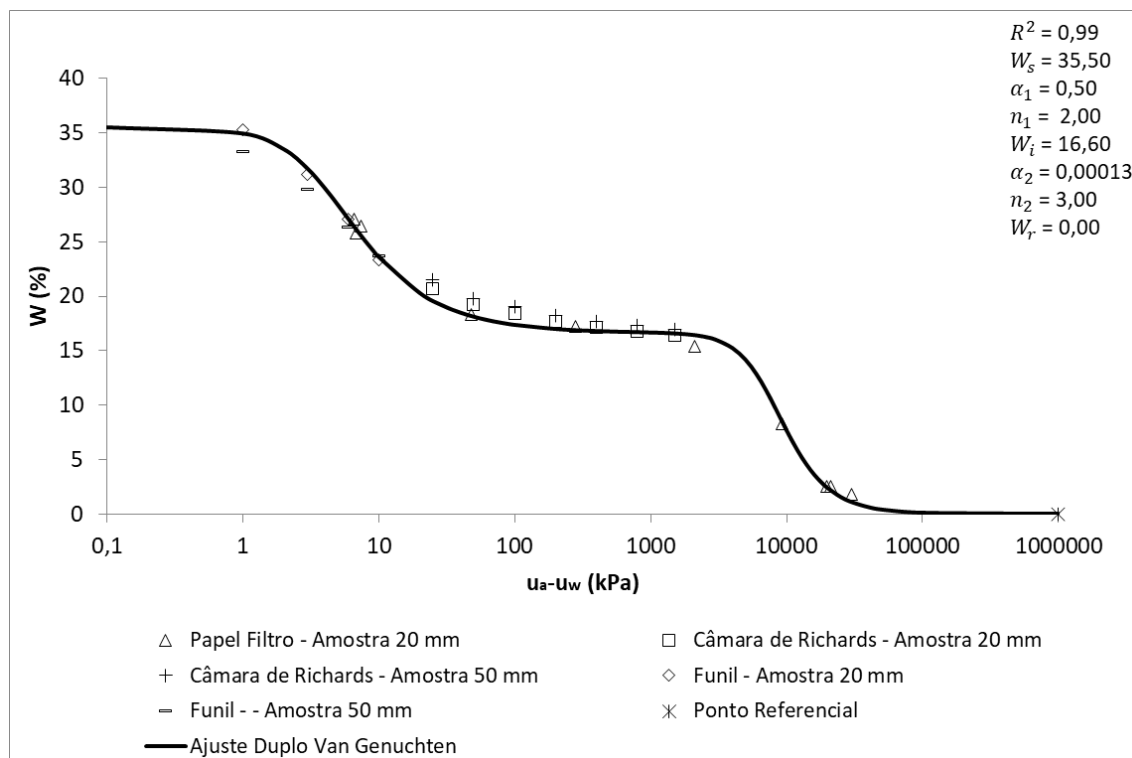
Figura 4.4 – CCSS do Solo Coluvionar na condição remoldada considerando o método da Centrifuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

4.1.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUCÇÃO DO SOLO COLUVIONAR INDEFORMADO

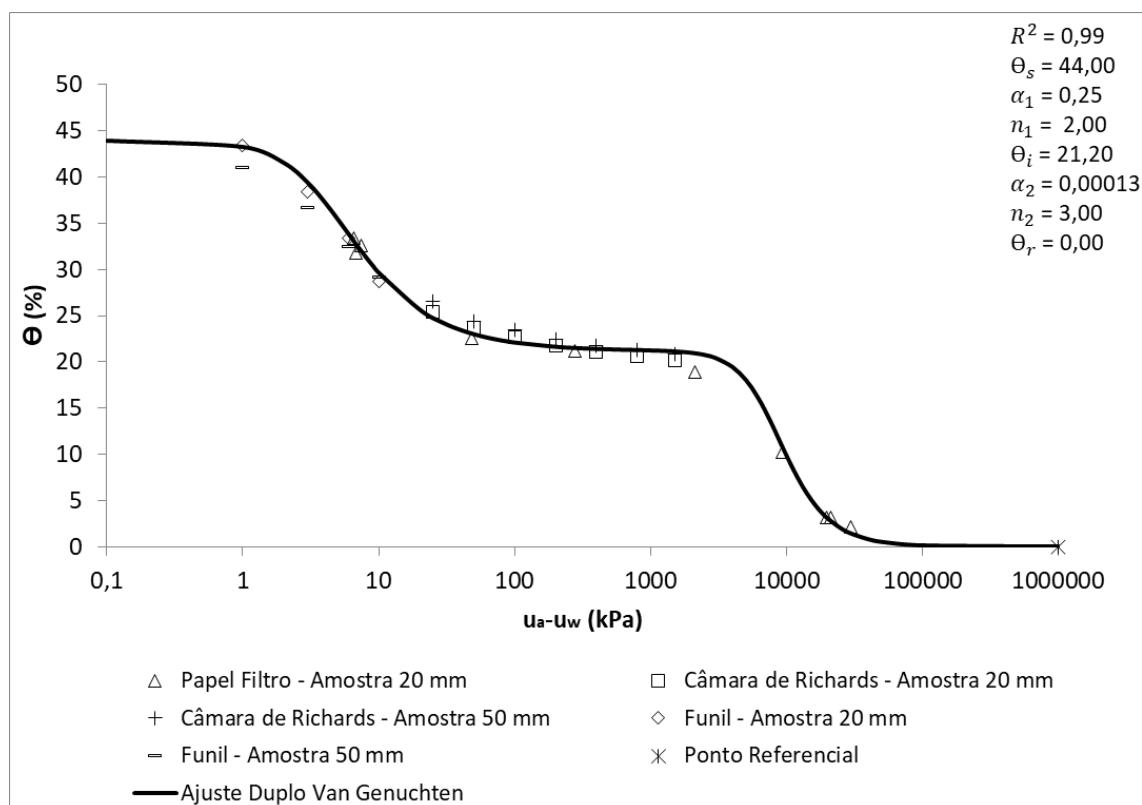
As Figuras 4.5 a 4.8 mostram as CCSS do solo coluvionar no estado indeformado. São considerados os métodos convencionais (papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.5, todos os métodos (centrífuga (com e sem disco cerâmico), papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.6, o método da centrífuga (com e sem disco cerâmico) e do papel filtro na Figura 4.7 e o método da centrífuga (sem a utilização de disco cerâmico) com a complementação de alguns pontos de papel filtro para altas sucções na Figura 4.8.

Nota-se nestas figuras que todas as CCSS determinadas apresentaram um comportamento bimodal, que tem relação com a curva da distribuição incremental dos poros, caracterizado por duas famílias de pico, tendo duas entradas de ar bem definidas.

É destacado que os parâmetros de ajuste do modelo Duplo de Van Genuchten foram iguais para todas as quatro curvas, sendo definidos: $\alpha_1 = 0,50$, $n_1 = 2,00$, $\alpha_2 = 0,00013$ e $n_2 = 3,00$. Além disso, o coeficiente de determinação que indica a qualidade do ajuste de uma linha de regressão (R^2) ficou estabelecido entre 0,98 e 1,00, mostrando que todos os métodos empregados tiveram grande concordância para o solo coluvionar no estado indeformado.

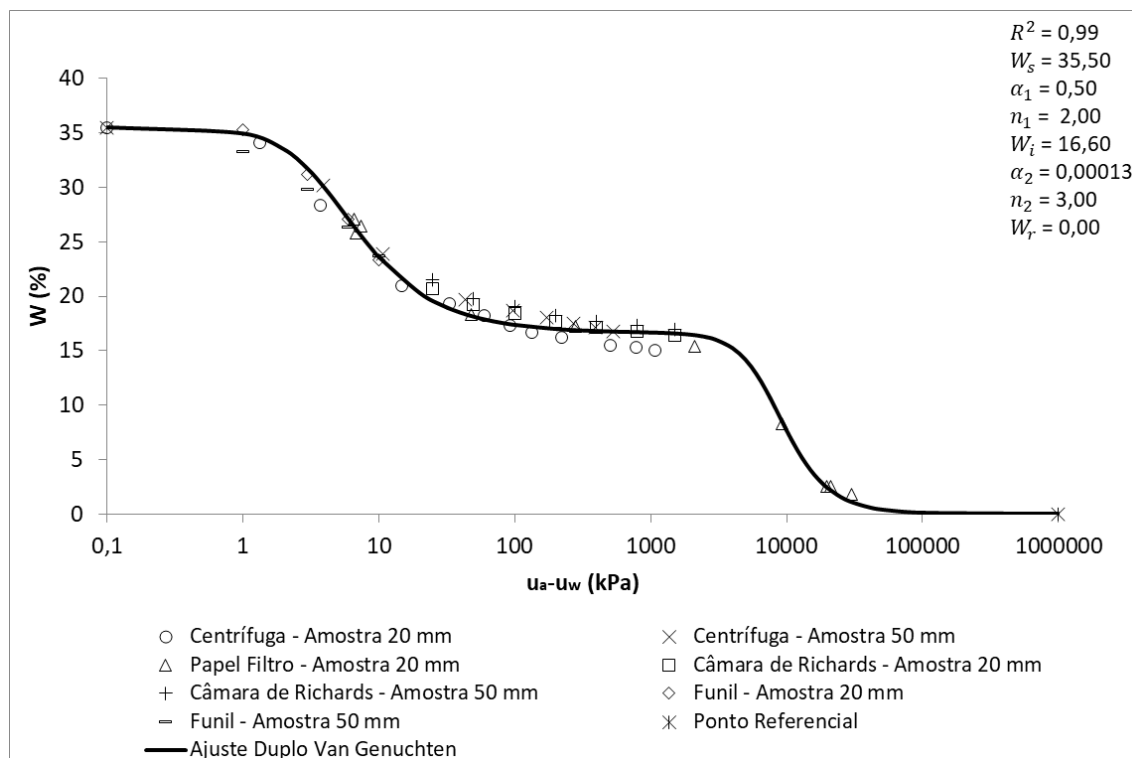


(a)

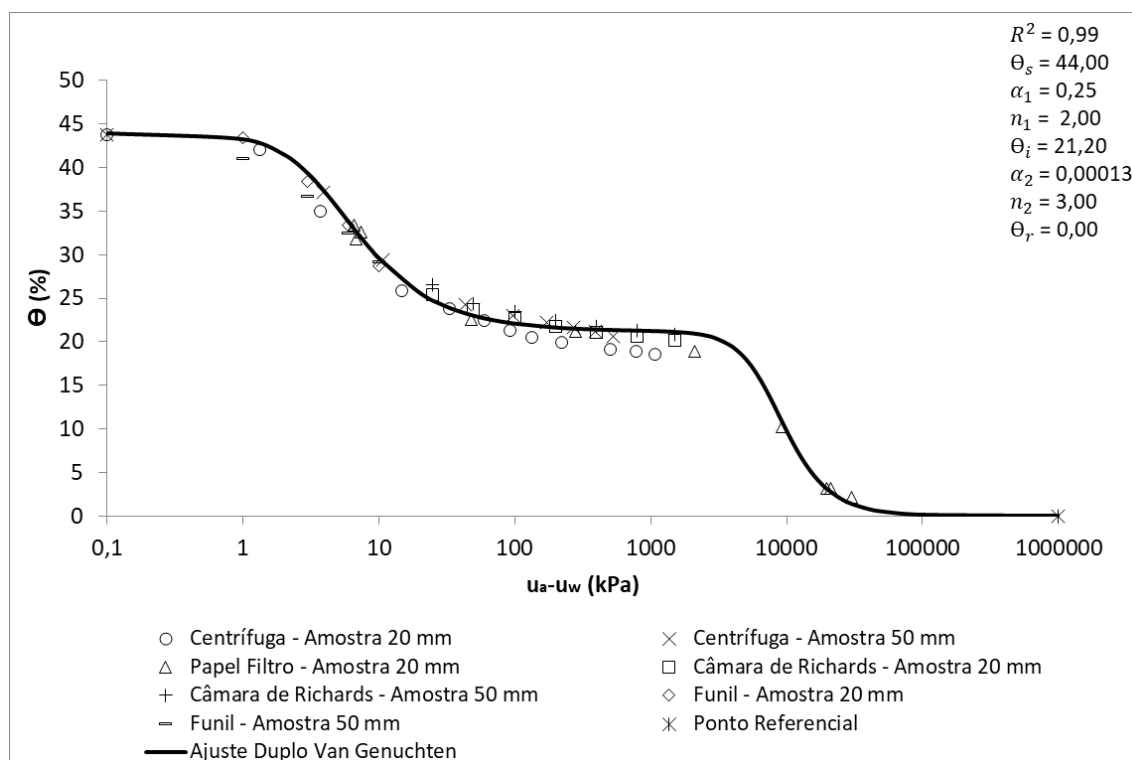


(b)

Figura 4.5 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

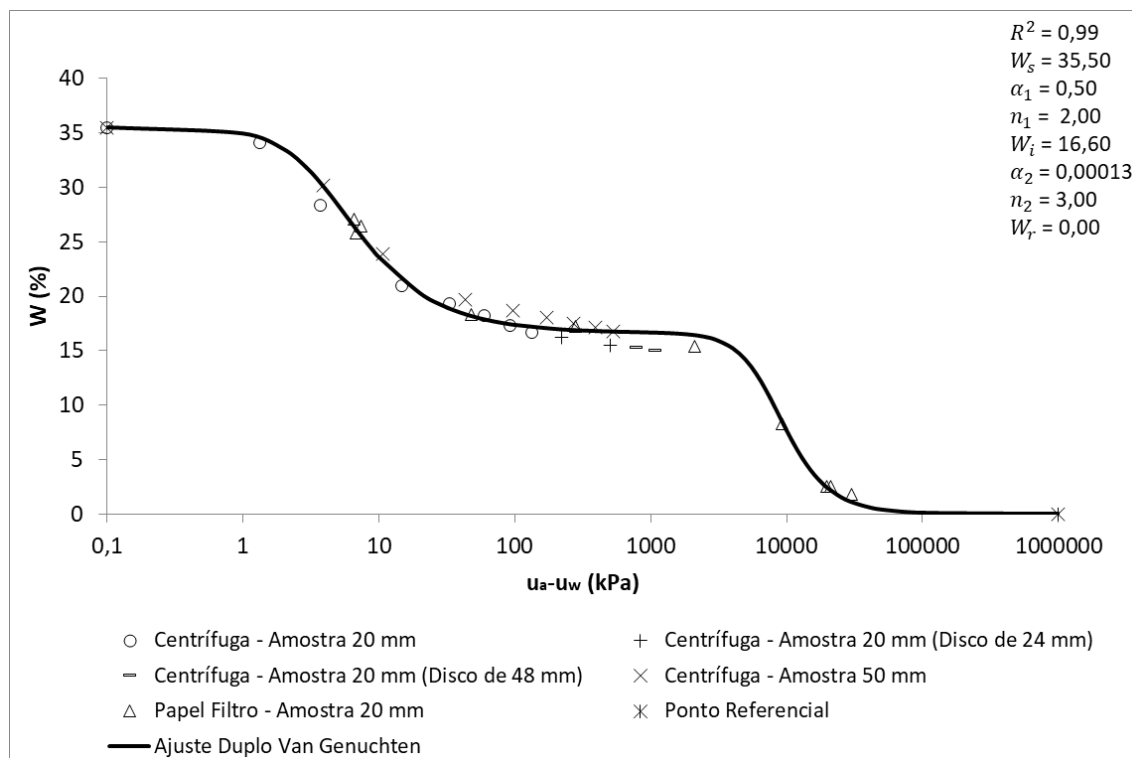


(a)

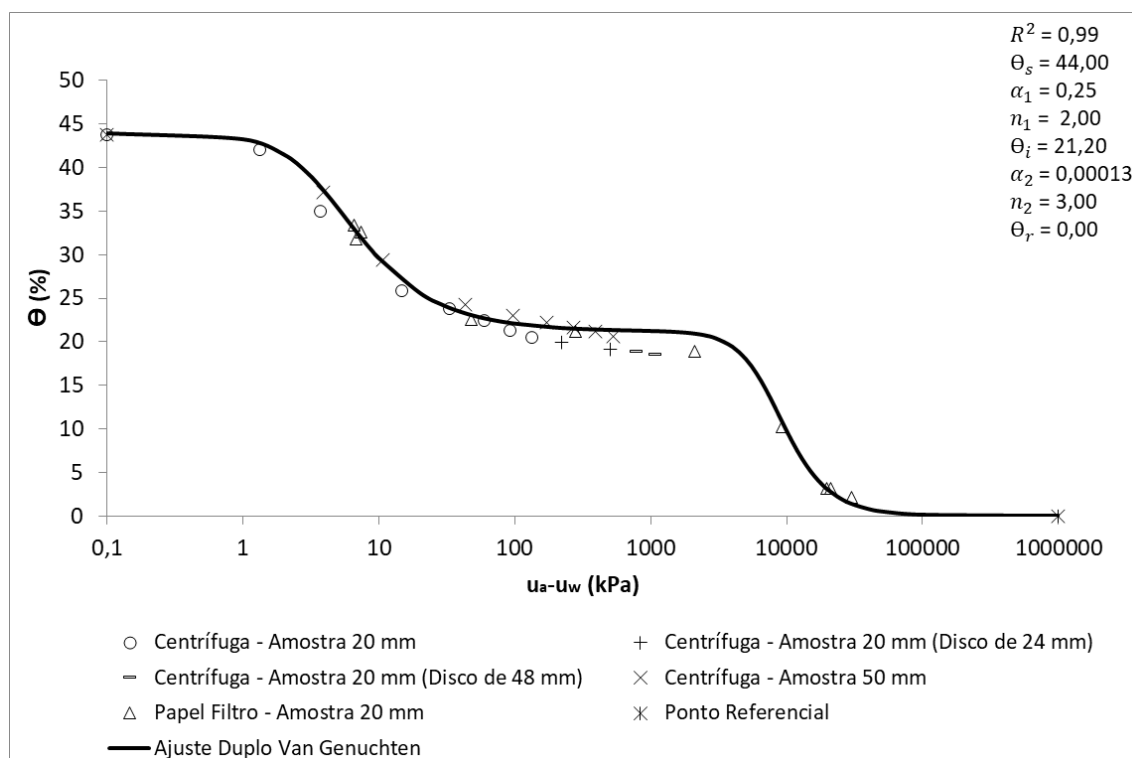


(b)

Figura 4.6 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando todos os métodos (Centrífuga (com e sem disco), Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

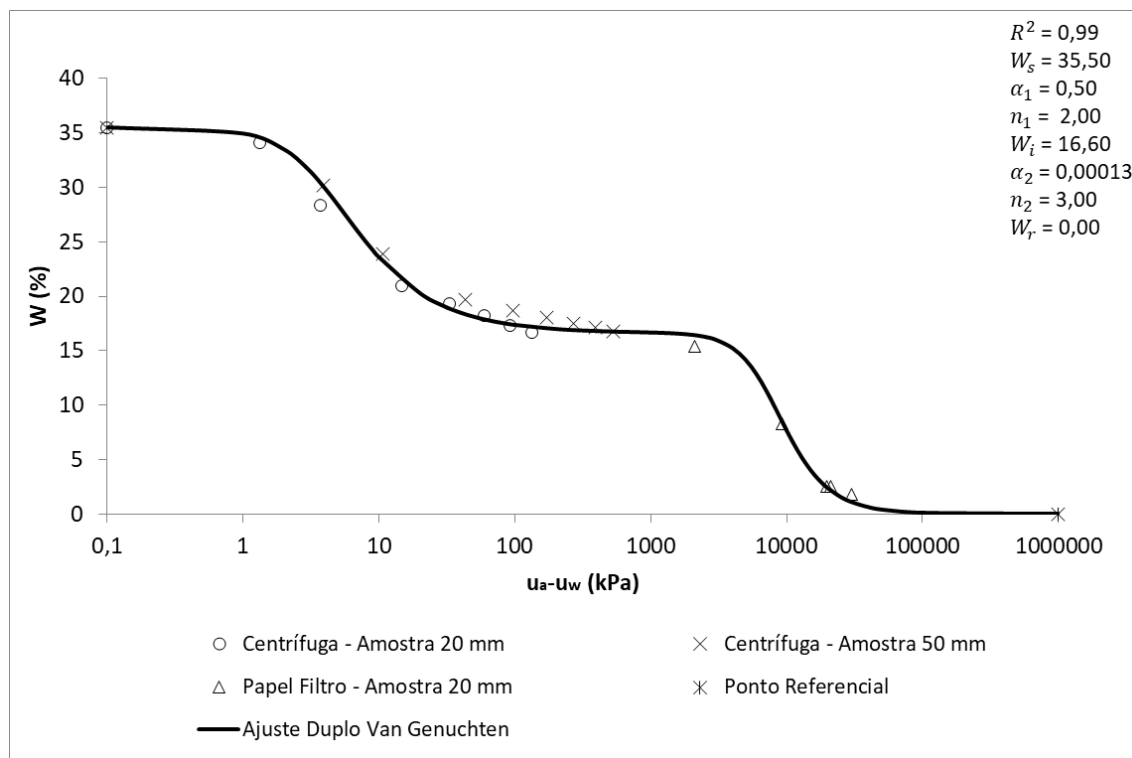


(a)

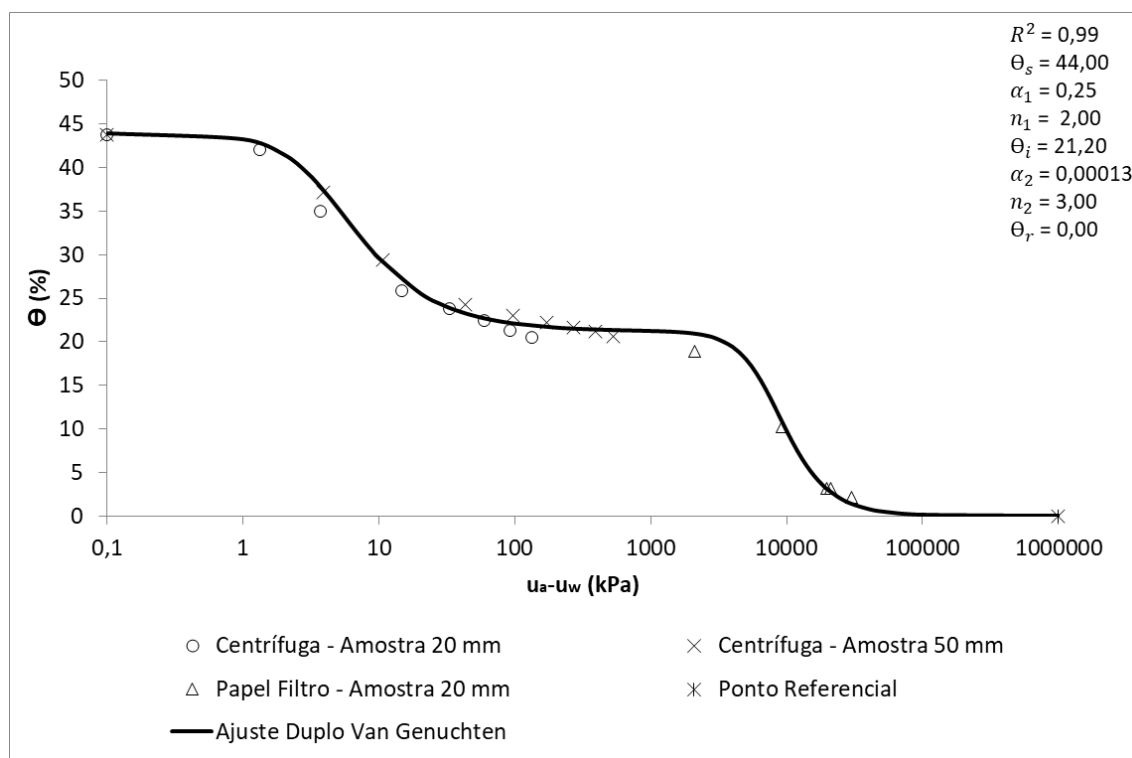


(b)

Figura 4.7 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando o método da Centrifuga (com e sem disco) e do Papel Filtro: (a) em função do teor de água gravimétrico; (b) em função do teor de água volumétrico.



(a)



(b)

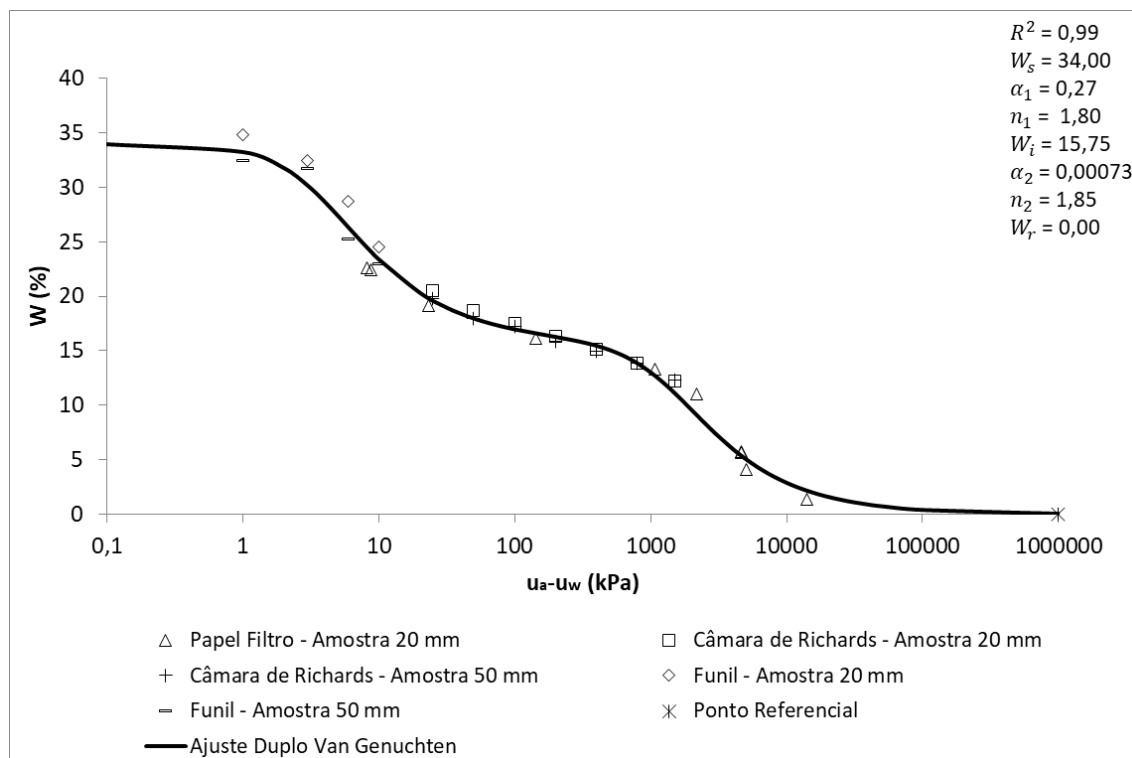
Figura 4.8 – CCSS do Solo Coluvionar na condição indeformada considerando o método da Centrifuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

4.1.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUÇÃO DO SOLO JOVEM RESIDUAL REMOLDADO

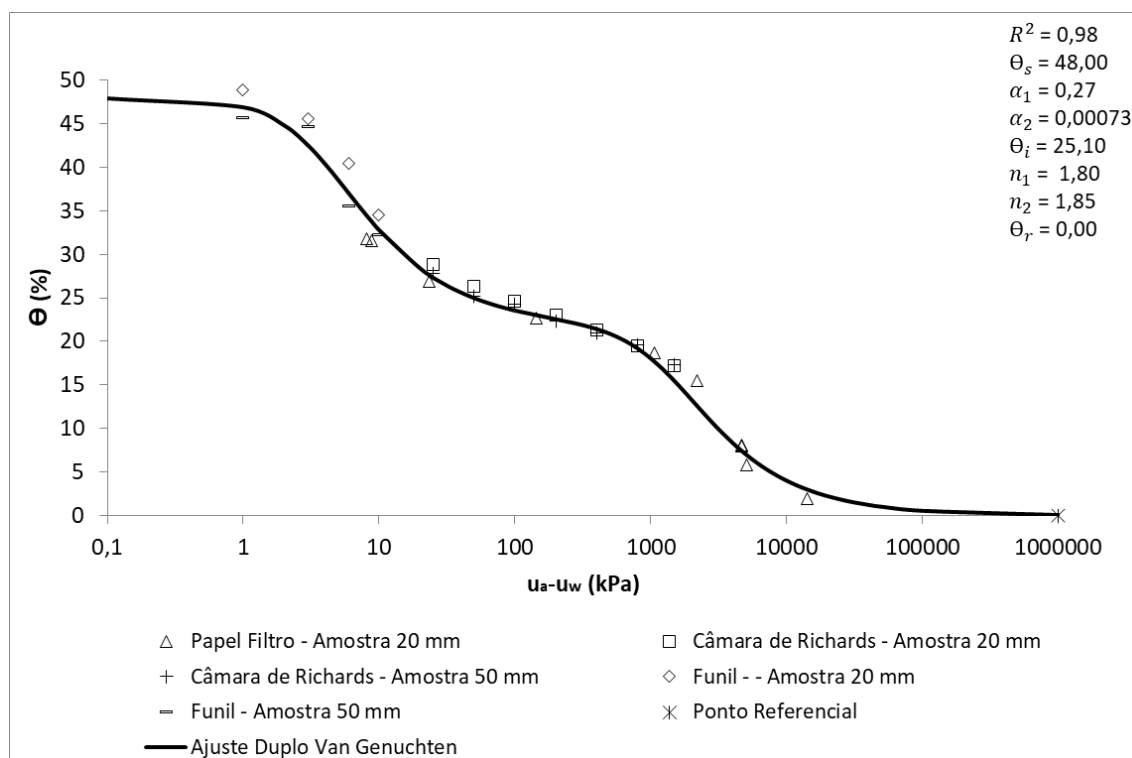
As Figuras 4.9 a 4.12 mostram as CCSS do solo jovem residual no estado remoldado. São considerado os métodos convencionais (papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.9, todos os métodos (centrífuga (com e sem disco cerâmico), papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.10, o método da centrífuga (com e sem disco cerâmico) e do papel filtro na Figura 4.11 e o método da centrífuga (sem a utilização de disco cerâmico) com a complementação de alguns pontos de papel filtro para altas sucções na Figura 4.12.

Nota-se nestas figuras que todas as CCSS determinadas apresentaram um comportamento bimodal, que tem relação com a curva da distribuição incremental dos poros, caracterizado por duas famílias de pico, tendo duas entradas de ar bem definidas.

É destacado que os parâmetros de ajuste do modelo Duplo de Van Genuchten foram iguais para todas as quatro curvas, sendo definidos: $\alpha_1 = 0,27$, $n_1 = 1,80$, $\alpha_2 = 0,00073$ e $n_2 = 1,85$. Além disso, o coeficiente de determinação que indica a qualidade do ajuste de uma linha de regressão (R^2) ficou estabelecido entre 0,98 e 1,00, mostrando que todos os métodos empregados tiveram grande concordância para o solo jovem residual no estado remoldado.

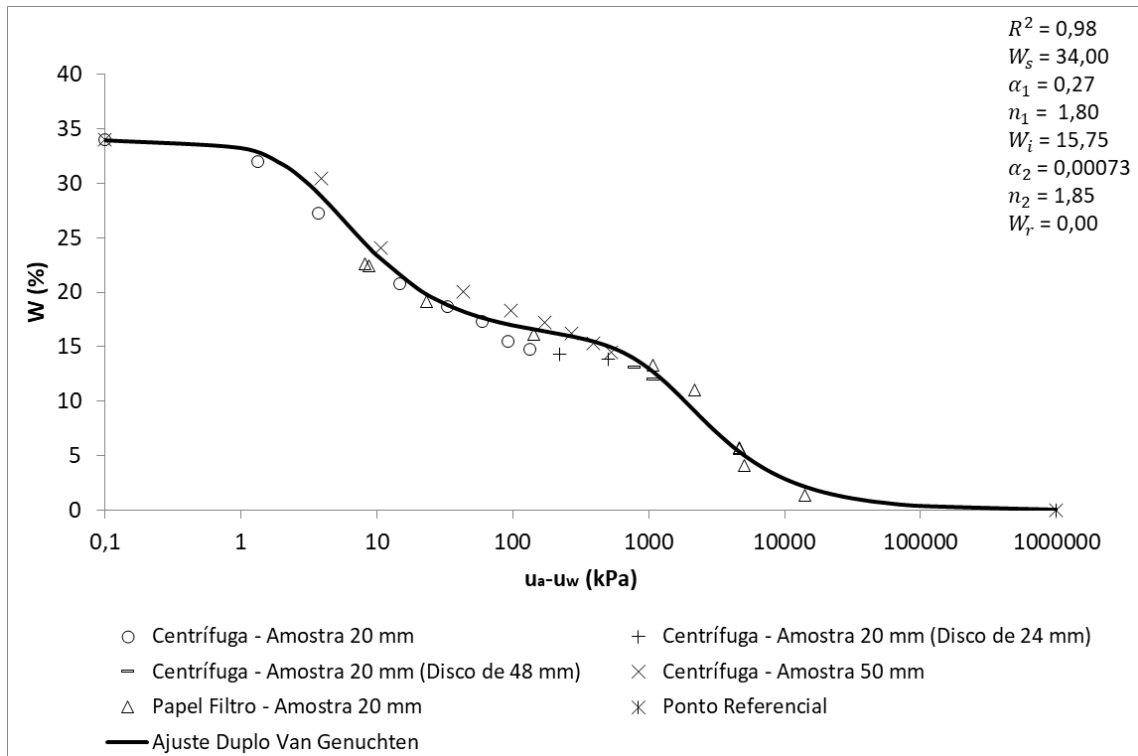


(a)

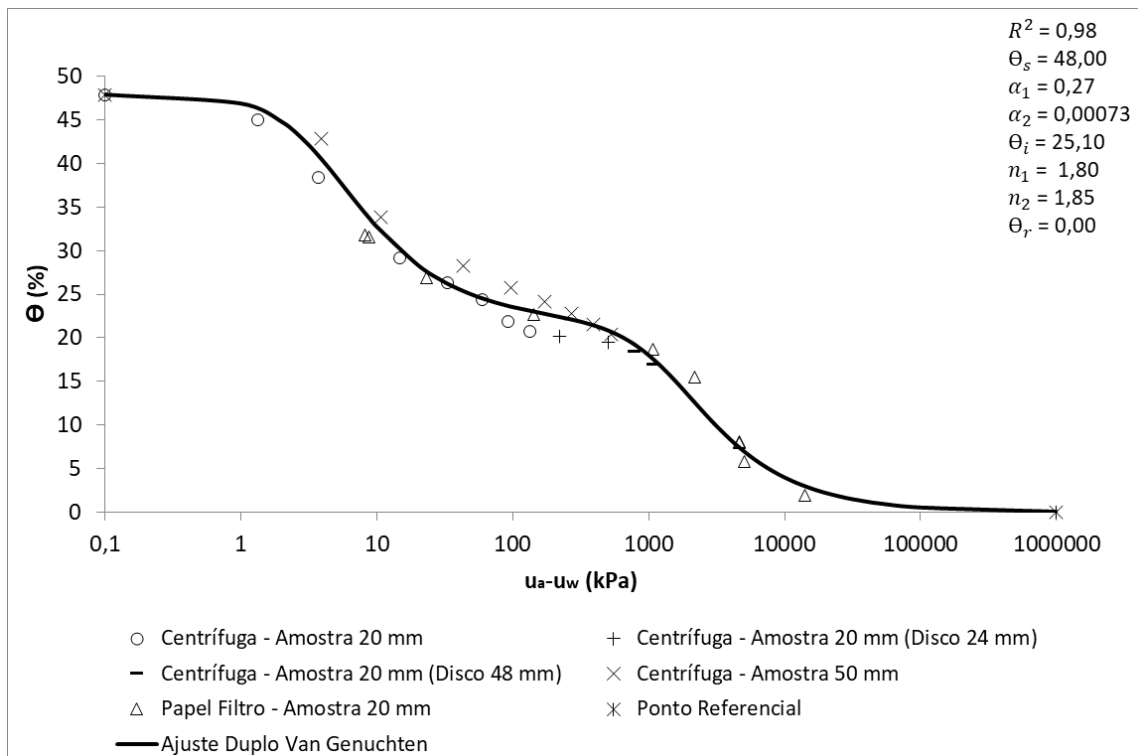


(b)

Figura 4.9 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição remoldada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

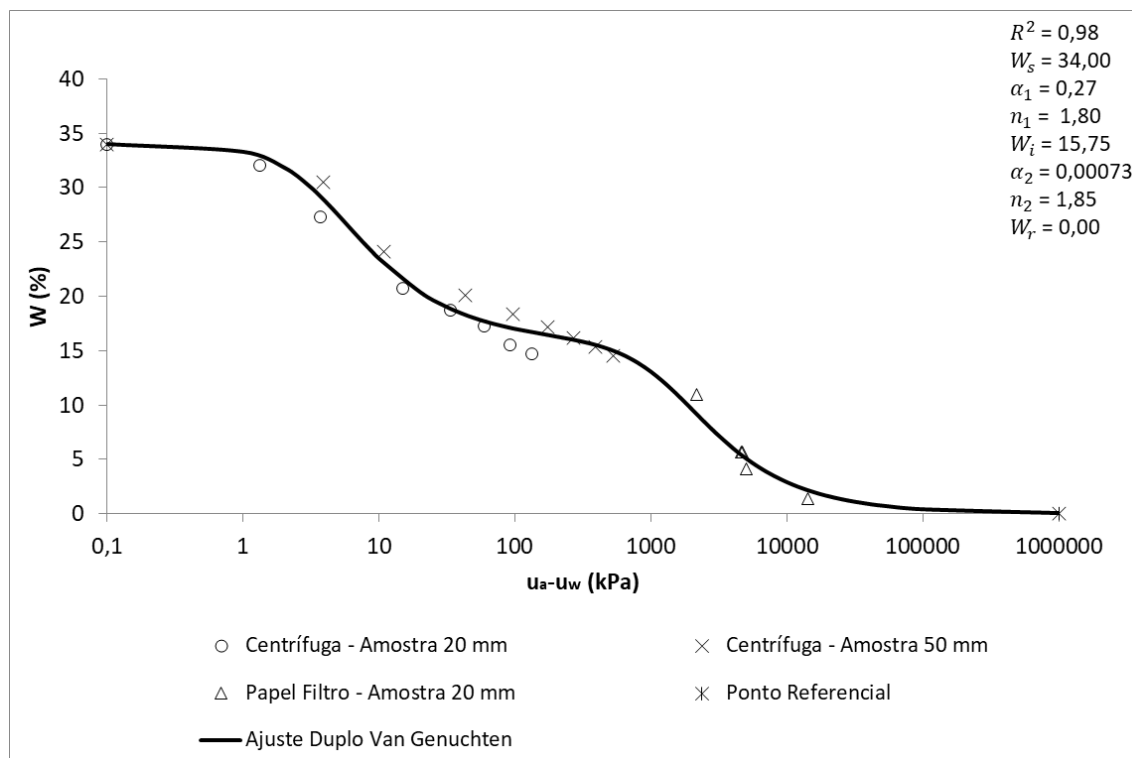


(a)

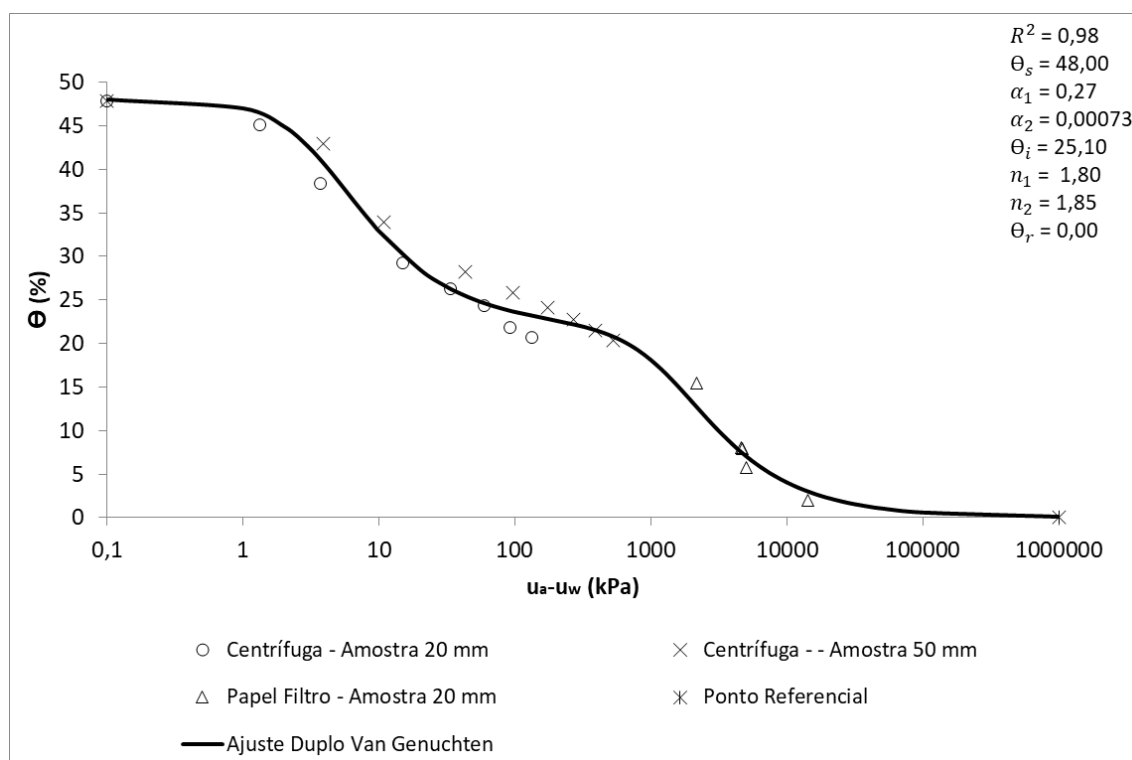


(b)

Figura 4.11 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição remoldada considerando o método da Centrifuga (com e sem disco) e do Papel Filtro: (a) em função do teor de água gravimétrico; (b) em função do teor de água volumétrico.



(a)



(b)

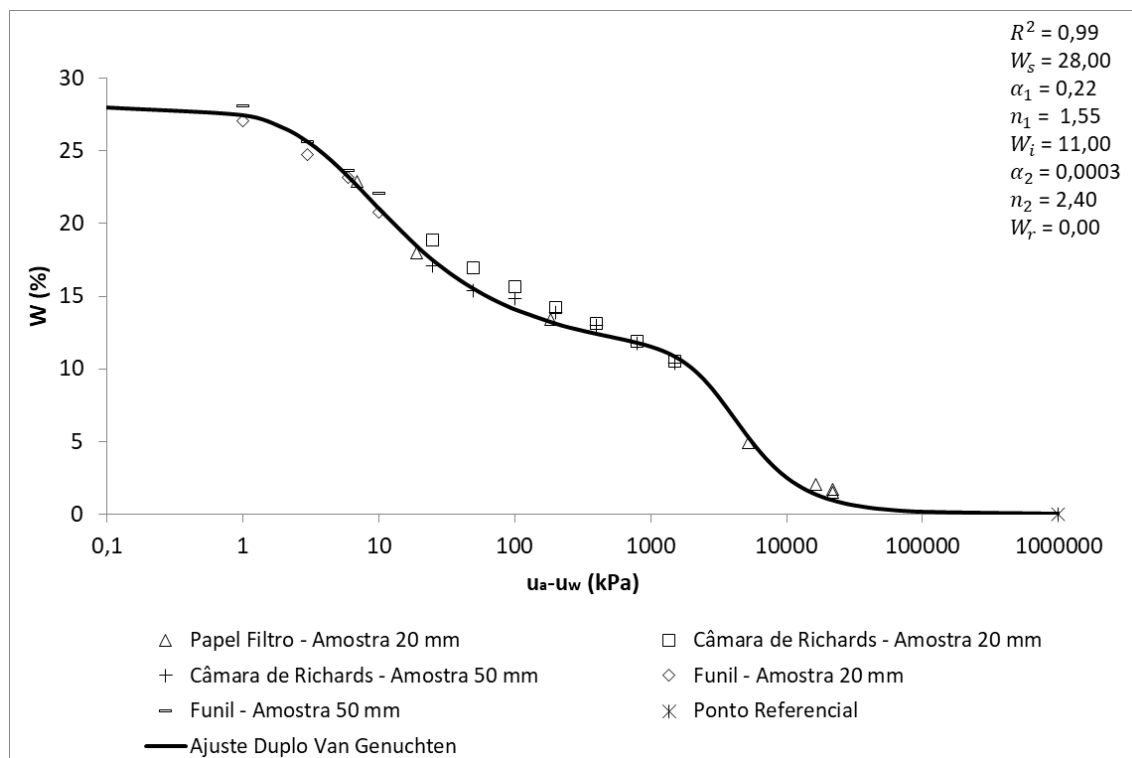
Figura 4.12 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição remoldada considerando o método da Centrífuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

4.1.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SUCÇÃO DO SOLO JOVEM RESIDUAL INDEFORMADO

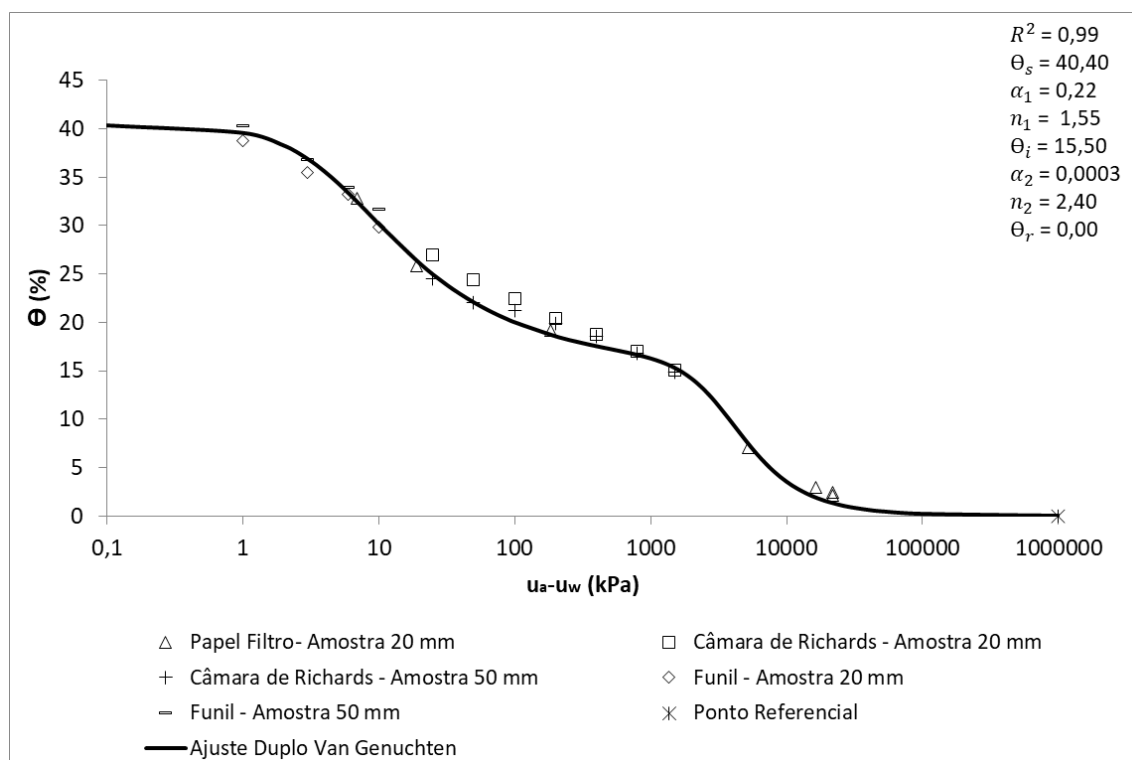
As Figuras 4.13 a 4.16 mostram as CCSS do solo jovem residual no estado indeformado. São considerado os métodos convencionais (papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.13, todos os métodos (centrífuga (com e sem disco cerâmico), papel filtro, câmara de Richards e funil) na Figura 4.14, o método da centrífuga (com e sem disco cerâmico) e do papel filtro na Figura 4.15 e o método da centrífuga (sem a utilização de disco cerâmico) com a complementação de alguns pontos de papel filtro para altas sucções na Figura 4.16.

Nota-se nestas figuras que todas as CCSS determinadas apresentaram um comportamento bimodal, que tem relação com a curva da distribuição incremental dos poros, caracterizado por duas famílias de pico, tendo duas entradas de ar bem definidas.

É destacado que os parâmetros de ajuste do modelo Duplo de Van Genuchten foram iguais para todas as quatro curvas, sendo definidos: $\alpha_1 = 0,22$, $n_1 = 1,55$, $\alpha_2 = 0,0003$ e $n_2 = 2,40$. Além disso, o coeficiente de determinação que indica a qualidade do ajuste de uma linha de regressão (R^2) ficou estabelecido entre 0,98 e 1,00, mostrando que todos os métodos empregados tiveram excelente concordância para o solo jovem residual no estado indeformado.

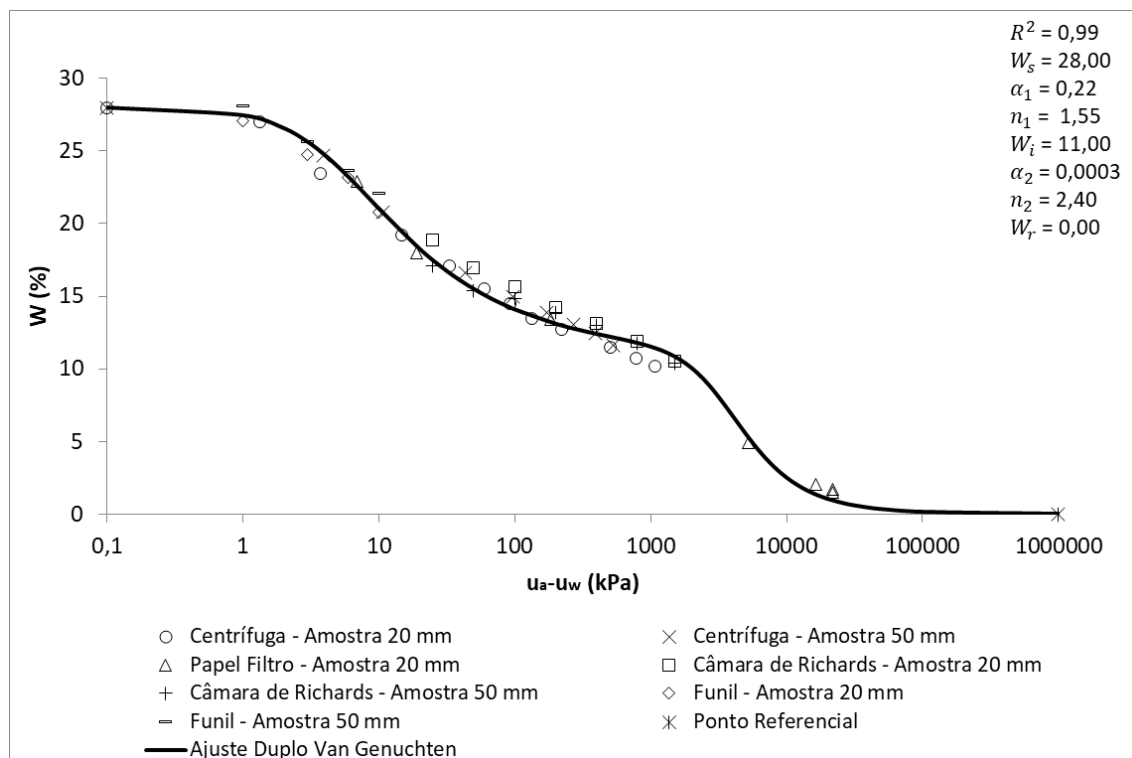


(a)

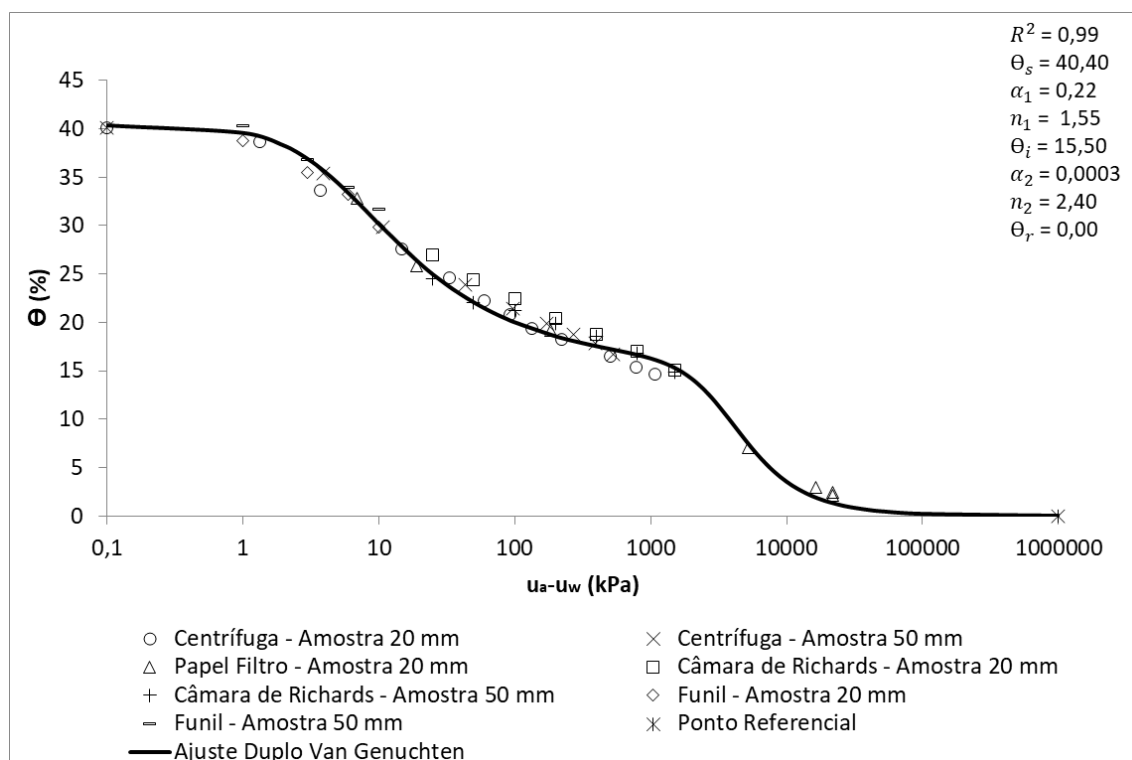


(b)

Figura 4.13 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando os métodos convencionais (Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

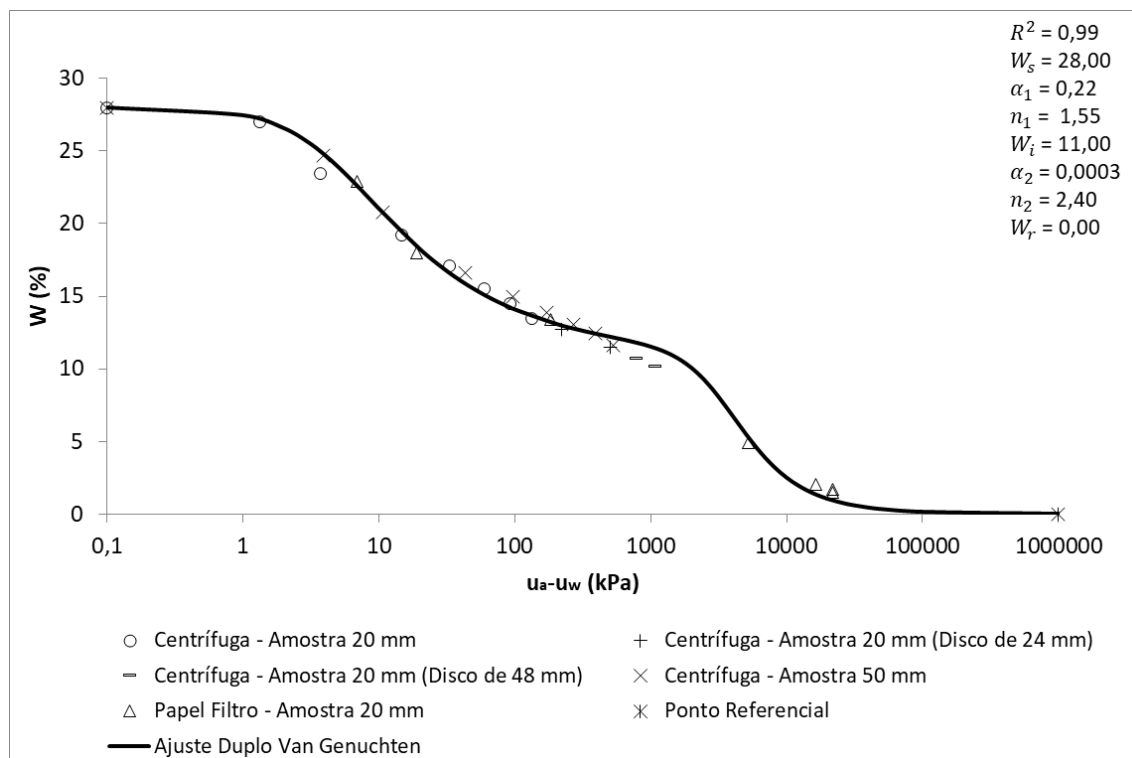


(a)

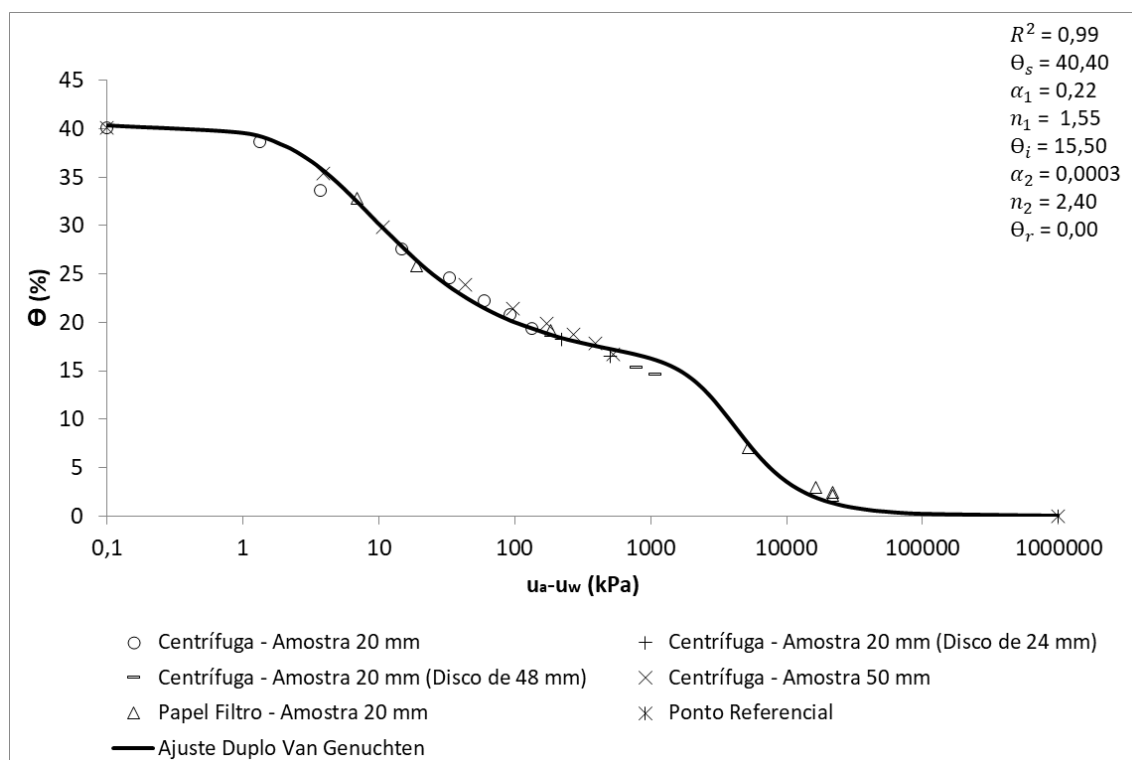


(b)

Figura 4.14 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando todos os métodos (Centrífuga (com e sem disco), Papel Filtro, Câmara de Richards e Funil): (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

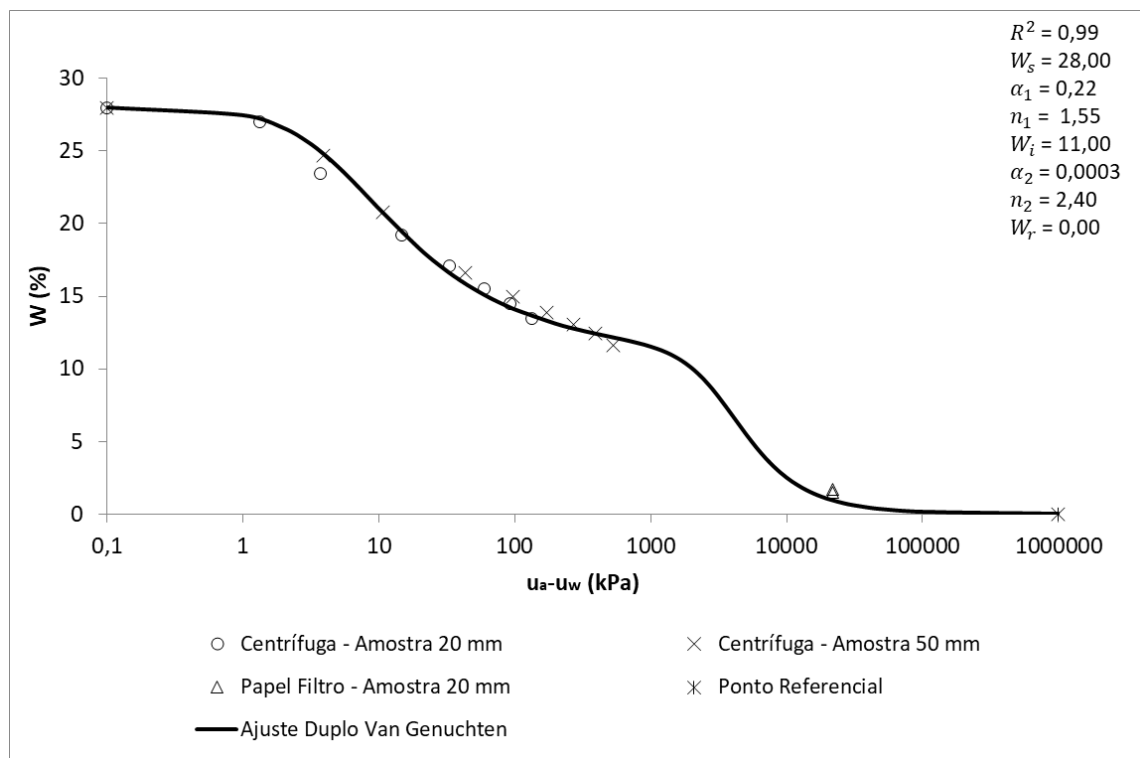


(a)

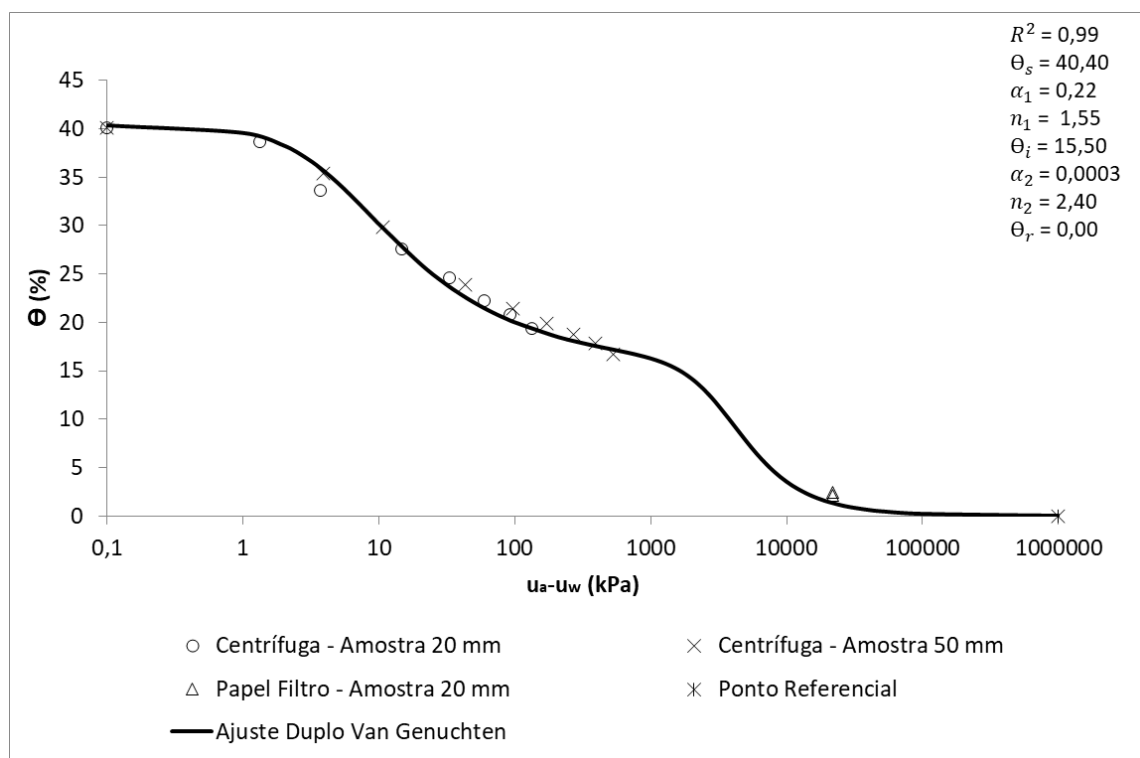


(b)

Figura 4.15 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando o método da Centrifuga (com e sem disco) e do Papel Filtro: (a) em função do teor de água gravimétrico; (b) em função do teor de água volumétrico.



(a)



(b)

Figura 4.16 – CCSS do Solo Jovem Residual na condição indeformada considerando o método da Centrifuga sem disco e do Papel Filtro para altas sucções: (a) em função do teor de água gravimétrico, (b) em função do teor de água volumétrico.

5 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia para obtenção da curva característica de sucção não saturada do solo por meio de uma centrífuga de pequena escala em regime transiente e sem instrumentação, sendo avaliados dois tipos de solos em dois estados distintos. Assim, do programa de pesquisa envolvendo a avaliação da curva característica de sucção de amostras remoldadas e indeformadas dos solos coluvionar e jovem residual se é possível concluir que:

- Com a metodologia proposta foi possível a obtenção adequada da CCSS com a utilização da centrífuga de bancada para obtenção de quase todos os pontos, sendo necessário a implementação de alguns pontos de alta sucção obtidos a partir do método do papel filtro;
- Foi constatada concordância entre os pontos da CCSS obtidos através do método centrífugo e os métodos tradicionais utilizados;
- Não houve interferência significativa nos dados em relação a utilização de diferentes alturas de amostras, com 20 mm e 50 mm, em todos os métodos empregados;
- Ambas as formulações utilizadas foram adequadas para obtenção das sucções, sendo a formulação sucção pontual aplicada nas amostras de 20 mm e a formulação da sucção média aplicada nas amostras de 50 mm;
- O ajuste através do modelo de ajuste duplo de van Genuchten foi adequado para os solos trabalhados, atingindo inclusive valores de coeficiente de determinação que indica a qualidade do ajuste de uma linha de regressão (R^2) excelentes, estabelecidos entre 0,98 e 1,00 em todas as CCSS;
- As CCSS apresentadas somente com o método da centrífuga, sem utilização de discos, e alguns pontos complementares de papel filtro para porção final da curva se mostraram muito coerentes com as outras CCSS comparativas, que levaram em conta tanto a utilização de discos na centrifugação, como os métodos convencionais. Desta forma, se mostrou possível a obtenção de uma CCSS completa, de forma rápida e eficiente, com uso do método da centrífuga sem a utilização de discos cerâmicos, sobre os quais há certa dificuldade de confecção, utilizando amostras de 20 mm e 50 mm, alguns pontos de alta sucção da técnica do papel filtro e ponto referencial de sucção de 10^6 kPa e umidade de 0%.

5.1 PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS

Futuras pesquisas podem utilizar da metodologia apresentada fazendo-se uso de outros tipos de solos, de diferentes características e em diferentes estados. Outra sugestão é dada com a possibilidade de implementação de instrumentação no voo centrífugo, onde as leituras possam ser feitas de forma automática no decorrer da centrifugação, garantindo a estabilidade das amostras no menor tempo de voo possível. Outro fato a ser levado em consideração é a avaliação mais detalhada da mineralogia dos solos, onde se indica ensaios como o de porosimetria, possibilitando assim quantificar a porosidade e a distribuição de tamanhos de poros abertos nas amostras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BESSO, C.; MOTTA, M. F. B.; CAMPOS, T. M. P. Comparação das Técnicas do Papel Filtro e de um Potenciômetro de Ponto de Orvalho para Obtenção da Curva de Retenção de Umidade de dois Solos Tropicais do Rio de Janeiro. XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. 2017. Florianópolis, Brasil. **Anais...** Santa Catarina: ABMS, 2017.

BICALHO, K. V.; BERTOLDE, A. I.; CUPERTINO, K. F.; FLEUREAU, J. M.; CORREIA, A. G. Single-Function Approach to Calibrating Whatman No. 42 Filter Paper Based on Suction Versus Water Content Relationships. **Geotechnical Testing Journal**, v. 38, n. 1, pp. 113–118, 2015.

CAPUTO, M. C., & Nimmo, J. R. Centrifuge method for measuring soil water retention. **Vadose Zone Journal**, 4(3), 794-800, 2005.

CARDUCCI, C. E. *et al.* Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação Duplo Van Genuchten. **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, n.1, p.77- 86, 2011.

COREY, A.T. “**Mechanics of heterogeneous fluids in porous media.** Water Resources Publication, Littleton, Colo, 1997.

DELAGE, P., & De Boer, R. Mechanical behavior of unsaturated soils. In **Mechanics of Unsaturated Geomaterials** (pp. 45-123). Springer, 1996.

DELL' AVANZI, E. **Comparison Between Predicted and Measured Hydraulic Conductivity of an Unsaturated Soil.** ,In: Fourth International Conference on Unsaturated Soils UNSAT 2006, 2006, Arizona. UNSAT 2006. Arizona : ASCE, 2006. v. 2. p. 1513-1519, 2006.

DELL'AVANZI, E. **Unsaturated Flow Under Increased Gravitational Field.** PhD Thesis University of Colorado at Boulder, CO, USA, 2004.

DELL'AVANZI, E. Comparison Between Predicted and Measured Hydraulic Conductivity of an Unsaturated Soil. In: IV International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2006), 2006, Carefree, Arizona. **Proceedings of IV International Conference on Unsaturated Soils**, v.2, p. 1513 – 1524.

DELL'AVANZI, E., ZOMBERG, J.G. & Cabral, A. R. Suction Profiles And Scale Factors For Unsaturated Flow Under Increased Gravitational Field. **Soils and Foundations**, 44, No. 3, pp.79-90, 2004.

DIAS, C. O. **Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados**. 2012. 240 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. FREDLUND, D. G. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, 16:121-139, 1979.

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

FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 31, nº 3, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R. Stress state variables for unsaturated soils. **ASCE Journal of Geotechnical Eng. Div. GT5**, vol 103 - pp. 447-466, 1997.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 31, p. 533-546, 1994.

FREITAS JÚNIOR, E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 19, n. 11, p. 1423-1428, nov. 1984.

GHANBARIAN-ALAVIJEH, B., Amini, F., & Liaghat, A. Centrifuge method for determination of soil–water characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivity. **Engineering Geology**, 165, 66-71, 2013.

GARDNER, R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. **Soil Science**, Baltimore, 43: 277-283, 1937.

GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, Baltimore, 85: 228 – 232, 1958.

GITIRANA JUNIOR, G.F.; MARINHO, F.A.M.; SOTO, M.A.A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In J.C. Carvalho, G.F.N. Gitirana Junior, S.L. Machado, M.M.A. Mascarenha & F.C.S. Silva Filho (editores), **Solos não saturados no contexto geotécnico**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), São Paulo, pp. 205–229, 2015.

GUIMARÃES, L. M. **Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrífuga de pequenas dimensões**. 2013. 135 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

HILLEL, D. **Soil and Water: Physical Principles and Processes**. Londres: Academic Press, Inc. p. 29-77, 1971. LEONG, E.C.; RAHARDJO, H. Review of Soil Water Characteristic Curve Equations. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol.123, nº 12. p.1106-1117, 1997.

KHANZODE, R. M.; VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G. Measurement of soilwater characteristic curves for fine-grained soils using a small-scale centrifuge. **Can. Geotech. J.** v.39, n.1, p. 1209–1217, 2002.

KHANZODE, R. M. **An alternative centrifuge method to obtain the soil-water characteristic curves for fine-grained soils**. 1999. 215 f. Dissertação (Mestrado) –

Master of Science in the Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan Saskatoon, Canadá, 1999.

LADE, P. V. Dynamics of soil behavior. **Journal of Geotechnical Engineering**, 118(4), 615-655, 1992.

LOZANO, J.C., *et al.* system for obtaining soil solution extracts and soil water retention curves using a bench centrifuge with fixed angle rotors. **Soil Science Society of America Journal**, 84(3), 845-854.

LIKOS, W. J.; LU, N. Automated Humidity System for Measuring Total Suction Characteristics of Clay.”, **Geotechnical Testing Journal**, v.26, n. 2, 2003.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Ensaio de Laboratório e Determinação Expedida. **Solos e Rochas**, v. 21, n. 2, p. 65-78, 1998. MARINHO, F. A. M. **Os Solos Não Saturados: aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. São Paulo, USP – SP. 200p, 2005.

MCCARTNEY, J. S. **Determination of the hydraulic characteristics of unsaturated soils using a centrifuge permeameter**. Ph.D. thesis, The Univ. of Texas at Austin, 2007.

MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J. Análise da influência do teor de água na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 211-228, 2010.

NIMMO, J. R.; RUBIN, J.; HAMMERMEISTER, D. P. Unsaturated flow in a centrifugal field: measurement of hydraulic conductivity and testing of Darcy's law.”, **Water Resources Research**, 23, 124-134, 1987.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, 12(3), 513-522, 1976.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 197 p., 1988.

PEREIRA, J. H. F. Colapso de solos não saturados em regiões áridas. **Revista Brasileira de Geotecnia**, 35(3), 217-244, 2015.

RAO, B. H.; SINGH, D. N. Establishing soil-water characteristic curve and determining unsaturated hydraulic conductivity of kaolin by ultracentrifugation and electrical measurements. **Can. Geotech. J.**, v. 49, pp. 1369-1377, 2012.

RAHARDJO, H.; NONG, X. F.; LEE, D. T. T.; LEONG, E. C.; FONG, Y. K. Expedited Soil–Water Characteristic Curve Tests Using Combined Centrifuge and Chilled Mirror Techniques. **Geotechnical Testing Journal**, v. 41, n. 1, pp. 207–217, 2018.

RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A.; MOHAMED, H.; IP, S. C. Y.; SHAH, R. S. Comparison of Soil–Water Characteristic Curves from Conventional Testing and Combination of Small-Scale Centrifuge and Dew Point Methods. **Geotech Geol Eng**, v. 7, pp. 1569-1575, 2018.

REATTO, A. Validity of the centrifuge method for determining the water retention properties of tropical soils. **Journal of Soil Science**, 35(2), 123-135, 2008.

REICHARDT, K. **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta- Atmosfera**. 4ª ed. Campinas: Fund. Cargill. 466p, 1985. REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Ed. Manole Ltda. Cap.3, p.27-65, 1990.

REIS, R. M. *et al.* Determination of the Soil-Water Retention Curve and the Hydraulic Conductivity Function Using a Small Centrifuge. **Geotechnical Testing Journal**, v. 34, n. 5, 2014.

RICHARDS, B. G.; EMERSON, W. W.; PETER, P. Discussion of “Evaluation of soil suction components by T. B. Edil and S. E. Motan, **Geotechnical Testing Journal**, **ASTM**, Philadelphia, v. 9, n.1, p. 41-45, March, 1986. RICHARDS, B. G. Behavior of

unsaturated soils. In: LEE, 1. K., ed. **Soil Mechanics**. New York, American Elsevier Publishing Company, Inc., 1974.

cap. 4. p.112 -157, 1974.

SANTOS, A. L. H. A. **Determinação das propriedades hidráulicas de solos não saturados através de amostras centrifugadas, com e sem a utilização simultânea de discos cerâmicos**. 2022. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2022.

SINGH, D. N.; KURIYAN, S. J.; MADHURI, V. Application of a Geotechnical Centrifuge for Estimation of Unsaturated Soil Hydraulic Conductivity. **Journal of Testing and Evaluation, ASTM**. v. 29, n. 6, p. 556-562, 2001.

SINGH, D.N. AND KURIYAN, SNEHA J. Estimation of Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils Using a Geotechnical Centrifuge. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 39, n. 3, p. 684-694, 2002.

STERCK, W. N. **Estudo da função de condutividade hidráulica de solos não saturados através de amostras centrifugadas**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soils Science Society of American Journal**, Vol. 44, p. 892-898, 1980.

VANAPALLI, S.K., FREDLUND, D.G., PUFAHL, D.E., AND CLIFTON, A.W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, 33: 379–392, 1996. VILAR, O. M. **Resistência ao Cisalhamento**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2002.

WHEELER, S. J., Sivakumar, V., & Chotai, A. Modelling the soil water characteristic curves of unsaturated soils. **Geotechnique**, 53(2), 173-177, 2003.

VILAR, O. M. **Introdução à mecânica dos solos não saturados**. Notas de aula da disciplina de Mecânica dos solos não saturado. São Carlos: EESC/USP: Departamento de Geotecnica, 2021.

VILAR, O. M. **Mecânica dos Solos Não Saturados: Fundamentos**. São Carlos: EESC/USP: Departamento de Geotecnica, 2009.

ZORNBERG, J. G.; MCCARTNEY, J. S. Centrifuge permeameter for unsaturated soils II: Measurement of the hydraulic characteristics of an unsaturated clay." **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, v. 136, n. 8, p. 1064–1076, 2010.