

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE
CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO
PELA CÂMARA DE COMPRESSÃO TRIAXIAL E PELO PAPEL FILTRO

JULIANA FENNER RUAS LUCAS

CASCAVEL - PR

JULHO - 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JULIANA FENNER RUAS LUCAS

**OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO
PELA CÂMARA DE COMPRESSÃO TRIAXIAL E PELO PAPEL FILTRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Hermínia Ferreira Tavares

Co-orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso

CASCADEL - PR

JULHO - 2010

Ficha catalográfica

L933 Lucas, Juliana Fenner Ruas
Obtenção da curva de retenção da água no solo pela câmara de compressão triaxial e pelo papel filtro / Juliana Fenner Ruas Lucas – Cascavel : UNIOESTE, 2010.
63 f. : il.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Hermínia Ferreira Tavares.
Co-orientador: Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola,
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia: f. 52-55.

1. Solo - Drenagem. 2. Curva de retenção. 3. Câmara de compressão triaxial. I. Tavares, Maria Hermínia Ferreira. II. Cardoso, Décio Lopes. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 631.587

JULIANA FENNER RUAS LUCAS

**OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO
PELA CÂMARA DE COMPRESSÃO TRIAXIAL E PELO PAPEL FILTRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, aprovada pela seguinte banca examinadora:

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Hermínia Ferreira Tavares
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE - campus de Cascavel

Prof. Dr. Fabio Augusto Meira Cássaro
Departamento de Física, UEPG - campus de Uvaranas

Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE - campus de Cascavel

Prof. Dr. Reginaldo Aparecido Zara
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE - campus de Cascavel

Cascavel, 13 de julho de 2010.

BIOGRAFIA RESUMIDA

Juliana Fenner Ruas Lucas, nascida em 5 de outubro de 1980, na cidade de Foz do Iguaçu - Paraná, é graduada em Engenharia Civil pela União Dinâmica de Faculdades Cataratas (2007) e especialista em Gestão Ambiental em Municípios pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2009). Desde o ano de 2002, é agente universitária da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, trabalhando no Laboratório de Materiais, Campus de Foz do Iguaçu, atuando nas áreas de administração, pesquisa e extensão.

“Não há problema que não possa ser
solucionado pela paciência.”

Francisco Cândido Xavier

DEDICATÓRIA

A Miriam, minha mãe, que sempre me conduziu pelos caminhos do aperfeiçoamento intelectual, e ao Maycon, que hoje me acompanha por estes mesmos caminhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem Seu consentimento, nada seria possível.

À espiritualidade amiga, pelos momentos de inspiração e motivação em meio aos desânimos e dificuldades.

À minha mãe, por todo carinho, compreensão e paciência ao longo desta jornada.

À minha irmã, pela cooperação junto às responsabilidades familiares.

Ao Maycon, por seu companheirismo e apoio neste e em tantos outros projetos de vida.

À minha prezada orientadora Prof.^a Dr.^a Maria Hermínia Ferreira, por sua diligência nesta importante etapa da minha vida acadêmica.

Ao meu prezado co-orientador Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso, por sua colaboração na execução dos experimentos.

À Prof.^a Dr.^a Nora Díaz Mora, pelo incentivo e permissão em utilizar as instalações e equipamentos do Laboratório de Materiais para este trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de capacitação e pelo auxílio financeiro para a realização de ensaios.

Aos professores, por todo o conhecimento transmitido intra e extraclasse.

Aos colegas, especialmente àqueles com quem houve uma convivência mais estreita, pelas experiências compartilhadas.

Aos amigos Bruno Alexandre Maran, Eduardo Damin, Gustavo Henrique Dalposso, Marivone Zanella Fank e Rodrigo Tartari, pela ajuda em momentos cruciais desta jornada.

Aos professores Dr. Alvaro Pires da Silva (USP/Esalq), Dr. Fabio Augusto Meira Cássaro (UEPG) e Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho (USP/Escola Politécnica), pela admirável solicitude e informações disponibilizadas.

Aos professores componentes da banca examinadora, pelas importantes contribuições para este trabalho na ocasião do exame de qualificação e defesa de dissertação.

RESUMO

OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO PELA CÂMARA DE COMPRESSÃO TRIAXIAL E PELO PAPEL FILTRO

O teor de água no solo está relacionado com a capacidade da matriz do solo em reter a água, caracterizada pelo potencial matricial da água. Umidade e potencial matricial são fatores funcionalmente inter-relacionados e representados pela curva de retenção da água no solo. Esta relação possibilita inferir a umidade a partir da medida do potencial matricial e vice-versa, assim como estimar outras propriedades do solo e da água no solo. O método tradicional para a determinação da curva de retenção emprega a câmara de pressão de Richards. Por questões práticas, a busca por métodos alternativos ao de Richards, financeiramente mais acessíveis e menos morosos, faz-se interessante. Diante disso, desenvolveu-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar o uso de dois dispositivos: a câmara de compressão triaxial e o papel filtro. Para tanto, realizou-se inicialmente coleta e caracterização físico-química do solo, preparo de amostras indeformadas e ensaio na câmara de Richards, utilizando pressões de 0, 10, 30, 60, 100, 300, 500, 1000 e 1500 kPa. No ensaio com a câmara de compressão triaxial, submeteu-se amostras de solo às pressões de 0, 10, 30, 60, 100, 300, 500 e 1000 kPa e, para cada pressão, foi mensurado o volume de água drenado, o que permitiu calcular a umidade da amostra àquela pressão. Com o papel filtro, mediu-se o potencial matricial da água em amostras cujas umidades foram previamente estabelecidas, utilizando-se curva de calibração adequada. Os três ensaios foram executados em quintuplicata e resultaram em pontos de pressão versus umidade que foram ajustados pelo programa RETC, usando o modelo de van Genuchten. Realizou-se uma análise comparativa de valores de umidade volumétrica estimados pelo modelo ajustado nos ensaios com a câmara triaxial e o papel filtro com a curva de retenção ajustada obtida pela câmara de Richards. Através dessa comparação, verificou-se a aplicabilidade do método do papel filtro para a determinação da curva de retenção de água em solos agrícolas e inadequação da câmara de compressão triaxial para esta finalidade.

Palavras-chave: câmara de pressão de Richards, métodos alternativos, potencial matricial, umidade do solo.

ABSTRACT

OBTAIN OF THE SOIL-WATER RETENTION CURVE BY THE TRIAXIAL COMPRESSION CHAMBER AND THE FILTER PAPER

The soil water content is related to the soil matrix ability to retain the water, characterized by the water matric potential. Moisture and matric potential are factors functionally interrelated and represented by the soil-water retention curve. This relationship allows inferring moisture from the matric potential measurement and vice versa, as well as deducing several soil and water in soil properties. The traditional method for determining the retention curve employs the Richards' pressure plate apparatus. For practical reasons, the search for alternatives to the Richards' apparatus that are financially more accessible and faster is needed. In this regard, this study aimed at evaluating the use of two devices: the triaxial compression chamber and the filter paper. Therefore, soil was initially collected and physical-chemically characterized. Undisturbed soil samples were prepared and tested in the Richards' chamber, using pressures of 0, 10, 30, 60, 100, 300, 500, 1,000 and 1,500 kPa. In the triaxial compression chamber test, soil samples were submitted to pressures of 0, 10, 30, 60, 100, 300, 500 and 1,000 kPa, and for each pressure, it was measured the volume of drained water and calculated the sample moisture at that pressure. In the filter paper test, it was measured the water matric potential in samples for which moisture levels were established using an appropriated calibration curve. The three tests were repeated five times, resulting in points of pressure versus moisture that were adjusted by the RETC program, using to the model of van Genuchten. It was performed a comparative analysis of the triaxial chamber and the filter paper estimated soil moisture values with the adjusted retention curve obtained by the Richards' apparatus. This comparison allowed to verify the applicability of the filter paper method for determining the water retention curve in agricultural soils and the inadequacy of triaxial compression chamber for this purpose.

Keywords: Richards' pressure apparatus, alternative methods, matric potential, soil moisture.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 A água no solo: fundamentos físicos.....	4
3.1.1 Constituição do solo.....	4
3.1.2 Energia da água no solo	6
3.2 Curva de retenção da água no solo	9
3.2.1 A importância da curva de retenção da água no solo.....	13
3.3 Métodos para obtenção da retenção da água no solo.....	14
3.3.1 Câmara de pressão de Richards.....	14
3.3.2 Câmara de compressão triaxial.....	16
3.3.3 Método do papel filtro.....	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Coleta de solo	25
4.2 Confeção de amostras	26
4.3 Caracterização do solo	27
4.3.1 Análises químicas	27
4.3.2 Análises físicas	27
4.4 Ensaio com a câmara de pressão de Richards	28
4.5 Ensaio com a câmara de compressão triaxial	29
4.5.1 O equipamento de compressão triaxial	29
4.5.2 Preparo de amostras	30
4.5.3 Montagem e execução do ensaio	30
4.6 Ensaio com o papel filtro.....	33
4.6.1 Preparo de amostras	33
4.6.2 Execução do ensaio.....	35
4.6.3 Obtenção da curva de calibração.....	36
4.7 Análise dos resultados.....	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Caracterização do solo	41
5.2 Câmara de pressão de Richards.....	42
5.2 Câmara de compressão triaxial.....	44

5.3 Método do papel filtro	48
6 CONCLUSÕES	52
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
8 REFERÊNCIAS	54
APÊNDICES	58
Apêndice A Valores referentes ao ensaio com a câmara de compressão triaxial.....	59
Apêndice B Valores referentes ao ensaio com o papel filtro	60
ANEXOS	61
Anexo A Laudo com as análises químicas e granulométrica.....	62
Anexo B Laudo com os resultados do ensaio da câmara de pressão de Richards	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Curvas de calibração para o papel filtro Whatman n.º 42, aplicáveis ao potencial matricial.....	21
Tabela 2	Sucções osmóticas produzidas por soluções de KCl a 20 °C	37
Tabela 3	Valores obtidos de teor de água no papel filtro (w_f)	39
Tabela 4	Caracterização física do solo	41
Tabela 5	Estatística descritiva dos valores de densidade de partícula e densidade do solo	42
Tabela 6	Estatística descritiva dos valores de umidade volumétrica obtidos na câmara de Richards	42
Tabela 7	Estatística descritiva dos valores de umidade volumétrica obtidos na câmara triaxial.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema da câmara de pressão de Richards (LIBARDI, 2000)	15
Figura 2	Esquema da câmara de compressão triaxial (VARGAS, 1981)	17
Figura 3	Disposições do papel filtro para a medição dos potenciais total e matricial da amostra de solo (BULUT; LEONG, 2008).....	20
Figura 4	Curvas de calibração apresentadas na norma D5298-03 para os papéis filtro Whatman n.º 42 e Schleicher & Schuell n.º 589-WH (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003)	22
Figura 5	Confecção de amostras: (a) bloco cilíndrico sendo desbastado e (b) amostra sendo encaixada em cilindro plástico	26
Figura 6	Equipamento de compressão triaxial.....	29
Figura 7	Amostra (conjunto) preparada e saturada para o ensaio na câmara de compressão triaxial.....	30
Figura 8	Câmara de compressão triaxial com montagem da amostra de solo.....	31
Figura 9	Montagem do ensaio do papel filtro: (a) detalhe do papel filtro e (b) disposição final	35
Figura 10	Montagem para a calibração do papel filtro	38
Figura 11	Curva de retenção obtida com a câmara de pressão de Richards.....	44
Figura 12	Curva de retenção obtida com a câmara de compressão triaxial.....	46
Figura 13	Comparação da umidade volumétrica estimada para câmara de Richards e para a câmara triaxial	47
Figura 14	Valores obtidos nos ensaios com o papel filtro	48
Figura 15	Curva de retenção obtida nos ensaios com o papel filtro.....	49
Figura 16	Comparação da umidade volumétrica estimada para a câmara de Richards e para o método do papel filtro	50

1 INTRODUÇÃO

Por diversos motivos, sejam eles de ordem edafológica ou geotécnica, há interesse nas relações entre solo e água, uma vez que numerosas propriedades do solo estão relacionadas com o seu teor de água. A variabilidade do conteúdo de água no solo e o estado de energia desta são fatores que influenciam tanto o comportamento mecânico e hidráulico do solo quanto o desenvolvimento vegetal.

Especialmente no que concerne à produção vegetal, a água consiste em fator essencial aos processos fisiológicos das plantas e, portanto, ao seu crescimento e desenvolvimento. Excessos ou déficits na quantidade de água disponível às plantas, em relação àquela requerida pelas mesmas, podem comprometer a produção agrícola.

Sendo assim, é de fundamental importância para a análise do comportamento de uma cultura conhecer as variações de umidade do solo e, conseqüentemente, do armazenamento de água no solo, o que torna possível a maximização da produtividade mediante o manejo racional da água pela adequação de sistemas de irrigação.

A umidade do solo está relacionada à “tenacidade” com a qual a água é retida pela matriz do solo, o que caracteriza o potencial matricial da água. Umidade e potencial matricial são funcionalmente inter-relacionados e graficamente representados pela denominada curva de retenção da água no solo. Esta relação possibilita não apenas inferir a umidade a partir da medida do potencial matricial e vice-versa, como também estimar outras propriedades, a exemplo da condutividade hidráulica do solo.

Diversos são os métodos experimentais para a determinação da curva de retenção da água no solo, cada um com suas peculiaridades metodológicas, vantagens e limitações. No método tradicional de obtenção da curva utiliza-se o equipamento conhecido como câmara de pressão de Richards. O uso bastante específico e o custo de aquisição relativamente elevado deste dispositivo restringem sua disponibilidade em centros de pesquisa. Além disso, o método apresenta, como uma de suas dificuldades operacionais, a necessidade de um longo período de tempo para o levantamento de uma curva de retenção.

Por questões práticas, a busca por métodos alternativos à câmara de Richards, financeiramente mais acessíveis e menos morosos, faz-se interessante. Neste ínterim, o presente trabalho propôs-se a avaliar o uso de dois dispositivos amplamente empregados pela Engenharia e Mecânica dos Solos em estudos do comportamento de solos, para a obtenção da curva de retenção de água no solo.

O primeiro método avaliado consiste no uso da câmara de compressão triaxial, equipamento usado em estudos de deformação e resistência de solos. O equipamento permite submeter uma amostra de solo a determinadas pressões hidrostáticas e verticais, ao mesmo tempo em que possibilita o controle da drenagem de água da amostra. Isto faz

com que diversas configurações de ensaio, em termos de aplicação de tensões, possam ser investigadas.

No segundo método, faz-se uso de papéis filtro para medir a sucção do solo. A técnica permite inferir tanto o potencial matricial quanto o potencial total do solo, dependendo da disposição do papel filtro em relação à amostra de solo. Para tanto, utiliza-se uma curva de calibração adequada ao papel filtro, que nada mais é que a sua curva de retenção de água, relacionando sucção e umidade neste.

Diante destas duas possíveis alternativas, realizou-se um estudo comparativo entre os valores de umidade volumétrica estimados pelo modelo de van Genuchten aplicado aos resultados dos ensaios com a câmara triaxial, o papel filtro e pelos obtidos via câmara de Richards. Por essa avaliação, verificou-se a aplicabilidade ou não dos dois dispositivos na determinação da curva de retenção de água em solos agrícolas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o uso da câmara de compressão triaxial e do papel filtro para a determinação da curva de retenção da água em solo agrícola.

2.2 Objetivos específicos

Verificar a possibilidade de uso do equipamento de compressão triaxial para a obtenção da curva de retenção de água como alternativa metodológica à câmara de pressão de Richards.

Averiguar a utilização do método do papel filtro para a obtenção da curva de retenção de água em solos agrícolas com amostras de um Latossolo Vermelho distroférico típico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A água no solo: fundamentos físicos

Pela análise da literatura, percebe-se que há grande interesse nas relações entre solo e água. Em termos agrônômicos, há a preocupação de como as propriedades do solo influenciam na sua capacidade de retenção de água, na movimentação da água no solo e na disponibilidade desta para os vegetais superiores. Essas características estão relacionadas direta ou indiretamente com o tamanho e a distribuição dos poros do solo e com a atração da água pelas partículas sólidas do solo (BRADY; BUCKMAN, 1989).

3.1.1 Constituição do solo

O solo é constituído por fases sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é constituída de matéria mineral e orgânica. Essas partículas sólidas são de composições químicas, formas e tamanhos variados e compõem a matriz do solo. A parte líquida, comumente denominada água do solo, constitui-se de uma solução de sais minerais e componentes orgânicos, cuja concentração varia de um solo para outro e com seu teor de água. A parte gasosa refere-se ao ar, que apresenta uma composição um pouco alterada em relação ao ar que circula sobre o solo, variando segundo numerosos fatores (REICHARDT; TIMM, 2004).

As fases líquida e gasosa são complementares, uma vez que a porção do espaço poroso não ocupada pela fase líquida é completada pela fase gasosa e dita porosidade de aeração. Combinadamente, as fases líquida e gasosa chegam a ocupar grande parte do volume de solo, compondo sua porosidade total. O equilíbrio entre ambas constitui-se num dos mais importantes fatores do solo que determinam a sua adequação como meio de desenvolvimento radicular. A capacidade do solo em suprir as raízes das plantas de água, ar, calor e nutrientes determina a sua fertilidade (PREVEDELLO, 1996).

O solo, sendo um sistema poroso constituído por partículas sólidas e volume de vazios, os quais podem ser ocupados por ar e água, é um armazenador de nutrientes e água para as plantas. Assim, as propriedades físicas do solo como textura, estrutura entre outras adquirem importância nas relações solo-água-planta-atmosfera uma vez que afetam a penetração das raízes, a circulação de ar, a infiltração e capacidade de retenção de água, a evaporação e o suprimento de nutrientes (KLAR, 1988).

A textura do solo é expressa por classes de tamanhos de partículas dentro de determinadas amplitudes de variação, englobando materiais com diferentes composições e características. O termo textura refere-se, portanto, exclusivamente à distribuição das partículas do solo quanto ao seu diâmetro. As partículas são divididas em três frações texturais (escala Atterberg): areia (de 2 a 0,02 mm), silte (de 0,02 a 0,002 mm) e argila

(menor que 0,002 mm). Através da análise granulométrica de um solo, determinam-se as quantidades relativas das três frações, definindo a textura do solo (KIEHL, 1979).

A argila é a fração mais determinante no comportamento físico do solo. Ela possui a maior área específica (área por unidade de massa) e, por isso, é a mais ativa em processos físico-químicos que ocorrem no solo. As partículas de argila absorvem água por serem carregadas negativamente e formarem uma “dupla camada iônica” com íons da solução do solo e com moléculas de água. Por esse motivo, verifica-se que solos de textura fina retêm mais água que os de textura mais arenosa. A areia e o silte têm áreas específicas relativamente pequenas e não mostram grande atividade físico-química, mas são importantes para a composição da macroporosidade do solo (REICHARDT; TIMM, 2004).

O termo estrutura é um conceito qualitativo que descreve o solo no que se refere a arranjo, orientação e organização das partículas sólidas. A estrutura define a geometria dos espaços porosos. O solo possui poros de variadas formas e dimensões, que condicionam um comportamento peculiar a cada solo. Um solo considerado bem estruturado é aquele que apresenta boa quantidade de poros de tamanho relativamente grande (KIEHL, 1979).

Outras características importantes relacionadas à fase sólida do solo consistem na densidade de partícula (d_p) e na densidade do solo (d_s), definidas pelas Equações 1 e 2, respectivamente:

$$d_p = \frac{m_s}{V_s}, \quad \text{Eq. (1)}$$

$$d_s = \frac{m_s}{V_t}, \quad \text{Eq. (2)}$$

em que: m_s é a massa das partículas sólidas de uma amostra de solo (que equivale a massa de solo seco em estufa a 105 °C, por 24 h ou até massa constante), V_s é o volume ocupado por estas partículas e V_t corresponde ao volume total de uma amostra de solo com estrutura indeformada (LAL; SHUKLA, 2004; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2005).

Relacionado às definições de densidade, tem-se o conceito de porosidade total (ρ), que é uma medida do espaço poroso do solo e consiste no quociente do volume correspondente aos poros pelo volume total de uma amostra de solo (V_t), que multiplicado por 100, é expresso em porcentagem. É possível, também, estimar a porosidade total a partir da Equação 3 (REICHARDT; TIMM, 2004):

$$\rho = 1 - \frac{d_s}{d_p}. \quad \text{Eq. (3)}$$

A água no solo caracteriza a sua umidade. A umidade gravimétrica (w) relaciona a massa de água (m_w) e a massa de partículas sólidas (m_s) de uma amostra de solo, conforme Equação 4. A umidade volumétrica (θ) relaciona o volume ocupado pela água (V_w) e o volume total (V_t), segundo a Equação 5. Assim,

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_t - m_s}{m_s}, \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_w + V_a}, \quad \text{Eq. (5)}$$

sendo que: m_t é a massa total da amostra com umidade natural e V_a é o volume do ar da amostra, respectivamente. Usualmente, w e θ são multiplicados por 100 e reportados com porcentagens de massa e de volume (HILLEL, 1998; LAL; SHUKLA, 2004).

Segundo a quantidade de água no solo, os solos podem apresentar duas condições: saturados, quando todo seu sistema poroso está preenchido por água, ou não saturados, quando somente parte da sua porosidade total apresenta água (MIGUEL; TEIXEIRA; PADILHA, 2004). Em geral, os solos agrícolas encontram-se na segunda condição, na qual o espaço poroso é ocupado tanto pela fase líquida quanto pela fase gasosa (PREVEDELLO, 1996). Desta relação, decorre que o conteúdo de água no solo também governa o conteúdo de ar e trocas gasosas no solo, afetando, portanto, a respiração das raízes, a atividade microbiana e o estado químico do solo (HILLEL, 1998).

No estudo do sistema solo-água, especialmente para a análise do comportamento de uma cultura, é de grande importância o conhecimento das variações de umidade do solo e, conseqüentemente, do armazenamento de água. Torna-se interessante, portanto, saber se a água se encontra ou não em movimento no solo. Para tanto, se faz necessário conhecer o estado termodinâmico em que se encontra a água (REICHARDT, 1990).

3.1.2 Energia da água no solo

A água no solo, assim como qualquer corpo da natureza, pode ser caracterizada por um estado de energia. A Termodinâmica estuda a energia e as leis que governam suas formas de transferência, definindo sistema como o objeto de estudo e, como meio, tudo o que circunda o sistema e com ele pode interagir (LIBARDI, 2000). O sistema é a água, incluindo ou não tudo que nela se encontra: íons, moléculas, gases dissolvidos. O meio é a parte sólida ou matriz do solo e os gases do ar do solo (REICHARDT, 1990).

As relações energéticas podem ser separadas em mecânicas (cinética e potencial), que aparecem por ação de forças que dão origem aos trabalhos mecânicos, e em térmicas, em virtude de diferenças de temperaturas. Devido ao seu lento movimento, a energia cinética da água no solo é desprezível. Já a energia potencial, que é função da posição e de condições internas da água, é de fundamental importância na determinação do estado energético da água no solo. Todas as interações entre a água e a matriz do solo, que envolvem forças capilares, de adsorção, elétricas e outras, são denominadas forças matriciais, que levam a um trabalho matricial. A presença de solutos na água implica trabalho químico (HILLEL, 1998; REICHARDT; TIMM, 2004).

Como consequência dessas relações sistema-meio, a água assume um estado de energia que pode ser descrito pela função termodinâmica energia livre de Gibbs que, no sistema solo-planta-atmosfera recebe o nome de potencial total da água (ψ), que é função da temperatura (T), da pressão (P), da altura relativa do sistema (z), do número de moles dos solutos na água do solo (n_a) e da umidade do solo (θ) (REICHARDT; TIMM, 2004).

A energia livre de Gibbs é expressa em unidade de energia. Como a energia de um sistema é uma grandeza extensiva, é oportuno expressá-la por unidade de uma outra grandeza proporcional à extensão do sistema. Para tanto, utiliza-se energia por unidade de volume, que apresenta dimensões de pressão. Esta grandeza é “energia”, mas tem a propriedade de ser intensiva, isto é, não depende da extensão do sistema e por isso a energia da água é chamada de potencial da água e usualmente é dada em unidade de pressão (REICHARDT; TIMM, 2004).

O potencial total da água é definido em relação a uma referência, ou seja, consiste na diferença de energia entre da água no solo e no estado padrão. Considera-se como estado padrão aquele no qual a água é pura (sem solutos), livre (sem forças externas além da gravidade), que se encontra a uma pressão de referência P_o , a uma temperatura de referência T_o e a uma elevação de referência z_o , ao qual é atribuído o valor arbitrário ψ_o igual a zero (JURY, GARDNER; GARDNER, 1991).

O potencial da água no solo é a soma de cinco componentes: térmica, de pressão, gravitacional, osmótica e matricial. Como os processos que ocorrem no solo são aproximadamente isotérmicos (T igual a T_o), a componente térmica geralmente é desprezada. As outras quatro componentes podem assumir importância considerável ou desprezível dependendo da configuração sistema-meio (REICHARDT; TIMM, 2004). O potencial da água é representado pela Equação 6:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_{os} + \Psi_m, \quad \text{Eq. (6)}$$

sendo que:

- ψ - potencial total da água no solo;

- ψ_p - potencial de pressão, que aparece quando uma pressão externa, normalmente maior que a pressão de referência P_o , atua sobre a água no solo;
- ψ_g - potencial gravitacional, decorrente da influência do campo gravitacional terrestre, determinado pela elevação relativa a um nível arbitrário de referência z_o ;
- ψ_{os} - potencial osmótico, resultante do fato da água no solo ser uma solução e a água padrão ser pura;
- ψ_m - potencial matricial, que resulta das forças de interação entre a matriz do solo e a água e levam-na a pressões menores que P_o (KLAR, 1988; HILLEL, 1998).

O potencial ψ define o estado de energia do sistema em um determinado ponto. Diferenças no potencial da água de um ponto para outro no solo definem a tendência da água fluir dentro deste. A tendência espontânea de toda a matéria é assumir um estado de energia mínima, procurando o equilíbrio com o meio. Desta forma, a água move-se constantemente no sentido de diminuir seu potencial total, ou seja, flui de onde o potencial é maior para onde este é menor. Portanto, conhecendo os potenciais da água em diferentes pontos do solo, pode-se determinar seu movimento (HILLEL, 1998).

Como simplificação, o potencial total da água no solo é calculado como a soma do potencial osmótico e do potencial matricial (BULUT; LYTTON; WRAY, 2001), arbitrando que a água no solo em estudo encontra-se a z_o e P_o , sendo então identificado como sucção total do solo (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003). No presente contexto, os termos potencial e sucção são usados para identificar uma mesma grandeza física, embora o primeiro seja mais comum à Física do Solo, referindo-se ao estado de energia da água no solo, enquanto o segundo, mais próprio da Engenharia, refere-se à pressão negativa a qual a água no solo está submetida.

O potencial osmótico ocorre em função da diferença de composição química entre a água no solo, que apresenta sais minerais e substâncias orgânicas, e a água pura. A presença de solutos afeta as propriedades termodinâmicas da água e diminui sua energia potencial, reduzindo a pressão de vapor da água do solo. O fenômeno pode não afetar significativamente o fluxo líquido no solo, mas influencia sempre que uma membrana ou barreira de difusão está presente, tornando-se importante na interação entre as raízes das plantas e o solo, bem como nos processos envolvendo difusão de vapor (HILLEL, 1998).

No contexto da Mecânica dos Solos, apesar de prevalecer a opinião de que é o potencial matricial que governa o comportamento mecânico e hidráulico do solo, em algumas situações, o papel do potencial osmótico é relevante e deve ser considerado, como, por exemplo, em solos de característica expansiva (PEREIRA, 2004).

O potencial matricial descreve a contribuição das forças de retenção da água no solo associadas com suas interfaces líquido-ar e sólido-líquido. É resultado de forças capilares, decorrentes da tensão superficial da água e seu ângulo de contato com as partículas

sólidas, e de adsorção que surgem em virtude da interação entre a água e a matriz do solo (LIBARDI, 2000). Estas forças atraem e fixam a água no solo, produzindo uma pressão que diminui a energia potencial da água com relação à água livre. Por ser negativo, o potencial matricial também é designado sucção matricial (HILLEL, 1998).

A textura e a estrutura do solo influenciam o potencial matricial. Em solos arenosos, cujos poros e partículas são relativamente grandes, a adsorção é pouco importante, enquanto que os fenômenos capilares predominam na determinação do potencial matricial; para texturas finas, ocorre o contrário. À medida que os potenciais aumentam em valores absolutos, os fenômenos de adsorção tornam-se mais atuantes e menos afetados pela distribuição de poros. Os solos que sofrem a ação da compactação têm sua porosidade afetada, com influência direta no potencial capilar, sem afetar o potencial de adsorção (KLAR, 1988).

O potencial matricial está relacionado com a umidade do solo, isto é, quanto maior a umidade, maior o ψ_m (ou menos negativo). Assim, variações de potencial também se dão para um mesmo solo, com diferentes teores de água. Para umidades elevadas, nas quais fenômenos capilares são predominantes na determinação do potencial matricial, este depende do arranjo e das dimensões dos poros da amostra, sendo função da densidade e da porosidade do solo. Para baixos teores de água, o potencial matricial praticamente independe de fatores geométricos, sendo a densidade e a porosidade de pouca importância em sua determinação (REICHARDT; TIMM, 2004).

3.2 Curva de retenção da água no solo

Um solo saturado em equilíbrio com a água livre, sob pressão atmosférica, quando submetido a uma força de sucção, terá parte de sua água retirada e o ar penetrará em seu interior. Aumentando-se a sucção, poros cada vez menores perderão água, dando entrada a mais ar. Aplicando-se aumentos gradativos, o fenômeno se repetirá, com diminuição da espessura da película de água que envolve as partículas de solo. Esta água, estando “presa” mais fortemente, exigirá sucções cada vez maiores para ser retirada (KLAR, 1988).

Deste modo, pode-se construir um gráfico relacionando as umidades gravimétricas (w) ou volumétricas (θ) do solo com os esforços de sucção ou potenciais matriciais da água (ψ_m), que é denominado “curva característica da água no solo” ou “curva de retenção” (JURY, GARDNER; GARDNER, 1991).

Através da curva de retenção, identifica-se que, quando o solo se encontra na condição de saturação ou próximo desta, sucções bastante reduzidas são suficientes para extrair água do mesmo. Por outro lado, em solos com umidades reduzidas, a retirada de água exige elevadas sucções. Assim, a curva mostra todas as gradações entre estes

extremos, indicando a modificação gradual na tensão com que a água é retida quando diminui ou aumenta a umidade (BRADY; BUCKMAN, 1989).

A relação entre o potencial matricial e a umidade no solo em geral não é unívoca, podendo ser obtida de duas maneiras diferentes:

- a) por secamento, tomando uma amostra de solo inicialmente saturada de água e aplicando gradualmente sucções maiores e fazendo medidas sucessivas da sucção, que é o próprio ψ_m , em função de inferências da θ ;
- b) por molhamento, tomando uma amostra de solo inicialmente seca ao ar e permitindo seu molhamento gradual por redução da sucção (REICHARDT; TIMM, 2004).

Dependendo da forma de obtenção da curva de retenção, surgem curvas diferentes, não superpostas. Com isso, os valores de uma mesma umidade corresponderão a potenciais matriciais diferentes. Este fenômeno denomina-se histerese (KLAR, 1988). A histerese decorre da diferença do ângulo de contato da água que recua e avança no espaço poroso do solo, função do tipo de partículas minerais e orgânicas que favorecem a maior ou menor expansão ou contração dos colóides do solo, bem como da não-uniformidade dos raios dos poros capilares do solo (COSTA; OLIVEIRA; KATO, 2008).

A histerese da curva de retenção dificulta a descrição matemática do fluxo de água no solo, especialmente quando os fenômenos de molhamento e secamento ocorrem simultaneamente. Para contornar parcialmente o problema, usa-se a curva de molhamento para descrever fenômenos de molhamento, a exemplo da infiltração, e a curva de secamento quando o fenômeno é de secamento, como no caso da evaporação (REICHARDT; TIMM, 2004).

Outro aspecto que exige atenção refere-se à variabilidade tanto metodológica quanto espacial da curva de retenção. Os resultados obtidos por Moraes, Libardi e Dourado Neto (1993), em seu estudo contemplando 250 curvas construídas a partir de 8 pontos (ψ_m versus θ), evidenciaram que os problemas analíticos são de tal ordem que podem levar a interpretações errôneas, comprometendo a qualidade e até a comparabilidade de resultados. A variabilidade metodológica mostrou-se elevada, principalmente a altas tensões, devendo-se, portanto, optar pela curva de retenção completa e não apenas por um ou dois pontos de interesse.

A retenção de água no solo é afetada por vários fatores, desde a distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas sólidas até a composição e concentração de solutos na solução do solo. Apesar das propriedades do solo normalmente apresentarem alta variabilidade espacial, Moraes et al. (1993), ao avaliarem estatisticamente os pontos da curva de retenção, verificaram que as umidades nas várias tensões consideradas em seus experimentos apresentaram, comparativamente, baixo coeficiente de variação (< 10%). No mesmo trabalho, os autores identificaram também a necessidade de apenas 3 a 4 amostras

para estimar adequadamente a média da umidade a um dado nível de probabilidade para as várias tensões.

As curvas de retenção são diferentes para solos argilosos, siltosos e arenosos. Pequenas variações de sucção respondem por praticamente toda a variação de umidade nos solos arenosos, enquanto nos solos argilosos modificações sensíveis de umidade são conseguidas pela aplicação de grandes sucções. Isso é explicado pelo fato do solo argiloso possuir poros menores quando comparados ao solo arenoso, ocorrendo a formação de finíssimos capilares. Além disso, o mecanismo de adsorção ocorre de forma mais intensa em solos de textura fina (PEREIRA, 2004).

De posse da curva característica de um solo, pode-se estimar ψ_m conhecendo-se θ , ou vice-versa. Desde que a geometria do sistema não varie com o tempo, a curva é única e não precisa ser determinada em cada experimento (REICHARDT; TIMM, 2004). A curva característica, bem como outros fatores inerentes aos solos, é variável de amostra para amostra, de local para local, de modo que a determinação de curvas de áreas maiores deverá envolver repetições que apresentem médias representativas e confiáveis (KLAR, 1988).

Uma vez que as curvas que relacionam o potencial matricial ψ_m e a umidade θ são levantadas experimentalmente, pois não há nenhuma teoria satisfatória para sua previsão, há a necessidade de definir modelos matemáticos que forneçam a curva melhor ajustada aos dados experimentais (REICHARDT; TIMM, 2004). Um modelo que vem sendo bastante empregado para se determinar as curvas de retenção da água no solo é o de van Genuchten (1980), representado pela Equação 7:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^b]^a}, \quad \text{Eq. (7)}$$

em que θ_r e θ_s indicam os valores de umidade residual e umidade na saturação, respectivamente, α , a e b são parâmetros empíricos que devem ser estimados pelo ajuste dos dados (PREVEDELLO, 1996). A θ_r é um parâmetro de extrapolação e, portanto, pode não representar o menor teor de água possível em um solo; a θ_s é o ponto da curva de retenção para $\psi_m = 0$; α é um parâmetro cujo inverso refere-se ao valor de entrada de ar ou pressão de borbulhamento e b refere-se à distribuição de tamanho de poros que afeta a inclinação da função de retenção (VAN GENUCHTEN, LEIJ; YATES, 1994).

O modelo considera valores de ψ_m positivos e permite a adoção de restrições para o parâmetro a , o que reduz o número de parâmetros a serem estimados. Como exemplo de restrição, tem-se a condição de Mualem, expressa pela Equação 8,

$$a = 1 - \frac{1}{b}, \quad \text{Eq. (8)}$$

ou mesmo a consideração em que $a = 1$, a qual tem sido utilizada com sucesso em muitos estudos para descrever os dados de retenção de água no solo. A condição da Equação (8) é especialmente interessante quando a Equação 7 é usada no equacionamento de expressões para prever outras propriedades hidráulicas (VAN GENUCHTEN, 1980).

A umidade na saturação θ_s deve constar entre os dados obtidos experimentalmente. A umidade residual θ_r , que pode ser definida como a umidade do solo submetido a um valor elevado de pressão (1500 kPa), pode, considerando esta definição, também ser medida experimentalmente (VAN GENUCHTEN, 1980).

Para auxiliar no processo de ajuste de dados, há diversos programas computacionais. Um deles é o RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009), que permite analisar e prever propriedades hidráulicas de solos não saturados. O programa utiliza os modelos paramétricos de Brooks-Corey e van Genuchten para representar a curva de retenção de água e os modelos teóricos de distribuição de tamanho de poros de Mualem e Burdine para prever a função de condutividade hidráulica do solo a partir de dados observados de retenção hídrica (VAN GENUCHTEN, LEIJ; YATES, 1994).

O RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009) usa uma aproximação não linear dos mínimos quadrados otimizada para estimar os parâmetros desconhecidos do modelo a partir de dados observados de retenção e/ou de condutividade. Esta aproximação baseia-se na partição da soma total dos quadrados dos valores observados em uma parte descrita pela equação ajustada e uma parte residual dos valores em torno daqueles previstos com o modelo. O objetivo do processo de ajuste é encontrar uma equação que maximize a soma dos quadrados associada ao modelo, minimizando a soma dos quadrados dos resíduos (VAN GENUCHTEN, LEIJ; YATES, 1994).

A soma dos quadrados dos resíduos (SQR) reflete o grau de polarização (falta de ajuste) e a contribuição dos erros aleatórios. A SQR é referida como o objetivo da função $O(c)$ em que c representa o vetor de parâmetros desconhecidos. O RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009) minimiza $O(c)$ iterativamente por meio da aproximação dos mínimos quadrados ponderados baseada no método da máxima vizinhança de Marquardt. Durante cada iteração, os elementos c_j de $O(c)$ são atualizados seqüencialmente e os resultados do modelo são comparados com aqueles obtidos para os níveis de iteração atual e anterior (VAN GENUCHTEN, LEIJ; YATES, 1994).

3.2.1 A importância da curva de retenção da água no solo

A curva característica de retenção da água no solo tem sido utilizada como importante ferramenta na mecânica dos solos não saturados. As propriedades de resistência ao cisalhamento e de fluxo tem sido obtidas por modelos que utilizam a curva de retenção (OLIVEIRA, 2004). O estudo de solos que estão sujeitos a variações de umidade tem aplicações em vários tipos de obras de engenharia: estradas e aeroportos, estabilidade de taludes naturais e aterros, fundações, barreiras argilosas para proteção ambiental entre outras (MARINHO, 1994).

O conhecimento do potencial matricial da água nos solos, mediante a curva de retenção, pode ser associado a outros parâmetros do solo e ambientais para avaliar processos hidrológicos, a condutividade hidráulica e os potenciais de expansão ou retração do solo (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003), o que permite melhores intervenções antrópicas relativas à vegetação e à produção agrícola, assim como no que concerne à estabilidade de obras de terra (DIENE; MAHLER, 2007).

A curva de retenção, uma vez que relaciona o potencial matricial e a umidade do solo, é parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas deste (CICHOTA; VAN LIER, 2004). A curva faz-se necessária em estudos de balanço e disponibilidade de água às plantas, de dinâmica da água e solutos no solo e de infiltração (TORMENA; SILVA, 2002). As equações de Darcy-Buckingham e Richards, que permitem quantificar o movimento da água no solo, por exemplo, são modelos que dependem do conhecimento da curva de retenção da água no solo para suas soluções (CÁSSARO et al., 2008).

O conteúdo de água no solo é uma variável utilizada em estudos que envolvem agricultura, hidrologia e meteorologia, dentre outros. Na agricultura, essa informação é necessária ao planejamento da irrigação para o aumento da produção agrícola (TEIXEIRA, MORAES; SIMONETE, 2005), uma vez que a frequência de irrigação requerida para uma cultura depende da quantidade de água que pode ser armazenada no solo.

Estudos mostram que a curva de retenção de água permite encontrar relações de dependência entre os coeficientes das equações matemáticas que a descrevem com diversas propriedades do solo. Como diferentes sistemas de uso e manejo do solo podem promover modificações na sua estrutura e no seu comportamento físico-hídrico, a curva de retenção pode ser utilizada na avaliação da qualidade do solo e nortear práticas sustentáveis de produção agrícola, mediante esta inter-relação (MACHADO et al., 2008).

Um exemplo disso é apresentado por Cássaro et al. (2008), que consiste no uso da curva de retenção para inferir sobre a distribuição do tamanho dos poros no solo. Isso é possível utilizando-se os parâmetros de ajuste da curva de van Genuchten para a determinação da Função Capacidade de Água. Em seu estudo, os autores obtiveram informações como a complexidade da gama de poros que compõe a amostra de solo e a

relação entre a variação da granulometria e da densidade do solo e as modificações de suas propriedades de retenção de água.

3.3 Métodos para obtenção da retenção da água no solo

Alguns dos métodos disponíveis para a determinação da curva de retenção da água no solo são: funil de Buchner e mesa de tensão, câmara de pressão de Richards, células Temp, psicrômetro termopar, método do equilíbrio com solução salina, entre outros (TAVARES, FELICIANO; VAZ, 2008). Verifica-se, também, a utilização de métodos conjugados de determinação da umidade e da tensão, como o uso de equipamentos TDR (Time Domain Reflectometry) associados a tensiômetros (FELICIANO, 2005).

Para a obtenção da curva de retenção para uma faixa ampla de valores de umidade, usualmente se faz necessário o emprego de mais de um método, uma vez que os métodos apresentam diferentes faixas de tensão de atuação, restringindo seu uso. Assim, o uso de métodos alternativos para a determinação da curva que abranjam a faixa que vai da saturação até o ponto de murcha permanente (1500 kPa) é de relevante interesse prático.

3.3.1 Câmara de pressão de Richards

A câmara de pressão de Richards (Figura 1) é o método tradicional de determinação da curva de retenção da água no solo, utilizado sob condições de laboratório (PREVEDELLO, 1996). O equipamento é constituído de uma câmara capaz de suportar alta pressão, ligada à atmosfera por intermédio de uma placa porosa em seu interior (LIBARDI, 2000). O arranjo instrumental é tal que a parte inferior da placa encontra-se continuamente sob pressão atmosférica e a parte superior, onde se encontra a amostra de solo, sob pressão controlada de ar, superior à atmosférica (REICHARDT; TIMM, 2004).

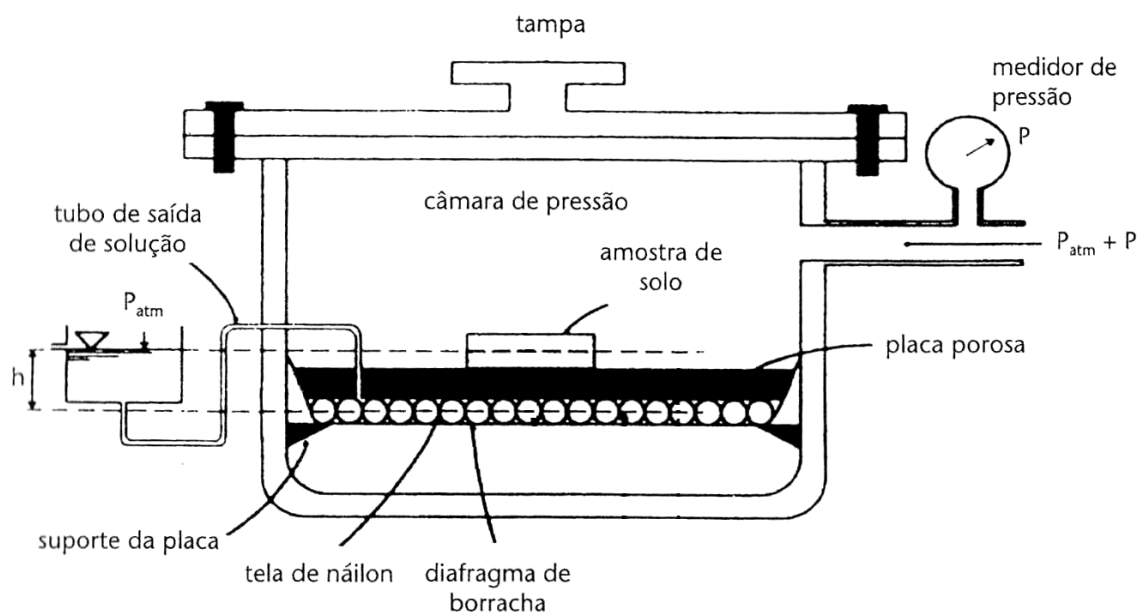


Figura 1 Esquema da câmara de pressão de Richards (LIBARDI, 2000).

A amostra de solo saturada é colocada sobre a placa cerâmica, também saturada, no interior da câmara. Em seguida, aplica-se uma determinada pressão à câmara, o que faz com que parte da água na amostra se mova para o reservatório sob a placa. A água é retirada do solo até que o equilíbrio se estabeleça, que é identificado pelo momento em que cessa a drenagem fora da câmara. Na condição de equilíbrio, o solo terá um teor de água θ retido a um potencial matricial Ψ_m numericamente igual à pressão aplicada na câmara (LIBARDI, 2000).

Na condição de equilíbrio, a leitura do manômetro fornece diretamente o potencial matricial da água do solo. Quando toda a água potencialmente drenável de uma amostra é eliminada, após uma dada pressão na câmara, retira-se a amostra da câmara e determina-se sua umidade (PREVEDELLO, 1996). A operação é repetida para tantos valores de pressão necessários para se obter uma boa curva de retenção da água. Um exemplo de escolha para pressões a serem aplicadas é: 6, 10, 33, 50, 100, 300, 500 e 1500 kPa (REICHARDT; TIMM, 2004).

Um aspecto operacional importante consiste na necessidade de perfeito contato solo/placa para o adequado transcorrer do ensaio (LIBARDI, 2000). Outro ponto é a limitação do instrumento devido à placa porosa: sucessivas e crescentes pressões podem ser aplicadas na câmara, desde que não ultrapassem a pressão de borbulhamento da placa (pressão acima da qual ocorre a passagem de ar através dos poros da placa) (PREVEDELLO, 1996).

No intervalo de pressões utilizado, a placa porosa (quando molhada) precisa ser permeável à água e impermeável ao ar, ou seja, a pressão aplicada não deve ser suficiente para eliminar a água dos poros da placa (REICHARDT; TIMM, 2004). Para tanto, existem

placas porosas com pressões de borbulhamento de 100, 300, 500 e 1500 kPa (PREVEDELLO, 1996) e placas de alta microporosidade, denominadas membranas de Richards, que podem ser usadas a pressões de 100 a 2000 kPa (REICHARDT; TIMM, 2004).

Apesar da câmara de pressão de Richards ser o método padrão para a obtenção da curva de retenção, possibilitando alcançar altos valores de pressão até maiores que 1500 kPa, este método apresenta algumas dificuldades: a determinação do ponto de equilíbrio entre a pressão aplicada e a água retida no solo, o contato amostra-placa, o longo tempo exigido para as medidas e o custo do equipamento (TAVARES, FELICIANO; VAZ, 2008).

3.3.2 Câmara de compressão triaxial

A câmara de compressão triaxial é amplamente utilizada nos estudos de tensão-deformação e de propriedades de resistência dos solos. Os ensaios consistem na compressão de uma amostra cilíndrica em que se variam as tensões radial e axial. Normalmente, são conduzidos em duas fases: na primeira, denominada de fase de confinamento, aplica-se uma tensão confinante uniforme em todas as direções da amostra e, na segunda, denominada fase de cisalhamento, mantém-se constante o valor da tensão confinante e aumenta-se o valor da tensão axial vertical, através da aplicação de uma força progressiva, até que ocorra a ruptura da amostra (ORTIGÃO, 2007).

Para tanto, o equipamento (Figura 2) é constituído por uma câmara cilíndrica de material resistente e transparente assentada sobre uma base de metal, uma bucha e um pistão. A amostra cilíndrica de solo é colocada entre um pedestal, na base da célula e um disco de metal. Para facilitar a drenagem, utiliza-se uma placa porosa na base da amostra, que é conectada à saída da câmara por tubulações. A amostra é envolvida por uma membrana de borracha impermeável, vedada no topo e na base por elásticos (O-rings), para evitar contato com a água da câmara (TERZAGHI, PECK; MESRI 1996; ORTIGÃO, 2007).

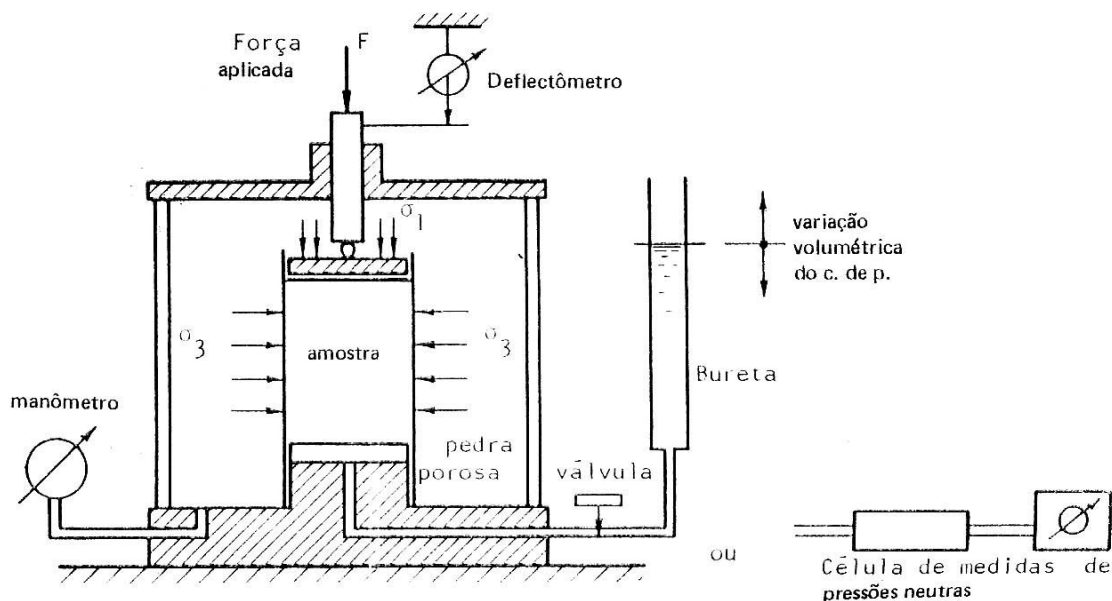


Figura 2 Esquema da câmara de compressão triaxial (VARGAS, 1981).

Após a montagem da amostra, a câmara é fechada hermeticamente e preenchida com água, a qual é submetida a uma pressão. A finalidade da água é a aplicação da tensão confinante, que atua em todas as direções, inclusive na direção vertical, impondo à amostra um estado hidrostático de tensões. O equipamento possibilita variar, conforme desejado, a pressão atuante sobre a amostra, uma vez que a água da câmara está ligada a um compressor. A pressão no interior da câmara é controlada por um manômetro. A tensão axial (σ_1) é gerada pela força (F) aplicada à amostra pelo pistão vertical que penetra na câmara e produz uma tensão desviatória (σ_2) acrescida à tensão confinante (σ_3) (VARGAS, 1981; PINTO, 2000).

O equipamento triaxial é tradicionalmente utilizado nos ensaios de determinação de módulo de deformabilidade e de resistência ao cisalhamento em amostras de solo, justamente por possibilitar a observação e o controle das pressões neutras que possam aparecer durante a execução dos mesmos (VARGAS, 1981). Pressão neutra ou poropressão é aquela a que está submetida a água intersticial da amostra de solo, que independe da porosidade do solo (PINTO, 2000), e que, no caso dos ensaios, é acrescida de uma parcela induzida pela pressão confinante somada à pressão axial (VARGAS, 1981).

O equipamento permite a medição da variação volumétrica da amostra de solo através de um transdutor de pressão, uma válvula para controle da drenagem e uma bureta graduada. Fechando-se a válvula de controle da drenagem, o ensaio é realizado em condições não drenadas, o que possibilita a medida da pressão neutra na água intersticial da amostra pelo transdutor de pressão. Quando o ensaio é realizado em condições drenadas, é possível determinar as deformações volumétricas em amostras saturadas

através da bureta graduada, uma vez que o volume de água que sai da amostra corresponde à variação de volume da mesma (ORTIGÃO, 2007; VARGAS, 1981).

No que se refere às condições de drenagem, os ensaios triaxiais convencionais são classificados em: consolidado drenado, consolidado não-drenado e não-consolidado não-drenado. Os três ensaios têm finalidades específicas. Nas argilas, por exemplo, são realizados os três tipos, dependendo da situação que se deseja analisar (ORTIGÃO, 2007).

No ensaio consolidado drenado, a drenagem da amostra é permitida nas duas fases. Aplica-se a pressão confinante e espera-se que a amostra adense, ou seja, que a pressão neutra se dissipe mediante a drenagem. A seguir, a tensão axial é aumentada lentamente, para que a água sob pressão possa sair. Desta forma, a pressão neutra durante todo o carregamento é praticamente nula, e as tensões totais (soma da pressão neutra e das tensões efetivas) aplicadas indicam as tensões efetivas (aquelas transmitidas pelos contatos entre as partículas sólidas do solo) que estavam ocorrendo. A quantidade de água que sai da amostra durante o carregamento axial pode ser medida e, se a amostra estiver saturada, indica a variação de volume (PINTO, 2000).

No ensaio consolidado não-drenado, aplica-se a pressão confinante e deixa-se dissipar, através de drenagem, a pressão neutra induzida. Desta forma, a amostra adensa sob a pressão confinante. A seguir, carrega-se axialmente sem drenagem. Esse ensaio indica a resistência não drenada em função da tensão de adensamento. Se as pressões neutras forem medidas, a resistência em termos de tensões efetivas também é determinada (PINTO, 2000).

No ensaio não-consolidado não-drenado, a amostra é submetida à pressão confinante e, a seguir, ao carregamento axial, sem que se permita qualquer drenagem, fazendo com que toda a pressão aplicada seja absorvida pela água intersticial, induzindo uma pressão neutra. O teor de água permanece constante, e, se a amostra estiver saturada, não haverá variação de volume. O ensaio é geralmente interpretado em termos de tensões totais. Este ensaio pode ser feito com ou sem medidas de pressões neutras (PINTO, 2000).

O ensaio triaxial é tão importante em Mecânica dos Solos que pode ser considerado como seu ensaio padrão. Verifica-se que a câmara de compressão triaxial é muito versátil, permitindo a aplicação de trajetórias de tensão diversas. O custo do equipamento necessário à sua execução é acessível à maioria dos laboratórios de solos (ORTIGÃO, 2007).

Feliciano (2005) estudou a obtenção da curva de retenção de água no solo utilizando a câmara de compressão triaxial considerando que, através da aplicação de pressão hidrostática em amostra de solo, pode-se coletar e quantificar a água que foi drenada da amostra àquela pressão e, a partir da quantidade de água drenada em diferentes níveis de pressão, calcula-se as umidades para as respectivas pressões aplicadas. Com estes teores, é possível construir um gráfico relacionando pressão e umidade.

Conforme explica o autor, a aplicação de tensões confinantes a uma amostra de solo saturado colocada em uma célula hermeticamente fechada e com drenagem impedida garante que toda pressão aplicada seja suportada exclusivamente pela água que preenche os vazios do solo, gerando um excesso de pressão neutra, mas sem permitir distorção ou deformações volumétricas da amostra. Este excesso de pressão neutra consiste em um gradiente hidráulico que possibilitará a drenagem da água intersticial quando a mesma for permitida. Então, a drenagem ocorrerá até que o excesso de pressão neutra seja dissipado. A quantificação da água drenada permite avaliar a umidade no solo que está em equilíbrio com a pressão inicialmente aplicada.

Feliciano (2005) avaliou a utilização da câmara de compressão triaxial para a obtenção da curva de retenção da água em amostra de solo indeformada, saturada e submetida a pressões hidrostáticas variando de 55 a 920 kPa. O pesquisador comparou a curva gerada em seu experimento com a curva obtida pelo método da câmara de pressão de Richards, observando alguma similaridade entre elas, apesar dos resultados obtidos em cada equipamento serem diferentes entre si e não conclusivos.

3.3.3 Método do papel filtro

A utilização do método do papel filtro permite a medida da sucção do solo que, segundo Deka et al. (1995), foi utilizado pela primeira vez por R. Gardner, em 1937, com esta finalidade. Desde então, o método tem sido usado e investigado por numerosos pesquisadores, destacando-se: Fawcett e Collis-George (1967), Al-Khafaf e Hanks (1974), Chandler e Gutierrez (1986), Houston, Houston e Wagner (1994), Bulut, Lytton e Wray (2001), Leong, He e Rahardjo (2002), Marinho e Oliveira (2006) entre outros.

Diversos aspectos do método do papel filtro são abordados na literatura, tais como: precisão do método, utilização de diferentes papéis filtro, procedimentos experimentais, técnicas para calibrar o papel filtro e para medir o potencial da água de amostras de solo, etc. Atualmente, o método de medição do potencial da água no solo usando papel filtro é padronizado pela norma D5298-03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003), que delinea tanto a calibração do papel filtro quanto o procedimento de medição.

O método baseia-se no princípio de que, quando solo úmido é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, a mesma irá passar do solo para este material até que o equilíbrio seja alcançado. No estado de equilíbrio, a sucção no solo e no material poroso é a mesma, apesar das respectivas umidades serem diferentes (MARINHO, 1994).

O método consiste em colocar papéis filtro em contato com o solo, em um recipiente hermético por um período de tempo suficiente para que a pressão de vapor da água nos

poros da amostra, a pressão de vapor da água nos poros do papel de filtro e a pressão parcial de vapor de água no ar do interior do recipiente atinjam o equilíbrio. A massa dos papéis filtro é posteriormente determinada e a sucção da amostra é inferida a partir de uma curva de calibração do papel filtro, que relaciona a sucção e o teor de água neste (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003).

Atualmente, a técnica do papel filtro é o único método que permite inferir tanto sobre o potencial matricial quanto o potencial total da água no solo (BULUT; LEONG, 2008). Se o papel filtro é colocado em contato direto com o solo, este permite a medida do potencial matricial da amostra. Se o papel filtro não estiver em contato direto com o solo, esta disposição permite a medida do potencial total, entendida como a soma dos potenciais matricial e osmótico (MAHLER; OLIVEIRA, 1997). A disposição do papel filtro para ambas as medições é mostrado na Figura 3.

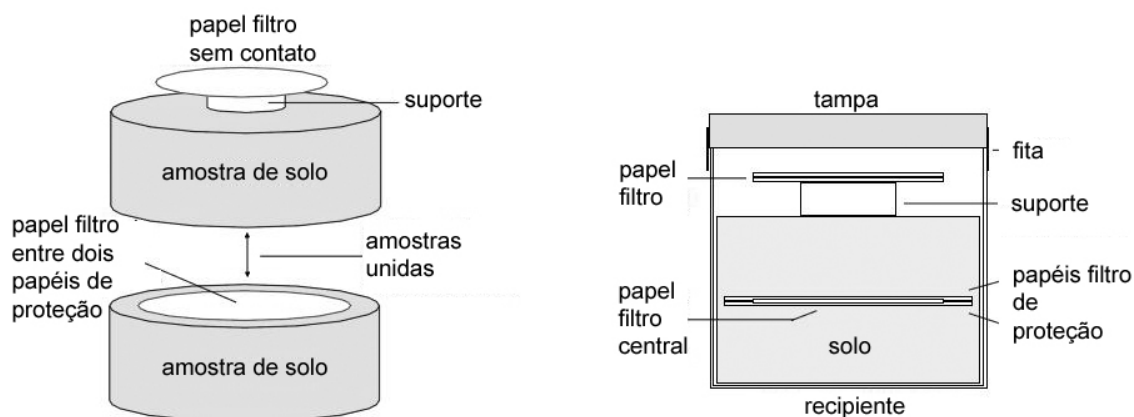


Figura 3 Disposições do papel filtro para a medição dos potenciais total e matricial da amostra de solo (BULUT; LEONG, 2008).

Além da fundamentação teórica dos princípios do método para a adequada utilização na medição de valores de sucção, um aspecto importante quanto à aplicação do papel filtro refere-se à sua curva de calibração. Na literatura, verificam-se curvas de calibração ligeiramente distintas, propostas por diferentes autores, mas que mostram razoável concordância entre si (MARINHO; OLIVEIRA, 2006). Na Tabela 1 são apresentadas algumas curvas para o papel filtro Whatman n.º 42.

Em seus estudos, Bulut, Lytton e Wray (2001) obtiveram duas curvas de calibração distintas, uma através de um processo de molhamento do papel filtro e outra por processo de secamento do papel inicialmente saturado, identificando a ocorrência do fenômeno da histerese no papel filtro. Diante deste fato, os autores apontam que, como os processos de medição das sucções matricial e total consistem em processos de molhamento do papel, ambas as medições deveriam ser inferidas a partir de curvas de calibração de molhamento,

Tabela 1 Curvas de calibração para o papel filtro Whatman n.º 42, aplicáveis ao potencial matricial

Autoria	Umidade gravimétrica do papel filtro (w_f) (%)	Sucção (log kPa)
Fawcett e Collis-George (1967)	-	$5,777 - 0,060 w_f$
Hamblin (1981)	-	$6,281 - 0,0822 w_f$
Chandler e Gutierrez (1986)	-	$5,85 - 0,0622 w_f$
Chandler et al. (1992)	≤ 47	$4,84 - 0,062 w_f$
	> 47	$6,05 - 2,48 \log w_f$
Leong, He e Rahardjo (2002)	< 47	$4,945 - 0,0673 w_f$
	≥ 47	$2,909 - 0,0229 w_f$
ASTM D5298 (2003)	$< 45,3$	$5,327 - 0,0779 w_f$
	$\geq 45,3$	$2,412 - 0,0135 w_f$
Oliveira e Marinho (2006)	< 33	$4,83 - 0,0839 w_f$
	≥ 33	$2,57 - 0,0154 w_f$

Fonte: Bicalho et al. (2007).

ou seja, curvas obtidas por técnicas de calibração em que o papel filtro estivesse inicialmente seco.

Houston, Houston e Wagner (1994) também obtiveram duas curvas de calibração diferentes, uma para a sucção total e outra para a sucção matricial, afirmando que as duas curvas não eram compatíveis, o que simplesmente significava que duas curvas distintas deveriam ser utilizadas nas medidas de sucção total e matricial. Contrariamente, Walker, Gallipoli e Toll (2005) sugerem que a curva de calibração para a sucção total representa uma condição transitória e que, se for conferido tempo suficiente para o equilíbrio, a curva de sucção total tende para a curva de sucção matricial.

As diferenças nas curvas de calibração para um mesmo papel filtro na literatura são atribuídas a vários fatores, tais como: definições termodinâmicas dos componentes da sucção, fonte de sucção e procedimento usados para a calibração, tempo de equilíbrio (BULUT; LEONG, 2008), qualidade do papel filtro e histerese (LEONG; HE; RAHARDJO, 2002). Em estudos recentes, estabeleceu-se que uma curva de calibração simples, bilinear, baseada na medida do vapor de água (umidade relativa) a partir de soluções salinas, é adequada para as medidas dos potenciais total e matricial, desde que o papel filtro não possua sucção osmótica inicial (BULUT; WRAY, 2005; MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

A curva de calibração consiste em duas partes: o segmento superior representa a umidade retida como filme adsorvido às partículas, enquanto que o segmento inferior representa a umidade retida pela capilaridade ou forças de tensão superficial entre partículas (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003). Um exemplo de curva de calibração é apresentado na Figura 4.

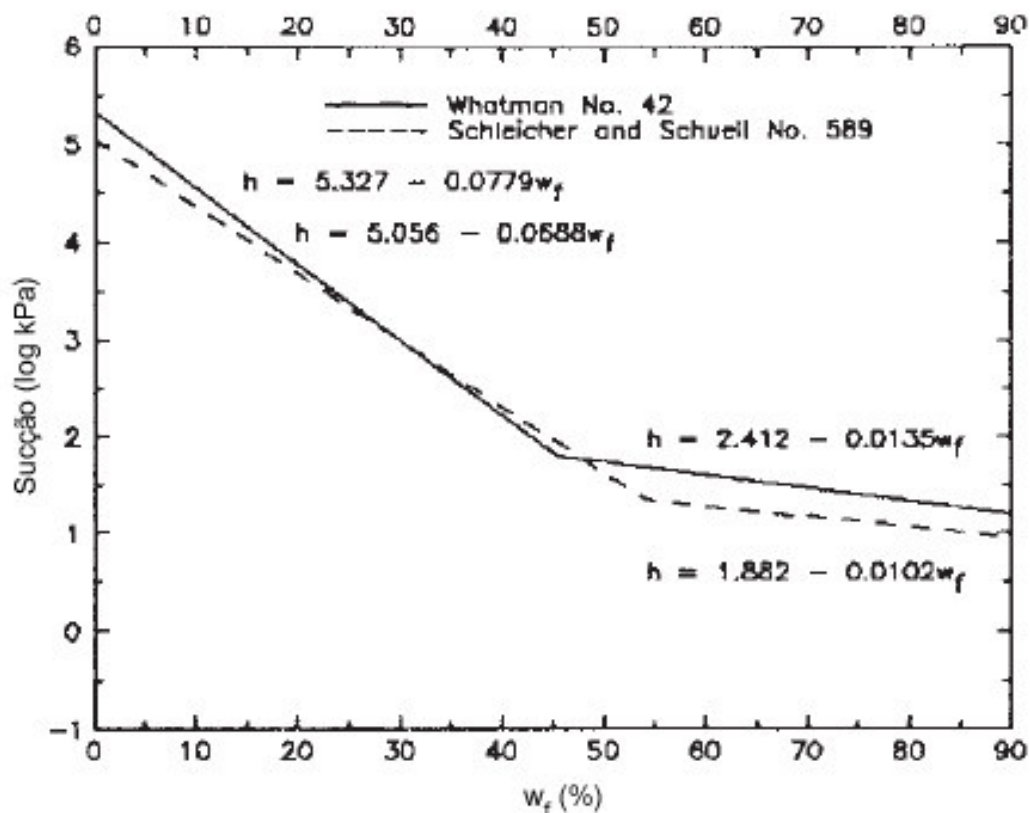


Figura 4 Curvas de calibração apresentadas na norma D5298-03 para os papéis filtro Whatman n.º 42 e Schleicher & Schuell n.º 589 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003).

Marinho e Oliveira (2006) explicam que a absorção de água pelo papel filtro pode ocorrer de duas formas: pelo fluxo de vapor ou pelo fluxo de líquido. Na situação de fluxo de vapor, as moléculas de água têm que escapar do solo superando a sucção matricial neste e também a possível sucção osmótica devido à presença de sais dissolvidos. O fluxo de líquido ocorre através das partículas do solo e das fibras do papel filtro, sem quebra da continuidade da água, o que implica em interação entre o papel filtro e a água dos poros do solo, com sais. Neste caso, a componente osmótica não atua como força tentando impedir a transferência da água para o papel.

Quando o papel filtro está em contato direto com a água do solo, água na fase líquida e sais permutam livremente e a água absorvida pelo papel filtro tem a mesma concentração de sais da água do solo. Desta forma, a medida é de sucção matricial. Se o papel filtro não está em contato direto com a água do solo, o espaço com ar deixado entre

ambos cria uma barreira aos sais, permitindo que apenas água na forma de vapor (água pura) flua. Neste caso, a medida é de sucção total (MARINHO; OLIVEIRA, 2006; BULUT; LEONG, 2008).

Considerando a sucção total do solo como a soma da sucção matricial e da sucção osmótica, se não houver sucção osmótica, a sucção total é igual à sucção matricial. Com base nesses conceitos, entende-se que o tipo de contato entre o papel de filtro e a água do solo define se é a sucção total ou matricial que está sendo medida, não sendo possível haver duas diferentes curvas de calibração para o papel de filtro, de acordo com o tipo de contato ou tipo de sucção medida (matricial ou total) (MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

O método do papel filtro apresenta-se como uma técnica de laboratório relativamente simples e econômica, que possibilita a medição de ampla faixa de sucções: 10 a 100000 kPa (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003). Para tanto, são utilizados papéis filtro quantitativos tipo II, sendo os mais usados Whatman n.º 42 e Schleicher & Schuell n.º 589-WH e equações de calibração desenvolvidas especificamente para cada marca de papel filtro.

Uma vez que o método do papel filtro determina a sucção do solo de forma indireta, sua precisão depende da precisão com que foi determinada a curva de calibração (BICALHO et al., 2007), que é limitada pelo instrumento usado para a calibração (DEKA et al., 1995). A norma D5298-03 indica a obtenção da curva de calibração mediante o cálculo da sucção de um papel filtro suspenso sobre solução salina em recipiente fechado a partir da umidade relativa do ar acima do papel e o uso de tabelas que relacionam a concentração destas soluções com a sucção gerada por estas (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003).

O processo industrial envolvido na produção do papel filtro garante que as características de absorção de cada papel sejam as mesmas, independentemente da caixa ou do lote (FAWCETT; COLLIS-GEORGE, 1967). Deka et al. (1995), em seu estudo, identificaram concordância razoável entre diferentes lotes do papel filtro Whatman n.º 42, sugerindo que curvas de calibração generalizadas para este papel podem ser usadas, quando a exatidão não é de importância principal na medição da sucção matricial.

Além da obtenção da curva de calibração, outros aspectos influenciam na confiabilidade das medições de sucção: variação de temperatura, tempo de equilíbrio, contato entre papel filtro e amostra (sucção matricial), manuseio e exposição ao ambiente (BICALHO et al., 2007).

A flutuação de temperatura durante o período de equilíbrio aumenta a variabilidade dos resultados, apesar da temperatura absoluta na qual o equilíbrio se dá não seja importante (AL-KHAFAF; HANKS, 1974). Assim, é imprescindível minimizar gradientes de temperatura durante a medição da sucção total, bem como durante a calibração com soluções salinas (BULUT; LEONG, 2008). Durante a medição, a variação de temperatura

deve ser menor que 3 °C considerando uma temperatura nominal de 20 °C (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003). Durante a calibração, sugere-se que as flutuações de temperatura não excedam de $\pm 0,1$ °C (BULUT; LYTTON; WRAY, 2001).

O tempo é um fator de extrema importância no método do papel filtro, pois deve ser suficiente para que o equilíbrio seja alcançado (MARINHO, 1994). O período de 7 dias é considerado suficiente para garantir o equilíbrio na maioria das medições de sucção (LEONG; HE; RAHARDJO, 2002), embora períodos maiores possam ser necessários para potenciais muito baixos de água (FAWCETT; COLLIS-GEORGE, 1967). Para a calibração do filtro de papel com soluções salinas, na literatura recente é sugerido um período de 14 dias (BULUT; LEONG, 2008).

Para se obter uma medição adequada de sucção, é necessário garantir que o papel filtro, após o equilíbrio, seja removido do ambiente de equilíbrio sem perda significativa de umidade. Por este motivo, o manuseio deve ser tão rápido quanto possível até ser aferida a quantidade de água presente no papel filtro. Recomenda-se que luvas e pinças sejam usadas para manusear quase que todos os materiais utilizados durante o experimento, evitando-se tocá-los diretamente, uma vez que a oleosidade das mãos pode causar o aumento da absorção de água pelo papel filtro (BULUT; LYTTON; WRAY, 2001).

Com relação a possíveis interferências na medição do teor de água do papel filtro, Marinho (1994) recomenda que o mesmo seja utilizado diretamente da caixa, ou seja, seco ao ar, contrariamente ao recomendado pela norma D5298-03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003), que orienta que o papel filtro seja seco em estufa antes do uso. Este procedimento pode afetar as características de adsorção do papel, resultando na alteração da curva de calibração e nas medidas de sucção. O papel Whatman n.º 42 apresenta um teor de água inicial de aproximadamente 6%, o que permite a medição de sucções de 0 a 29 MPa, aproximadamente (MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

O método do papel filtro é uma técnica simples e pode ser confiável se seus princípios básicos são corretamente compreendidos e um protocolo laboratorial é cuidadosamente seguido (BULUT; LEONG, 2008). Além de um método eficiente na medição das sucções total e matricial dos solos, é também utilizado na determinação das características de retenção de água nos solos (PEREIRA, 2004; SOTO, 2004).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Coleta de solo

O estudo foi conduzido com amostras confeccionadas a partir de solo coletado no NEEA - Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola, pertencente à UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, localizado na BR 467, km 101, na cidade de Cascavel, com coordenadas geográficas 24° 54' 148" latitude sul, 53° 31' 57.312" longitude oeste, altitude de 750 m. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico.

O solo foi retirado de uma área de aproximadamente 1,5 m de diâmetro, a uma profundidade de 0,28-0,40 m da superfície para evitar a presença de raízes, em local agricultável, embora coberto por pastagem na ocasião da coleta. Inicialmente, procedeu-se a remoção da camada superficial de solo de 0,05 m mediante capina com enxada. Com o auxílio de pá manual, cavou-se a área até a profundidade de 0,28 m. Na sequência, escavou-se valas até a profundidade de 0,40 m, definindo trincheiras de 0,12 m de altura.

Para realizar a extração de blocos de solo indeformado, foram utilizados 65 cilindros de plástico de aproximadamente 0,12 m de altura confeccionados a partir de tubos de PVC rígido comerciais para esgoto doméstico de 0,10 m de diâmetro interno. Estes cilindros, lubrificadas com óleo queimado em sua superfície interna, foram um a um colocados sobre as trincheiras e cuidadosamente cravados até sua borda inferior atingir a profundidade de 0,40 m. Para que a cravação dos cilindros não afetasse a estrutura do solo, esta operação deu-se simultaneamente com o desbaste da trincheira ao redor de cada cilindro até o seu diâmetro, minimizando as tensões do cilindro sobre o solo.

O mesmo procedimento foi usado para a extração de 5 blocos cilíndricos de solo para a determinação da densidade do solo pelo método do anel volumétrico, sendo, no entanto, utilizados cilindros metálicos de aproximadamente 0,10 m de diâmetro e 0,12 m de altura.

Os cilindros contendo o solo extraído foram envoltos individualmente em filme plástico de PVC e acondicionados em caixas de papelão para proteger o solo de choques mecânicos durante o transporte.

Além das amostras de solo indeformado, cerca de 10 kg de solo com sua estrutura deformada foram coletados das trincheiras e acondicionados em sacos plásticos para a realização dos ensaios químicos e físicos de caracterização.

4.2 Confeção de amostras

Os cilindros contendo o solo extraído foram transportados para o Laboratório de Materiais da UNIOESTE, na cidade de Foz do Iguaçu, para a confecção das amostras de solo a serem examinadas na câmara de pressão de Richards, submetidas ao método do papel filtro e à câmara de compressão triaxial.

Primeiramente, removeu-se o filme plástico e o cilindro de PVC mediante corte longitudinal com haste de metal quente (ferro de solda). A partir dos blocos cilíndricos de solo, precisamente da região central destes, foram esculpidas com faca afiada amostras indeformadas cilíndricas de aproximadamente 0,0528 m de diâmetro e 0,05 m de altura para os ensaios na câmara de pressão de Richards, de aproximadamente 0,0528 m de diâmetro e 0,025 m de altura para os ensaios com o papel filtro, e de aproximadamente 0,05 m de diâmetro e de altura para os ensaios na câmara de compressão triaxial, obtendo-se de 1 a 3 amostras de solo por bloco.

À medida que os blocos de solo eram desbastados (Figura 5a) e atingiam o diâmetro definido, eram encaixados cilindros plásticos confeccionados a partir de eletroduto de PVC rígido nas amostras (Figura 5b), para possibilitar o posterior processo de saturação das mesmas. O uso destes cilindros foi o que definiu o diâmetro das amostras para os ensaios na câmara de Richards e com o papel filtro, em função do diâmetro interno do eletroduto. As amostras para os ensaios na câmara triaxial não utilizaram os cilindros para a saturação e por isso seu diâmetro foi definido em virtude do diâmetro do pedestal na base da câmara.

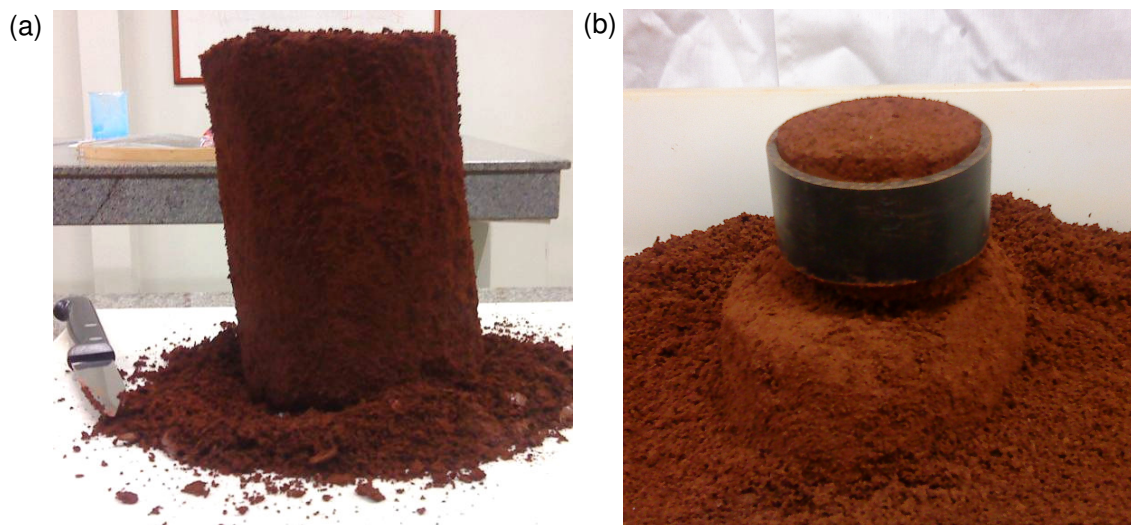


Figura 5 Confeção de amostras: (a) bloco cilíndrico sendo desbastado e (b) amostra sendo encaixada em cilindro plástico.

Uma vez confeccionadas as amostras, efetuou-se 10 medidas de diâmetro e de altura em pontos diferentes destas, com paquímetro, para o cálculo do diâmetro e altura médios das amostras e com estes determinar o volume das mesmas. Nas amostras

encaixadas nos cilindros plásticos, não se realizou a medida do diâmetro, sendo este considerado igual ao diâmetro interno do cilindro.

Ao todo, foram confeccionadas 5 amostras para o ensaio na câmara de Richards, 90 amostras para o ensaio com o papel filtro e 10 para o ensaio na câmara de compressão triaxial, considerando as amostras sobressalentes. Esta etapa do trabalho demandou aproximadamente 60 dias para a sua conclusão.

4.3 Caracterização do solo

4.3.1 Análises químicas

Para caracterizar o solo utilizado na confecção das amostras a serem ensaiadas, realizou-se análises químicas referentes a macronutrientes, micronutrientes, saturação de bases e complexo de trocas. Estes procedimentos foram realizados pelo Laboratório de Solos da COODETEC - Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola, unidade-sede de Cascavel.

4.3.2 Análises físicas

As análises físicas realizadas para caracterizar o solo utilizado na confecção das amostras a serem ensaiadas consistiram em: unidade gravimétrica, densidade de partícula, densidade do solo, porosidade do solo e análise granulométrica.

Imediatamente após a coleta do solo e retorno com este ao laboratório, procedeu-se a determinação da umidade gravimétrica do solo (w). O ensaio foi realizado com base na NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986), cujo anexo descreve a determinação do teor de água de solos em laboratório. Para tanto, utilizou-se porções de aproximadamente 30 g de solo com estrutura deformada e os equipamentos e instrumentos necessários do Laboratório de Geotecnia da UNIOESTE, campus de Cascavel. Foram realizadas 5 repetições deste ensaio.

A densidade de partícula (d_p) foi determinada com base na NBR 6508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) que descreve o método de obtenção da massa específica de solos. Para tanto, utilizou-se porções de aproximadamente 50 g de solo com estrutura deformada e os equipamentos e instrumentos necessários do Laboratório de Geotecnia da UNIOESTE. Foram realizadas 5 repetições deste ensaio.

A densidade do solo (d_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2005), utilizando-se cilindros metálicos de 0,10 m de diâmetro e 0,12 m de altura. O volume dos cilindros foi previamente

calculado com base na média de 10 medidas de diâmetro interno e de altura em pontos diferentes destes, realizadas com paquímetro. Os cilindros metálicos foram especialmente confeccionados para este fim e os demais equipamentos e instrumentos utilizados foram os disponibilizados pelo Laboratório de Geotecnia da UNIOESTE. Foram realizadas 5 repetições deste ensaio.

A porosidade do solo (ρ) foi calculada utilizando-se a Equação 3 e as médias dos valores obtidos nos ensaios de densidade de partícula e densidade do solo.

A análise granulométrica foi realizada pelo Laboratório de Solos da COODETEC, juntamente com as análises químicas, sendo determinadas as porcentagens das frações argila, silte e areia.

4.4 Ensaio com a câmara de pressão de Richards

Neste método, uma amostra indeformada de solo saturada em água destilada por 24 h, é colocada sobre placa cerâmica, previamente saturada, dentro da câmara de pressão de Richards e submetida a pressões aplicadas gradativamente. Quando o manômetro indica a pressão desejada, deixa-se a amostra drenando até que ela pare de perder água, atingindo a máxima drenagem da água contida nos seus poros correspondente àquela pressão aplicada (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2005).

Ao final de cada estágio, a amostra é retirada e tem sua massa verificada para a determinação de sua umidade na condição de equilíbrio. A amostra retorna ao aparelho e aplica-se a pressão seguinte, repetindo-se a operação. Após verificada a massa da amostra retirada da última pressão, esta é levada a estufa para secar a 105 °C e obter a massa de solo seco. Com isso, determina-se a umidade gravimétrica da amostra, através da Equação 4, ou a umidade volumétrica, utilizando a Equação 5. A partir destes dados, é possível traçar o gráfico relacionando pressão (potencial matricial) e umidade, que corresponde à curva de retenção da água no solo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2005).

Para este trabalho, 5 amostras indeformadas de solo, esculpidas e encaixadas em cilindros plásticos de 0,0528 m de diâmetro e de aproximadamente 0,05 m de altura, foram submetidas ao procedimento descrito. Para cada uma das amostras, foi gerado um conjunto de 9 pontos relacionando pressão aplicada e umidade volumétrica, uma vez que as pressões utilizadas foram 0, 10, 30, 60, 100, 300, 500, 1000 e 1500 kPa.

Este ensaio foi realizado pelo Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da USP - Universidade de São Paulo, campus de Piracicaba, e demandou aproximadamente 60 dias para a sua conclusão.

4.5 Ensaio com a câmara de compressão triaxial

4.5.1 O equipamento de compressão triaxial

O equipamento de compressão triaxial (Figura 6), como um todo, apresenta um painel com várias conexões e tubulações, resistentes à pressão, para permitir as diferentes manobras necessárias aos ensaios usuais, compressor de ar, cilindro água-ar para a transferência da pressão de ar à água no sistema, reservatório de água destilada para abastecimento do sistema, bureta, manômetros, transdutor de pressão para o monitoramento da pressão neutra na amostra de solo e sistema mecânico de aplicação e controle da força vertical à amostra além da câmara propriamente dita.



Figura 6 Equipamento de compressão triaxial.

A câmara utilizada é formada por um compartimento cilíndrico de um material transparente de alta resistência, de aproximadamente 0,20 m de altura, 0,10 m de diâmetro externo, cuja parte superior possui um pistão que permite a transmissão da força vertical a ser aplicada à amostra de solo nos ensaios de cisalhamento. A borda da câmara, assim como a parte superior e base desta, é de aço inoxidável, soldada a um cilindro de lucite, com um mecanismo que permite a vedação e o travamento da câmara junto à base. Na

base, há um pedestal que apresenta um orifício que está ligado a uma bureta por meio de válvula de controle da drenagem e um tubo de 0,005 m de diâmetro.

O equipamento descrito e utilizado encontra-se no Laboratório de Geotecnia da UNIOESTE, no campus de Cascavel.

4.5.2 Preparo de amostras

Foram utilizadas amostras indeformadas de solo, esculpidas, de aproximadamente 0,05 m de diâmetro e de altura que tiveram alturas e diâmetros médios determinados para o cálculo do respectivo volume. Cada amostra foi colocada sobre uma placa porosa de 0,05 m de diâmetro e estas foram envoltas por uma tira de papel filtro comum presa a amostra por fita adesiva para possibilitar a saturação do solo, conforme apresentada na Figura 7.

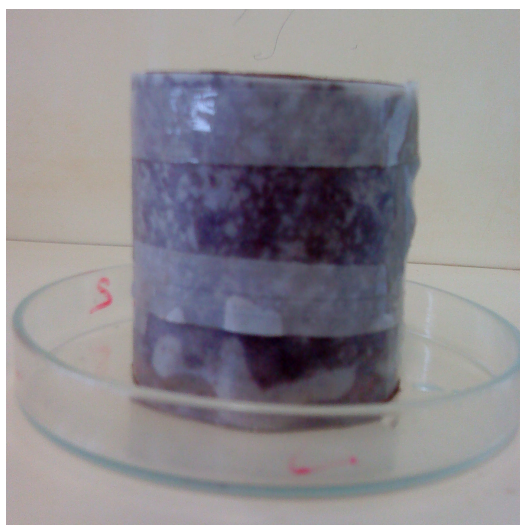


Figura 7 Amostra (conjunto) preparada e saturada para o ensaio na câmara de compressão triaxial.

As amostras assim preparadas foram saturadas em água destilada por 48 h para eliminar bolhas de ar, imergindo-as parcialmente em recipiente com água. As massas do conjunto, da placa porosa e do papel filtro saturados, assim como da placa e do papel secos foram mensuradas para, ao final do ensaio, determinar-se o volume de água no solo na saturação.

4.5.3 Montagem e execução do ensaio

Após saturada, a amostra de solo sobre a placa porosa e envolta em papel filtro foi colocada sobre o pedestal que compõe a base da câmara. A ligação entre o orifício deste pedestal e a válvula de controle da drenagem, assim como entre esta e o nível de referência da bureta, foi previamente preenchida com água destilada de forma a retirar bolhas de ar,

possibilitando-se a comunicação de forma contínua da água do solo, através da placa porosa saturada, com a água da bureta, quando a válvula de controle estivesse aberta.

Posicionada a amostra sobre o pedestal, utilizou-se um espaçador cilíndrico de resina epóxi, além da peça de acrílico usada no topo da amostra, para permitir o travamento usual da montagem pelo pistão da câmara. Envolveu-se a amostra com uma membrana de borracha impermeável cujas extremidades alcançavam a peça de acrílico no topo da montagem e o pedestal da base da câmara, sendo, nestes pontos, utilizados anéis de borracha (O-rings) sobre a membrana para garantir a vedação e evitando-se o contato da amostra com a água da câmara. Na Figura 8 é apresentada uma das amostras montadas na câmara de compressão triaxial.



Figura 8 Câmara de compressão triaxial com montagem da amostra de solo.

Uma vez isolada a amostra, fechou-se a câmara, desceu-se o pistão para travamento da montagem e preencheu-se a câmara com água destilada. Durante o ensaio, eram manipuladas 2 válvulas junto a câmara: a de controle de drenagem e a que permitia a entrada de pressão mediante água pressurizada a uma determinada pressão. Com essas válvulas fechadas, liberava-se o ar comprimido do compressor para o sistema, cuja pressão era transmitida à água das tubulações mediante o cilindro de transição água-ar, e ajustava-se, através de válvulas e leitura em manômetro do equipamento, a pressão a ser aplicada à água da câmara. Feitos os ajustes, transmitia-se a pressão para a câmara abrindo-se a válvula de entrada de pressão deixando esta aberta por aproximadamente 1 min. Fechava-se esta e aguardava-se aproximadamente 10 min. Abria-se a válvula de drenagem e monitorava-se a variação de água na bureta decorrente da drenagem provocada pela pressão da água na câmara sobre a amostra.

O monitoramento da drenagem de água da amostra para cada pressão aplicada consistia na leitura e registro do nível de água na bureta, imediatamente antes e após a aplicação da pressão e após intervalos de tempo de 1, 2, 4, 8, 15, 60, 120 min e, a partir de então, em intervalos de 1h, para as pressões de 10 a 300 kPa, e de 2 h para a pressão de 1000 kPa. Como critério de fim da drenagem, considerou-se a repetição de três leituras sucessivas após a primeira hora de monitoramento. Verificado o término da drenagem, fechava-se a válvula de drenagem e repetia-se a operação para a pressão seguinte.

Ao fim da drenagem, cada pressão aplicada promovia a retirada de uma determinada quantidade de água correspondente à diferença entre a leitura inicial e final do nível de água na bureta, em mL, que equivale a cm^3 . Estes volumes de água eram registrados para, ao final do ensaio, calcular-se o volume de água remanescente na amostra para cada pressão.

O cálculo do volume de água na amostra após a aplicação da primeira pressão correspondia à diferença entre o volume de água no solo da amostra na saturação e o volume de água drenada após a aplicação da pressão e cessada a drenagem. Na segunda pressão aplicada, o volume de água no solo era calculado através da diferença entre o volume de água na amostra à pressão anterior e o volume de água drenada nesta pressão e assim sucessivamente.

Com o término do ensaio, a amostra (conjunto solo-placa-papel) foi seca em estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$, por 24 h e posteriormente teve sua massa mensurada. Subtraindo-se da massa do conjunto saturado a massa do conjunto seco, tinha-se a massa de água no conjunto saturado. Subtraindo desta a massa de água na placa e no papel, obtinha-se a massa de água no solo na saturação. Considerando que a densidade da água é igual a 1 g cm^{-3} , tem-se a massa de água, em g, numericamente igual ao volume, em cm^3 , e assim, o volume de água no solo na saturação.

Com o volume de água na saturação e os volumes de água drenada registrados, calculou-se a umidade volumétrica do solo na saturação (que corresponde ao potencial matricial de $\psi_m = 0\text{ kPa}$) e em cada pressão aplicada através da Equação 5, uma vez que o volume da amostra era inicialmente conhecido.

As pressões aplicadas foram: 10, 30, 60, 100, 300, 500 e 1000 kPa. A partir de 1200 kPa, a válvula de segurança do compressor de ar entrava em funcionamento, o que impossibilitou a aplicação de 1500 kPa no ensaio. Este ensaio foi realizado em 5 amostras, sendo que cada mostra demandou de 12 a 15 dias de ensaio.

Para este ensaio, empregou-se uma balança analítica com 2 casas decimais para a mensuração das massas. Os cálculos e registros foram feitos com o auxílio de planilha eletrônica do programa Excel (MICROSOFT..., 2003).

4.6 Ensaio com o papel filtro

A metodologia de laboratório para a obtenção do potencial matricial do solo utilizando papel filtro é padronizada pela norma D5298-03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003). Para a obtenção da curva de retenção de água no solo aplicando este método, fez-se necessário o preparo de amostras, cujas umidades foram previamente estabelecidas, em procedimento semelhante ao descrito por Pereira (2004), e a determinação da curva de calibração do papel filtro utilizado nos ensaios.

Este ensaio foi desenvolvido nas dependências do Laboratório de Materiais da UNIOESTE, na cidade de Foz do Iguaçu, sendo utilizados os equipamentos e instrumentos disponíveis neste.

4.6.1 Preparo de amostras

Como indica a norma D5298-03, para cada medida de potencial matricial são necessárias as duas metades de uma amostra de solo. Optou-se em confeccionar duas amostras de 0,0528 m de diâmetro e de aproximadamente 0,025 m de altura para cada medida para contornar a dificuldade decorrente do corte de uma amostra de 0,05 m de altura ao meio, uma vez que o solo utilizado apresentava estrutura natural. Como descrito anteriormente, estas amostras foram encaixadas em cilindros plásticos de massa conhecida (previamente mensurada) e tiveram suas alturas médias determinadas.

A partir do cálculo do volume de cada amostra de solo, em cm^3 , e estimada a porosidade do solo, em %, calculou-se o volume total de poros a partir da multiplicação destes dois valores. Assumindo que, quando saturado, o volume total de poros é preenchido por água, tem-se que este corresponde ao volume de água na saturação, em cm^3 . Considerando a densidade da água como 1 g cm^{-3} , tem-se a massa de água na saturação, em g, numericamente igual ao volume de água na saturação, em cm^3 .

As amostras foram saturadas em água destilada por 48 h para eliminar bolhas de ar, mediante colocação de papel filtro comum na parte inferior do cilindro, prendendo-o com elástico de borracha, e imergindo-as parcialmente em recipiente com água. Após a saturação, para cada amostra, removeu-se o papel e o elástico e mensurou-se a massa do conjunto cilindro-solo saturado. Como eram conhecidas as massas de água na saturação e do cilindro, foi possível calcular a massa de solo de cada amostra, subtraindo estes dois valores da massa do conjunto cilindro-solo saturado.

Com os resultados de potencial matricial versus umidade volumétrica do ensaio com a câmara de Richards, a partir das médias dos valores de umidade obtidos para cada potencial matricial e do volume calculado das amostras, multiplicando-os, calculou-se o

volume de água que cada amostra deveria ter para que apresentasse a umidade volumétrica equivalente a cada potencial matricial.

Conhecidas a massa de água referente a cada umidade e as massas de solo e do cilindro de cada amostra, calculou-se, somando estes três valores, quanto o conjunto cilindro-solo deveria pesar para a amostra de solo apresentar uma umidade volumétrica específica (equivalente a um determinado potencial matricial).

As amostras saturadas foram deixadas secando ao ar por até 72 h, monitorando-se sua massa em balança analítica a cada 6 h até que a massa do conjunto cilindro-solo fosse igual ou ligeiramente inferior a correspondente a uma determinada umidade volumétrica. Às amostras cuja massa do conjunto era inferior à desejada, com este sobre a balança, adicionou-se água destilada com conta-gotas para corrigir a massa de água e assim obter a massa do conjunto correspondente a umidade volumétrica desejada.

Ao término do ensaio, após a manipulação dos papéis filtro, as amostras de solo foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h e posteriormente tiveram suas massas aferidas para a determinação da umidade volumétrica real das mesmas. Subtraindo-se da massa do conjunto solo-cilindro corrigida a massa do conjunto seco, tem-se a massa real de água na amostra ao início do ensaio. Considerando que a densidade da água é igual a 1 g cm⁻³, tem-se a massa de água, em g, numericamente igual ao volume, em cm³, e assim, o volume de água no solo, sendo possível calcular a umidade volumétrica real através da Equação 5, uma vez que o volume de cada amostra era inicialmente conhecido. Considerou-se a umidade volumétrica real de cada montagem igual à média das umidades das amostras que a compunham.

Os cálculos e procedimentos descritos foram realizados para 5 pares de amostras para cada umidade volumétrica correspondente aos potenciais matriciais: 10, 30, 60, 100, 300, 500, 1000, 1500 kPa, para obter pontos próximos aos pontos estabelecidos nos demais métodos, contemplando, portanto, 5 repetições. Assim, para cada um dos 8 valores de potencial matricial estabelecidos, preparou-se 5 pares de amostras.

Nesta etapa de preparo das amostras, empregou-se uma balança analítica com 3 casas decimais para a mensuração das massas. Os cálculos e registros foram feitos com o auxílio de planilha eletrônica do programa Excel (MICROSOFT..., 2003).

4.6.2 Execução do ensaio

A execução do ensaio foi realizada segundo a norma D5298-03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003), sendo utilizado o papel filtro Whatman Schleicher & Schuell 42, de 0,055 m de diâmetro, lote 1442055.

Primeiramente, procedeu-se o preparo do papel filtro. Uma vez que as amostras de solo apresentavam diâmetro menor que o diâmetro nominal do papel filtro, houve a necessidade de recortá-lo. Foram preparados papéis filtro de 0,05 e de 0,045 m de diâmetro com o auxílio de dois gabaritos metálicos confeccionados para este fim e tesoura comum. Toda a manipulação dos papéis filtro foi realizada com o uso de luvas de látex.

Os papéis filtro recortados foram dispostos em cápsulas metálicas e levados à estufa a 110 ± 5 °C para secar por 17 h. Após este período, foram acondicionados em sacos plásticos auto-vedantes dentro de dessecador com sílica gel até o momento do uso.

Para cada par de amostras cuja quantidade de água estava ajustada para corresponder a uma determinada umidade volumétrica e, portanto a um determinado potencial matricial, procedeu-se a montagem segundo a disposição indicada pela norma D5298-03 para a medida do potencial matricial, sendo disposto um papel filtro de 0,045 m de diâmetro entre dois papéis filtro de 0,05 m e estes colocados entre duas amostras de solo com igual umidade, dentro de um recipiente plástico com tampa (Figuras 9a e 9b), de 0,5 L de capacidade.

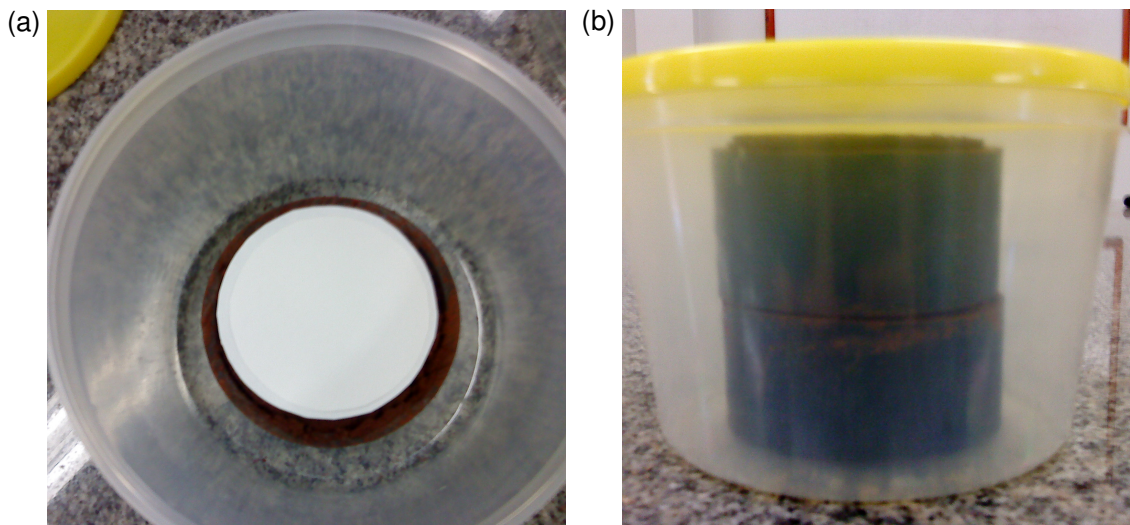


Figura 9 Montagem do ensaio do papel filtro: (a) detalhe do papel filtro e (b) disposição final.

Os recipientes plásticos com as amostras foram fechados e acondicionados em caixa de EPS, de capacidade de 60 L, em uma sala com temperatura controlada mediante aparelho condicionador de ar a 20 °C. Utilizou-se um termômetro digital dentro da caixa para registrar as temperaturas máxima e mínima ocorridas durante o ensaio, que foram de 22,2 e 19,5 °C, respectivamente. Fechou-se a caixa e deixou-se as amostras em repouso por 30

dias para garantir o equilíbrio termodinâmico da água no solo e no papel filtro dentro dos recipientes.

Ao fim do período de equilíbrio, o papel filtro central de cada montagem foi transferido, com o uso de pinças e o mais rapidamente possível (em torno de 5 s), para uma cápsula metálica com tampa, cuja massa foi previamente mensurada e registrada como T_c , e o conjunto cápsula-papel filtro teve sua massa medida em balança analítica e este valor foi registrado como M_1 . Na sequência, a cápsula metálica com papel filtro foi levada para estufa a 110 ± 5 °C para este secar por 10 h.

Após o período de secagem, cada cápsula foi retirada da estufa e transferida para o dessecador, sendo colocada sobre um bloco de metal dentro deste para esfriar por aproximadamente 60 s. Atingida a temperatura ambiente, o conjunto cápsula-papel filtro teve sua massa medida e este valor foi registrado como M_2 . Na sequência, o papel filtro foi removido e a cápsula vazia teve sua massa mensurada, cujo valor era registrado como T_h .

Para cada papel filtro, calculou-se, conforme indicação da norma D5298-03, as Equações 9, 10 e 11:

$$M_f = M_2 - T_h \quad \text{Eq. (9)}$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad \text{Eq. (10)}$$

$$w_f = 100 \frac{M_w}{M_f} \quad \text{Eq. (11)}$$

nas quais: M_f é a massa do papel filtro seco, M_2 é a massa do conjunto cápsula-papel filtro seco, T_h é a massa da cápsula quente, M_w é a massa de água no papel filtro, M_1 é a massa do conjunto cápsula-papel filtro úmido, T_c é a massa da cápsula fria, medidas em g, e w_f é o teor de água no papel filtro, em %. Nesta etapa, empregou-se uma balança analítica com 4 casas decimais para a mensuração das massas.

Uma vez obtidos os valores de w_f , aplicando-os na curva de calibração do papel filtro, tem-se o potencial matricial das amostras de solo submetidas ao ensaio.

4.6.3 Obtenção da curva de calibração

A necessidade de recortar os papéis filtro, expondo-os a umidade do ar ambiente, implicou na secagem dos mesmos em estufa. Conseqüentemente, fez-se necessária a calibração do papel filtro seco, a qual foi realizada utilizando-se soluções salinas, com base no que determina a norma D5298-03 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND

MATERIALS, 2003) e nas orientações de Bulut, Lytton e Wray (2001), que detalham este procedimento.

Primeiramente, buscou-se na literatura valores tabelados relacionando concentração de solução salina e sucção osmótica produzida por esta, a 20 °C (temperatura do ensaio), sendo o sal reagente NaCl ou KCl. Na Tabela 2, os valores apresentados por Bulut (1996), que são coincidentes com os apresentados por Fredlund e Rahardjo (1993).

Tabela 2 Sucções osmóticas produzidas por soluções de KCl a 20 °C

Molalidade (mol kg ⁻¹)	Sucção osmótica (kPa)
0	0
0,05	229
0,10	452
0,15	671
0,20	890
0,25	1107
0,30	1324
0,35	1540
0,40	1757
0,45	1973
0,50	2190
0,55	2406
0,60	2623
0,65	2840
0,70	3057
0,75	3274
0,80	3492
0,85	3710
0,90	3928
0,95	4147
1,00	4366

Fonte: Bulut (1996).

A partir dos valores da Tabela 2 e empregando-se o programa Excel (MICROSOFT..., 2003), gerou-se o gráfico de dispersão dos referidos valores e adicionou-se linha de tendência de regressão linear com exibição da equação da reta. Com esta equação, calculou-se os valores de sucção osmótica equivalentes a 0,001, 0,002, 0,005 e 0,010 mol kg⁻¹, para obter pares ordenados de molalidade versus sucção intermediários 0 e 229 kPa.

Uma vez que a equação gerada não forneceu resultados coerentes quando comparados aos apresentados por Bulut, Lytton e Wray (2001) para soluções de KCl a 25 °C e por Fredlund e Rahardjo (1993) usando soluções de KCl em diferentes temperaturas, repetiu-se o procedimento, utilizando-se apenas os valores das duas primeiras linhas da Tabela 2. Com isso, obteve-se uma nova equação com resultados de sucção osmótica equivalentes a 0,001, 0,002, 0,005 e 0,010 mol kg⁻¹ coerentes com os fornecidos pelos referidos autores.

Considerando que a unidade de concentração molalidade corresponde ao número de mols (ou seja, massa, em g, dividida pela massa molar, em g mol⁻¹) de soluto dissolvido por quilograma de solvente (RUSSELL, 1994) e, que 1 kg de água destilada (solvente) corresponde a 1 L (densidade 1000 kg m⁻³ e 1 m³ é igual a 1000 L), para as molalidades de 0,001 a 0,010 mol kg⁻¹ e 0,05 a 0,50 mol kg⁻¹ da Tabela 2, calculou-se a massa do reagente KCl correspondente aos respectivos valores de molalidade, considerando a utilização de 0,2 L de água destilada, obtendo-se assim a composição de 14 soluções salinas.

As soluções preparadas foram colocadas em recipientes plásticos com tampa idênticos aos utilizados no ensaio com as amostras de solo e papéis filtro. Utilizou-se cilindros plásticos (eletroduto de PVC rígido de 0,0528 m de diâmetro interno) de aproximadamente 0,05 m de altura como suporte para apoiar um papel filtro seco não recortado aproximadamente 0,02 m acima da superfície da solução salina (Figura 10).

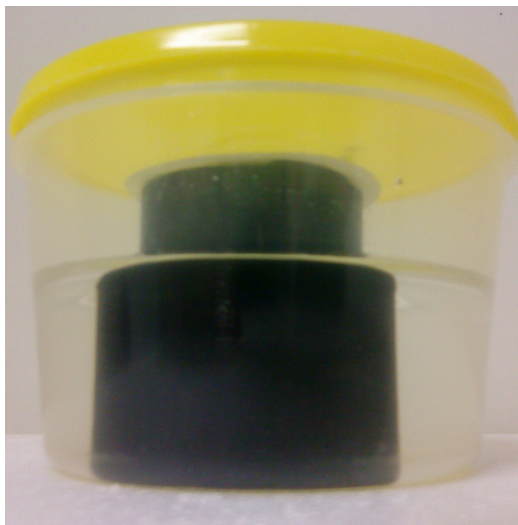


Figura 10 Montagem para a calibração do papel filtro.

Feita a montagem mostrada na Figura 10, os 14 recipientes contendo as soluções salinas foram fechados e acondicionados em caixa de EPS, uma sala com temperatura controlada mediante a utilização de aparelho condicionador de ar a 20 °C. Utilizou-se um termômetro digital dentro da caixa para registrar as temperaturas máxima e mínima ocorridas durante a calibração, que foram, respectivamente, de 20,4 e 19,7 °C. Fechou-se a caixa e deixou-se as soluções em repouso por 30 dias para garantir o equilíbrio

termodinâmico da água na solução salina, no papel filtro e do vapor de água dentro dos recipientes.

Ao fim do período de equilíbrio, procedeu-se com o papel filtro de cada montagem da mesma forma que com os papéis filtro centrais do ensaio com as amostras de solo, obtendo-se os valores de w_f referentes a cada solução salina apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Valores obtidos de teor de água no papel filtro (w_f)

Molalidade (mol kg ⁻¹)	Sucção osmótica (kPa)	w_f (%)
0,001	5	51,82
0,002	9	46,52
0,005	23	44,55
0,010	46	37,18
0,050	229	30,43
0,100	452	27,05
0,150	671	23,89
0,200	890	23,65
0,250	1107	23,15
0,300	1324	22,06
0,350	1540	21,51
0,400	1757	20,96
0,450	1973	19,70
0,500	2190	18,99

Empregando-se o programa Excel (MICROSOFT..., 2003), efetuou-se transformação logarítmica decimal nos valores de sucção e gerou-se o gráfico de dispersão dos valores transformados de sucção versus w_f , adicionando-se linha de tendência de regressão linear com exibição da equação da reta. Com isso, o programa forneceu a Equação 12, que corresponde à curva de calibração do papel filtro utilizado nos ensaios:

$$\psi_m = 4,9322 - 0,0836 w_f \quad \text{Eq. (12)}$$

em que ψ_m é a sucção ou potencial matricial, em log kPa. O coeficiente de determinação R^2 fornecido pelo programa para a equação resultou em 99,25%.

4.7 Análise dos resultados

Aplicou-se estatística descritiva aos conjuntos de dados obtidos na determinação da densidade de partícula e densidade do solo. Isso foi realizado para verificar a qualidade dessas determinações, uma vez que estes valores seriam utilizados para estimar a porosidade das amostras de solo e, com base nesta propriedade, seriam efetuados os cálculos para o preparo das amostras a serem utilizadas no método do papel filtro.

Fez-se também uso da estatística descritiva para analisar os resultados de umidade volumétrica obtidos a cada pressão aplicada nos ensaios com a câmara de pressão de Richards e com a câmara de compressão triaxial. Para tanto, empregou-se o programa estatístico MINITAB 15 (MINITAB..., 2006).

Para efetuar o ajuste dos resultados fornecidos pelos três métodos de ensaio avaliados, utilizou-se o programa RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009) e o modelo de van Genuchten (1980), representado pela Equação 7. Forneceu-se ao programa os valores de umidade volumétrica versus pressão (esta em $\text{cm H}_2\text{O}$, considerando que $1033 \text{ cm H}_2\text{O}$ equivalem a $101,325 \text{ kPa}$ (REICHARDT; TIMM, 2004)). Identificou-se a configuração, dentre as disponíveis no programa, que apresentasse o maior valor para o coeficiente de determinação (R^2), para o conjunto de dados observados. Esse foi considerado o melhor ajuste possível dos dados.

Complementarmente ao parâmetro estatístico R^2 , para avaliar a eficiência do ajuste dos dados, empregou-se o erro-padrão da estimativa (EPE), conforme apresentado por Manieri, Vaz e Maria (2007), considerando-se que, quanto menor o EPE, mais precisa é a estimativa (HINES et al., 2006).

Para verificar a aplicabilidade da câmara de compressão triaxial e do papel filtro para a determinação da curva de retenção da água no solo, comparou-se os valores de umidade volumétrica estimados pelas equações fornecidas pelo RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009) para estes métodos com os valores estimados para a câmara de pressão de Richards para as mesmas pressões, considerando estes como referência.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do solo

No Anexo A deste trabalho são apresentados os resultados das análises realizadas para a caracterização química do solo utilizado na confecção das amostras ensaiadas, na forma de laudo expedido pela COODETEC.

Os resultados das análises físicas do solo são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 Caracterização física do solo

Propriedade física	Resultado
Umidade gravimétrica em campo (w)	0,39 g g ⁻¹
Densidade de partícula (d _p)	2,95 g cm ⁻³
Densidade do solo (d _s)	1,09 g cm ⁻³
Porosidade (ρ)	63,05%
Análise granulométrica	Argila – 75%
	Silte – 13%
	Areia – 12%

Os valores obtidos de densidade de partícula e densidade do solo mostraram-se inferiores aos apresentados por Feliciano (2005), respectivamente, 3,05 e 1,204 g cm⁻³, o qual analisou também solo coletado no NEEA. Comparada com a média dos resultados apresentados no Anexo B para a densidade do solo das amostras a serem submetidas à câmara de Richards, igual a 1,08 g cm⁻³, o valor obtido mostra-se próximo.

Supõe-se que a relativamente baixa densidade do solo seja decorrente da forma de coleta das amostras para o ensaio, uma vez que os anéis volumétricos foram cuidadosamente cravados no solo mediante desbaste lateral de trincheira, enquanto que a coleta usual de amostras utiliza-se de castelo e aplicação de pressão sobre este para introduzir o anel no solo (KIEHL, 1979), o que promoveria uma ligeira compactação do mesmo, afetando a estrutura e a densidade do solo.

A partir da análise granulométrica do solo, é possível classificá-lo como solo muito argiloso, considerando o triângulo de classificação textural apresentado por Reichardt e Timm (2004).

Os resultados da estatística descritiva dos valores determinados de densidade de partícula e densidade do solo são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 Estatística descritiva dos valores de densidade de partícula e densidade do solo

Variável	N	Média	Desvio padrão	Variância	Coefficiente de variação	Mínimo	Máximo
d_p (g cm ⁻³)	4	2,95	0,0915	0,00837	3,11	2,85	3,05
d_s (g cm ⁻³)	5	1,09	0,0270	0,00073	2,47	1,06	1,13

De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variância é a média dos quadrados dos desvios, que consistem na diferença entre uma observação e a média das observações, e o desvio padrão é a raiz quadrada positiva da variância. Já o coeficiente de variação (CV), que é o desvio padrão em porcentagem média, permite comparar melhor a dispersão dos dados por ser uma medida relativa e consiste em indicativo da precisão de um experimento. Os autores consideram que valores de CV inferiores a 10%, como no caso dos obtidos para d_p e d_s , são baixos e refletem a homogeneidade dos dados, o que é um indicativo da qualidade na determinação dos mesmos.

5.2 Câmara de pressão de Richards

Os resultados obtidos no ensaio das 5 amostras de solo na câmara de pressão de Richards são apresentados no Anexo B, na forma de laudo emitido pelo Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ.

A estatística descritiva dos valores observados de umidade volumétrica em função das pressões aplicadas (potenciais matriciais) é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 Estatística descritiva dos valores de umidade volumétrica obtidos na câmara de Richards

Variável	N	Média	Desvio padrão	Variância	Coefficiente de variação	Mínimo	Máximo
$\theta(0 \text{ kPa})$	5	0,6368	0,0198	0,00039	3,12	0,6105	0,6658
$\theta(10 \text{ kPa})$	5	0,4586	0,0382	0,00146	8,32	0,4301	0,5210
$\theta(30 \text{ kPa})$	5	0,4084	0,0413	0,00170	10,11	0,3770	0,4720
$\theta(60 \text{ kPa})$	5	0,3880	0,0372	0,00138	9,58	0,3592	0,4434
$\theta(100 \text{ kPa})$	5	0,3753	0,0346	0,00120	9,22	0,3482	0,4235
$\theta(300 \text{ kPa})$	5	0,3435	0,0252	0,00064	7,34	0,3239	0,3836
$\theta(500 \text{ kPa})$	5	0,3268	0,0247	0,00061	7,56	0,3078	0,3664
$\theta(1000 \text{ kPa})$	5	0,3054	0,0240	0,00058	7,85	0,2872	0,3442
$\theta(1500 \text{ kPa})$	5	0,2935	0,0236	0,00056	8,03	0,2758	0,3319

Na Tabela 6, identifica-se que os coeficientes de variação das umidades volumétricas para as pressão do ensaio são inferiores a 10%, exceto para a pressão de

30 kPa (CV igual a 10,11%). Segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002), estes resultados são homogêneos, indicando que os ensaios foram executados em condições bem controladas. O melhor ajuste dos 45 valores de umidade volumétrica versus pressão resultantes do ensaio na câmara de Richards deu-se com a adoção da restrição dada pela Equação 8. No programa RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009), estimativas iniciais foram escolhidas com base nas informações dos percentuais de argila, silte e areia e densidade do solo. A Equação 13 mostra o resultado do ajuste dos dados de retenção de água no solo,

$$\theta = 0,01778 + \frac{0,61906}{[1 + (0,44276 \cdot \psi_m)^{1,09074}]^{0,08319}}, \quad \text{Eq. (13)}$$

em que θ é dado em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e ψ_m em $\text{cm H}_2\text{O}$, considerando que o programa forneceu os seguintes valores:

- $\theta_r = 0,01778 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;
- $\theta_s = 0,63684 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;
- $\alpha = 0,44276$;
- $b = 1,09074$.

A Equação 13 apresentou um R^2 , que é um indicador da adequação de um modelo de regressão, tanto melhor quanto mais próximo de 100% (HINES et al., 2006), igual a 92,79% e um EPE igual a $0,028 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, indicando uma elevada correspondência entre os valores observados e os estimados pelo ajuste. Na Figura 11, é apresentada a curva de retenção para os valores estimados pela Equação 13.

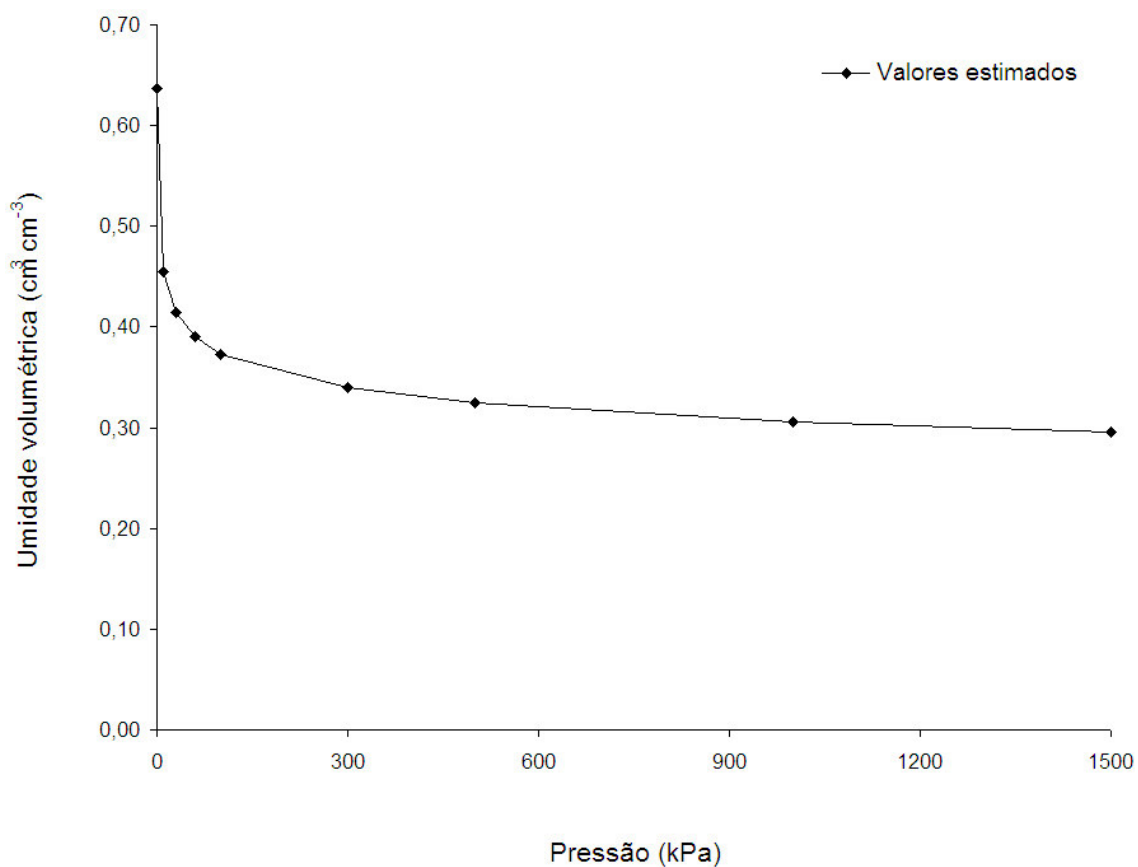


Figura 11 Curva de retenção obtida com a câmara de pressão de Richards.

Observando a Figura 11, assim como os resultados da estatística descritiva da Tabela 6, identifica-se concordância dos resultados obtidos com os apresentados por Moraes et al. (1993) que, analisando 250 curvas de retenção da água no solo, verificaram que as umidades às várias pressões consideradas em seus experimentos apresentaram, comparativamente, coeficientes de variação baixos, menores que 10%.

5.2 Câmara de compressão triaxial

Os resultados obtidos no ensaio das 5 amostras de solo na câmara de compressão triaxial são apresentados no Apêndice A. A estatística descritiva dos valores observados de umidade volumétrica em função das pressões aplicadas é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 Estatística descritiva dos valores de umidade volumétrica obtidos na câmara triaxial

Variável	N	Média	Desvio padrão	Variância	Coefficiente de variação	Mínimo	Máximo
$\theta(0 \text{ kPa})$	5	0,63	0,01789	0,00032	2,85	0,61	0,65
$\theta(10 \text{ kPa})$	5	0,60	0,0259	0,00067	4,33	0,57	0,63
$\theta(30 \text{ kPa})$	5	0,54	0,0336	0,00113	6,18	0,510	0,58
$\theta(60 \text{ kPa})$	5	0,45	0,0402	0,00162	8,98	0,40	0,49
$\theta(100 \text{ kPa})$	5	0,33	0,0472	0,00223	14,14	0,26	0,38
$\theta(300 \text{ kPa})$	5	0,23	0,0444	0,00197	19,47	0,17	0,28
$\theta(500 \text{ kPa})$	5	0,15	0,0270	0,00073	18,51	0,12	0,18
$\theta(1000 \text{ kPa})$	5	0,09	0,0239	0,00057	25,95	0,06	0,12

Na Tabela 7, identifica-se que os coeficientes de variação das umidades volumétricas para as pressões acima de 60 kPa são superiores a 10%. Segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002) classificam como médios CV entre 10 e 20% e altos quando acima de 20%, o que indica que os resultados obtidos na câmara triaxial são mais heterogêneos que os valores resultantes da câmara de Richards.

O melhor ajuste dos 40 valores de umidade volumétrica versus pressão resultantes do ensaio na câmara triaxial é apresentado na Equação 14,

$$\theta = \frac{0,62316}{[1 + (0,00239 \cdot \psi_m)^{1,74791}]^{0,32188}}, \quad \text{Eq. (14)}$$

em que θ é dado em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e ψ_m em $\text{cm H}_2\text{O}$, considerando que o programa forneceu os seguintes valores:

- $\theta_r = 0 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;
- $\theta_s = 0,62316 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;
- $\alpha = 0,00239$;
- $a = 0,32188$;
- $b = 1,74791$.

A Equação 14 apresentou um R^2 igual a 97,14% e um EPE igual a $0,053 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, indicando uma elevada correspondência entre os valores observados e os estimados pelo ajuste. Na Figura 12, é apresentada a curva de retenção para os valores estimados pela Equação 14 juntamente com a curva obtida com a câmara de pressão de Richards.

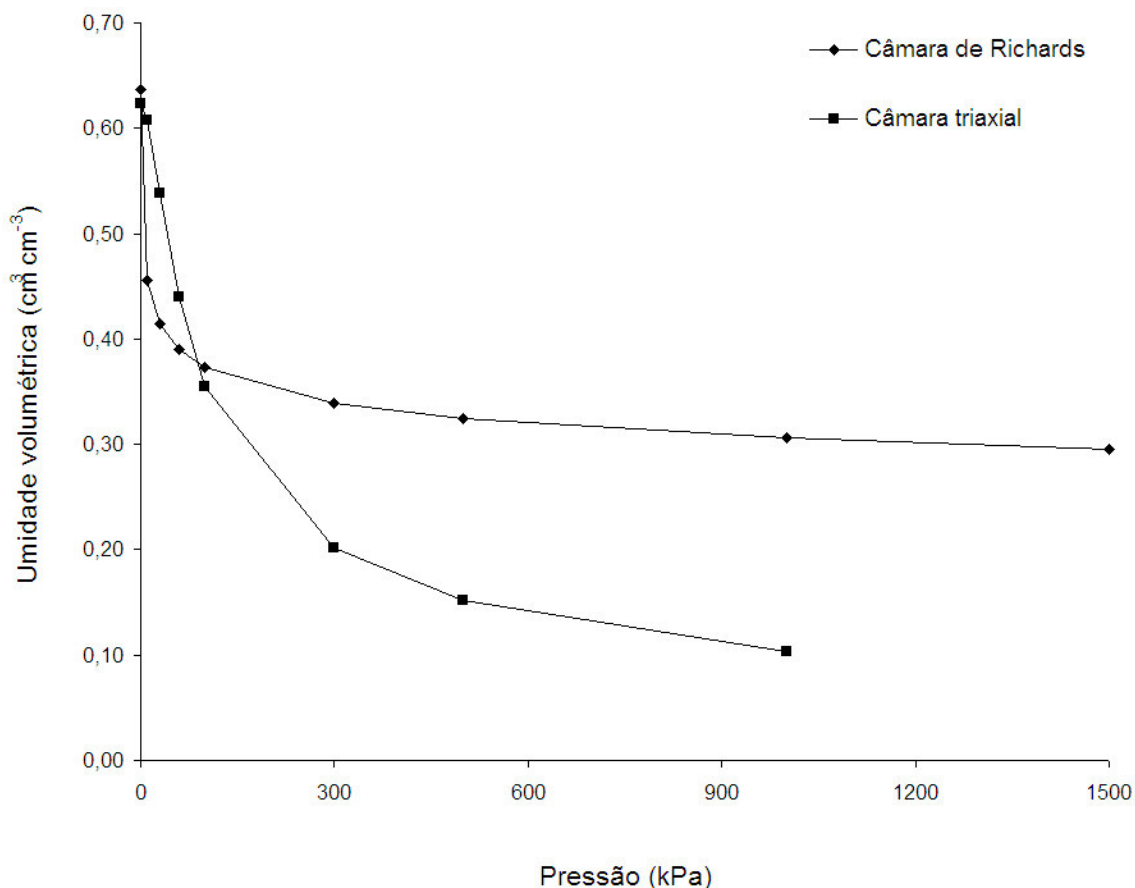


Figura 12 Curva de retenção obtida com a câmara de compressão triaxial.

Na Figura 12, é possível identificar diferença entre o comportamento das curvas ajustadas para os valores resultantes da câmara de Richards e da câmara triaxial. Atribui-se esta diferença a possível distinção na transmissão das pressões aplicadas à amostra ensaiada devido às características de cada equipamento, gerando distribuição de tensões diferenciadas sobre a estrutura e a água do solo.

No equipamento triaxial, a pressão aplicada à água na câmara é transmitida à membrana de borracha gerando a tensão confinante sobre toda a superfície desta, que comprime a estrutura do solo, adensando-o caso a válvula de drenagem da câmara esteja aberta. Neste processo de consolidação, a água é expelida do solo, este ocupa seu lugar e com isso a amostra sofre redução de volume (TERZAGHI, PECK; MESRI 1996). Inclusive, estando a amostra inicialmente saturada, o volume de água drenado equivale à variação de volume do solo (PINTO, 2000).

Na câmara de pressão de Richards, deduz-se que a alteração da estrutura seja menor, uma vez que a amostra encontra-se dentro de um anel volumétrico rígido e a pressão de ar incide diretamente sobre o topo da amostra, produzindo tensões sobre a estrutura do solo assim como diretamente sobre a água que se encontra nos seus poros superficiais.

Além disso, a drenagem da amostra na câmara de Richards não decorre do adensamento do solo, mas sim da diferença de potencial estabelecida entre a água na amostra, sob pressão aplicada à câmara, e a água sob a placa porosa, que se encontra sob pressão atmosférica, apresentando, portanto, potencial inferior. Conforme explica Libardi (2000), estando a amostra de solo intimamente ligada à placa porosa saturada, esta funciona como uma extensão da amostra, e assim, a diferença de potencial promove a movimentação da água do solo para o reservatório sob a placa, até que o equilíbrio se estabeleça.

A comparação entre as respostas estimadas para os dois equipamentos, para as pressões de 10, 30, 60, 100, 300, 500 e 1000 kPa, é mostrada na Figura 13.

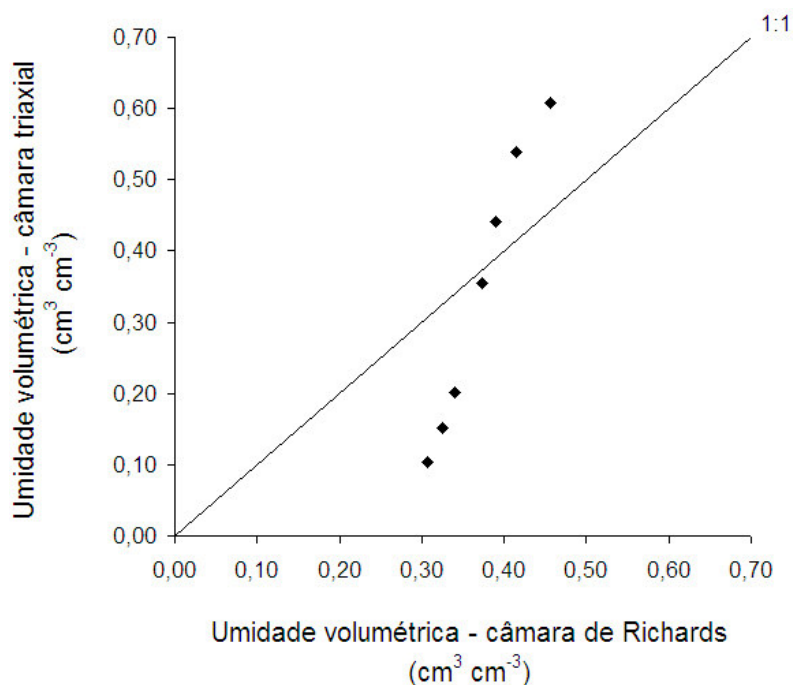


Figura 13 Comparação da umidade volumétrica estimada para a câmara de Richards e para a câmara triaxial.

Conforme ilustrado na Figura 13, verifica-se que, em umidades entre 0,40 e 0,60 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, a câmara triaxial apresentou valores consideravelmente mais altos que os valores da câmara de Richards. Cássaro et al. (2008) apontam que, quando o conteúdo de água no solo se encontra próximo à saturação, a curva de retenção depende basicamente do arranjo poroso do solo, ou seja, de sua estrutura, o que explica esta diferença, já que a estrutura da amostra foi alterada pelo equipamento triaxial. Portanto, o aumento de densidade da amostra implica em um excedente de água expulso dela.

Segundo Reichardt e Timm (2004), para baixos teores de água, o potencial matricial praticamente independe de fatores geométricos, sendo a porosidade de pouca importância em sua determinação. Sendo assim, supor-se-ia que para valores de umidade abaixo de

0,40 cm³ cm⁻³, os equipamentos apresentassem respostas mais próximas, o que não foi verificado.

5.3 Método do papel filtro

Os resultados obtidos no ensaio com o papel filtro são apresentados no Apêndice B e graficamente representados na Figura 14.

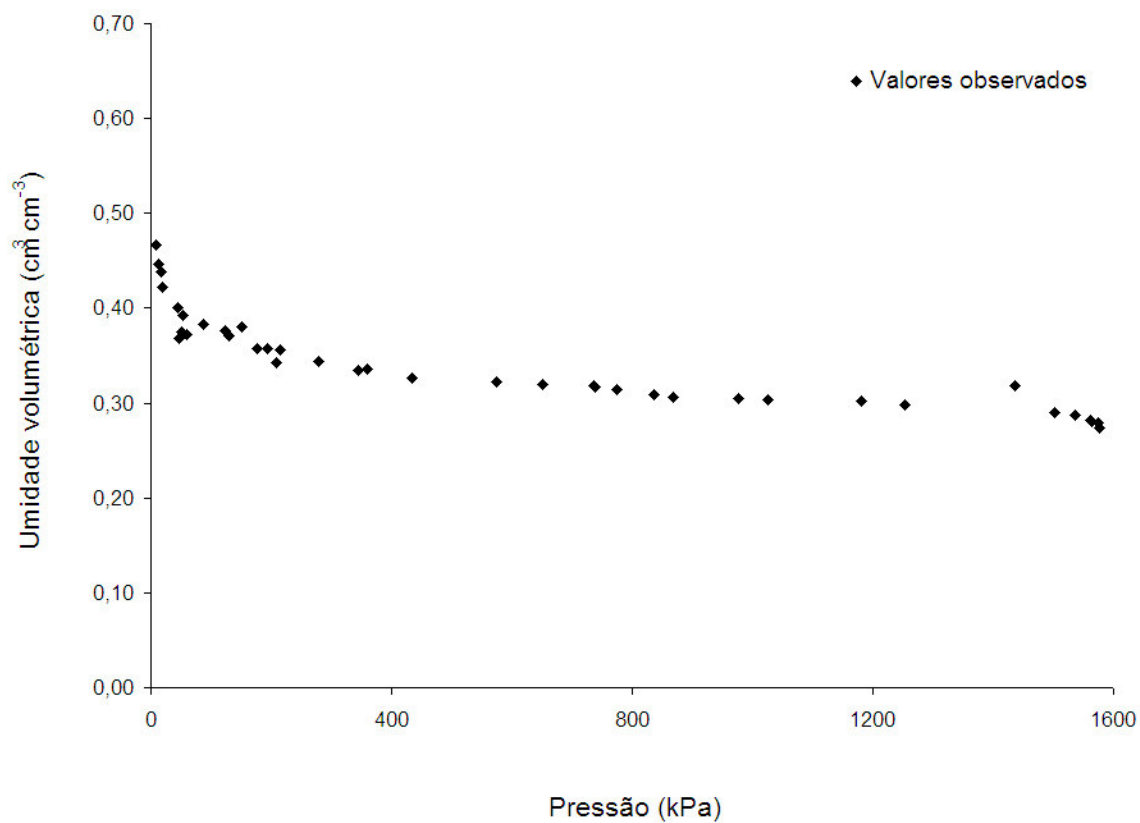


Figura 14 Valores obtidos nos ensaios com o papel filtro.

Nos ensaios com o papel filtro, como pode ser identificado na Figura 14, houve dificuldade em se colocar amostras em uma mesma umidade volumétrica e, desta forma, não se obteve repetições em uma mesma umidade, o que impossibilitou a análise estatística apresentada para os outros dois métodos sobre a variável dependente (pressão).

Calculando o coeficiente de correlação de Pearson para os valores de umidade volumétrica real das amostras e o teor de água no papel filtro (w_f), obteve-se resultado igual a 0,961, o que indica forte correlação entre as respectivas medidas, como previsto considerando que quanto maior a umidade da amostra de solo, maior deveria ser a mesma no papel filtro. O coeficiente de correlação é uma quantidade adimensional que mede a associação entre duas variáveis aleatórias indicando que, quanto mais próximo de 1, mais alta é a correlação positiva entre as mesmas (HINES, 2006).

O melhor ajuste dos 40 valores de umidade volumétrica versus pressão resultantes do ensaio com o papel é apresentado na Equação 15,

$$\theta = 0,12062 + \frac{0,42784}{[1 + (0,05219 \cdot \psi_m)^{1,00500}]^{0,13404}}, \quad \text{Eq. (15)}$$

em que θ é dado em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e ψ_m em $\text{cm H}_2\text{O}$, considerando que o programa forneceu os seguintes valores:

- $\theta_r = 0,12062 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
- $\theta_s = 0,54846 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
- $\alpha = 0,05219$;
- $a = 0,13404$;
- $b = 1,00500$.

A Equação 15 apresentou um R^2 igual a 95,44%, indicando elevada eficiência do ajuste dos dados pelo modelo. Na Figura 15, é apresentada a curva de retenção para os valores estimados pela Equação 15 juntamente com a curva obtida com a câmara de pressão de Richards.

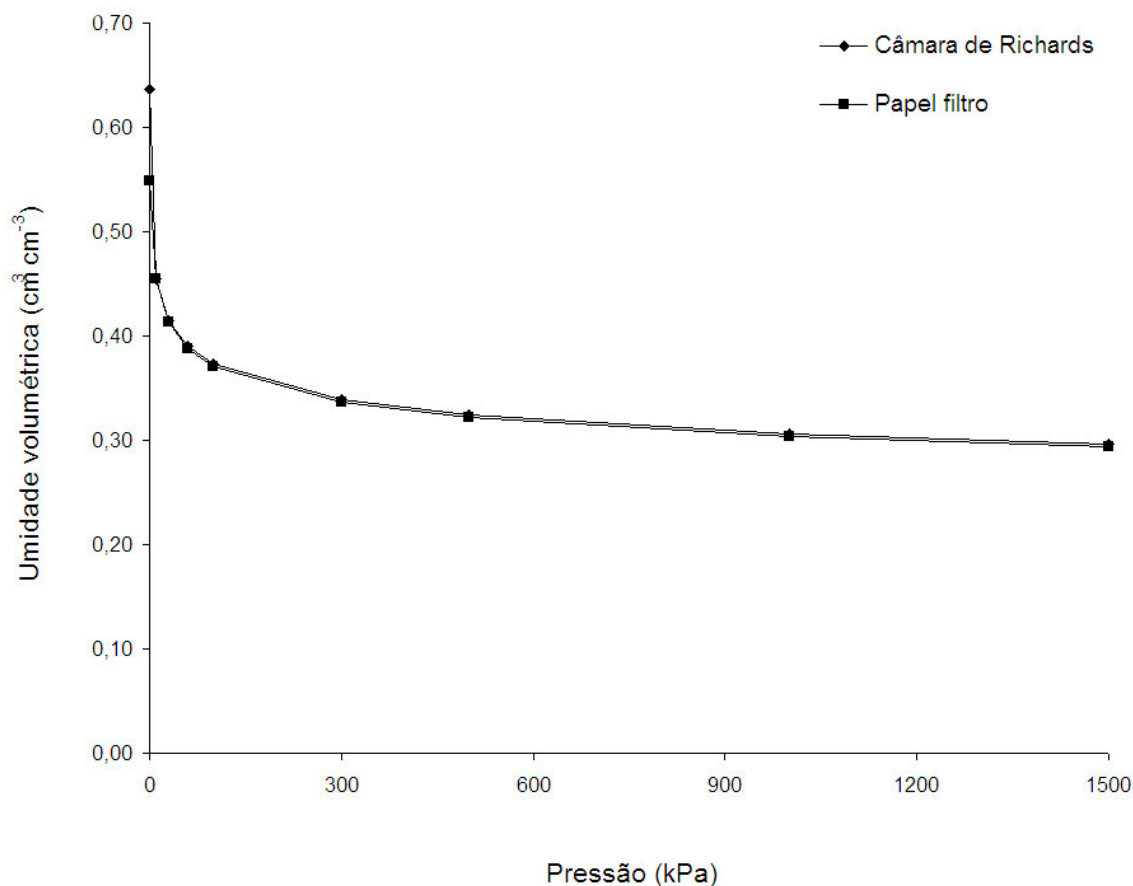


Figura 15 Curva de retenção obtida nos ensaios com o papel filtro.

Na Figura 15, é possível identificar a quase sobreposição das curvas ajustadas para os valores resultantes da câmara de Richards e ensaio com o papel filtro. Em parte, este comportamento se deve ao ajuste realizado pelo programa RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009) que, embora fornecendo parâmetros distintos para o modelo de van Genuchten (1980), resultou em curvas graficamente semelhantes. A comparação entre as respostas estimadas para os dois métodos, para as pressões de 10, 30, 60, 100, 300, 500, 1000 e 1500 kPa, é mostrada na Figura 16.

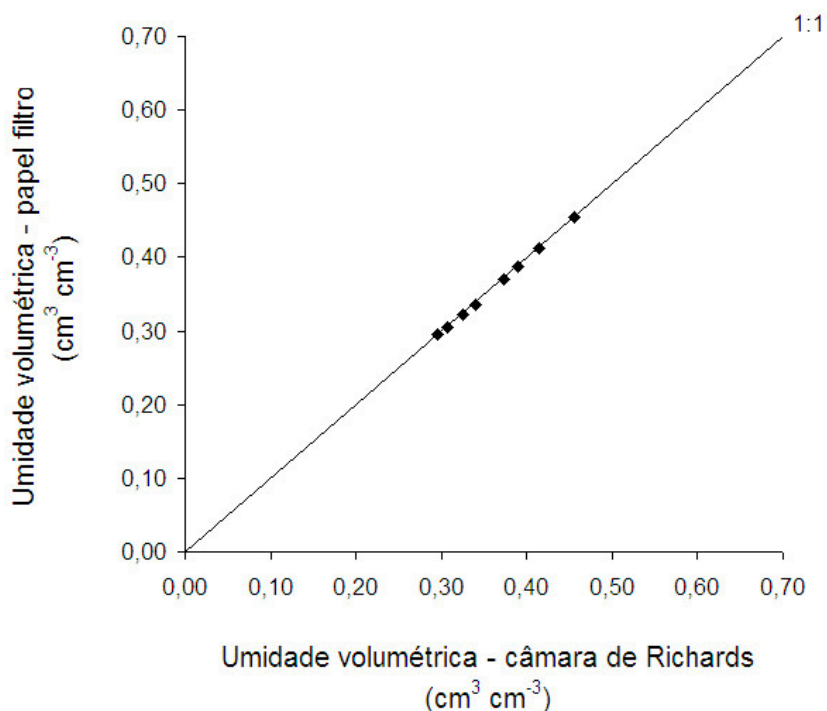


Figura 16 Comparação da umidade volumétrica estimada para a câmara de Richards e para método do papel filtro.

Conforme ilustrado na Figura 16, verifica-se que os valores de umidade volumétrica estimados nos dois métodos foram semelhantes, o que evidencia a possibilidade de utilização do método do papel filtro na construção da curva de retenção para um solo agrícola, assim como vem sendo utilizado em amostras de solo compactado, a exemplo dos trabalhos de Oliveira (2004), Pereira (2004) e Soto (2004) que fazem uso deste método dentre seus procedimentos experimentais.

Possivelmente, os resultados alcançados se devam ao rigor imposto ao ensaio, especialmente quanto ao tempo de equilíbrio de 30 dias, superior aos 7 dias indicado na norma D5298-03. Gomes (2007) destaca que a precisão das aferições efetuadas com o papel filtro pode ser significativamente afetada pela deficiência de contato entre o papel filtro e o solo. Entretanto, o autor salienta que o aumento do tempo de interação entre o papel filtro e o solo pode compensar eventuais dificuldades de acesso da água intersticial ao papel filtro.

O método do papel filtro exige um cuidadoso protocolo laboratorial tanto na confecção de amostras, uma vez que irregularidades superficiais ou descontinuidades na face da amostra em relação ao papel filtro podem acarretar em medições incorretas (GOMES, 2007), quando na execução do ensaio. Além disso, o método não possibilita a determinação da umidade do solo para pontos específicos de pressão de forma direta, o que constitui um diferencial em relação ao uso da câmara de Richards. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho associados ao baixo custo do método transformam-no em alternativa interessante à câmara de pressão de Richards para a obtenção da curva de retenção da água.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos mediante as metodologias definidas neste trabalho, verificou-se que:

1. A comparação entre as curvas obtidas pelo equipamento de compressão triaxial e pela câmara de pressão de Richards indicou que o emprego da câmara triaxial não se mostra adequado para a determinação da curva de retenção da água no solo.

2. O método do papel filtro pode ser utilizado para a obtenção da curva de retenção de água em solos agrícolas, constituindo o seu uso em alternativa metodológica à câmara de pressão de Richards, ao menos quando investigadas amostras de um Latossolo Vermelho distroférico típico.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude da impossibilidade de estabelecer, neste estudo, amostras de solo com umidades volumétricas iguais, constituindo assim as repetições a serem avaliadas no ensaio do papel filtro, o conjunto de valores observados não permitiu a avaliação da acurácia do método na determinação das pressões nas amostras ensaiadas. Deste modo, sugere-se o desenvolvimento de pesquisas com esta finalidade, aplicadas, inclusive, a amostras de diferentes tipos de solos agrícolas.

8 REFERÊNCIAS

- AL-KHAFAF, S.; HANKS, R. J. Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential. **Soil Science**, Philadelphia, v. 117, n. 4, p. 194-199, 1974.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298-03**: standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. Philadelphia, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.
- _____. **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.
- BICALHO, K. V.; GOMES CORREIA, A.; FERREIRA, S.; FLEUREAU, J. M.; MARINHO, F. A. M. The use of filter paper method for matric suction measurement of an unsaturated compacted silty sand. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., 2007, Salvador. **Anais...** Salvador: ABMS, 2007. p. 215-219.
- BRADY, N. C.; BUCKMAN, H. O. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 647 p.
- BULUT, R. **A re-evaluation of the filter paper method of measuring soil suction**. 1996. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Texas Tech University, Lubbock, 1996.
- BULUT, R.; LEONG, E. C. Indirect measurement of suction. **Geotechnical and Geological Engineering**, Netherlands, n. 26, p. 633-644, 2008.
- BULUT, R.; LYTTON, R. L.; WRAY, W. K. Soil suction measurements by filter paper. In: GEO-INSTITUTE SHALLOW FOUNDATION AND SOIL PROPERTIES, 2001, Houston. **Proceedings...** Houston: Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, 2001. p. 243-261.
- BULUT, R.; WRAY, W. K. Free energy of water-suction-in filter papers. **Geotechnical Testing Journal**, West Conshohocken, v. 28, n. 4, p. 355-364, 2005.
- CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F.; SANTOS, R. A. dos; GIMÉNEZ, D.; REICHARDT, K. Funil de haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2555-2562, 2008.
- CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter paper method of suction measurements, **Géotechnique**, London, v. 36, p. 265-268, 1986.
- CICHOTA, R.; VAN LIER, Q. de J. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 585-596, 2004.
- COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. da S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 515-523, 2008.
- DEKA, R. N.; WAIRIU, M.; MTAKWA, P. W.; MULLINS, C. E.; VEENENDAAL, E. M.; TOWNEND, J. Use and accuracy of the filter-paper technique for measurement of soil matric potential. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 46, p. 233-238, jun. 1995.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de laboratórios**: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 334 p.

FAWCETT, R. G.; COLLIS-GEORGE, N. A filter-paper method for determining the moisture characteristics of soil. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, Collingwood, v. 7, p. 162-167, 1967.

FELICIANO, J. J. da S. **Métodos alternativos para obtenção da curva de retenção da água no solo**. 2005. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1993. 489 p.

GOMES, J. E. da S. **Estudo sobre os fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M.; BORROR, C. M. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 588 p.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. R.; WAGNER, A. M. Laboratory filter paper measurements. **Geotechnical Testing Journal**, West Conshohocken, v. 17, p. 185-194, 1994.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil physics**. 5. ed. New York: John Wiley, 1991. 328 p.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: CERES, 1979. 264 p.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408 p.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. New York: Marcel Dekker, 2004. 682 p.

LEONG, E. C.; HE, L.; RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Journal of Geotechnical Testing**, West Conshohocken, v. 25, n. 3, p. 322-333, 2002.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: P. L. Libardi, 2000. 509 p.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502, 2008.

MAHLER, C. F.; OLIVEIRA, L. C. D. de. Measurement of total suction in situ of porous soils of São Paulo using the filter-paper method. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENT IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: AAB, 1997. p. 243-247.

MANIERI, J. M.; VAZ, C. M. P.; MARIA, I. C. de. Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 191-198, 2007.

MARINHO, F. A. M. Measurement of suction using the filter paper method. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1994, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: ABMS, 1994. v. 2, p. 515-522.

MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The filter paper method revisited. **Geotechnical Testing Journal**, West Conshohocken, v. 29, n. 3, p. 1-9, 2006.

MICROSOFT Office Excel 2003. [S.l.]: Microsoft Corporation, 2003.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. C. C. Curvas características de sucção do solo laterítico da região de Londrina/PR. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v. 12, n. 24, p. 63-74, 2004.

MINITAB Release 15: statistical software. [S.l.]: Minitab Inc., 2006.

MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L.; DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção da água pelo solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 3, p. 383-392, 1993.

MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Heterogeneidade dos pontos experimentais de curvas de retenção da água no solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 3, p. 393-403, 1993.

OLIVEIRA, O. M. de. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. 2004. 361 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 386 p.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. 247 p.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo**: com problemas resolvidos. Curitiba: C. L. Prevedello, 1996. 446 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 469 p.

RUSSELL, J. B. **Química geral**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1994. V. 1. 662 p.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 2004. 224 f. Tese (Doutorado em Geotécnica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

TAVARES, M. H. F.; FELICIANO, J. J. da S.; VAZ, C. M. P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 517-524, 2008.

TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 161-168, 2005.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: John Wiley, 1996. 529 p.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 305-314, 2002.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. California: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1994. 117 p. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ada/csmos/models/retc.html>>. Acesso em: 3 maio 2009.

VAN GENUCHTEN, M. T.; SIMUNEK, J.; LEIJ, F. J.; SEJNA, M. **RETC**. Version 6.02. Riverside: US Salinity Laboratory, USDA, ARS, 2009. Disponível em: <<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc-downloads>>. Acesso em: 4 out. 2009.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1981. 509 p.

WALKER, S. C.; GALLIPOLI, D.; TOLL, D. G. The effect of structure on the water retention of soil tested using different methods of suction measurement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED EXPERIMENTAL UNSATURATED SOIL MECHANICS, 2005, Trento. **Proceedings...** Trento: Taylor and Francis, 2005. p. 33-39.

APÊNDICES

Apêndice A Valores referentes ao ensaio com a câmara de compressão triaxial

Amostra	Pressão (kPa)	Umidade volumétrica (cm ³ cm ⁻³)
1	0	0,61
	10	0,57
	30	0,51
	60	0,41
	100	0,33
	300	0,20
	500	0,13
	1000	0,06
2	0	0,64
	10	0,58
	30	0,53
	60	0,47
	100	0,33
	300	0,23
	500	0,13
	1000	0,09
3	0	0,63
	10	0,62
	30	0,58
	60	0,49
	100	0,38
	300	0,28
	500	0,17
	1000	0,11
4	0	0,61
	10	0,59
	30	0,52
	60	0,40
	100	0,26
	300	0,17
	500	0,12
	1000	0,08
5	0	0,65
	10	0,63
	30	0,58
	60	0,47
	100	0,37
	300	0,26
	500	0,18
	1000	0,12

Apêndice B Valores referentes ao ensaio com o papel filtro

Montagem	w _f (%)	Pressão (kPa)	Umidade volumétrica real (cm ³ cm ⁻³)
10(1)	45,56	13,3	0,446
10(2)	38,27	54,1	0,393
10(3)	48,02	8,3	0,466
10(4)	44,60	16,0	0,438
10(5)	31,64	193,7	0,357
30(1)	25,34	651,0	0,320
30(2)	37,82	58,9	0,372
30(3)	39,15	45,7	0,401
30(4)	43,59	19,4	0,422
30(5)	33,99	123,3	0,376
60(1)	31,28	207,6	0,342
60(2)	33,72	129,8	0,371
60(3)	38,94	47,5	0,368
60(4)	35,84	86,3	0,383
60(5)	23,85	868,5	0,306
100(1)	24,70	737,2	0,318
100(2)	32,09	177,5	0,358
100(3)	-	-	-
100(4)	32,90	152,0	0,380
100(5)	38,46	52,1	0,375
300(1)	31,10	215,0	0,356
300(2)	28,65	344,1	0,335
300(3)	20,80	1561,4	0,282
300(4)	29,76	277,9	0,344
300(5)	22,98	1025,3	0,303
500(1)	24,44	773,8	0,314
500(2)	27,46	433,0	0,327
500(3)	28,42	359,6	0,336
500(4)	26,00	573,9	0,322
500(5)	21,94	1252,9	0,298
1000(1)	20,75	1576,7	0,274
1000(2)	24,04	836,6	0,309
1000(3)	21,23	1435,4	0,318
1000(4)	23,24	975,9	0,305
1000(5)	24,69	738,0	0,317
1500(1)	22,25	1179,9	0,302
1500(2)	20,88	1536,8	0,287
1500(3)	20,75	1574,9	0,279
1500(4)	21,00	1502,4	0,290
1500(5)	20,79	1564,0	0,281

ANEXOS

Anexo A Laudo com as análises químicas e granulométrica



Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola

Laudo de Análises de Solos Nº 185223

Cliente: Juliana Fenner Ruas Lucas - FOZ DO IGUAÇU/PR	Entrada 30/3/2010	Análise 1/4/2010
Identificação do Proprietário		

Nome: Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola	Unidade:
Município/UF: Cascavel/PR	Matrícula Coop.

Identificação da Amostra		
---------------------------------	--	--

Nº Amostra: 01	Nº Cliente:	Propriedade:
Nº Perímetro:	Prof (cm): 20	Localidade:
Nº Lotes:		
Local Amostra:	Nº Matrícula:	

Resultados das Análises de Solos		
---	--	--

Macronutrientes			Micronutrientes		Granulometria		
P mg/dm ³	K ⁺ cmol/dm ³	C g/dm ³	Cu mg/dm ³	Zn mg/dm ³	Argila %	Silte %	Areias %
1,00	0,10	10,91	8,30	0,80	75	13	12
Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Classe Argila = Solo tipo 3 <small>Classificação conforme Instrução Normativa nº 10, de 14 de junho de 2005, seção 01, página 12; e alterada pela Instrução Normativa nº 12 através de retificação publicada no DOU de 17 de junho de 2005, seção 01, página 06.</small>		
Ca ²⁺ cmol/dm ³	Mg ²⁺ cmol/dm ³	H ⁺ +Al ³⁺ cmol/dm ³	Fe mg/dm ³	Mn mg/dm ³			
2,40	1,59	5,76	39,00	28,00			
Médio	Alto		Médio	Alto			
pH	Al ³⁺ cmol/dm ³	S-(SO ₄) ²⁻ mg/dm ³	B mg/dm ³				
5,10	0,00	ANS	ANS				
Médio	Baixo						

Este Laboratório participa da Comissão Estadual de Laboratórios de Análises Agronômicas - C.E.L.A. - Pr

		Saturações		Complexo de Trocas			Índices das Relações				
SB cmol/dm ³	T cmol/dm ³	V ₁ %	Al ³⁺ %	Ca ²⁺ %	Mg ²⁺ %	K ⁺ %	Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Ca ²⁺ /K ⁺	Mg ²⁺ /K ⁺	$\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{K^{+}}$	$\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{K^{+}}}$
4,09	9,85	41,52	0,00	24,37	16,14	1,02	1,51	24,00	15,90	39,90	0,05
Médio	Baixo	Baixo	M.Baixo	Baixo	Alto	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Alto	Baixo

SB - Soma das Bases V₁ - Saturação das Bases P, K⁺, Cu, Zn, Fe e Mn - Mehlich I - Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ - KCl - C - Walkley Black - pH - Cloreto de Cálcio
T - Capacidade de Trocas Catiónicas ANS - Análise Não Solicitada H⁺+Al³⁺ - Tampão SMP - S(SO₄)²⁻ - Fosfato Monocálcico - B - Cloreto de Bário

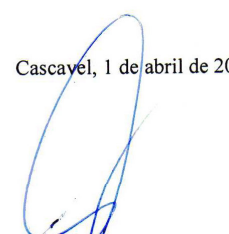

Edson Feliciano de Oliveira
Eng. Agr. CREA 6842-D - Reg. 14899
7ª Região - Pr

Jorge José Jurach
Eng. Agr. CREA 5688-D - Reg. 13306
7ª Região - Pr

Cascavel, 1 de abril de 2010

Dorival Vicente
Eng. Agr. CREA 8267 V/PR
7ª Região - Pr

Celso Ari Palagi
Eng. Agr. CREA 13983-D - Reg. 29011
7ª Região - Pr


Mário Cesar Ferreira Godinho
Técnico em laboratório

Este laudo representa amostra encaminhada pelo Proprietário

BR 467 - Km 98 - Caixa Postal 301 - CEP 85.813-450 - Cascavel - PR - Fone (45) 3321-3532 - Fax (45) 3321-3510 - E-mail: solos@coodetec.com.br

Anexo B Laudo com os resultados do ensaio da câmara de pressão de Richards



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
 ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
 Av. Pádua Dias, 11 • Caixa Postal 9 • Cep 13418-900 • Piracicaba, SP • Brasil
 Fone (19) 3417-2111 • Fax (19) 3417.2110
 e-mail: cralves@esalq.usp.br



Departamento de Ciência do Solo - Laboratório de Física do Solo

Cliente: Juliana Fenner

ψ	SOLO A	SOLO B	SOLO C	SOLO D	SOLO E	SOLO A	SOLO B	SOLO C	SOLO D	SOLO E
ψ	Umidade volumétrica					Umidade gravimétrica				
KPa	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	$\frac{\text{g}}{\text{g}}$	$\frac{\text{g}}{\text{g}}$	$\frac{\text{g}}{\text{g}}$	$\frac{\text{g}}{\text{g}}$	$\frac{\text{g}}{\text{g}}$
0	0,6410	0,6105	0,6327	0,6341	0,6658	0,6163	0,5815	0,5455	0,5982	0,6165
10	0,5210	0,4265	0,4675	0,4337	0,4444	0,5010	0,4062	0,4030	0,4091	0,4115
30	0,4720	0,3750	0,4278	0,3789	0,3881	0,4538	0,3572	0,3688	0,3575	0,3594
60	0,4434	0,3594	0,4089	0,3590	0,3691	0,4264	0,3423	0,3525	0,3387	0,3417
100	0,4235	0,3469	0,4003	0,3494	0,3562	0,4072	0,3304	0,3451	0,3296	0,3298
300	0,3836	0,3239	0,3522	0,3239	0,3341	0,3689	0,3085	0,3036	0,3056	0,3094
500	0,3664	0,3078	0,3347	0,3078	0,3175	0,3523	0,2931	0,2885	0,2904	0,2939
1000	0,3442	0,2872	0,3122	0,2872	0,2962	0,3310	0,2735	0,2692	0,2709	0,2743
1500	0,3319	0,2758	0,2998	0,2758	0,2844	0,3191	0,2626	0,2585	0,2602	0,2634
Denidade do solo (g cm^{-3})	1,04	1,05	1,16	1,06	1,08					

Prof. Dr. Alvaro Pires da Silva
 Coordenador do Laboratório

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)