

Capítulo 11

INSTRUMENTAÇÃO DE LABORATÓRIO E CAMPO E A MEDIÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

Fernando Antônio Medeiros Marinho
Miguel Angel Alfaro Soto
Gilson de Farias Neves Gitirana Junior

1. INTRODUÇÃO

A medição de propriedades de solos não saturados exige o emprego de técnicas para medição e controle da sucção do solo, sempre com o objetivo de determinar parâmetros para análise e/ou previsão do comportamento do material. É importante compreender a diferença entre processos de medição e imposição de sucção, tipo de sucção medida e tempo de resposta de cada técnica ou sensor utilizado. Além disso, a natureza do mecanismo de interação entre sensor empregado e a água do solo possui grande influência na forma de interpretação dos resultados obtidos.

No campo, as técnicas são sempre de medição da sucção, enquanto que, em laboratório, dependendo do caso, pode-se ter a imposição (i.e., controle) ou a medição da sucção. Em problemas associados com medições de campo, busca-se monitorar, de forma passiva, a resposta do solo a um determinado evento, quer seja uma chuva ou um carregamento. Nesse caso, o tempo de resposta do sistema de medição tem um papel fundamental na escolha do método adequado. Em alguns casos, é essencial que o sensor possa captar variações em tempo muito curto, como é o caso de sistemas de alerta.

No caso da curva de retenção de água, durante sua determinação, busca-se, de forma ativa, um estado de equilíbrio, com fluxos relativamente bem previsíveis e monitorados. A sucção pode ser imposta de forma direta, controlando-se a pressão da água e/ou do ar. Pode ser medido o estado de outra fase da água, o vapor, que esteja em equilíbrio com o sistema ou utilizar alguma variável sensível à variação do teor de umidade. Em todos os casos de medição indireta, uma calibração é necessária para se inferir a sucção.

Qualquer que seja o método usado, o sistema deve entrar em equilíbrio com o sensor ou com o aparato de modo que se possa inferir a relação entre a quantidade de água no solo e o estado de tensão da água, determinando-se, assim, a curva de retenção de água.

As técnicas aqui apresentadas são, muitas vezes, utilizadas para determinação de outras propriedades de solos não saturados, como sua compressibilidade e resistência ao cisalhamento. Assim, o conhecimento das técnicas expostas ao longo do texto beneficia o entendimento de forma geral de técnicas laboratoriais para solos não saturados. De forma semelhante, várias das técnicas laboratoriais formam as bases ou, pelo menos, compartilham semelhanças com técnicas de medição do estado do solo *in situ*.

O domínio dos fundamentos apresentados no capítulo anterior é necessário para um melhor entendimento das técnicas experimentais desenvolvidas até o momento. É importante compreender a definição de sucção total e seus componentes, a sucção matricial e a sucção osmótica. Os fenômenos de capilaridade e os processos de fluxo de água, na forma líquida e de vapor, tratados em outros capítulos deste livro, também facilitam a compreensão dessas técnicas experimentais.

Salienta-se ainda que existem, na literatura e no mercado, diversos tipos de sensores que não serão descritos aqui, tais como o sensor de dissipação de calor (Phene *et al.*, 1971; Gan *et al.*, 1994; Shuai & Fredlund, 2000), o sensor psicrométrico (Fredlund & Rahardjo, 1993; Arab *et al.*, 2011), dentre outros. Todos esses sensores não mencionados fazem uso dos conceitos aqui descritos.

2. AS AMOSTRAS E SUA PREPARAÇÃO

A determinação de qualquer parâmetro de solo está relacionada diretamente com as características do solo em sua condição de trabalho. Dessa forma, as amostras utilizadas para a determinação da curva de retenção de água devem representar do ponto de vista estrutural, de nível de tensões, de teor de umidade e de grau de saturação as condições do solo no projeto de engenharia a ser estudado.

2.1 Trajetórias de sucção e tensão total líquida

Além desses aspectos, devem-se levar em conta as trajetórias de secagem e umedecimento e o nível de sucção associado a essas trajetórias. Assim, a curva de retenção obtida pela trajetória de secagem de uma amostra de solo inicialmente úmida é diferente da curva de retenção obtida pelo umedecimento de uma amostra inicialmente seca, resultando no fenômeno conhecido com histerese. A Figura 1 ilustra a diferença de trajetórias obtidas por ambos os processos. Pode ser observado que o grau de saturação na trajetória de secagem (Ponto A) é maior que o grau de saturação da trajetória de umedecimento para o mesmo valor de sucção (Ponto B).

Em geral, a diferença entre as curvas de retenção de molhagem e de secagem pode ser atribuída a diversos fatores, tais como não uniformidade geométrica dos poros, diferente conectividade espacial dos poros durante os processos de secagem ou umedecimento, variação do ângulo de contato líquido-sólido, que varia em função do tipo de trajetória e ar preso no processo de umedecimento.

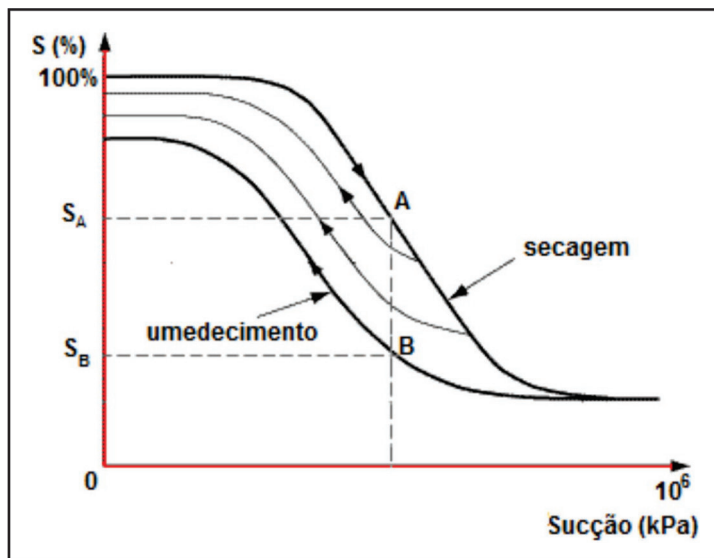


Figura 1 – Diferença entre curvas de retenção de molhagem e secagem

A determinação da curva de retenção na trajetória de secagem é mais comum por ser de mais fácil execução. Apesar dessa constatação, recomenda-se que a trajetória imposta em laboratório reproduza a trajetória de interesse para o problema em vista, aumentando a representatividade da curva assim obtida. Há consideravelmente maior quantidade de curvas de secagem encontradas na literatura quando comparadas com curvas de molhagem. Isso pode causar estranheza, já que os problemas mais comuns relacionados com solos não saturados envolvem trajetórias de molhagem. Pode-se citar, como exemplos, a análise de colapso e expansão de um perfil exposto à molhagem, a análise de estabilidade de taludes sujeitos à infiltração, dentre outros problemas.

Outra prática comum é a determinação da curva de retenção sob tensão total nula, embora exista a possibilidade de se obter a curva sob algum estado de tensão total diferente de zero (e.g., Ng & Pang, 2000). É possível ainda converter a curva obtida sob tensão total nula para uma curva de um determinado estado de tensão (e.g., Vanapalli *et al.*, 1999). Esses procedimentos não serão abordados aqui. De qualquer forma, deve-se ter em mente que a tensão de confinamento causa variações de volume total, que influenciam as propriedades de retenção do solo, como comentado no capítulo anterior. Para solos altamente compressíveis, a avaliação da influência da tensão confinante é particularmente importante.

2.2 Inicialização do estado de corpos de prova e formas de imposição de variações de umidade

Ensaio de determinação de curva de retenção exigem cuidadoso controle e monitoramento do estado do solo no início, durante e ao fim do ensaio. Por estado, entendem-se

as variáveis de estado de tensões (i.e., a sucção e a tensão total líquida) e as variáveis de estado de volume (e.g., os índices físicos).

As condições iniciais são de particular interesse, pois refletem uma condição de referência a partir da qual poderão ser determinados os índices físicos do material em momentos posteriores. Dessa forma, é fundamental que, tanto no caso de solos naturais como compactados, seja determinada a sucção inicial e seu respectivo teor de umidade e grau de saturação. No caso dos solos remoldados, isso deve ser feito caso haja a aplicação de tensão antes do início da determinação da curva de retenção.

A medição do volume total de corpos de prova durante o determinado ensaio, muitas vezes, não é realizada, apesar da sua importância. No caso de ausência de dados de volume total, torna-se impossível o cálculo do teor de umidade volumétrico ou do grau de saturação. Apenas no caso de materiais rígidos, com desprezível variação de volume, pode-se renunciar ao monitoramento das variações de volume a menos. Nessa condição, tanto o grau de saturação quanto o teor de umidade volumétrico podem ser determinados a partir do volume inicial e das variações de volume de água armazenada no solo.

Ensaio em trajetórias de secagem podem ser feitos seguindo-se dois procedimentos:

a) Para a determinação da *curva de secagem a partir da sucção nula*, após a determinação da sucção inicial, deve-se promover a saturação de forma lenta. Isso pode ser feito por meio de uma placa de sucção ou, simplesmente, permitindo-se que a amostra absorva água pela base. No caso de solos expansivos, o procedimento de saturação exige um cuidado adicional. Caso a amostra de solo expansivo possua uma sucção inicial elevada, o processo de saturação poderá gerar trincas. Nesses casos, é recomendada a utilização de vapor frio de água.

b) Para a determinação da *curva de secagem a partir da sucção inicial*, a amostra pode ser submetida ao primeiro ponto de ensaio na condição em que se encontra, e os acréscimos de sucção seguem a partir desse ponto.

Procedimentos equivalentes podem ser seguidos no caso de trajetórias de molhagem. Um procedimento adicional pode ser realizado, no qual algumas amostras são secas e outras são umedecidas a partir da sucção inicial. Nesse caso, a curva de retenção obtida é denominada curva de retenção mista.

Algumas observações se fazem necessárias. Caso não haja como controlar a perda de água durante o processo de aumento de sucção (salienta-se que o controle por meio de bureta não é acurado, principalmente, para a definição da condição inicial), recomenda-se o uso de várias amostras que são removidas para obtenção do teor de umidade a cada ponto.

Deve-se também lembrar que, no caso de solos não coesivos, a manipulação das amostras é pouco viável. Assim, a escolha da técnica de ensaio deve levar em consideração a dificuldade de manutenção da integridade de corpos de prova.

Embora a trajetória de umedecimento não exija, propriamente, uma preparação para a amostra, é importante ressaltar que o processo de umedecimento pode ser bastante agressivo para a amostra. Quando houver a intenção de se determinar a trajetória de umedecimento, a amostra deve ser, no máximo, seca ao ar antes de se iniciar o processo de

umedecimento. Solos arenosos podem perder completamente a sua coesão quando secos ao ar, mas, em geral, não sofrem qualquer problema com a absorção de água. O processo de umedecimento de solos arenosos pode ser feito das seguintes formas: por capilaridade, colocando-se a amostra em contato com uma quantidade determinada de água; ou por aspersão de água diretamente sobre a amostra.

Quando se trata de solos argilosos, a absorção por capilaridade pode levar a uma perturbação da superfície da amostra que está em contato direto com a água. Esse comportamento é mais grave em solos potencialmente expansivos. Sugere-se, nesses casos, utilizar-se vapor de água (de preferência vapor frio) para induzir uma absorção mais lenta. Salienta-se que, mesmo quando não se pretende obter a trajetória de umedecimento, em muitos casos, é necessário induzir um aumento de saturação como explicado anteriormente e, nesse caso, deve-se ter o mesmo cuidado com o processo de absorção de água, mesmo a amostra não estando seca ao ar.

3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

Serão apresentados, a seguir, os quatro métodos mais comuns para a determinação da curva de retenção: a placa de sucção, a placa de pressão, o método do papel filtro e o método do equilíbrio de vapor. Esses métodos se destacam por serem largamente adotados e exigirem equipamentos e recursos laboratoriais relativamente simples. Essas técnicas devem também ser encaradas, em certos casos, como complementares entre si, principalmente com respeito à faixa de sucções possível em cada método.

3.1 Placa de sucção

A placa de sucção, também conhecida como funil de Haines, é recomendada para impor sucções entre 0 e 70 kPa. O limite superior, no entanto, está limitado tanto por condições práticas de laboratório como pela eventual dificuldade em se manter a continuidade hidráulica do sistema. Dessa forma, recomenda-se que o seu uso seja para sucções de até 40 kPa.

A placa de sucção permite, com muita precisão, definir o trecho inicial da curva de retenção, que, em muitos casos, é de fundamental importância para a interpretação da curva de retenção. Não se pode definir previamente, sem se conhecer o tipo de material e sua estrutura, os diversos valores de sucção a serem utilizados no ensaio. Porém, solos mais argilosos tendem a possuir uma sucção de entrada de ar elevada, e isso deve ser levado em consideração na escolha dos valores de sucção a serem impostos.

3.1.1 Princípio de funcionamento da placa de sucção

Para se compreender o princípio de funcionamento da placa de sucção, a Figura 2 serve como referência. Quando não existe fluxo entre os pontos A e B, o sistema está em equilíbrio. Nesse caso, a carga hidráulica em A é igual à carga hidráulica em B. A carga total nos pontos A e B vale:

$$h_{tA} = h_{pA} + h_{aA} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$h_{tB} = h_{pB} + h_{aB} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que: h_t é a carga total; h_p é a carga piezométrica; h_a é a carga altimétrica; e os subíndices A e B se referem aos dois pontos do sistema.

Considerando-se que as cargas hidráulicas nos pontos A e B são iguais no momento de equilíbrio (i.e., ausência de fluxo) e que a carga piezométrica no ponto B é nula, pode-se determinar a carga piezométrica no ponto A como sendo função da elevação dos pontos A e B, da seguinte forma:

$$h_{pA} = -(h_{aA} - h_{aB}) = -h \quad (\text{Eq. 3})$$

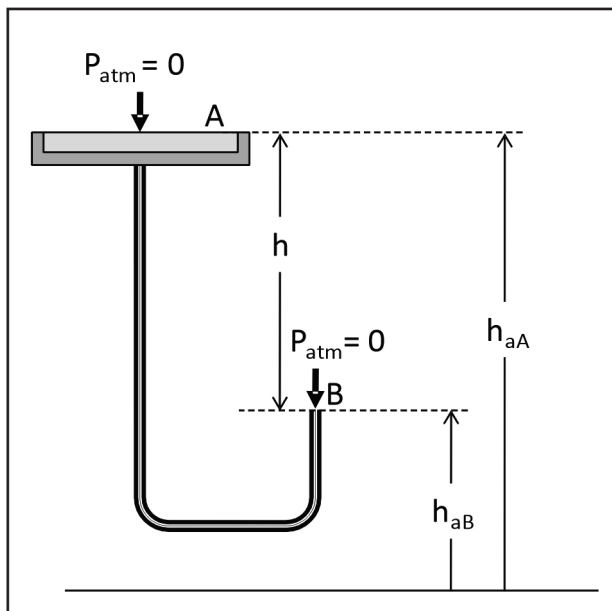


Figura 2 – Esquema da placa de sucção

Tendo-se em vista que exista continuidade hidráulica entre a água do solo colocado sobre o elemento poroso e que o elemento poroso seja capaz de sustentar a pressão negativa (relativa) imposta pela diferença de altura entre a amostra e a saída inferior do sistema, a sucção é dada por:

$$(u_a - u_w) = h\gamma_w \quad (\text{Eq. 4})$$

Considerando-se que, ao longo do próprio corpo de prova, tem-se uma distribuição constante de carga hidráulica ao fim do equilíbrio, a sucção matricial no ponto médio do corpo de prova é dada por:

$$(u_a - u_w)_m = \left(h + \frac{h_{cp}}{2} \right) \gamma_w \quad (\text{Eq. 5})$$

em que: $(u_a - u_w)_m$ é a sucção matricial média aplicada ao corpo de prova; e h_{cp} é a altura do corpo de prova.

Apesar de a altura do corpo de prova típica ser relativamente pequena, no caso de baixas sucções, impostas por pequenos desníveis h , é recomendável considerar-se a sucção no ponto médio. É importante também comentar que a forma de imposição de sucção, por meio do desnível entre os pontos A e B, impõe, ao sistema, uma limitação física. Uma sucção de 50 kPa, por exemplo, exigiria um desnível de 5 m, o que, geralmente, não é viável no espaço físico de um laboratório típico. As sucções normalmente impostas raramente ultrapassam 20 kPa, correspondendo, aproximadamente, a 2 m de desnível.

Outro comentário importante é que, de acordo com o princípio de funcionamento do sistema da placa de sucção, a precisão da sucção matricial imposta é proporcional à precisão da medição do desnível entre os pontos A e B. Se o desnível for medido com precisão de 1 mm, o que é perfeitamente viável, tem-se um sucção matricial imposta cujo valor tem uma precisão de aproximadamente 0,01 kPa.

3.1.2 O equipamento de placa de sucção

A Figura 3 ilustra a placa de sucção e seus detalhes. A placa de sucção consiste em um elemento poroso devidamente saturado, com um valor de entrada de ar compatível com a sucção máxima a ser imposta. Considerando-se o limite físico imposto pelo desnível possível entre os pontos A e B, pode-se afirmar que cerâmicas com valor de entrada de ar superiores a 20 kPa são adequadas. Não é conveniente empregar elementos porosos com valores de entrada de ar desnecessariamente elevados, pois tais elementos teriam reduzida permeabilidade, elevando o tempo necessário para saída de água drenada pelo solo e o tempo de equilíbrio do sistema.

Conforme ilustra a Figura 3, o elemento poroso é colocado sobre um compartimento totalmente preenchido por água e esse compartimento é conectado a um tubo flexível, tendo, na sua extremidade, um regulador de nível. Esse regulador mantém o nível de saída de água em uma cota qualquer, escolhida em função da sucção matricial necessária. O esquema da Figura 3 pode ser realizado com múltiplos corpos de prova do mesmo ou de diferentes materiais. Infelizmente, apenas a curva de retenção de secagem pode ser medida. A medição da umidade de equilíbrio é feita retirando-se os corpos de prova para pesagem ao fim de cada estágio de aplicação de sucção e a partir da massa de sólidos, determinada, ao fim do ensaio, pelo método da estufa. Pode-se citar, como desvantagem desse procedimento, a possibilidade de perda de solo desagregado durante a manipulação dos corpos de prova.

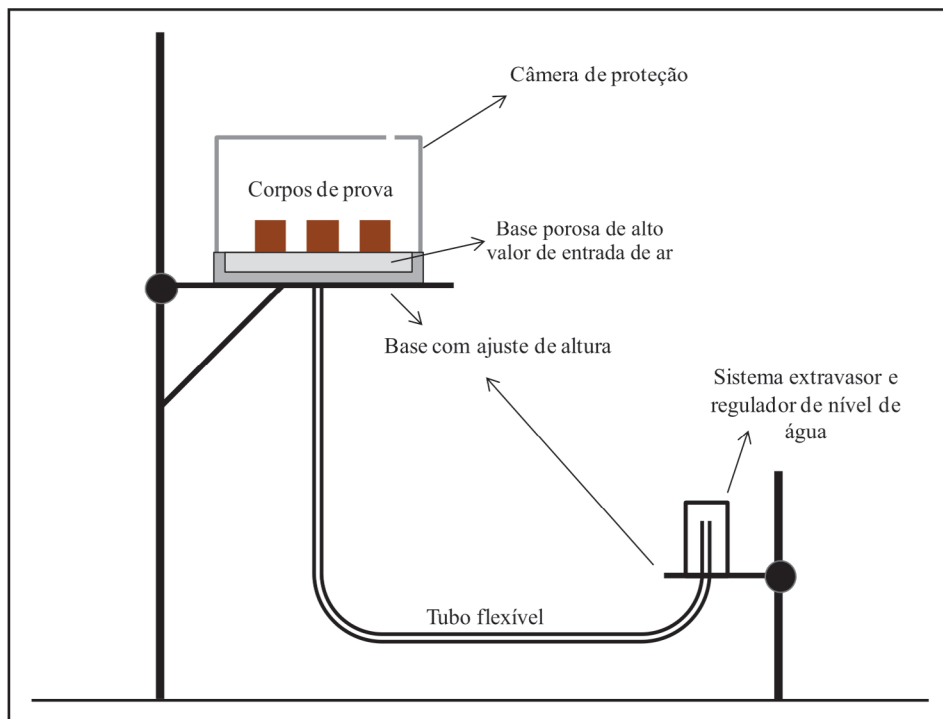


Figura 3 – Detalhe da placa de sucção

3.1.3 Procedimento de ensaio de placa de sucção

O procedimento de ensaio de placa de pressão utilizando-se o esquema da Figura 3 (sem o emprego de bureta) envolve os passos descritos a seguir:

- As amostras são coletadas em anéis cilíndricos e devem ser representativas da estrutura e textura do solo em caso de solos indeformados.
- Retirar a placa porosa do aparelho e deixá-la saturando submersa em água destilada durante 24 horas.
- Conectar a base, o tubo flexível e o frasco extravasor, que serão preenchidos com água destilada e deaerada, tomando-se cuidado para se eliminarem as bolhas de ar que, porventura, tenham surgido durante esse processo. O processo de saturação de toda a tubulação é fundamental e trabalhosa. Deve-se utilizar água quente, inicialmente fervida e mantida acima dos 30°C. Esse procedimento facilita a absorção de eventuais bolhas de ar aprisionadas nas paredes do sistema.
- Encaixar a placa já saturada na cavidade (destinada para ela) no aparelho e colocar o solo assente na placa. Saturar a amostra por capilaridade, levantando-se o nível do frasco extravasor a uma altura superior ao do solo. Finalmente, colocar a câmara de proteção para evitar evaporação, porém, certificando-se de que o solo estará sob pressão atmosférica.

- O tempo para a saturação é de, aproximadamente, 24 horas ou de até de 36 horas para solos de textura argilosa. Depois de saturado, colocar o nível superior do frasco extravasor coincidente com o nível de contato placa-solo (h_{aA}). Nesse processo, começará a sair água em excesso do frasco. Esse nível será o inicial ($h = 0$ cm).

- Para o processo de secagem, as magnitudes de pressão aplicadas dentro da câmara serão em ordem crescente. Em cada estágio, durante o ensaio, a água da amostra flui pelo frasco até que seja atingido o equilíbrio de carga hidráulica no sistema.

- A partir do momento em que não for observado mais gotejamento de água, a massa da amostra é registrada pela sua pesagem e utilizada no cálculo do teor de umidade mediante a seguinte expressão.

$$w(\%) = 100 \times \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\theta(\%) = 100 \times \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (\text{Eq. 7})$$

em que: $w(\%)$ e $\theta(\%)$ representam as umidades gravimétrica e volumétrica, respectivamente; M_{su} e M_{ss} , as massas do solo úmido para cada equilíbrio de umidade e massa do solo seco, respectivamente; ρ_d e ρ_w , as massas específicas do solo seco e da água, respectivamente.

Cabe ressaltar que a massa seca do solo (M_{ss}) é obtida no final do ensaio, colocando-se a amostra em estufa a 105°C durante 24h, após equilíbrio da última sucção desejada para esse teste.

3.2 Placa de pressão

As limitações experimentais encontradas em certos equipamentos, como a placa de sucção e tensiômetros, estão, principalmente, relacionadas à dificuldade de se controlar e/ou medir pressões negativas devido ao fenômeno denominado cavitação.

A placa de pressão é um equipamento capaz de contornar essas dificuldades, aplicando uma mudança do referencial de pressão de ar de modo a levar a pressão da água a valores acima do zero absoluto. Essa mudança de referencial chama-se translação de eixo. Essa técnica foi introduzida no meio Geotécnico por Hilf (1956).

3.2.1 Princípio de funcionamento da placa de pressão

A diferença entre a pressão do ar (u_a) e da água (u_w) nos poros do solo induz à formação dos meniscos. A técnica da translação de eixos considera que, mantendo-se a diferença entre as pressões, não há alteração do raio do menisco e, portanto, não existe variação de sucção. Em outras palavras, sendo a sucção matricial, $(u_a - u_w)$, uma variável de estado de tensão do solo, iguais valores de sucção matricial causados por diferentes combinações de valores de u_a e u_w possuem o mesmo efeito no solo, resultando no mesmo teor de umidade.

Levando-se em consideração que os componentes de pressão da sucção inicial de um solo podem ser representados por um ponto P (u_{a1} versus u_{w1}) em um eixo cartesiano, tal como ilustrado na Figura 4, a técnica de translação de eixos consiste no deslocamento do referencial de pressão (u_{a1} igual à pressão atmosférica), aumentando artificialmente a pressão do ar existente nos poros do solo. Supondo-se que o acréscimo de pressão de ar (u_{a2}) produza também uma magnitude equivalente na pressão de água (u_{w2}), a origem do sistema de coordenadas inicial (O) será transladado para uma nova origem (O'). Dessa forma, ter-se-á o ponto P de coordenadas (u_w , u_a) em relação ao sistema de referência original e coordenadas (u_{w1} , u_{a1}) em relação ao novo sistema.

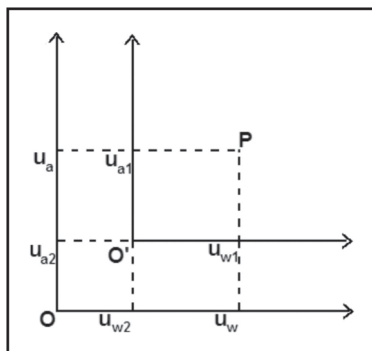


Figura 4 – Representação da translação de eixos

Relacionando-se (u_w , u_a) com (u_{w1} , u_{a1}), tem-se:

$$u_w = u_{w1} + u_{w2} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$u_a = u_{a1} + u_{a2} \quad (\text{Eq. 9})$$

Dado que u_{w2} , u_{a2} , podem-se relacionar as duas expressões acima, resultando em:

$$u_a - u_w = u_{a1} + u_{w1} \quad (\text{Eq. 10})$$

Assim, ao se elevar a pressão de ar, também será aumentada a pressão na água, permanecendo sempre a diferença ($u_a - u_w$), que representa a sucção do solo. A pressão da água nos poros poderá atingir valores admissíveis pelo equipamento sem que ocorram problemas de cavitação.

Na Geotecnia, além da curva de retenção, a técnica da translação de eixos pode ser aplicada em vários tipos de equipamentos, tais como edômetro, compressão triaxial e cisalhamento direto.

3.2.2 O equipamento de placa de pressão

O equipamento consiste em uma câmara que deve ser hermeticamente fechada e que contém, no seu interior, uma placa porosa de elevada pressão de entrada de ar. Esse sis-

tema permite o controle da sucção pelo método de translação de eixos. A Figura 5 ilustra uma das possibilidades para o equipamento de placa de pressão. A placa de pressão, quando realizada na configuração apresentada na Figura 5, é conhecida também como “panela de Richards”, em homenagem ao cientista que a introduziu, na década de 1930.

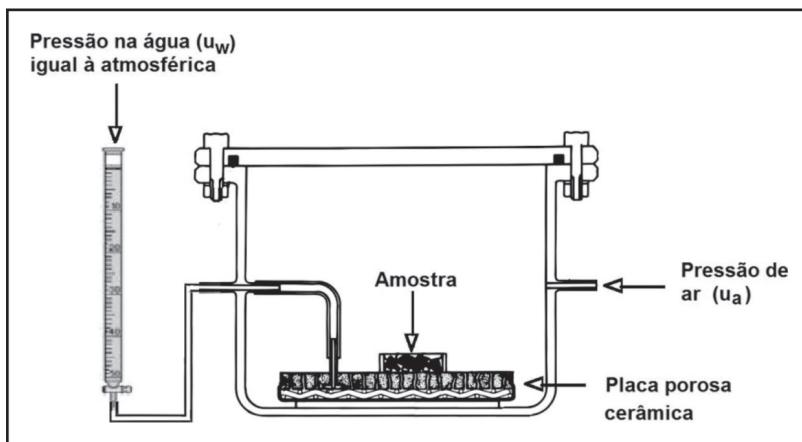


Figura 5 – Esquema do equipamento de placa de pressão

A câmara possui um duto que permite a aplicação da pressão de ar (também é possível utilizar nitrogênio) dentro da câmara. Uma vez aplicada a pressão de ar desejada, a água da amostra é expulsa através da placa porosa em direção da bureta. A magnitude da sucção equivale à pressão de ar aplicada artificialmente quando se mantém a água sob pressão atmosférica, ou seja, a sucção é a diferença entre a pressão de ar aplicada e a pressão da água na amostra.

O ar sob pressão do interior da câmara não escapa através do elemento poroso graças às suas características de retenção da água. O elemento poroso não permitirá a passagem do ar, contanto que a pressão de entrada de ar não seja atingida. Dessa forma, deve-se ter em mente o nível de sucção que se deseja aplicar ou controlar para que seja utilizado o elemento poroso adequado.

Existem materiais cerâmicos disponíveis de forma comercial e também fabricados em centros de pesquisa (e.g. Marinho *et al.*, 2006), desde valores baixos, como 100 kPa, e que podem atingir valores de entrada de ar de até 1500 kPa. Por isso, considera-se, de forma geral, que o limite prático de sucção matricial do ensaio de placa de pressão é, aproximadamente, de 1500 kPa. Existe outro fator que determina tal limite: quanto maior o valor de entrada de ar do elemento poroso, menor o tamanho dos seus poros e menor sua permeabilidade. A permeabilidade desses materiais pode se tornar tão baixa, que tempos de equilíbrio tendem a se tornar inviáveis.

Desse modo, para diminuir-se o tempo de equilíbrio, deve-se sempre empregar elementos porosos cujos valores de entrada de ar não ultrapassem a faixa de sucções desejada. Como orientação geral, indicam-se elementos de 100 kPa para areia, 300 kPa para siltes, e 500 a 1500 kPa para argilas. Argilas porosas, como solos compactados com bai-

xa energia ou certos solos tropicais, podem ter características hidráulicas semelhantes a areias, de forma que a recomendação acima não se aplica em todos os casos. Vaz *et al.* (2021) apresentam uma avaliação detalhada dos fatores que interferem no tempo de equilíbrio e oferecem um método para estimativa preliminar do tempo de equilíbrio, permitindo melhor planejamento de ensaios.

Assim como no caso da placa de sucção, o sistema da placa de pressão pode ser empregado de duas formas principais: 1) com o uso de múltiplos corpos de prova e acompanhamento de seus teores de umidade com base da periódica pesagem de corpos de prova; ou 2) com o uso de um único corpo de prova. No primeiro caso, esse procedimento é seguido em materiais com baixa coesão e que não podem ser manipulados a cada estágio de sucção. O teor de umidade é medido com a retirada de um corpo de prova por sucção aplicada. A segunda alternativa é usada para materiais coesivos, nos quais a manipulação dos corpos de prova pode ser feita sem que haja perda de material. Nesse caso, tanto o peso quanto o volume do corpo de prova devem ser determinados de modo a permitir a determinação de parâmetros relacionados com volume (i.e., grau de saturação, teor de umidade volumétrico e índice de vazios).

3.2.3 Procedimento de ensaio de placa de pressão

As amostras são, em geral, talhadas ou moldadas em anéis cilíndricos de modo a se conhecer o volume inicial do material. A placa porosa deve ser completamente saturada, bem como todo o sistema de condução de água.

Como comentado anteriormente, o processo mais comum para a determinação da curva de retenção é por secagem, sendo que, nesse caso, é necessário que a amostra seja saturada no início do ensaio. A saturação nem sempre é uma tarefa fácil, em particular, se o solo varia de volume durante a absorção de água. Caso sejam utilizados outros métodos para a obtenção da curva de retenção, a fase de saturação pode acontecer anteriormente. A saturação deve ser feita de maneira lenta para evitar mudanças drásticas nas tensões internas dos corpos de prova, que podem provocar alteração estrutural. A saturação diretamente na placa de pressão pode demorar mais do que na placa de sucção devido à menor condutividade hidráulica da placa porosa usada. Deve-se monitorar a entrada de água para a amostra de modo a avaliar a condição de equilíbrio na saturação. Após a saturação, determina-se a massa e as dimensões da amostra, retornando-se os corpos de prova para a placa porosa. O contato entre a água do solo e a água do elemento poroso é fundamental para o processo de migração de água. Quando houver dúvidas sobre o contato, deve-se utilizar uma fina camada de sílica sobre o elemento poroso de modo a melhorar o contato. Essa sugestão aplica-se também à placa de sucção.

As magnitudes de pressão aplicadas dentro da câmara são em ordem crescente no caso da trajetória de secagem. A definição dos valores de sucção a serem utilizados depende de diversos fatores. Solos mais arenosos exigem uma melhor definição para baixos valores de sucção. Outro aspecto importante na definição das sucções é a definição da entrada de ar do solo. Na maioria dos casos, recomenda-se a escolha de sucções que sejam distribuídas uniformemente na escala logarítmica, a exemplo do que se faz quando da seleção das tensões em um ensaio de adensamento. Sucções com valores aproximadamente dobrados a cada estágio produzem uma distribuição relativamente uniforme.

Em cada estágio de sucção matricial, a água da amostra flui para o reservatório até o equilíbrio ser atingido. Tendo em vista que a placa de pressão é, em geral, um sistema aberto, sempre haverá troca de água entre a amostra e o sistema (*e.g.*, Oliveira & Marinho, 2006). Para se estabelecer o momento final de um estágio de sucção, deve-se determinar a massa das amostras sucessivamente ou inferir o equilíbrio por meio das medições na bureta. A determinação do teor de umidade é feita retrocalculando-se as umidades ao final do ensaio após a amostra ser colocado na estufa, conforme descrito anteriormente.

3.3 Método do papel filtro

A técnica do papel filtro é, certamente, a mais simples e econômica de todas as técnicas para se medir sucção do solo em uma faixa de sucção de 10 a 100.000 kPa. A simplicidade, muitas vezes, leva à falta de cuidado na adoção da técnica, e isso leva a erros que são, em geral, atribuídos à técnica, quando, na realidade, são fruto de erros de operação. A qualidade dos resultados depende da aplicação rigorosa da metodologia pelo usuário.

A medição da curva de retenção (e da sucção) utilizando papel filtro não consiste em uma forma controlada de impor sucções, como era o caso dos métodos anteriores. Na verdade, o método oferece uma maneira de determinar sucções que são correspondentes às variações previamente impostas de teor de umidade. Apesar dessa importante diferença metodológica, o método do papel filtro oferece uma forma igualmente válida para a obtenção de curvas de retenção.

3.3.1 Princípio do método do papel filtro

A técnica consiste na utilização de papéis filtro (do tipo quantitativos) como instrumentos de medida para a quantificação indireta da sucção matricial e/ou total do solo.

Quando um solo é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, esta passará do solo para o papel até que o equilíbrio seja alcançado. A sucção matricial é medida quando o fluxo ocorre por capilaridade com contato direto através das partículas do solo e o papel, pois apenas tensões capilares são vencidas nesse processo. Por outro lado, a sucção total é medida se o fluxo ocorre em forma de vapor sem contato entre o solo e o material poroso, já que são vencidas as forças osmóticas e capilares que retêm a molécula de água. A Figura 6 ilustra um esquema dos arranjos utilizados para medição da sucção matricial e total.

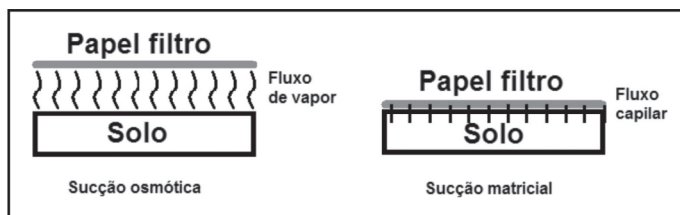


Figura 6 – Tipos de fluxo da água da técnica do papel filtro:
a) sem contato; e b) com contato

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. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da sucção correta. Sempre deve ser utilizado papel filtro “quantitativo”. O papel filtro mais usado é o Whatman N° 42.

Os papéis devem ser usados diretamente da caixa, que deve ser mantida em local protegido de umidade (no estado seco ao ar) (*e.g.*, Fawcett & Collis-George, 1967; McQueen & Miller, 1968; Chandler & Gutierrez, 1986; Marinho & Oliveira, 2006). Já a norma americana ASTM-D5298-92 sugere que o papel filtro seja seco em estufa por, no mínimo, 16 horas antes do uso. Apesar do procedimento de secagem ser citado em norma, não há consenso no meio técnico-científico, já que esse procedimento pode afetar as características de absorção do papel, resultando na alteração da curva de calibração.

3.3.2 Materiais empregados para execução da técnica de papel filtro

Os seguintes materiais são empregados na determinação da curva de retenção pela técnica do papel filtro:

- papel filtro Whatman N° 42 ou qualquer papel filtro quantitativo devidamente calibrado;
- filme de PVC e alumínio;
- tela de *nylon* de 1 a 5 mm de abertura,
- pinças, tesoura, luvas de látex, fita adesiva plástica;
- sacos herméticos auto selantes;
- caixa térmica;
- balança analítica de 0,0001g de precisão com câmara de pesagem;
- estufa.

3.3.3 Procedimento de ensaio com papel filtro

Para a medição da sucção matricial, o papel filtro deve ser colocado diretamente sobre a superfície da amostra, com o objetivo de entrar em contato com a água dos poros. Nesse caso, não haverá eventuais diferenças entre a característica da água transferida ao papel e a água do solo, sendo o fluxo apenas devido a fenômenos capilares. Caso seja necessário, pode-se utilizar um papel intermediário entre o solo e o papel de medição para evitar que solo fique aderido ao papel utilizado na medição da sucção.

Para a medição da sucção total, o papel deve ser colocado com um espaçador que garanta a troca de umidade apenas por vapor, sem permitir o contato da água do solo com o papel. Nesse caso, a água que migrará para o papel terá características diferentes da água do solo já que os eventuais sais não são transferidos para o papel por vapor. O espaçador deve ser de material não absorvente, que permita a livre passagem do vapor e que não possa sofrer oxidação. Recomenda-se um espaçador de, no máximo, 4 mm de altura, de forma a minimizar o tempo de equilíbrio.

Em todos os casos, o tamanho do papel deve ser o maior possível de modo a maximizar a precisão das medições de umidade do papel. Após a colocação do papel o solo, os conjuntos solo-papel filtro devem ser embrulhados em filme de PVC, seguidos de filme de alumínio, de modo a se evitar perda ou ganho de umidade para o meio externo. O conjunto deve ser protegido com um filme plástico que deve manter o papel firme contra o solo, no caso da medição de sucção matricial, e segurando-se o papel contra a tela, no caso de medição de sucção total.

É possível se fazer a medição da sucção matricial e total na mesma amostra, podendo-se inclusive utilizar as laterais do corpo de prova, caso haja espaço suficiente. Salienta-se que o tempo de equilíbrio deve ser controlado pela sucção total, como se verá adiante.

No momento da remoção do papel filtro, o processo deve ser o mais rápido possível e as camadas de filme plástico e de alumínio não podem criar obstáculos à remoção rápida do papel. Os papéis devem ser removidos com uso de pinça. As amostras devem ser deixadas em repouso numa caixa de isopor e em ambiente com temperatura constante ($\pm 1^\circ\text{C}$).

O tempo de equilíbrio para as medições de sucção matricial é de sete dias, independentemente do nível de sucção a ser medido. Contudo, no caso de medições de sucção total, o tempo de equilíbrio varia com o nível de sucção. Sugerem-se os tempos indicados na Tabela 1 para o equilíbrio do sistema.

Tabela 1 – Tempos de equilíbrio para sucção total (Marinho, 1994)

Sucção Total (kPa)	Tempo de equilíbrio (dias)
0 - 100	Mais de 30
100 - 250	30
250 - 1000	15
1000 - 3000	7

Após o tempo de equilíbrio, os papéis são retirados com auxílio de uma pinça para determinação do teor de umidade do papel. A retirada do papel exige extremo cuidado. O papel deve ser transferido para um saco plástico autosselante em menos de 4 segundos. A massa do papel, após a sua retirada do sistema, é feita utilizando-se uma balança com resolução de 0,0001g. Após a determinação da massa, o papel é colocado na estufa para secagem (tempo mínimo de 2 horas a 105°C). A retirada do papel da estufa também deve ser rápida e com o uso de pinça, e o papel deve ser acondicionado em saco plástico hermético, com a sua respectiva tara previamente determinada. Esse procedimento é particularmente importante. Pequenos erros de determinação de massa pela balança são cancelados quando a determinação da massa do papel é feita a partir da subtração da massa do saco plástico hermético da massa do conjunto papel filtro mais seu contêiner. No caso da balança de alta precisão empregada, pequenos erros causados por variações térmicas ou mesmo por desnível imperceptível da balança podem ser facilmente eliminados por esse procedimento.

Com a determinação do teor de umidade do papel, utiliza-se a equação de calibração para se obter a sucção. Com o uso do papel filtro qualitativo Whatman 42, sugere-se a aplicação das equações a seguir (Chandler *et al.*, 1992):

Para $W_{\text{papel}} \leq 47\%$,

$$\text{Sucção(kPa)} = 10^{4,84 - 0,0622w(\%)} \quad (\text{Eq. 11})$$

Para $W_{\text{papel}} > 47\%$,

$$\text{Sucção(kPa)} = 10^{6,05 - 2,48 \log(w(\%))} \quad (\text{Eq. 12})$$

Deve-se ressaltar que, no caso de um laboratório de pesquisa com experiência na execução de ensaios de papel filtro, recomenda-se sempre a determinação da curva de calibração, sendo tal curva medida especificamente para o lote utilizado e considerando-se as condições e os procedimentos particulares do laboratório.

As amostras devem ser pesadas e medidas (determinação da variação de volume) após a retirada do papel. Em seguida, as amostras são submetidas à variação de umidade por secagem ou por umedecimento, dependendo da trajetória seguida. Para o caso de umedecimento, deve-se esperar 24h com a amostra envolta em filme plástico e de alumínio antes de se colocar novamente os papéis filtro. O valor da sucção medida será associado ao teor de umidade nessa condição, que é calculado quando a amostra é levada à estufa no final do processo.

Após a alteração da umidade, coloca-se, novamente, o papel filtro na amostra (sucção total e/ou matricial) e procede-se como descrito anteriormente. A determinação do final do processo do uso do papel depende do uso que será dado à curva de retenção. Sugere-se, no entanto, que a amostra seja deixada secar ao ar por alguns dias, medindo-se a umidade relativa do ar. Esse procedimento permite a determinação de um ponto da curva de retenção com uma sucção elevada que ajuda na definição final da curva, colaborando para a determinação do grau de saturação residual. A determinação da sucção com base na umidade relativa é feita utilizando-se a expressão apresentada no item a seguir.

3.4 Método por equilíbrio de vapor

O método do equilíbrio de vapor é baseado em uma forma de imposição de sucção total, sendo possível a aplicação de valores de sucção relativamente elevados, conforme será visto a seguir.

3.4.1 Princípio do método por equilíbrio de vapor

O método consiste em determinar a sucção total por meio da umidade relativa do ar (UR). A umidade relativa do ar é a relação entre a pressão parcial de vapor do ar (p_v) e a pressão parcial de saturação de vapor do ar (p_{v0}):

$$UR = \frac{p_v}{p_{v0}} \quad (\text{Eq. 13})$$

A pressão parcial de saturação corresponde à máxima pressão parcial possível, de forma que ofertas adicionais de umidade ao ar não se transformariam em vapor, havendo condensação. O valor de p_{v0} depende da temperatura, podendo ser determinado pela seguinte expressão, resultado do ajuste de um polinômio aos dados publicados por Kaye e Laby (1995):

$$P_{v0} = 2,200 \times 10^{-9} T^5 + 3,385 \times 10^{-7} T^4 + 1,741 \times 10^{-5} T^3 + 1,723 \times 10^{-3} T^2 + 4,144 \times 10^{-2} T + 0,618 \quad (\text{Eq. 14})$$

em que: T é a temperatura, em graus Celcius. A uma temperatura de 20°C, por exemplo, a pressão parcial de saturação de vapor é igual a 2,3384 kPa.

A relação entre a umidade relativa do ar e a sucção total é dada pela expressão:

$$\psi = -\frac{\gamma_w RT}{Mg} \ln(\text{UR}) \quad (\text{Eq. 15})$$

em que: ψ representa a sucção total, em kPa; γ_w é o peso específico da água em kN/m³; R é a constante universal dos gases perfeitos (8,3143 J mol⁻¹ K⁻¹); T é a temperatura, em K; M é a massa molecular da água (0,018016 kg mol⁻¹); e g é a aceleração gravitacional (9,807 m s⁻²).

Considerando-se a determinação da sucção em um ambiente a 20°C, a seguinte expressão é obtida:

$$\Psi = -135.055 \ln(\text{UR}) \quad (\text{Eq. 1})$$

O método de imposição de sucção pode ser utilizado sempre que se for capaz de induzir uma umidade relativa em um ambiente e a amostra de solo esteja em equilíbrio com ele. O uso de soluções saturadas é a forma mais fácil de se impor uma umidade relativa. A Tabela 2 apresenta as substâncias e a respectiva umidade relativa obtidas com soluções saturadas para três temperaturas. Outra alternativa é o emprego de ácidos.

Para a acomodação de amostras com a solução salina, qualquer tipo de recipiente pode ser utilizado, desde que seja hermético, mantenha pressão atmosférica e esteja em local sem variação significativa de temperatura. A Figura 7 ilustra um arranjo possível utilizado para o ensaio. As amostras de solos podem ser colocadas em um dessecador contendo a solução aquosa selecionada. De acordo com as propriedades físico-químicas desse composto, uma determinada umidade relativa é imposta dentro do dessecador. Mudanças de teor de umidade ocorrem por transferências de vapor entre a solução e a amostra, e uma determinada sucção é aplicada na amostra quando o equilíbrio de vapor é atingido. A sucção resultante corresponde à sucção total (matricial e osmótica), pois a água é transferida isenta de solutos. É possível a utilização de soluções diluídas para se obter, com o mesmo composto, umidades relativas diferentes.

Tabela 2 – Valores de umidade relativa de equilíbrio para algumas soluções salinas saturadas (Modificado de ASTM E104 - 02, 2012)

Composto	Fórmula	°C		
		20	25	30
Cloreto de lítio	$\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$	$11,3 \pm 0,3$	$11,3 \pm 0,3$	$11,3 \pm 0,2$
Acetato de potásio	$\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	$23,1 \pm 0,3$	$22,5 \pm 0,3$	$21,6 \pm 0,5$
Cloreto de magnésio	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$33,1 \pm 0,2$	$32,8 \pm 0,2$	$32,4 \pm 0,1$
Carbonato de potásio	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$43,2 \pm 0,3$	$43,2 \pm 0,4$	$43,2 \pm 0,5$
Nitrato de magnésio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$54,4 \pm 0,2$	$52,9 \pm 0,2$	$51,4 \pm 0,2$
Cloreto de sódio	NaCl	$75,5 \pm 0,1$	$75,3 \pm 0,1$	$75,1 \pm 0,1$
Cloreto de potásio	KCl	$85,1 \pm 0,3$	$84,3 \pm 0,3$	$83,6 \pm 0,3$
Cloreto de bário	$\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	91 ± 2	90 ± 2	89 ± 2
Nitrato de potásio	KNO_3	$94,6 \pm 0,7$	$93,6 \pm 0,6$	$92,3 \pm 0,6$
Sulfato de potásio	K_2SO_4	$97,6 \pm 0,5$	$97,3 \pm 0,5$	$97,0 \pm 0,4$

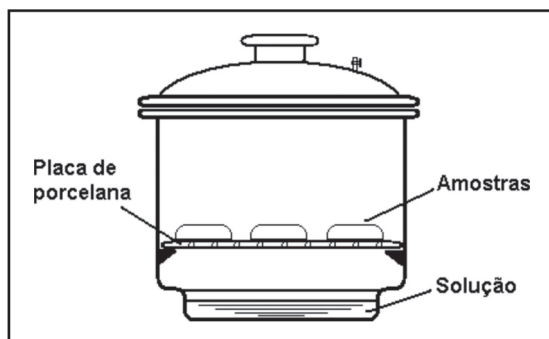


Figura 7 – Arranjo utilizado para o método de equilíbrio de vapor

Essa técnica, além de ser utilizada como medida padrão de referência e como calibração de outros equipamentos, pode ser empregada na determinação de pontos da curva de retenção de água no solo, com a vantagem de impor sucção sob condições naturais, não sendo aplicada pressão nenhuma na fase gasosa, como no ensaio de placa de pressão. No entanto, devido à transferência de umidade ser pela fase gasosa, é necessário maior tempo para estabelecer equilíbrio termodinâmico, sendo cada vez maior quando a umidade relativa a ser imposta dentro do dessecador se aproxima a 100%. Os mesmos tempos de equilíbrio sugeridos para o papel filtro podem ser utilizados nessa técnica. Salienta-se que o tamanho e a quantidade de amostras pode afetar o tempo de equilíbrio.

Visto que, no interior do dessecador, a temperatura influencia na movimentação das moléculas de água e, conseqüentemente, na magnitude da pressão de vapor, é necessário que, para o equilíbrio termodinâmico, exista uma temperatura constante. Por essa razão, recomenda-se que o ensaio seja conduzido num ambiente climatizado com faixa de varia-

ção de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ para, assim, obterem-se umidades reativas com variações de, aproximadamente, $\pm 0,5\%$ (ASTM E104-85). Mesmo que não se tenha um sistema automatizado de controle de temperatura, a colocação do sistema em caixa de isopor com uma parede de, aproximadamente, 10 cm impede variações de temperatura maiores que $0,5^{\circ}\text{C}$, que, para os fins de determinação de curva de retenção, considera-se adequado.

3.4.2 Materiais necessários pelo método do equilíbrio de vapor

Os ensaios exigem os seguintes materiais:

- Dessecador ou outro recipiente hermético, de material resistente à corrosão e não higroscópicos.
- Solução salina saturada, preparadas previamente a partir de reagentes, e água pura decorrente de destilação (osmose reversa ou similar).
- Balança com resolução de 0,001g para pesagem das amostras de solo ou preparação de soluções com ácido sulfúrico.
- Estufa com termostato regulador que permite manter a temperatura entre 105 e 110°C .

3.4.3 Procedimento de ensaio utilizando a técnica de equilíbrio de vapor

Preparação da solução saturada aquosa

Para a solução aquosa, podem ser utilizados diferentes produtos, como ácido sulfúrico ou sais (cloretos). Por facilidade de manipulação e segurança, geralmente, são preferidas as soluções salinas saturadas. No entanto, deve-se considerar que sempre será necessário tomar cuidados ao se manusear tanto sais como ácidos, sendo recomendável a manipulação desses produtos em capelas e com máscaras de proteção. Também se deve levar em conta que esses produtos poderão ser perigosos e que seu descarte deve ocorrer em locais apropriados a esse fim.

Recomendações para a preparação de soluções salinas

A escolha do tipo de solução é função da sucção desejada (Tabela 2). O cálculo da sucção a partir da umidade relativa imposta no dessecador é dado pela Equação 16. Deve-se adicionar água destilada ao sal em incrementos de 2 ml até que o sal não apresente mais capacidade de absorção. Uma vez preparada a solução, deverá ser colocada uma camada de 4 cm de espessura no fundo do dessecador – isso para sais que produzam valores mais elevados de umidade relativa. Caso contrário, será necessária apenas uma camada de 1,5 cm. Logo, tampar o dessecador e esperar a equalização da temperatura por, pelo menos, uma hora antes da utilização. Outros recipientes inertes podem ser utilizados, criando-se um volume menor de ar no seu interior.

Preparação do corpo de prova

A preparação das amostras é similar à dos outros métodos já abordados, porém, deve ser levado em consideração que o emprego de corpos de prova grandes e em maior número no mesmo sistema poderá aumentar consideravelmente o tempo de equilíbrio de vapores.

É desejável que as mesmas amostras sejam reutilizadas para cada estágio de sucção (em todos os métodos), porém, devido ao elevado tempo de equilíbrio que determinados tipos de solos e soluções induzem, outras amostras poderão ser ensaiadas em outros dessecadores ao mesmo tempo. Deve-se, no entanto, garantir a homogeneidade e representatividade das amostras em todos os casos. Esse aspecto se aplica para as demais técnicas de determinação da curva de retenção de água, em particular, no caso de areias e materiais sem coesão.

Cuidados deverão ser tomados com a manipulação para a colocação das amostras dentro do dessecador. Amostras saturadas (como as do início da curva pelo processo de secagem) podem drenar o excesso de água, contaminando a solução, ou amostras muito secas (como as do início da curva pelo processo de umedecimento) podem se desagregar e também contaminar a solução ou falsear os resultados devido à sua falta de integridade.

Colocadas as amostras, o dessecador deve ser tampado hermeticamente. A variação de umidade será controlada por pesagem sucessiva até a constância de peso. A periodicidade da pesagem será estabelecida pelo operador, levando-se em consideração que períodos muito curtos poderão atrapalhar a transferência de água em forma de vapor entre duas leituras consecutivas.

Alcançado o equilíbrio de umidade em cada estágio de sucção, o teor de umidade de equilíbrio será calculado de forma similar ao item 3.1.3.

3.5 Outros métodos

Apesar de os quatro métodos de determinação da curva de retenção aqui apresentados serem os mais difundidos no meio técnico e científico, existem outras formas de determinação de curvas de retenção, que não serão tratadas aqui, mas que merecem citação. Romero (2001) apresenta uma revisão das diversas técnicas de aplicação de sucção por fluxo líquido e de vapor, fazendo referência a algumas técnicas não tratadas aqui.

Fluxo osmótico

O método consiste na aplicação de sucção matricial por meio do fluxo osmótico a partir de uma solução de polietileno glicol (PEG) com potencial conhecido (tipicamente PEG 20000 ou 30000) através de uma membrana semipermeável de celulose. Esse método possui semelhanças com método da placa de pressão, diferenciando-se apenas na forma de imposição da sucção.

Potenciômetro de ponto de orvalho

Esse método consiste no emprego de potenciômetros de ponto de orvalho (Campbell *et al.*, 1973) para a determinação da sucção total do solo. O método se diferencia do emprego de psicrômetros à medida que potenciômetros de ponto de orvalho não sofrem das severas limitações decorrentes da exigência de controle de temperatura durante o emprego de psicrômetros. A aplicação prática desse método assemelha-se, do ponto de vista de execução, ao método do papel filtro (sem contato), diferenciando-se apenas na forma de determinação da sucção.

Ensaio de coluna

Trata-se de um ensaio com características muito distintas de todos os demais aqui apresentados. Esse método consiste na imposição de molhagem ou secagem através de uma coluna unidimensional instrumentada com sensores de umidade e sucção. Ensaios de coluna permitem a obtenção de grandes volumes de dados a partir dos quais se determina tanto a curva de retenção quanto a função de condutividade hidráulica. Infelizmente, a preparação e a execução do ensaio são consideravelmente mais dispendiosas do que as demais técnicas. Aparatos construídos com diferentes configurações podem ser encontrados na literatura, podendo-se citar, como exemplo, aquele apresentado por Yang *et al.* (2004).

4. INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO PARA MEDIÇÃO DE SUCÇÃO

Além de ser necessária para estudo de materiais em laboratório, a medição de sucção precisa ser realizada em campo de forma a viabilizar o monitoramento de maciços não saturados. Pode-se citar, como exemplos comuns de aplicações que envolvem o monitoramento de sucção em campo, a instrumentação de encostas para gerenciamento de riscos de escorregamentos e a instrumentação de barreiras de resíduos sólidos para a avaliação do seu desempenho.

Existe um considerável número de instrumentos desenvolvidos para a medição de sucção no campo, sendo que a maioria destes mede a sucção matricial, considerada como a parcela da sucção total de maior interesse do ponto de vista de comportamento do solo. É importante levar em conta que instrumentos projetados para a aplicação em agronomia (Mota *et al.*, 2021) podem não atender às faixas de sucção necessárias em estudos geotécnicos. Serão apresentados, a seguir, dois tipos de instrumentos, que podem ser considerados os mais utilizados no meio técnico. Fredlund *et al.* (2012) apresentam um revisão extensa desses e de outros instrumentos, sendo recomendada como leitura complementar.

4.1 Tensiômetros

O tensiômetro permite a medição direta da poropressão negativa da água do solo, a partir da qual tem-se o valor da sucção matricial. A componente osmótica da sucção não é medida pelos tensiômetros, já que ocorre passagem dos sais solúveis através do sistema de medição.

Os principais componentes de um tensiômetro são ilustrados na Figura 8. A ponteira porosa do tensiômetro é responsável por promover a interface entre a água do dispositivo e o solo sem permitir a entrada de bolhas de ar no sistema. Para desempenhar tal função, emprega-se, geralmente, um material cerâmico com alto valor de entrada de ar. O tensiômetro possui um compartimento interno que deve ser completamente preenchido por água e acoplado a um dispositivo para medição da pressão da água. É importante ressaltar que tensiômetros podem ser miniaturizados e adaptados de diversas maneiras, permitindo também o seu emprego em instrumentação de laboratório.

O dispositivo de medição da pressão gerada no interior do pode ser de três tipos: manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo e transdutor elétrico de pressão. A vantagem do manômetro de mercúrio é que não existe necessidade de calibração, porém, a correção da densidade deve ser feita evitando-se erros de até 0,25% na leitura (Marinho *et al.*, 2008). Os manômetros de vácuo podem medir tensões de 0 a 100 kPa, sendo de fácil manutenção, porém, apresentando baixa acurácia. Os transdutores elétricos de pressão, diferentemente dos dois tipos de dispositivos citados, permitem uma aquisição de dados automática. O princípio do seu funcionamento está no deslocamento de uma membrana e de resistores colados a ela, induzindo, assim, uma variação de resistência do sistema e, consequentemente, uma variação de tensão. Transdutores podem ter elevada acurácia e precisão quando bem calibrados, além de requerem pouco fluxo de água para entrarem em equilíbrio com o solo, possibilitando um menor tempo de equilíbrio.

Tensiômetros de diferentes dimensões e geometrias podem ser encontrados no meio acadêmico e no mercado, sendo possível sua aplicação tanto no campo quanto na instrumentação de ensaios de laboratório (*e.g.* Marinho *et al.*, 2009). Apesar de poder ser empregado no laboratório, o tensiômetro é mais conhecido pela sua aplicação no monitoramento *in situ*.

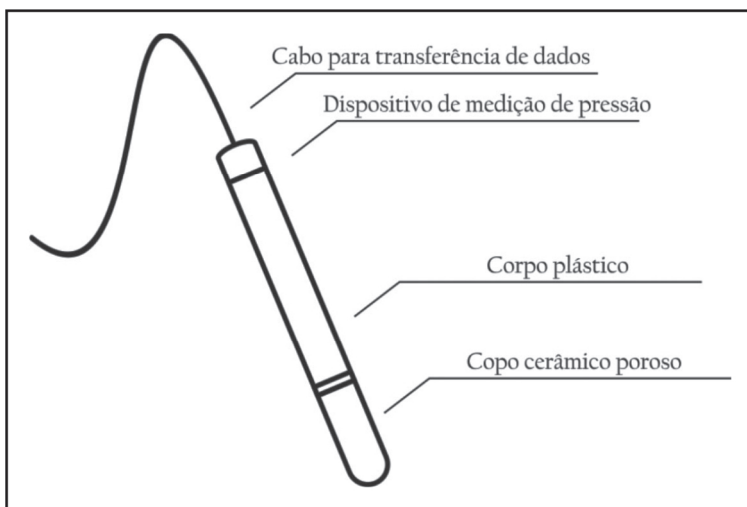


Figura 8 – Tensiômetro e seus componentes (Silva Jr., 2010)

Com a ponta cerâmica do tensiômetro colocada em contato com o solo, a água do tensiômetro será tensionada pela água do solo, sendo que, após o equilíbrio de carga hidráulica, tem-se uma leitura no dispositivo de medição de pressão correspondente à poropressão da água no solo. Quando a pressão de ar for maior do que a pressão atmosférica, a leitura do tensiômetro deve ser somada com a pressão de ar no solo para se obter a sucção matricial. A leitura deve ser também ajustada em função da elevação do elemento de medição de pressão em relação à elevação da ponteira cerâmica. Por exemplo, um tensiômetro com corpo relativamente longo, colocado na posição vertical, estando o dis-

positivo de medição de pressão 50 cm acima da ponteira cerâmica, deverá ter sua leitura descontada de 4,9 kPa. Assim, se a leitura do tensiômetro for de, por exemplo, 50 kPa, a leitura corrigida é de 45,1 kPa.

A grande limitação do tensiômetro convencional é sua capacidade de medição, que, em geral, vai somente de 0 a 90 kPa (Stannard, 1992), podendo ser até inferior caso o tensiômetro não seja saturado de forma apropriada. A máxima pressão negativa é imposta pelo fenômeno de cavitação, que permite a expansão de microbolhas de ar no sistema, quando a água passa repentinamente da fase líquida para a fase gás devido à queda de pressão. A pressão sob a qual a cavitação ocorre pode ser estendida, tomando-se vários cuidados com respeito à água utilizada no tensiômetro, tais como utilizar água deionada por processos como vácuo, vácuo sob agitação e fervura ou utilizar a aplicação de vácuo no tensiômetro preenchido de água, de forma a remover a maior quantidade de ar possível aprisionado nas microcavidades. Tarantino (2004) apresenta recomendações a respeito do procedimento de saturação de tensiômetros.

4.1.1 Tensiômetro de alta capacidade

Tensiômetros de alta capacidade permitem a medição de poropressões negativas muito além daquelas medidas pelos instrumentos convencionais. Para tal, foram desenvolvidas técnicas de preparação da água utilizada e mudanças na geometria do compartimento de armazenamento de água (forma e redução de volume), que previnem o processo de nucleação heterogênea, que desencadeia a cavitação (Marinho *et al.*, 2009).

O tensiômetro de alta capacidade de Ridley e Burland (1993) pode ser citado como um instrumento pioneiro. A esse, seguiram-se outros projetos de tensiômetros, como o de Ridley e Burland (1995), que propuseram modificações, como a eliminação de materiais que favoreçam a nucleação, tais como *O-rings* e elastômeros. Como ilustrado na Figura 9(a), o corpo do tensiômetro é formado por duas seções de aço inoxidável e, na seção superior, por um diafragma plano e um medidor de tensão. A cerâmica utilizada possui valor de entrada de ar de 1500 kPa e é colada na seção superior e posicionada para permitir uma abertura de 0,1 mm entre o filtro e o diafragma. Além disso, um procedimento diferente foi adotado para a saturação do tensiômetro, com o emprego de vácuo e posterior pressurização por meio da aplicação de 4000 kPa de pressão positiva por um período mínimo de 24 horas.

O tensiômetro desenvolvido pela Universidade de Saskatchewan (Guan & Fredlund, 1997) é similar ao primeiro modelo desenvolvido pelo Imperial College. Seu modelo é ilustrado Figura 9(b), consistindo em um transdutor envolvido por um receptáculo produzido em aço inoxidável. O dispositivo emprega uma cerâmica de alto valor de entrada de ar, de 1500 kPa. Foi utilizada pressurização, com seis ciclos de pressão positiva de 12.000 kPa por 1 hora, seguida de pressão negativa de 85 kPa por 1 hora. Esse tensiômetro possibilitou medidas de sucção de até 1250 kPa e períodos de medições de até três dias.

Tensiômetros de alta capacidade foram desenvolvidos também no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (Toker *et al.*, 2003) e pela Universidade de Trento (Tarantino e Mongiovi, 2003), todos introduzindo melhorias incrementais em relação aos modelos anteriores.

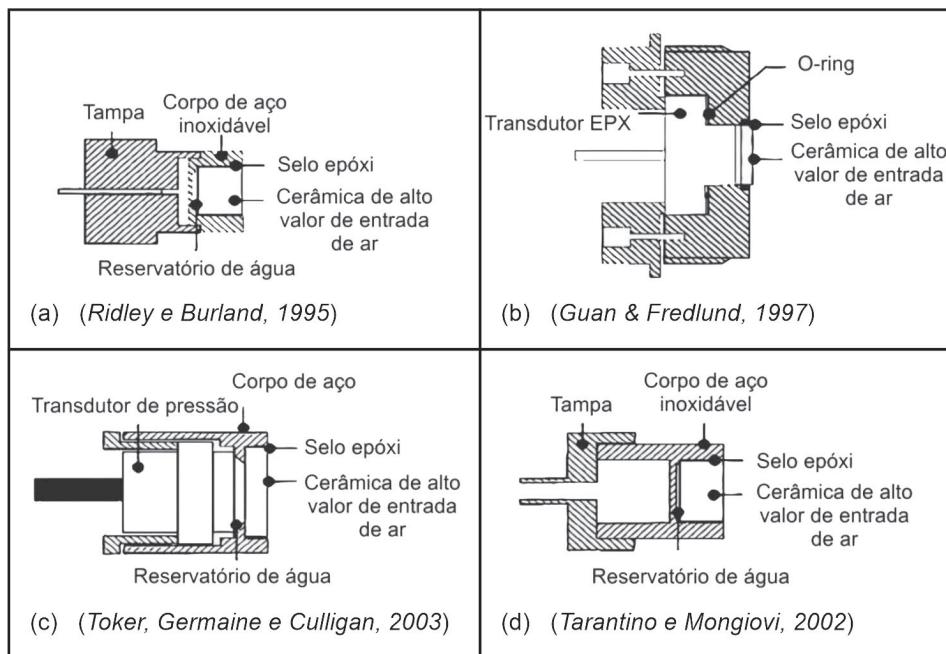


Figura 9 – Diferentes modelos de tensiômetros (modificado de Marinho *et al.*, 2008)

Apesar dos recentes desenvolvimentos tecnológicos pelos quais os tensiômetros de alta capacidade passaram, seu emprego no campo continua relativamente limitado, com sua aplicação mais comum sendo em instrumentação de ensaios de laboratório. Os tensiômetros convencionais preenchem uma importante lacuna, permitindo a medição de sucção matricial com relativa facilidade, alta acurácia e precisão. Apesar do seu limite de sucção aparentemente baixo, grande parte dos problemas geotécnicos de interesse está incluído dentro da sua faixa de sucção de trabalho.

4.2 Sensor de matriz granular (GMS)

O sensor denominado GMS mede a resistividade do solo. O sensor consiste em eletrodos que ficam dentro de um material granular inerte (quartzo), que é envolvido por uma membrana e uma malha de aço, em alguns casos, possuindo uma camada de gesso. O princípio de funcionamento é similar ao do bloco de gesso (Bouyoucos, 1965). Em geral, o sensor já vem com uma curva de calibração, porém, deve-se promover uma verificação dessa curva antes do seu uso (*e.g.*, Irmak & Haman, 2001). A condutividade elétrica varia em função do teor de umidade da matriz granular. A partir do equilíbrio entre os valores de sucção matricial do sensor e do solo que o envolve, pode-se obter a sucção do solo por meio de uma curva de calibração. O sensor GMS possui uma forma cilíndrica envolvida com uma tela de aço sobre uma manta sintética que possibilita o contato com o solo. A Figura 10 ilustra o sensor e o sistema de aquisição de dados.

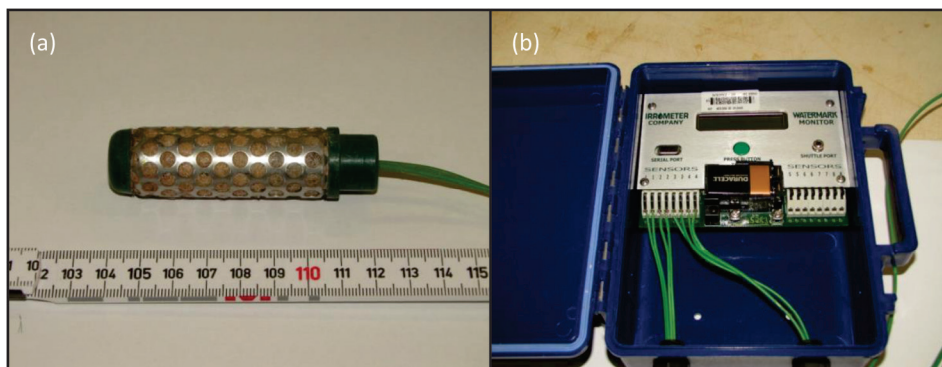


Figura 10 – Sensor GMS: a) corpo do sensor; e b) sistema de aquisição de dados

O GMS foi desenvolvido para uso na agricultura, mas algumas de suas características o levaram a ser utilizado em algumas aplicações na engenharia geotécnica (*e.g.*, Mendes, 2008). Devido ao seu tamanho, seu uso é limitado em laboratório, no entanto, pode-se utilizá-lo em colunas para a determinação da curva de retenção de materiais mais grosseiros ou para estudos específicos de fluxo em meio não saturado.

O sensor possui baixo custo e uma faixa de medição que vai de zero a, aproximadamente, 200 kPa. Praticamente, não há necessidade de manutenção após sua instalação a menos que haja um total ressecamento do solo e do sensor.

Quando comparado com o tensiômetro, o GMS possui um tempo de resposta significativamente maior. O seu uso está restrito a situações nas quais o tempo de resposta não seja determinante. Por outro lado, o GMS permite acompanhar variações sazonais que possuem grande importância para os problemas relacionados com a movimentação de água nos solos e, consequentemente, em problemas de estabilidade de taludes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Décadas de desenvolvimento científico e tecnológico resultaram em uma grande variedade de métodos de medição de sucção e da curva de retenção. Os diversos métodos disponíveis oferecem distintas maneiras, por vezes, redundantes, e, por outras, complementares, de determinação de propriedades e estado de solos não saturados.

Deve-se compreender bem o princípio de funcionamento de cada método descrito de modo a permitir que a interpretação da curva de retenção ou da medição de sucção esteja correta. Aspectos relacionados com o tipo de sucção, tempo de equilíbrio, faixa de interesse e detalhamento da curva devem ser considerados quando se escolhem os métodos a serem utilizados. É importante compreender que cada método possui sua faixa de aplicação e limitações de modo que pode ser recomendável a utilização de mais de um procedimento para a adequada obtenção da curva de retenção. Deve-se determinar não só o teor de umidade gravimétrico das amostras, mas também os índices volumétricos. Somente com o entendimento dos aspectos de estado do material é que a interpretação da curva de retenção será correta e terá utilidade prática.

REFERÊNCIAS

- ARAB, M.G.; ZAPATA, C.E. & MARINHO, F.A.M. (2011). Using MEMS based RH sensor to measure high total suction. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Alexandria, v. III, pp. 1881-1884.
- ASTM E104 - 02 (2012). Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions.
- BOUYOUCOS, G.J. (1965). Plaster of paris block electrical measuring unit for making a continuous measurement of soil moisture under field conditions. WEXLER, A. (ed.). Humidity and moisture: Measurement and control in science and industry, v. 4., Reinhold, New York, pp. 105-111
- CAMPBELL, E.C.; CAMPBELL, G.S. & BARLOW, W.K. (1973). A dewpoint hygrometer for water potential measurement. *Agricultural Meteorology*, 12: 113-121.
- CHANDLER, R.J. & GUTIERREZ, C.I. (1986). The filter paper method of suction measurement. *Geotechnique*, 36(2): 265-268.
- CHANDLER, R.J.; CRILLEY, M.S. & MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). A low-cost method of assessing clay desiccation for low rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 92: 82-89.
- FAWCETT, R. & COLLIS-GEORGE, N. (1967). A Filter paper Method for Determining the Moisture Characteristics of Soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 7: 162-167.
- FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. & FREDLUND, M. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Practice*, Wiley, New York. 926p.
- GAN, J. K.M.; FREDLUND, D.G.; LI, W X. & AND XING, A. (1994). Design and data acquisition for thermal conductivity matric suction sensors, *Transportation Research Record*, 1432: 68-75.
- GUAN, Y. & FREDLUND, D.G. (1997). Use of tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 34: 604-614.
- HILF, J.W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. Doctoral Thesis. Technical Memo No.654, United States Bureau of Reclamation, Denver. 218p.
- IRMAK, S. & HAMAN, D.Z. (2001). Performance of the Watermark granular matrix sensor in sandy soils. *ASCE – Applied Engineering in Agriculture*, 17(6): 787-795.

KAYE, G.W.C. & LABY, T.H. (1995). Tables of Physical and Chemical Constants. 16th ed., Longman Scientific and Technical, London. 624p.

MARINHO, F.A.M. (1994). Shrinkage behavior of some plastic clays. Doctoral Thesis, Imperial College, University of London, London. 216p.

MARINHO, F.A.M. & OLIVEIRA, O.M. (2006). The filter paper method revised In Geotechnical Testing Journal, 29: 250-258.

MARINHO, F.A.M.; TAKE, A. & TARANTINO, A. (2009). Tensiometric and axis translation techniques for suction measurement. Geotechnical and Geological Engineering, 26(6): 615-631.

MARINHO, F.A.M.; ZAMBUZI, N. DE C. & CAMPOS, T.M.P. (2006). Desenvolvimento de cerâmica com alta pressão de entrada de ar. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Curitiba, v. I, pp. 435-440.

MCQUEEN, I.S. & MILLER, R.F. (1968). Calibration and evaluation of a wide range gravimetric method for measuring moisture stress. Soil Science, 106: 225-231.

MENDES, R.M.; MARINHO, F.A.M. & FUNARI, A.H. (2007). Avaliação do sensor de matriz granular (GMS) para medição de sucção. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Salvador-Bahia, v. I, pp. 209-213.

MENDES, R.M. (2008). Estudo das Propriedades Geotécnicas de Solos Residuais Não Saturados de Ubatuba (SP). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 230p.

MOTA, W.N.; EVANGELISTA, A.W.P.; MAIA, L.J.Q.; CORRECHEL, V.; ALVES JR., J.; VARRONE, L.F.R. & GITIRANA JR., G.F.N. (2021). Development of a heat pulse sensor for measuring matric suction on soilless substrates. Computers and Electronics in Agriculture, 185: 106119.

NG, C.W & PANG, Y.W. (2000). Influence of stress state on soil-water characteristic and slope stability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(2): 157-166.

OLIVEIRA, O.M. & MARINHO, F.A.M. (2006). Study of equilibration time in the pressure plate. Geotechnical Special Publication n. 147. 4th International Conference on Unsaturated Soils, v. II, pp. 1864-1874.

PHENE, C.J.; RAWLINS, S.L., & HOFFMAN, G.J. (1971). Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation with a porous body: Theory and sensor construction, Proceedings of Soil Science Society of America, Vol. 35: 27-33.

RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique*, 43(2): 321-324.

RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. (1995). Measurement of suction in materials which swell. *Applied Mechanics Review*, 48(9): 727-732.

ROMERO, E. (2001). Controlled suction techniques. IV Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, RS, pp. 535-542.

SHUAI, F., & FREDLUND, D.G. (2000). Use of a new conductivity sensor to measure soil suction, *GeoDenver Conference*, Denver, CO, pp. 1-12.

SILVA JR., A.C. (2010). Avaliação das flutuações sazonais de umidade e sucção em um perfil de solo tropical. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnica, Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiania, GO, 137 p.

STANNARD, D.I. (1992). Tensiometers – theory, construction, and use. *Geotechnical Testing Journal*, 15(1): 48-50.

TAN, E.; FREDLUND, D.G. & GITIRANA JR., G.F.N. (2004). Comparisons of correction methods for factors influencing thermal conductivity suction sensors. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, SP, pp. 127-132.

TARANTINO, A. (2004). Panel Lecture: Direct measurement of soil water tension. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Recife-PE, v. III, p. 1005-1017.

TARANTINO, A. & MONGIOVI, L. (2003). Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction. *Geotechnique*, 53(1): 137-141.

TOKER, N.K.; GERMAINE, J.T. & CULLIGAN, P.J. (2003). Comment on ‘Cavitation during desaturation of porous media under tension’ by Dani Or and Markus Tuller, *Water Resources Research*, 39(11): 1-3.

VANAPALLI, S.K.; PUFAHL, D.E., & FREDLUND, D.G. (1999). The effect of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, 49(2): 143-159.

VAZ, E.F.; GITIRANA JR., G.F.N.; MENDES, T.A. & REBOLLEDO, J.F.R. (2021). On the equilibrium of suction and pressure plate tests. *Acta Geotechnica*, 16: 2741-2758.

YANG, H.; RAHARDJO, H.; WIBAWA, B., & LEONG, E.C. (2004). A soil column apparatus for laboratory infiltration study. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 27(4): 347-355.