

## 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).

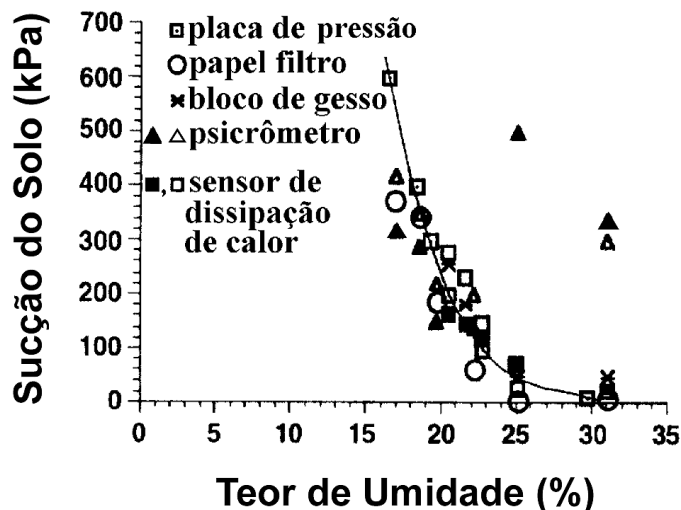
Lee & Wray (1995) fizeram uma comparação entre os diversos equipamentos e técnicas de medição de sucção. Eles obtiveram uma curva característica de sucção por meio de uma placa de pressão e a utilizaram para comparação entre as técnicas. O solo utilizado por eles foi considerado ter uma sucção osmótica 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.

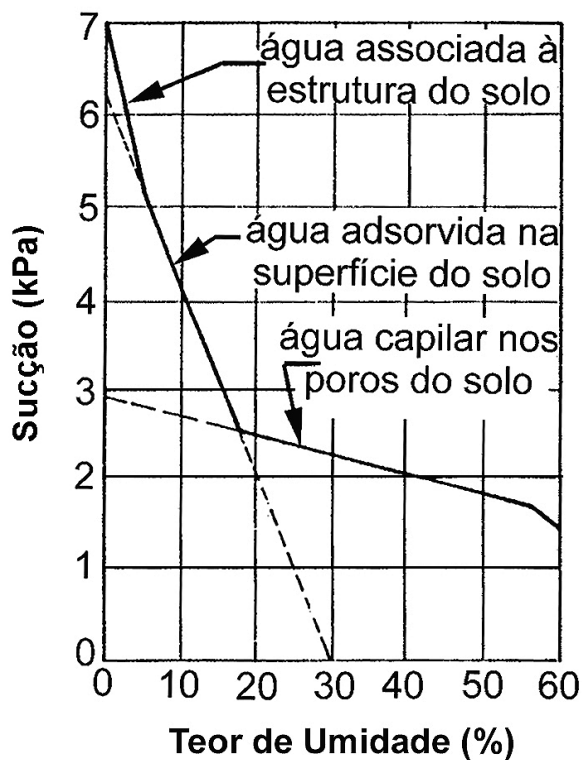
A sucção matricial, por sua vez, pode ser composta por duas parcelas (de Campos et al., 1992):

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

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:

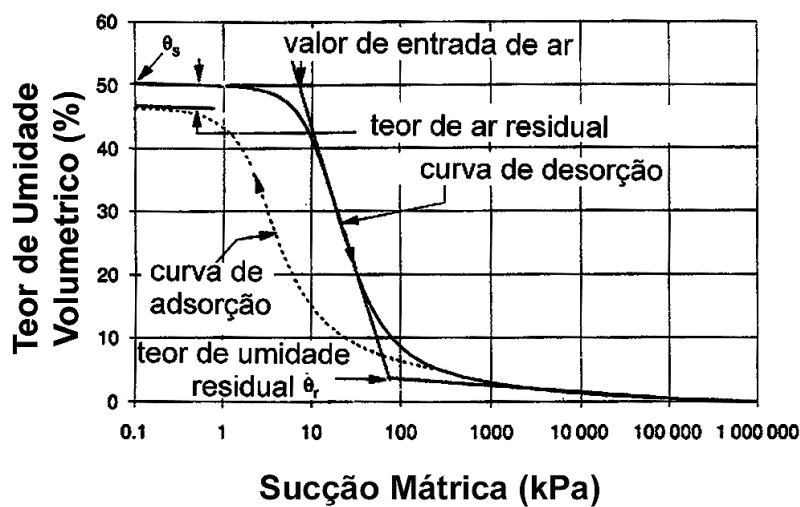
- ⇨ Geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais;
- ⇨ Influência do ângulo de contato solo-água, que muda em função da rugosidade do grão e de sua mineralogia;
- ⇨ Ocorrência de ar aprisionado nos poros, tendendo a reduzir o teor de umidade no processo de umedecimento.

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 à partir do qual um aumento da sucção matricial não produziria variações significativas no grau de saturação.

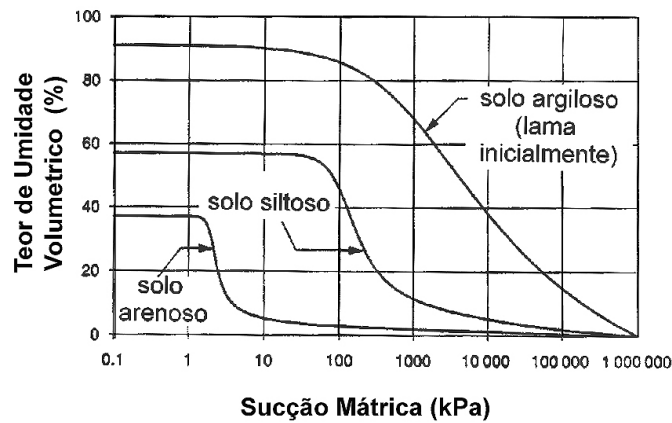
A Figura 5.3 representa um gráfico típico de curva característica para um solo siltoso, podendo se perceber a histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento. Algumas características da curva foram assinaladas. É possível perceber o valor de entrada de ar e o teor de umidade residual, análogo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

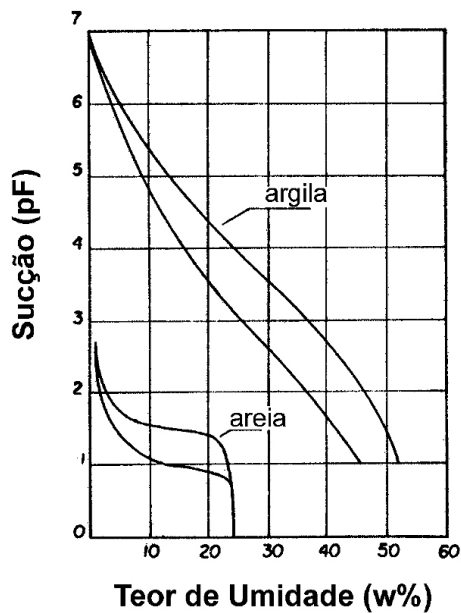


**FIGURA 5.3:** Curva Característica Típica de um Solo Siltoso  
(adaptado de Fredlund e Xing, 1994)

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:

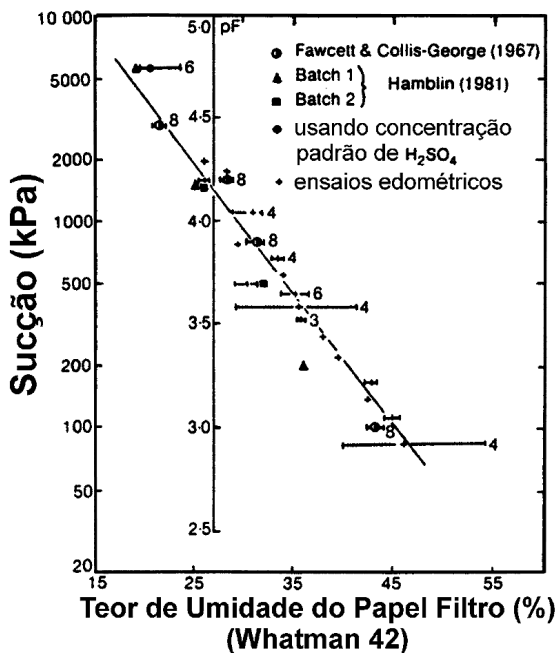
$$< 47\% \rightarrow 4.842 - 0.0622(w) \quad (5.3)$$

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

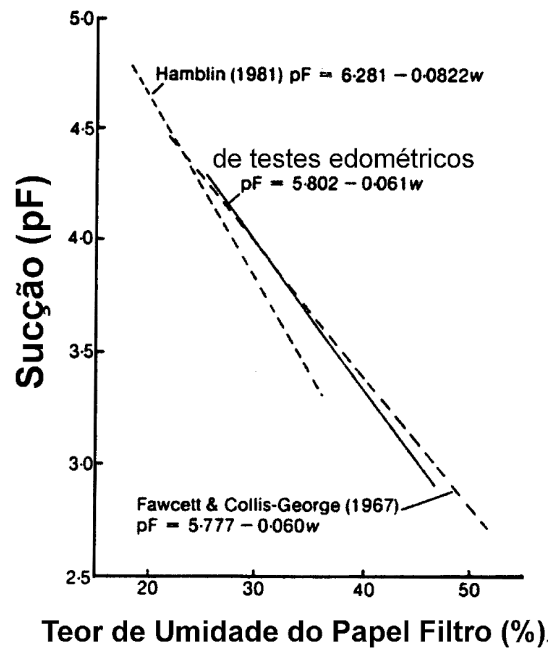
Nas equações acima, o  $w$  é o teor de umidade do papel filtro. Estas relações foram obtidas por Chandler et al. (1992), confirmadas por Swarbrick (1995) e, de acordo com Ridley & Wray (1995), são bem adequadas, principalmente para sucção matricial. Neste trabalho, a curva de calibração adotada foi 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.

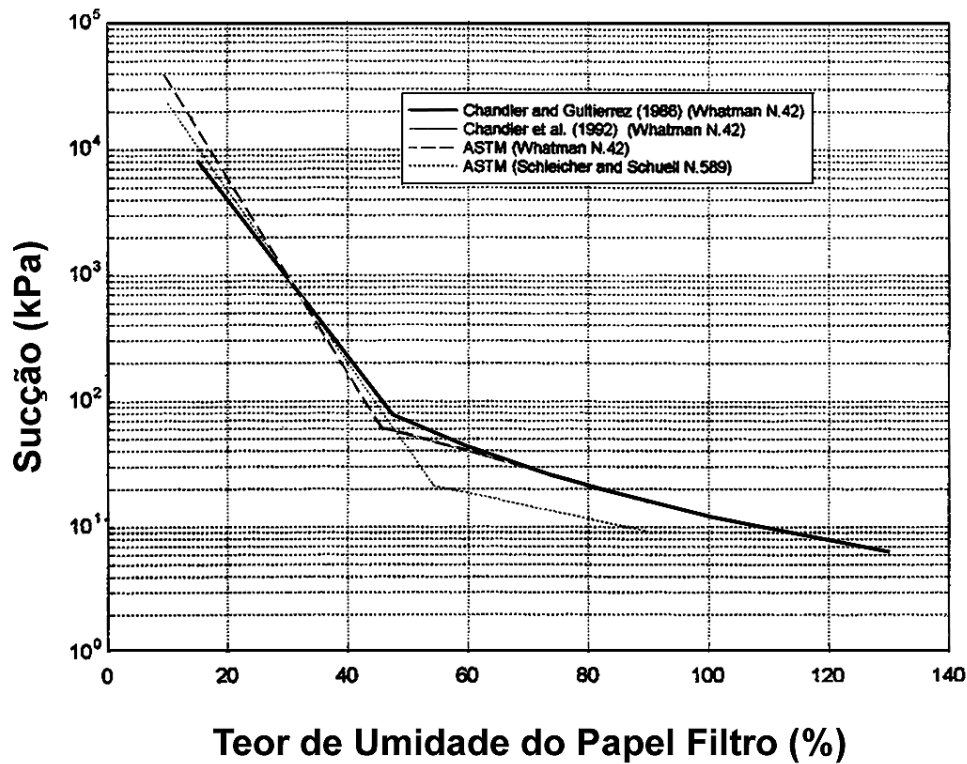


FIGURA 5.8: Curva de Calibração Adotada (papel Whatman's 42) (apud Marinho, 1994).

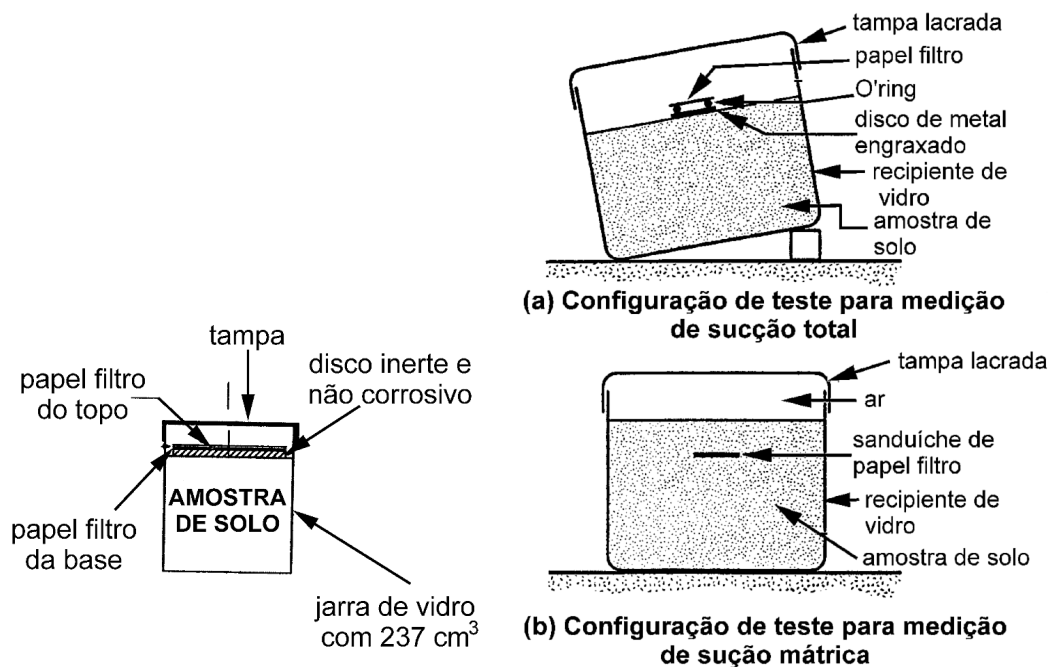
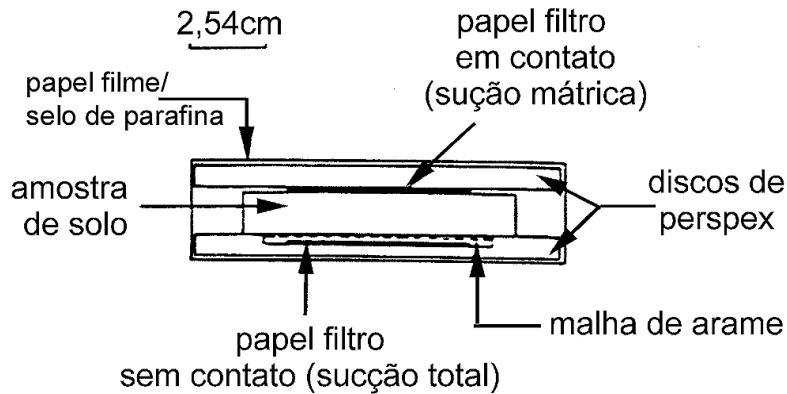


FIGURA 5.9: Esquema de Montagem de Ensaio de Papel Filtro (apud McQueen e Miller, 1968)

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).

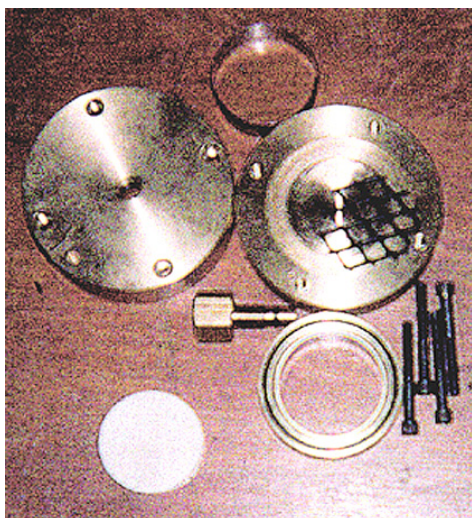
Tentativas tem sido feitas para aumentar a precisão de medida do teor de umidade do papel filtro com uma balança eletrônica que pode ser colocada dentro do recipiente com a amostra do solo. Ela cabe em vasilhas com 75 mm de diâmetro e permite a pesagem de 300gramas de amostra. A balança conta o número 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.

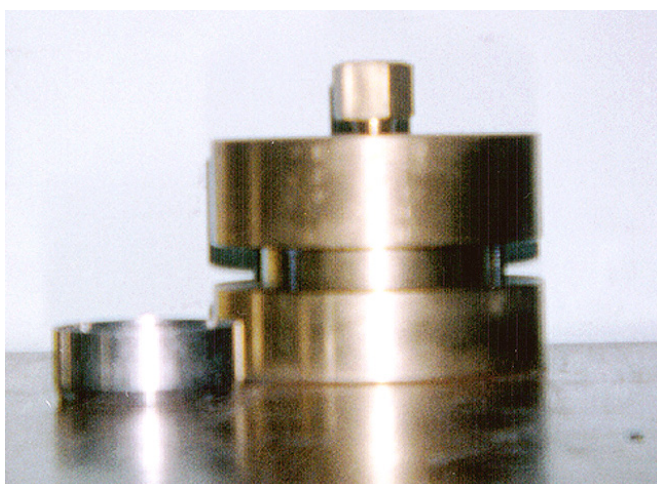
Os procedimentos utilizados no ensaio foram basicamente os descritos na designação da ASTM 5298-92. As amostras eram coladas para secar à partir de 100% de saturação. Foram usadas amostras secas ao ar sem pré-adensamento e pré-adensadas a 300kPa e 700kPa. Todas elas inicialmente eram homogeneizadas e 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  $t = 0$ .

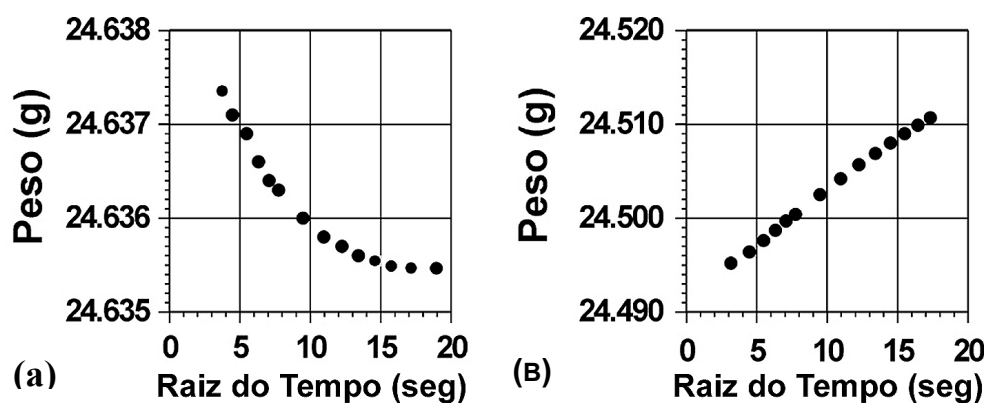
As curvas típicas de variação de umidade contra a raiz do tempo estão representadas na Figura 5.15, sendo que no item (a), está uma situação de perda de umidade ao se retirar da câmara de equalização, e no item (b), a de ganho de umidade após sair da estufa. Pode se notar a variação na massa do papel 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.

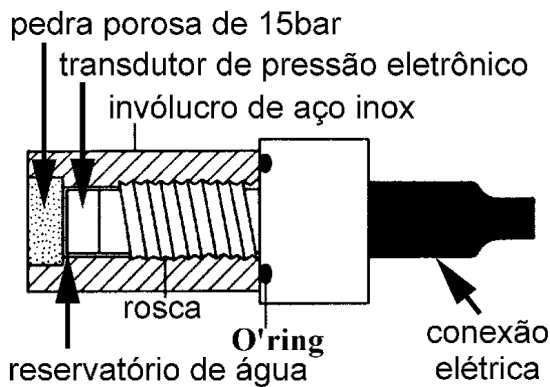
Para se verificar a adequabilidade do tempo de equalização, quatro câmaras com amostras supostamente idênticas eram montadas, e abertas após períodos diferentes. Em quase todos os casos, o prazo de sete dias foi suficiente, mesmo para baixos valores de sucção. Somente em muito poucos casos a equalização 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

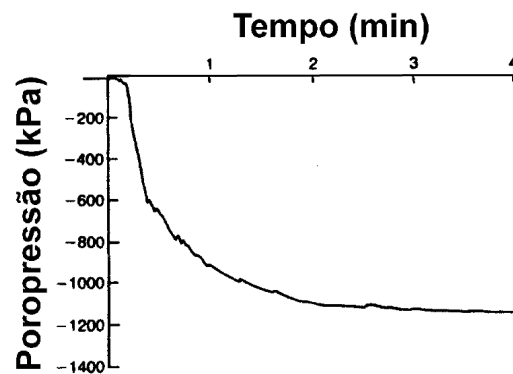
#### **Uso do Tensiômetro do Tipo *Imperial College***

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.

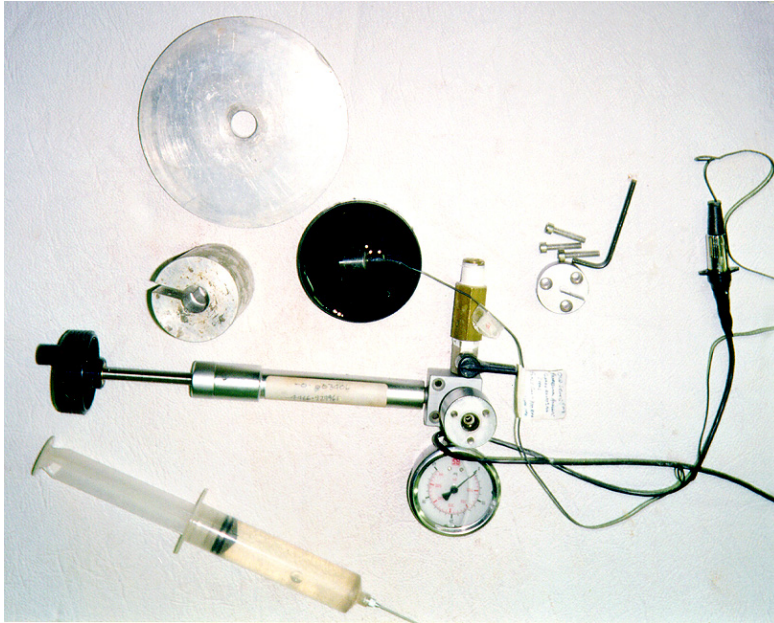
Marinho & Pinto (1997) também apresentaram um tensiômetro que permite medições de sucção maiores que 100kPa. Ele trabalharia devido a uma técnica que evitaria a cavitação. O instrumento também usa um pequeno volume de água (perto de 20mm<sup>3</sup>) e área superficial interna igualmente pequena. A técnica 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.

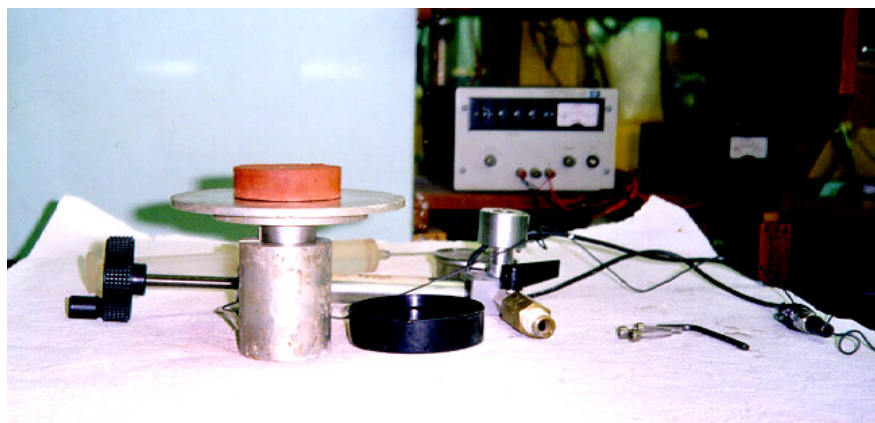
A Figura 5.19 mostra o transdutor sendo preparado para uso. Ele é colocado com a pedra porosa virada para cima e, sobre ele e colocado um prato metálico com um furo central, tudo ajustado de modo que a ponta porosa ficasse ligeiramente saliente. A Figura 5.20 mostra todo o conjunto montado, com a amostra 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



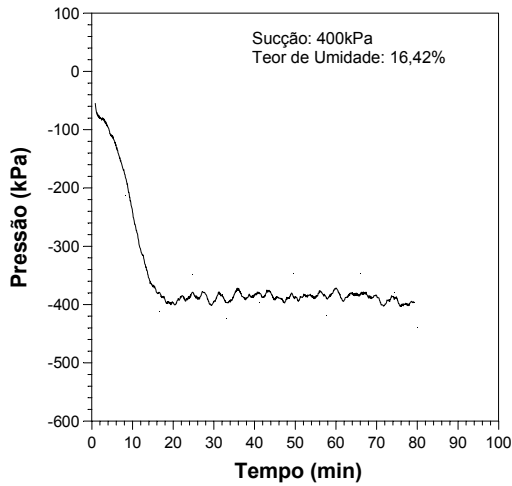
dispositivo. Uma vez iniciadas as leituras, a estabilização era considerada de ter ocorrido após a mesma pressão ser mantida constante por um período de aproximadamente de 15 a 20 min.

### 5.3.2.2

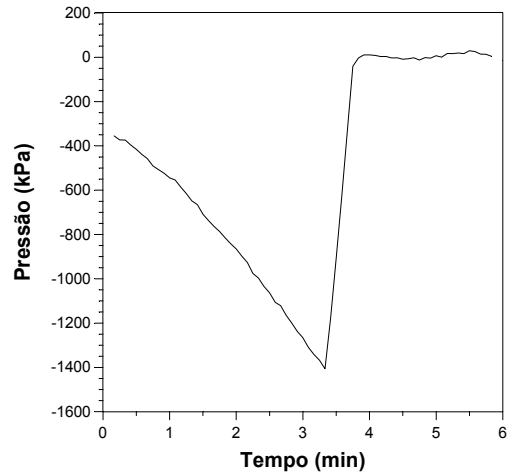
#### COMENTÁRIOS SOBRE OS ENSAIOS REALIZADOS COM O TENSÍMETRO

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.

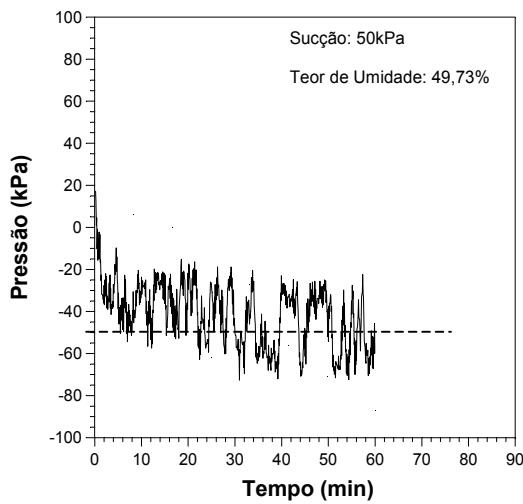
Alguma dificuldade foi encontrada na definição da espessura e do teor de umidade da pasta de caulim utilizada para melhorar o contato entre o solo e o tensiômetro. Acredita-se que por utilizá-la mais espessa ( $\cong 5\text{mm}$ ) em alguns casos, o equipamento não tendia para uma estabilização, mesmo 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).



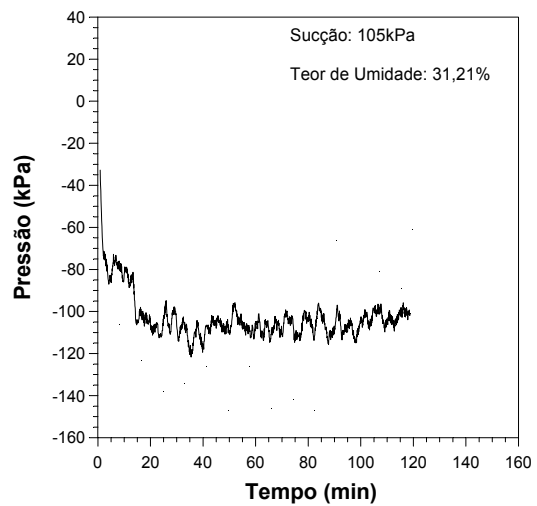
**FIGURA 5.21:** Resposta Típica Obtida com o Uso do Tensiômetro



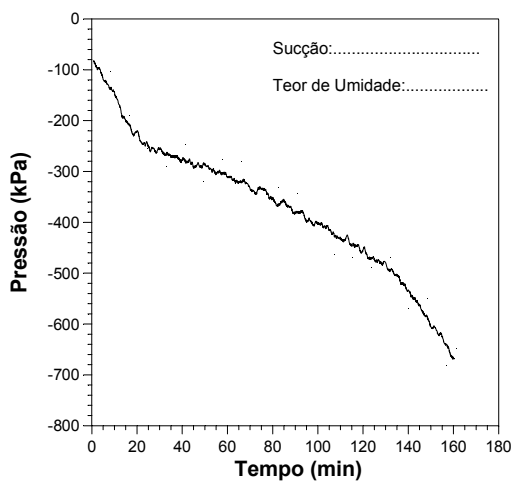
**FIGURA 5.22:** Resposta Típica Obtida Devido a Dessaturação do Tensiômetro



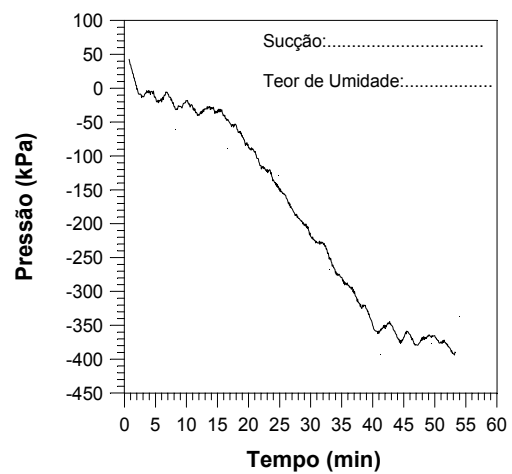
**FIGURA 5.23:** Oscilação de Leitura do Tensiômetro a Baixos Níveis de Sucção.



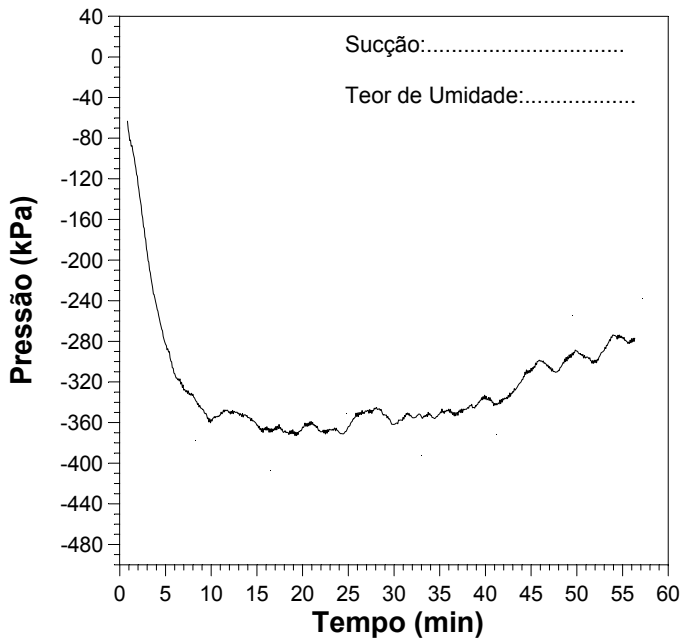
**FIGURA 5.24:** Leitura do Tensiômetro a Baixos Níveis de Sucção: Oscilação.



**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).

### 5.3.3.1

#### METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS DESSECADORES

O objetivo, portanto, com o uso de dessecador é ter um dispositivo onde se pode colocar as amostras sobre um líquido, de modo que transferência de umidade ocorra somente por absorção de vapor. A Figura 5.28 mostra alguns dessecadores com amostras do resíduo equalizando. Cada um dos dessecadores está com uma diferente concentração de solução de NaCl e água destilada, conforme sugerido em Jucá (1990). A sucção mínima medida por este processo foi em torno de 1MPa, e a máxima, 10MPa. Os conjunto foram deixados equalizar por aproximadamente 6 meses. Pesagens foram executadas periodicamente para verificar se as amostras haviam atingido uma constância de peso.

As amostras utilizadas foram as mais variadas possíveis, desde a lama de lavagem de bauxita até a lama vermelha OP não neutralizada. Porém, todas foram preparadas da mesma forma, ou seja, foram homogeneizadas ainda em baixo teor de sólidos, deixadas sedimentar e adensar por peso-próprio, exposta ao ressecamento ao ar e, só então conduzidas aos dessecadores. Os valores medidos foram plotados juntamente com os da técnica do papel filtro sem contato com o solo, sendo apresentados mais adiante.



**FIGURA 5.28:** Vista dos Dessecadores Usados para Medição de Sucção Total.

### 5.3.4

#### Uso de Tensiômetros Durante Ensaio de Ressecamento

Foram executados ensaios de secagem nas lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada, que estão descritos em Villar et al. (1997) e Villar & de Campos (1999) e serão mais detalhados em um capítulo mais adiante, semelhantes aos descritos por Swarbrick (1992). Para estes ensaios, foram construídas caixas de vidro isoladas lateralmente e na base, chamadas de lisímetros, que eram colocadas sobre balanças, para o acompanhamento da perda de umidade do solo ali depositado, durante uma simulação de um processo de ressecamento por meio de exposição a lâmpadas halógenas especiais, que emitem radiação semelhante à do sol.

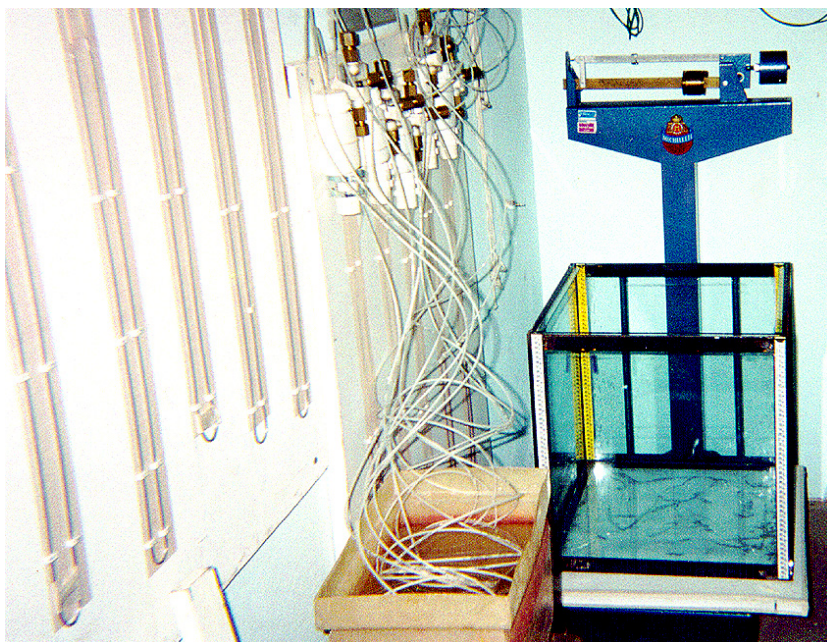
Nestas caixas, foram colocados tensiômetros de pequenas dimensões para o acompanhamento do desenvolvimento da sucção devido à variação do teor de umidade durante o processo de secagem. Estes tensiômetros foram feitos com tubos “saran”, de aproximadamente 0.3cm de diâmetro e ponta porosa de alta entrada de ar, com 0.5 cm de diâmetro. Eram, então, conectados a tubos de acrílico de 1,9cm de diâmetro, que funcionavam como reservatório de água, dispo de válvulas para permitir a sua circulação para remoção de bolhas de ar e ressaturação do sistema. Estes tensiômetros eram conectados a uma coluna de mercúrio. Teoricamente, tinham capacidade de medir sucções de até 100kPa, justamente o nível de sucção para o qual se encontrou dificuldades de medição com o uso das outras técnicas aqui mencionadas.

#### 5.3.4.1

##### METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS TENSIÔMETROS DURANTE OS ENSAIOS DE RESSECAMENTO

A Figura 5.29 dá uma idéia da montagem dos tensiômetros. Eles estão dentro do recipiente com água deairada, no centro da figura, parte inferior. No canto esquerdo, pode se notar as colunas de mercúrio através das quais eram feitas as leituras. Elas possuíam um sistema de retirada de bolhas de ar e saturação no topo. Bem acima do recipiente com água onde estão as pedras porosas, estão

reservatórios de acrílico, que também possuíam válvulas para permitir a circulação de água e retirada de bolhas de ar. Cada tensiômetro era conectado a um reservatório deste em separado, que por sua vez eram ligados à uma coluna de mercúrio.



**FIGURA 5.29:** Vista do Esquema Montado para os Ensaio de Ressecamento: Detalhe dos Tensiômetros.

Foram usadas duas grandes caixas de secagem. Na 01, onde não haveria amostragem, foram distribuídos 5 tensiômetros a 5cm dentro do solo, próximo a cada um dos cantos e um no centro. Dois foram instalados a 10cm, distantes entre si 25cm e a 12,5cm do centro da caixa. Um outro tensiômetro foi colocado a 15cm dentro do solo, também centrado, e outros dois a 20 cm, seguindo a disposição daqueles instalados a 10cm. Na caixa 02, de amostragem, foram instalados 3 tensiômetros, todos no centro da caixa, a 5cm, a 10 e a 20cm dentro do solo. Termopares foram colocados próximos a cada tensiômetro, em ambas as caixas. Os resíduos eram muito bem homogeneizados antes da colocação dos tensiômetros, que tiveram, portanto, instalação facilitada devido à baixa consistência do material no início do ensaio. A leitura de referência inicial foi tomada com os tensiômetros dentro de água, na altura onde seriam instalados.

Como eram realizadas amostragens periódicas, o valor da sucção podia ser diretamente relacionado com o teor de umidade medido. Durante todo o ensaio, como a perda de umidade ao longo do tempo também era monitorada, o teor de umidade aproximado de cada camada onde estavam instalados os instrumentos também podia ser estimado, caso a amostragem não tivesse sido realizada naquele dia. Assim, pôde ser obtida a relação sucção contra teor de umidade em peso ao longo de todo o ensaio, tanto para valores medidos (obtidos das amostragens) como calculados (estimados das leituras de perda de umidade), e compará-la com os valores fornecidos pelas outras técnicas.

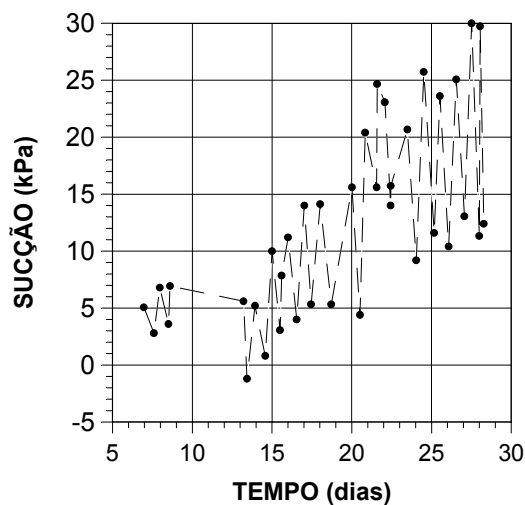
#### **5.3.4.2**

#### **COMENTÁRIOS SOBRE OS ENSAIOS REALIZADOS COM OS TENSÍÔMETROS DURANTE OS ENSAIOS DE RESSECAMENTO**

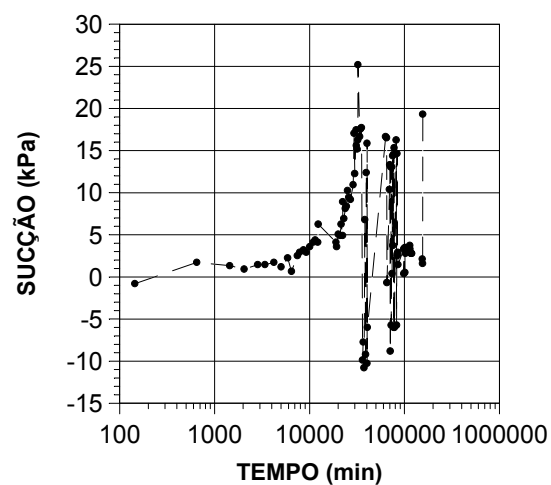
Foram feitos ensaios nestes resíduos com duração de até 120 dias. Os valores de sucção medidos pelos tensiômetros na camada superficial uma semana após o início do ensaio, era de apenas 0.7kPa, aproximadamente. Cerca de um mês após, os valores de sucção registrados na superfície eram de 22kPa e, a 20cm de profundidade, 17kPa. Estes tensiômetros só responderam adequadamente até um nível de sucção da ordem de 30kPa, dessaturando à partir daí. Se ao invés de água como fluido de saturação tivesse sido utilizado um outro, mais viscoso e com um ponto de ebulição maior, provavelmente se teria medido níveis maiores de sucção. A variação da leitura ao longo do tempo destes instrumentos será apresentada mais detalhadamente no capítulo que discute os ensaios de ressecamento.

Foi verificado que a temperatura da sala durante os ensaios influenciava muito a leitura da coluna de mercúrio, provavelmente devido à sua dilatação. Elas eram bem mais baixas enquanto as lâmpadas estavam acesas e a temperatura da sala estava acima de 45°C (chegaram a mais de 60°C em uma ocasião), aumentando sensivelmente após o ensaio desligado, quando então a temperatura descia rapidamente para em torno dos 25°C. Um exemplo desta oscilação das leituras pode ser visto na Figura 5.30, que mostra os registros efetuados por um

tensiômetro instalado a 20 cm de profundidade. Por conta deste comportamento, o procedimento adotado foi sempre fazer as leituras dos tensiômetros pela manhã, após um período de no mínimo 8 horas de equalização da temperatura da camada de solo com o ambiente. Um exemplo de gráfico de leituras à partir deste procedimento pode ser visto na Figura 5.31, se tratando de um tensiômetro colocado à 5cm de profundidade. Também pode ser verificado aí que o ponto de dessaturação do instrumento e que as tentativas de novamente saturá-lo não surtiram efeito à partir de então.



**FIGURA 5.30:** Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Oscilação Causada Devido Efeito de Temperatura.



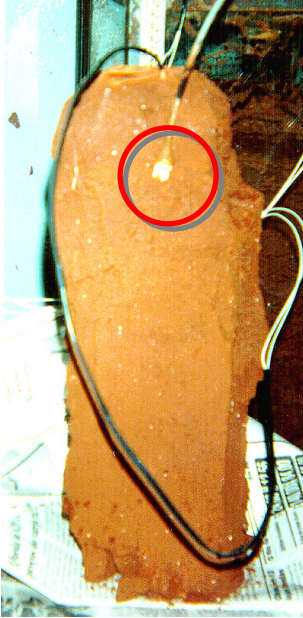
**FIGURA 5.31:** Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Resultado Típico, Mostrando a Dessaturação ao Final.

Os efeitos de temperatura em leituras de tensiômetros pode ser melhor estudado e compreendido por exemplo em Blutters & Cardon (1998); Warrick et al. (1998); Butcher et al. (1999) e Biesheuvel et al. (1999).

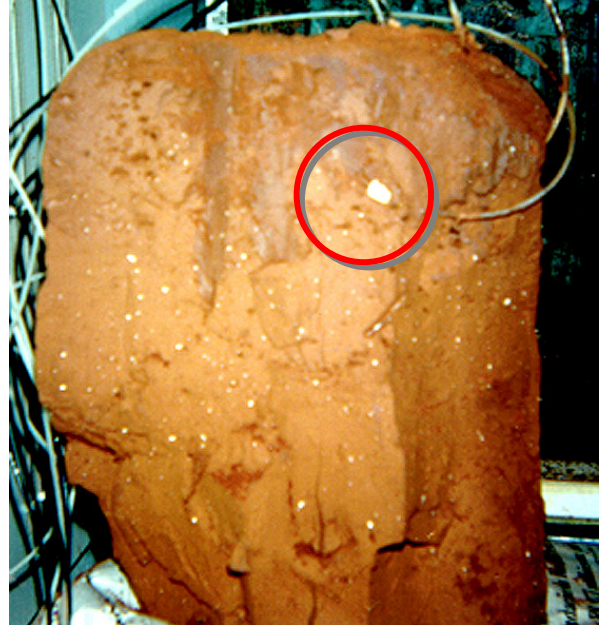
A Figura 5.32 mostra um tensiômetro após um ensaio ser desmontado. Pode ser notado que houve muito boa aderência e contato do resíduo em torno da pedra porosa, o que é uma indicação de adequabilidade da forma de instalação. Em um único caso, porém, um dos tensiômetros teve sua ponta forçada para cima, como pode se visto na Figura 5.33. Porém, o bom contato do resíduo com a pedra porosa foi mantido. Em alguns casos, o tensiômetro condicionou o local de abertura de trincas, de tal modo que alguns deles ficaram com a face exposta no



interior da trinca, à medida que o ressecamento avançou. Porém, quando isso aconteceu, eles já tinham dessaturado, de modo que não houve prejuízo nas leituras.



**FIGURA 5.32:** Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Oscilação Devido Efeito de Temperatura.



**FIGURA 5.33:** Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Resultado Típico, Com Dessaturação ao Final.

## 5.4

### Resultados Obtidos: Curvas Características dos Resíduos

Para a montagem das curvas características dos resíduos, todos os resultados obtidos das diversas medições realizadas eram plotados em um mesmo gráfico em relação ao teor de umidade gravimétrico. Juntamente com as curvas de secagem, foi então estabelecida uma curva entre estas grandezas, eliminado-se os pontos que não se encaixavam na tendência geral apresentada pela maioria das medidas. Com essa relação tendo sido estabelecida, ela foi tomada como referência para, novamente em conjunto com as curvas de secagem, chegar à função que associava a sucção e o teor de umidade volumétrico, o grau de saturação e o índice de vazios. Ou seja, os pontos da curva adotada entre sucção e

teor de umidade gravimétrico eram diretamente correlacionados às outras grandezas por intermédio das curvas de secagem previamente determinadas. São estes os resultados que serão apresentados à seguir.

#### 5.4.1

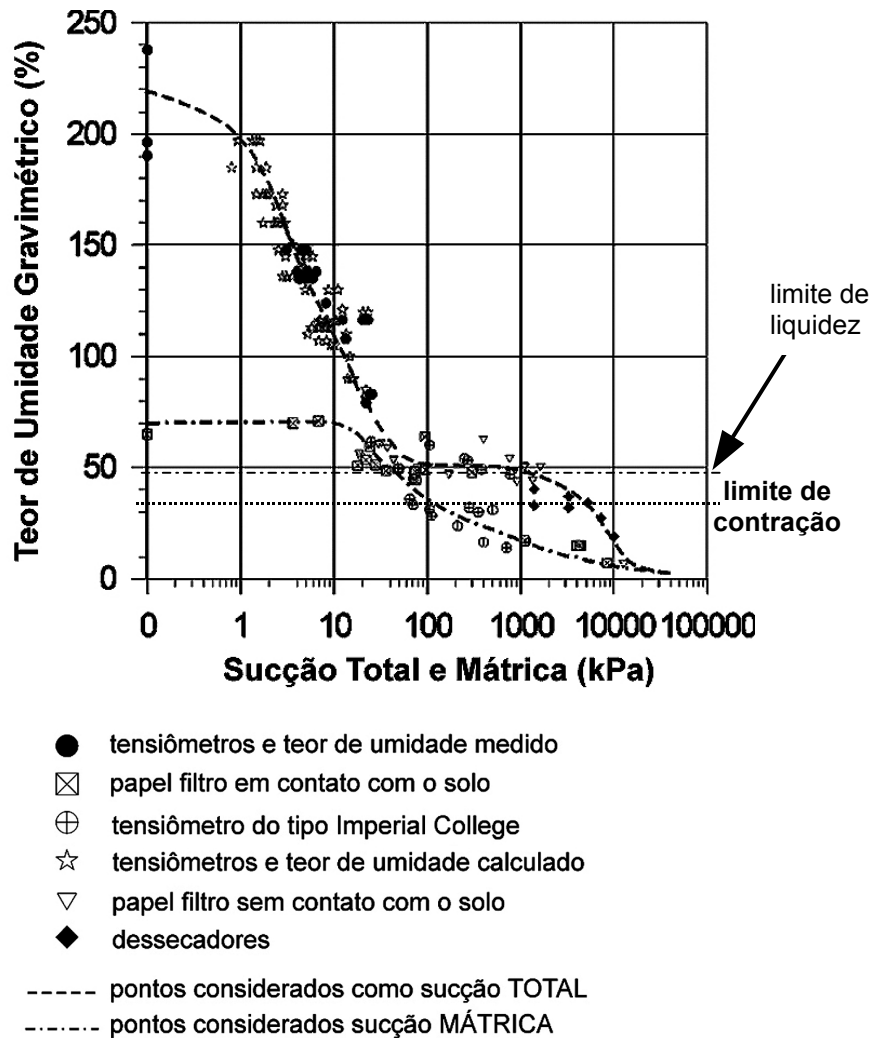
##### **Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada**

A Figura 5.34 resume todas as medidas efetuadas através das diversas técnicas citadas anteriormente na lama vermelha OP neutralizada. Nela também está a curva que foi interpretada como sendo a relação entre o teor de umidade gravimétrico e a sucção.

A tendência foi considerar todas as leituras dos tensiômetros em contato com o resíduo durante o ensaio de ressecamento como sendo de sucção total, ao invés de mátrica, como previamente admitido em Villar & de Campos (2001). Como pelas curvas de secagem pode se checar que todas estas medidas foram realizadas no rejeito ainda saturado, foi admitido que o que estava sendo medido foi sucção total devido à uma eficiência osmótica das pedras porosas destes instrumentos. Além disso, a possibilidade de elevada sucção osmótica era esperada, se for levada em consideração a química do fluido de preenchimento dos poros, uma mistura de soda cáustica com ácido sulfúrico, que apresenta uma elevada concentração iônica.

Uma consideração porém deve ser feita sobre a montagem desta curva da Figura 5.34. Na verdade ela foi feita em diferentes etapas, sendo que nesta faixa de medidas inicial só estão resultados de amostras que foram secas à partir de um baixo teor de sólidos e experimentaram uma grande variação volumétrica durante o ressecamento. As outras medidas efetuadas com os outros instrumentos foram executadas em amostras já à partir deste ensaio de ressecamento desmontado e, em poucos casos, de outras amostras que foram preparadas do mesmo jeito (sedimentadas, adensadas por peso próprio e expostas ao ressecamento), mas inicialmente com um teor de sólidos ligeiramente maior, para depois serem submetidas à um procedimento de moldagem antes dos ensaios. Não se sabe se este processo de moldagem possa ter provocado o amolgamento nas amostras, a

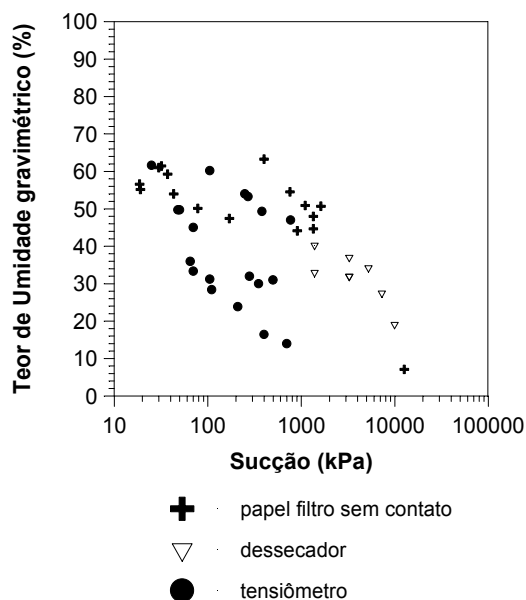
tal ponto que na verdade se teria dois materiais diferentes à partir de um teor de umidade aproximado de 60%.



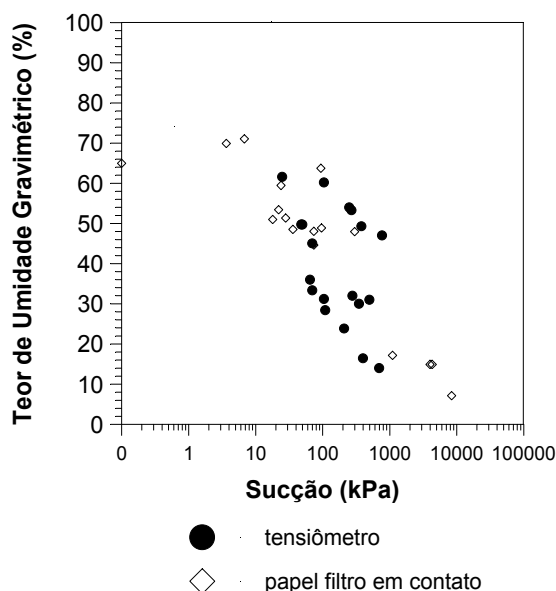
**FIGURA 5.34:** Resultados Obtidos das Diferentes Técnicas de Medição de Sucção para a Lama Vermelha OP Neutralizada.

Para proporcionar uma comparação direta entre algumas medidas efetuadas pelas diferentes técnicas, elas foram plotadas em separado da curva da Figura 5.34. Assim, na Figura 5.35, estão os dados obtidos pelo dessecador, considerados como de sucção total, os do papel filtro sem contato com o solo, também supostamente resultados de sucção total, e os medidos pelo transdutor do tipo Imperial College. Pode ser verificado que os resultados medidos pela técnica do papel filtro sem contato se ajusta bem aos obtidos com os dessecadores. Os

resultados do tensiômetro com os do papel filtro ficaram diferentes entre si para valores mais baixos de umidade. Na região do ponto de entrada de ar porém, o que se pode perceber é que vários registros do tensiômetro acusam elevados valores de sucção, se confundindo com os valores do papel filtro sem contato. Os valores mais baixos de sucção estarem no mesmo nível entre as diferentes técnicas na região do ponto de entrada de ar é algo compreensível, uma vez que neste teor de umidade, sucção total e matricial se confundem. Não foi encontrada nenhuma explicação para os valores mais altos de sucção registrados pelo tensiômetro.



**FIGURA 5.35:** Comparação entre as Leituras Realizadas Pelo Papel Filtro Sem Contato, o Dessecador e o Tensiômetro.



**FIGURA 5.36:** Comparação entre as Leituras Realizadas pelo Papel Filtro em Contato e o Tensiômetro do Tipo Imperial College.

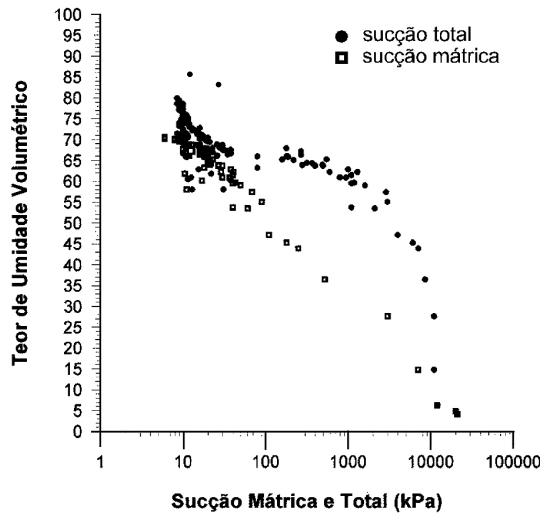
Na Figura 5.36, estão os registros feitos pelo tensiômetro do tipo Imperial College e aqueles obtidos pela técnica do papel filtro, com o papel em contato com o resíduo. Pode ser verificado que há uma melhor concordância entre os valores fornecidos pelas duas técnicas. Também pode ser observado que o papel filtro em contato com o resíduo igualmente registrou alguns valores de sucção

elevados para teores de umidade em torno de 50%. Com base nestes resultados, pode se chegar a conclusão que os registros efetuados pelo tensiômetro do tipo Imperial College são em sua maioria, de sucção mátrica.

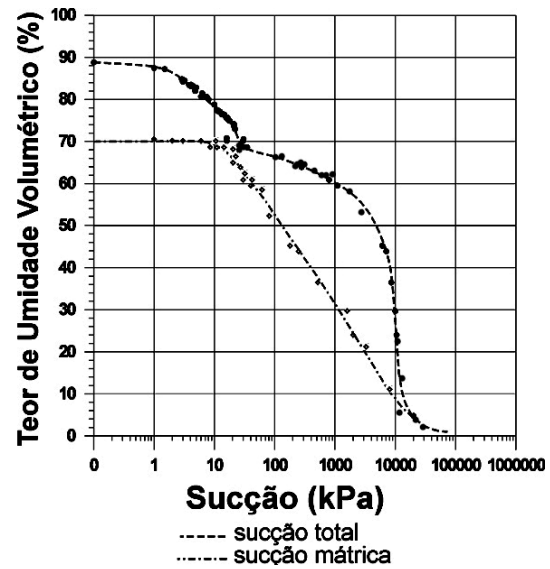
Um aspecto interessante de notar na Figura 5.34 é que a curva característica de sucção total mudaria de inflexão para se igualar à sucção mátrica à partir do teor de umidade equivalente ao limite de plasticidade, que neste caso está muito próximo ao limite de contração. Na figura também ressalta o teor de umidade considerado como limite de liquidez obtido pelo aparelho de Casagrande. Ele é menor que o valor de entrada de ar do resíduo. Como amostras foram moldadas com teor de umidade acima de 60%, fica evidente que o limite de liquidez determinado não está correto. O formato da curva característica de sucção total, com a acentuada descontinuidade na região do ponto de entrada de ar, é provavelmente devido a que grande parte da contração sofrida pelo resíduo durante o processo de secagem ocorreu justamente neste trecho de leituras executadas por meio dos mini tensiômetros, com teor de umidade variando de 220 a 60%. E a pressão causada nestes instrumentos devido à contração é justamente a inversa da provocada pela sucção. Assim, os tensiômetros na verdade devem ter registrado um valor intermediário de pressão entre a contração exercida pela lama ao secar e a sucção.

A Figura 5.37 mostra todas as leituras realizadas em relação ao teor de umidade volumétrico. A Figura 5.38 representa a mesma relação após eliminar os pontos que ficaram ou longe da tendência escolhida para a sucção com o teor de umidade gravimétrico, considerada base nas interpretações, ou quando se verificou as propriedades físicas da amostra usada para a medição da sucção em relação às das curvas de secagem e estas não se ajustaram. Por exemplo, se o teor de umidade volumétrico calculado estivesse muito fora da relação pré estabelecida entre esta grandeza e o teor de umidade gravimétrico de sua curva de secagem estabelecida previamente, essa medida foi ignorada. Esta comparação foi útil especialmente na definição da curva na região do ponto de entrada de ar, onde ocorria uma dispersão muito grande das leituras. Por estas figuras, é medido de acordo com a Figura 5.3, uma sucção de entrada de ar de aproximadamente 15kPa e um teor de umidade volumétrico residual de 4%. A Figura 5.39 apresenta a relação obtida entre a sucção e grau de saturação após ter sido feita a

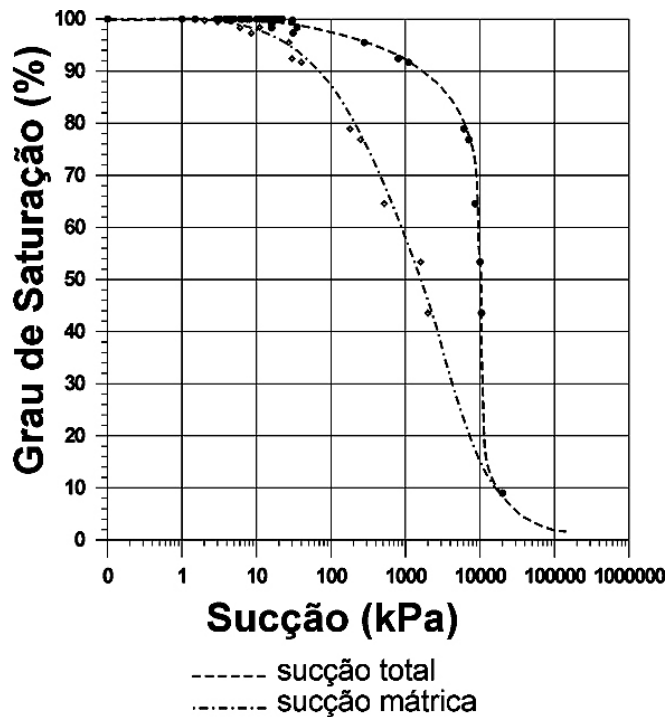
interpretação. O grau de saturação residual foi encontrado de ser 7% por esta figura.



**FIGURA 5.37:** Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada Antes da Interpretação.

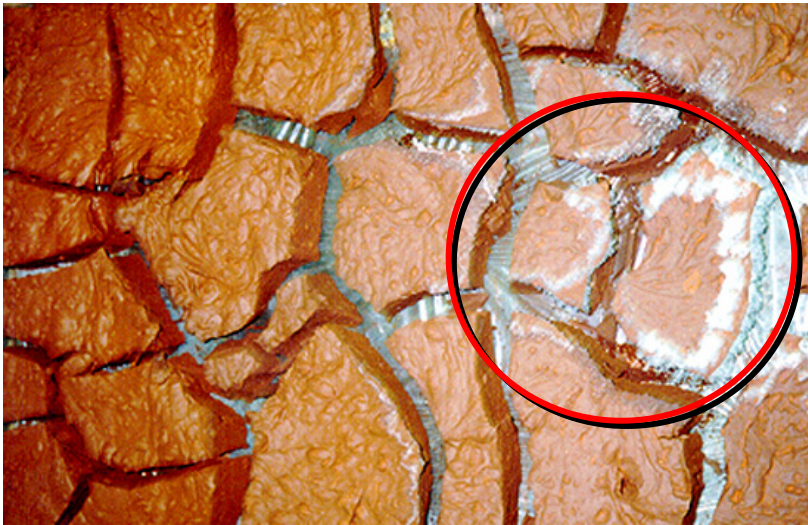


**FIGURA 5.38:** Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada Depois de Feita a Interpretação.



**FIGURA 5.39:** Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada em Relação ao Grau de Saturação Após a Interpretação.

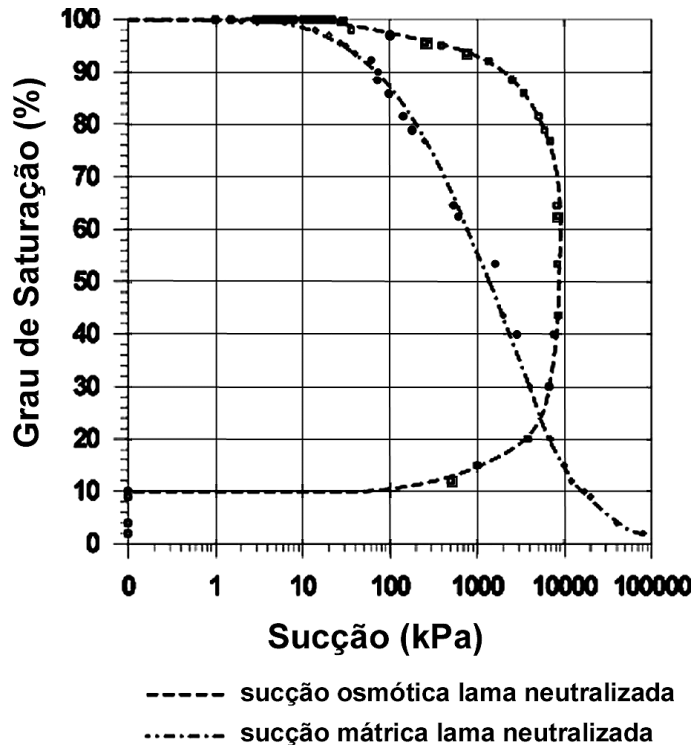
Devido ao tipo de fluido presente, uma mistura de soda cáustica com ácido sulfúrico, é esperado existir uma elevada sucção osmótica nestes resíduos. O pó branco formado na superfície do material exposto ao ressecamento deve ser uma cristalização deste fluido na superfície. A análise deste pó através de difração por raios X, indicou que ele é de uma mistura de sódio com ácido sulfúrico, e foi classificado como thernardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). O início de sua formação pode ser visto pela Figura 5.40.



**FIGURA 5.40:** Formação de Cristais durante Ressecamento da Lama Vermelha OP Neutralizada .

Para se ter uma idéia do nível de sucção osmótica que poderia ser esperado neste material, foi feito um gráfico de onde simplesmente se subtraiu os valores de sucção matricial dos de sucção total apresentados nas Figuras 5.38 e 5.39. O resultado pode ser visto na Figura 5.41. Esta figura não representa os valores reais da sucção osmótica, especialmente para baixos valores de teor de umidade. A tendência é de ocorrer um aumento da sucção osmótica com o avanço do processo de ressecamento, à medida que também vai ocorrendo uma diminuição da capacidade de medição de sucção mátrica, de tal modo que a determinação da primeira via diferença da sucção total pela segunda fica comprometida (Marinho, 2002). Para teores de umidade mais elevados, contudo, pode-se ter uma melhor noção de qual seria o nível da sucção osmótica, e pela figura em questão, ele é verificado de estar aproximadamente em torno de

2000kPa quando o solo apresenta um grau de saturação de 90%. A comprovação, porém, só poderia ser feita via medição direta.



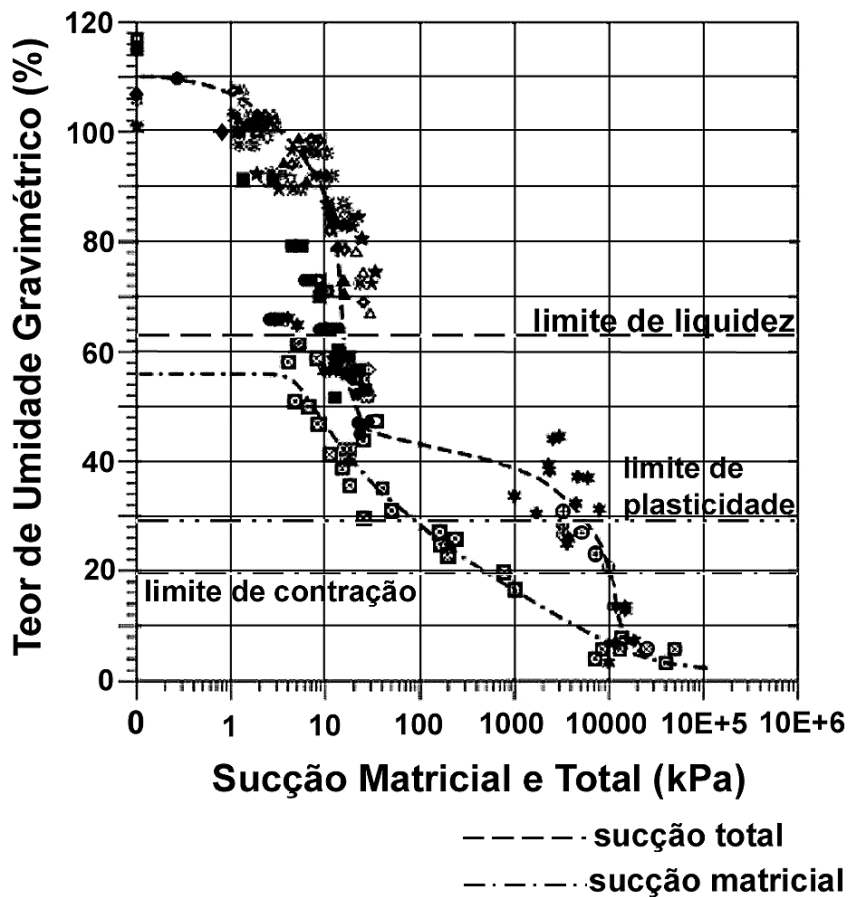
**FIGURA 5.41:** Estimativa Precária do Nível de Sucção Osmótica na Lama Vermelha OP Neutralizada .

#### 5.4.2

##### Curva Característica da Lama Vermelha OP Não Neutralizada

Com a lama vermelha OP não neutralizada não foram executados ensaios com o tensiômetro do tipo IC. O motivo foi por já se ter uma grande bem razoável de medidas executadas com as outras técnicas. A Figura 5.42 resume todos os valores obtidos, mais a interpretação que foi realizada por estes pontos, definindo a curva característica de sucção matricial e total. As leituras feitas com os mini tensiômetros instalados no resíduo durante a secagem foram considerados como sucção total pelo mesmo motivo explicado para o caso da lama vermelha OP neutralizada. As considerações feitas sobre preparação das amostras também se aplicam para este caso.





- Sucção medida no ponto 01 – caixa 01 – 5cm de prof.
- ◇ Sucção medida no ponto 02 – caixa 01 – 5cm de prof.
- ◆ Sucção medida no ponto 03 – caixa 01 – 5cm de prof.
- Sucção medida no ponto 04 – caixa 01 – 5cm de prof.
- Sucção medida no ponto 05 – caixa 01 – 5cm de prof.
- ◻ Sucção medida no ponto 13 – caixa 02 – 5cm de prof.
- ◊ Sucção medida no ponto 06 – caixa 01 – 10cm prof.
- △ Sucção medida no ponto 07 – caixa 01 – 10cm prof.
- ▲ Sucção medida no ponto 14 – caixa 02 – 10cm prof.
- ☆ Sucção medida no ponto 08 – caixa 01 – 15cm prof.
- ★ Sucção medida no ponto 09 – caixa 01 – 20cm prof.
- ⊕ Sucção medida no ponto 10 – caixa 01 – 20cm prof.
- ✱ Sucção medida no ponto 15 – caixa 02 – 20cm prof.
- ⊗ Papel filtro em contato
- ★ Papel filtro sem contato
- ⊕ Dessecadores

**FIGURA 5.42:** Resultados Obtidos das Diferentes Técnicas de Medição de Sucção para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

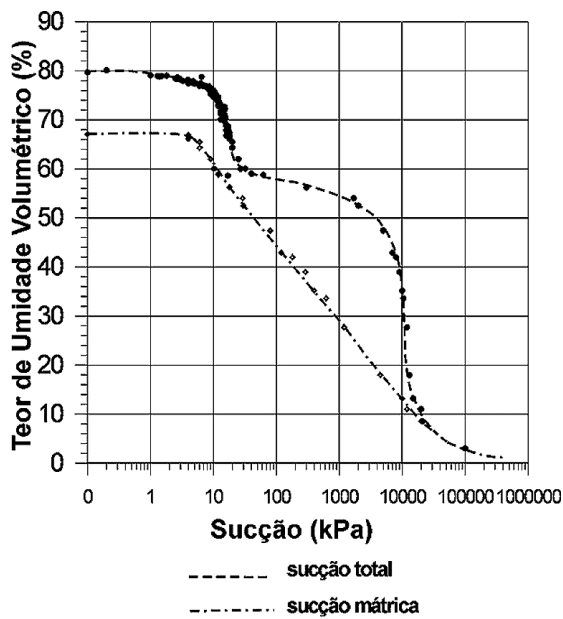
Na Figura 5.42 também pode ser notado que a curva característica de sucção total mudaria de inflexão para se igualar à sucção matricial próximo ao

teor de umidade equivalente ao limite de plasticidade, como no caso da lama vermelha OP neutralizada. O formato da curva característica de sucção total, com a acentuada descontinuidade, também é creditada de ser devido a que grande parte da contração sofrida pelo resíduo durante o processo de secagem ocorreu justamente neste trecho de leituras executadas por meio dos mini tensiômetros, com teor de umidade variando de aproximadamente 120 a 50%. E, como assumido anteriormente, os tensiômetros na verdade devem ter registrado um valor intermediário de pressão entre a contração exercida pela lama ao secar e a sucção.

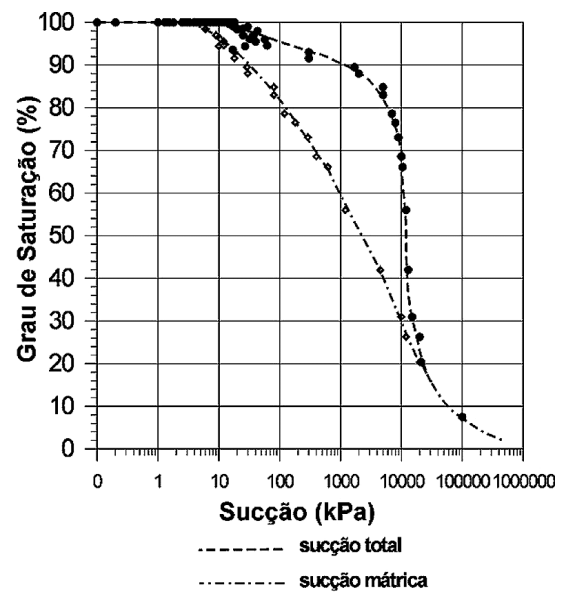
A Figura 5.43 representa a relação entre a sucção e o teor de umidade volumétrica, obtida à partir das curvas de secagem e já após eliminar os pontos no mesmo procedimento já explicado anteriormente. Por esta figura, pode ser verificada uma sucção de entrada de ar de aproximadamente 5kPa, contra 15kPa da lama vermelha OP neutralizada, e um teor de umidade volumétrico residual de 5%, muito próximo do encontrado para a lama vermelha OP neutralizada (4%). Esta diferença no valor de entrada de ar entre os dois resíduos não pode ser creditada só ao tipo de fluido, uma vez que as duas lamas tiveram condições iniciais ligeiramente diferentes. A lama vermelha OP neutralizada foi preparada com um teor de sólidos inicial muito mais baixo que a não neutralizada. Isto pode ter levado à formação de estruturas diferentes após a sedimentação e o adensamento. A Figura 5.44 apresenta a relação obtida entre a sucção e grau de saturação, de onde foi verificado que o grau de saturação residual foi encontrado de ser 6%, também muito próximo ao registrado para a lama vermelha OP neutralizada (7%).

E também com o intuito de se ter uma idéia do nível desta sucção osmótica no resíduo, foi feito um gráfico semelhante ao da lama vermelha OP neutralizada, de onde simplesmente se subtraiu os valores de sucção mátrica dos de sucção total apresentados nas Figuras 5.43 e 5.44. O resultado pode ser visto na Figura 5.45, em relação ao teor de umidade volumétrico, e na 5.46, em relação ao grau de saturação. Sabe-se muito bem que este tipo de curva não representa corretamente o valor da sucção osmótica, como já discutido anteriormente, mas o valor registrado nestas figuras para elevados teores de umidade e baixos níveis de sucção matricial medidos devem estar próximos do real. Assim, pode ser verificado pela figura que para um grau de saturação de 90%, há uma sucção

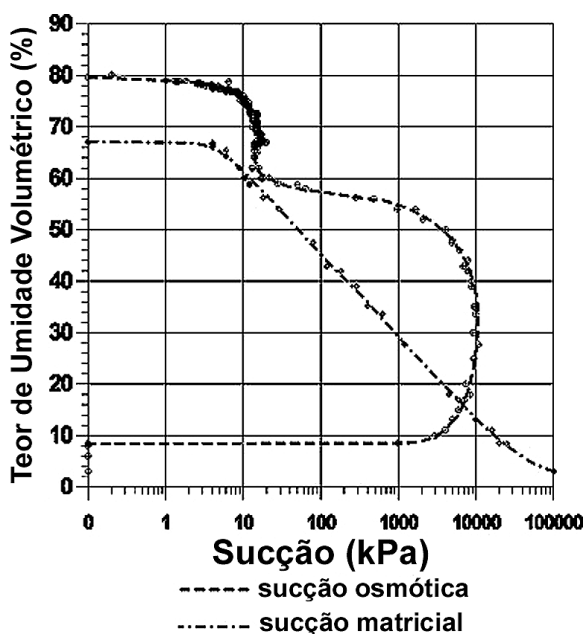
osmótica em torno 1000kPa, menor da que foi registrada para a lama vermelha OP neutralizada, que para o mesmo grau de saturação, já acusava 2000kPa.



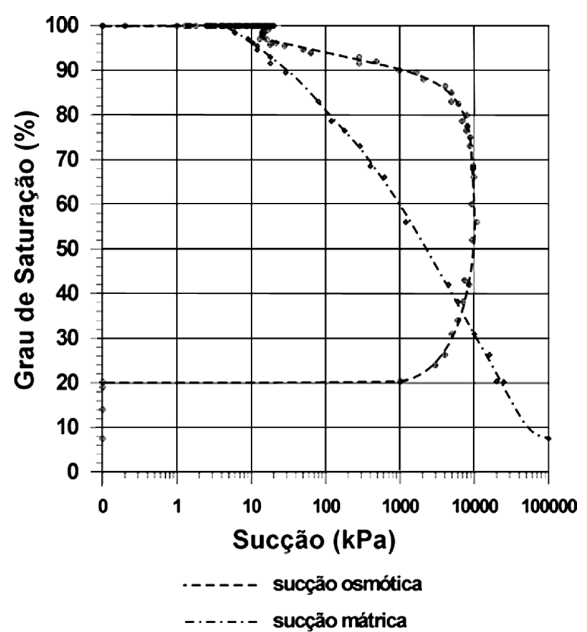
**FIGURA 5.43:** Curva Característica da Lama Vermelha OP Não Neutralizada em Relação ao Teor de Umidade Volumétrica Após a Interpretação.



**FIGURA 5.44:** Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada em Relação ao Grau de Saturação Após a Interpretação.



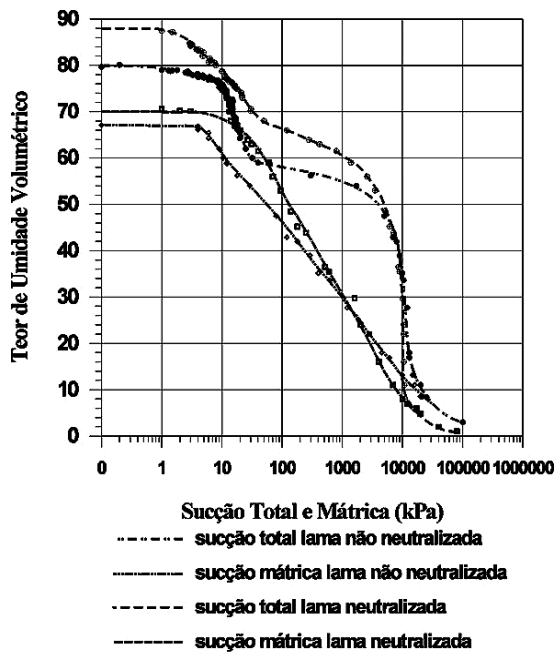
**FIGURA 5.45:** Estimativa Precária do Nível de Sucção Osmótica em Relação ao Teor de Umidade Volumétrica na Lama Vermelha OP Neutralizada.



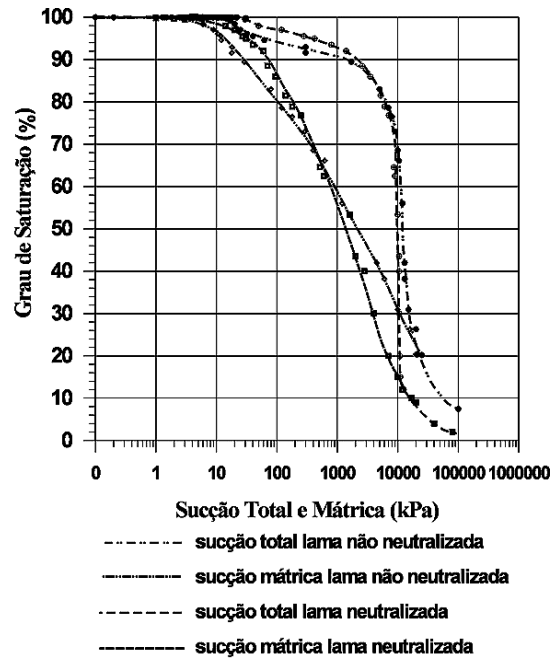
**FIGURA 5.46:** Estimativa Precária do Nível de Sucção Osmótica em Relação ao Grau de Saturação na Lama Vermelha OP Neutralizada.

Para facilitar a comparação entre as curvas características dos dois resíduos, elas foram plotadas num mesmo gráfico. Na Figura 5.47 e 5.48, estão tanto as curvas de sucção total e matricial em relação ao teor de umidade volumétrico e o grau de saturação respectivamente. Na Figura 5.49 e 5.50, estão somente as curvas de sucção matricial, em relação ao teor de umidade volumétrico e grau de saturação. Por aí, fica mais claro ver que a lama vermelha OP não neutralizada apresenta menores níveis de sucção a elevados teores de umidade, porém, com o ressecamento, atinge níveis de sucção ligeiramente maiores. Na Figura 5.51 e 5.52, foi feita a mesma comparação em relação ao que seria a sucção osmótica. Pode ser notado que para teores de umidade mais elevados, a lama neutralizada tende a apresentar níveis mais elevados. Para teores de umidade mais baixos, não é possível se chegar a nenhuma conclusão por este tipo de gráfico.

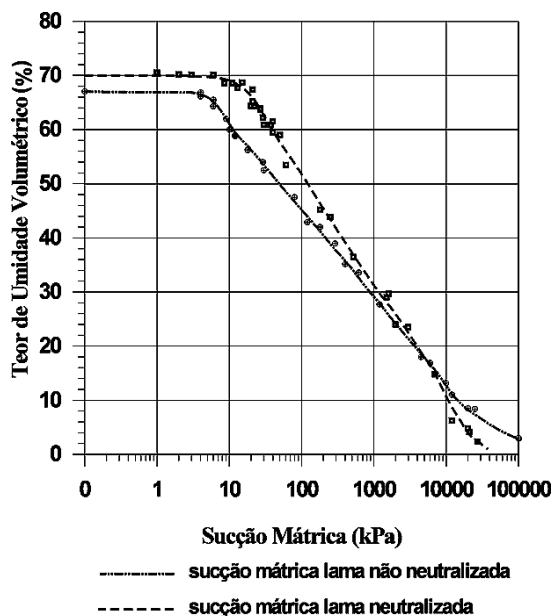
Para a lama vermelha OP não neutralizada, também foram obtidas as curvas características de sucção mátrica para o resíduo pré-adensado a 300 e 700kPa. As amostras foram preparadas como já descrito anteriormente: o resíduo era homogeneizado em um teor de sólidos muito baixo, colocado para sedimentar e adensar por peso próprio e, ainda saturado, conduzido para ensaios de adensamento do tipo deformação controlada. Após a execução destes ensaios, nos quais se aplicava tensões máximas de 300 e 700kPa, o resíduo era então exposto a secagem ao ar. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.53 e 5.54. Uma quantidade muito menor de medições foram realizadas, e basicamente somente através da técnica do papel filtro, de modo que uma dose ainda maior de interpretação foi necessária. Como pode ser visto pela Figura 5.53 e, a maior parte das medições para estas duas situações foi feita para teores de umidade mais elevados. Assim, para completar a parte final da curva, foi admitida a hipótese de que a sucção para o teor de umidade igual a zero seria igual a  $10^6$ kPa para todos os tipos de solo, de acordo com Fredlund & Xing (1994). Talvez um melhor procedimento fosse, à partir dos pontos medidos, utilizar um dos inúmeros métodos existentes para modelar a curva característica, como por exemplo, os citados em Fredlund & Xing (1994); Rossi & Nimmo (1994); Fayer & Simmons (1995); Leong & Rahardjo (1997); Aubertin et al.(1998); Kravchenko & Zhang (1998). Porém, isso foi julgado desnecessário nesta primeira análise.



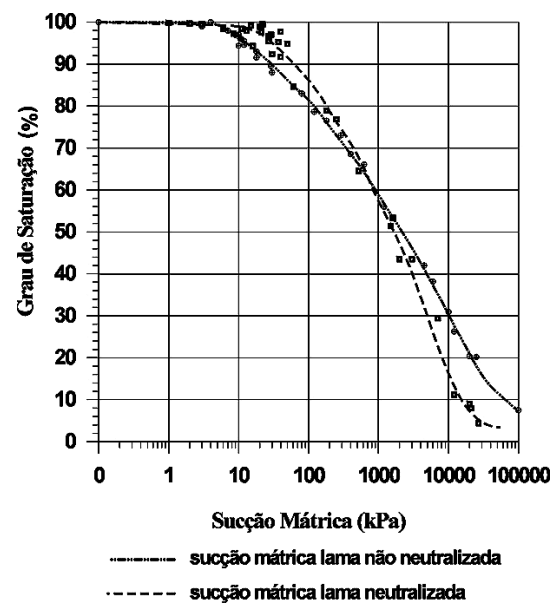
**FIGURA 5.47:** Comparação entre as Curvas Características de Sucção Total e Máttrica das Lamas Neutralizada e Não em Relação ao Teor de Umidade Volumétrico.



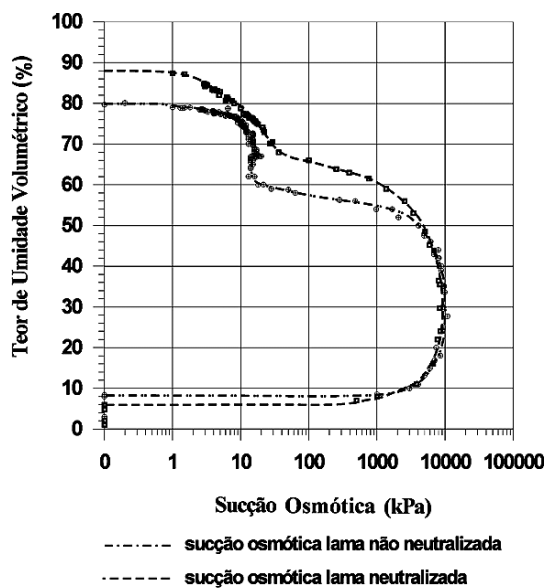
**FIGURA 5.48:** Comparação entre as Curvas Características de Sucção Total e Máttrica das Lamas Neutralizada e Não em Relação ao Grau de Saturação.



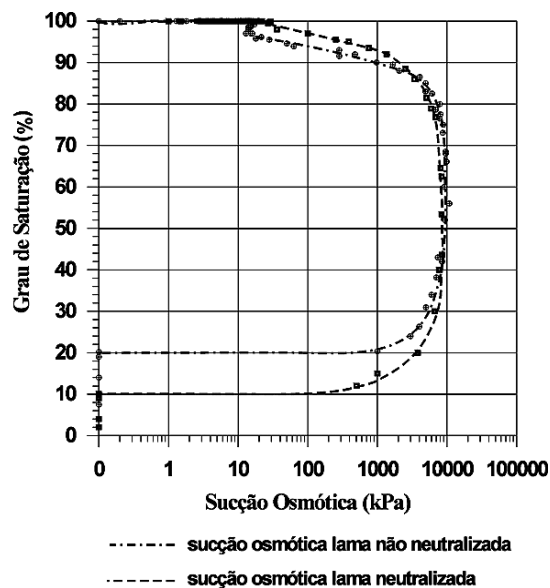
**FIGURA 5.49:** Comparação Entre As Curvas Características de Sucção Máttrica em Relação ao Teor de Umidade Volumétrico das Lamas Neutralizada e Não Neutralizada.



**FIGURA 5.50:** Comparação Entre As Curvas Características de Sucção Máttrica das Lamas Neutralizada e Não em Relação Grau de Saturação.



**FIGURA 5.51:** Comparação das Estimativas do Nível de Sucção Osmótica das Lamas Neutralizada e Não em Relação ao Teor de Umidade Volumétrico.



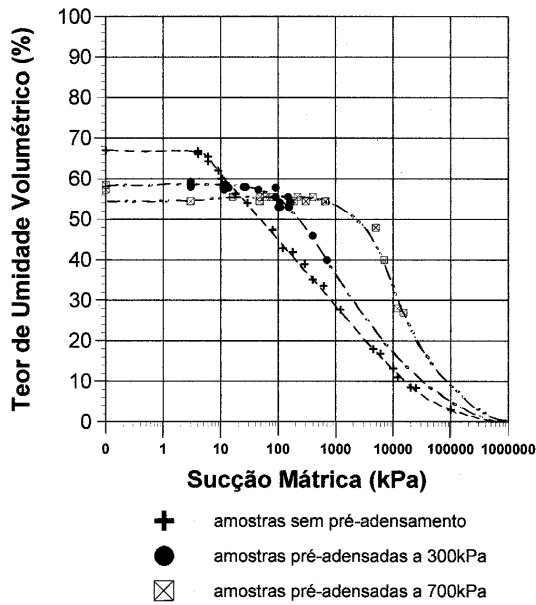
**FIGURA 5.52:** Comparação das Estimativas do Nível de Sucção Osmótica das Lamas Neutralizada e Não em Relação ao Grau de Saturação.

Como efeito do pré-adensamento, pode ser percebido a redução do teor de umidade gravimétrico de entrada de ar (54% para a sem pré-adensamento; 40% para a pré-adensada a 300kPa e 34% para a pré-adensada a 700kPa). A sucção matricial de entrada de ar também aumentou, passando de 5kPa para o resíduo sem pré-adensamento para 60kPa para a pré-adensada a 300kPa e 3000kPa para a pré-adensada a 700kPa, com teores de umidade volumétrico residuais de respectivamente 5%, 6% e 8%. Este elevado aumento da sucção matricial de entrada de ar mostra bem como o pré carregamento reduziu os vazios da amostra. Os graus de saturação residual variaram de 5%, 7% e 10% para a sem pré-adensamento, a pré-adensada a 300kPa e a 700kPa, respectivamente. A Figura 5.55 mostra como ficou a relação entre a variação da tensão de pré-adensamento e a sucção matricial de entrada de ar.

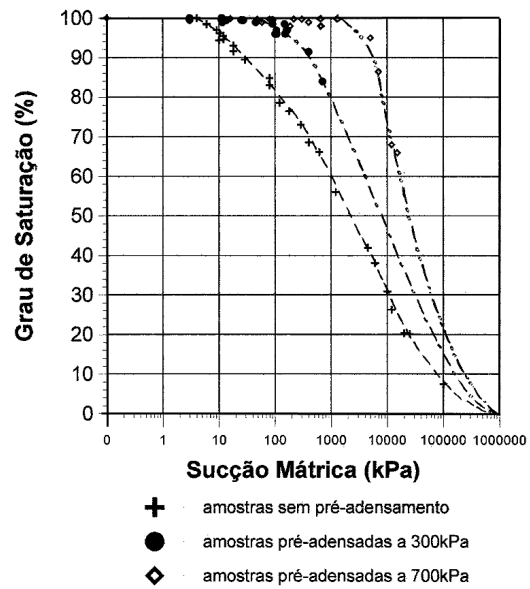
Pelos pontos da Figura 5.55 foi interpolada uma função exponencial, com coeficiente de determinação de 0,998, que associa diretamente a sucção à tensão de pré-adensamento nesta faixa de tensões, e que pode servir como um primeiro indicativo do nível de sucção de entrada de ar esperado após a aplicação de um pré-carregamento. A equação encontrada foi:

$$\text{Sucção matricial (kPa)} = 4,53 \cdot e^{(0,0092 \cdot \text{tensão de pré-adensamento} - \text{kPa})} \quad (5.5)$$

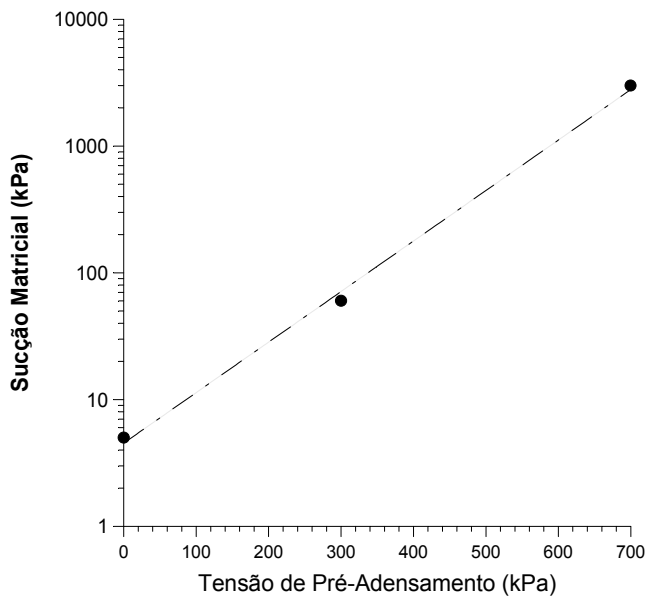
Na fórmula (5.5), o “e” é a base do logaritmo neperiano.



**FIGURA 5.53:** Curva Característica da Lama Vermelha OP Não Neutralizada em Relação ao Teor de Umidade Volumétrica Após a Interpretação: Comparação entre Diferentes Tensões de Pré-Adensamento.



**FIGURA 5.54:** Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada em Relação ao Grau de Saturação Após a Interpretação: Comparação entre Tensões de Pré-Adensamento Diferentes.



**FIGURA 5.55:** Variação da Sucção Matricial de Entrada de Ar com a Tensão de Pré-Adensamento da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

## 5.5

### Relação entre a Sucção e o Índice de Vazios

Através das curvas de secagem, foi possível obter a relação entre a sucção e o índice de vazios para os resíduos. Para a lama vermelha OP neutralizada, esta relação está representada na Figura. 5.56. Na Figura 5.57 está destacada somente a relação entre a sucção matricial e o índice de vazios, pela qual se interpolou uma função do tipo potencial, com um coeficiente de correlação igual a 0,90, que poderá ser usada para uma estimativa prévia ou da sucção ou do índice de vazios. A equação encontrada foi:

$$\text{Sucção Matricial (kPa)} = 14503(\text{índice de vazios})^{-9,43} \quad (5.6)$$

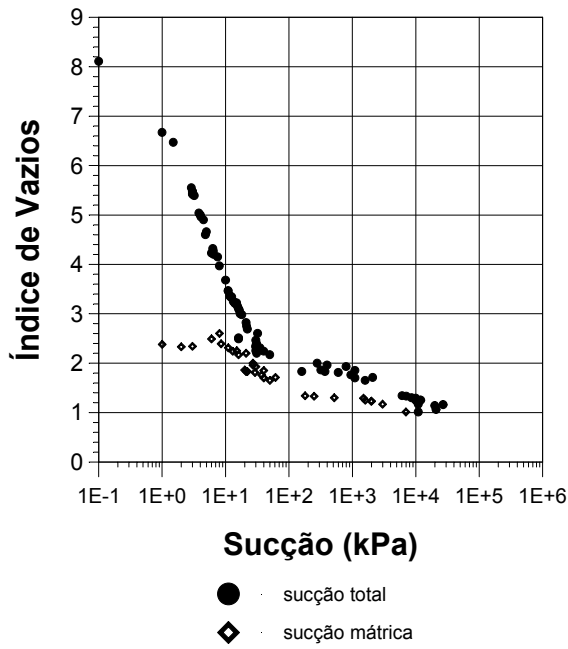
$$\text{Índice de Vazios} = 2,62(\text{sucção mátrica kPa})^{-0,095} \quad (5.7)$$

Examinando a curva da Figura 5.57, pode ser visto que a relação entre a sucção e o índice de vazios possui dois pontos de inflexão. O primeiro ocorre no valor de entrada de ar da amostra, e o segundo, em torno do índice de vazios correspondente ao limite de plasticidade, que neste caso é muito próximo àquele calculado com o valor do teor de umidade correspondente ao limite de contração deste resíduo. Após ter sido feita a comparação entre os índices de vazios calculados das amostras com os das curvas de secagem, eliminado-se aqueles que não se ajustavam a estas e refazendo o gráfico, estes pontos de inflexão ficam ainda mais definidos, como pode ser visto na Figura 5.58.

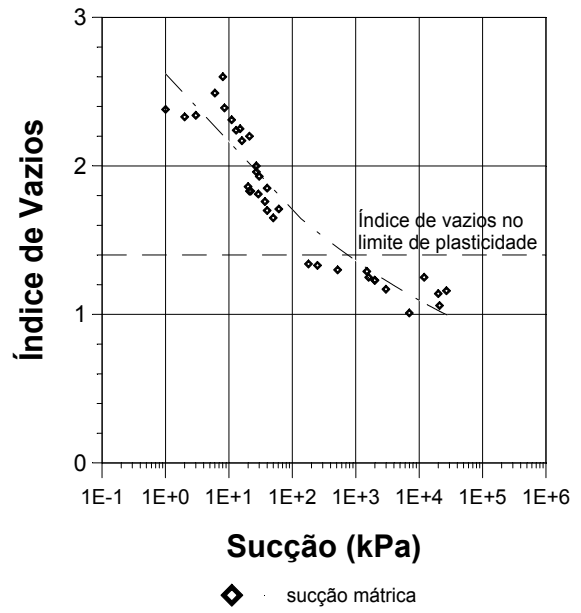
Examinado a Figura 5.58, pode ser verificado que as mudanças de inclinação são correspondentes à uma sucção próxima ao valor de entrada de ar e àquela no limite de contração. A curva pode ser então definida de acordo com estes dois trechos por equações do tipo potencial, com um coeficiente de correlação igual a 0,99, e que podem auxiliar numa primeira estimativa de valores:

- (a) para valores de sucção matricial entre a entrada de ar e o limite de contração:

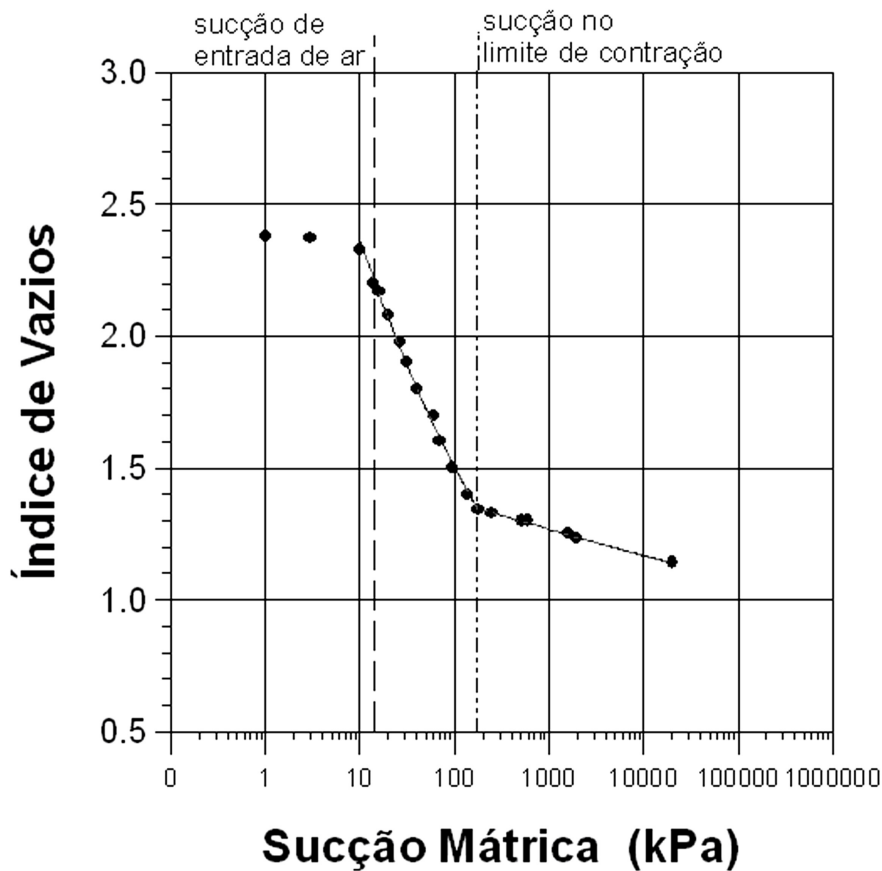




**FIGURA 5.56:** Relação entre o Índice de Vazios e a Sucção da Lama Vermelha OP Neutralizada.



**FIGURA 5.57:** Relação entre o Índice de Vazios e a Sucção Mátrica da Lama Vermelha OP Neutralizada.



**FIGURA 5.58:** Interpretação da Relação Índice de Vazios contra a Sucção da Lama Vermelha OP Neutralizada.

$$\text{Sucção Matricial (kPa)} = 785(\text{índice de vazios})^{-5,05} \quad (5.8)$$

$$\text{Índice de Vazios} = 3,73(\text{sucção mátrica kPa})^{-0,197} \quad (5.9)$$

(b) para valores de sucção matricial maiores que a do limite de contração:

$$\text{Sucção Matricial (kPa)} = 748516(\text{índice de vazios})^{-28} \quad (5.10)$$

$$\text{Índice de Vazios} = 1,62(\text{sucção mátrica kPa})^{-0,035} \quad (5.11)$$

Para a lama vermelha OP não neutralizada, a relação entre a sucção e o índice de vazios está na Figura 5.59. Na Figura 5.60 está destacada a relação somente considerando a sucção matricial. A curva tracejada é uma função potencial, com coeficiente de correlação igual a 0,99, interpolada pelos pontos entre a sucção matricial de entrada de ar e a do limite de contração. A equação desta função é dada pelas fórmulas (5.12) e (5.13). Pode ser percebido que os coeficiente são próximos aos definidos para a lama vermelha OP neutralizada. As fórmulas (5.14) e (5.15) apresentam a mesma função, mas interpolada por todos os pontos. Elas tiveram índice de correlação igual a 0,95 e também tem coeficiente da mesma ordem de grandeza das equações obtidas para a lama vermelha OP neutralizada:

(a) para valores de sucção matricial entre a entrada de ar e o limite de contração:

$$\text{Sucção Matricial (kPa)} = 632(\text{índice de vazios})^{-7,6} \quad (5.12)$$

$$\text{Índice de Vazios} = 2,32(\text{sucção mátrica kPa})^{-0,130} \quad (5.13)$$

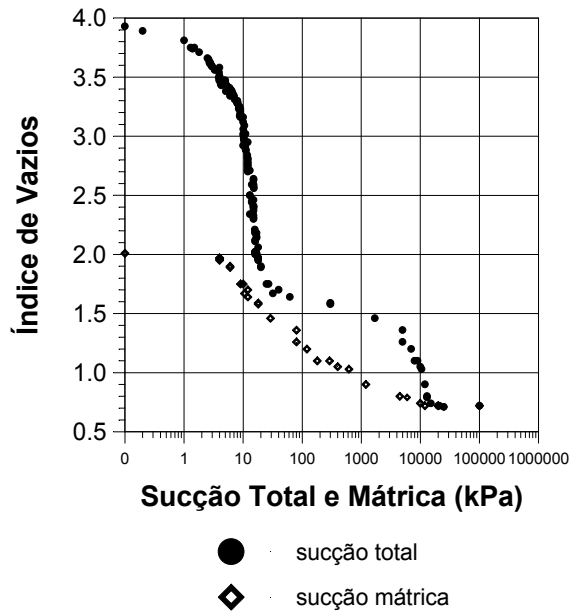
(b) para valores em toda a faixa de sucção matricial:

$$\text{Sucção Matricial (kPa)} = 892(\text{índice de vazios})^{-8,79} \quad (5.14)$$

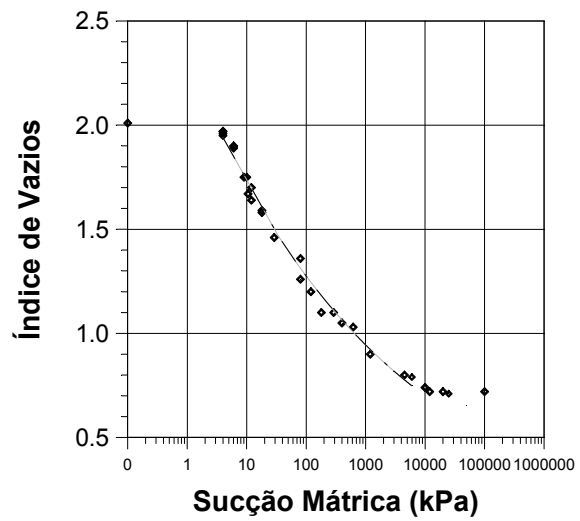
$$\text{Índice de Vazios} = 2,11(\text{sucção mátrica kPa})^{-0,108} \quad (5.15)$$

Com o intuito de facilitar a comparação entre o comportamento das duas lamas, as mesmas curvas estão agora plotadas em um só gráfico, mostrado na Figura 5.61. A Figura 5.62 destaca as relações entre o índice de vazios e a sucção matricial dos dois resíduos. A lama vermelha OP não neutralizada atingiu um menor índice de vazios final após o ressecamento que o resíduo neutralizado, como já havia sido percebido pelas curvas de secagem, provavelmente por ter sido “disposta” mais espessada, ou seja, com um maior teor de sólidos, e não por ação do fluido de preenchimento dos poros. Porém, inicialmente apresentou uma taxa menor de variação do índice de vazios com o ganho de sucção em relação à lama neutralizada. Este comportamento se inverte depois, uma vez que a lama vermelha OP neutralizada atingiu seu limite de contração em um maior teor de umidade.

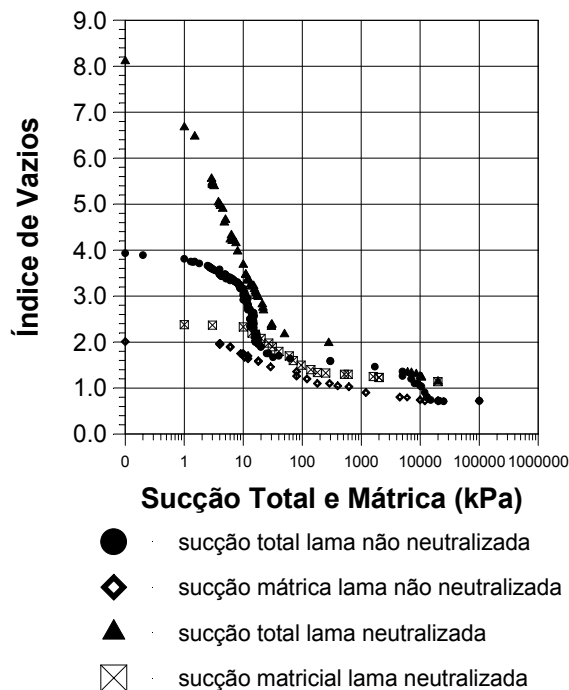
A Figura 5.63 mostra a comparação entre as curvas índice de vazios contra a sucção matricial para a lama vermelha OP não neutralizada sem pré-adensamento, pré-adensada a 300kPa e a 700kPa. Pode ser visto que à partir de um determinado nível de sucção, o trecho linear da curva da lama sem pré-adensamento coincide com o da lama pré-adensada a 300kPa, em um comportamento semelhante ao processo de compressão, quando para um mesmo solo, após uma determinada pressão acima da de pré-adensamento, as retas virgens coincidiriam novamente. À medida que o processo de ressecamento avançou, as duas curvas se distanciaram novamente, indo a lama sem pré-adensamento encontrar a curva daquela pré-adensada a 700kPa em uma sucção mais elevada. Esta última tem o trecho linear quase que paralelo ao da lama pré-adensada a 300kPa, indicando que elas possuem o mesmo tipo de comportamento em relação à compressibilidade durante o processo de secagem. Elas também se tornam coincidentes em um nível mais elevado de sucção, quando o resíduo pré-adensado a 300kPa já está atingindo seu limite de contração.



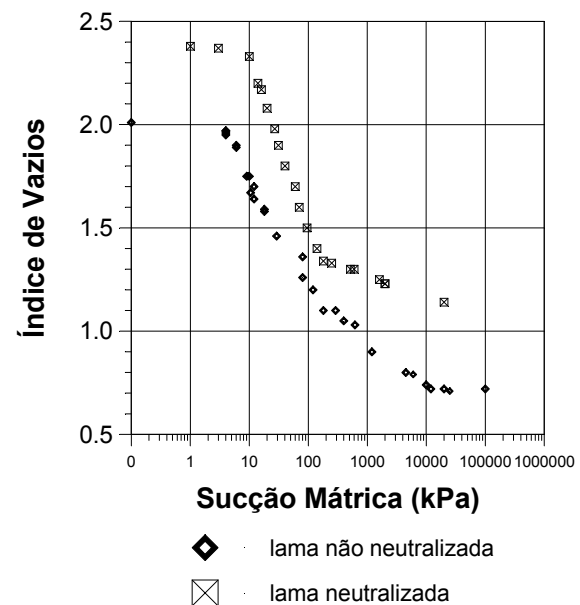
**FIGURA 5.59:** Relação entre o Índice de Vazios e a Sucção da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.



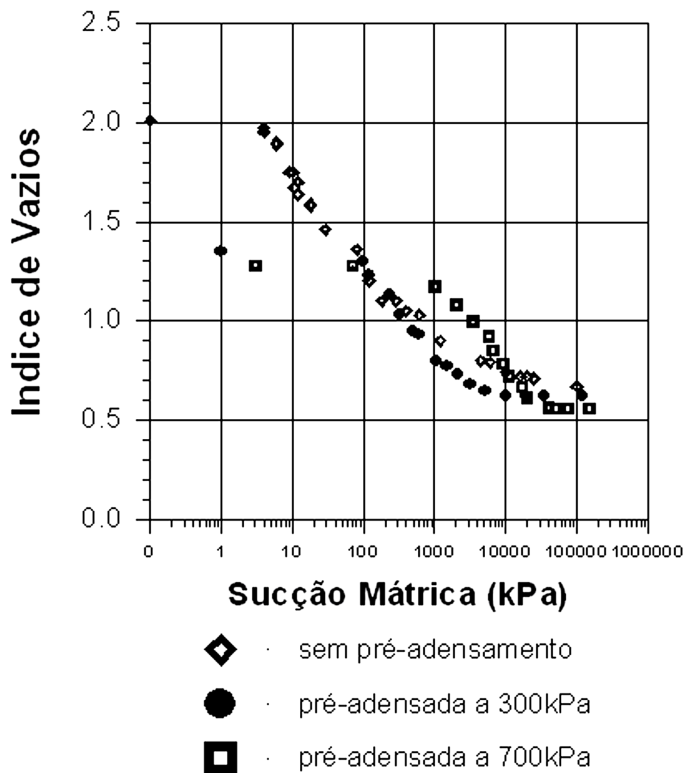
**FIGURA 5.60:** Relação entre o Índice de Vazios e a Sucção Mátrica da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.



**FIGURA 5.61:** Comparação entre a Relação do Índice de Vazios com a Sucção da Lama Vermelha Neutralizada E Não.



**FIGURA 5.62:** Comparação Entre a Relação do Índice de Vazios com a Sucção Mátrica da Lama Vermelha Neutralizada e Não.



**FIGURA 5.63:** Comparação da Relação Índice de Vazios contra a Sucção da Lama Vermelha OP Neutralizada Com e Sem Pré-Adensamento.

## 5.6

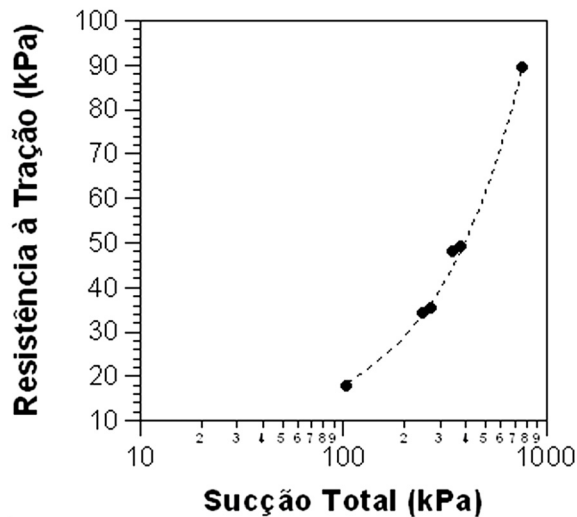
### Relação entre a Sucção e a Resistência à Tração dos Resíduos.

Em alguns casos, antes de serem rompidas amostras no ensaio de tração, algumas amostras da lama vermelha OP neutralizada foram usadas no ensaio para medição da sucção com o tensiômetro do tipo Imperial College. Tão logo a estabilização da leitura do instrumento era atingida, a amostra era conduzida ao ensaio de tração, tendo o seu teor de umidade de moldagem comparado com o teor de umidade após a ruptura. Na Figura 5.64 está a relação obtida para aquelas que não apresentaram variação no seu teor de umidade durante todo este processo. O que pode ser verificado é que, para este material e dentro deste nível de sucção, há uma relação direta e linear entre esta grandeza e a resistência à tração, obtida com um coeficiente de correlação de 0,996. A sucção medida foi considerada como “total”, após as considerações feitas pela interpretação das Figuras 5.35 e

5.36. Estes pontos são exatamente alguns daqueles que estão mais próximos das medidas realizadas pela técnica do papel filtro sem contato com o solo e com os dessecadores, como pode ser constatado nas figuras citadas. A equação obtida foi:

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = 0,108[\text{sucção total (kPa)}] + 7,52 \quad (5.16)$$

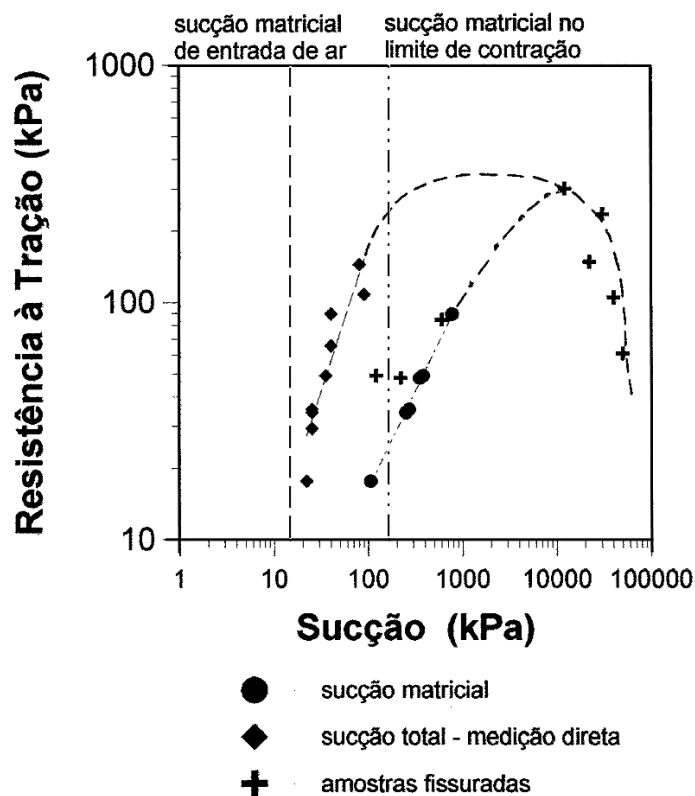
OBS: para sucção entre 100 e 1000kPa



**FIGURA 5.64:** Relação entre a Resistência à Tração e a Sucção Total Medida em Algumas Amostras da Lama Vermelha OP Neutralizada Pelo Tensiômetro IC.

A Figura 5.65 apresenta a relação entre todos os resultados de resistência à tração da lama vermelha OP neutralizada correlacionados através da curva característica com a sucção matricial. Nesta figura, também estão os pontos apresentados na Figura 5.64, e que foram considerados como uma relação entre a resistência à tração e a sucção total, feita em medição direta. Mantendo a base da interpretação sobre a relação entre a resistência à tração e o teor de umidade gravimétrico, discutida no Capítulo 04 (Figura 4.52), foi assumido que há um crescimento contínuo da resistência à tração com a sucção matricial à partir de um região próxima do ponto de entrada de ar até o limite de contração, região onde ela atingiria seu máximo (por volta de 250kPa). À partir daí, com o fissuramento ficando mais intenso, haveria uma diminuição de ganho da resistência com o aumento da sucção matricial. Ao atingir um determinado valor de sucção, a

resistência à tração diminuiria mesmo com a diminuição do teor de umidade e, conseqüentemente, aumento de sucção. A região do valor de sucção máxima (próximo a 1000kPa, teor de umidade gravimétrico de 22%) coincide com a região do teor de umidade no qual a amostra atingiu sua densidade total máxima, como pode ser verificado pelas curvas de secagem. Para teores de umidade menores, a densidade total também passou a decrescer. É sugerido, então, que este valor de sucção determina o ponto em que o trincamento começa se tornar ainda mais intenso, havendo uma maior conexão entre as fissuras. Toda esta tendência está sugerida na figura por uma linha tracejada interpolada entre os pontos.



**FIGURA 5.65:** Relação entre a Resistência à Tração e a Sucção da Lama Vermelha OP Neutralizada.

As medidas consideradas como de sucção total e que foram realizadas em amostras intactas e com teor de umidade abaixo do limite de contração ficaram realmente destacadas das demais, também obtidas em amostras intactas, e se ajustaram bem a algumas resistências medidas em amostras fissuradas. Também

está sendo sugerido por linha tracejada passando pelos pontos, que há um crescimento da resistência à tração com a sucção total até um ponto onde esta e a matricial se equivalem (em torno de 10MPa), decrescendo à partir daí em uma curva única.

Foi interpolada uma função potencial tanto pelos pontos associados à sucção matricial quanto à total da Figura 5.64, com teores de umidade acima do limite de contração. As fórmulas obtidas são as mostradas à seguir, e tiveram coeficiente de correlação de 0,85 para a relação em função da sucção matricial e 0,99 para a em função da total:

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = 0,63(\text{sucção matricial - kPa})^{1,22} \quad (5.17)$$

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = 0,38(\text{sucção total - kPa})^{0,82} \quad (5.18)$$

No caso da lama vermelha OP não neutralizada, também foi mantido o modelo de comportamento sugerido no Capítulo 04 entre a resistência à tração e o teor de umidade gravimétrico como base para a interpretação da relação existente entre a resistência à tração e a sucção, que é o mesmo adotado para o resíduo neutralizado. A curva que exprime o comportamento do material sem pré-adensamento corresponde àquela tracejada na Figura 5.66. Para o trecho inicial dos resultados obtidos de ensaios realizados no resíduo antes se atingir a sucção equivalente ao teor de umidade do limite de plasticidade, também foi interpolada uma função, para que forneça uma primeira estimativa de ordem de grandeza de uma grandeza em relação à outra. A equação que descreve esta função foi determinada com um coeficiente de 0,97, e tem sua expressão dada pela fórmula (5.19):

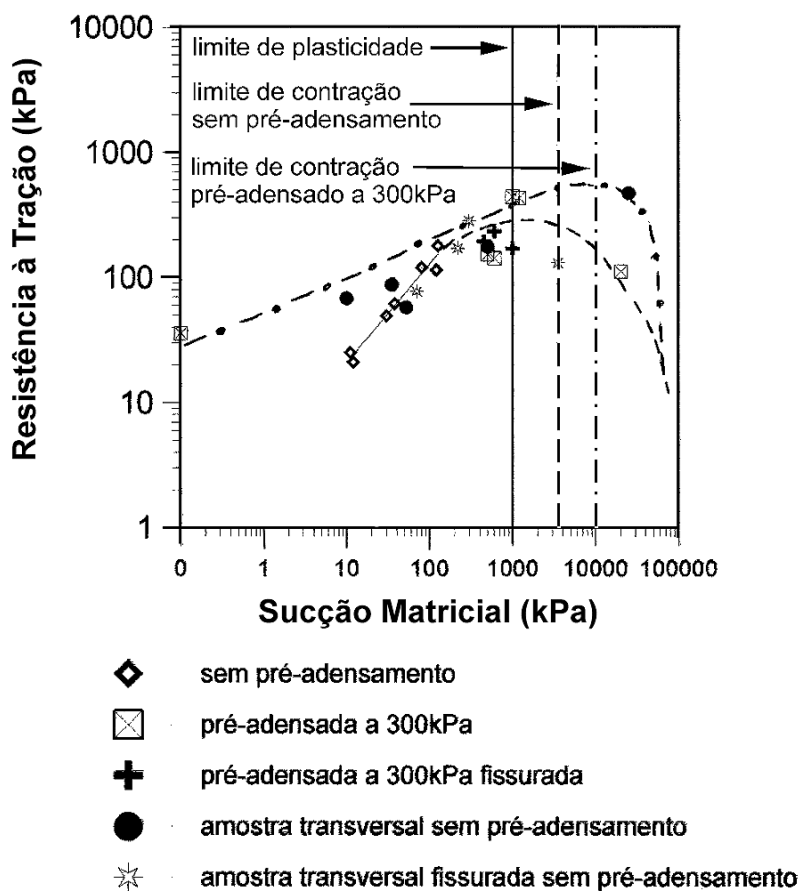
$$\text{Resistência à tração (kPa)} = 3,42(\text{sucção matricial - kPa})^{0,79} \quad (5.19)$$

Na Figura 5.66 também estão resultados obtidos de ensaios em resíduo pré-adensado a 300kPa, cujo comportamento é descrito pela curva traço-ponto. Pode ser verificado que estas amostras parecem apresentar uma taxa de ganho de resistência menor com o aumento da sucção que aquelas sem pré-adensamento.



Porém, são muito pouco os dados para que isso seja afirmado de maneira conclusiva.

Os poucos resultados obtidos em amostras “transversais”, aquelas moldadas em sentido perpendicular ao da deposição das partículas, mostraram para valores mais baixos de sucção, um comportamento mais próximo ao das amostras com pré-adensamento. Este mesmo comportamento já havia sido identificado nas curvas de secagem. Porém, nestas ficava mais evidente que, à medida que a sucção aumentava, esta aparente anisotropia desaparecia, ficando o comportamento destas amostras transversais mais próximas das consideradas “normais”. Já aqui neste gráfico da Figura 5.66, os dados são insuficientes para se para que se esta mesma tendência fosse confirmada.



**FIGURA 5.66:** Relação da Resistência à Tração com a Sucção da Lama Vermelha OP Não Neutralizada Com e Sem Pré-Adensamento.

## 5.7

### Conclusões

Este capítulo descreveu os procedimentos utilizados para a obtenção das curvas características de dois resíduos de processamento de bauxita, as lamelas vermelhas OP neutralizada e não neutralizada. Foi experimentada a aplicação de quatro técnicas diferentes: a do papel filtro, uso de dessecadores, medição com transdutor de sucção do tipo *Imperial College* (Ridley & Burland, 1993) e uso de pequenos tensiômetros instalados no solo durante ensaio para simulação do ressecamento. O procedimento utilizado na aplicação de cada uma delas foi brevemente descrito e foi verificado, à partir das curvas características obtidas, que estas técnicas podem ser usadas simultaneamente, se complementando. Uma técnica se mostrou mais prática que outra, dependendo do teor de umidade em que se encontrava o material ensaiado.

Na técnica do papel filtro, os procedimentos utilizados no ensaio foram basicamente os descritos na designação da ASTM 5298-92 e se mostraram fáceis de aplicar. Todas as amostras foram preparadas seguindo a mesma metodologia, e só a trajetória de secagem foi feita. O tempo de equalização mínimo foi de sete dias, mas a média utilizada foi de quinze dias, que foi o período considerado mais adequado para garantir a completa equalização. Foi necessário monitorar a perda de umidade do papel após o desmonte das câmaras de equalização e o ganho de umidade após retirá-los da estufa para obtenção de valores aceitáveis. Só se conseguiu manusear amostras com teores de umidade em peso menores que aproximadamente 70% para aplicação desta técnica.

No caso do transdutor do tipo IC, foi necessário o uso de uma pasta de caulim para melhorar o seu contato com o solo. 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. Devido a uma oscilação no sistema de aquisição de dados, os valores medidos de sucção próximos entre zero e 200kPa apresentaram muito ruído. Dos resultados, foi verificado que os valores medidos pelo transdutor do tipo *Imperial College* se ajustaram, em sua maioria, aos medidos pelo papel filtro em contato

com o solo, na medição de sucção matricial. Na região do ponto de entrada de ar porém, o que se pode perceber é que vários registros do tensiômetro acusaram valores mais elevados de sucção, se confundindo com os do papel filtro sem contato. Também fora desta região de entrada de ar, para níveis ainda mais elevados de sucção, alguns outros valores medidos pelo tensiômetro IC também se ajustaram bem aos obtidos quando o papel não estava em contato, sugerindo uma medição da sucção total. Desta forma, é conveniente que seja feita a verificação da eficiência osmótica da pedra porosa deste instrumento.

Com relação ao uso dos dessecadores, ele se mostrou bem adequado e fácil de utilizar para a obtenção de elevados valores de sucção total. O tempo de equalização verificado foi longo, chegando a quase seis meses em alguns casos. Os valores de sucção obtidos dos dessecadores se ajustaram muito bem aos medidos pela técnica do papel filtro para medição de sucção total.

Os mini-tensiômetros instalados no interior da lama exposta ao ressecamento só responderam adequadamente até um nível de sucção da ordem de 30kPa, dessaturando à partir daí. Se ao invés de água como fluido de saturação tivesse sido utilizado um outro, mais viscoso, provavelmente se teria medido níveis mais elevados de sucção. Foi verificado que a temperatura da sala durante os ensaios influenciava muito a leitura da coluna de mercúrio, provavelmente devido à sua dilatação. Por conta deste comportamento, o procedimento adotado foi sempre fazer as leituras dos tensiômetros pela manhã, após um período de no mínimo 8 horas de equalização da temperatura da camada de solo com o ambiente.

Os valores medidos por este mini tensiômetros deixaram claro que o solo já apresentava baixos valores de sucção para teores de umidade em torno de 200%. Estes dados auxiliaram em muito o traçado da curva característica, completando as informações para níveis baixos de sucção. A tendência foi considerar todos as suas leituras como sendo de sucção total, ao invés de mátrica, já que pelas curvas de secagem pode se checar que o rejeito ainda estava saturado. Foi admitido, portanto, que o que estava sendo registrado foi sucção total devido à uma eficiência osmótica das pedras porosas destes instrumentos. Além disso, a possibilidade de elevada sucção osmótica era esperada, se for levada em

consideração a química do fluido de preenchimento dos poros. Assim, o conhecimento desta eficiência osmótica de suas pedras porosas deve ser estabelecido. Pelo formato final da curva característica obtida, parece que o processo de contração influenciou as suas medidas.

Da curva característica da lama vermelha OP neutralizada, foi verificado um teor volumétrico de entrada de ar de aproximadamente 70%. A sucção de entrada de ar foi de apenas 15kPa, considerada muito baixa, se for levada em consideração a granulometria fina do resíduo. O teor de umidade residual verificado foi de 4% e o grau de saturação residual, 7%. O nível da sucção osmótica grosseiramente estimado foi aproximadamente 2000kPa quando o solo apresenta um grau de saturação de 90%.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, uma sucção de entrada de ar de aproximadamente 5kPa, contra 15kPa da lama vermelha OP neutralizada, e um teor de umidade volumétrico residual de 5%, muito próximo do encontrado para a lama vermelha OP neutralizada (4%), foi encontrado. O teor de umidade volumétrico de entrada de ar foi verificado estar próximo a 66%. Esta diferença no valor de sucção de entrada de ar entre os dois resíduos não pode ser creditada só ao tipo de fluido, uma vez que as duas lamas tiveram condições iniciais ligeiramente diferentes. Foi verificado que o grau de saturação residual encontrado foi de 6% para o resíduo não neutralizado, também foi muito próximo ao registrado para o neutralizado (7%). Com relação à estimativa da sucção osmótica, para um grau de saturação de 90%, foi verificado haver um nível em torno 1000kPa para o resíduo cáustico, menor da que foi registrada para a lama vermelha OP neutralizada.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, também foram obtidas as curvas características de sucção matricial para o resíduo pré-adensado a 300 e 700kPa. Como efeito do pré-adensamento, pode ser percebido a redução do teor de umidade volumétrico de entrada de ar (66% para a sem pré-adensamento; 58% para a pré-adensada a 300kPa e 54% para a pré-adensada a 700kPa). A sucção matricial de entrada de ar também aumentou, passando de 5kPa para o resíduo sem pré-adensamento para 60kPa para a pré-adensada a 300kPa e 3000kPa para a pré-adensada a 700kPa, com teores de umidade volumétrico residuais de

respectivamente 5%, 6% e 8%. Este elevado aumento da sucção mátrica de entrada de ar mostra bem como o pré carregamento reduziu os vazios da amostra. Os graus de saturação residual variaram de 5%, 7% e 10% para a sem pré-adensamento, a pré-adensada a 300kpa e a 700kPa, respectivamente. Foi interpolada uma função exponencial que associa diretamente a sucção à tensão de pré-adensamento nesta faixa de tensões, e que pode servir como um primeiro indicativo do nível de sucção de entrada de ar esperado após a aplicação de um pré-carregamento.

A lama vermelha OP não neutralizada atingiu um menor índice de vazios final após o ressecamento que o resíduo neutralizado, como já havia sido percebido pelas curvas de secagem, provavelmente por ter sido “disposta” mais espessada, ou seja, com um maior teor de sólidos, e não por ação do fluido de preenchimento dos poros. Porém, inicialmente apresentou uma taxa menor de variação do índice de vazios com o ganho de sucção em relação à lama neutralizada. Este comportamento se inverte depois, uma vez que a lama vermelha OP neutralizada atingiu seu limite de contração em um maior teor de umidade.

Na comparação entre as curvas índice de vazios contra a sucção matricial para a lama vermelha OP não neutralizada sem pré-adensamento, pré-adensada a 300kPa e a 700kPa, foi visto que à partir de um determinado nível de sucção, o trecho linear da curva da lama sem pré-adensamento coincide com o da lama pré-adensada a 300kPa, em um comportamento semelhante ao processo de compressão. À medida que o processo de ressecamento avançou, as duas curvas se distanciaram novamente, indo a lama sem pré-adensamento encontrar a curva daquela pré-adensada a 700kPa em uma sucção mais elevada. Esta última tem o trecho linear quase que paralelo ao da lama pré-adensada a 300kPa, indicando que elas possuem o mesmo tipo de comportamento em relação à compressibilidade durante o processo de secagem. Elas também se tornaram coincidentes em um nível mais elevado de sucção, quando o resíduo pré-adensado a 300kPa já está atingindo seu limite de contração.

Na relação entre a resistência à tração e a sucção, foi assumido que há um crescimento contínuo da primeira com a sucção matricial à partir de um região próxima do ponto de entrada de ar até o limite de contração, região onde ela

atingiria seu máximo. À partir daí, com o fissuramento ficando mais intenso, haveria uma diminuição de ganho da resistência com o aumento da sucção matricial. A região do valor de sucção máxima nos ensaios realizados coincidiu com a região do teor de umidade no qual as amostras atingiram sua densidade total máxima, como pode ser verificado pelas curvas de secagem. Para teores de umidade menores, a densidade total também passou a decrescer. É sugerido, então, que este valor de sucção determina o ponto em que o trincamento começa se tornar ainda mais intenso, havendo uma maior conexão entre as fissuras.

Nos ensaios em resíduo pré-adensado a 300kPa, foi verificado que estas amostras parecem apresentar uma taxa de ganho de resistência menor com o aumento da sucção que aquelas sem pré-adensamento. Porém, são muito pouco os dados para que isso seja afirmado de maneira conclusiva. Os poucos resultados obtidos em amostras “transversais” mostraram, para valores mais baixos de sucção, um comportamento mais próximo ao das amostras com pré-adensamento. Este mesmo comportamento já havia sido identificado nas curvas de secagem. Porém, nestas ficava mais evidente que, à medida que a sucção aumentava, esta aparente anisotropia desaparecia, ficando o comportamento destas amostras transversais mais próximas das consideradas “normais”. Já aqui na relação entre a resistência a tração e a sucção, os dados são insuficientes para se para que se esta mesma tendência fosse confirmada.