

## 5

### Determinação das Curvas Características de Sucção dos Resíduos

#### 5.1

##### Introdução

O conhecimento prévio da sucção e de sua variação com o teor de umidade devido à evaporação é de fundamental importância para realizar uma análise dos resíduos, quando submetidos ao ressecamento. Sucção de um solo é um dos parâmetros mais importantes para conhecimento de seu comportamento não saturado.

Basicamente, sucção dos solos é uma quantidade energética para avaliar a sua capacidade de reter água. Quando água livre migra para dentro de um solo, ela será retida ou adsorvida por ele. Para desprender esta água adsorvida, energia externa tem de ser aplicada, indo de encontro às forças de retenção do solo. A energia aplicada por unidade de volume de água para desprendê-la é a sucção (Lee & Wray, 1995). Quanto mais secos os solos, maior a sucção.

Curva característica de sucção é a expressão gráfica que relaciona a sucção com teor de umidade, este podendo ser expresso em termos de volume ou em peso. Ela pode ser utilizada para fornecer estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como a permeabilidade, resistência ao cisalhamento e variação de volume (*Fredlund et al., 1997*). Neste capítulo, são apresentados os procedimentos utilizados e os resultados obtidos par montagem das curvas características de sucção de dois resíduos, a lama vermelha OP neutralizada e a lama vermelha OP não neutralizada, com os quais se executou os ensaios de ressecamento de maiores dimensões. Quatro técnicas diferentes foram utilizadas: o dessecador, o papel

filtro e a medição direta com uso de um transdutor e mini tensiômetros instalados no interior da camada de lama enquanto exposta à secagem. A necessidade do uso destas diferentes técnicas se deve ao fato da grande variação de volume e consistência apresentada pelo material ao longo de toda a faixa de teor de umidade do ensaio. Dependendo do seu teor de umidade e consistência, uma técnica se mostrava mais adequada que outra para obtenção de resultados mais confiáveis. As dificuldades e vantagens encontradas com cada uma destas técnicas são comentadas. Estes procedimentos também foram discutidos em Villar & de Campos (2001) e Villar & de Campos (2002), onde apenas alguns resultados referentes a um dos resíduos foram mostrados. Alguns conceitos e definições ligados ao tema também serão aqui reapresentados, apenas para uniformização da nomenclatura que será usada ao longo do capítulo.

## 5.2

### Curvas Características de Sucção

Como já definido, a curva característica de sucção, doravante chamada só curva característica, representa a relação entre a sucção e a variação do teor de umidade do solo. Em laboratório, esta relação tem sido obtida utilizando-se diferentes equipamentos e técnicas, que tem sido exaustivamente discutidas em vasta literatura (por exemplo, *Fredlund & Rahardjo, 1993; Fredlund & Xing, 1994; Barbour, 1998; Dineen & Ridley, 1999; Sillers & Fredlund, 2001; Fredlund et al., 2001; Sillers et al., 2001; Fredlund, 2002 etc.*) que inclui livros, periódicos e também anais de congressos e seminários de cunho nacional e internacional, tais como o *Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados (ÑSAT)*, a *International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT)*, dentre outros. Portanto, só serão apresentados aqui algumas definições ligadas ao tema com o intuito de uniformização dos conceitos utilizados, deixando que maiores detalhes, caso haja interesse, sejam obtidos nos anais dos referidos congressos, por exemplo.

Existe, agora, uma grande variedade de equipamentos comercialmente disponíveis para a medição de sucção de solo. O psicrômetro, por exemplo, tem se mostrado capaz de medir sucção em muitas amostras de solo, com rapidez razoável (Woodburn & Lucas, 1995). Ele é um instrumento que mede umidade e pode ser usado para medir sucção total, possuindo, em alguns modelos, dispositivos elétricos de medição de calor. A técnica do papel filtro, que associa a umidade do papel com a sucção do solo, também pode ser usada para cobrir toda a escala de sucção de solo e vem se tornando mais utilizada, à medida que os procedimentos de utilização tem sido mais firmemente estabelecidos (Houston et al., 1994; Marinho, 1994; Woodburn & Lucas, 1995; Ridley, 1995; Ridley & Wray, 1995; Swarbrick, 1995; Melgarejo et al., 2002). Muitos sensores estão agora disponíveis, tanto para medições de laboratório como para campo (Ridley & Burland, 1993; Fleming et al., 1994; Marinho & Souza Pinto, 1997; Trichês & Pedroso, 2002).

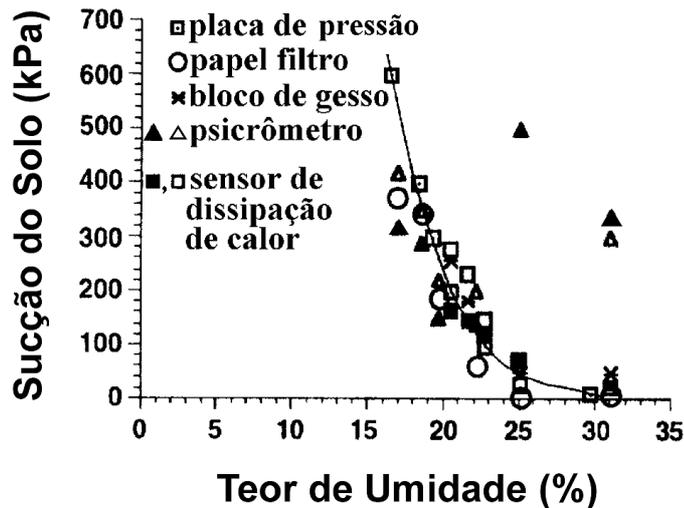
Lee & Wray (1995) fizeram uma comparação entre os diversos equipamentos e técnicas de medição de sucção. Eles obtiveram uma curva característica de sucção por meio de uma placa de pressão e a utilizaram para comparação entre as técnicas. O solo utilizado por eles foi considerado ter uma sucção osmótica desprezível. Amostras de solo com sucção matricial conhecida foram confeccionadas e, então, medidas pelos variados instrumentos. Uma boa concordância foi obtida por eles entre os dados da placa de pressão e as medições com um psicrômetro e papel filtro. Os resultados das medições obtidas de outros instrumentos foram superpostos na curva característica de sucção do solo, como visto na Figura 5.1, mostrando que as respostas são semelhantes e que o uso de instrumentos diferentes conduzem a medição da mesma grandeza quando corretamente calibrados e utilizados, o que corrobora a intenção do uso de técnicas diferentes na obtenção da curva característica dos resíduos.

A sucção está associada à energia potencial da água do solo. É definida quantitativamente como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos vazios de solo. Ridley (1995) relata que existiriam dois níveis distintos em que ela poderia ser medida. O primeiro envolve a medição da poropressão, chamado de sucção mátrica ou matricial, e o segundo, a tensão exigida para remover uma molécula de água do solo dentro da fase de vapor, chamada de sucção total.

Marshall (1959) cita uma definição de sucção total de um solo não saturado como a soma de duas componentes:

$$S_t = S_m + S_{om} \quad (5.1)$$

Onde:  $S_t$  = sucção total;  $S_m$  = sucção matricial e  $S_{om}$  = sucção osmótica.



**FIGURA 5.1:** Comparação Entre Várias Técnicas de Medição de Sucção  
(adaptado de Lee & Wray, 1995)

Alguns autores sugerem que o comportamento dos solos não saturados depende basicamente da parcela de sucção matricial (Fredlund, 1979; Edil & Motan, 1984). A parcela osmótica estaria associada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos no solo e se acredita que ela não contribua significativamente para sua resistência ao cisalhamento (Blight, 1983). Segundo Fredlund & Xing (1994), em sucções muito elevadas, maiores que 1500kPa, a sucção mátrica e a total podem, em geral, ser assumidas como equivalentes.

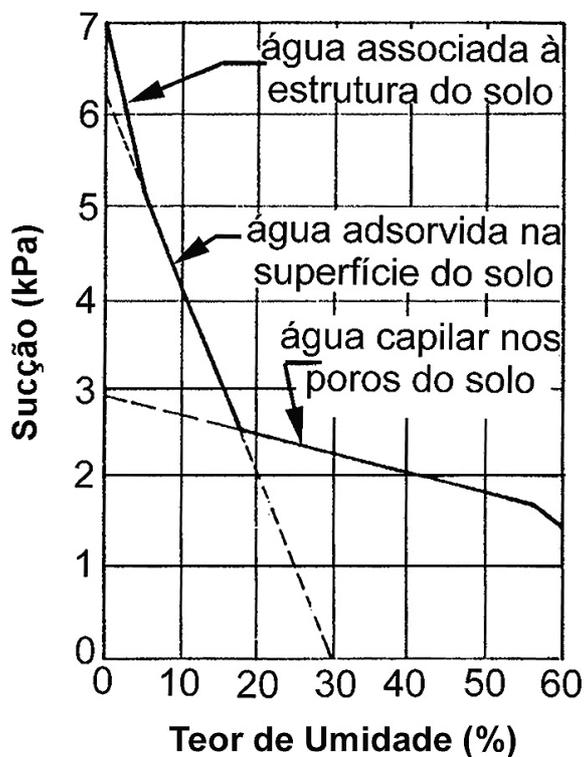
A sucção matricial, por sua vez, pode ser composta por duas parcelas (de Campos et al., 1992):

$$S_m = S_c + S_{ad} \quad (5.2)$$

onde:  $S_c$  = sucção capilar e  $S_{ad}$  = sucção de adsorção.

A sucção capilar estaria relacionada com o nível macro estrutural do solo, ou seja, com os poros interligados nos quais a água flui devido a gradientes de pressão capilar. A adsorção é ligada à hidratação de minerais argílicos, um aspecto micro-estrutural.

Sucção é em geral expressa em unidade de pressão, carga hidráulica equivalente (unidade de comprimento) ou através da escala pF, que corresponde ao logaritmo decimal da sucção expresso em centímetros de água. De Campos et al. (1992) sugerem que para a aplicação em problemas geotécnicos relacionados à ruptura, seria mais recomendável que se representasse a curva característica como a relação sucção contra o teor de umidade em peso e os envolvendo deformação, o emprego da umidade volumétrica. O grau de saturação é uma outra medida usada com frequência em relação à sucção. A Figura 5.2 mostra o que seria a influência relativa de cada parcela de sucção em uma curva característica, de acordo com MacQueen e Miller (1974).



**FIGURA 5.2:** Influência Relativa de Parcelas de Sucção em uma Curva Característica (McQueen e Miller, 1974 – em de Campos e outros, 1992)

A curva característica de sucção é dependente da trajetória de secagem ou umedecimento seguida. Ou seja, o mesmo solo apresenta valores diferentes de sucção para um mesmo teor de umidade, caso este tenha sido atingido por adição de fluido (chuva, por ex.) ou secagem (evaporação). De acordo com Presa (1982), este efeito de histerese pode ser atribuído a:

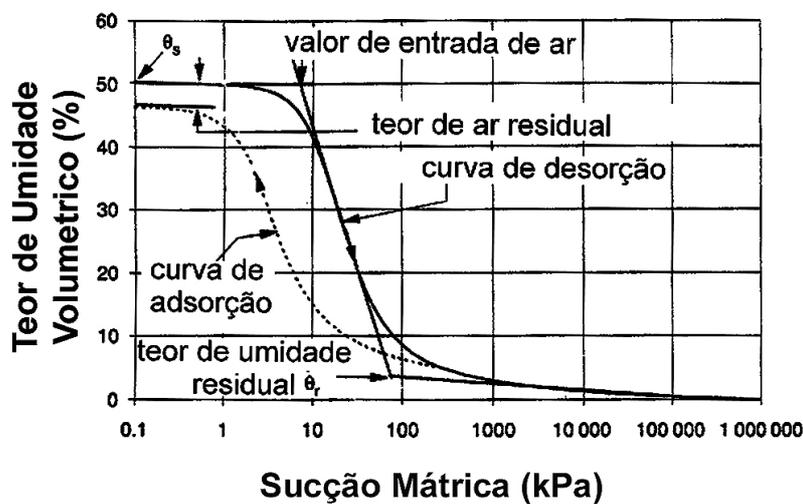
- ⇨ Geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais;
- ⇨ Influência do ângulo de contato solo-água, que muda em função da rugosidade do grão e de sua mineralogia;
- ⇨ Ocorrência de ar aprisionado nos poros, tendendo a reduzir o teor de umidade no processo de umedecimento.

A forma da curva característica é afetada por diversos fatores (por exemplo, Presa, 1982; Campos, 1988; Jucá, 1990; de Campos et al., 1992). Um deles é o tipo de solo, tanto no que se refere a aspectos granulométricos quanto a mineralógicos. Em solos argilosos, tanto as forças capilares como as de adsorção são significativas, enquanto que, de uma maneira geral, estas últimas são pequenas em solos arenosos. Nestes, quando puramente arenosos, uma pequena sucção pode dessaturar os poros maiores.

Brooks & Corey (1966) já haviam mostrado que a relação entre o grau de saturação e a sucção matricial está associada com a distribuição granulométrica. Eles introduziram o conceito de “valor de entrada de ar” em termos de sucção como sendo o valor da sucção mátrica que tem de ser excedida para o ar poder entrar para os vazios do solo. Isto seria uma medida do tamanho máximo do poro do solo (Marinho & Chandler, 1994). Brooks & Corey (1966) também definiram o conceito de grau de saturação residual, que seria aquele a partir do qual um aumento da sucção matricial não produziria variações significativas no grau de saturação.

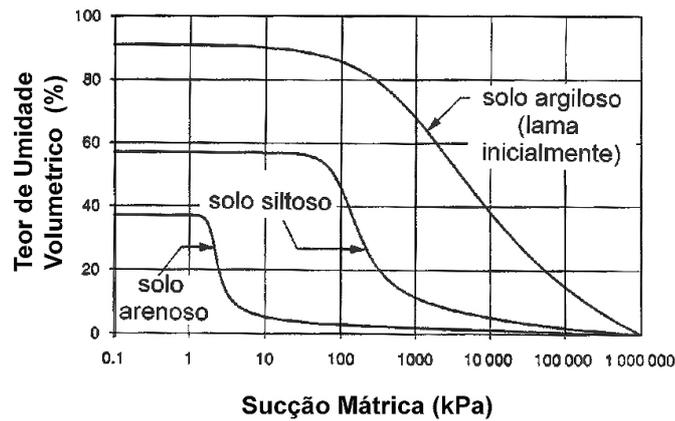
A Figura 5.3 representa um gráfico típico de curva característica para um solo siltoso, podendo se perceber a histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento. Algumas características da curva foram assinaladas. É possível perceber o valor de entrada de ar e o teor de umidade residual, análogo ao citado

grau de saturação residual, ou seja, o teor de umidade à partir do qual uma grande variação na sucção é exigida para remover mais água do solo. Fredlund & Xing (1994) consideram esta uma definição vaga e representam nesta Figura 5.3 um meio para obtenção do valor com auxílio das tangentes representadas. Segundo eles, a sucção total correspondente a teor de umidade zero parece ser essencialmente o mesmo para todos os tipos de solo. Esta sucção seria em torno de  $10^6$  kPa, confirmado experimentalmente para uma série de solos (Cronney & Coleman, 1961) e também por considerações termodinâmicas (Richards, 1965).

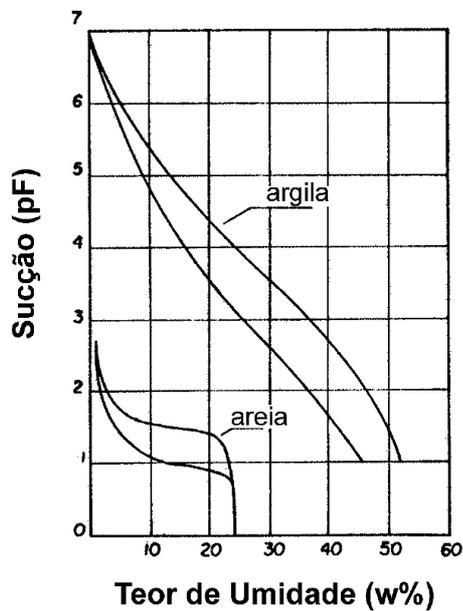


**FIGURA 5.3:** Curva Característica Típica de um Solo Siltoso  
(adaptado de Fredlund e Xing, 1994)

A Figura 5.4 mostra curvas características típicas para solos argilosos e arenosos. A Figura 5.5 também representa curvas características de sucção de solos com diferentes granulometrias. De acordo com de Campos et al. (1992), é recomendável que os ensaios para obtenção da curva característica de sucção sejam realizados em ambientes com temperatura controlada. Isto seria devido ao fato de que um aumento de temperatura reduziria a tensão superficial na interface solo-água, diminuindo a curvatura do menisco e, conseqüentemente, a sucção. Se também houver a existência de ar ocluído na massa de solo, o aumento da temperatura expandiria os poros com ar, o que também alteraria a estrutura do material e, conseqüentemente, modificaria a forma da curva.



**FIGURA 5.4:** Curva Característica Típica de Diferentes Tipos de Solo  
(adaptado de Fredlund e Xing, 1994)



**FIGURA 5.5:** Curva Característica Típicas de diferentes Tipos de Solo  
(adaptado de De Campos e outros, 1992)

### 5.3

#### Métodos de Obtenção das Curvas Características de Sucção

Serão apresentadas, à seguir, uma descrição rápida das técnicas de obtenção da curva característica dos resíduos que foram usadas neste trabalho.

Existem outras, que poderão ser pesquisadas por exemplo, em Fredlund & Rahardjo (1993). Após a explicação de cada técnica, será também apresentada a metodologia de ensaio usada com os resíduos.

### 5.3.1

#### O Método do Papel Filtro

Quando dois materiais porosos são colocados juntos e lacrados em um meio ambiente, eles trocarão água entre si até chegarem ao equilíbrio. A troca de água pode ser em forma só de vapor (se não é permitido o contato com os materiais) ou tanto na forma de fluxo de líquido quanto de vapor (se há contato direto). O papel filtro, um material poroso, se comporta da mesma maneira quando lacrado com um solo qualquer. A água que o papel filtro absorve pode ser usada como um indicador da sucção, sendo que, em geral, quanto mais seco o papel filtro na umidade de equilíbrio, maior a sucção do solo.

A determinação da sucção do solo à partir da umidade do papel filtro é feita com base em uma curva de calibração, obtida do equilíbrio do papel com soluções salinas de sucção osmótica conhecida. O uso potencial do papel filtro como dispositivo ou medida de sucção de um solo foi, segundo Fredlund & Rahardjo (1993), primeiro testado por Gardner (1937). Dependendo do tipo de contato (se há ou não) entre o papel e o solo, o papel filtro pode medir tanto sucção matricial quanto total. No ensaio em que o papel não fica em contato com o solo, é usual a colocação de disco de material inerte entre ele e o solo, para garantir que somente vapor será trocado. Antes de ser absorvido pelo papel filtro, o vapor de água tem de superar as forças matricial e osmóticas para sair do solo, resultando, assim, numa estimativa da sucção total quando não se tem contato papel filtro-solo. Quando ocorre este contato, só sucção matricial é medida, uma vez que a solução ou fluido dos vazios do solo é permitida de se mover através do papel filtro junto com a água adsorvida (*Lee & Wray, 1995*). Uma revisão sobre a técnica é apresentada por Marinho (1994).

Mais recentemente, o ensaio foi padronizado pela norma ASTM D 5298-92. Os dois tipos de papel filtro mais freqüentemente adotados são os das marcas

Whatman's 42 e Schleicher & Schuell nº 589. Existem várias curvas de calibração destes papéis na literatura e não há um consenso sobre qual o mais adequado. Chandler & Gutierrez (1986) acham o Whatman's 42 apropriado para uso por ser mais espesso, com um tamanho de poro pequeno. Fawcett & Collis-George (1967) fizeram calibrações deste papel, que foram repetidas por Hamblin (1981), usando tanto papel tratado para impedir ataque de fungos durante o período de equalização como sem tratamento, não encontrando diferenças nos resultados. O mesmo se repetiu com Chandler & Gutierrez (1986). Eles, contudo, encontraram problemas para medições de valores de sucção de menos de 80kPa.

Marinho (1994) apresenta uma série destas curvas de calibração, obtidas para os dois tipos de papel. As Figuras 5.6 e 5.7 mostram curvas de calibração de Chandler & Gutierrez (1986) comparada com as obtidas por outros autores. A calibração do Whatman's 42 inicialmente seco, resulta numa relação entre a sucção e o teor de umidade do papel filtro bilinear, com uma variação de sensibilidade ocorrendo em um teor de umidade em torno de 47%, segundo as relações:

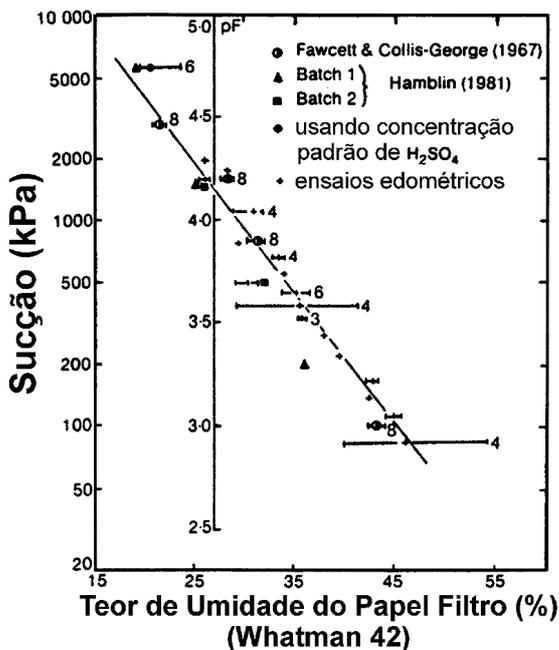
$$< 47\% \rightarrow 4.842 - 0.0622(w) \quad (5.3)$$

$$> 47\% \rightarrow 6.050 - 2.48\log(w) \quad (5.4)$$

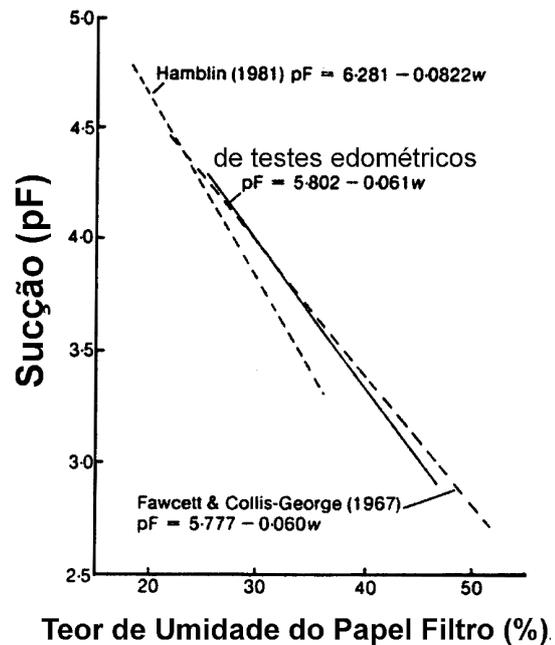
Nas equações acima, o  $w$  é o teor de umidade do papel filtro. Estas relações foram obtidas por Chandler et al. (1992), confirmadas por Swarbrick (1995) e, de acordo com Ridley & Wray (1995), são bem adequadas, principalmente para sucção matricial. Neste trabalho, a curva de calibração adotada foi a sugerida pela ASTM D 5298 - 92, e está representada na Figura 5.8, em comparação com aquela de Chandler e Gutierrez (1986).

Com relação à montagem do papel com o solo, alguns esquemas tem sido sugeridos, como por exemplo, a por McQueen & Miller (1968), apresentada na Figura 5.9. Na Figura 5.10 está a sugestão de Houston et al. (1994). A de Ridley (1995) está reproduzida na Figura 5.11. Os cuidados recomendados são que, para o caso de medição de sucção total, será melhor usar o papel filtro colocado o mais próximo e paralelo do solo possível e que seja mínima a relação entre o volume de ar e o volume de solo no recipiente utilizado para equalização (Ridley, 1995).

Houston et al. (1994), também para sucção total, recomendam cuidados com a possível condensação de vapor na câmara, o que poderia levar a medições errôneas de sucção, caso viessem a cair sobre o papel. Por isso, sugerem que o recipiente fique inclinado (Figura 5.10).



**FIGURA 5.6:** Curvas de Calibração de Papel Filtro Whatman's 42 (adaptado de Chandler & Gutierrez, 1986)



**FIGURA 5.7:** Comparação Entre Curvas Calibração de Papel Filtro Whatman's 42 (adaptado de Chandler & Gutierrez, 1986)

Chandler & Gutierrez (1986) alertam que o grau de contato entre o papel filtro e a amostra de solo é muito importante e deve-se tomar cuidado para que o papel não seja comprimido, senão a pressão de água será restringida. Super estimativas de sucção em 200 a 300kPa foram por eles registradas, aparentemente por essa razão.

Papel filtro mostra histerese se usado em trajetória de umedecimento ou secagem, de modo que é importante usá-lo de acordo como a curva de calibração de referência foi obtida. Ou seja, se a curva foi obtida por uma trajetória de umedecimento, o ensaio deve começar com papel seco.

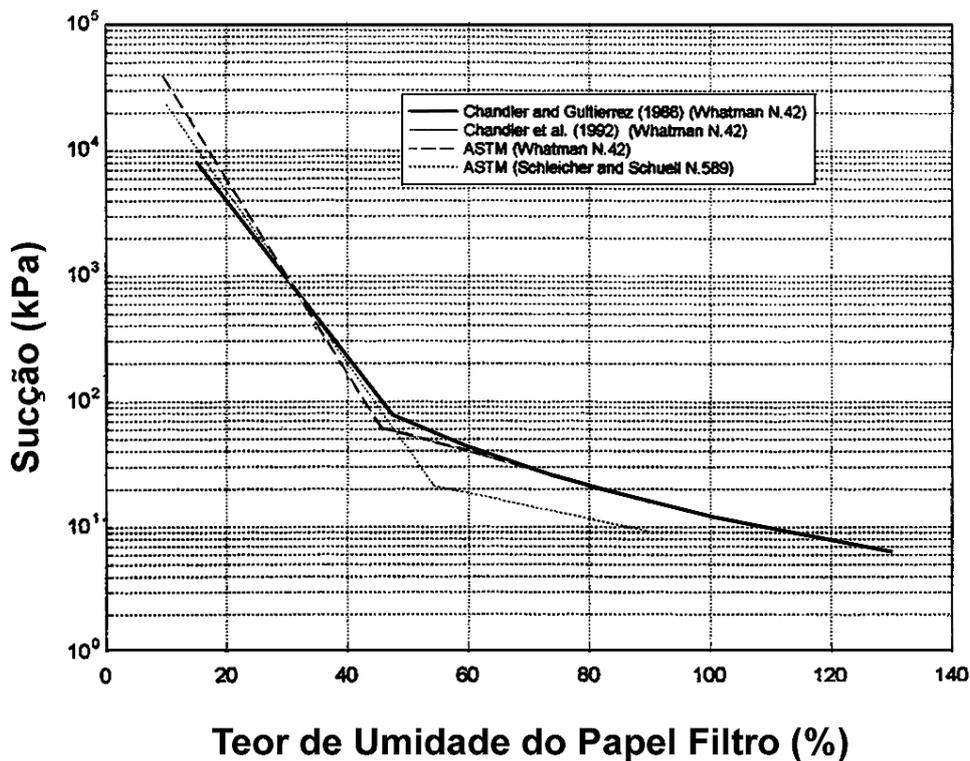


FIGURA 5.8: Curva de Calibração Adotada (papel Whatman's 42) (apud Marinho, 1994).

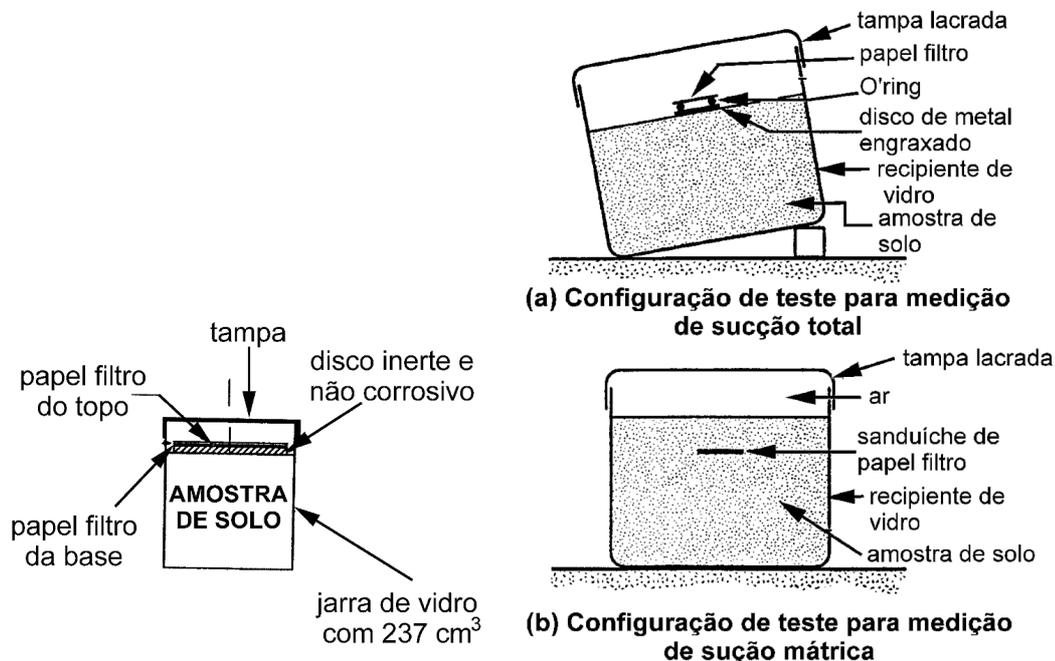
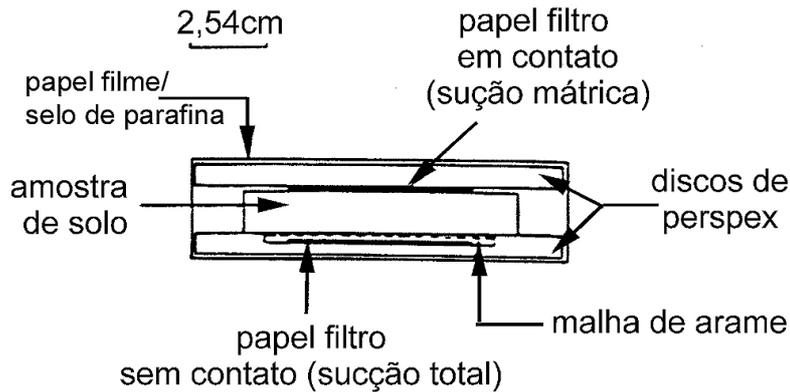


FIGURA 5.9: Esquema de Montagem de Ensaio de Papel Filtro (apud McQueen e Miller, 1968)

FIGURA 5.10: Esquemas de Montagem de Ensaio de Papel Filtro (adaptado de Houston et al., 1994)



**FIGURA 5.11:** Esquema de Montagem de Ensaio de Papel Filtro (Ridley, 1995)

De acordo com Woodburn & Lucas (1995), o método tem três desvantagens principais e que afetariam sua utilidade. Elas seriam: o tempo exigido para se atingir o equilíbrio; o efeito da variação da temperatura e a exigência para medições muito precisas da massa do papel, que varia muito imediatamente após ser retirada do recipiente onde está em contato com o solo e da estufa. O efeito de cada um destes fatores no resultado final ainda não foi determinado, segundo eles.

O tempo exigido para atingir o equilíbrio é de, em geral, 7 dias (McQueen & Miller, 1968; ASTM, 1992). Há autores que chegam a sugerir apenas dois dias (Al-Khafaf & Hanks, 1974); três dias (Chandler & Gutierrez, 1986) e dez dias (Sibley & Williams, 1990). Tempos maiores são considerados melhores, mas há o risco de flutuações de temperatura, que aumentam a possibilidade de condensação de vapor, o que poderia invalidar os resultados (Swarbrick, 1995).

Para se certificar da taxa em que papéis filtros atingem o equilíbrio, Swarbrick (1995) realizou alguns ensaios em amostras a diferentes teores de umidade inicial. Ele verificou que o tempo de sete dias para o equilíbrio é adequado para todas as situações. Quando se utilizou de papéis filtros inicialmente secos para medição de sucção total, percebeu a necessidade de maior tempo para atingir equilíbrio em amostras mais úmidas (sucção baixa), mas mesmo assim, este tempo de equalização foi menor que sete dias. No caso de sucção mátrica, os papéis levaram menos tempo para atingir o equilíbrio nas amostras úmidas, o que seria devido ao melhor contato de caminho de fluxo. Ridley (1995) e Marinho (1994 e 1995) recomendam que para valores baixos de

sucção total se deixe um tempo de equalização maior (ele usou quatorze dias para uma sucção de 200kPa).

Quanto ao problema de flutuação de temperatura, ele pode ser minimizado se os recipientes com as amostras são colocados em caixas isolantes, como isopor. De acordo com Woodburn & Lucas (1995), quando se mede sucção matricial, o recipiente com solo e papel deve ser colocado em locais com variação de temperatura menor que 3°C e, para a sucção total, 0,5°C.

Outra discussão é sobre a validade do uso das curvas de calibração para os papéis conseguidas por meio de métodos de medida de sucção mátrica para fazer a correlação com valores de sucção total. Houston et al. (1994) encontraram curvas de calibração de sucção total e matricial diferentes para papel do tipo Fischer. Isto teria acontecido, segundo Marinho (1994) e Ridley (1995), pelo fato do espaço de equalização ter sido muito curto.

Ridley (1993) sugeria que poderia haver uma diferença significativa entre a curva de calibração para medição de sucção total e a de sucção matricial pelo fato de a absorção de água pelo papel pela fase de vapor (como nas medidas de sucção total) ser diferente do processo de absorção pela fase líquida (como nas medições de sucção matricial). Isto resultaria, de acordo com ele, em um teor de umidade do papel filtro máximo quando a absorção é somente através da fase de vapor e, assim, a curva de calibração cairia abaixo da de sucção matricial para valores inferiores a 1000kPa.

De acordo com Ridley & Burland (1994), pesquisas tem mostrado que a curva de calibração para a medição de sucção total seria sensível a:

- ⇨ Distância entre o solo e papel filtro;
- ⇨ Área superficial exposta do solo;
- ⇨ Temperatura absoluta na qual as medições são feitas;
- ⇨ Tempo de equalização.

Desta forma, eles recomendam que se deveria usar uma curva de calibração obtida como a situação que está sendo estudada. Já Ridley (1995)

afirma não ter encontrado muitas discrepâncias nas curvas de calibração obtidas pelos dois métodos (contato e sem contato), o que já era mostrado por Marinho (1994).

Tentativas tem sido feitas para aumentar a precisão de medida do teor de umidade do papel filtro com uma balança eletrônica que pode ser colocada dentro do recipiente com a amostra do solo. Ela cabe em vasilhas com 75 mm de diâmetro e permite a pesagem de 300gramas de amostra. A balança conta o número de impulsos elétricos exigidos para sustentar a massa do papel filtro, que está dependurado em um braço móvel. Assim, é evitado o efeito da rápida variação no teor de umidade do papel filtro quando ele é retirado do recipiente em contato com o solo e da estufa, após a secagem (Woodburn & Lucas, 1995).

### 5.3.1.1

#### **METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM PAPEL FILTRO**

As medições usando o papel filtro foram realizadas em dois dos resíduos, a lama vermelha OP neutralizada e a lama vermelha OP não neutralizada. Foram estes os que foram ensaiados nas caixas instrumentadas de ressecamento, como será descrito em capítulo mais adiante, e também, os únicos dos quais se dispunha quantidade suficiente para moldagem das amostras.

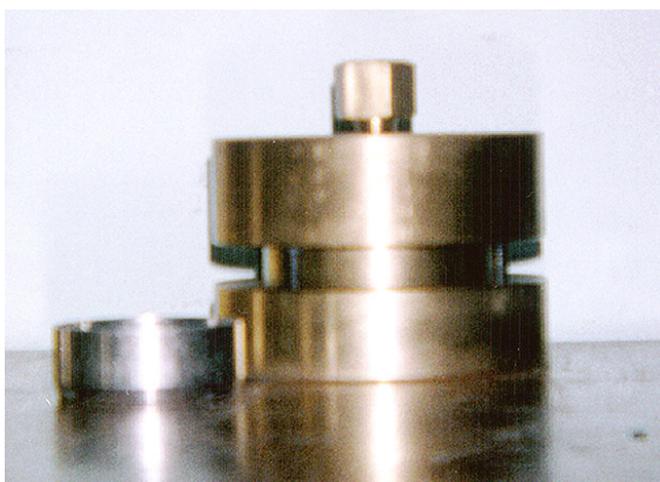
Os procedimentos utilizados no ensaio foram basicamente os descritos na designação da ASTM 5298-92. As amostras eram coladas para secar à partir de 100% de saturação. Foram usadas amostras secas ao ar sem pré-adensamento e pré-adensadas a 300kPa e 700kPa. Todas elas inicialmente eram homogeneizadas e deixadas sedimentar e adensar por peso próprio, para que atingissem uma estrutura mais semelhante possível da que ocorre “in situ”. Daí, ou eram deixadas secar ao ar ou levadas para o consolidômetro de lama e submetidas ao pré-adensamento, para só depois serem expostas a secagem. As amostras eram moldadas em diferentes teores de umidade com auxílio de um anel metálico, do tipo utilizado nos ensaios edométricos convencionais, com 50mm de diâmetro e 20mm de altura. Então, eram colocadas em um recipiente hermeticamente selado, representado nas Figuras 5.12 a 5.14.



**FIGURA 5.12:** Detalhe da Câmara de Equalização Utilizada nos Ensaio de Papel Filtro Desmontada.



**FIGURA 5.13:** Detalhe da Câmara de Equalização Utilizada nos Ensaio de Papel Filtro Semi – Montada.



**FIGURA 5.14:** Câmara de Equalização Utilizada no Ensaio de Papel Filtro Montada

Na Figura 5.12, o recipiente é visto todo desmontado. O material usado na confecção foi latão e a amostra, mantida dentro do anel de adensamento, que está na parte superior da figura, é colocada dentro de um outro anel, que o circunda, e tem anéis de borracha do tipo O’Ring tanto na parte inferior como superior e também na parte interna, no contato entre eles. Uma vez a amostra colocada dentro deste primeiro anel, era, então, selada pelas duas tampas circulares maiores, e que eram mantidas juntas por parafusos.

A parte superior possui um furo central com um parafuso que também possui um anel de borracha para melhor vedação. Este parafuso só era colocado após as duas tampas já fixadas, sendo o furo superior deixado aberto por um breve período de tempo para permitir a dissipação de alguma pressão que eventualmente possa ter sido originada pela montagem. Além desta função, este parafuso da tampa superior também tinha a finalidade de exercer uma pressão sobre um disco de PVC que era colocado sobre o papel, garantindo um bom contato nas amostras com baixos teores de umidade, nas quais não se conseguia um contato muito bom entre o papel e o solo de uma maneira geral. Na Figura 5.13 se vê uma tela de material inerte que servia para separar o solo do papel nas medições de sucção total. Esta tela foi posteriormente substituída por outra ainda mais fina, de modo que o papel ficava só a 1 mm de distância do solo em medições de sucção total. A Figura 5.14 mostra a aparência final do arranjo. Um anel amostrador de 2cm de altura ao fundo dá uma idéia da dimensão final.

Em geral, nas amostras com teores de umidade maiores, colocava-se o papel para medição de sucção mátrica na parte de baixo, o contato sendo garantido pelo peso próprio do solo, e os de medição de sucção total, na parte de cima, sendo a separação entre os dois feita pela tela plástica. Quando a amostra estava com um teor de umidade muito baixo, colocava-se papel em contato em cima e embaixo, fazendo uso do disco de PVC para assegurar o contato. Em uma outra câmara, montava-se outro ensaio, com amostra em um mesmo teor de umidade, para as medições de sucção total.

Para evitar os efeitos de histerese do papel filtro, ele foi usado da mesma forma que na curva de calibração, ou seja, numa trajetória de umidificação. Assim, o papel no início do teste estava seco, sendo retirado diretamente de sua caixa. Foi verificado que quando exposto ao ar por um longo período de tempo (uma semana, em elevadas umidades relativas do ar em torno de 85%), a umidade máxima do papel atingia 6%. Por isso, foi considerado desnecessário secar os papéis em estufa antes do ensaio. Foram utilizados papéis da marca Whatman's 42, cortado no mesmo diâmetro da amostra, um para cada medição. A curva de calibração usada foi a proposta pela ASTM.

Após a câmara bem selada, elas eram colocadas em duas caixas de isopor, que por sua vez eram mantidas em uma sala com temperatura controlada em torno de 20°C. Aí, eram deixadas para equalizar por no mínimo sete dias, mas a média do período de equalização utilizado foi de quinze dias. Em alguns casos, esperou-se um prazo de 120 dias de equalização para sucção total em algumas amostras muito úmidas, exatamente para a verificação de qual período de tempo para mais adequado.

Com o equilíbrio supostamente atingido, as câmaras eram abertas já do lado da balança de precisão de  $10^{-4}$  gramas. O papel era removido por meio de pinças e imediatamente colocados dentro de cápsulas, que eram lacradas rapidamente. À partir daí, começava-se a monitorar a perda de umidade do papel por uns cinco minutos, com leituras durante o primeiro minuto de 10 em 10 segundos, depois de 30 em 30 segundos. Com estes dados, se montava um gráfico de variação do peso contra a raiz do tempo e assim, era possível fazer uma extrapolação para o tempo  $t$  igual a zero. Isto feito, a cápsula era conduzida para a estufa, que também ficava do lado da balança, de modo que, após um tempo de secagem de 24 horas a 105°C, elas iam diretamente para a pesagem. O ganho de umidade também era monitorado para se conseguir o valor no tempo  $t = 0$ .

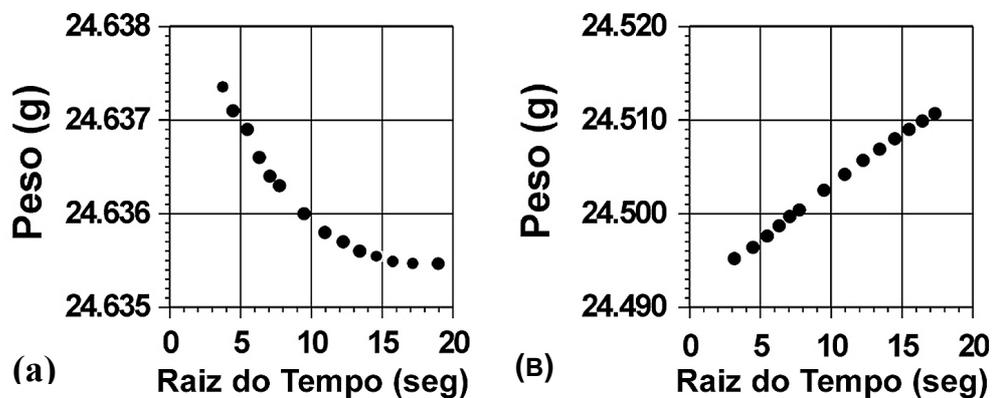
As curvas típicas de variação de umidade contra a raiz do tempo estão representadas na Figura 5.15, sendo que no item (a), está uma situação de perda de umidade ao se retirar da câmara de equalização, e no item (b), a de ganho de umidade após sair da estufa. Pode se notar a variação na massa do papel para ambos os casos, variação esta que, se não for corrigida, pode levar a grandes erros de interpretação.

### 5.3.1.2

#### COMENTÁRIOS SOBRE OS ENSAIOS REALIZADOS COM PAPEL FILTRO

Uma das dificuldades encontradas na utilização do método foi insistir em ensaios em que a estufa usada para secar os papéis após a retirada das câmaras de equalização não estava do lado da balança usada para medir seu peso seco. Quando não se dispunha de estufa e balança lado a lado, demorava-se quase que

cinco minutos entre retirada das cápsulas e pesagem e não era possível obter a parte inicial da curva para identificar a leitura correspondente ao peso do papel no tempo zero. Vários ensaios foram perdidos por causa deste detalhe. Erros de interpretação também aconteciam mesmo se mantendo os papéis em cápsulas lacradas, dentro de dessecadores fechados hermeticamente e com produtos para absorção de umidade, se acontecesse uma demora de mais de 2 a 3 minutos para a pesagem, e ainda se monitorando o ganho ou perda de umidade pelo processo descrito anteriormente.



**FIGURA 5.15:** Curvas de Acompanhamento da Variação do Peso do Papel Filtro: (a) Após Retirar da Câmara de Equalização (Perda de Umidade) e (b) Após Retirar da Estufa (Ganho de Umidade).

A câmara de equalização feita em bronze algumas vezes dificultou as montagens. Elas sendo construídas em acrílico, além de ficarem mais leves, permitem checar o fechamento e verificar se a colocação da tampa não deslocou o papel de sua posição. Isto ocorreu algumas vezes, fazendo o papel entrar em contato com o óleo de lubrificação que era usado nas paredes da câmara para facilitar a montagem e evitar o ressecamento dos anéis de borracha. Foi verificado posteriormente, que o uso de sacos plásticos com vedação hermética, vendidos em supermercados, funcionaram muito bem para acomodar as amostras de solo com papel filtro, como também constatado por Marinho (1994). Neste caso, solo e papel filtro eram embrulhados em papel filme, depois papel alumínio e por fim, colocados nestes sacos plásticos e conduzidos para as caixas de isopor. A câmara

de equalização de latão continuou sendo usada para as amostras mais secas, já que ela garantia um bom contato.

Só se conseguiu manusear amostras com teores de umidade em peso menores que aproximadamente 70% para aplicação desta técnica. Os resultados para as amostras com teores de umidade entre 40 e 10% não puderam ser aproveitados devido aos erros de execução dos ensaios, especialmente o descrito anteriormente, devido à variação de umidade do papel após ser retirado das câmaras de equalização e da estufa.

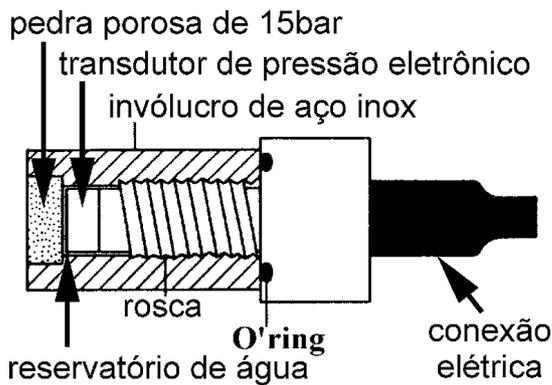
Para se verificar a adequabilidade do tempo de equalização, quatro câmaras com amostras supostamente idênticas eram montadas, e abertas após períodos diferentes. Em quase todos os casos, o prazo de sete dias foi suficiente, mesmo para baixos valores de sucção. Somente em muito poucos casos a equalização só ocorreu após um período de quinze dias, tendo sido registrado uma variação de 20% no teor de umidade do papel filtro retirado com sete dias para o de quinze dias. Devido a este fato, o tempo de equalização de quinze dias foi considerado de ser o melhor, tanto para medição de sucção matricial como total. Em todos os casos, as paredes da câmara eram checadas para se verificar se houve condensação de vapor, o que ocorreu somente no ensaio para o qual se esperou 120 dias para equalizar, muito provavelmente pela variação da temperatura da sala onde foram deixadas.

### 5.3.2

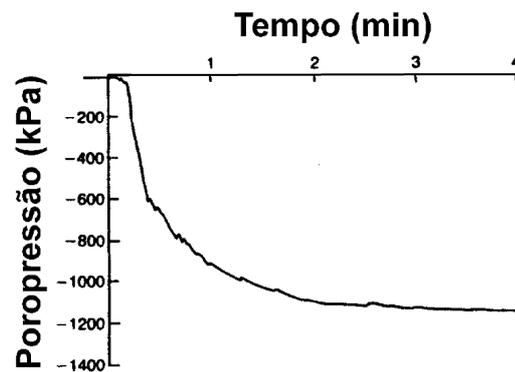
#### **Uso do Tensiômetro do Tipo *Imperial College***

Ridley & Burland (1993) apresentaram o desenvolvimento de um novo equipamento capaz de medições diretas de sucção de até 1500kPa. Ele usa um transdutor de poropressão miniatura em aço inox, do tipo ENTRAN EPX-500, com uma faixa de trabalho de 3500kPa. É envolto por um revestimento também de aço inox, com uma pedra porosa de alta entrada de ar (1500kPa) e um reservatório de água livre entre esta pedra e o transdutor de aproximadamente 3mm<sup>3</sup>. Segundo os autores, este pequeno volume parece inibir a formação de bolhas de ar na água, aumentando a faixa de medição direta de sucção além da

atingida normalmente por outros instrumentos. A saturação da pedra porosa é feita com o uso de uma bomba de água de alta pressão. O esquema do equipamento está mostrado na Figura 5.16. Eles faziam as medições colocando o instrumento em um buraco, no centro de uma placa horizontal, com a pedra porosa um pouco saliente na parte superior. A amostra era colocada sobre a placa horizontal e o contato era mantido pelo uso de uma mola inserida atrás do instrumento. A curva típica de resposta é mostrada na Figura 5.17.



**FIGURA 5.16:** Tensiômetro de Ridley & Burland (1993).



**FIGURA 5.17:** Curva de Resposta Típica do Tensiômetro Ridley & Burland (1993).

Marinho & Chandler (1994) fizeram uso deste equipamento e compararam as respostas obtidas com os valores medidos pela técnica do papel filtro, em amostras consideradas idênticas. Eles conseguiram uma boa concordância nas medições de sucção matricial entre as duas técnicas, em níveis de até 500kPa. Para valores mais elevados, o tensiômetro tendia, porém, a superestimar os resultados. Ridley (1993) teria observado este efeito e sugerido que era de se esperar problemas de contato solo/transdutor para solos com baixos teores de umidade e elevadas sucções. Marinho & Chandler (1994), porém, checaram a possibilidade do tensiômetro estar registrando sucção total e não mátrica. Para isto, compararam os resultados obtidos pelo uso do tensiômetro em amostras preparadas com a adição de uma solução salina. As leituras ficaram próximas das medições de sucção total obtidas com papel filtro, o que levou a conclusão de que o equipamento poderia medir sucção total e não matricial, devido a uma certa eficiência osmótica da pedra porosa, em solos com teor salino elevado. Esta

eficiência osmótica seria uma medida da habilidade da pedra porosa agir como uma membrana semi-permeável, evitando o fluxo de íons, mas permitindo o de água (Mitchell, 1991).

Ridley & Burland (1994) comentando a suposição de que o tensiômetro desenvolvido por eles estaria medindo sucção total, concluíram que os efeitos osmóticos no aparelho eram pequenos e sua resposta era realmente próxima à de medição de sucção matricial fornecida pelo papel filtro em contato. Para eles, os valores obtidos por Marinho & Chandler (1994) seriam devidos à situações especiais de micro-estrutura dos solos compactados usados por estes, e não devido a efeitos osmóticos. Eles também confirmaram que a dessaturação de seu instrumento ocorre por volta de 1500kPa de sucção, pressão de entrada de ar da pedra porosa em uso. Mas esta dessaturação poderia ocorrer para valores menores de sucção se o tensiômetro não estiver completamente saturado antes do uso.

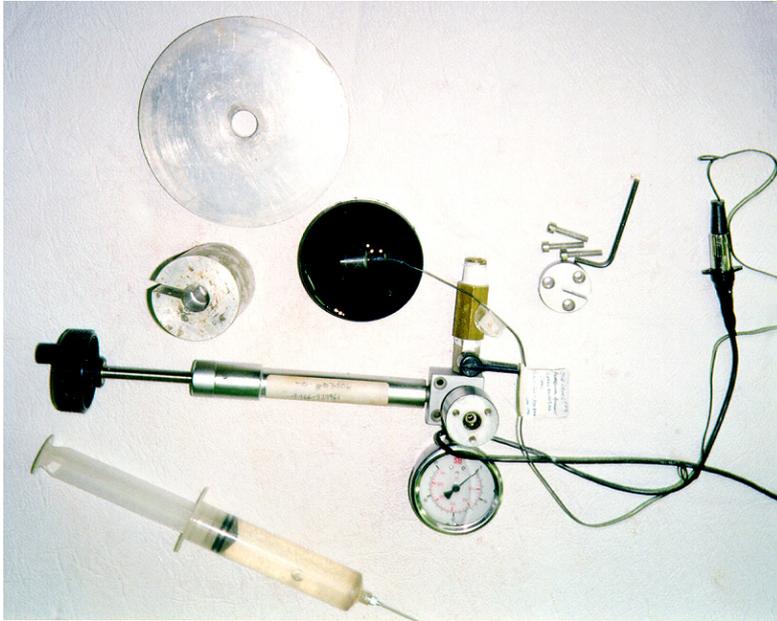
Marinho & Pinto (1997) também apresentaram um tensiômetro que permite medições de sucção maiores que 100kPa. Ele trabalharia devido a uma técnica que evitaria a cavitação. O instrumento também usa um pequeno volume de água (perto de 20mm<sup>3</sup>) e área superficial interna igualmente pequena. A técnica de saturação é aplicada com uma pressurização do sistema a 3,5 MPa, mantida por 24 horas e, então, fazendo-se ciclos de 0 a 3,5 MPa por dez vezes. Isto reduziria a possibilidade de cavitação e o equipamento estaria apto a sustentar sucções da ordem de 600kPa. É feito uso de uma pequena quantidade de lama para melhorar o contato entre a amostra e o tensiômetro. O conjunto deve ser coberto com filme plástico para evitar evaporação. A resposta em amostras com alturas menores foi verificada de ser mais rápida.

### 5.3.2.1

#### **METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM O TENSIOMETRO DO TIPO *IMPERIAL COLLEGE***

Neste trabalho, foi utilizado o equipamento proposto por Ridley & Burland (1993). Ele pode ser visto na Figura 5.18. O transdutor propriamente dito está dentro do recipiente negro com água. Na parte de cima está a câmara de

saturação, a que contém três furos para encaixe de parafusos, e cuja tampa está à esquerda. Ela é acoplada a um manômetro e um pistão, que permite aplicar até 4MPa de pressão ao transdutor.



**FIGURA 5.18:** Tensiômetro do Tipo Ridley e Burland (1993) Utilizado. Vista da Câmara de Saturação.

A Figura 5.19 mostra o transdutor sendo preparado para uso. Ele é colocado com a pedra porosa virada para cima e, sobre ele e colocado um prato metálico com um furo central, tudo ajustado de modo que a ponta porosa ficasse ligeiramente saliente. A Figura 5.20 mostra todo o conjunto montado, com a amostra já em contato com o tensiômetro. Uma pasta de caulim com um teor de umidade aproximado de 55% a 60%, pouco acima de seu limite de liquidez, foi utilizada para melhorar o contato. Ela era colocada com uma espessura de aproximadamente 2 a 3mm no máximo. O transdutor era conectado a uma fonte de excitação de 5 volts e a um sistema de aquisição de dados. Todo o conjunto era coberto com um filme plástico para evitar a evaporação durante o período de equalização.

As amostras utilizadas foram de material inicialmente sedimentado e adensado por peso próprio, e expostos para secar até atingir uma consistência que permitia ser moldado. Só se trabalhou com a lama vermelha OP neutralizada, por

havia sido obtido menos resultados de medição de sucção por papel filtro com este resíduo. Em geral, quando atingiam a consistência que permitia moldagem, as amostras registraram sucção igual a zero (umidade por volta de 60 a 70%), próximo ao valor de entrada de ar registrado pelas curvas de secagem. A moldagem era feita com anéis de adensamento, com 76 mm de diâmetro e 20mm de espessura, como pode ser visto pelas Figuras 5.19 e 5.20. Algumas eram deixadas secar ao ar e outras, colocadas em estufa por diferentes intervalos de tempo. Os teores de umidade das amostras variaram de 68% a 9%.



**FIGURA 5.19:** Detalhe da Preparação para Uso do Tensiômetro



**FIGURA 5.20:** Ensaio Com o Tensiômetro Pronto Para Ser Iniciado.

O transdutor era saturado antes dos ensaios com auxílio da câmara apropriada para este fim. Por meio deste dispositivo, ciclos de pressão de 4Mpa eram aplicados e, por fim, essa carga era deixada por aproximadamente 12 horas e verificada de ser mantida constante por meio do manômetro acoplado ao

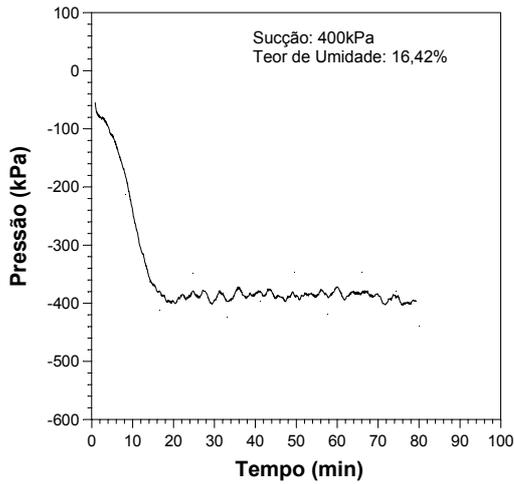
dispositivo. Uma vez iniciadas as leituras, a estabilização era considerada de ter ocorrido após a mesma pressão ser mantida constante por um período de aproximadamente de 15 a 20 min.

### 5.3.2.2

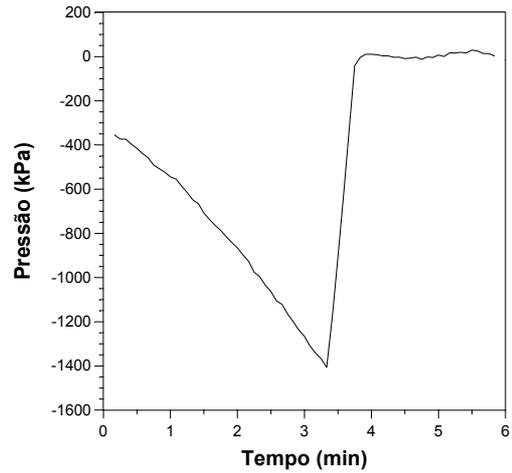
#### COMENTÁRIOS SOBRE OS ENSAIOS REALIZADOS COM O TENSÍMETRO

A curva típica de resposta obtida com o uso do tensiômetro pode ser vista na Figura 5.21. O valor máximo registrado antes que o tensiômetro dessaturasse foi por volta de 2300 kPa, mas, em geral isto ocorria em torno de 1220 a 1400kPa, próximo ao valor de entrada de ar da pedra porosa, como pode ser percebido na Figura 5.22. O período de tempo para que esta dessaturação ocorresse variou de caso para caso, em alguns ocorrendo em poucos minutos (3 a 5 minutos), e em outros, mais de meia hora. Devido a uma oscilação no sistema de aquisição de dados, os valores medidos de sucção próximos entre zero e 200kPa apresentaram muito ruído, como pode ser notado nas Figuras 5.23 e 5.24. Após um longo prazo, se estas oscilações ocorriam em torno de um valor bem definido de pressão, a leitura era aproveitada. O intervalo de tempo necessário para atingir a estabilização da leitura também foi diverso.

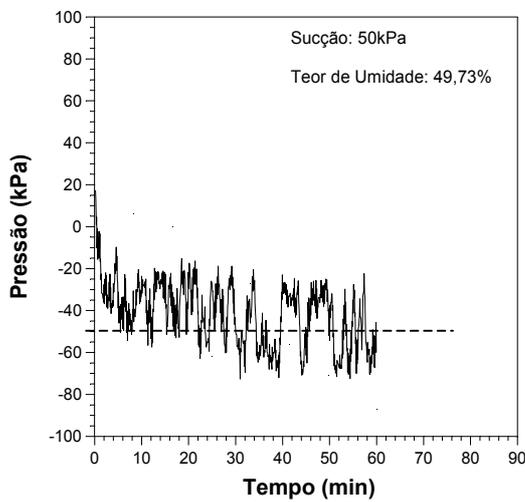
Alguma dificuldade foi encontrada na definição da espessura e do teor de umidade da pasta de caulim utilizada para melhorar o contato entre o solo e o tensiômetro. Acredita-se que por utilizá-la mais espessa ( $\cong 5\text{mm}$ ) em alguns casos, o equipamento não tendia para uma estabilização, mesmo após um longo período de tempo. Ou então, as leituras apresentavam uma tendência a estabilizar para então continuarem a aumentar, voltando a apresentar nova tendência a estabilização minutos mais tarde. Estes comportamentos estão representados nas Figuras 5.25 e 5.26. A dupla equalização da Figura 5.26 pode ter o primeiro patamar devido ao equilíbrio isolado da pasta com o transdutor, e o segundo, do conjunto solo/pasta. Outros casos ainda ocorreram em que a leitura diminuía, após já estar aparentemente equilibrada, podendo ser devido a um início de dessaturação do equipamento (ver a Figura 5.27).



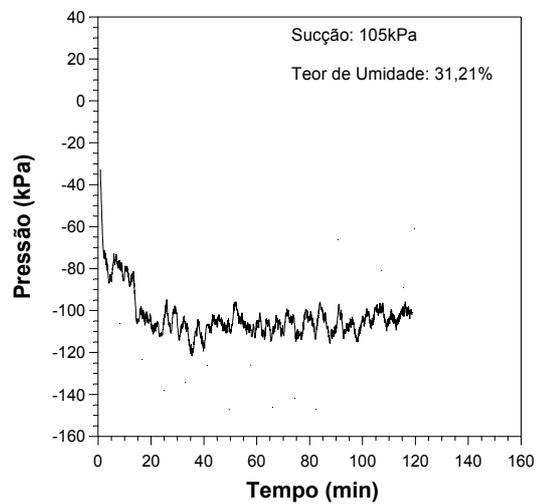
**FIGURA 5.21:** Resposta Típica Obtida com o Uso do Tensiômetro



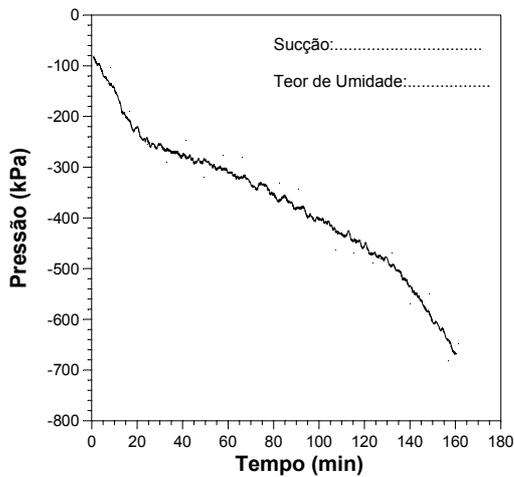
**FIGURA 5.22:** Resposta Típica Obtida Devido a Dessaturação do Tensiômetro



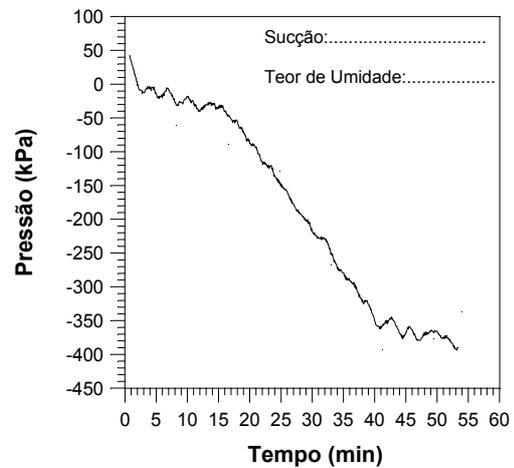
**FIGURA 5.23:** Oscilação de Leitura do Tensiômetro a Baixos Níveis de Sucção.



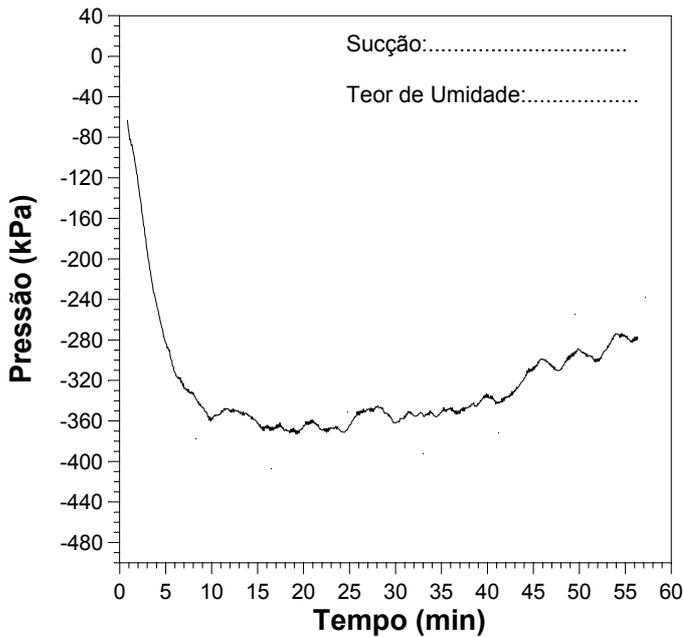
**FIGURA 5.24:** Leitura do Tensiômetro a Baixos Níveis de Sucção: Oscilação.



**FIGURA 5.25:** Leitura Sem Estabilização Influência Da Pasta de Contato.



**FIGURA 5.26:** Dupla Equalização da Leitura do Tensiômetro.



**FIGURA 5.27:** Exemplo de Tendência de Leitura do Tensiômetro a se Elevar Após Aparente Estabilização.

### 5.3.3

#### Uso de Dessecadores

Para obtenção dos valores de sucção total mais elevados e confirmar a curva de sucção total obtida pelo uso da técnica do papel filtro, foram utilizados dessecadores, onde as amostras eram deixadas equalizar em termos de pressão de vapor junto com uma solução salina de molalidade conhecida e, portanto, de sucção também conhecida.

Sob condições isotérmicas, a umidade relativa no espaço sobre um líquido em um recipiente fechado, como um dessecador, se aproxima de um valor fixo e reproduzível. No caso de água destilada, a umidade relativa de equilíbrio é essencialmente 100%. Se a água tiver sal nela, a umidade relativa de equilíbrio pode ser significativamente menor que 100%, dependendo do tipo e concentração de sal utilizados. É presumido que o sal fique na água líquida e que o vapor no espaço superior seja de água pura quando somente água e sal constituem a solução. Sob estas condições, a umidade relativa pode ser unicamente relacionada à sucção total (Houston et al., 1994).