

LUCAS MARTINS GUIMARÃES

**DESENVOLVIMENTO DE UM PERMEÂMETRO PARA DETERMINAÇÃO DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA E NÃO SATURADA DE
SOLOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2008**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

G963d
2008

Guimarães, Lucas Martins, 1981-

Desenvolvimento de um permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada de solos / Lucas Martins Guimarães. – Viçosa, MG, 2008. x, 64f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 60-64.

1. Condutividade hidráulica saturada. 2. Condutividade hidráulica não saturada. 3. Solos - Permeabilidade - Equipamentos e acessórios. 4. Mecânica dos solos.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

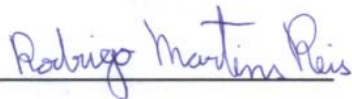
CDD 22.ed. 624.1536

LUCAS MARTINS GUIMARÃES

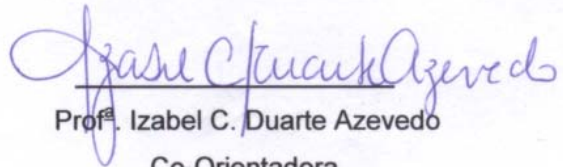
**DESENVOLVIMENTO DE UM PERMEÂMETRO PARA DETERMINAÇÃO DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA E NÃO SATURADA DE
SOLOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

APROVADA: 27 de fevereiro de 2008.



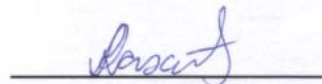
Prof. Rodrigo Martins Reis
Co-Orientador (UENF/RJ)



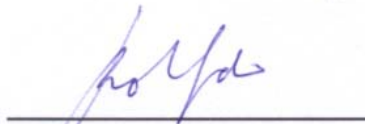
Prof.^a Izabel C. Duarte Azevedo
Co-Orientadora



Prof. Sérgio Tibana
(UENF/RJ)



Prof.^a Rejane Nascentes
(UFMT/MT)



Prof. Roberto Francisco de Azevedo
Orientador

Dedico este trabalho à minha família, a minha namorada

e aos meus amigos que estiveram sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que estiveram sempre ao meu lado, apoiando minhas decisões, me dando força e incentivo, na qual sem o apoio de vocês este trabalho não existiria.

À todos meus irmãos, que sempre torceram e rezaram por mim, cada um a sua maneira contribuiu e muito para minha formação e caráter.

Ao professor Roberto, a qual sou muito grato, pela força nos momentos difíceis, pelos ensinamentos, amizade, compreensão e confiança depositada. Muito obrigado!

À professora Izabel, a qual tenho um enorme carinho, respeito e admiração e que me conhece desde o início da graduação, que vem me acompanhando desde então, sempre com palavras de apoio. Obrigado pela paciência e compreensão. Devo muito a você. Obrigado!

A Mariana, que me acompanhou durante estes dois anos, pelo carinho, confiança, amor e momentos que serão guardados para sempre.

A professora Rejane e a doutoranda Simone, pela amizade, pelos conselhos e pelo carinho.

Ao professor Rodrigo, pelos ensinamentos e companheirismo.

Aos amigos irmãos de república, Fernando Portelinha e Francelino “Marrom”, pela amizade lapidada ao longo destes dois anos, pelos momentos que tornaram esta fase mais prazerosa.

Aos meus amigos Araujenses, Guto, João, Júlio, Beto e Adriano, por simplesmente serem meus amigos.

Aos amigos de Viçosa Neto, Roberto, Caio e Vinícius, por tudo.

Aos técnicos de laboratórios e amigos, Paulo Capelão e Júlio, que sempre estiveram prontos para me ajudar nos trabalhos e pelos momentos de descontração dentro e fora do laboratório.

Ao doutorando Vander, pela amizade e pelos ensinamentos de laboratório, sendo fundamental neste trabalho.

Ao torneiro mecânico “Chiquito” pelo trabalho exemplar e competência na confecção do equipamento.

A Kelly, pela amizade, e por tornar nossa república em um ambiente tranquilo e organizado.

Aos amigos de laboratório, Geraldo e Marcelo, por estarem sempre dispostos a ajudar e pelos momentos de descontração.

A CAPES, pela concessão da bolsa, a qual seria impossível permanecer em Viçosa, e a CNPq por financiar o projeto.

A Universidade Federal de Viçosa, que continua sendo a melhor de todas e a qual levo no coração.

E a todos aqueles que não foram citados, mas que foram fundamentais para conclusão deste trabalho.

BIOGRAFIA

LUCAS MARTINS GUIMARÃES, filho de Jurandir Ferreira Guimarães e Antônia Benicia Guimarães é natural de Araújios, Minas Gerais.

Em abril de 2001, ingressou no Curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

Em maio de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração em Geotecnia, ao nível de mestrado. Submeteu-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2008.

RESUMO

GUIMARÃES, Lucas Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2008. Desenvolvimento de um permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada de solos. Orientador: Roberto Francisco Azevedo. Co-Orientadores: Rodrigo Martins Reis, Izabel C. Duarte Azevedo.

Quando se projeta uma barragem de terra ou se investiga a estabilidade de um talude é importante que se conheça a condutividade do solo, tanto em condições saturadas, quando em condições não-saturadas. Também, na construção de camadas de impermeabilização construídas na base de aterros industriais, sanitários, etc., é fundamental a determinação da condutividade hidráulica da camada. Os equipamentos mais usados normalmente só calculam a condutividade hidráulica saturada e, usando gradientes baixos, próximos dos que ocorrem no campo, não tem precisão para determinar condutividades hidráulicas menores que 10^{-6} cm/s. No entanto, muitos órgãos ambientais brasileiros exigem que camadas de impermeabilização tenham condutividade hidráulica menor que 10^{-7} cm/s, o que, certamente, é contraditório com a precisão dos equipamentos existentes. O principal objetivo dessa dissertação foi projetar, construir e colocar em funcionamento, um permeâmetro com controle de sucção para determinar as condutividade hidráulicas em solos saturados e não saturados, usando uma bomba de fluxo para impor uma vazão constante. A metodologia utilizada foi a do regime permanente onde se controlou as vazões e monitorou as diferenças de pressão entre o topo e a base da amostra. O equipamento consta de um permeâmetro de parede flexível, bomba de fluxo com diâmetro reduzido, sistema de monitoramento com transdutor diferencial de pressão e interfaces ar/água. O permeâmetro é capaz de determinar condutividade hidráulica com valores maiores que 10^{-10} cm/seg. Os ensaios foram realizados em trajetórias de secagem, e poderá futuramente realizar ensaios em trajetórias de umedecimento, podendo, conseqüentemente, avaliar o efeito da histerese no solo. Comparou-se os resultados obtidos experimentalmente com as curvas teórica dos métodos de VAN GENUCHTEN (1980) e GARDNER (1958). Destaca-se o funcionamento adequado do equipamento e a necessidade de se fazer um número maior de ensaios.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Lucas Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February de 2008. Development of a permeameter for determination of saturated and unsaturated hydraulic conductivity of soils. Adviser: Roberto Francisco Azevedo. Co-advisers: Rodrigo Martins Reis, Izabel C. Duarte Azevedo.

When an earth dam or the stability of a slope is projected is investigated, is important to know about the hydraulic conductivity of the soil, in saturated conditions and unsaturated conditions. It is fundamental the determination of the hydraulic conductivity of liners constructed in the base of industrial embankments, landfills, etc.. The equipments more used calculate the saturated hydraulic conductivity and, using low gradients, close to the ones in the field, they don't have precision to determine hydraulic conductivities smaller than 10^{-6} cm/s. However, many Brazilian environmental organizations demand that the liners must have hydraulic conductivity smaller than 10^{-7} cm/s, which, certainly, is contradictory with the precision of the existent equipments. The main objective of this dissertation is to project, to build and to put in operation, a permeameter with suction control to determine the hydraulic conductivity in saturated and unsaturated soils, using a flow bomb to impose a constant flow in the sample. The methodology used was that of the permanent regime where they monitored the flow rates and monitored the differences in pressure between the top and bottom of the sample. The equipment consists of a wall permeameter of flexible, pump flow with reduced diameter, a monitoring system with a pressure differential transducer and interfaces air / water. The permeameter is able to determine hydraulic conductivity with values greater than 10^{-10} cm / sec. The tests were performed in trajectories of drying, and conducting trials in the future trajectories of wetting and can thus assess the effect of hysteresis in the soil. Compared to the results obtained experimentally with the curves of the theoretical methods of VAN GENUCHTEN (1980) and GARDNER (1958). The conclusions obtained in this research are presented, in which the adequate functioning of the new equipment is emphasizing, as well as the need of carrying a larger number of tests.

ÍNDICE

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Conceitos energéticos da água no solo	3
2.1.1 Potenciais de água no solo	3
2.1.2 Sucção no solo	5
2.1.3 Curva de retenção de água do solo	8
2.1.4 Determinação experimental	9
2.1.5 Relações empíricas para definir a curva de retenção de água no solo	11
2.2 Fluxo em meios saturados e não saturados	12
2.3 Determinação da função de condutividade hidráulica	15
2.3.1 Determinação experimental	17
2.3.2 Permeâmetros de parede flexível com uso de vazão constante	18
2.3.3. Determinação Indireta da função de condutividade hidráulica	20
2.3.3.1 Método de Fredlund, Xing e Huang (1994)	20
2.3.3.2 Método de Van Genuchten (1980)	21
2.3.3.3 Método de Green e Corey (1971)	22
2.3.3.4 Método de GARDNER (1958)	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Considerações gerais	24
3.2 O solo	24
3.3 Descrição do equipamento desenvolvido e do sistema de aquisição de dados	25
3.3.1 Painel de controle de pressão	26
3.3.2 Célula de ensaio	27
3.3.3 Transdutor diferencial de pressão	30
3.3.4 Sistema de aplicação de vazão constante	31
3.3.5 Interfaces ar / água	34
3.3.6 Sistema de aquisição de dados	34
3.4 Preparação das amostras	35
3.5 Determinação da curva característica	35
3.5.1 Determinação da curva característica pela técnica do papel filtro	36
3.5.2 Determinação da curva característica com a placa de pressão	38
3.6 Metodologia de ensaio para determinação da condutividade	39
3.6.1 Calibração do transdutor diferencial de pressão	41
3.6.2 Saturação das pedras porosas de alta entrada de pressão de ar	42
3.6.3 Determinação da condutividade hidráulica das pedras porosas de alta entrada de ar	42

3.6.4 Montagem da amostra de solo no permeâmetro	43
3.6.5 Determinação da condutividade hidráulica saturada do solo	43
3.6.6 Aplicação da sucção na amostra	45
3.6.7 Determinação da condutividade não saturada	46
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.1 Caracterização geotécnica	47
4.2 Curva característica de retenção de água no solo	48
4.3 - Determinação da permeabilidade da pedra porosa de alta entrada de pressão de ar	50
4.4 - Determinação da permeabilidade saturada	51
4.5 - Determinação da permeabilidade não saturada	52
4.6 - Comparação entre valores experimentais e valores analíticos do coeficiente de permeabilidade	56
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	58
5.1 Conclusões	58
5.2 Sugestões	58
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Em várias obras geotécnicas, a condutividade hidráulica dos solos deve ser determinada. Por exemplo, quando se projeta uma barragem de terra ou se investiga a estabilidade de um talude, é fundamental que se conheça a condutividade do solo, tanto em condições saturadas, abaixo da linha freática, quando em condições não-saturadas. Na construção de camadas de impermeabilização na base de aterros industriais, sanitários, etc., também é fundamental a determinação da condutividade hidráulica da camada.

A condutividade hidráulica é altamente dependente da quantidade de água no solo: seu valor é máximo quando o solo está saturado e decresce acentuadamente com a diminuição da umidade. Com essa diminuição, os vazios maiores, responsáveis em grande parte pela condutividade hidráulica do meio poroso, são os primeiros a serem drenados, com o volume de água neles remanescente se concentrando sob forma de meniscos no contato com as partículas. A maior parte do fluxo se transfere para os vazios menores, diminuindo assim a condutividade hidráulica do meio em até 10^5 vezes em relação ao seu valor na condição saturada (Pacheco, 2005).

Entretanto, como a umidade está relacionada diretamente com a capacidade que o solo tem de reter água, à medida que aumenta a sucção no solo, a condutividade hidráulica também irá depender da sucção. Para baixos teores de umidade, ou altas sucções, a condutividade hidráulica pode ser tão pequena que podem ser necessários gradientes hidráulicos elevados, ou intervalos de tempo muito grandes, para que seja possível detectar a ocorrência de fluxo no meio.

Como a sucção ou pressão capilar varia em função de diversos fatores como, carregamento externo, infiltração, evaporação, esvaziamento rápido de uma barragem, dentre outros, o conhecimento da relação entre a condutividade hidráulica e a pressão capilar (função de condutividade) é essencial para os projetos das obras mencionadas anteriormente.

A condutividade hidráulica dos solos pode ser determinada por meio de ensaios de campo ou laboratório. Os equipamentos mais usados normalmente

calculam somente a condutividade hidráulica saturada e, para gradientes baixos, próximos dos que ocorrem no campo, não têm precisão para determinar valores menores do que 10^{-6} cm/s. No entanto, a NBR 10004 exige que as camadas de impermeabilização apresentem condutividade hidráulica menor que 10^{-7} cm/s, o que, certamente, é contraditório com a precisão dos equipamentos existentes.

1.2 Objetivos

O principal objetivo dessa dissertação é desenvolver, ou seja, projetar, construir e colocar em funcionamento, um permeâmetro com controle de sucção para determinar a condutividade hidráulica em solos saturados e não saturados, usando uma bomba de fluxo para impor uma vazão constante na amostra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos Energéticos da Água no Solo

2.1.1 Potenciais de Água no Solo

Segundo IWATA (1988), define-se o potencial total da água no solo como o trabalho útil que deverá ser realizado para transportar, em condições reversível e isotérmica, um volume unitário de água pura de um reservatório sob pressão atmosférica e elevação especificada, até o ponto considerado no solo.

O potencial total da água em um solo pode ser expresso como:

$$\phi_t = \phi_g + \phi_p + \phi_{osm} + \phi_m \quad 2.1$$

em que :

ϕ_t : potencial total [L^2T^{-2}];

ϕ_g : potencial gravitacional [L^2T^{-2}];

ϕ_p : potencial pneumático [L^2T^{-2}];

ϕ_{osm} : potencial osmótico [L^2T^{-2}];

ϕ_m : potencial matricial [L^2T^{-2}].

O potencial gravitacional equivale à energia potencial do campo gravitacional, medido a partir de um referencial de posição.

$$\phi_g = g.h \quad 2.2$$

em que:

g : aceleração gravitacional [LT^{-2}];

h : distância vertical à superfície de referência [L].

O potencial pneumático origina-se de pressões externas de gás diferentes da pressão atmosférica e tem especial importância quando se consideram os ensaios de placa de pressão ou a técnica de translação de eixos. Este potencial pode ser representado por:

$$\phi_p = \frac{g \cdot \Delta P}{\gamma_w} \quad 2.3$$

em que:

g: aceleração gravitacional [LT⁻²];

ΔP : diferença entre a pressão aplicada ao ar do solo [ML⁻¹T⁻²];

γ_w : peso específico da água [ML⁻²T⁻²].

O potencial osmótico deriva da diferença de composição entre a água do solo (com presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e a água pura. Segundo JIMÉNEZ (1993), o potencial osmótico ocorre devido à água nos poros possuir sais em dissolução que exercem sucção osmótica e levam a água do solo, no estado original, ao estado padrão (água pura).

$$\phi_{osm} = \frac{-g \cdot (-P_{osm})}{\gamma_w} \quad 2.4$$

em que:

g: aceleração gravitacional [LT⁻²];

P_{osm} : pressão osmótica [ML⁻¹T⁻²].

γ_w : peso específico da água [ML⁻²T⁻²].

O potencial matricial da água do solo é um potencial de pressão que decorre do efeito combinado da ação das forças capilares e de absorção, que surgem da interação entre a água e as partículas minerais ou matriz que compõe o solo (HILLEL, 1971).

$$\phi_m = \frac{-g \cdot (-P_m)}{\gamma_w} \quad 2.5$$

em que:

g : aceleração gravitacional [$L T^{-2}$];

P_m : pressão matricial [$ML^{-1} T^{-2}$];

γ_w : peso específico da água [$ML^{-2} T^{-2}$].

2.1.2 Sucção no Solo

Quando os potenciais gravitacionais e pneumáticos podem ser desprezados, o potencial total, neste caso composto pelos potenciais matricial e osmótico, corresponde ao trabalho total das forças de capilaridade, absorção e osmose.

Nesse caso, a sucção total (ψ_t), é expressa da seguinte forma:

$$\psi_t = \psi_m + \psi_{osm} \quad 2.6$$

em que:

ψ_t : sucção total [$ML^{-1} T^{-2}$];

ψ_m : sucção matricial [$ML^{-1} T^{-2}$];

ψ_{osm} : sucção osmótica [$ML^{-1} T^{-2}$]

A sucção total (ψ_t) é definida como a pressão manométrica negativa, em relação à pressão externa de gás sobre a água do solo, que deverá ser aplicada a um reservatório de água pura (à mesma cota e temperatura) de modo que se mantenha em equilíbrio, através de uma membrana semipermeável (permite o fluxo da água, porém, não de solutos), entre a água do reservatório e a água do solo. A Figura 2.1, ilustra os conceitos da sucção matricial, osmótica e total.

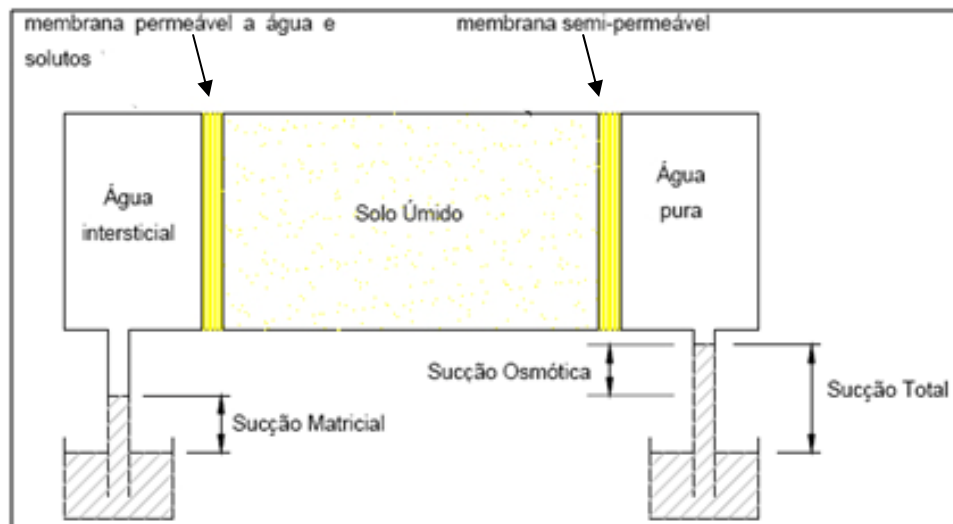


Figura 2.1. Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total (Marinho, 1997).

A sucção matricial (ψ_m) é igual á sucção total quando a água do solo é idêntica à água padrão (água pura ou solução com a mesma composição da água do solo), restando apenas o efeito da matriz do solo (capilaridade e adsorção). Os efeitos matriciais são decorrentes das pressões geradas pelo menisco capilar e da adsorção da água por forças exercidas pelas superfícies das partículas. Estas são quantificadas em forma global devido à dificuldade de discriminá-las (JIMÉNEZ, 1993). A interface ar-água gerada pelos efeitos capilares no menisco que se forma entre as partículas de solo adjacentes pode ser representada através do chamado modelo capilar, mostrado na Figura 2.2 (BUCKINGHAM, 1980).

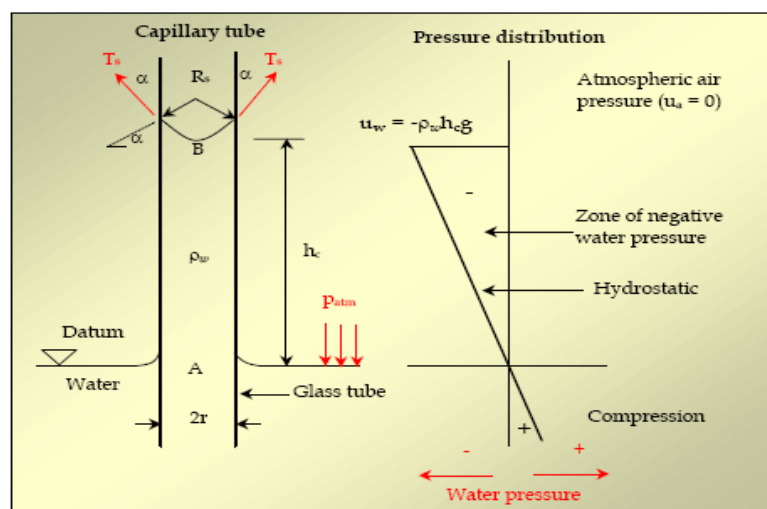


Figura 2.2: Modelo capilar para a análise da sucção matricial (SOTO, 2004).

Através do equilíbrio de forças na interface ar-água observa-se que a força exercida pelo ar é igual às contrárias exercidas pela água e pode ser representado da seguinte forma:

$$u_a \cdot \pi \cdot R^2 - u_w \cdot \pi \cdot R^2 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma_s \cdot \text{sen}\alpha \quad 2.7$$

em que:

u_a : pressão do ar [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$];

u_w : pressão da água [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$];

R : raio do menisco [L];

α : ângulo de contato entre a interface ar-água com o tubo capilar;

σ_s : tensão superficial da água [MT^{-2}].

Para um menisco perfeitamente esférico ($\alpha = 90^\circ$) a expressão acima fica reduzida para:

$$(u_a - u_w) = \frac{2 \sigma_s}{R} \quad 2.8$$

em que:

$(u_a - u_w)$: sucção matricial [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]

Quando no termo $(u_a - u_w)$ a pressão do ar (u_a) corresponde à atmosférica, a pressão existente nas moléculas de água é proporcional à tensão superficial e ao raio do capilar. A tensão superficial (σ_s) é originada pela interação das forças intermoleculares produzidas nas zonas de contato entre as partículas do solo, água e ar, sendo esta responsável pela concavidade da interface ar-água e da ascensão da coluna de água no tubo capilar.

A sucção osmótica (ψ_{osm}) é igual à sucção total quando o solo se encontra saturado, ou seja, quando a componente matricial não ocorre, restando apenas o efeito da concentração de solutos. Na Figura 2.1, a água pura está em contato com o solo (com maior concentração de solutos) através de uma membrana semipermeável. A maior concentração da água do solo causa atração entre as moléculas de água pura e conseqüentemente fluxo destas através da membrana semipermeável. O equilíbrio é atingido quando a

pressão hidrostática é suficiente para equilibrar as forças osmóticas que produzem o fluxo das moléculas de água pura para a água do solo. A sucção osmótica pode ser expressa usando a equação de Van't Hoff's da seguinte forma:

$$\psi_{\text{osm}} = R_1 \cdot T \cdot C_s \quad 2.9$$

em que:

R_1 : constante universal dos gases ($\frac{82 \cdot atm}{mol \cdot ^\circ K}$);

T : temperatura absoluta em graus kelvin ($^\circ K$);

C_s : concentração do soluto (mol/L^3).

Segundo SOTO (2004), esta componente é relacionada com o comportamento dos solos argilosos causado pela “dupla camada difusa”. A dupla camada resulta da atração eletrostática das cargas negativas do argilo-mineral e a concentração de íons positivos ou cátions da solução adjacente à superfície da partícula. Disto resulta atração entre as moléculas de água livre do solo (solução) que tendem a dispersar os cátions da camada difusa com a finalidade de equilibrar a concentração (MITCHELL, 1993). A importância da sucção osmótica, na Mecânica dos Solos, parece estar mais relacionada aos solos dispersivos ou expansivos, embora se admita que o valor da sucção total corresponde quase integralmente ao valor da sucção matricial (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Conseqüentemente, na prática é usual considerar a sucção do solo como sucção matricial.

2.1.3 Curva de Retenção de Água do Solo

O conhecimento prévio da sucção do solo e de sua variação com o teor de umidade é de fundamental importância para analisar o comportamento não saturado dos solos.

A curva característica de sucção de um solo é a relação entre a sucção e a quantidade de água no solo. A quantidade de água é geralmente colocada

em termos de conteúdo de umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ) e/ou grau de saturação (S) (Figura 2.3).

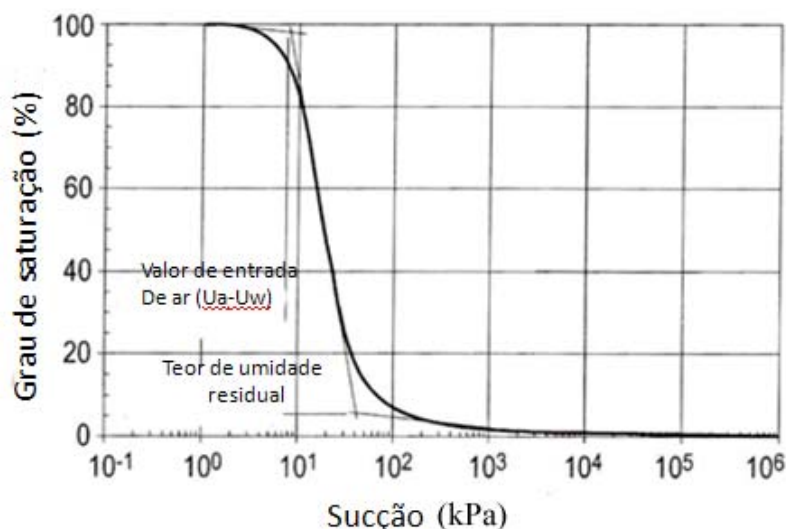


Figura 2.3. Curva característica completa de um solo (BARBOUR, 1998).

Na Figura 2.3 observam-se, também, algumas características da curva, como o valor de entrada de ar e o teor de umidade residual.

Segundo FREDLUND et. al (1994), o valor de entrada de ar de um solo é o valor da sucção mátrica a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios maiores do solo. O teor de umidade residual é o conteúdo de umidade a partir do qual é necessária uma grande variação de sucção para remover mais água do solo, ou o valor de umidade a partir do qual aumentos de sucção não produzem variações significativas no conteúdo de umidade.

2.1.4 Determinação Experimental

As medidas de sucção tanto em laboratório como em campo esbarram numa série de dificuldades experimentais, e comumente deve-se recorrer a diferentes técnicas de ensaio com intuito de se conhecer o potencial dentro de uma faixa ampla, que seja suficiente para utilização prática.

São vários os métodos usados para se obter a curva de sucção de um solo, dentre eles destacam-se: tensiômetros, papel filtro, placa de pressão, placa de sucção, osmótico e centrífugo.

Os tensiômetros interagem com o solo por meio de uma pedra porosa que “interliga” a água do solo com a água do tensiômetro. A sucção é obtida medindo-se a pressão da água do tensiômetro, que por estar em equilíbrio com a água do solo, tem a mesma pressão. Este processo pode ser automatizado, através de um sensor elétrico conectado ao tensiômetro. Os tensiômetros em geral, medem sucções de até, aproximadamente, 90 kPa, devido ao fenômeno de cavitação. RIDLEY (1995) propuseram um novo tensiômetro cuja principal qualidade é medir sucções superiores a 100 kPa sem que a cavitação ocorra no sistema. Sucções até 1.500 kPa podem ser medidas aproveitando da alta resistência à tração da água, da ordem de 500.000 kPa.

A técnica do papel filtro parte do princípio de que, quando um solo é colocado em contato com um material poroso que tenha capacidade de absorver água, a mesma irá passar do solo para o material poroso até que o equilíbrio seja alcançado. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do material poroso (calibração), a sucção do solo pode ser obtida referindo-se à curva de calibração. O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém com umidades diferentes.

A placa de pressão faz uso da técnica da translação de eixos. Esta técnica objetiva evitar que ocorra o fenômeno da cavitação. A translação de eixos impõe um aumento na pressão do ar que causa uma translação da pressão de referência. Esta técnica foi desenvolvida por Hilf em 1956, e pode ser aplicada em vários tipos de equipamentos utilizados em ensaios geotécnicos, como edômetro, triaxial, cisalhamento direto, permeômetros para determinação da condutividade hidráulica não saturada ou apenas num sistema que objetive determinar a curva de retenção.

A placa de sucção tem seu uso mais adequado quando se deseja impor sucções de até 80 KPa devido ao fenômeno de cavitação (Marinho, 2005). O sistema trata-se de impor uma diferença de altura entre o reservatório e a pedra porosa de alta entrada de ar, obtendo uma pressão relativa na pedra abaixo da pressão atmosférica. Esta diferença é a carga de pressão imposta. A placa de sucção é o sistema mais adequado quando se deseja definir a entrada de ar em materiais com uma distribuição de poros bastante uniforme ou com um valor de entrada de ar baixo (Marinho, 2005).

A técnica osmótica baseia-se no princípio termodinâmico que afirma que a pressão hidrostática incrementa o potencial de água, enquanto que o soluto

decrece-o. Assim, uma solução confinada em contato com água pura livre, através de uma membrana semipermeável perfeita, estará em equilíbrio quando a pressão hidrostática aplicada à solução for igual à sucção osmótica (ANDERSON, 1958 apud Soto, 2004). Esta é, por definição, a pressão osmótica, que depende evidentemente da concentração da solução. De outro lado, se a água pura livre é substituída por um solo úmido, o potencial total ou energia livre da água na solução pode ser menor ou maior do que a água do solo. Essa diferença de potencial tenderia a movimentar a água (do solo ou da solução), do maior para o menor potencial, através da membrana, até que um novo equilíbrio seja estabelecido.

Na técnica da centrífuga, o solo é previamente saturado e a curva de retenção é traçada em trajetórias hídricas de secagem. Para uma velocidade de rotação pré-estabelecida, diferentes valores de sucção podem ser aplicados, variando a distância do corpo de prova ao centro de rotação da centrífuga e variando a velocidade de rotação.

2.1.5 Relações Empíricas para Definir a Curva de Retenção de Água no Solo

A curva de retenção pode ser definida mediante relações empíricas, a partir dos dados de sucção e umidade ou grau de saturação. Diversas relações são comumente usadas para estimar essa curva. Algumas delas são apresentadas a seguir:

- GARDNER (1958)

$$\theta = \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\alpha \cdot \psi^n + 1} + \theta_r \quad 2.10$$

- VAN GENUTCHEN (1980)

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + |\alpha_v \psi|^n\right)^m} \quad 2.11$$

$$m = 1 - 1/n$$

• FREDLUND et al.,(1994):

$$\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi_a}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \quad 2.12$$

em que:

ψ : sucção matricial (cm);

ψ_a : sucção matricial que corresponde à entrada de ar (cm);

ψ_r : sucção que corresponde à umidade volumétrica residual (cm);

θ : teor de umidade volumétrica (cm³/cm³);

θ_s : teor de umidade volumétrica de saturação (cm³/cm³);

θ_r : teor de umidade volumétrica residual (cm³/cm³);

α_v : parâmetro de ajuste da curva (cm⁻¹);

λ : parâmetro de ajuste, depende do tamanho dos poros do solo;

a : valor aproximado da sucção de entrada de ar (cm);

n, m : parâmetros de ajuste.

10^6 : valor limite de sucção para qualquer tipo de solo (kPa).

2.2 Fluxo em Meios Saturados e Não Saturados

O fluxo de água em meios porosos é descrito pela lei de Darcy:

$$v = -k(\psi) \cdot i \quad 2.13$$

em que v é a velocidade de percolação (vazão por unidade de área), $K(\psi)$ é a função de permeabilidade ou condutividade hidráulica e i é o gradiente hidráulico igual:

$$i = \frac{\partial H}{\partial z} \quad 2.14$$

Assumindo que a pressão de ar seja nula e desprezando a sucção osmótica e as forças de percolação, pode-se escrever que a carga total (H) é igual a:

$$h = h_e + h_p = z - \frac{\psi}{\gamma_w} \quad 2.15$$

em que h_e e h_p são, respectivamente, as cargas de elevação (ou altimétrica) e de pressão (ou piezométrica).

Em função das equações 2.14 e 2.15, a Lei de Darcy pode ser expressa como:

$$v = -k(\psi) \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(z - \frac{\psi}{\gamma_w} \right) \right] = -k(\psi) \cdot \left[1 - \frac{1}{\gamma_w} \times \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad 2.16$$

O fluxo de água através de um volume de controle de um meio poroso não-saturado é governado pela seguinte equação de continuidade:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad 2.17$$

em que o lado esquerdo da equação representa a variação de água no volume de controle por unidade de tempo e o lado direito é igual a diferença entre a quantidade de água que entra e sai na unidade de tempo, por unidade de comprimento. Substituindo a Equação (2.16) na Equação (2.17) e usando a regra da cadeia para tornar ψ a variável primária, alcança-se a equação do fluxo de água num meio poroso não-saturado, normalmente conhecida como Equação de Richards, dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\psi) \cdot \left(1 - \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right) \quad 2.18$$

A Equação de Richards é acoplada e não linear uma vez que as funções $k(\psi)$ e $\theta(\psi)$ geralmente são não lineares. Em situações reais é normalmente

resolvida numericamente, ou pelo método das diferenças finitas ou dos elementos finitos.

A lei de Darcy é limitada às condições de fluxo viscoso, fluidos newtonianos, ausência de mudanças físicas e químicas decorrentes do fluxo, bem como a meios isotrópicos e a não ocorrência de *Slip Flow* (duas camadas adjacentes de fluido que se movem com velocidades diferentes) (DELGADO, 2000).

Alguns desvios da relação linear entre vazão e o gradiente aplicado foram reportados por (ENGLEHARD e TUNN, 1955, LUTZ e KEMPER, 1959 apud DELGADO, 2000), principalmente para valores de gradientes pequenos. Estes desvios têm sido atribuídos à migração de partículas que bloqueiam e desbloqueiam as passagens de fluxo, às características de fluxo não newtoniano dos fluidos, bem como à consolidação e expansão localizada que ocorre no início do ensaio. A expansão localizada é inevitável quando se impõe um gradiente através de solos muito compressíveis, gerando uma percolação induzida, a qual é decorrente da mudança na distribuição de tensões efetivas ao longo do corpo de prova (DELGADO, 2000).

Através de uma análise da resistência da ligação interpartícula em relação às forças de percolação, MITCHELL (1993) sugere que aquelas partículas que não participam na transmissão de esforços no arcabouço do solo podem se deslocar sob valores moderados de gradientes hidráulicos. Solos com estruturas floculadas ou com baixo teor de argila parecem ser particularmente susceptíveis ao deslocamento de partículas finas durante a penetração do fluido através dos poros do solo, com o conseqüente bloqueio e desbloqueio dos canais de fluxo.

No caso de fluxo não saturado, OLSON & SCHWARTZENDRUBER (1968), apresentaram dados definitivos demonstrando a validade da lei de Darcy para faixas estreitas do grau de saturação de quatro solos com baixa plasticidade (80 –90 %, 73 - 87 %, 66 - 89 %, 66 – 83 %). HAMILTON, et. al (1981), reportam medições da condutividade hidráulica sobre argilas compactadas numa faixa de grau de saturação entre 25 e 95 %; sendo que estes dados não sugerem qualquer tendência de que a condutividade hidráulica varia com o gradiente hidráulico.

2.3 Determinação da Função de Condutividade

A função de condutividade hidráulica pode ser determinada a partir de resultados de ensaios experimentais, sejam estes realizados em campo ou em laboratório, ou a partir de modelos matemáticos, fazendo uso das propriedades de volume/massa do solo, de sua curva de retenção e condutividade hidráulica saturada, sendo este último o mais usual tendo em vista as dificuldades na obtenção experimental (MARINHO, 2005).

As técnicas baseadas na metodologia de regime permanente para a determinação das condutividades hidráulicas efetivas têm ampla aplicação e maior confiabilidade. Como o equilíbrio capilar prevalece ao longo do ensaio, a saturação é medida de forma direta e o esquema de cálculo é baseado na lei de Darcy. As técnicas de regime permanente são invariavelmente demoradas, já que o estabelecimento do equilíbrio pode demandar horas ou mesmo dias, para cada nível de saturação, e dependerá da facilidade que o meio poroso permite a passagem do fluido considerado, e/ou, da técnica utilizada (DELGADO, 2005).

As técnicas baseadas na metodologia de regime transiente apresentam muitas incertezas nos esquemas de cálculo. Restrições operacionais relacionadas com altas velocidades de injeção diminuem a função da capilaridade, de forma que a influência da molhabilidade não pode ser sempre manifestada. Técnicas baseadas no regime transiente são consideradas mais rápidas, embora o equilíbrio de saturação nunca seja atingido. As curvas de condutividade hidráulica relativa (K_r) versus Grau de saturação ($S\%$) podem ser obtidas em questão de horas.

Dentre as metodologias de regime permanente encontram-se as de carga constante e vazão constante. Na primeira, gradientes de pressão são aplicados nas extremidades do corpo de prova enquanto são registradas as vazões. Na segunda, uma vazão constante é injetada através de uma das extremidades da amostra e uma contrapressão de valor constante aplicada na outra extremidade, enquanto é registrada a pressão induzida pela injeção.

O método de regime transiente mais usado é o do “perfil instantâneo” que consiste em instalar em uma amostra de solo instrumentos para medição da carga de pressão (tensiômetros) e do teor de umidade (*time-domain reflectometry probes, TDR*). A amostra com uma umidade inicial normalmente baixa é, então, submetida a uma taxa de infiltração resultando em redistribuição de água e pressões dentro do corpo de prova, naturalmente

variável com o tempo. Em cada instante, as medições de umidade e pressão permitem o cálculo da condutividade hidráulica e do teor de umidade, para uma ampla faixa de valores de sucção

A determinação da condutividade absoluta, que é a facilidade com que um fluido se desloca no interior de um meio poroso totalmente saturado e independe do fluido utilizado, é menos complicada, desde que somente um fluido atravesse o meio poroso. No entanto, cuidados devem ser tomados de forma a obter resultados confiáveis (MARINHO, 2005).

Tabela 2.1- Métodos para determinação da função de condutividade hidráulica (Marinho, 2005)

Método	Metodologia		Regime de fluxo
	Teor de Umidade	Sucção	
Tradicional	mede-se	mede-se	Permanente
Centrifuga	mede-se	estima-se	Permanente
Absorção	mede-se	estima-se	Transiente
Sorção	mede-se	estima-se	Transiente
Vazão em passos múltiplos	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente
Vazão de passo único	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente
Vazão Constante	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Permanente
Perfil Instantâneo	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente
Evaporação	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente

Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns métodos encontrados na literatura para obtenção da função de condutividade hidráulica, com a descrição do tipo de medição realizada durante o ensaio e o regime de fluxo. Nesses métodos é necessária medir o teor de umidade ou a sucção. Em alguns, medem-se as duas grandezas. Medindo-se um dos parâmetros, o outro deve ser inferido utilizando-se uma curva de retenção obtida independentemente. A função de condutividade hidráulica poderá ser estimada diretamente se ambos os parâmetros forem determinados.

2.3.1 Determinação Experimental

A condutividade pode ser medida em laboratório ao se impor um fluxo sobre uma amostra de solo. A célula que comporta a amostra é denominada permeâmetro, de paredes flexíveis e ou rígidas.

Os permeâmetros de parede flexível consistem de células do tipo triaxial, nas quais a amostra pode ser saturada aplicando-se contrapressão, e o grau de saturação pode ser verificado através da medição do parâmetro B para o fluxo de uma única fase (fase líquida). É possível também controlar as tensões verticais e horizontais, de forma a simular as condições de campo. O fluxo no contato é eliminado, já que a membrana que envolve a amostra é mantida em contato com o corpo de prova, através da pressão confinante exercida pelo fluido da célula.

Os permeâmetros de parede rígida consistem de um tubo rígido que contém o corpo de prova a ser ensaiado, fixado entre duas placas. Estes permeâmetros são, em geral, bem mais simples e menos onerosos do que os de parede flexível, permitindo ensaiar espécimes de grandes dimensões. No entanto, não é possível ter controle sobre as tensões que estão agindo na amostra, além de existir a possibilidade de fluxo do fluido no contato com a parede rígida (DELGADO, 2000). O fluxo ao longo do contorno rígido pode ser de particular importância quando se ensaiam amostras com líquidos que possam acarretar contração do corpo de prova. Nesses casos, cria-se um canal de fluxo preferencial entre o corpo de prova e a parede do permeâmetro, ocasionando um fluxo não uniforme (DANIEL et al, 1983). Na Tabela 2.2 se apresenta uma comparação indicando as vantagens e desvantagens de cada tipo de permeâmetro.

Tabela 2.2: Vantagens e desvantagens dos dois tipos de permeâmetros (DANIEL, 1994, apud DELGADO, 2000)

TIPO DE PERMEÂMETRO	PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS DESVANTAGENS
Parede rígida	- Simplicidade de construção e operação	-É possível a ocorrência de fluxo no

	<p>da célula</p> <ul style="list-style-type: none"> -Baixo custo da célula -Podem ser construídos permeâmetros de grandes dimensões -Ampla faixa de materiais pode ser utilizada (incluindo materiais quimicamente resistentes) -Pode ser permitida a expansão vertical. -Se desejado pode-se realizar o ensaio sem a aplicação de tensão vertical 	<p>contato corpo de prova - parede.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Não há controle sobre as tensões horizontais -Se o corpo de prova contrair existirá fluxo na parede do permeâmetro -Não pode ser garantida a saturação do corpo de prova a través do parâmetro B -Não se pode saturar o corpo de prova de forma convencional através da aplicação de contra pressão -O tempo de ensaio é longo no caso de materiais com baixa condutividade hidráulica
Parede flexível	<ul style="list-style-type: none"> -Pode-se saturar o corpo de prova da forma convencional através da aplicação de contra pressão -Pode-se confirmar a saturação do corpo de prova a través do parâmetro B -Pode-se controlar as tensões principais -Fluxo no contato parede - corpo de prova é improvável, mesmo com corpos de prova com superfícies rugosas -Tempo de ensaio rápido para materiais com baixo coeficiente de permeabilidade em decorrência da capacidade de saturação via contrapressão 	<ul style="list-style-type: none"> -Custo do equipamento alto -Requer aplicação de pressão em três lugares (pressão de câmara, pressão na base e pressão no topo.) -Problemas de compatibilidade química da membrana com alguns líquidos químicos e poluentes -Operação da célula mais complicada. -Dificuldade de se realizar ensaios com tensões efetivas extremamente baixas. É necessário de no mínimo 14 kPa de σ', de forma de pressionar a membrana ao C.P. a fim de não haver fluxo no contato

2.3.2 Permeâmetros de Parede Flexível com Uso de Vazão Constante

A vantagem desta metodologia surge da facilidade de se controlar pequenas vazões de forma precisa, ao invés de medi-las com as conseqüentes dificuldades experimentais, sendo possível a determinação da condutividade hidráulica em gradientes hidráulicos suficientemente pequenos, garantindo, desta forma, deformações volumétricas do corpo de prova mínimas.

O fluido é injetado ou extraído do corpo de prova com vazão constante, fazendo uso de uma bomba de fluxo, e o gradiente gerado é monitorado através de um transdutor de pressão diferencial. Esta metodologia assume que o fluxo é governado pela lei de Darcy. Inicialmente é observado um fluxo transiente antes de se atingir o regime permanente (quando a diferença de pressão entre as extremidades do corpo de prova permanece constante).

Segundo DELGADO (2000), este método foi inicialmente introduzido por OLSEN (1966), com a finalidade de determinar a condutividade hidráulica saturada em solos finos. Foi também utilizado por PANE et al. (1983), OLSEN et al. (1985), AIBAN ZNIDARCIC e (1989), ARARUNA (1995),

SCHACKELFORD e GLADE (1994). OLSEN et al. (1994) e AIBAN e ZNIDARCIC (1989), têm utilizado este método para a determinação da condutividade hidráulica da fase aquosa em meios não saturados.

HUANG et al. (1995), apresentam um permeâmetro de parede flexível para a determinação da condutividade hidráulica não saturada (K_w), o qual permite monitorar e quantificar, as variações de volume do corpo de prova, decorrentes da mudança das variáveis do estado de tensões, tensão normal líquida, ($\sigma - u_a$) e sucção mátrica ($u_a - u_w$). σ é a tensão de confinamento, u_a a pressão de poro no ar e u_w a pressão de poro da água. O controle da sucção é realizado através da técnica de translação de eixos, sendo que o fluxo é imposto, gerando um gradiente de pressão na fase líquida entre as extremidades da amostra. Um esquema do equipamento é mostrado na Figura 2.4.

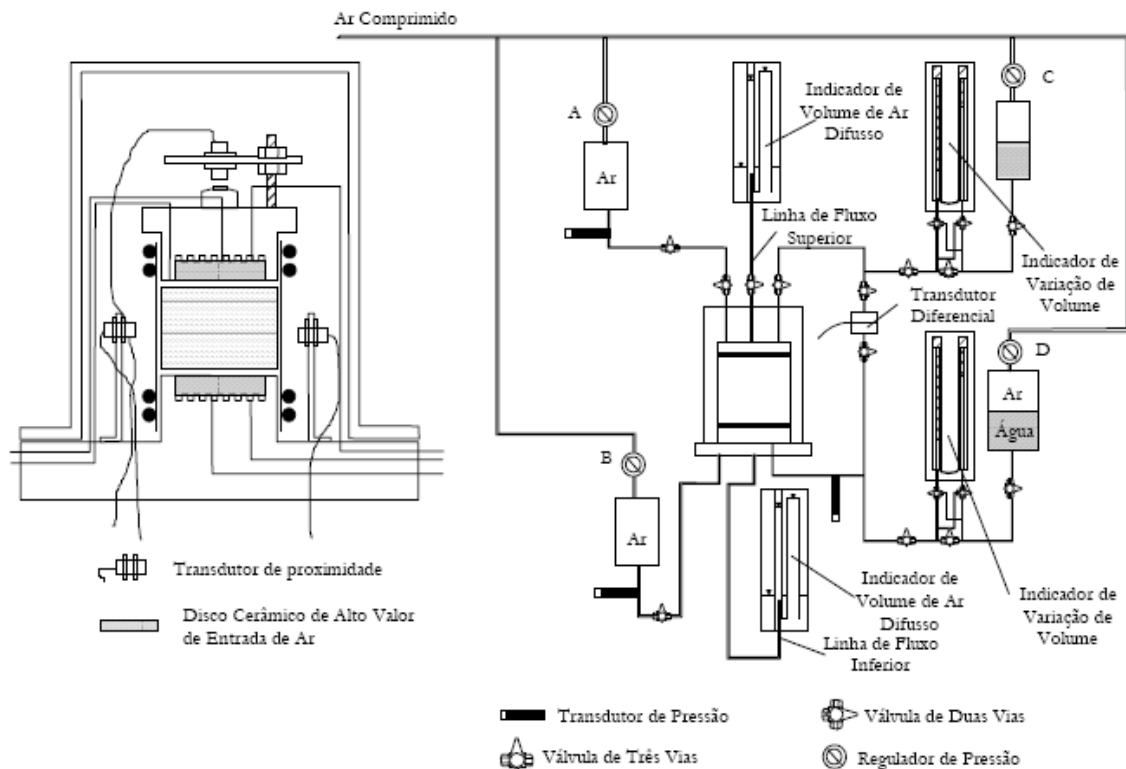


Figura 2.4: Permeâmetro e esquema geral do sistema (HUANG et al., 1995).

2.3.3. Determinação Indireta da Função de Condutividade Hidráulica

Em decorrência das dificuldades encontradas na determinação experimental, numerosas tentativas têm sido realizadas para prever a função de condutividade hidráulica para solos não saturados a partir da condutividade hidráulica do solo saturado e da curva de retenção de água do solo. Esta

abordagem é baseada no fato de que, tanto a função de condutividade hidráulica quanto a curva característica de sucção, são função da distribuição do tamanho dos poros (FREDLUND et al., 1994).

2.3.3.1 Método de FREDLUND, XING e HUANG (1994)

O método proposto por FREDLUND et al. (1994) desenvolve a função da condutividade hidráulica não saturada a partir da condutividade hidráulica saturada e da integração ao longo de toda a curva de retenção de água do solo. O método utiliza toda a faixa de sucção (0 a 10^6 kPa), que elimina a necessidade de determinar o teor de umidade residual, normalmente exigida em outros métodos. Os autores afirmam que o método é mais preciso para solos arenosos do que para solos argilosos.

$$K_w = K_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad 2.19$$

em que:

k_s : condutividade hidráulica saturada obtida em laboratório, (m/s);

θ : teor de umidade volumétrico (cm^3/cm^3);

y : variável *dummy* de integração, representada pelo logaritmo da sucção;

j : menor sucção descrita na função final;

N : maior sucção descrita na função final;

ψ : sucção correspondente;

θ' : a primeira derivada de:

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln[e + (\psi/a)^n] \right\}^m} \quad 2.20$$

em que:

a : o valor de entrada de ar do solo;

n, m : parâmetros de ajuste a curva sucção x teor de umidade volumétrico;

$C(\psi)$: correção da função definida como:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{C_r}\right)}{\ln(1 + 1000000/C_r)} \quad 2.21$$

em que:

C_r : constante da matriz de sucção, correspondente ao valor de teor de umidade residual volumétrico (valor normalmente usado 1500KPa).

2.3.3.2 Método de VAN GENUCHTEN (1980)

VAN GENUCHTEN propôs a seguinte equação analítica para determinação da condutividade hidráulica não saturada k_ψ de um solo em função da sucção mátrica ψ :

$$K_\psi = k_s \times \frac{\left[1 - (a\psi^{n-1}) \times (1 + (a\psi)^n)^{-m}\right]^2}{\left[(1 + a\psi)^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad 2.22$$

em que:

k_s : condutividade hidráulica na condição saturada;
 a, n, m : parâmetros para ajuste da curva de retenção

Os parâmetros a, n, m podem ser estimados da função de teor de umidade volumétrico considerando-se um ponto P equidistante do teor de umidade volumétrico nas condições saturada e residual.

Se θ_p for o teor de umidade volumétrico neste ponto e ψ_p o valor da sucção mátrica correspondente, então a inclinação S_p da tangente à função neste ponto pode ser calculada como:

$$S_p = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \times \left[\frac{d\theta_p}{d(\log \psi_p)} \right] \quad 2.23$$

Para estimativa dos parâmetros a e m , após a avaliação de S_p , VAN GENUCHTEN sugeriu o procedimento dado pela equação 2.24:

$$m = 1 - 10^{(0,8S_p)} \text{ para } 0 < S_p < 1 \quad 2.24$$

$$m = 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} \text{ para } S_p > 1 \quad 2.25$$

$$a = \frac{1}{\Psi_p} \left(2^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{(1-m)} \quad 2.26$$

Nos casos em que o teor de umidade volumétrico residual não é claramente identificado, o método dos mínimos quadrados, considerando-se ajustes não-lineares (VAN GENUCHTEN, 1980), pode ser empregado para determinação simultânea dos parâmetros a , m e θ_r .

2.3.3.3 Método de GREEN e COREY (1971)

Um método para calcular a função de condutividade hidráulica para solos não saturados com base na função característica de sucção foi também proposto por Green e Corey (1971), produzindo resultados com precisão suficiente para a maioria das aplicações.

$$K(\theta)_i = \frac{K_s}{K_{sc}} \times \frac{30T^2}{\mu g \eta} \times \frac{\zeta^p}{n^2} \times \sum_{j=1}^m [(2j+1-2i)h_i^{-2}] \quad 2.27$$

em que:

$k(\theta)_i$: condutividade hidráulica correspondente ao teor de umidade volumétrico θ_i ;

k_s / k_{sc} : razão entre condutividade hidráulica saturada medido (k_s) e calculado (k_{sc});

n : número de intervalos de sucção considerados;

h_i : carga de sucção (cm);

m : máximo intervalo de integração (soma), correspondente ao teor de umidade volumétrico na condição saturada;
 n : número total de intervalos entre i e m ;
 T : tensão superficial da água (dyn/cm);
 ξ : porosidade na condição saturada;
 η : viscosidade da água;
 g : aceleração da gravidade;
 μ : massa específica da água (g/cm³);
 p : parâmetro cujo valor, de acordo a literatura, está no intervalo [1-2].

O termo $\frac{30T^2}{\mu g \eta} \times \frac{\xi^p}{n^2}$ é constante e pode ser feito igual a 1 no processo de obtenção da forma da função de condutividade hidráulica desejada. A forma geométrica é fundamentalmente controlada pelo termo no interior do somatório da Equação (2.27). Uma vez conhecida a forma da curva, sua posição final é obtida pela restrição de que deve passar pelo valor conhecido k_s na condição saturada.

2.3.3.4 Método de GARDNER (1958)

GARDNER (1958) propôs a seguinte equação para determinação da condutividade hidráulica não saturada k_ψ de um solo em função da sucção mátrica ψ :

$$K(\psi) = K_s \cdot \text{EXP}(-\alpha \cdot \psi)$$

2.28

em que:

k_s : Condutividade hidráulica saturada;

α : Parâmetro de ajuste da curva de retenção de água no solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Considerações Gerais

Apresentam-se nesta secção as principais características do solo estudado e dos equipamentos desenvolvidos, as metodologias para

preparação das amostras para obtenção da curva característica de sucção e da condutividade hidráulica, bem como as metodologias usadas nos ensaios para obtenção da curva característica de sucção, determinação da condutividade hidráulica saturada e determinação da condutividade hidráulica não saturada.

3.2 O Solo

O material escolhido para a execução dos ensaios é um solo residual jovem de gnaiss coletado em um talude de corte localizado na Vila Secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa (Figura 3.1).



Figura 3.1: Local de coleta da amostra de solo.

Em uma primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização do solo seguindo as normas técnicas da ABNT (Tabela 3.1): granulometria conjunta, limites de consistência, massa específica dos sólidos e ensaio de compactação.

Tabela 3.1: Normas brasileiras para ensaios de caracterização e compactação de solos

Ensaio	Normas Brasileiras
Granulometria	ABNT NBR-7181/84

Limites de consistência (LL e LP)	ABNT NBR-6459/84 e ABNT NBR-7180/84
Peso Específico dos Sólidos (γ_s)	ABNT NBR-6508/84
Compactação	ABNT NBR-6457/86

3.3 Descrição do Equipamento Desenvolvido e do Sistema de Aquisição de Dados

O permeâmetro desenvolvido neste trabalho para determinar a condutividade hidráulica saturada e não saturada de solos, pode ser dividido nos seguintes componentes:

- Painel de controle de pressão;
- Célula de ensaio com transdutor diferencial de pressão;
- Bomba de fluxo;
- Sistema de aquisição de dados;
- Interfaces ar / água.

Na Figura 3.2, apresenta-se uma vista geral do equipamento, com os componentes mencionados, detalhados a seguir.



Figura 3.2: Vista geral do permeômetro desenvolvido.

3.3.1 Painel de controle de pressão

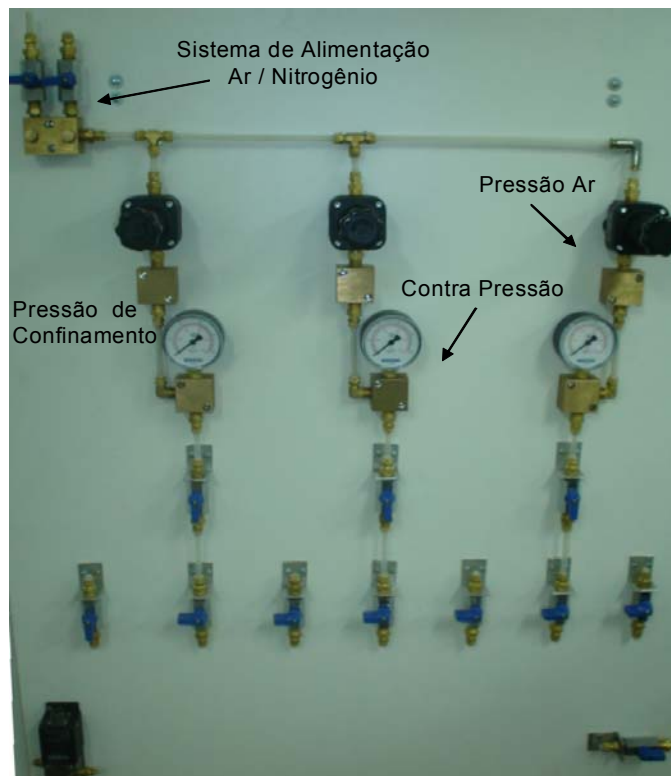
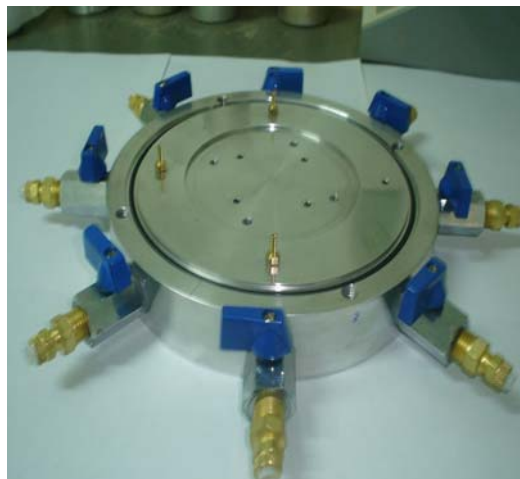


Figura 3.3: Vista geral do painel de aplicação de pressão.

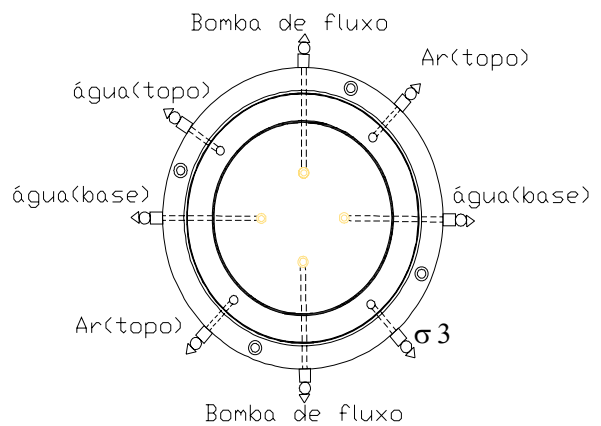
O painel de controle de pressão, apresentado na Figura 3.3, tem como objetivo controlar a aplicação da contra pressão na amostra, a tensão de confinamento da célula e a pressão de ar na amostra para obtenção da sucção desejada. A pressão pode vir tanto de um compressor de ar, quanto de um balão de nitrogênio, caso ocorra alguma falha ou se deseje aplicar uma pressão maior que a capacidade do compressor.

3.3.2 Célula de ensaio

O permeâmetro é constituído por um cilindro de acrílico, base e tampa de alumínio, uma peça intercambiável de latão na qual se aloja a pedra porosa especial e um *top-cap* de alumínio.



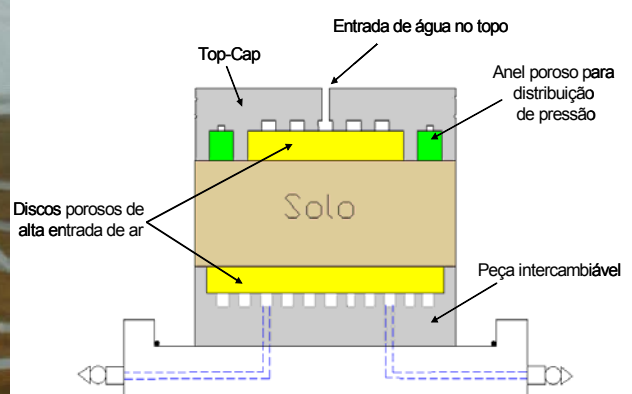
a)



b)



c)



d)

Figura 3.4: (a) base; (b) detalhes da base com as respectivas saídas; (c) célula de ensaio; (d) esquema da base com a peça intercambiável e *top cap*.

A base possui oito entradas laterais (Figuras 3.4a e 3.4b): duas para aplicação e controle das pressões de água na base; uma para aplicação, controle e medição das pressões de água no topo; duas saídas para medição das pressões de água que direcionam para a bomba de fluxo, duas entradas para aplicação e medição de ar dentro da amostra e uma entrada para aplicação de pressão na câmara (tensão confinante). Apresentam-se, na Figura 3.4c, o permeâmetro durante um ensaio e, na Figura 3.4d, um corte esquemático das partes constituintes das peças descritas.

A base possui uma ranhura circular concêntrica (Figura 3.4a) para alojar a peça intercambiável, na qual se encontra colado o disco poroso de alta entrada de pressão de ar ($\phi = 104,78$ mm e altura = 7,14 mm) (Figura 3.5). Esta peça é fixada à base por quatro parafusos guias, permitindo desta forma sua troca, se necessário, por outra com disco de valor de entrada de ar diferente (Figura 3.6). O disco poroso é assentado sobre uma base que possui um rasgo em forma de espiral, de forma que os quatro furos (dois da entrada de água e os dois da saída para bomba de fluxo) possam ser interconectados, possibilitando a realização do fluxo e saturação do disco poroso (Figura 3.7). Os quatro canais que ligam a base à peça intercambiável estão vedados por anéis de vedação (Figura 3.8). Estes canais estão ligados as duas saídas para a bomba de fluxo e as duas entradas de água.

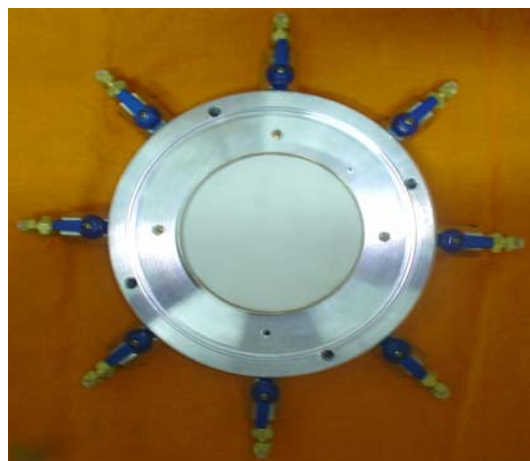


Figura 3.5: Base e peça intercambiável com o disco de alta entrada de ar colada.

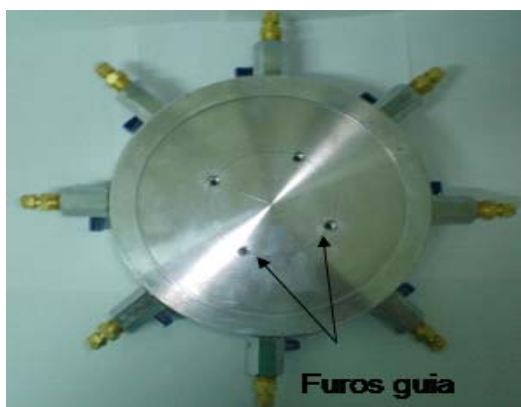


Figura 3.6: Parte inferior da peça intercambiável com os furos guias.



Figura 3.7: Peça intercambiável com câmara aspiralada.



Figura 3.8: Vista inferior da peça intercambiável.

O *top cap* possui um rebaixo circular que funciona como uma câmara para alojar o disco poroso de alta entrada de pressão de ar ($\phi=79,38$ mm e altura= 7,14 mm) e um rebaixo anelar para alojar a pedra para distribuição da pressão de ar e uma câmara. A pedra anelar é confeccionada com uma mistura

de areia grossa e cola Araldite. O *top cap* possui ainda um furo central conectado à uma câmara que tem uma ranhura em forma de espiral para aplicação do fluxo e saturação da pedra porosa, de forma que todo o disco poroso de alta entrada de pressão de ar fica em contato com a água (figura 3.9 e 3.10). Para a fabricação da pedra anelar, foi confeccionado um dispositivo que permitiu que ela fosse moldada e extraída sem danificá-la.

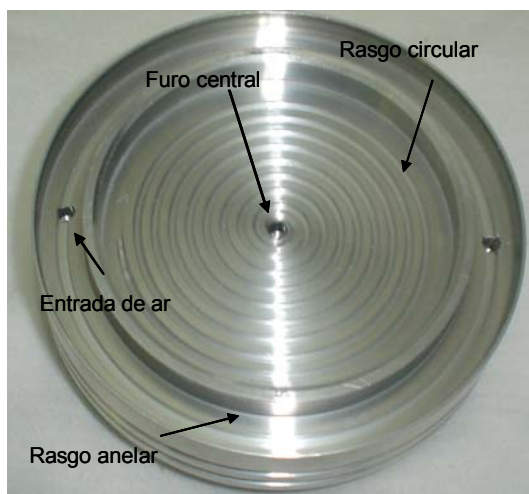


Figura 3.9: Detalhes do *top cap*.



Figura 3.10: Anel e pedra porosa de alta entrada de ar colados no *top cap*.

.3.3.3 Transdutor Diferencial de Pressão

Um transdutor diferencial de pressão de alta precisão, fornecido pela Validyne Engineering Corporation, modelo P300D, capaz de obter diferenças de pressão de até ± 35 kPa é usado no equipamento (Figura 3.11). O transdutor

é formado por duas câmaras, cada uma possuindo uma saída de água (leituras de pressão) e uma válvula de sangria. Uma das saídas de pressão pode ser conectada ao topo, à base ou à bureta. Durante a fase de equilíbrio da sucção na amostra, o transdutor mede a altura de água na bureta, que varia devido a expulsão da água do corpo de prova. A outra saída vai para a bomba de fluxo que é utilizada para medir a diferença de pressão entre o topo e a base da amostra durante fluxo.



Figura 3.11: Transdutor diferencial de pressão utilizado.

3.3.4 Sistema de Aplicação de Vazão Constante

Para aplicação de fluxo com uma vazão constante na amostra, foi desenvolvida uma bomba que é acoplada a uma prensa triaxial com controle analógico de velocidade. A bomba de fluxo consiste de um tubo de vidro PIREX ($\phi_{int} = 0,4866$ cm) e um embolo feito a partir de uma barra de latão de diâmetro um pouco menor, no qual se colocam dois anéis de vedação para evitar vazamentos. O bombeamento de água se dá quando o embolo se desloca dentro do tubo, semelhante a uma seringa. O deslocamento do embolo é controlado pela prensa triaxial. Obtém-se a vazão desejada em função da velocidade selecionada na prensa. Para proteger o tubo de vidro, este foi colocado dentro de um tubo de alumínio de maior diâmetro, preenchendo-se o

intervalo entre os dois com poliacetal , confinando o tubo de vidro evitando sua fratura (Figura 3.12). O conjunto de tubos é preso a uma base que possui entrada e saída de água necessárias para o bombeamento, e é fechado no topo por meio de uma peça de alumínio e quatro hastes de aço inox (Figura 3.13).

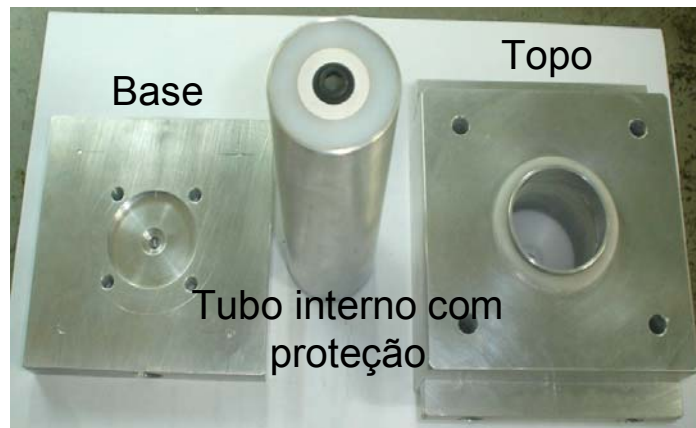


Figura 3.12: Detalhes da bomba de fluxo.



Figura 3.13: Bomba de fluxo finalizada.

Na Figura 3.14 mostra-se como a bomba é presa na prensa triaxial. Observa-se que o corpo da bomba é fixado por meio de uma barra de alumínio aos dois montantes da prensa e permanece parado, enquanto que o embolo é

preso, com duas barras de latão, ao prato da prensa e se desloca junto com ele.

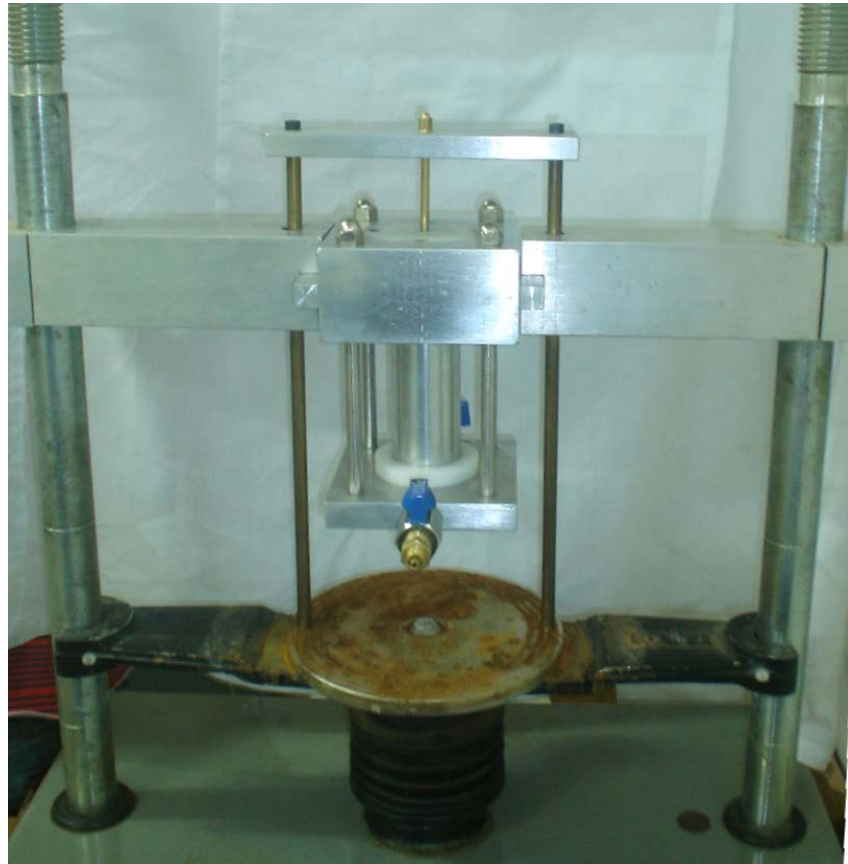


Figura 3.14: Bomba fixada à prensa.

A prensa possui um controlador de velocidade analógico que pode selecionar velocidades de 0,00001 a 9,99999 mm/min. As vazões impostas em função das velocidades Darcianas, para o diâmetro da bomba de fluxo, podem ser conhecidas pela equação 3.1.

$$Vazão = 0,0003 \times Velocidade \quad 3.1$$

sendo a velocidade em mm/min e a vazão em cm³/seg.

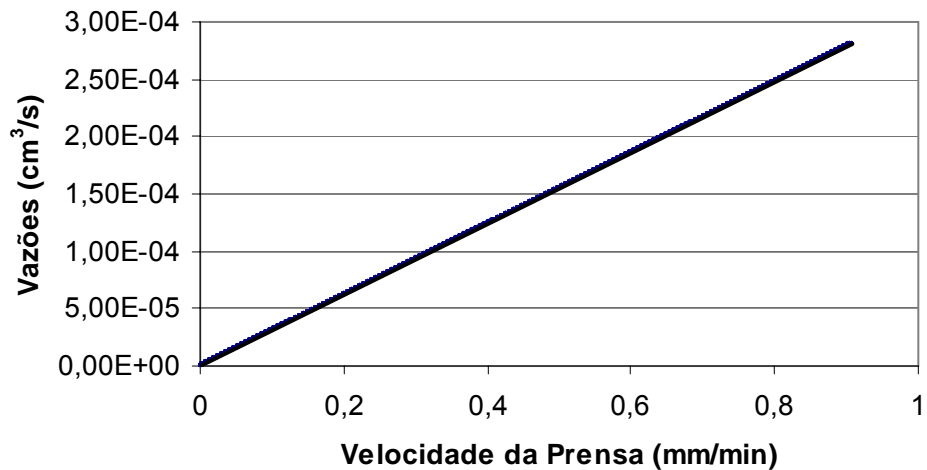


Figura 3.15: Vazões em função das velocidades impostas pela prensa.

Observa-se na Figura 3.15 as pequenas vazões possíveis de serem aplicadas, devido ao pequeno diâmetro da bomba e baixas velocidades da prensa.

3.3.5 Interfaces Ar / Água

Para aplicação da contra pressão e pressão de confinamento na célula de ensaio, foram construídas duas interfaces ar / água. As interfaces foram confeccionadas com tubo de acrílico e base e topo de alumínio. A base possui uma entrada para aplicação de pressão de ar, que é transmitida para a água por meio de uma membrana de látex. As outras saídas são para enchimento da célula com água deairada, distribuição de pressão no sistema e escape de ar para esvaziamento da membrana.

3.3.6 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados utilizado é formado por um módulo de monitoramento de dados de 16 bits com quatro canais, fabricado pela Wykeham Farrance, um micro computador e um transdutor diferencial de pressão. O módulo de monitoramento tem a função de excitar o transdutor e, ao mesmo tempo, amplificar e converter o sinal analógico para sinal digital.

O programa de aquisição de dados armazena os dados em um arquivo no fomato *.txt. Esse programa apresenta na tela do computador o gráfico

referente à diferença de pressão gerada ao longo do tempo, permitindo assim definir o momento em que o estado permanente é alcançado.

3.4 Preparação das Amostras

Para obtenção das amostras, o solo foi compactado estaticamente, usando um cilindro CBR e uma prensa. O solo foi umedecido e prensado até a altura pré-determinada para obtenção do grau de compactação desejado. Após extração da amostra compactada do cilindro CBR, moldavam-se os corpos de prova. De cada amostra compactada, foram retirados quatro corpos de provas para a curva de sucção ou um corpo de prova para o ensaio de condutividade (Figura 3.16a). Todos os corpos de prova foram moldados utilizando-se o terço central da amostra (Figura 3.16b). Exibe-se, na Figura 3.16c, a amostra após ser rasada. O anel utilizado para moldagem, especialmente fabricado para esse fim, possui o mesmo diâmetro da pedra porosa especial.

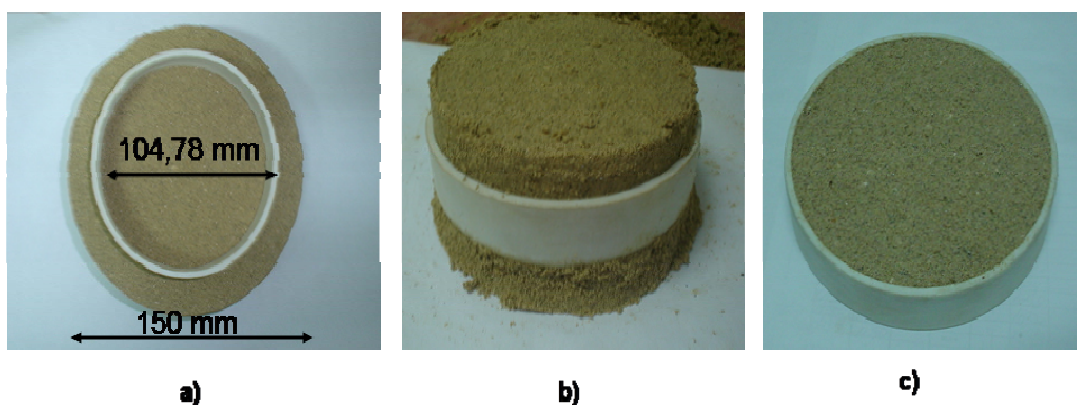


Figura 3.16: (a) Moldagem das amostras para ensaio de condutividade hidráulica; (b) Amostra posicionada no terço médio; (c) Corpo de prova moldado para o ensaio de condutividade hidráulica.

3.5 Determinação da Curva Característica

A curva característica foi determinada usando-se a técnica do papel filtro e da placa de pressão. Os dois métodos foram necessários, uma vez que a câmara de aplicação de pressão possui um disco poroso de alta entrada de pressão de ar de 500 kPa, restringindo a obtenção de pontos na curva característica a valores no máximo igual a este valor. Para valores superiores a esse, optou-se pela técnica do papel filtro.

3.5.1 Determinação da Curva Característica pela Técnica do Papel Filtro

Para obtenção dos pontos utilizando da técnica do papel filtro, foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42, seguindo o procedimento:

- Inicialmente, os corpos de prova foram moldados dentro de um anel de PVC de 47,14 mm de diâmetro interno e 20 mm de altura, determinando-se seus teores de umidades.
- Em seguida, umedeceram-se os corpos de prova até próximo à saturação, aspergindo-se água de uma distância de aproximadamente 60 cm.
- Em seguida, os corpos de prova foram deixados secar até atingir o teor de umidade desejado (Figura 3.17a), calculado previamente mediante os índices físicos e controlado por pesagens sucessivas
- Os papéis filtro foram cortados no diâmetro desejado e, então, colocados cuidadosamente, um na superfície superior outra na inferior de cada corpo de prova (Figura 3.17b e 3.17c).
- Imediatamente após o posicionamento dos papéis filtro, envolveu-se o corpo de prova com filme plástico, colocavam-se os discos de PVC para fornecer o máximo de contato do papel com o solo, davam-se várias voltas com o filme plástico e fixava o conjunto com fita adesiva (Figuras 3.17d, 3.17e e 3.17f). Em seguida, os corpos de prova foram identificados e deixados na câmara úmida por 7 dias, dentro de um recipiente com tampa.
- Após esse período, os corpos de prova foram abertos e determinou-se o teor de umidade do papel filtro. Para isso, vários cuidados foram tomados:
 - ✓ Removido o filme plástico que envolvia o corpo de prova, o papel filtro foi retirado com auxílio de uma pinça e colocado na balança analítica com precisão de 0,0001g. Durante o processo de transferência, o papel filtro não ficou exposto ao ar por mais que 5 segundos, minimizando alguma perda de sua umidade.
 - ✓ Após a pesagem, o papel filtro úmido foi colocado na estufa, por um período de 2 horas, a uma temperatura de 105°C.

- ✓ Após a secagem em estufa, o papel foi pesado e determinado seu peso seco. Mais uma vez, o processo de transferência deve ser o mais rápido possível, para evitar algum ganho de umidade pelo papel filtro em função da umidade do ambiente.
- Calculado o teor de umidade do papel filtro (w), a sucção matricial do solo é determinada utilizando as curvas de calibração do papel filtro Whatman N°42 obtidas por CHANDLER et al., (1992). As equações dessas curvas são:

I) Para umidades do papel filtro $> 47\%$ Sucção (kPa) = $10^{(6.05-2.48\log w)}$

II) Para umidades do papel filtro $\leq 47\%$ Sucção (kPa) = $10^{(4.84-0.0622)}$

Ao se utilizar esta técnica, o ideal é que cada valor de sucção seja determinado pela média de pelo menos dois resultados.

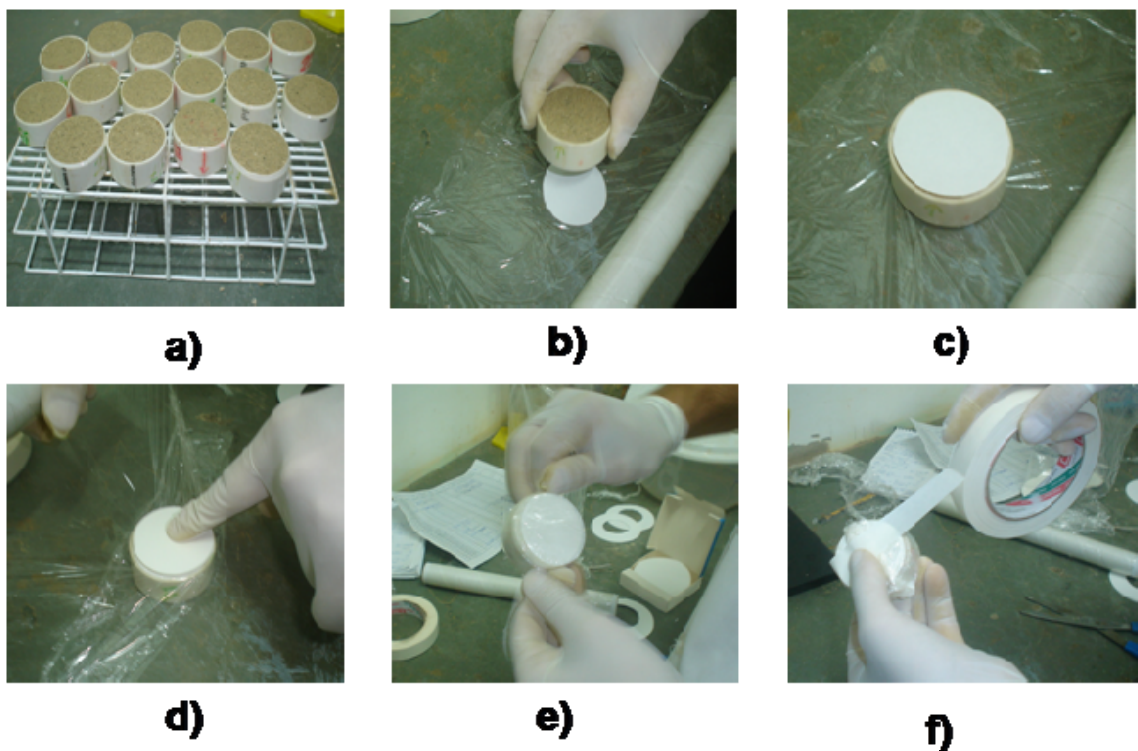


Figura 3.17: Detalhes da preparação dos corpos de prova. (a)Secagem dos corpos de prova após serem umedecidos; (b) Colocação do papel filtro inferior; (c) Colocação do papel filtro superior; (d) Colocação do disco de PVC; (e) Proteção com filme plástico; (f) Fixação com fita adesiva.

3.5.2 Determinação da Curva Característica com a Placa de Pressão

Para obtenção dos pontos da curva usando a placa de pressão, admite-se que a técnica de translação de eixos (Hilf, 1956) é válida. Para diminuir o tempo de execução do ensaio, foram utilizadas três células, aplicando-se, em cada uma, pressões de ar (sucções) diferentes. O procedimento adotado foi o seguinte:

- Após a moldagem dos corpos de provas nos anéis de PVC, determinaram-se a massa de cada anel e o teor de umidade.
- Os corpos de provas foram saturados e colocados nas câmaras de pressão (Figura 3.18).
- A cada 24 horas os corpos de prova foram retirados das câmaras, pesados e recolocados nas câmaras até que os pesos das amostras permanecessem constantes. Calculou-se o teor de umidade volumétrico, ou o grau de saturação da amostra, correspondente à sucção aplicada.
- Aumentou-se gradativamente a sucção, repetindo o processo descrito anteriormente, obtendo-se, assim, vários pontos da curva. O valor máximo aplicado foi de 450 kPa.



Figura 3.18: Placas de pressão usadas para determinação da curva característica (LEC/UFV).

3.6 Metodologia de Ensaio para Determinação da Condutividade Hidráulica

A metodologia para a execução do ensaio para determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada consta das seguintes etapas;

- Calibração do transdutor diferencial de pressão;
- Saturação das pedras porosas de alta entrada de pressão de ar;
- Determinação da condutividade hidráulica das pedras porosas de alta entrada de pressão de ar;
- Montagem da amostra de solo na célula de ensaio;
- Determinação da condutividade hidráulica saturada;
- Aplicação da sucção na amostra;
- Determinação da condutividade hidráulica não saturada.

Um desenho esquemático da aparelhagem para determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada pode ser visto na Figura 3.20.

Esquema Representativo do Permeâmetro

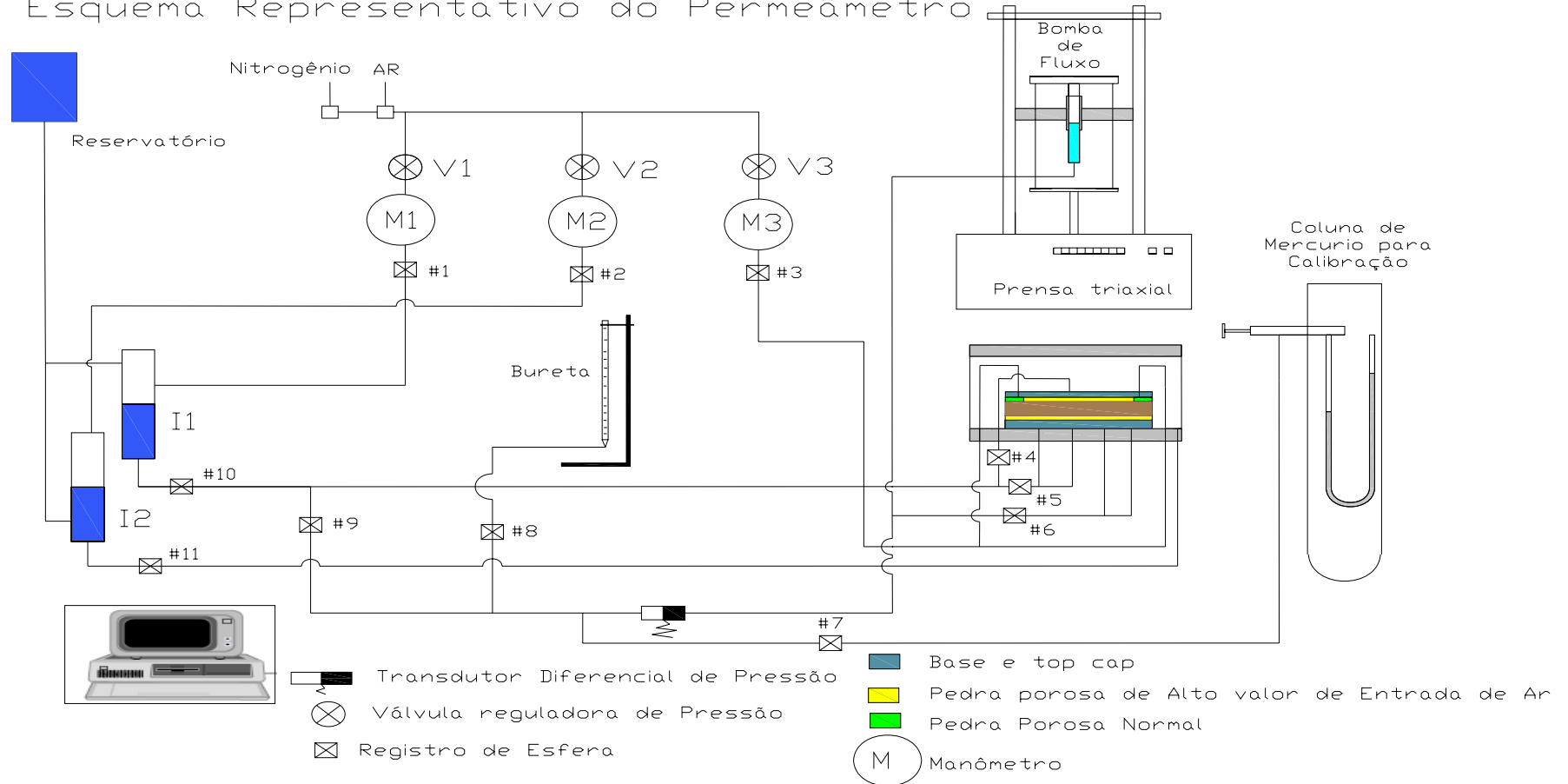


Figura 3.20: Desenho esquemático dos equipamentos determinação condutividade hidráulica.

3.6.1 Calibração do Transdutor Diferencial de Pressão

Procurou-se garantir que a tubulação estivesse livre de bolhas de ar, fazendo passar água deairada em abundância, pela base da amostra e extravasando pela bureta e pela saída da bomba de fluxo. Para se obter o primeiro ponto da curva de calibração, o transdutor foi fixado na mesma altura da saída da bomba de fluxo. A bureta foi preenchida com água até o nível da saída que permaneceu aberta, garantindo, assim, que ambos os lados do transdutor diferencial de pressão estivessem com a mesma pressão. Garantido a mesma pressão em ambos os lados, considerou-se ser este o primeiro ponto da curva de calibração (ponto “zero”). Para se determinar o segundo ponto da curva, os registros #6, #8 e #9 (Figura 3.20) foram fechados e o registro #7 aberto para se aplicar, de um lado do transdutor diferencial, uma pressão de 30 kPa por meio de uma coluna de mercúrio, regulável através de um pistão (Figura 3.19). Foram realizados alguns testes para verificação da calibração, aplicando pequenas pressões de um lado do transdutor com a coluna de mercúrio e verificando a resposta no módulo. Esses testes forneceram resultados coerentes.



Figura 3.19: Coluna de mercúrio acoplada ao pistão utilizada para calibração do transdutor diferencial de pressão.

3.6.2 Saturação das Pedras Porosas de Alta Entrada de Pressão de Ar

Para realização dos ensaios de condutividade hidráulica saturada e não saturada fazendo uso da técnica de translação de eixos, é necessário que as pedras porosas de alta entrada de ar estejam completamente saturadas. Primeiramente, a peça intercambiável e o *top cap* foram instalados na célula, sendo que no *top cap* apenas o furo central estava conectado com o sistema de saturação. Após a instalação, a célula foi fechada e preenchida com água deairada. Os registros #6, #7 e #10 (Figura 3.20) foram fechados e os registros #4, #5, #8, #9 e #11 foram abertos. Aplicou-se uma pressão de 200 KPa na célula usando a interface I2, forçando o fluxo pelo dois discos e extravasando todo o líquido pela bureta. Este fluxo permaneceu por dois dias. Após este tempo, o registro #8 foi fechado e os registros #6 e #10 foram abertos para aplicação de 200 kPa de pressão pela interface I1. Fazendo isto, tem-se em todo o sistema a mesma pressão, podendo, assim, garantir a integridade do transdutor (ambas as saídas estão com 200KPa) e dissolver qualquer bolha de ar que ainda possa existir nas pedras.

3.6.3 Determinação da Condutividade Hidráulica das Pedras Porosas de Alta Entrada de Ar

Para a obtenção da condutividade hidráulica saturada e não saturada, é necessário conhecer o valor da condutividade hidráulica das pedras porosas, para que se possa conhecer a perda de carga gerada pelo fluxo através delas e assim calcular a perda de carga ocorrida no solo. Para isso, o módulo de aquisição de dados e o programa foram ligados, e a bomba de fluxo preparada com uma velocidade pré-determinada. Fecharam-se os registros #4, #5 e #10, abriram-se o registro #6 e a entrada para a bomba de fluxo, e, por fim, ligou-se a prensa para dar início ao fluxo. A condutividade hidráulica obtida foi apenas da pedra porosa da base, uma vez que os registros #4 e #5 permaneceram fechados, não havendo assim fluxo pelo topo. A água que percolou é a que estava na célula, que estava, inicialmente, com a mesma pressão em todo o sistema. O fluxo gerou um diferencial de pressão, que foi monitorado constantemente na tela do computador. Quando a diferença de pressão se tornou permanente, deu-se por finalizado o ensaio.

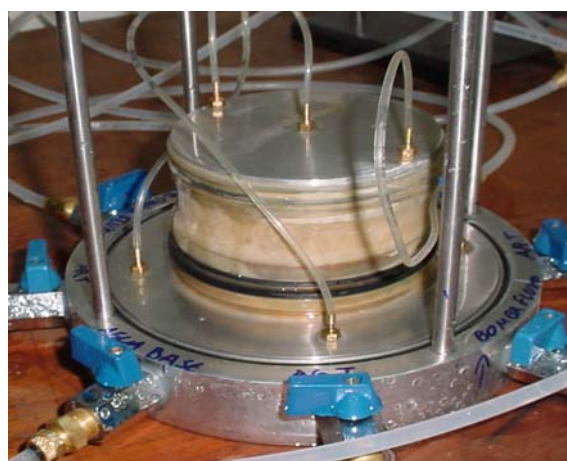
O procedimento de determinação da condutividade hidráulica dos discos é realizado somente uma vez, sendo necessário repeti-lo apenas se trocarmos as pedras porosas por outras de valor de entrada de ar diferente.

3.6.4 Montagem da Amostra de Solo no Permeâmetro

Após a moldagem do corpo de prova, suas dimensões foram conferidas e o seu índice de vazios obtido a partir do seu peso e volume, do peso específico das partículas sólidas e do seu teor de umidade. Em seguida, a amostra é colocada sobre a pedra porosa da base e o anel de moldagem é retirado com cuidado, com auxílio de um disco de PVC do mesmo diâmetro da amostra. Com o solo na posição (Figura 3.21a) ajeitou-se o *top cap* e colocou-se a membrana de látex com os anéis de vedação que garantem a vedação entre os vazios do corpo de prova e a água que preenche a célula (Figura 3.21b).



a)



b)

Figura 3.21:(a) Solo alojado sobre o disco poroso de alta entrada de ar; (b) Amostra preparada para iniciar os ensaios.

3.6.5 Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada do Solo

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada, aplicou-se uma tensão confinante de 50 kPa na célula e uma pressão de 50 kPa no sistema. A tensão confinante igual à pressão no sistema não acarretou problemas na amostra, uma vez que a pressão dentro da amostra era aberta

para atmosfera. Com os registros #4 e #8 fechados, retirou-se a tubulação de ar, ocorrendo assim um fluxo ascendente que passa da base saindo pela pedra porosa normal do topo, conseqüentemente pela entrada de ar que está desconectada. A água não percola pela pedra porosa de alta entrada de ar do topo, porque o registro #4 permanece fechado. Monitora-se, de tempos em tempos, a vazão de saída, até que ela fique constante. Nessa altura, considera-se que o solo está saturado.

Com o solo saturado, o módulo de monitoramento é ligado, o programa preparado, a pressão no sistema reduzida a zero, a entrada de ar fechada (registro por onde extravasava a água durante o processo de saturação), o registro #4 aberto e o registro #5 fechado. A bomba de fluxo é, então, ligada e as diferenças de pressão entre o topo e a base do corpo de prova registradas com o tempo, até atingir o estado permanente. Encerra-se, então, o ensaio, desligando-se o programa e a bomba de fluxo.

O coeficiente de permeabilidade das pedras porosas de alta entrada de ar tem influência no cálculo da condutividade hidráulica do solo, devendo-se, assim, considerar a perda de carga nas pedras porosas.

A condutividade hidráulica do solo, pode ser calculado considerando o conjunto como três materiais diferentes e que:

$$v = v_{base} = v_{solo} = v_{topo} \quad 3.1$$

e

$$h = h_{base} + h_{solo} + h_{topo} \quad 3.2$$

Em que v é velocidade do fluxo através do conjunto pedra-solo-pedra, v_{base} é a velocidade de fluxo através da pedra porosa da base, v_{solo} é a velocidade do fluxo através do solo, v_{topo} é a velocidade do fluxo através da pedra porosa do topo. E h é a perda de carga total de todas as camadas, e h_{base} , h_{solo} , h_{topo} são as perdas de carga totais de cada camada.

Utilizando a lei de Darcy na equação 3.1, pode-se escrever:

$$k \frac{h}{H} = k_{topo} \frac{h_{topo}}{H_{topo}} = k_{solo} \frac{h_{solo}}{H_{solo}} = k_{base} \frac{h_{base}}{H_{base}} \quad 3.3$$

Usando os resultados da Equação 3.2 na Equação 3.3, pode-se escrever:

$$k_{\text{solo}} = \frac{H_{\text{solo}}}{\frac{H}{k} - \left(\frac{H_{\text{topo}}}{k_{\text{topo}}} + \frac{H_{\text{base}}}{k_{\text{base}}} \right)} \quad 3.4$$

Em que H_{solo} é a espessura da amostra de solo, H_{topo} e H_{base} são as alturas das pedras porosas de alta entrada de ar, H é a altura total das três camadas, k_{topo} e k_{base} são os coeficientes de permeabilidade das pedras porosas de alta entrada de ar e k é o coeficiente de permeabilidade do conjunto das três camadas, calculado pela Equação 3.5

$$k = \frac{Q_w}{i \times A} \quad 3.5$$

Onde Q_w é vazão imposta pela bomba de fluxo, i o gradiente gerado e, A , a área da seção transversal da amostra de solo. O gradiente i é calculado por meio da diferença de pressão medida pelo transdutor diferencial.

3.6.6 Aplicação da Sucção na Amostra

Atingido o regime permanente para a determinação da condutividade hidráulica saturada, as mangueiras de aplicação de pressão de ar na amostra foram conectadas, os registros #4, #6 e #10 foram fechados e os registros #5, #8 e #9 abertos. O programa de aquisição de dados é preparado. Nos ensaios realizados neste trabalho, a tensão confinante foi sempre 50KPa maior que a sucção aplicada na amostra, obtendo assim uma tensão confinante constante de 50 KPa. Dessa forma, ajustou-se para 100KPa a tensão confinante e 50KPa a pressão de ar na amostra, deixando aberto o registro #3. A única saída para a água é pela bureta, sendo registrado constantemente a elevação da água na bureta pelo transdutor diferencial de pressão. Com o registro #4 fechado, a drenagem se deu exclusivamente pela pedra porosa contida na peça intercambiável. No momento que a diferença de pressão se torna constante, considera-se que a equalização da sucção na amostra foi totalmente atingida.

O tempo necessário para atingir esse equilíbrio depende, principalmente, da altura da amostra (distância de drenagem), número de faces drenantes, tamanho dos poros do material ensaiado, e da trajetória seguida, isto é, trajetória de secagem ou umedecimento (Delgado, 2005).

3.6.7 Determinação da Condutividade Hidráulica Não Saturada

Para a determinação da condutividade hidráulica não saturada, o procedimento é semelhante ao da condutividade saturada. Com o equilíbrio da sucção, fecham-se os registros #5 e #8 e abrem-se os registros #4, #6 e #10. Prepara-se o módulo e o programa para aquisição de dados e aciona-se a bomba de fluxo, iniciando-se os registros das diferenças de pressão.

Este processo de aplicação de pressão, equalização da sucção e determinação da condutividade hidráulica não saturada poderá ser repetido várias vezes, variando apenas a sucção a ser aplicada.

Ao final do ensaio, a tensão confinante e a pressão aplicada na fase gasosa foram simultaneamente removidas. A célula é, então, esvaziada, e o corpo de prova removido e levado, imediatamente, para a estufa a fim de se determinar o seu grau de saturação no final do ensaio.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresentam-se a seguir os resultados e as análises dos ensaios descritos no tópico anterior.

4.1 Caracterização Geotécnica

Nas Figuras 4.1 e 4.2 encontram-se as curvas granulométrica e de compactação. Além disso, exibem-se, na Tabela 4.1, os resultados da caracterização geotécnica do solo, que apresenta uma coloração acinzentada, e foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação (USCS) como SC (areia argilosa).

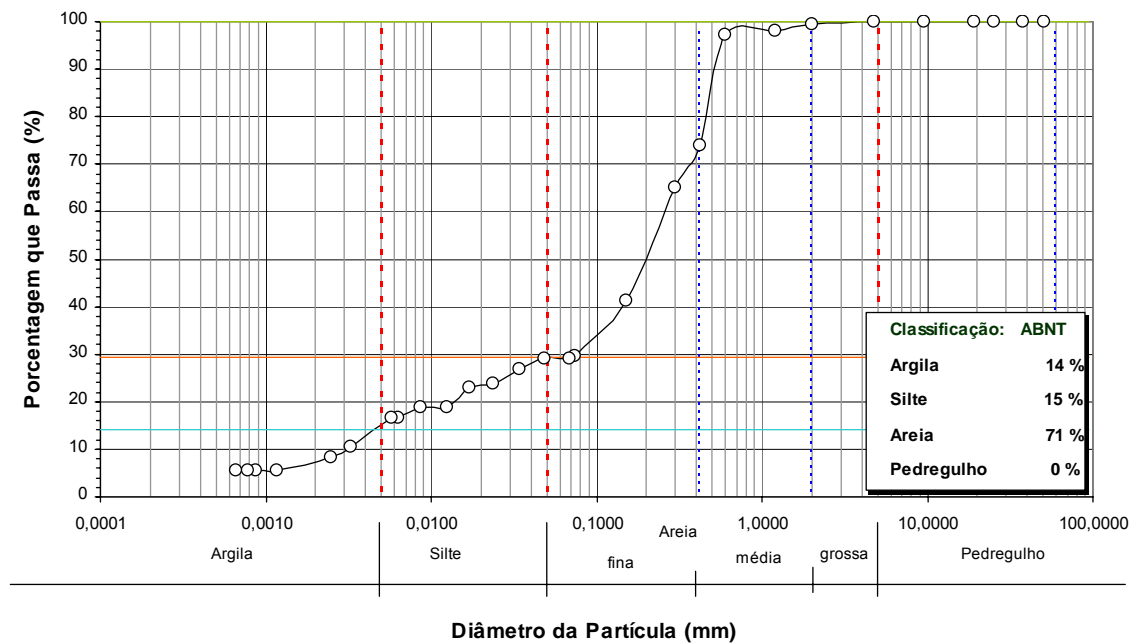


Figura 4.1: Curva granulométrica do solo.

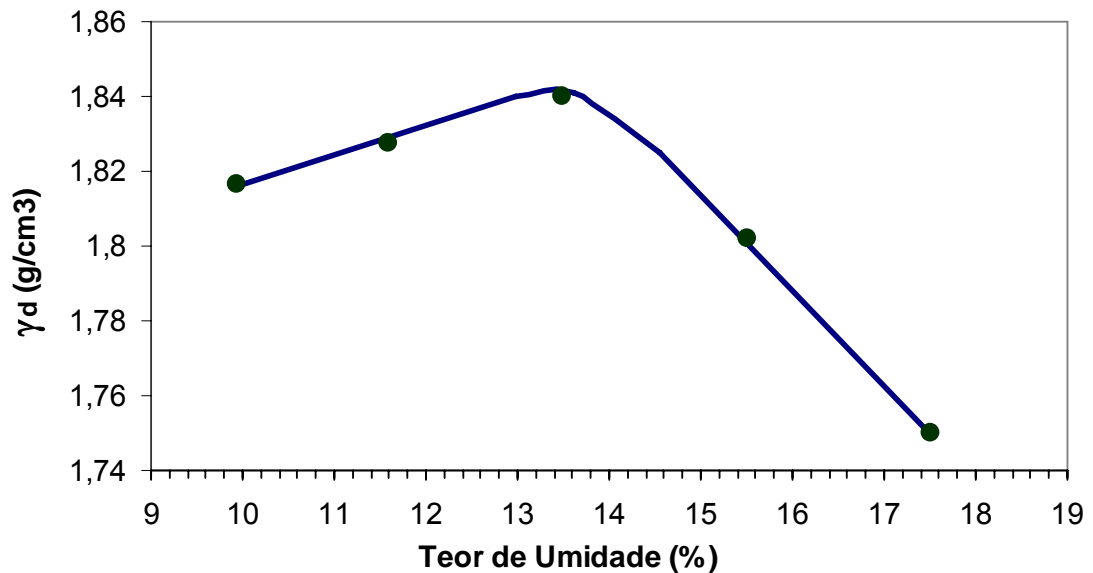


Figura 4.2 - Curva de compactação do solo.

Tabela 4.1 - Caracterização geotécnica do solo

Granulometria				Limites de Atterberg			Índices Físicos		
Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedreg. (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ _s (kN/m ³)	γ _{dmáx} (kN/m ³)	W _{ótima} (%)
14	15	71	0	25	16	9	27,73	18,06	13,47

4.2 Curva Característica ou de Retenção de Água no Solo

Para que não houvesse influência da variação de temperatura, todos os ensaios para obtenção da curva característica e condutividade foram realizados em ambiente com temperatura controlada a 20°C.

As amostras foram compactadas e apresentaram valores entre 0,709 e 0,739 com valor médio de 0,724, conforme apresentado na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados iniciais para obtenção da curva característica.

Nº Anel	Técnica de ensaio	Volume cm3	Umidade de Moldagem	Massa Umida após moldagem	e	n
3	Papel Filtro	35,43	13,13	66,09	0,712	0,416
4	Papel Filtro	35,43	13,00	64,92	0,733	0,423
5	Papel Filtro	35,43	13,30	65,71	0,727	0,421
11	Papel Filtro	35,43	12,94	65,56	0,725	0,420
12	Papel Filtro	35,43	12,86	65,07	0,737	0,424
15	Papel Filtro	35,43	12,72	65,65	0,720	0,418
17	Papel Filtro	35,43	13,77	66,66	0,709	0,415
20	Papel Filtro	35,43	13,10	66,12	0,713	0,416
21	Papel Filtro	35,43	13,70	65,55	0,737	0,424
22	Papel Filtro	35,43	12,72	65,15	0,733	0,423
27	Papel Filtro	35,43	12,80	65,98	0,712	0,416
2	Placa de Pressão	35,43	13,13	66,15	0,713	0,416
8	Placa de Pressão	35,43	13,72	65,49	0,739	0,425
9	Placa de Pressão	35,43	12,89	65,51	0,726	0,421
16	Placa de Pressão	35,43	13,64	65,84	0,729	0,422

e: índice de vazios; n: porosidade

Na Figura 4.3, são apresentados os valores experimentais obtidos no ensaio de obtenção da curva de retenção de água por meio do uso do papel filtro e da placa de pressão. O valor do teor de umidade volumétrica saturado foi de 0,42. O teor de umidade volumétrica foi obtido pela seguinte equação:

$$\theta_w = \frac{S_r \times e}{1 + e} \quad 4.1$$

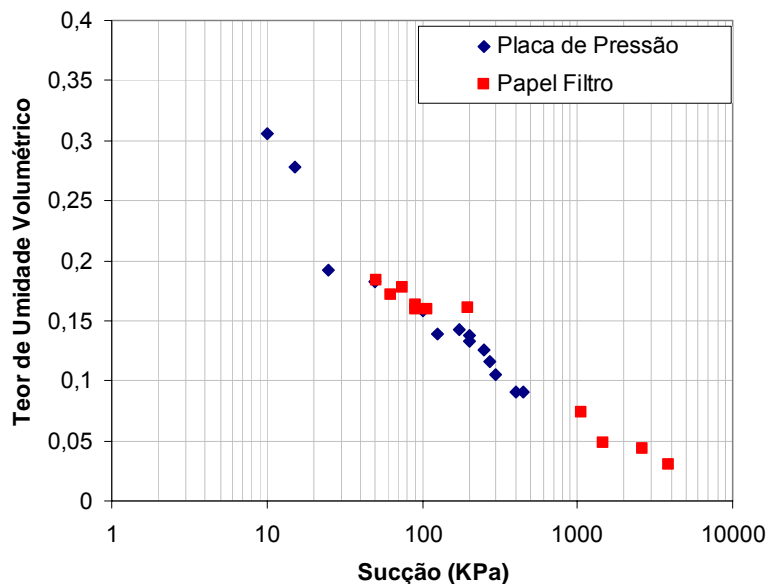


Figura 4.3: Teor de umidade volumétrica x sucção matricial obtidos em laboratório.

Na Figura 4.4 observa-se o ajuste dos dados experimentais às equações de VAN GENUCHTEN (1980) e GARDNER (1958), equações 2.11 e 2.10, com

os parâmetros apresentados na Tabela 4.3. Não foi possível obter pontos da curva de retenção de água para valores de sucção abaixo de 15KPa devido a precisão do manômetro utilizado. Mas, como pode ser observado na Figura 4.4, as equações de VAN GENUCHTEN (1980) e GARDNER (1958) ajustou bem os pontos experimentais.

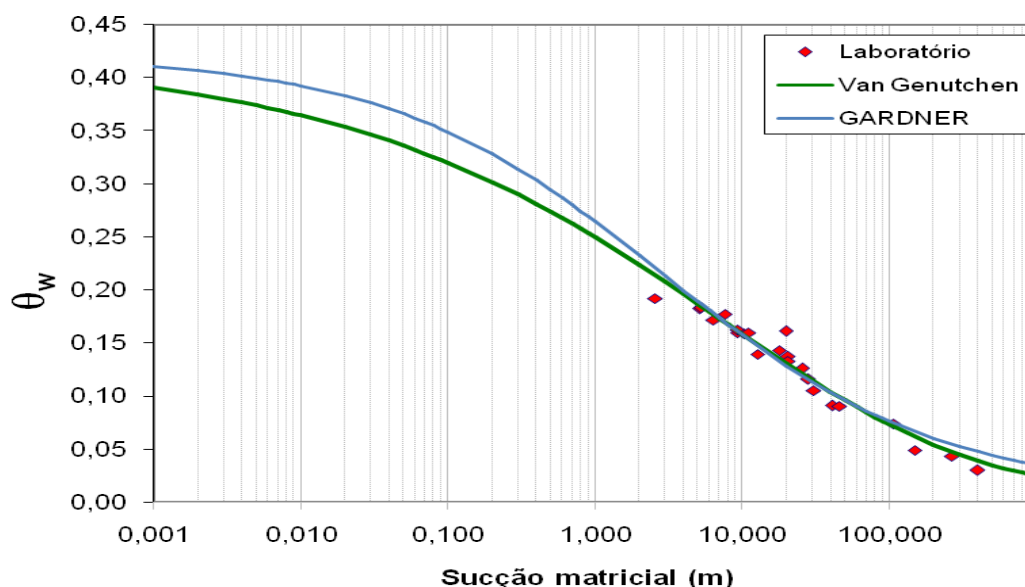


Figura 4.4: Ajuste da curva pelas equações aos dados de laboratório.

Tabela 4.3: Valores dos parâmetros de VAN GENUCHTEN (1980) e GARDNER (1958).

	θ_r	θ_s	n	m	α	η
Van Genuchten	0,01	0,42	1,38	0,27	1,85	-
Gardner	0,01	0,42	-	-	0,346	0,465

4.3 Determinação da Condutividade da Pedra Porosa de Alta Entrada de Pressão de Ar

Para obtenção da condutividade hidráulica do solo, primeiramente obteve-se a condutividade hidráulica da pedra porosa de alta entrada de pressão de ar. Foram colocadas três velocidade diferentes na prensa e, para cada uma, o valor da condutividade foi calculado (Figura 4.5). Por fim a condutividade hidráulica da pedra porosa de alta entrada de ar foi a média das

três determinações Na Tabela 4.4 exibe-se os valores das condutividade saturadas para cada valor de velocidade da prensa e a média adotada.

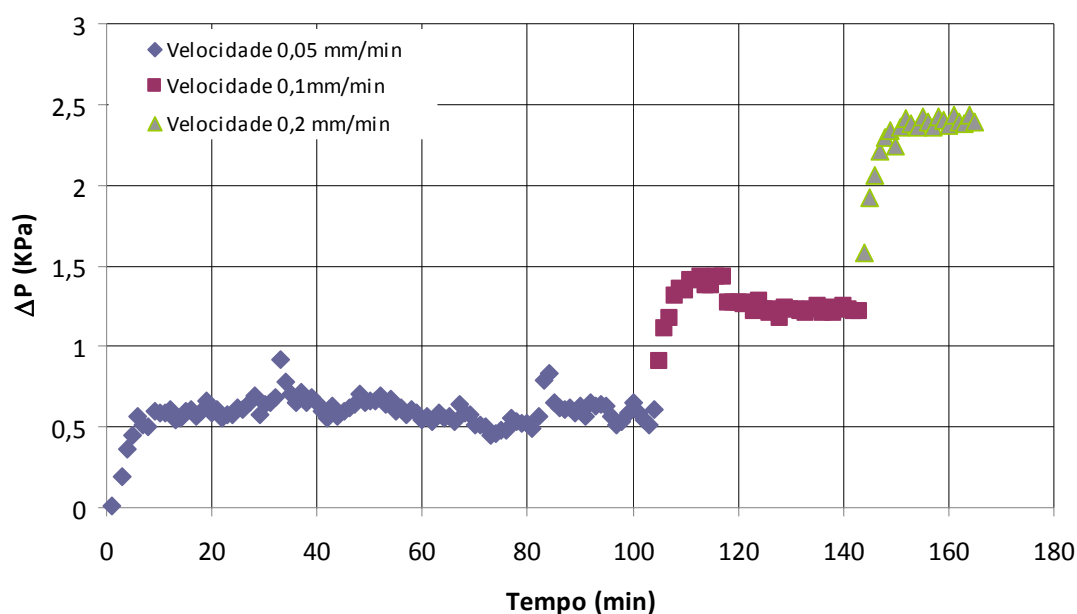


Figura 4.5: Diferenças de pressão para cada velocidade imposta pela prensa.

Tabela 4.5: Condutividades calculadas para diferentes valores de velocidade da prensa

Velocidade mm/min	0,05	0,1	0,2
k saturada (cm/s)	1,92E-08	1,95E-08	2,04E-08
Gradiente gerado cm/cm	8,42	17,50	34,21
Valor médio de k (cm/s)	1,97E-08		

4.4 - Determinação da Condutividade Hidráulica do Solo saturado.

Na Tabela 4.6 exibe-se os resultados obtidos após a moldagem do corpo de prova.

Tabela 4.6: Dados do corpo de prova antes do ensaio

w_i (%)	e	n	Massa inicial (g)	Altura (cm)	ϕ (cm)
13,9	0,718	0,418	326,99	2,00	10,49

O valor do índice de vazios obtido após a moldagem do corpo de prova se encontra no intervalo dos valores encontrados nos corpos de prova moldados para obtenção da curva característica.

Na Figura 4.6, mostra-se a diferença de pressão medida durante o ensaio para obtenção da condutividade hidráulica saturada. O tempo de estabilização, nesse caso cerca de 140 minutos, depende da altura da amostra, tamanho das partículas, forma dos poros, tortuosidade dos canais e índices de vazios.

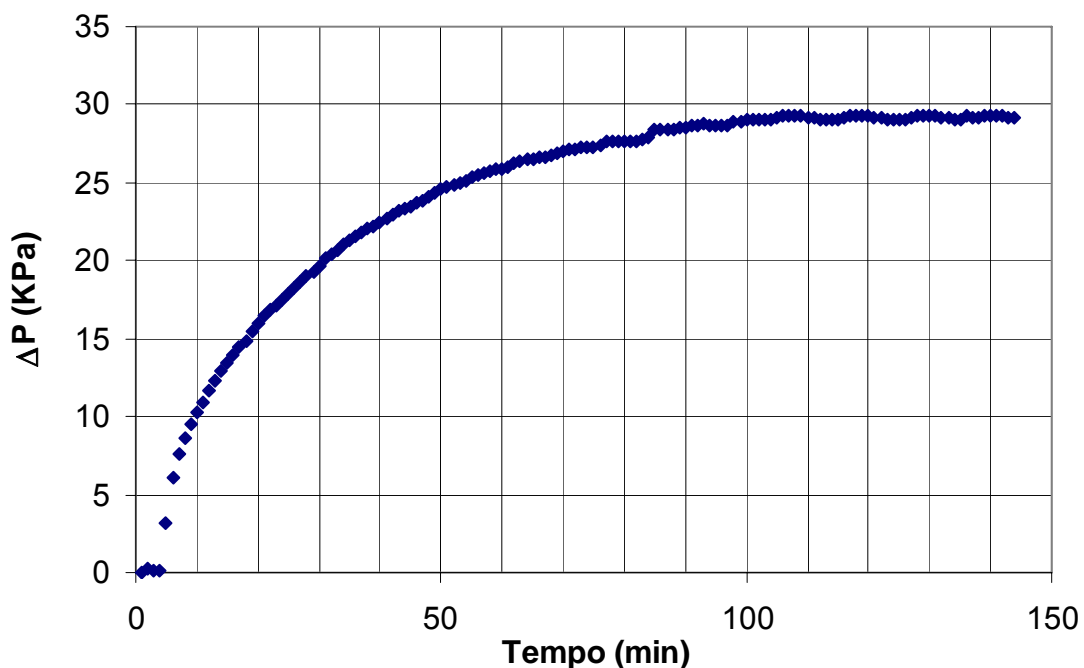


Figura 4.6: Diferenças de Pressão para condutividade do solo saturado.

O valor obtido da condutividade hidráulica saturada foi de $1,69E-07$ cm/s para uma velocidade de 0,75 mm/min, o que corresponde a uma vazão de $2,32E-04$ cm³/s.

4.5 Determinação da Condutividade Hidráulica Não Saturada

Como é comum acontecer, a primeira tentativa de realizar um ensaio com o novo equipamento apresentou uma série de problemas. Ao se aplicar a sucção na amostra, observou-se o aparecimento de bolhas de ar na tubulação de drenagem. Após uma verificação minuciosa, concluiu-se que o ar estava passando por baixo da pedra porosa colada na peça intercambiável. O ensaio foi desmontado, a pedra porosa especial foi retirada da peça intercambiável e foi, novamente, colada.

Em um novo teste realizado, não se constatou novos vazamentos. Foi, então, aplicada uma sucção de 50 kPa na amostra. O tempo de equilíbrio foi de aproximadamente 42 horas como pode ser observado na Figura 4.7.

Após o equilíbrio da sucção na amostra, ligou-se a bomba de fluxo com a velocidade de 0,1 mm/min, correspondente a vazão de $3,1E-05 \text{ cm}^3/\text{s}$. Na Figura 4.8 mostra-se a variação com o tempo da diferença de pressão durante a fase de fluxo constante para determinar a condutividade hidráulica não saturada correspondente a sucção de 50KPa.

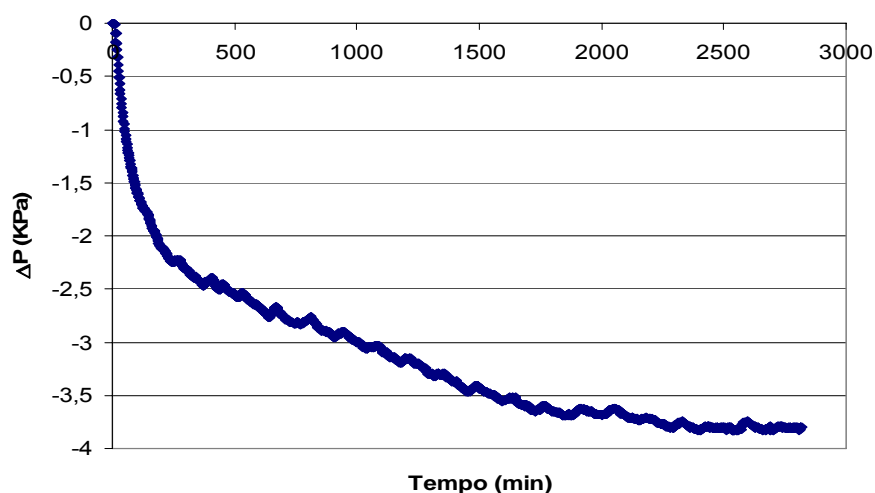


Figura 4.7: Equilíbrio capilar para sucção de 50KPa.

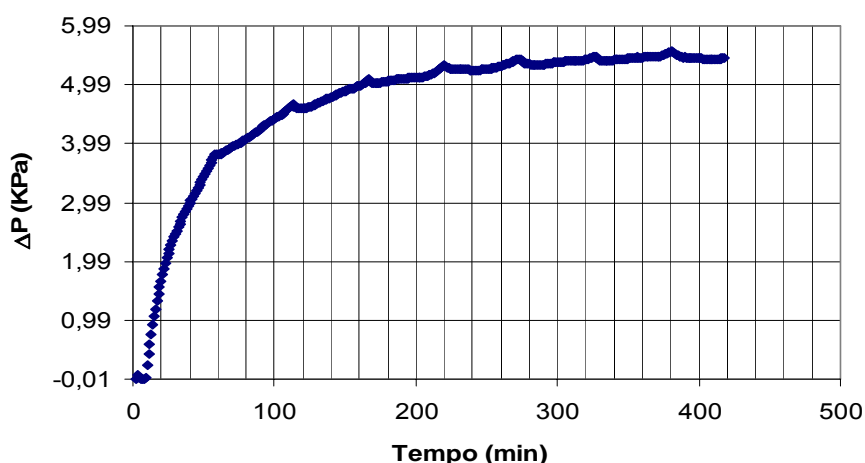


Figura 4.8: Diferenças de Pressão para condutividade do solo não saturado com sucção de 50KPa.

Com a finalização do ensaio com sucção de 50 kPa, iniciou-se a fase de equilíbrio capilar para sucção de 100KPa (Figura 4.9). O tempo de equilíbrio foi menor, de aproximadamente 25 horas. DELGADO (2000) reportou comportamento semelhante para uma areia siltosa.

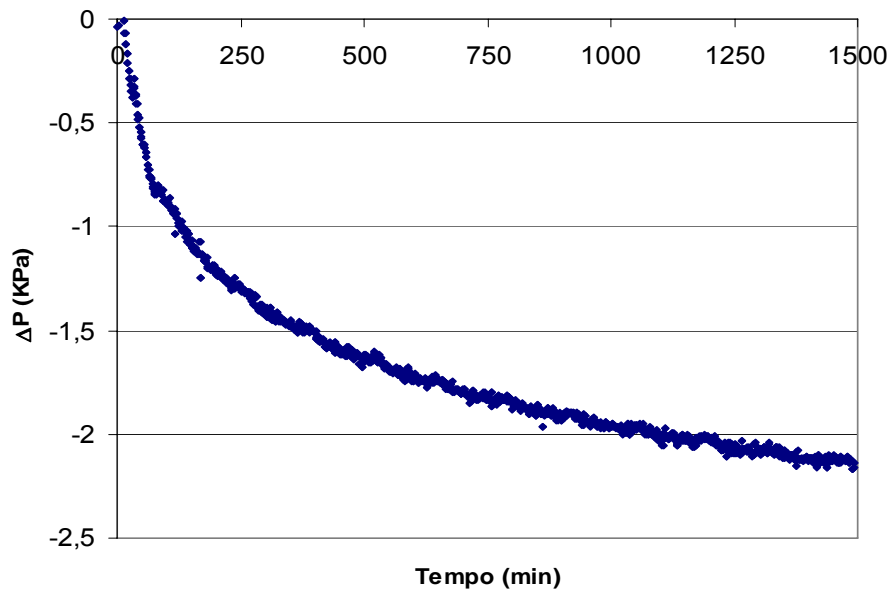


Figura 4.9: Equilíbrio capilar para sucção de 100KPa.

Após o equilíbrio da sucção na amostra, ligou-se a bomba de fluxo com a velocidade de 0,1 mm/min, correspondente a vazão de $3,1E-05 \text{ cm}^3/\text{s}$. Na Figura 4.10 mostra-se a variação com o tempo da diferença de pressão durante a fase de fluxo constante para determinar a condutividade não saturada correspondente a sucção de 100KPa.

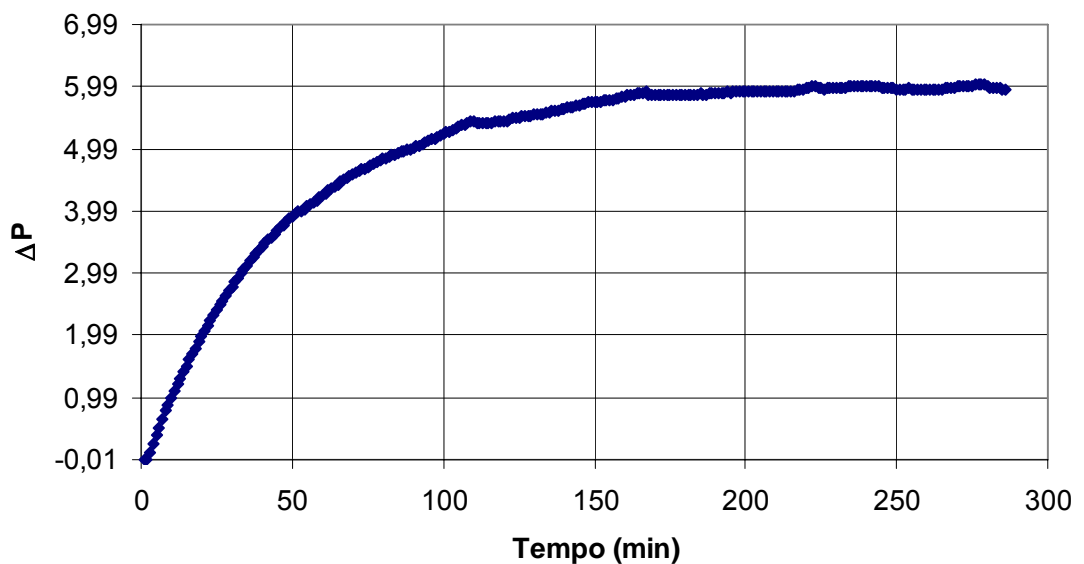


Figura 4.10: Diferenças de Pressão para condutividade do solo não saturado para sucção de 100KPa.

Nas Figuras 4.8 e 4.10 observa-se que os tempos para se atingir o regime permanente nos ensaios com 50 kPa e 100 kPa foram de, respectivamente, 400 e 250 minutos. OLSEN et al. (1994) utilizaram a técnica da vazão constante em amostras previamente saturadas, e reportaram que o tempo necessário para se obter o regime permanente aumenta com o aumento da sucção, ao contrário do que foi observado nesse trabalho. Entretanto, BICALHO (1999), que realizou ensaios com um solo siltoso, obteve valores de tempo menores para atingir o regime permanente à medida que os valores da sucção aumentavam. Na Tabela 4.7 exibe-se um resumo com os resultados obtidos.

Tabela 4.7: Valores finais após os ensaios

K_{saturada} cm/seg	K_{50} cm/seg	K_{100} cm/seg	Massa Final	W_{final} (%)	θ	S_r (%)	ψ aplicada kPa
1,69E-7	3,15E-8	2,56E-8	315,89	10,08	0,166	39,7	100

4.6 Comparação entre Valores Experimentais e Valores Analíticos do Coeficiente de Permeabilidade

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos experimentalmente, foi determinada a função de condutividade pelo ajuste da curva de VAN GENUCHTEN (1980) pela equação 2.22 e GARDNER (1958) equação 2.27. Os dados de entrada são a condutividade hidráulica saturada obtida em laboratório e os valores α , m e n para o ajuste de GENUCHTEN (1980) e α e η para o ajuste de GARDNER (1958), obtidos pela curva de retenção e expostos na Tabela 4.3. A saturação efetiva é obtida pela equação:

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad 4.1$$

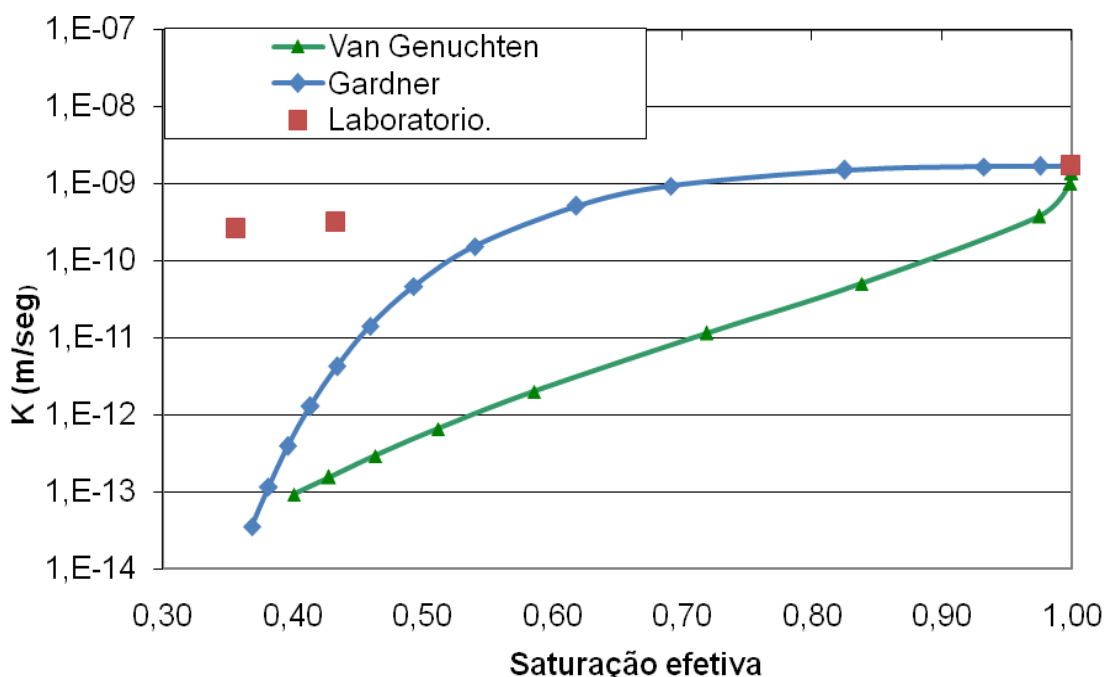


Figura 4.11: Função de condutividade pelas equações e valores obtidos em laboratório.

Observa-se na Figura 4.11, que as curva de VAN GENUCHTEN (1980) e GARDNER (1958) não teve um bom ajuste com os dados das medições diretas em laboratório. Essas diferenças podem ser explicadas, ou por erros no ajuste dos modelos aos dados experimentais, ou por erros nos próprios resultados experimentais.

Quanto a esses últimos erros nos resultados experimentais, algumas hipóteses podem ser levantadas, tais como: as pedras porosas especiais estarem inadequadas, com condutividades hidráulicas muito baixas para as do solo ensaiado. Dessa forma, elas consomem boa parte da perda de carga e com isso diminuem a precisão no cálculo da condutividade hidráulica do solo, conforme reportado por LU & LIKOS (2004). Outra hipótese pode ser levantada quanto à completa saturação de todo sistema. Na presente e inicial versão do equipamento, o ensaio não é feito com contra-pressão o que, certamente, garantiria mais a inexistência de ar no sistema.

Ressalta-se que estes foram os primeiros ensaios com o novo equipamento. Certamente, é necessário realizar mais ensaios, com outros valores de sucção e outros tipos de solos, em amostras compactadas e indeformadas, bem como se usar outros métodos de ajuste da curva de

condutividade para ser mais conclusivo a respeito das diferenças encontradas nesse trabalho.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Essa dissertação teve como objetivo desenvolver, colocar em funcionamento e realizar os primeiros ensaios em um permeâmetro, com controle de sucção, para determinar a condutividade hidráulica em solos saturados e não saturados, usando o método de vazão constante. O desenrolar do trabalho levou às seguintes conclusões.

Os tempos observados durante a fase de equilíbrio capilar no corpo de prova foram compatíveis com os tempos observados em outros trabalhos com solos parecidos.

Durante a fase de fluxo para determinação da condutividade hidráulica, os tempos necessários para alcançar o regime permanente diminuíram com o

aumento da sucção. BICALHO (1999) observou a mesma tendência, enquanto OLSEN (1994) verificou tendência contrária.,

Os resultados obtidos na determinação da curva de retenção de água do solo por meio da placa de sucção e do método do papel filtro ficaram bem próximos, confirmando a validade dessas duas técnicas.

O modelos de VAN GENUTCHEN e GARDNER ajustaram-se bem aos resultados experimentais da curva de retenção de água do solo.

A funções de condutividade hidráulica proposta pelos modelos de VAN GENUTCHEN e GARDNER, a partir dos parâmetros obtidos na modelagem da curva de retenção de água do solo não se ajustou bem às condutividades hidráulicas medidas com o novo equipamento. Essas diferenças podem ser explicadas, ou porque os modelos são inadequados para o solo ensaiado, ou porque ocorreram erros nos resultados experimentais. Quanto a esses últimos, algumas hipóteses podem ser levantadas, tais como: as pedras porosas especiais estarem inadequadas, com condutividades hidráulicas muito baixas para as do solo ensaiado. Dessa forma, elas consomem boa parte da perda de carga e com isso diminuem a precisão no cálculo da condutividade hidráulica do solo, conforme reportado por LU & LIKOS (2004). Outra hipótese pode ser levantada quanto à completa saturação de todo sistema. Na presente e inicial versão do equipamento, o ensaio não é feito com contra-pressão o que, certamente, daria uma maior garantia da inexistência de ar no sistema.

5.2 Sugestões

Como se trata de um novo equipamento e somente foram realizados os primeiros ensaios, algumas sugestões se fazem necessárias para aperfeiçoá-lo o equipamento e agilizar a execução dos ensaios.

Instalação de transdutores de pressão abaixo dos três manômetros, para se ter maior precisão no valor das pressões aplicadas, uma vez que a precisão dos manômetros é de ± 7 KPa. Com a instalação destes transdutores, será possível verificar o valor do parâmetro B em um processo de saturação por contra-pressão. Além disso, será possível fazer ensaios com valores de sucção menores que cerca de 50 kPa.

A instalação de uma membrana hidrofóbica (permite a passagem de ar e impede a passagem de água) sobre a pedra porosa normal facilitará a execução do ensaio e diminuirá o seu tempo.

Certamente, é necessário realizar mais ensaios, com outros valores de sucção e outros tipos de solos, em amostras compactadas e indeformadas, bem como se usar diferentes métodos de ajuste da curva de condutividade hidráulica para ser mais conclusivo a respeito das diferenças encontradas nesse trabalho.

Os ensaios realizados para a determinação da condutividade hidráulica foram feitas segundo uma trajetória de secagem. Recomenda-se a execução de ensaios com o mesmo corpo de prova tanto em trajetórias de secagem e quanto de umedecimento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181/84, Solo – Análise Granulométrica – Procedimento**, Rio de Janeiro, 13p, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo: ensaio de compactação: Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ, 10 p, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459/84, Solo - Determinação do limite de liquidez**, Rio de Janeiro, 6p, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180/84, Solo – Determinação do limite de plasticidade**, Rio de Janeiro, 3p, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508/84, Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 8p, 1984.

AIBAN, S.A. & ZNIDARCIC, D., “**Evaluation of The Flow Pump and Constant Head Techniques for Permeability Measurements**”, Geotechnique Vol 36 N°4, pp. 655-666, 1989.

ARARUNA JR, J.T., “**Measurement of Permeability of Soil Using a Flow Pump-Development and Evaluation of Equipment and Test Procedure**” Ph. D. Dissertation, University of New Castle, Civil Engineering Department, 1995.

BICALHO, K. V., “**Modeling Water Flow in an Unsaturated Compacted Soil**”. Ph.D. Dissertation, University of Colorado, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, 235p, 1999.

BROOKS, R.H. & COREY, A.T., “**Hydraulic Properties of Porous Media**”, Colorado State Univ. Hydrol. Paper, N°3, 27 pp, 1964.

BUCKINGHAM, E., “**Studies on the Movement of Soil Moisture**”. U.S. Dept. Agr. Bur.Soils, Bul., 38pp, 1980.

CHANDLER, R. J., AND GUTIERREZ, C. I., “**The filter Paper Method of Suction Measurement**”. Géotechnique, p.265-268, 1992.

DANIEL, D.E., “**Permeability Test for Unsaturated Soil**”. Geotechnical Testing Journal,(ASTM), Vol. 6, N° 2 pp. 81-86, 1983.

DELGADO, C. W.C., “**Desenvolvimento de um Equipamento para o Estudo da Permeabilidade Efetiva em Meios Multifásicos**”. Tese de doutorado, PUC-RIO, Rio de Janeiro, 373p, 2000.

- ELZEFTAWY, A.; CARTWRIGHT, K., **“Evaluation the Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Soils”**. Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM STP, T.F. Zimmie and C.D. Riggs Editors, pp168-181, 1981.
- FREDLUND, D. G. AND RAHARDJO, H., **“Soil Mechanics for Unsaturated Soils”**. New York, John Wiley & Sons, Inc.1993. p. 1 – 6, 1993.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. & HUANG, S., **“Predicting the Permeability Functions for Unsaturated Soil Using the Soil-Water Characteristic Curve”**. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, n° 4, pp. 533 - 546, 1994.
- GARDNER, W. R. (1958). **Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table**. Soil Science, Baltimore, 85: 228 - 232.
- GREEN, R. E. and COREY, J. C., **“Calculation of Hydraulic Conductivity”**: A Further Evaluation of Some Predictive Methods. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 35, pp. 3-8, 1971.
- HAMILTON, J.M., DANIEL D.E AND OLSON R.E., **“Measurement of Hydraulic Conductivity of Partially Saturated Soils”**. Permeability and Groundwater Contaminant Transport. ASTM STP 746. Zimmie T.F. and Riggs C.° Eds., American Society for Testing and Materials, 1981.
- HILF, J. W., **“An Investigation of Pore-water Pressures in Compacted Cohesive Soils”**. Technical Memorandum, Bureau of Reclamation U. S. Department of Interior, 654, Denver, Colorado,1956.
- HILLEL, D., **“Soil Water - Physical Principles and Processes”**. New York, Academic Press, 1971. cap. 1 – 5, 1971.

- HUANG, S.Y., FREDLUND, D.G. E BARBOUR, S.L., **“Measurement of the Coefficient of Permeability Of Unsaturated Soil”**. 1st Conference on Unsaturated Soils, Paris-France, Vol 1, pp 505-511, 1995.
- IWATA, S., **“Soil-water interactions”**. USA, Marcel Dekker, Inc., 380 p, 1988.
- JIMENES S.J., **“Hacia una Mecánica de Suelos no Saturada”**. Revista Ingeniería Civil Vol.88 -1ra parte.pp.145-164, 1993.
- LOW, P.E.; ANDERSON, D.M., **“Osmotic Pressure Equations Determining Thermodynamic Properties of Soil”**. Soil Science, vol.I, 86, pp.251-253, 1958.
- LU, N. & LIKUS, W.J., **“Unsaturated Soil Mechancics”**, John Wiley @ Sons, Inc., p. 556, 2004.
- MARINHO, F. A. M., **“Medição de Sucção em Solos”**. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. 373-398, Rio de Janeiro, 1997.
- MARINHO, F.A.M., **“Os solos não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados”**. Texto apresentado a USP/SP para o concurso de livre docência. USP, São Paulo/SP, 2005.
- MITCHELL, J. K., **“Fundamentals of Soil Behavior”**. 2nd ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 435 p, 1993.
- OLSEN, H.W., **“Darcy’s Law in Saturated Kaolinite”**. Water Resource Research 2, N°2, 1966.
- OLSEN, H.W., NICHOLS R.W. AND RICE T.L., **“ Low Gradient Permeability Measurements in a Triaxial System”**, Geotechnique, 35 N°2, 1985.
- OLSEN, H.W., WILLDEN, A.T., KIUSALAAS, N.J., NELSON, K.R. AND POESTER, E.P., **“Volume Controlled Hydrologic Property Measurements in Triaxial Systems”**. In Hydraulic Conductivity and

Waste Contaminant Transport in Soils, ASTM STP 1142, David E, Daniel and Stephan J. Tratwein, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.1994.

OLSON, T.C. AND SCHWARTZENDRUBER, D., **“Soil Science Society of America Proceedings”**. Vol. 32 N°4, 1968.

PACHECO, P. G. M., **“Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre”**. Dissertação de Mestrado. PUC-RIO, Rio de Janeiro/RJ,129p, 2005.

PANE, V., CROCE, P. ZNIDARCIC, D. KO, H.-Y., OLSEN, H.W. AND SCHIFFMAN, R.L.,**“Effects of Consolidation on Permeability Measurements for Soft Clay”**, Geotechnique, 1983.

RIDLEY, A. M. AND WRAY, W. K., **Suction Measurement: “A Review of Current Theory and Practices”**. In: Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 95, Paris – França, Vol.3, p.1293-1322, 1995.

SCHACKELFORD, C.D. AND GLADE, M.J., **“Constant-Flow and Constant Gradient Permeability Tests on Sand-Bentonite-Fly Ash Mixtures, In Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soils”**. ASTM STP 1142, 1994.

SOTO, M. A. A.,**“Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaios com Solos Não Saturados”**, Tese de Doutorado. USP, São Carlos / SP, 233p, 2004.

LUTZ, J.F.,AND KEMPER,J.D., **“Intrinsic Permeability of Clay as Affected by Clay-Water Interaction”**. Soil Science, Vol 88. 1959.

VAN GENUCHTEN, M.T., **“A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”**. Soil Sci. Soc.Am.J., vol. 44, n° 5, pp. 892 – 898, 1980.