

3 Ensaio em solos não saturados

3.1. Obtenção das propriedades hidráulicas não saturadas

3.1.1. Sucção e Umidade

A sucção presente no solo varia em diversas ordens de grandeza, além de variar conforme o fenômeno que ocorre no solo (seção 2.22) e, portanto sua obtenção é limitada a técnica e uso particular como mostrado na Tabela 3.

A instrumentação usual realiza medidas diretas, como o tensiômetro ou indiretas como o papel filtro, psicrômetro, e sensores de condutividade térmica.

O tensiômetro utiliza-se da equalização entre a carga interna, em um tubo vedado, a sucção mátrica do solo. A sucção é medida através de um medidor de pressão (coluna de mercúrio, vacuômetro de bourdon ou transdutor de pressão) e seu sistema está limitado à pressão de cavitação da água que é entorno de ~90KPa (900cm). Há, no entanto, tensiômetros de alta capacidade que podem medir sucções de até aproximadamente 1,2 Mpa. A diferença destes está no transdutor que deve suportar grandes pressões absolutas e na pedra porosa com altos valores de entrada de ar (~1,5Mpa). O maior cuidado em relação a este equipamento deve ser a saturação da pedra porosa.

O método do papel filtro consiste na medição da umidade do mesmo após alguns dias de contato com a amostra cuja sucção deseja-se medir. Este tempo deverá ser o suficiente para que seja equalizada a sucção entre amostra e o papel (7 dias, ASTM, 1992; 3 dias Chandler e Gutierrez, 1986; e 10 dias Sibley & Williams, 1990; *Apud* Villar, 2002). A sucção então é obtida através da curva característica do papel filtro que deve ser calibrada para cada lote se possível como mostrado na Figura 6 (*Apud* Marinho, 2005).

Tabela 3 - Resumo das técnicas comuns para se medir e controlar a sucção (Masrouri *et al.*, 2008)

Técnica		Componente de sucção	Medidas de sucção a partir ou controlando sucção com	Faixa de sucção (KPa)	Trajetória disponível
Para medir sucção	Tensiometro	Mátrica	Pressão negativa de água	0-100(1500)	
	Sensor de condutividade elétrica/térmica (Bloco de Gesso)	Mátrica	Condutividade térmica	100-4000	
	Papel Filtro	Mátrica/Total	Conteúdo de água do papel	100-100000	
	Psicrômetros, higrômetros, polímeros com sensores de resist./capacit.	Total	Humidade do Vapor	100-100000	
Para controlar sucção	Placa de pressão	Mátrica	Pressão de Ar	10-1500	Secagem /Umidecimento
	Coluna de solo	Mátrica/total	Carga de água negativa	0-100	Secagem
	Centrífuga	Mátrica	Força Centrífuga	10-1500	Secagem /Umidecimento
	Osmótica	Mátrica	Pressão osmótica	0-1000	Secagem /Umidecimento
	Equilíbrio de Vapor	Total	Solução salina	3000-100000	Secagem /Umidecimento

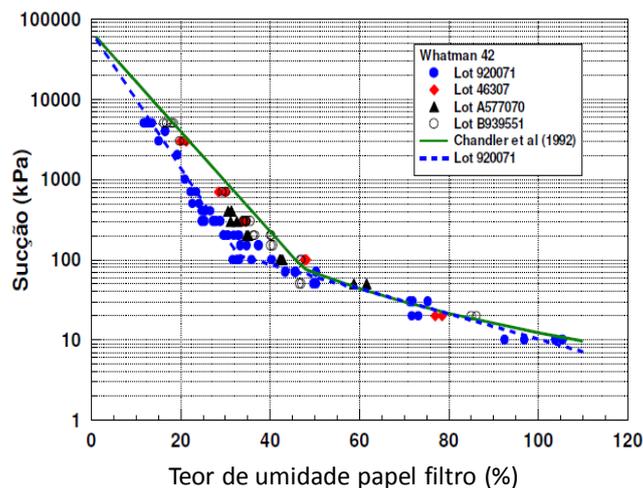


Figura 6 - Curvas de calibração de diferentes lotes do papel filtro Whatman 42 (Apud Marinho, 2005)

Esse método abrange quase toda a extensão da curva característica, no entanto dificuldades tanto com a saturação da amostra como medidas de duas

formas de sucção⁷ (matricial e total) a partir de certo nível de sucção. Outros aspectos devem ser considerados como o tempo de equalização ou desconsiderados como o tamanho da área de contato entre o papel e a amostra. (Marinho, 2005).

Já a umidade presente no solo pode ser obtida de forma direta, em estufa ou indireta, com TDR (Time Domain Reflectometry) ou sonda de nêutrons.

3.1.2. Curva característica

A obtenção da curva característica em laboratório se limita às técnicas supracitadas (Tabela 3) de medidas de sucção, uma vez que a curva é a relação da mesma com a umidade (ver seção 2.1.1.1).

Em geral as limitações dos ensaios se devem ao tempo de equalização da sucção⁸, a medições serem feitas em amostras distintas, ou ao tipo da parcela de sucção desejada (mátrica, osmótica ou total). Como exemplo destas limitações podemos citar a placa de pressão que, para sucções altas, está fadada a um longo tempo de ensaio, uma vez que

3.1.3. Condutividade hidráulica

A obtenção direta da curva de condutividade hidráulica é de certa forma muito restrita na literatura, seja pelo custo ou pela morosidade dos ensaios. Portanto, em geral a curva de condutividade hidráulica é estimada através de relações com outras propriedades por meio de modelos empíricos e macroscópicos (Kozeny, 1927; Richards, 1931; Averjanov, 1950, Gardner, 1958) ou modelos estatísticos (Burdine, 1953; Kunze *et al.*, 1968; Green e Corey, 1971; Maulem, 1976; Fredlund *et al.*, 1994) (*Apud* Masrouri, 2008).

Neste item serão apresentados brevemente os métodos de laboratório⁹ e campo¹⁰ para a obtenção da condutividade hidráulica. .

⁷ Observado em Gomes (2002). (*Apud* Marinho, 2005)

⁸ ex: placa de pressão que requer de diversos estágios incrementais e está limitada pela condutividade da pedra porosa de alto valor de entrada de ar.

⁹ Resumido em Masrouri (2008)

¹⁰ Somente os métodos de infiltração baseados na sortividade dos solos.

3.1.3.1.

Condutividade hidráulica – Ensaios de Laboratório

A condutividade hidráulica saturada pode ser obtida de maneira simples em ensaios de parede rígida ou flexível, sob carga constante ou variável.

Já a medição da condutividade hidráulica não saturada (curva de condutividade hidráulica) exige um controle do ensaio¹¹ em termos de sucção ou umidade e das variações volumétricas. As metodologias (Tabela 4) para sua obtenção consistem de duas vertentes principais, uma sendo os métodos em regime permanente e a outra os em regime transiente.

3.1.3.1.1.

Métodos em regime permanente

Os ensaios para a obtenção da condutividade hidráulica não saturada em regime permanente necessitam do controle de sucção e volumétrico (1 ou 2 fases), Figura 7, uma vez que utilizam a lei de Darcy como lei de movimento¹². As principais limitações destes métodos são relacionadas as permeabilidades muito baixas encontradas em sucções muito altas que exigem medidas precisas de pequenos volumes; e controles relacionados ao longo tempo de ensaio (Ex: efeito difusão do ar na pedra porosa e no tensiômetro).

As técnicas para o controle da sucção são: osmótica (Figura 8), controle de umidade (Figura 9) e translação de eixos. As duas primeiras são processos termodinâmicos e, portanto exigem controle de temperatura ($\pm 0,1^\circ\text{C}$). Adicionalmente, na primeira, aplica-se pressões negativas somente à fase água o que facilita a medição volumétrica¹³. A técnica por sucção osmótica exige também o controle da solução¹⁴, que em geral é o polietileno-glicol¹⁵.

Tabela 4 - Metodologias de ensaio para obtenção de Condutividade hidráulica (Masrouri, 2008)

¹¹ Ver seção 3.2, que consiste em ensaios inversos cujo controle é reduzido

¹² Detalhes em Freeze e Cherry (1979) e Fredlund e Rahardjo (1993)

¹³ Não há pressões positivas de ar variando no corpo de prova o que não contribui à geração de bolhas oclusas

¹⁴ O contato entre o corpo de prova e a solução é feito com uma membrana semi-permeável

¹⁵ Estável e pouco reativo

Metodologias de ensaio		Vantagens	Desvantagens	Custo Relativo
Métodos em regime permanente (RP)	Convencionais de carga constante (CCC)	Simplicidade de poder controlar o estado de tensões	Custoso, tedioso, demorado em materiais de baixa permeabilidade	Baixo
	Fluxo constante (através de bombas)	Simplicidade, pode controlar o estado de tensões Mais rápidos e de melhor resolução o CCC. Gera Condutividade hidráulica e CC.	Bomba necessária	Custo inicial moderado (equipamento)
	Centrífuga	Pequeno tempo para medir baixa Condutividade hidráulica	Requer a centrífuga Somente para solos densos e rígidos Grande rede de tensões normais Necessidade de atenção operacional	Custo inicial alto (equipamento)
Métodos em regime transiente (RT)	Outflow-inflow (vazão de saída/entrada) [Solução direta ou inversa]	Mais rápidos que os de RP Bom controle de massa Simplicidade (equipamento)	Poucas comparações confiáveis com outros métodos (solos de textura fina)	Baixo
	Perfil instantâneo [Solução direta ou inversa]	Simplicidade Gera Condutividade hidráulica e CC Bons para argilas ($30% < S_w < 90%$) e para areias ($S_w < 50%$)	Controle de massa ruim Sem controle de tensões Possibilidade de erros perto de S_w	Custo de moderado a alto (equipamento)
	Método Térmico	Simplicidade Bom para Condutividade hidráulica baixo	Demorado Sem controle de tensões Requer a CC	Moderado (instrumentação)

* S_w = Saturação do solo

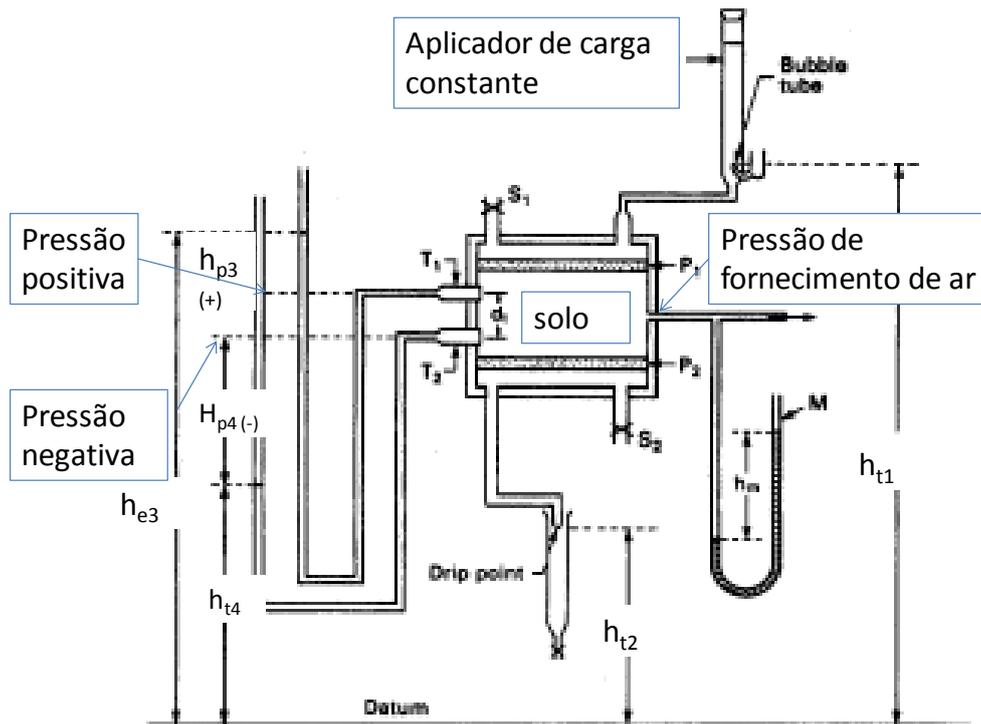


Figura 7 - Aparato para medição da condutividade hidráulica (de Klute, 1965a)

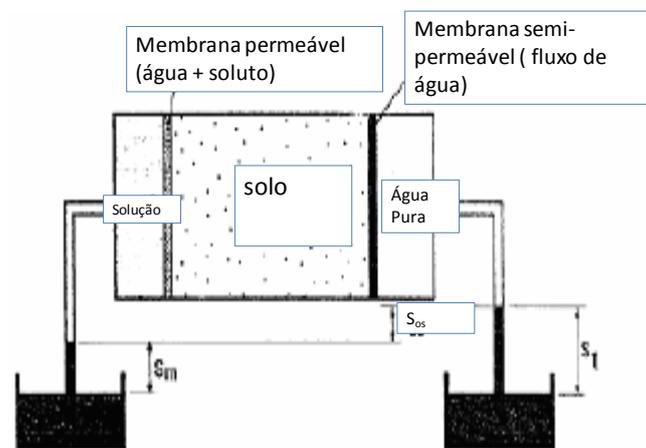


Figura 8 - Controle de sucção osmótica (Soto, 2004)

Na técnica de controle de umidade, o fluxo é induzido no vapor da solução na medida em que se desenvolvem pressões parciais de água em ambientes iônicos (ácidos ou sais).

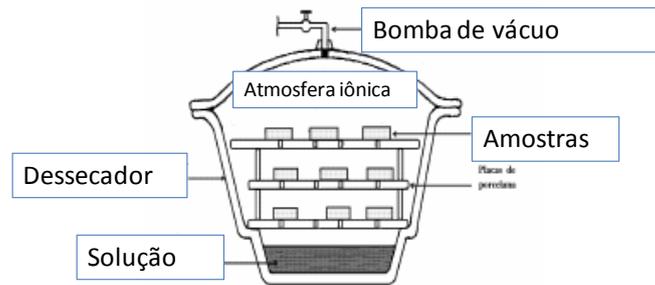


Figura 9 - Controle de sucção por umidade relativa (Soto, 2004)

A última delas, nominada translação de eixos, se baseia no princípio de que se não houver variação de umidade no solo, ao se aplicar uma dada pressão de água nos poros ocorrerá o mesmo incremento de pressão no ar e vice-versa.

As técnicas para o controle volumétrico são: medidas diretas do volume líquido; medidas das duas fases ,ar e água do corpo de prova; ou ainda medidas diretas do corpo de prova.

A primeira técnica, medida direta do volume do líquido, está limitada a variação volumétrica dos instrumentos (Ex: Câmara e tubulações) e líquido sensíveis à variação da temperatura e pressão. Para fins de redução dos efeitos supracitados essa técnica Bishop e Donald (1961) utilizaram células triaxiais de parede dupla. (Apud Moncada, 2008).

Na segunda técnica, as medidas das fases ar e água, são feitas diretamente por equipamentos controladores de pressão/volume, e está limitada à perda do volume medido em conexões ou por difusão, além de ser sensível à variação de temperatura.

As medidas diretas do corpo de prova, podem ser feitas via processamento de imagem, LVDTs ou varredura por laser.

3.1.3.1.2. Métodos em regime transiente

A grande vantagem do método em regime transiente é, em geral, o tempo mais curto de ensaio, além de em algumas configurações ser possível a obtenção direta (ou indireta) de ambas as curva de condutividade hidráulica e característica (Tabela 4).

A metodologia de ensaio varia bastante sendo mais comuns os chamados de perfil instantâneo (Tabela 5), onde se pretende medir ao longo de uma coluna (fluxo unidimensional) as variáveis dependentes do problema de fluxo (sucção, umidade, vazão). A técnica mais comum se baseia na obtenção da umidade a vários valores de sucção, alcançando, portanto a acumulação de umidade ao longo do tempo nestes pontos. Estes valores são representados graficamente nestes mesmos eixos e então um modelo estatístico da condutividade hidráulica não saturada é gerado (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Tabela 5 - Revisão sobre o método do perfil instantâneo (Adaptado de Moncada, 2008)

Ano	Autor	Técnica
1953	Watson	Drenagem por Gravidade
1966	Richards e Weeks	Dessorção, aplicação de carga de sucção
1968	Wind (1968), Ayra <i>et al.</i> (1975), Meerdink <i>et al.</i> (1996)	evaporação com temperatura controlada
1972	Oveman e West	Fluxo
1981	Hamilton e outros	Vazão Controlada

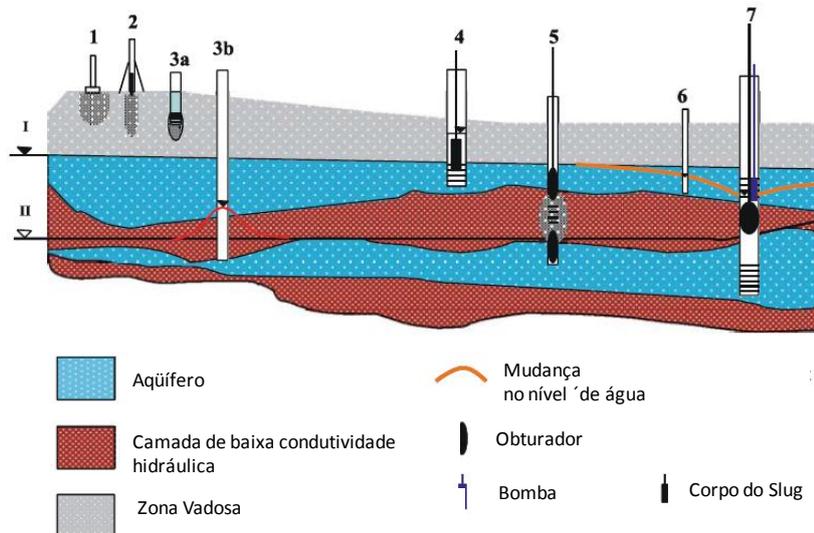
3.1.3.2.

Condutividade Hidráulica – Ensaio de Campo

Diversos ensaios de campo podem ser usados para estimar a condutividade hidráulica dos solos, estando condicionados as devidas aplicações (região, profundidade, K_{sat} do material, aos custos e o tempo de ensaio).

Dos ensaios de campo, serão apresentados somente os ensaios realizados na zona vadosa (ver de 1 ao 3a da Figura 10), resumidos a seguir, cujo princípio é baseado na infiltração de água no solo.

Outros ensaios comuns, porém realizados, em geral, na zona saturada (K_{sat}) são o ensaio Slug/Bail (Figura 10-4); o de Pulso (Figura 10-5) e o de bombeamento de poços (Figura 10-6, piezômetro e Figura 10-7)



- I. Nível de água do aquífero não confinado
- II. Nível potenciométrico do aquífero parcialmente confinado
1. Infiltrômetro de anel duplo
2. Permeâmetro de Guelph
- 3.a) Poço com revestimento
- 3.b) Poço com fundo aberto
4. Ensaio Slug/Bail
5. Ensaio de pulso com obturadores
6. Piezometro
7. Ensaio de bomeamento

Figura 10 - Resumo dos ensaios de campo para medição da condutividade hidráulica saturada- (Knödel, Lange, & Voigt)

3.1.3.3. Infiltrômetro de anel duplo

O infiltrômetro de anel duplo¹⁶ consiste na aplicação de carga constante à anéis de 30 e 60 cm de diâmetro cravados de forma concêntrica, a profundidades de 5 a 10 cm. A variação de volume de água medido do anel central é anotada em intervalos de tempo regulares até se atingir a condição de regime permanente. A condutividade saturada é então determinada através da equação de Darcy assumindo fluxo 1D, vertical. A faixa dos valores de condutividade obtidos está entre 10^{-6} e $5 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$, e é adequado para solos relativamente finos e de baixa plasticidade que não ofereçam resistência a penetração dos anéis.

¹⁶ Consultar Daniel (1989)

3.1.3.4. Infiltrômetro de tensão

O ensaio infiltrômetro de tensão (Figura 11) aplica uma carga constante negativa (ou positiva) ao solo através de um disco circular e uma membrana.

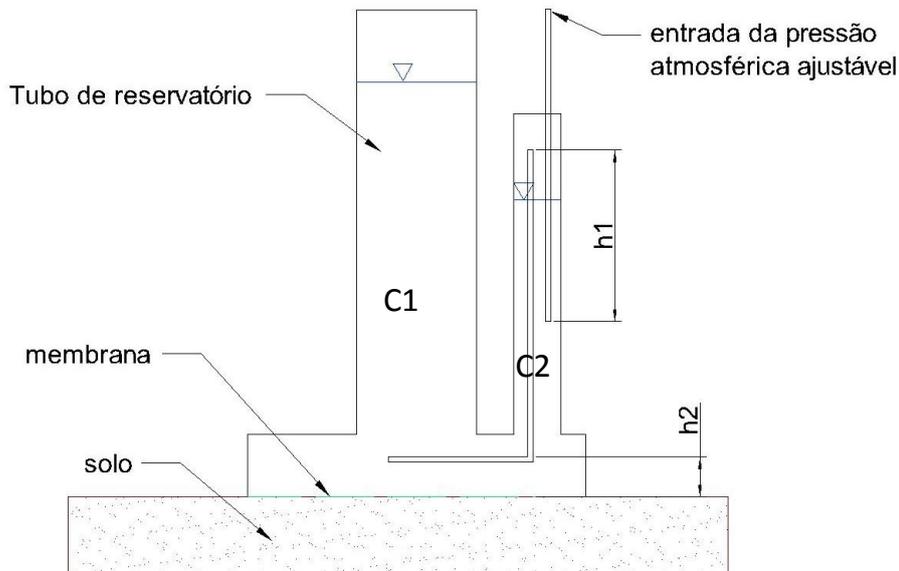


Figura 11 - Infiltrômetro de tensão adaptado de Anguro-Jaramillo *et al.*, 2000.

A carga hidráulica (h_0) aplicada ao solo é feita com o uso de dois reservatórios de Mariotte, onde a entrada de ar do segundo tubo tem pressão menor do que a atmosférica e é dada conforme a Figura 11 por: $h_0 = h_2 - h_1 - h_c$. Analisando h_0 através do ponto 2 temos que a carga de elevação é igual a h_2 e a carga de pressão é $-h_1 = p_{atm} - h_1$ sendo esta ajustável e h_c representa a correção devido ao efeito de capilaridade do sistema.

As propriedades do solo são calculadas a partir da infiltração acumulada no tempo com soluções semi-analíticas, baseadas na solução de Woodings (1968) e utilizam dos princípios da sortividade do solo.

Algumas das técnicas usadas para a obtenção da solução são com o uso de multi-discos; em Thony *et al.* (1991), Vauclin e Chopart (1992) ou multi-cargas; em Ankeny *et al.* (1991) e Philip (1985,1986). (*Apud Vandervaere et al.*, 1997).

As restrições aplicadas a solução de Woodings (1968), solo homogêneo e isotrópico podem gerar resultados não realísticos, inclusive com K_{sat} negativos.

(Hussen e Warrick, 1993; Longsdon e Jaynes, 1993)(*Apud Vandervaere et al.*, 1997). Este método também foi resolvido indiretamente com estimativa de parâmetros como mostrado na seção 3.2 em Simunek & van Genuchten (1996).

3.1.3.5. Permeâmetro de Guelph

O método consiste na aplicação de uma carga, H , constante a um furo de profundidades rasas, no máximo 3 metros, através de dois tubos acrílicos concêntricos. O de maior diâmetro funciona como reservatório e o outro aplica a carga atmosférica a uma altura desejada no próprio tubo (garrafa de Mariotte) (Figura 12). Este método permite medir K_{sat} na faixa de 10^{-2} a 10^{-6} cm s^{-1} além da sortividade e o potencial mátrico (Φ_m) para todos os tipos de solo. Algumas das limitações do ensaio são citadas na seção 6.4. Reynolds e Elrick (1985^a, 1985^b) e Salverda e Dane (1993) mostraram que existe uma tendência de aumento de K_{sat} com o aumento do raio do furo (*Apud* Diniz, 1998).

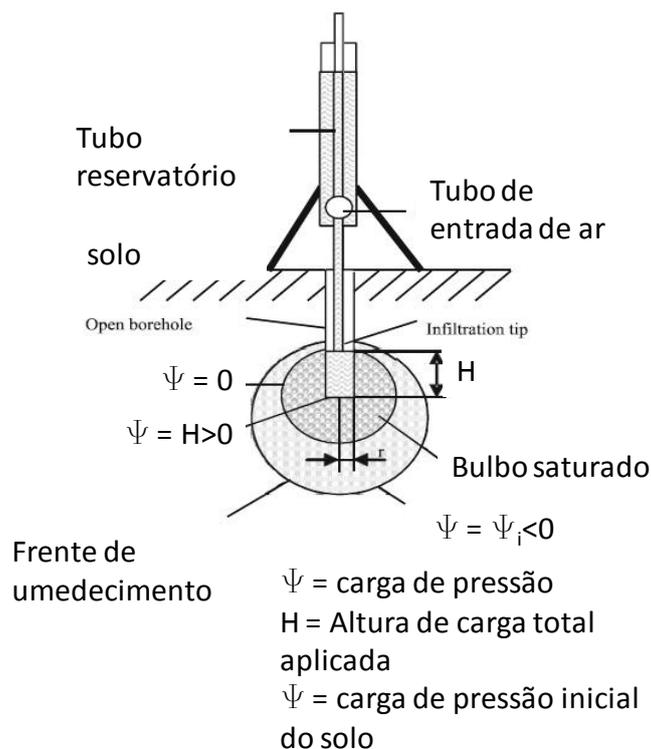


Figura 12 - Princípio do método de funcionamento do permeâmetro de Guelph - Giakoumakis & Tasakiris, 1999 (*Apud* Knödel, Lange & Voigt, 2007).

3.1.3.6. Permeâmetro de poço

Semelhante ao permeâmetro de Guelph, o método permeâmetro de poço consiste na aplicação de carga constante (ou variável) a um poço ou tubo fechado (PVC em geral), com uma abertura na ponta. Este método permite medir K_{sat} na ordem de 10^{-3} a 10^{-7} cm.s^{-1} , e tem suas variações com respeito à metodologia, teoria, e material utilizado. (Gartung e Neff, 1999 *Apud* Knödel, Lange & Voigt, 2007). Uma boa revisão das soluções analíticas¹⁷ para permeâmetros de carga constante foi feita por Elrick e Reynolds (1992) e em Diniz (1998), onde algumas destas foram comparadas.

Xiang (1994) e Xiang e Chen (1996) estabelecem algumas limitações das metodologias, como a distribuição de carga aplicada ao longo do poço.

3.2. Revisão – Ensaios inversos

A modelagem dos fenômenos naturais vem associada a diversas simplificações, e ainda assim demandam esforço do ser humano para criar condições em que eles aconteçam.

No problema direto tem-se a certeza de que ao se provocar certo efeito, sob as condições devidas, teremos uma resposta esperada, ou seja, temos uma resposta direcionada e única (observação), cuja validação pode ser dada em outras condições ou repetições e assim obter-se a variável desejada (caso o modelo usado se cumpra).

O grande problema das metodologias diretas envolve a complexidade no controle destes experimentos. No caso de ensaios de regime permanente pode-se citar as seguintes dificuldades: tempo de duração do ensaio a altas sucções, controle do volume medido (perdas), geração de sucção osmótica (água pura x água do corpo de prova), contração da amostra e possível não conectividade com o fluxo de água (secção 3.1.3.1.1). Em regime transiente as dificuldades encontradas são: determinação do ponto onde a umidade se torna constante sob a sucção aplicada (Simunek, 1999 e Wang *et al.*, 1998), dificuldade nas medidas de

¹⁷ Xiang, et al.(1997) estabelecem uma solução para solos em múltiplas camadas.

variação volumétrica pela necessidade de precisão, problemas relacionados a evaporação e a dessaturação da pedra porosa (ex: para a contabilização da umidade do sistema), erros associados a determinação do teor de umidade (contração a altas sucções). (Leong e Rahardjo, 1998).

O problema inverso vem, portanto como uma alternativa mais simples para a obtenção das variáveis desconhecidas (parâmetros da curva característica ou condutividade hidráulica), uma vez que o controle do ensaio pode ser reduzido¹⁸.

Assim, as etapas para o desenvolvimento de uma técnica deste tipo consistem na: criação de um experimento tipo e condição de funcionamento (ex: geometria, método e contorno); determinação da quantidade de observações (variável dependente), seleção de um modelo (ex: fluxo e relações constitutivas); construção e o peso para as diversas fontes da função objetivo e nas técnicas para inferir na incerteza após a calibração (algoritmos e dados produzidos). (Tabela 6 de Vrugt e Bouten, 2003)

Tabela 6 - Revisão das pesquisas em problemas inversos em propriedades hidráulicas (Adaptado de Vrugt e Bouten, 2003)

Pesquisas e aplicabilidade da solução inversa		
i	Tipo de experimento transiente e tipo da condição prescrita inicial e de contorno	Hopmans <i>et al.</i> , 1992; Van Dam <i>et al.</i> , 1992, 1994; Simunek e van Genuchten, 1996,1997; Simunek <i>et al.</i> , 1998b; Romano e Santini, 1999; Durner <i>et al.</i> , 1999; Wildenschild <i>et al.</i> , 2001
ii	Determinação da quantidade mais adequada e informativa dos dados observados	Zachmann <i>et al.</i> , 1981; Kool <i>et al.</i> , 1985; Parker <i>et al.</i> , 1985; Kool e Parker, 1988; Valiantzas e Kerkides, 1990; Toorman <i>et al.</i> , 1992; Eching e Hopmans, 1993; Eching <i>et al.</i> , 1994; Durner <i>et al.</i> , 1999; Vrugt <i>et al.</i> , 2002a)
iii	A seleção de um modelo das propriedades hidráulicas	Zachmann <i>et al.</i> , 1982; Russo, 1988; Zurmühl e Durner, 1998)
iv	Construção e peso diversas fontes e construção da função objetivo	Van Dam <i>et al.</i> , 1994; Clausnitzer e Hopmans, 1995; Hollenbeck e Jensen, 1998; Vrugt e Bouten, 2002
v	Adoção e desenvolvimento de técnicas para inferir na incerteza restante após a calibração	Kool e Parker, 1988; Hollenbeck e Jensen, 1998; Vrugt e Bouten, 2002

Zachman *et al.* (1981) realizaram numericamente o problema inverso para a estimativa de parâmetros utilizando o modelo de Brooks e Corey e concluíram que apesar de um bom ajuste para a vazão de saída acumulada as curvas de

¹⁸ Entende-se controle reduzido por necessitar somente da definição das condições de contorno e da obtenção de um número suficientes de observações

retenção e condutividade hidráulica obtidas não coincidiram com as utilizadas em uma primeira simulação direta (valores reais).

Kool *et al.* (1985) laboraram através do mesmo ensaio, vazão de saída acumulada, porém controlando a pressão no topo da coluna e concluíram que apesar dos bons ajustes nesta configuração, quando realizados ensaios em laboratório (Parker *et al.*, 1985; van Dam *et al.*, 1992, 1994; Wildenschild *et al.*, 1997; e Hollenbeck *et al.*, 1998 *Apud* Velloso, 2000), foi demonstrado que não se produziram resultados confiáveis. O resultado obtido pelos pesquisadores foi reafirmado por Toorman *et al.* (1992) e Mous (1993) que atribuíram a falta de confiança deste experimento à alta correlação entre os parâmetros e sua baixa sensibilidade, principalmente os da curva de condutividade hidráulica, na região perto da saturação (*Apud* Velloso, 2000).

Em vez da condição de contorno fixa, com um valor de carga, ensaios com diferentes cargas em multi-estágio e com suas respectivas medições de vazão acumulada, conduzidos por van Dam *et al.* (1992) e posteriormente incrementadas medições de carga de pressão dentro do corpo de prova por Eching *et al.* (1994), vieram à melhorar sensivelmente a identificabilidade da solução, se tornando o experimento padrão em laboratório.

Mais tarde, Simunek *et al.* (1996) apresentaram comparações numéricas entre a eficiência das variáveis dependentes, umidade, pressão (sucção) ou vazão. Neste estudo se concluiu que somente a grandeza de pressões (sucção) seria suficiente para boa estimativa dos parâmetros e que informações adicionais de umidade volumétrica aumentariam a qualidade da solução.

Outros estudos foram conduzidos para estabelecer a melhor função objetivo, distribuição das condições iniciais (carga ou umidade), quantidade de medidas, erro nas medidas (modelo e equipamento), tipo de solo etc (Tabela 6) (Russo *et al.*, 1991; Hopmans & Simunek, 1999 *Apud* Kumar *et al.*, 2010).

Um exemplo de outro ensaio inverso sugerido é o baseado em condições de evaporação descritas por Wendroth *et al.* (1993) (*Apud* Simunek *et al.*, 1999b). Simunek *et al.*, (1999b) obtiveram bons resultados na comparação com a solução analítica do método de Wind (1968) e verificaram pouca variabilidade nos resultados quando usados todos os tensiômetros ou apenas 1 para a função objetivo. Mais recentemente uma comparação foi feita o ensaio de vazão de saída em multi-estágio (MSO) e o método de evaporação por Schelle *et al.* (2010) e

conclui-se que os resultados foram compatíveis somente a faixa de umidade semelhante dos ensaios, sendo o último não deve ser extrapolado a condições mais úmidas que 100 cm. Uma proposta que potencializa o método foi apresentada por Shindler et al. (2010) que constitui na extrapolação das medições, seguindo o modelo constitutivo, ao valor de entrada de ar de tensiômetro de alta capacidade usado no ensaio (~800KPa).

Um dos avanços em relação à identificação e qualidade dos parâmetros veio com os algoritmos de estimação de distribuição (AED), onde Vrugt *et al.*, 2003 analisam além dos coeficientes de sensibilidade os coeficientes de variação(CV) e as funções de distribuição. Neste estudo Vrugt *et al.*, 2003 também analisaram o erro associado ao modelos constitutivos (Brooks Corey (BC), Kosugi (KS) e van Genuchten (VG)) e constata a baixa qualidade dos modelos perto da saturação (no ensaio multi-estágio de vazão de saída) além de maiores incertezas nos parâmetros relacionadas a solos mais finos. De certa forma avançando sobre o aspecto dos modelos, Bitterlich *et al.* (2004) estabeleceram, em um experimento de vazão de saída, uma forma livre de parametrização da curva característica e da curva de condutividade hidráulica que oferece grande flexibilidade em relação a qualidade da informação medida. No entanto algumas perdas devem ser levadas em conta tais como a extrapolação das curvas além da região afetada pelas medidas (ex: pela parametrização excessiva) ou a possibilidade de obtenção de parâmetros irrealis ao desacoplar curva característica da curva de condutividade hidráulica.

Em campo, talvez, a primeira aplicação da solução inversa para a obtenção dos parâmetros hidráulicos tenha sido feita por Dane e Hurska (1983) com dados do método do perfil instantâneo.

Subseqüentemente, Inoue et al (1998) analisaram um experimento de extração de água em diversas etapas e obtiveram valores não realísticos de θ_r (somente θ_s fixo) quando somente foram usados a carga de pressão e a taxa de extração cumulativa, a estimativa da curva característica melhorou significativamente quando dados de umidade foram adicionados a otimização.

Similarmente Kodesová *et al.* (1998) e Simunek *et al.* (1999a) obtiveram valores não confiáveis de θ_s (θ_r fixo), usando dados de carga de pressão e

infiltração acumulada em ensaios de permeâmetro de cone (único ensaio inverso em profundidade chegando a até 30m ou mais, em Simunek, et al (1999a)).

Outro ensaio de campo com solução inversa foi com a utilização do infiltrômetro de disco em estudos feitos Simunek *et al.* (1998b) e Venterella *et al.* (2005) baseados na infiltração acumulada onde, obtiveram, aparentemente, bons resultados para a estimativa de quatro dos sete parâmetros do modelo de vanGenuchten-Maulem (com m e l fixos), exceto para K_{sat} .

Velloso, 2000 em um ensaio infiltração com um de permeâmetro de carga constante e com medidas de sucção ao longo do tempo (Ensaio de Infiltração Monitorada, EIM) estabeleceu bons resultados para a retroanálise de três dos sete parâmetros de VG-Maulem. (θ_r , θ_s m e l fixos fixos).

Mais recentemente ensaios de média e longa duração sob condição de infiltração tem sido usados para a obtenção das propriedades hidráulicas em campo para tanto para camadas únicas, em Zou *et al.*(2001) com medidas de sucção, e como em múltiplas camadas, em Ritter *et al.* (2003) com medidas de umidade e em Wöhling *et al.* (2008) com medidas de sucção. Para regiões semi-áridas um método baseado na evapotranspiração e transpiração foi utilizado por Jhorar *et al.* (2002).