

7 Curvas Características de Sucção

7.1. Introdução

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

Basicamente, a sucção dos solos é uma quantidade energética para avaliar sua capacidade de reter água. Quando a água livre migra dentro de um solo, ela pode ser adsorvida ou retida por ele. Para desprender esta água adsorvida, energia externa tem de ser aplicada. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água para desprendê-la, é a sucção (Lee & Wray, 1995).

A curva característica de sucção de um solo é a relação entre a sucção e a quantidade de água no solo. Esta quantidade de água é geralmente colocada em termos de conteúdo de umidade gravimétrica (w), grau de saturação (S) ou umidade volumétrica (θ). 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.

Para a determinação das curvas características dos solos ensaiados, na condição natural e na condição contaminada, utilizou-se o Método do Papel Filtro, o qual, segundo Marinho (1994), tem se mostrado eficiente.

Neste Capítulo, serão apresentados uma breve revisão dos conceitos teóricos, comentários sobre o método utilizado e os resultados obtidos para a montagem das curvas características de sucção.

7.2. Conceitos Básicos

7.2.1. Sucção Total, Mátrica e Osmótica

Segundo Marinho (1997), a sucção pode ser definida como a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico – químicas, que faz com que o sistema água – solo absorva ou perca água dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação.

Em geral, a sucção dos solos é dividida em duas parcelas, a matricial e a osmótica. A componente matricial está relacionada com a *matriz* do solo, ou seja, ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural. A componente osmótica, está relacionada à concentração química da água do solo. A sucção total é a soma destas duas parcelas, ou seja:

$$St = Sm + Som \quad \text{Eq. 7.1}$$

onde, St = sucção total,

Sm = sucção mátrica

Som = sucção osmótica

Uma maneira de visualizar o significado destas componentes é quando uma membrana semi-permeável está presente, como é mostrado na figura 7.1.

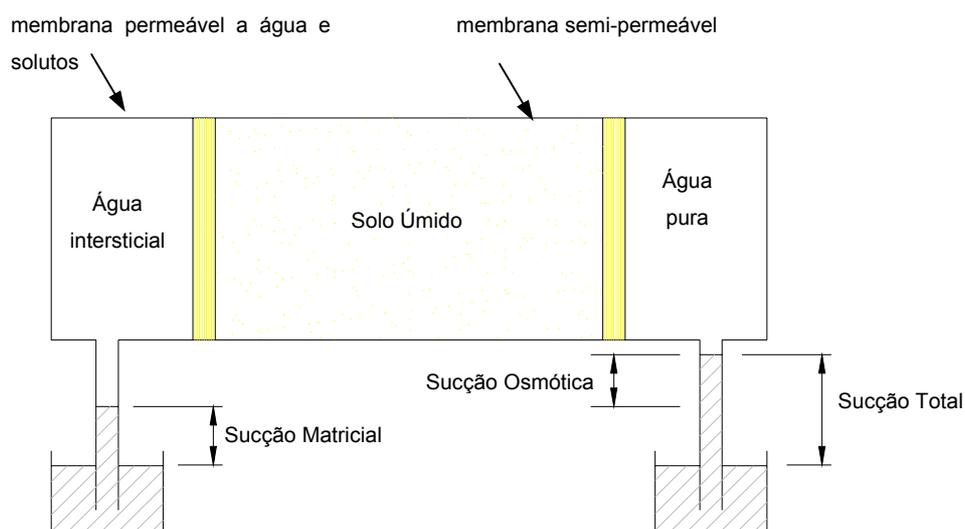


Figura 7.1 – Sistema que ilustra os conceitos de sucção total e mátrica (Marinho, 1997)

A sucção total é a diferença de pressão através de uma membrana semi-permeável que separa água pura do sistema solo/água intersticial.

A sucção mátrica é a diferença de pressão através de uma membrana que separa o sistema solo/água intersticial de uma solução idêntica a da água intersticial, mas, sem solo. A membrana é permeável à solução, mas não as partículas de solo ou ar (Marinho, 1997).

A sucção mátrica por sua vez, é composta por duas parcelas (de Campos et al., 1992),

$$S_m = S_c + S_{ad} \quad \text{Eq. 7.2}$$

onde, S_c = sucção capilar,

S_{ad} = sucção de adsorção

A parcela de sucção capilar esta 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 parcela de adsorção está associada ao nível micro-estrutural, ou seja, de hidratação dos minerais argílicos. A figura 7.2 mostra as faixas, em uma curva característica, em que estas parcelas de sucção tem maior influência.

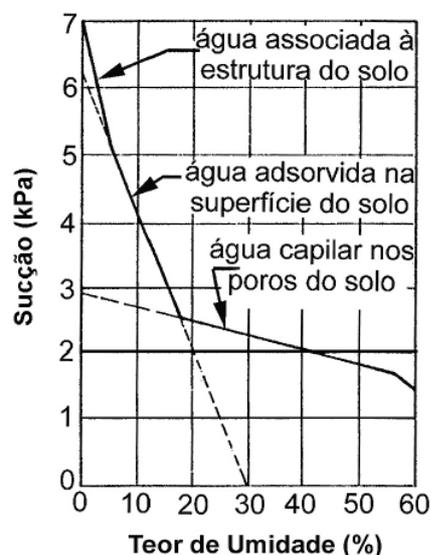


Figura 7.2 - Influência Relativa de Parcelas de Sucção em uma Curva Característica (McQueen e Miller, 1974 – em Villar, 2002)

Existem numerosos estudos sobre os fatores que afetam a sucção mátrica dos solos, como temperatura, ângulo de contato, etc. Maiores informações sobre este tema podem ser consultadas, por exemplo, em de Campos et al. (1992). Marinho (1994, 1997), Bachmam et al. (2002), Fredlund and Rahardjo (1993) e Krahn and Fredlund (1999).

Em geral, as unidades utilizadas para expressar os valores de sucção são unidade de pressão, sendo as mais utilizadas kPa, atm e bars. A sucção também pode ser expressa através da escala pF ($pF = \log_{10}hs$), que corresponde ao logaritmo decimal da sucção expressa em centímetros de água ($1pF=0,1mca$).

7.2.2. Curva Característica de Sucção

A curva característica de sucção define a relação entre o conteúdo de umidade gravimétrico, w , ou conteúdo de umidade volumétrico, θ , ou o grau de saturação, S , e a sucção. Uma curva típica está mostrada na figura 7.3, a figura mostra a curva característica completa de um solo.

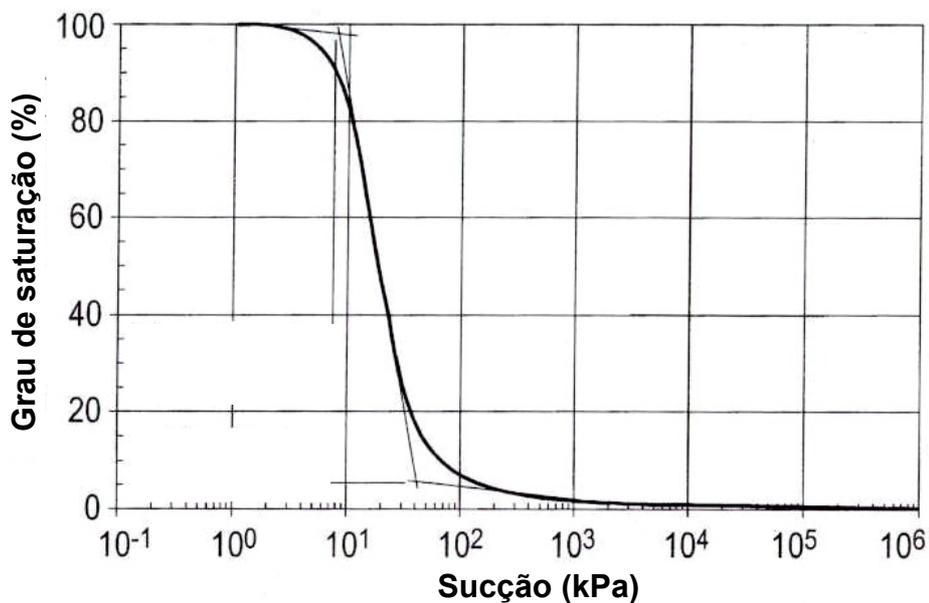


Figura 7.3 – Curva Característica (*Barbour, 1998*)

A curva característica de sucção apresenta histerese, segundo a trajetória para sua determinação seja de umedecimento ou de secagem, isto está ilustrado na figura 7.4. Existem numerosos estudos sobre este tema, pelo qual ele não será tratado nesta dissertação, maiores detalhes podem ser consultados em Fredlund & Rahardjo (1993).

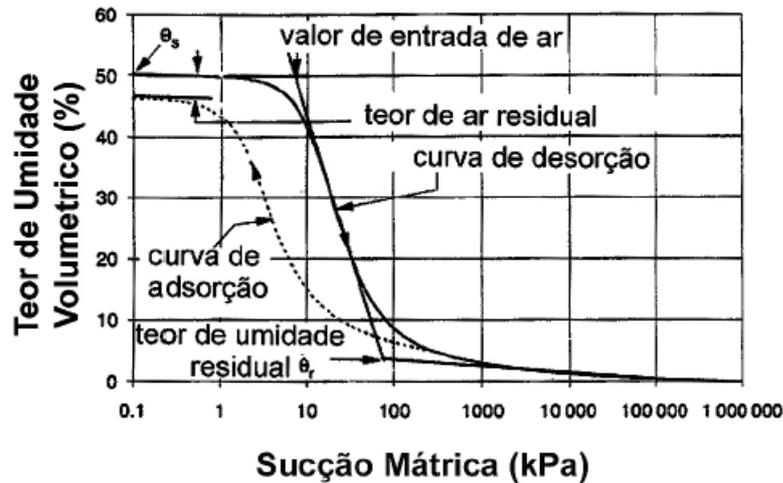


Figura 7.4 - Curva Característica Típica de um Solo Siltoso (Fredlund e Xing, 1994 – em Villar, 2001)

A figura 7.4 apresenta também algumas características da curva, como o valor de entrada de ar e o teor de umidade residual.

Segundo Fredlund & Xing (1994), o valor de entrada de ar de um solo é o valor da sucção mátrica a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios maiores do solo. O teor de umidade residual é o conteúdo de umidade a partir do qual é necessária uma grande variação de sucção para remover mais água do solo, ou, o valor de umidade a partir do qual aumentos de sucção não produzem variações significativas no conteúdo de umidade. Os meios gráficos, a partir do traçado de tangentes à curva, para determinar estes parâmetros, estão indicados na figura 7.4.

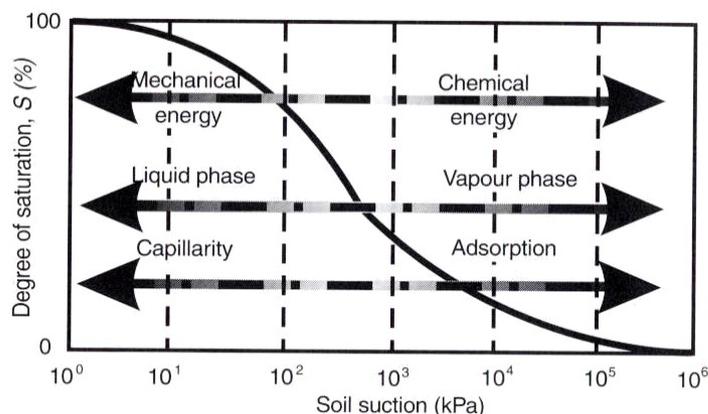


Figura 7.5 – Formas de energia, e Mecanismos de armazenagem de água representados em uma curva característica de sucção (Barbour, 1998)

Na figura 7.5, pode se observar a importância das diferentes componentes energéticas e o fenômeno de retenção de água predominante em uma curva característica de sucção.

Na figura 7.6, podem observar-se alguns dos fenômenos que afetam a forma da curva característica de sucção. Estão mostradas nesta figura curvas características (a) para distintos tipos de solos, (b) para diferentes tensões de adensamento e (c) para diferentes condições de compactação.

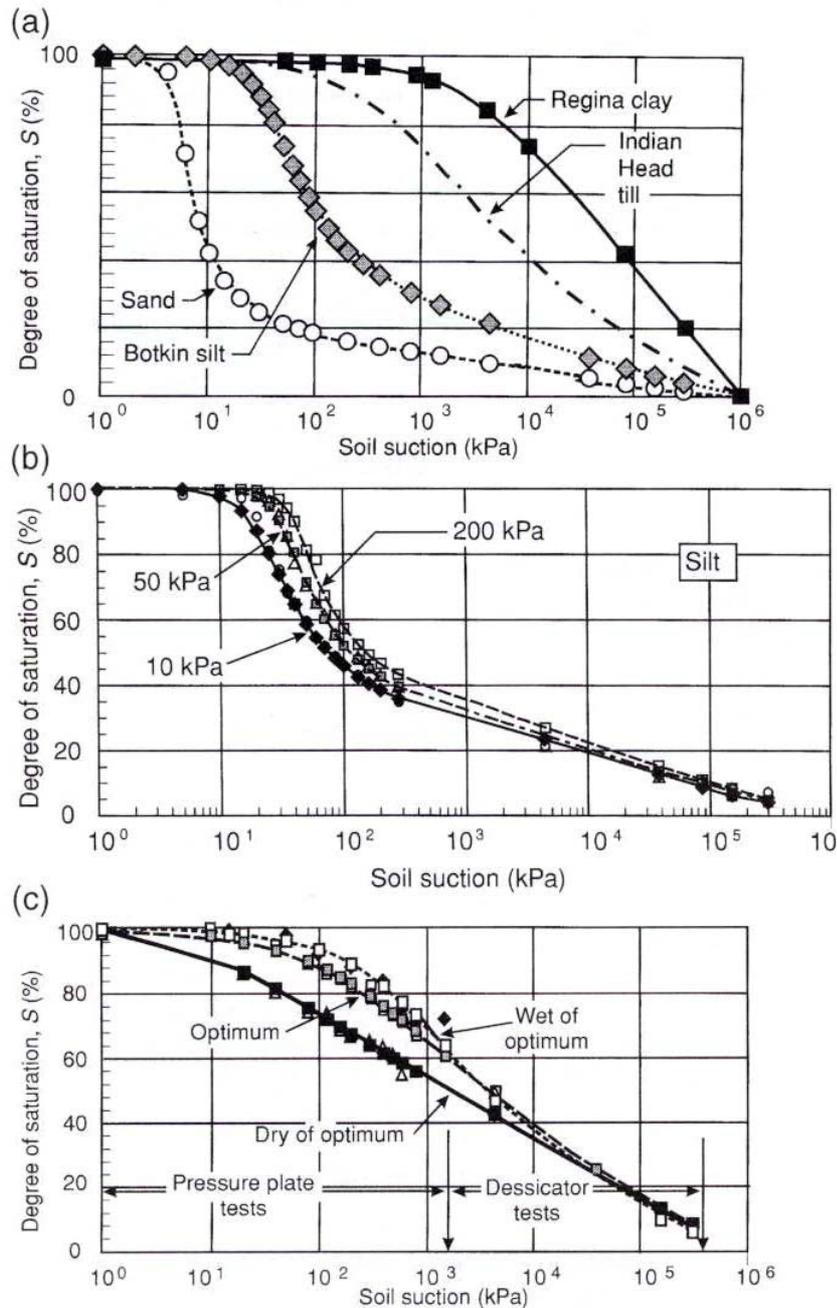


Figura 7.6 – Influência de a) textura do solo, b) consolidação, e c) da compactação, em uma curva característica de sucção (Barbour, 1998)

Na figura 7.6-a, pode-se observar que à medida que o tamanho das partículas decresce, o valor de entrada de ar, cresce; e a inclinação da curva torna-se mais suave. A diminuição do tamanho dos poros maiores, com o adensamento a pressões maiores, também faz crescer o valor de entrada de ar (ver figura 7.6-b), para valores de sucção elevados as curvas coincidem, ou seja o tamanho dos poros menores é pouco afetado pela consolidação (Barbour,1998). Finalmente na figura 7.6-c), estão mostrados os efeitos do conteúdo de umidade na compactação de um solo argiloso; do lado seco para o lado úmido há um aumento no valor de entrada de ar.

A temperatura também é um parâmetro importante para a medição dos valores de sucção. Por isso, sempre se recomenda que os ensaios sejam feitos em ambientes com temperatura controlada. Os efeitos da temperatura na determinação da sucção são analisados, entre outros, por de Campos et al. (1992), por Bachmann et al. (2002), e por Marinho (1994).

A curva característica pode ser utilizada para fornecer parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como o coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, variação do volume, transporte de contaminantes na zona não saturada. Em geral a relação entre estes parâmetros e a sucção é feita em termos de sucção mátrica.

Pelo menos nesta pesquisa, não foram achados estudos experimentais ou teóricos, que correlacionem as mudanças na sucção osmótica com os outros parâmetros (coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, variação de volume, etc.) do solo saturado ou não saturado. Em geral, os pesquisadores coincidem em afirmar que as mudanças nas propriedades dos solos estão relacionados a mudanças no valor de sucção mátrica, e não em mudanças na sucção total. Em geral, para solos naturais, onde o conteúdo de sais da água intersticial quase não apresenta mudanças, esta afirmação resulta verdadeira. No caso de solos contaminados, onde existe uma mudança nesta composição química quase simultânea com o ingresso do contaminante ao solo, a influência da componente de sucção osmótica na mudança das propriedades do solo (tanto saturado como não saturado) ainda não tem sido muito estudada.

É interessante mencionar que, a maioria dos pesquisadores afirma que as mudanças na sucção osmótica podem ser levadas em conta utilizando o valor da sucção total, nas relações obtidas para sucção mátrica. Para tal, bastaria trocar nas expressões o termo de sucção mátrica pelo de sucção total. Maiores informações sobre este aspecto podem ser obtidas em Fredlund et al., 1994;

Fredlund, 2000; Barbour, 1998; Fredlund et al., 1994; Fredlund and Rahardjo, 1993; Yong, 2001; El-Kadi, 1985, Yong et al. 1992.

7.2.3.

Equações para a Curva Característica de Sucção

Numerosas formulas empíricas têm sido propostas para simular a curva característica de sucção de um solo. Brooks and Corey (1964) foram os primeiros pesquisadores a propor uma equação para definir a forma da curva característica,

$$\Theta = \left(\frac{\Psi b}{\Psi} \right)^\lambda$$

com

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

onde θ_s e θ_r são os conteúdos de umidade volumétrico e residual, respectivamente,

Ψ é a sucção

Ψb o valor de entrada de ar

λ é um índice relacionado com a distribuição de tamanhos de partículas.

Baseando-se no mesmo princípio, também outros pesquisadores propuseram equações para simular a forma da curva característica de sucção, como William et al (1983), McKee and Bumb (1984, 1987), Van Genuchten (1980), Gardner (1958) e Fredlund and Xing (1994). Algumas destas propostas estão resumidas na tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Resumo de algumas equações propostas para a curva característica de sucção

Autor(s)	Equação	Parâmetros do solo
Gardner, 1958	$w = \frac{w_s}{1 + \left(\frac{\Psi}{a_g} \right)^{n_g}}$	a_g, n_g
Van Genutcten, 1980	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a_{vg}} \right)^{n_{vg}} \right]^{m_{vg}}}$	a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}

Autor(s)	Equação	Parâmetros do solo
Maulem, 1976	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a_m}\right)^{n_m}\right]^{m_m}}$	$a_m, n_m, m_m=1/(1-n_m)$
Burdine, 1953	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a_b}\right)^{n_b}\right]^{m_b}}$	$a_b, n_b, m_b=2/(1-n_b)$
Fredlund and Xing, 1994	$w = C(\Psi) \frac{w_s}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{\Psi}{af}\right)^{n_f}\right)\right]^{m_f}}$	$a_f, n_f, m_f, C(\Psi)$

Nesta tabela, os parâmetros a , n e m são parâmetros de ajuste que dependem do tipo de solo e, w_s é o conteúdo de umidade correspondente com um grau de saturação de 100 %.

Fredlund & Xing (1994) partem da distribuição granulométrica do solo para obter uma equação que descreva a variação da sucção com o conteúdo de umidade volumétrica. Com este modelo, e considerando que o valor de sucção correspondente a um teor de umidade zero é igual a 10^6 kPa, eles acham uma equação que descreve esta relação.

O limite superior de sucção foi verificado experimentalmente para uma série de solos (Croney & Coleman, 1961) e também por considerações termodinâmicas (Richards, 1965).

A equação obtida por Fredlund & Xing (1994) é a seguinte,

$$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[e + (\psi/a)^n\right]\right\}^m} \quad \text{Eq. 7.3}$$

com

$$C(\psi) = \frac{-\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (1.000.000/\psi_r)]} + 1 \quad \text{Eq. 7.4}$$

onde, θ_s é o conteúdo de umidade volumétrica correspondente ao grau de saturação de 100% e, $C(\Psi)$ é uma função de correção para tomar em conta o limite superior de sucção, Ψ_r é o valor de sucção correspondente ao conteúdo de umidade volumétrica residual, θ_r .

Os parâmetros n , m e a são parâmetros de ajuste, e podem ser obtidos com o auxílio de procedimentos gráficos, como está mostrado na figura 7.7.

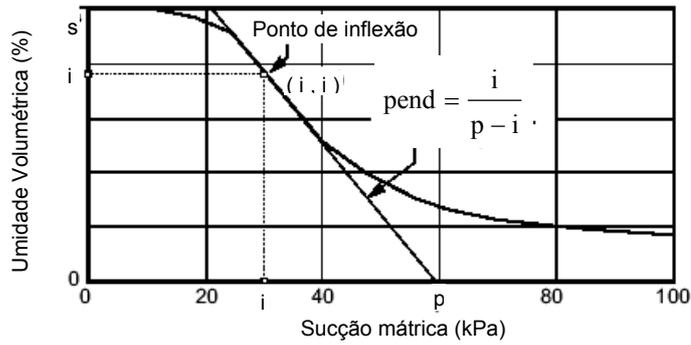


Figura 7.7 – Procedimentos Gráficos para obter os parâmetros a , n , m e Ψ_r (Adaptado de Fredlund and Xing, 1994)

A partir dos valores obtidos da curva, os parâmetros a , n , m , e Ψ_r , podem ser obtidos como,

$$a = \psi_i \quad \text{Eq. 7.5}$$

$$m = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right] \quad \text{Eq. 7.6}$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3,72s^* \quad \text{Eq. 7.7}$$

$$s^* = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1,31^m (\psi_i + \psi_r) \ln[1 + (1.000.000/\psi_r)]} \quad \text{Eq. 7.8}$$

$$s = \frac{\theta_i}{\ln(\psi_p/\psi_i)} \quad \text{Eq. 7.9}$$

A influência de cada um destes parâmetros na forma da curva característica, está mostrada nas figuras 7.8, 7.9 e 7.10.

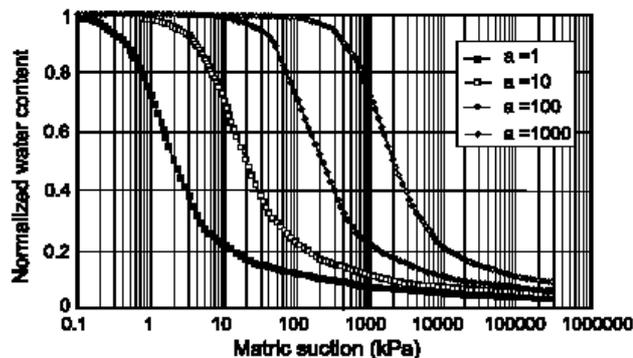


Figura 7.8 – Influência do parâmetro a na forma da curva característica, com $n=2$ e $m=1$ (Fredlund and Xing, 1994)

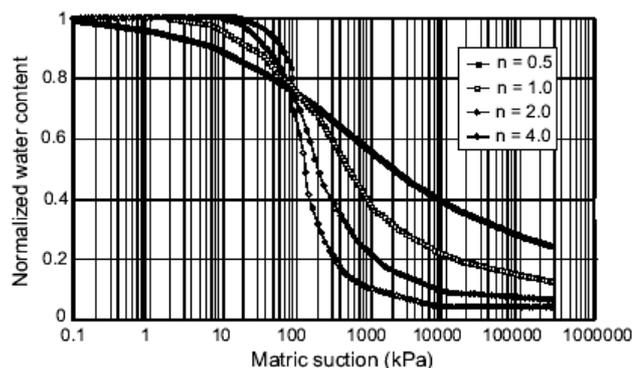


Figura 7.9 – Influência do parâmetro n na forma da curva característica, com $a=100$ e $m=1$ (Fredlund and Xing, 1994)

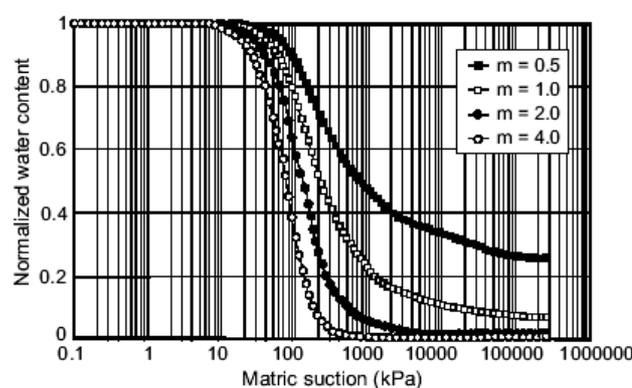


Figura 7.10 – Influência do parâmetro m na forma da curva característica, com $a=100$ e $n=2$ (Fredlund and Xing, 1994)

7.2.4. Métodos de Medição

Existe uma grande variedade de técnicas para a medição da sucção em solos. Na tabela 7.2 estão apresentadas as técnicas mais utilizadas para medir sucção e os níveis de sucção de aplicação de cada técnica.

Exceto a placa de pressão, em todas estas técnicas mede-se o conteúdo de água ou alguma propriedade física sensível à mudança no conteúdo de água (umidade relativa, resistência elétrica, taxa de dissipação de calor, etc.). Ou seja, o parâmetro medido nessas técnicas não é a sucção, sendo necessárias curvas de calibração para calcular o valor da sucção nos solos. Na tabela 7.3 estão resumidas a leituras de “saída” de algumas técnicas.

Tabela 7.2 - Técnicas de medição de sucção (Marinho, 1997)

Técnica	Sucção Mátrica	Sucção Osmótica	Sucção Total	Intervalo (kPa)
Psicrômetro		x	x	100 – 8000
Papel Filtro	x		x	0 – 29000
Tensiômetro	x		x	0 – 90 0 – >1000
Translação de eixos	x			0 – 1500
Condutividade térmica	x			0 – 400
Condutividade elétrica	x	x		20 - 1500

Tabela 7.3 – Resumo das leituras de saída de algumas técnicas para medir sucção (Adaptado de Lee & Wray, 1995)

Técnica	Leitura de saída
Placa de pressão	Conteúdo de água, pressão de ar.
Sensor térmico	Taxa de dissipação de calor.
Psicômetro	Umidade relativa.
Papel Filtro	Conteúdo de água.

Uma técnica recentemente desenvolvida por Lykos & Lu (2003) consiste em um sistema experimental automatizado, que permite aplicar valores de sucção total em solos argilosos não saturados, a partir do controle da umidade relativa. O sistema permite o controle da sucção total em um intervalo de aproximadamente 7.000 a 700.000kPa, mantendo uma proporção adequada dos conteúdos de nitrogênio “seco” e “úmido”, em uma câmara fechada. Esta proporção é controlada por um sistema automático. Para obter as curvas características, o conteúdo de umidade dos solos colocados na câmara é medido continuamente com uma balança eletrônica, como a quantidade de água adsorvida ou perdida em resposta à sucção aplicada. Quatro tipos de argila foram ensaiados utilizando o sistema automatizado, e os resultados foram comparados com valores de sucção medidos para a técnica do papel filtro sem contato, mostrando ambos resultados uma boa concordância para dois dos materiais ensaiados.

A seguir, é apresentada uma descrição do Método do Papel Filtro, que foi a técnica utilizada nesta dissertação para obter as curvas características dos solos.

Detalhes de procedimento, aplicação assim como vantagens e desvantagens das outras técnicas citadas na tabela 7.2 podem ser consultadas em Marinho (1994, 1997), de Campos et al. (1992), Fredlund and Rahardjo (1993, 1999), Lee & Wray (1995), Trong & Holden (1995), Villar (2002), e Ridley et al. (2003), entre outros.

- ***Método do papel filtro***

Quando um solo é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, a mesma irá passar do solo para o material poroso, até que o equilíbrio seja alcançado. O Método do Papel Filtro baseia-se neste princípio. Um solo, com alguma umidade, quando é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor, faz com que este último absorva uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de pressão.

Tendo-se a relação entre sucção e umidade do material poroso, ou seja, a curva de calibração, a sucção do solo pode ser obtida. O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém conteúdos de umidade diferentes. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da correta sucção (Marinho, 1994).

Normalmente papel filtro “quantitativo”, tipo 2 é utilizado. Os mais usados são Whatman Nº 42 e Schleicher & Schell Nº 589. Dependendo do tipo de contato entre o papel e o solo, o papel filtro pode medir tanto sucção mátrica quanto total. Para entender esta capacidade do papel filtro, é interessante lembrar a figura 7.1. O papel filtro na medição de sucção mátrica fica em contato com o solo e atua como uma membrana permeável à água e solutos, ou seja, a solução intersticial é permitida de se mover através do papel filtro junto com a água absorvida, a transferência de água do solo para o papel é feita por capilaridade (figura 7.11a). No caso da medição de sucção total, o papel não fica em contato com o solo e, então, o ar que fica entre o papel filtro e o solo atua como membrana semipermeável. A transferência aqui é feita através de vapor (figura 7.11b), e o vapor antes de ser absorvido pelo papel filtro deve superar as forças matricial e osmótica para sair do solo.

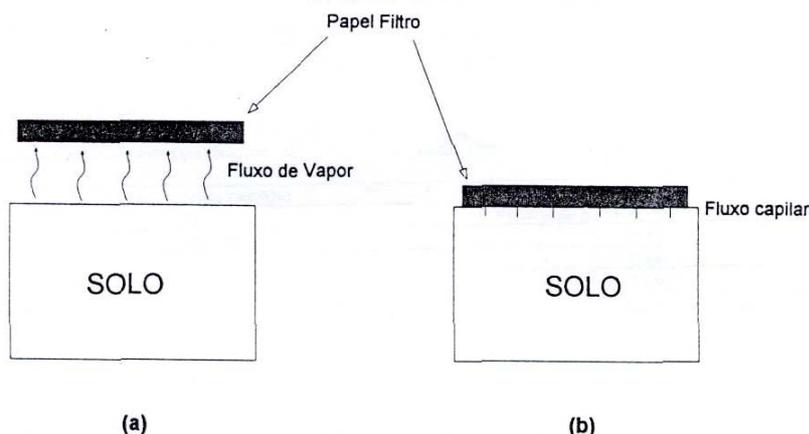


Figura 7.11 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho, 1997)

A metodologia para medir sucção do solo, pelo método do papel filtro foi padronizada pela norma ASTM D5298-92. Outros procedimentos recomendados podem ser consultados em Marinho (1994) e Ridley et al. (2003).

Como já foi mencionado, o método do papel filtro precisa da obtenção de uma relação entre a umidade do papel filtro e o valor de sucção, para determinar o valor de sucção do solo.

Diferentes técnicas podem ser usadas para calibrar o papel filtro. As principais estão apresentadas na tabela 7.4. O procedimento de calibração consiste em permitir que o papel filtro atinja o estado de equilíbrio com uma sucção conhecida. Depois que o equilíbrio é alcançado o papel filtro é pesado e seco em estufa. A umidade é obtida e relacionada com a sucção gerada. A escolha do método para a geração da sucção depende do nível de sucção desejado (Marinho, 1994).

Um dos aspectos mais importantes para se obter uma adequada medição de sucção é garantir que o papel filtro, após o equilíbrio, seja removido do ambiente de equilíbrio sem perda significativa de umidade.

Tabela 7.4 - – Técnicas usadas para calibração do papel filtro (Marinho, 1997)

Técnica	Faixa de sucção para calibração do papel filtro	Comentários
Placa de Sucção	0 – 1 atm	Sucção gerada diretamente
Amostras de campo	0 – 2MPa	Utiliza a habilidade dos solos plásticos de sustentar a média da tensão efetiva quando descarregado sob condição não drenada. Assume-se que a sucção matricial é numericamente igual a média da tensão efetiva da amostra no campo.

Cont. Tabela 7.4

Técnica	Faixa de sucção para calibração do papel filtro	Comentários
Amostras edométricas	0.1 MPa – 2 MPa	Assume-se descarregamento unidimensional e não drenado. A pressão de consolidação aplicada é numericamente igual a sucção mátrica da amostra descarregada.
Placa de Pressão	0 – 1.5 MPa	Usa a técnica de translação de eixos
Dessecador	0.5 MPa – 30 MPa	Soluções com a pressão de vapor conhecida são utilizadas. O papel filtro é colocado em ambiente fechado com a solução. A transferência de água é por vapor. O equilíbrio é alcançado quando a afinidade por água da solução usada e do papel filtro são equalizadas.

Existem varias curvas de calibração para os principais papéis filtros utilizados, disponíveis na literatura, e não há um consenso sobre qual é a mais adequada. Nas tabelas 7.5 e 7.6 se resumem algumas destas curvas de calibração. Em geral, elas são compostas por duas equações, que indicam a diferente sensibilidade da resposta do papel filtro para altos e baixos níveis de sucção.

Tabela 7.5 – Curvas de Calibração para o papel Watman N°42

Referência	Curva de Calibração	
Hamblin (1981)	$\log S = 8.022 - 3.683 \times \log wf$	
Chandler et al. (1992)	$\log S = 4.84 - 0.0622 \times wf$	$wf \leq 47$
	$\log S = 6.05 - 2.48 \times \log wf$	$wf > 47$
ASTM (1997)	$\log S = 5.327 - 0.0779 \times wf$	$wf < 45.3$
	$\log S = 2.413 - 0.0135 \times wf$	$wf \geq 45.3$
Leong et al. (2002)	$\log S = 2.909 - 0.0229 \times wf$	$wf \geq 47$
Sucção Mátrica	$\log S = 4.945 - 0.0673 \times wf$	$wf < 45.3$
Leong et al. (2002)	$\log S = 8.778 - 0.222 \times wf$	$wf \geq 26$
Sucção Total	$\log S = 5.31 - 0.0879 \times wf$	$wf < 26$

S = Sucção em kPa; wf = umidade do papel filtro

Tabela 7.6 – Curvas de Calibração para o papel Schleicher & Schuell N° 589

Referência	Curva de Calibração	
Mac Queen and Miller (1968)	$\log S = 5.238 - 0.0723 \times wf$	$wf < 54$
	$\log S = 1.8966 - 0.01025 \times wf$	$wf \geq 54$
Al-Khafaf and Hanks (1974)	$\log S = 4.136 - 0.0337 \times wf$	$wf < 85$
	$\log S = 2.0021 - 0.009 \times wf$	$wf \geq 85$
McKeen (1980)	$\log S = 4.9 - 0.0624 \times wf$	$wf < 66$
	$\log S = 1.25 - 0.0069 \times wf$	$wf \geq 66$
ASTM (1997)	$\log S = 5.056 - 0.0688 \times wf$	$wf < 54$
	$\log S = 1.882 - 0.0102 \times wf$	$wf \geq 54$
Leong et al. (2002)	$\log S = 2.659 - 0.018 \times wf$	$wf \geq 54$
Sucção Mátrica	$\log S = 5.438 - 0.069 \times wf$	$wf < 54$
Leong et al. (2002)	$\log S = 8.778 - 0.191 \times wf$	$wf \geq 32$
Sucção Total	$\log S = 5.26 - 0.0705 \times wf$	$wf < 32$

S = Sucção em kPa; wf = umidade do papel filtro

Uma comparação destas curvas está apresentada nas figuras 7.12 e 7.13.

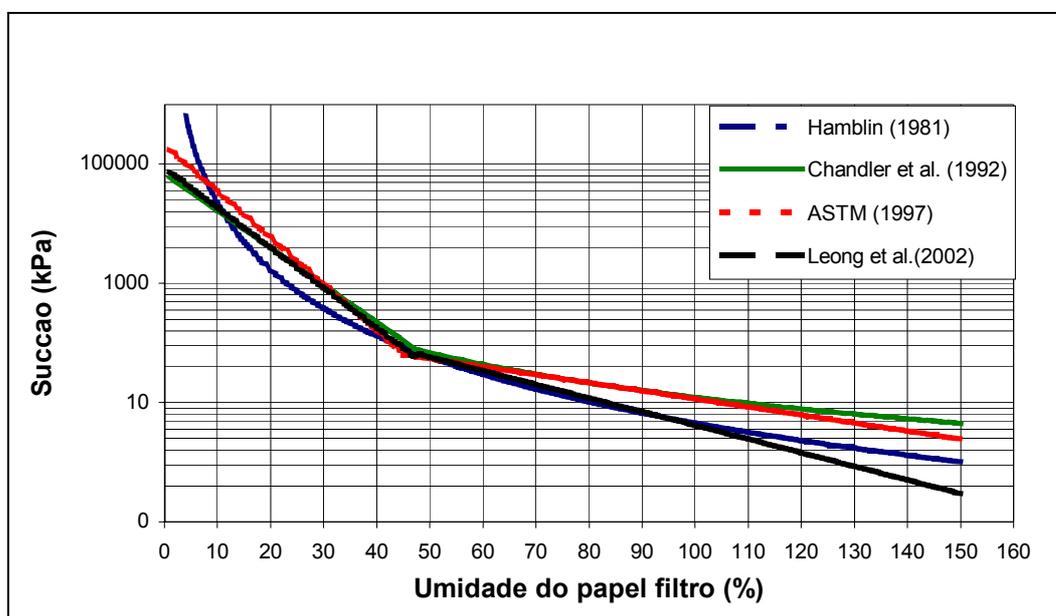


Figura 7.12 – Curvas de calibração para o papel filtro Whatman N° 42

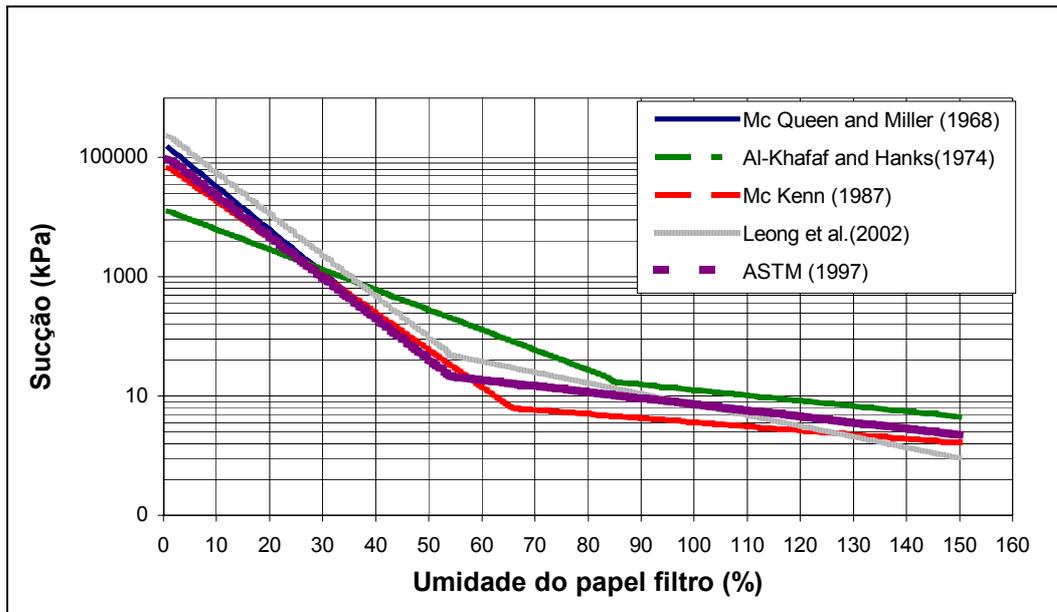


Figura 7.13 – Curvas de calibração para o papel filtro Schleicher & Schuell N° 589

Outros trabalhos que merecem atenção são os de Fredlund et al. (1999), e o de Bulut et al. (2001). Fredlund et al. (1999) apresentam uma calibração indireta para o papel filtro Schleicher and Schuell N° 589.

Bulut et al. (2001) apresentam duas curvas de calibração para o papel filtro Schleicher & Schuell N° 589, uma para o papel filtro inicialmente úmido, e a outra para o papel inicialmente seco. Eles acham que a curva de calibração por umedecimento do papel filtro é a que dá o melhor ajuste para medir tanto valores de sucção total como mátrica.

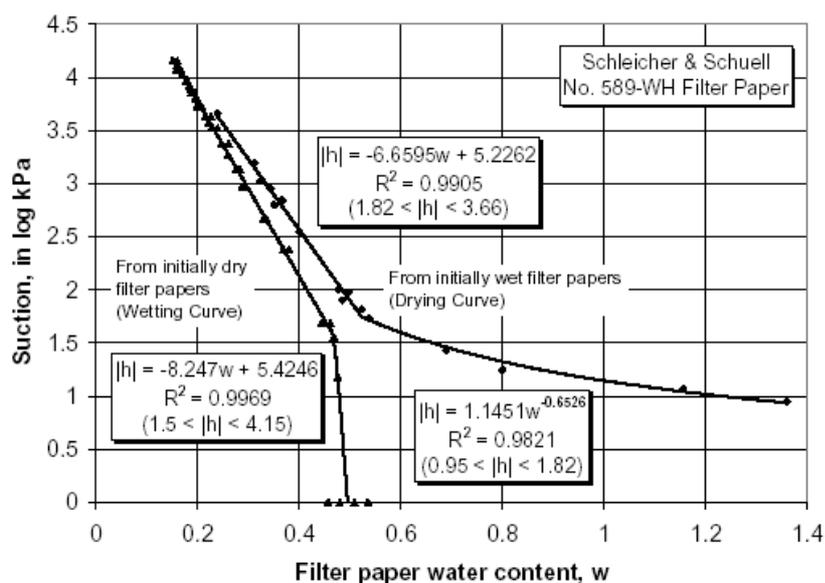
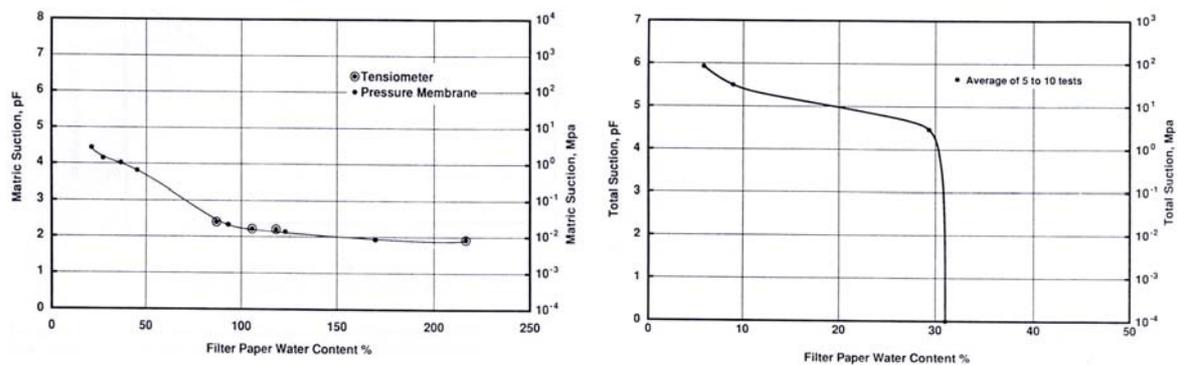


Figura 7.14 – Curva de Calibração (Bulut et al, 2001)

Uma das polêmicas com respeito ao método do papel filtro está na utilização de uma única curva de calibração para os métodos sem contato (sucção total) e com contato (sucção mátrica). Houston et al. (1994) apresentam uma curva de calibração para as medições de sucção total, e outra para as medições de sucção mátrica, na calibração do papel Fisher 9,54A (ver Figura 7.15). Segundo Marinho (1994), isto teria acontecido pelo fato do tempo de equalização utilizado ter sido muito curto.

Também Leong et al. (2002) adotaram duas curvas de calibração, uma para cada tipo de sucção, baseando-se em que a resposta do papel filtro é diferente para sucções mátricas e totais. Nas figuras 7.16 e 7.17, se mostram as curvas de calibração obtidas por este pesquisadores. As equações já foram apresentadas nas tabelas 7.5 e 7.6.



a) Curva de calibração para sucção mátrica

b) Curva de calibração para sucção total

Figura 7.15 – Curvas de calibração para o papel filtro Fisher 9,54A (Houston et al., 1994)

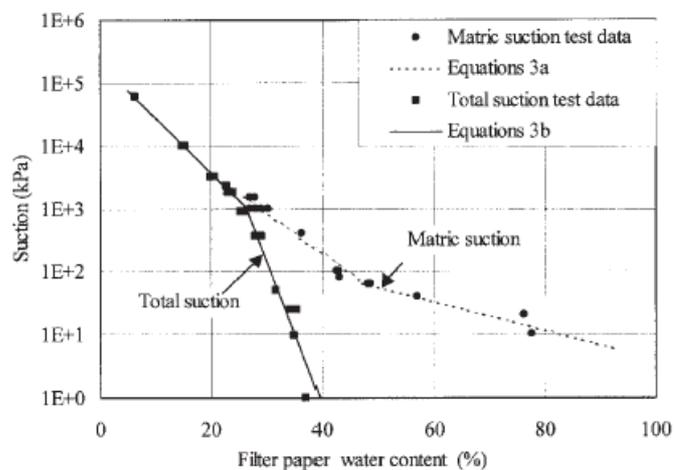


Figura 7.16 – Curvas de Calibração papel filtro Whatman N° 42 (Leong et al., 2002)

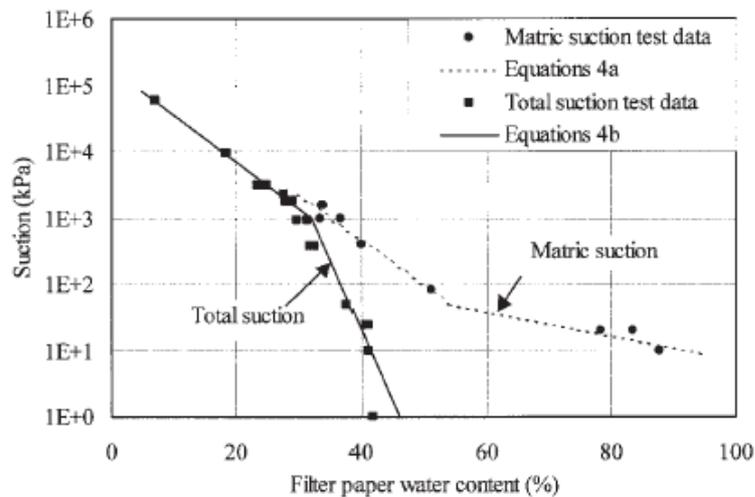


Figura 7.17 – Curvas de Calibração papel filtro S&S 589 (Leong et al.,2002)

Fredlund (1992) informa que existe uma tendência de convergência entre a sucção total e mátrica para altos valores de sucção, ou baixos conteúdos de umidade. Isto pode ser explicado, tendo em vista que, para umidades baixas, a transferência de umidade entre o solo e o papel filtro ocorre predominantemente por fluxo de vapor.

Outras limitações do método, de acordo com Woodburn & Lucas (1995), são o tempo exigido para atingir o equilíbrio, o efeito da variação de temperatura e a necessidade de fazer medições muito exatas de massa do papel filtro. O tempo exigido para atingir a situação de equilíbrio varia segundo se queiram determinar valores de sucção total ou mátrica. Na tabela 7.7 são resumidas as propostas de alguns pesquisadores.

Tabela 7.7 – Tempos de equalização para o método do papel filtro (Leong et al.,2002)

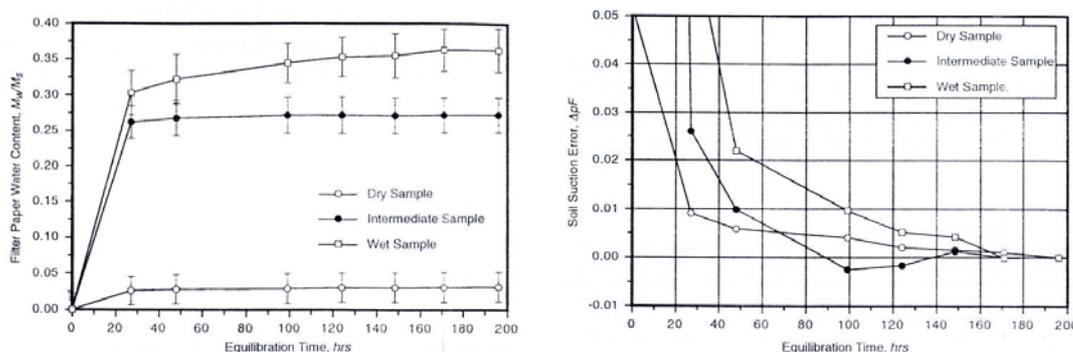
References	Equilibration Time	Filter Paper Method
Fawcett and Collis-George (1967)	6–7 days	Contact
McQueen and Miller (1968b)	7 days	Contact
Al-Khafaf and Hanks (1974)	2 days	Contact and uncertain contact
Hamblin (1981)	Minutes–36 days	Contact
Chandler and Gutierrez (1986)	5 days	Contact
Duran (1986)	7 days	Noncontact
Greacen et al. (1987)	7 days	Contact
Sibley and Williams (1990)	3 days	Contact
Lee and Wray (1992)	10 days	Noncontact
Houston et al. (1994)	14 days	Contact and noncontact
Harrison and Blight (1998)	7 days	Contact and noncontact
	7–10 days	Wetting and noncontact
	21 days	Drying and noncontact
	10 days	Wetting and contact
	25–30 days	Drying and contact

Segundo Marinho (1994), para medições de sucção mátrica é suficiente um período de equalização de 7 dias, já para a medição de sucção total, a duração deste período depende do nível de sucção, como está indicado na tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Tempo de equilíbrio para medição de sucção total (Marinho, 1997)

Nível de Sucção Total (kPa)	Tempo de equilíbrio sugerido
0 – 100	> 30 dias
100 – 250	30 dias
250 – 1000	15 dias
1000 – 30000	7 dias

Swarbrick (1995) executou ensaios com amostras com diferentes teores de umidade, para estudar o erro associado às medições de sucção com o tempo de equilíbrio. Na figura 7.18 são apresentados os resultados obtidos por este pesquisador. Nestas figuras “*wet sample*” corresponde a um valor de sucção de 3.1 pF (442 MPa), “*intermediate sample*”, 3.6 pF (514 MPa), e “*dry sample*” a 6 pF (857 MPa). O tempo máximo de equalização necessário foi de 7 dias, e correspondeu à amostra identificada como “*wet sample*”.



a) Conteúdo de água do papel filtro vs tempo de equilíbrio

b) Erro nos valores de sucção vs tempo de equilíbrio

Figura 7.18 – Influência do tempo de equalização no método do papel filtro (Swarbrick, 1995).

A flutuação da temperatura é outro problema importante, já que pode provocar condensação ou evaporação, alterando assim o tempo de equalização necessário. Para minimizar os efeitos deste problema, se recomenda o uso de caixas isolantes, como caixas de isopor, para a conservação das amostras durante o período de equalização.

Segundo Woodburn & Lucas (1995), para a medição de sucção matricial, o recipiente com solo e papel deve ficar em locais com variações de temperatura menores que 3°C, nos casos de medição de sucção total esta variação deve ser menor que 0,5°C.

Com respeito à determinação da massa do papel filtro, um dos inconvenientes, é que retirado do contato com o solo, ele perde rapidamente água e quando retirado da estufa, após a secagem, absorve rapidamente água do ambiente, variando assim a massa do papel. Marinho recomenda a utilização de uma balança com precisão de leitura de 0.0005 g, e um tempo de transferência de no máximo 5 segundos.

Villar (2002), propõe monitorar a perda (ou ganho) de umidade do papel por cinco minutos (usando uma balança com precisão de 0.0001g) com leituras durante o primeiro minuto de 10 em 10 segundos, depois de 30 em 30 segundos. Fazendo uma regressão linear entre os dados de raiz de tempo e da massa do papel filtro, obtém-se o valor da massa para o tempo zero.

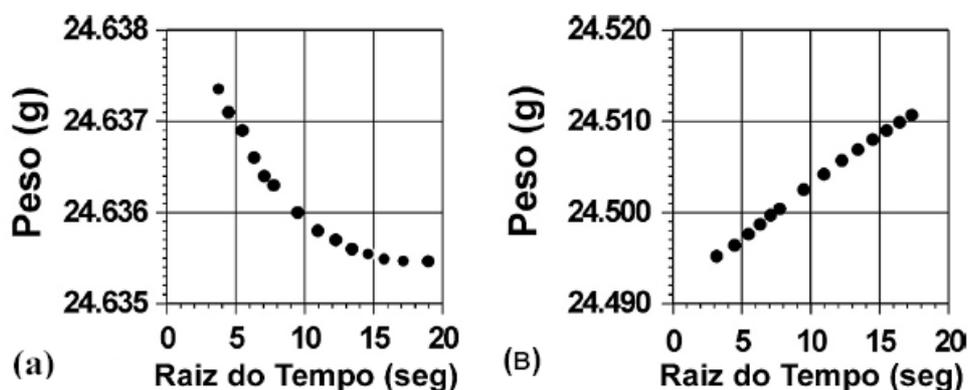


Figura 7.19 - Curvas de Acompanhamento da Variação do Peso do Papel Filtro: (a) Após Retirar da Câmara de Equalização (Perda de Umidade) e (b) Após Retirar da Estufa (Ganho de Umidade), (Villar, 2002)

Até aqui se procurou resumir os pontos mais importantes do método do papel filtro, maiores detalhes e uma revisão mais completa podem ser consultados em Marinho (1994).

7.3. Ensaio Executados

A idéia de fazer estes ensaios foi determinar a mudança que o licor cáustico pode produzir nas curvas características de sucção mátrica e total. Para

isto foram determinadas as curvas características dos materiais naturais e dos materiais contaminados. As amostras naturais foram moldadas dos blocos indeformados, já as contaminadas foram moldadas dos corpos de prova provenientes dos ensaios edométricos Tipo 1, após a finalização do ensaio.

A determinação da sucção mátrica visou a observar as mudanças na estrutura dos solos pela percolação do licor cáustico. Já a medição da sucção total foi uma maneira de avaliar a mudança na sucção osmótica. Uma mudança na sucção osmótica era esperada, já que com a passagem do licor se modifica a composição da água dos poros, aumentando o conteúdo de sais.

Para esta determinação, optou-se pela utilização do método do papel filtro e pela utilização das câmaras de equalização. Isto permitiu fazer, concomitantemente, as medidas de sucção mátrica e total.

Um dos motivos que motivou a escolha deste método foi, justamente, a possibilidade de medir ambas as grandezas com o mesmo equipamento, e também a vantagem que este método permite obter a curva característica completa, ou seja, permite cobrir todo o intervalo de variação de sucção do solo. O fato de ser um método simples de executar e controlar também influenciou na escolha.

No Capítulo 3, encontram-se descritas a metodologia utilizada e as características do equipamento (câmaras de equalização), pelo que só se ressaltaram aqui alguns pontos de interesse. Na figura 7.20 pode se observar o arranjo final do conjunto.

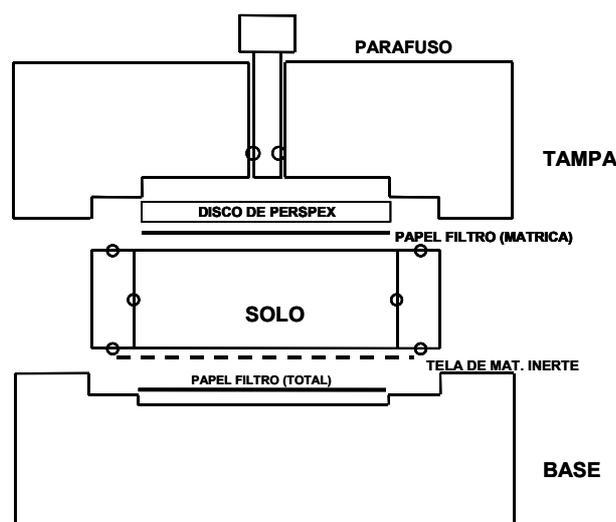


Figura 7.20 – Seção transversal da câmara de equalização.

Foi utilizado papel filtro Whatman Nº 42, cortado no mesmo diâmetro que a amostra de solo, usando um papel filtro para cada medição.

Neste trabalho não foram feitas calibrações para o papel filtro, utilizou-se a curva de calibração de Chandler et al. (1992), e o procedimento de ensaio descrito no Capítulo 3. O papel filtro inicialmente encontrava-se seco ao ar.

As dimensões dos corpos de prova provenientes dos ensaios edométricos (7 cm de diâmetro por aproximadamente 9 de altura) obrigaram à reutilização dos anéis de solo, variando sua umidade para poder obter as curvas características completas.

Nas amostras contaminadas, que eram moldadas diretamente dos corpos de prova do ensaio edométrico, os valores iniciais de grau de saturação eram de aproximadamente 80%. Já nas amostras naturais, o maior grau de saturação obtido foi de 85%.

7.3.1. Resultados obtidos

As curvas características obtidas estão apresentadas nas figuras 7.21 a 7.26. Os parâmetros mais importantes como valor de entrada de ar e conteúdo de umidade residual estão resumidos nas tabelas 7.9, 7.10 e 7.11.

Tendo em vista o comportamento observado nas duas primeiras curvas características de materiais não contaminados, nas quais os valores de sucção mátrica e total são praticamente iguais, e por limitações de tempo, optou-se por determinar, para o material do ensaio 3, somente valores de sucção mátrica. Neste caso se utilizaram, dois papéis filtros por medição e não se utilizaram as câmaras de equalização.

7.3.1.1. Curvas Características dos materiais naturais

A continuação, nas figuras 7.21 a 7.23, são mostradas as curvas características dos materiais naturais, para obter os valores de entrada de ar e conteúdo de umidade residual foram usadas as equações 7.3 e 7.5 (Fredlund and Xing, 1994).

Um fato interessante do comportamento do material, é que a curva apresenta dois comportamentos diferenciados segundo o nível de sucção, ou o grau de saturação. A primeira parte da curva característica é similar à curva

característica de um material arenoso, até uma sucção de aproximadamente 10 kPa ; a partir daí o comportamento da curva muda e passa a ser similar ao de um material argiloso.

Este comportamento dual obrigou a definir dois parâmetros adicionais, o valor de entrada secundária de ar, e o conteúdo de umidade residual primário. O valor de entrada secundária de ar é o valor de sucção para o qual começa a entrar ar nos poros pequenos. E o conteúdo de umidade residual primário é o valor de umidade residual para a primeira porção da curva. Estes valores são obtidos pelo mesmo método de tangentes (Figura 7.7), a diferença está em que se considera cada curva individualmente. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 7.9.

Este comportamento diferenciado obrigou, também, a utilizar duas curvas para simulá-lo, como está mostrado nas figuras 7.21 a 7.23. Nestas figuras, o ponto correspondente à sucção de 0,1 kPa foi calculado teoricamente, e corresponde a um grau de saturação de 100%. Então, a umidade volumétrica é igual à porosidade.

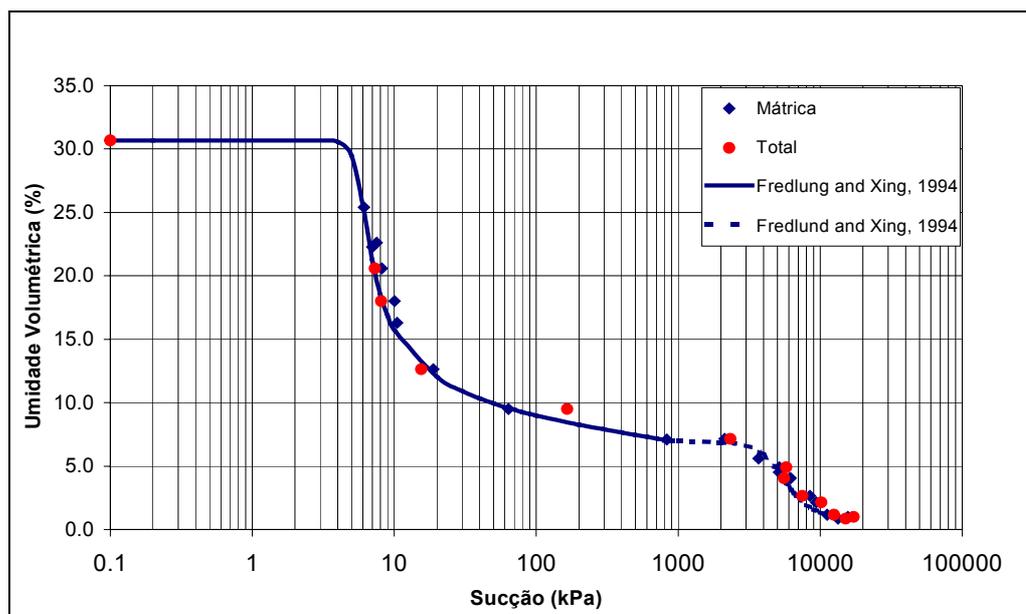


Figura 7.21 – Curva Característica de Sucção para o solo E1-CS3

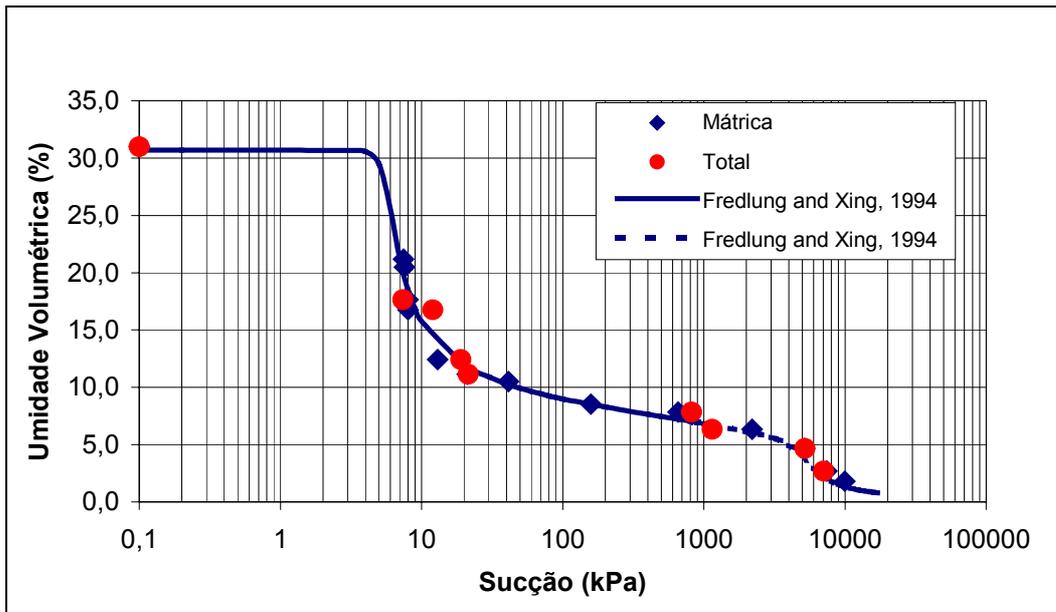


Figura 7.22 – Curva Característica de Sucção para o solo E2-CN3

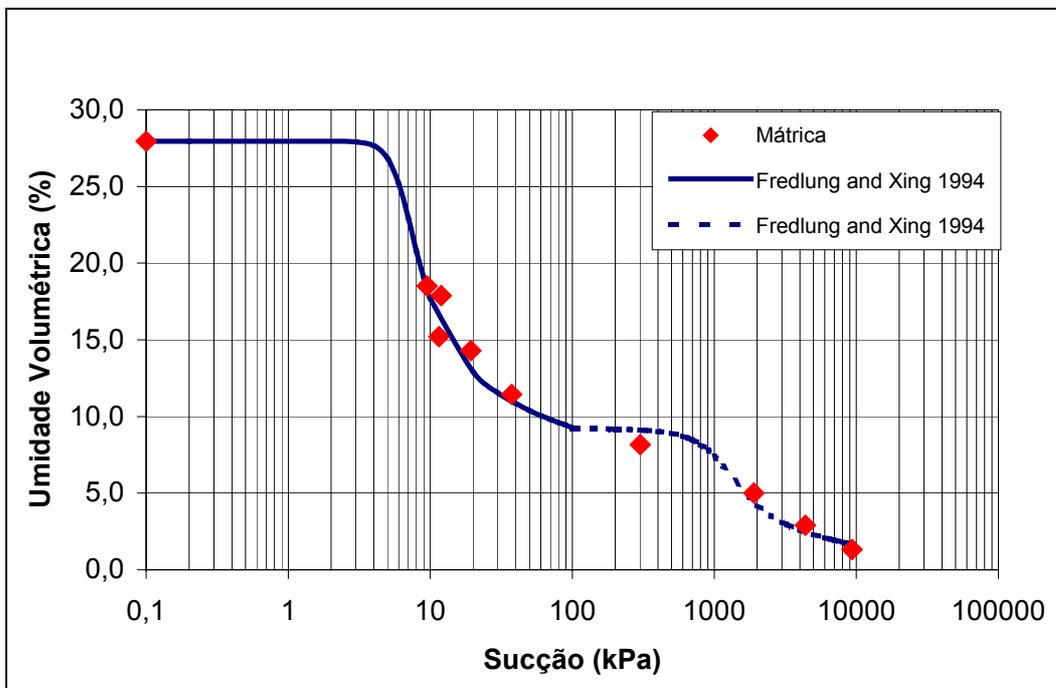


Figura 7.23 – Curva Característica de Sucção Mátrixa para o solo E3-CN2.

Tabela 7.9 – Parâmetros da curva característica de sucção mátrixa para os materiais naturais

Solo	Ψ_{EA} (kPa)	θ_r (%)	S_r (%)	Ψ_{ESA} (kPa)	θ_r primário (%)	S_r primário (%)
E1 – CS3	5,0	1,5	5,00	2800	11,0	36,67
E2 – CN3	5,0	1,8	5,71	2700	11,5	36,51
E3 – CN2	4,8	2,5	8,96	800	12,0	43,01

Ψ_{EA} =valor de entrada de ar, Ψ_{ESA} =valor de entrada secundária de ar, θ_r =conteúdo de umidade volumétrica residual, S_r =grau de saturação residual.

7.3.1.2 Curvas Características dos materiais contaminados

Na obtenção das curvas características apresentadas nas figuras 7.24, 7.25 e 7.26, valem as mesmas considerações feitas para as curvas do material natural.

Na tabela 7.10 são apresentados os valores de entrada de ar e conteúdo de umidade volumétrica residual. Como também aqui a curva apresenta um comportamento dual, se informam os valores de entrada secundária de ar e conteúdo de umidade volumétrica residual primário.

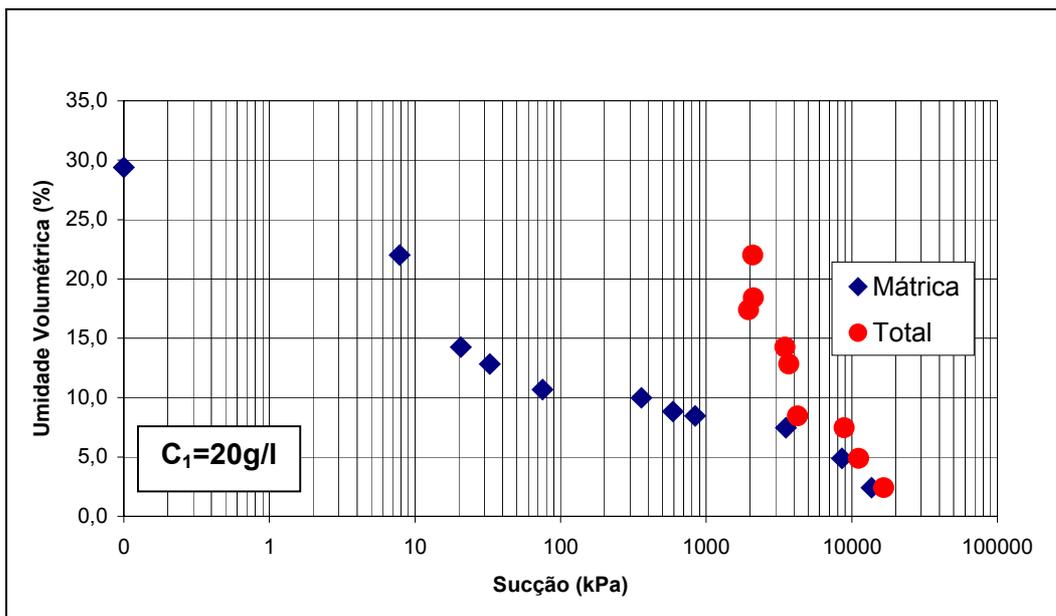
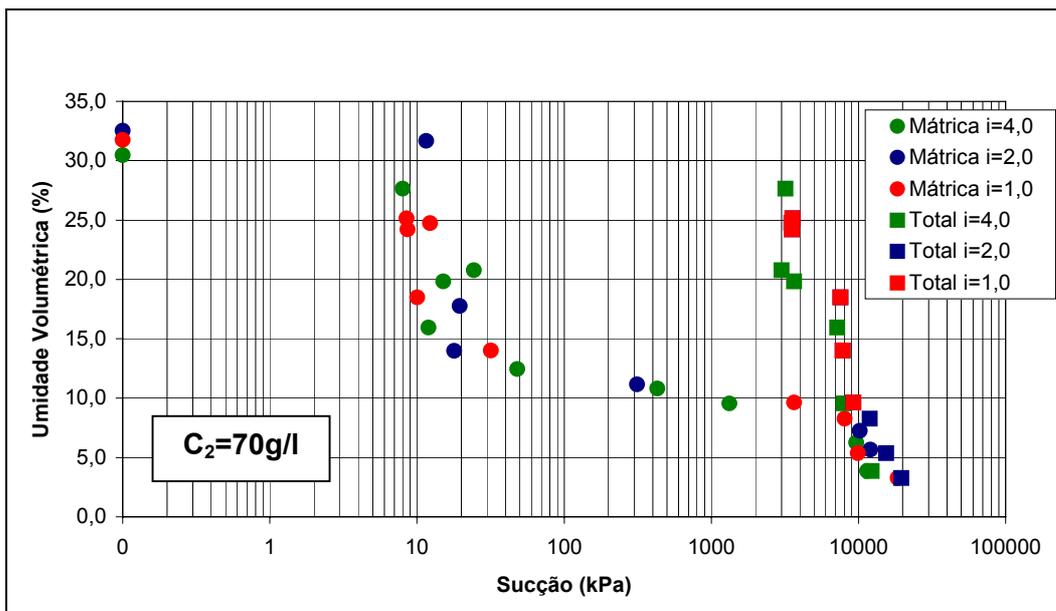
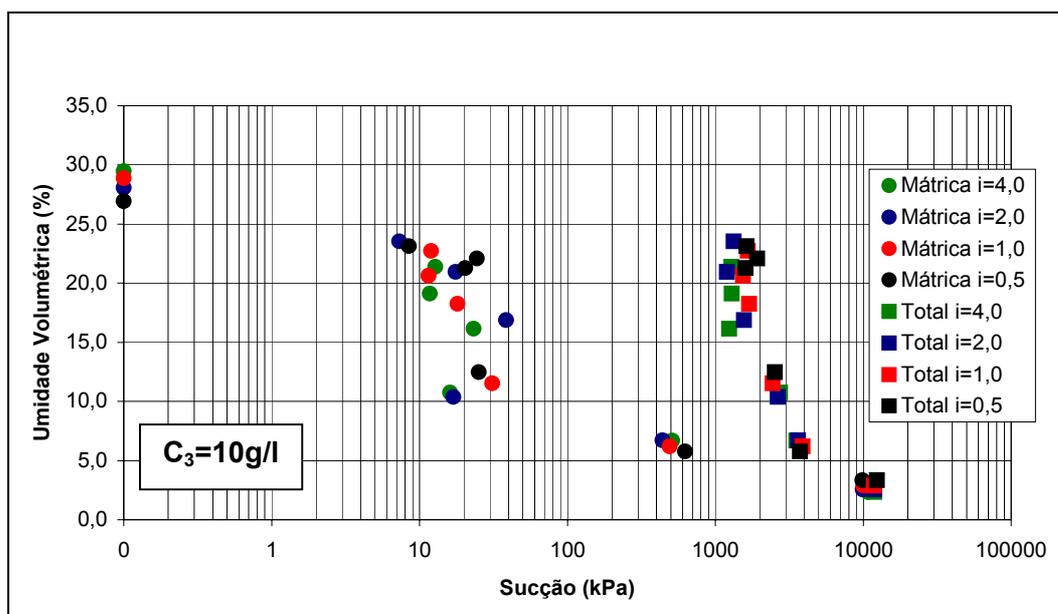


Figura 7.24 - Curvas Características de Sucção para o material contaminado – Ensaio C₁.



(*) i =gradiente hidráulico do ensaio edométrico

Figura 7.25 – Curvas Características de Sucção para o material contaminado – Ensaio C₂.



(*) i =gradiente hidráulico do ensaio edométrico

Figura 7.26 – Curvas Características de Sucção para o material contaminado – Ensaio C_3 .

Tabela 7.10 – Parâmetros da curva característica de sucção mátrica para os materiais contaminados

Ensaio	Ψ_{EA} (kPa)	θ_r (%)	S_r (%)	Ψ_{ESA} (kPa)	θ_r primário (%)	S_r primário (%)
$C_1=20$ g/l	4,8	2,5	8,62	3000	12,0	41,37
$C_2=70$ g/l	5,2	3,5	11,44	3600	13,8	45,10
$C_3=10$ g/l	4,0	2,0	7,06	700	10,5	37,10

Ψ_{EA} =valor de entrada de ar, Ψ_{ESA} =valor de entrada secundária de ar, θ_r =conteúdo de umidade volumétrica residual, S_r =grau de saturação residual

7.3.1.3.– Sucção Osmótica

Para ter uma idéia do nível de sucção osmótica que apresentam estes materiais após a percolação do licor, se determinou o valor de sucção osmótica subtraindo dos valores de sucção total os valores de sucção mátrica. O resultado pode ser conferido na figuras 7.27, 7.28, 7.29.

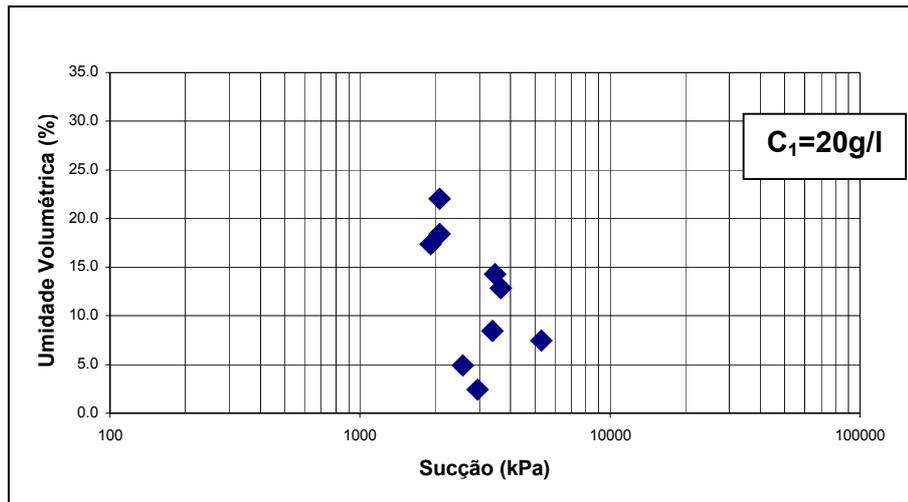


Figura 7.27 – Curva Característica de sucção osmótica para o material contaminado – Ensaio C₁

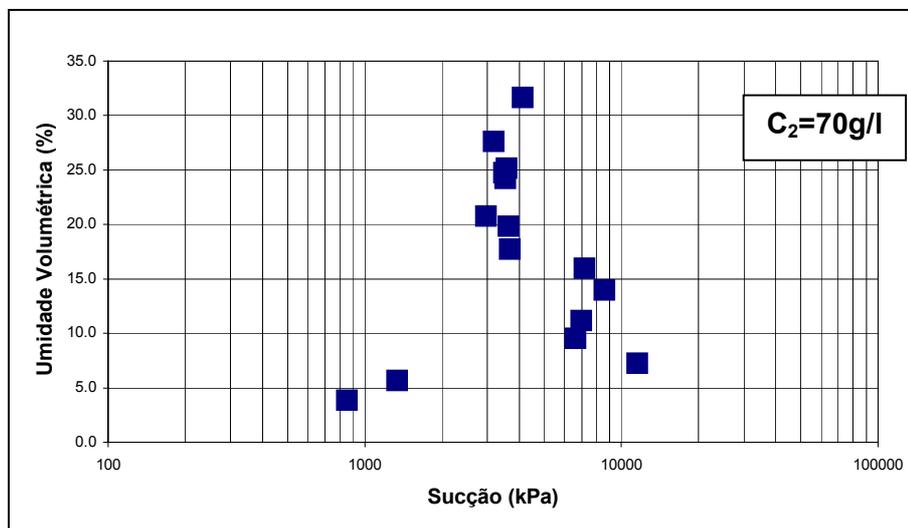


Figura 7.28 – Curva Característica de sucção osmótica para o material contaminado – Ensaio C₂

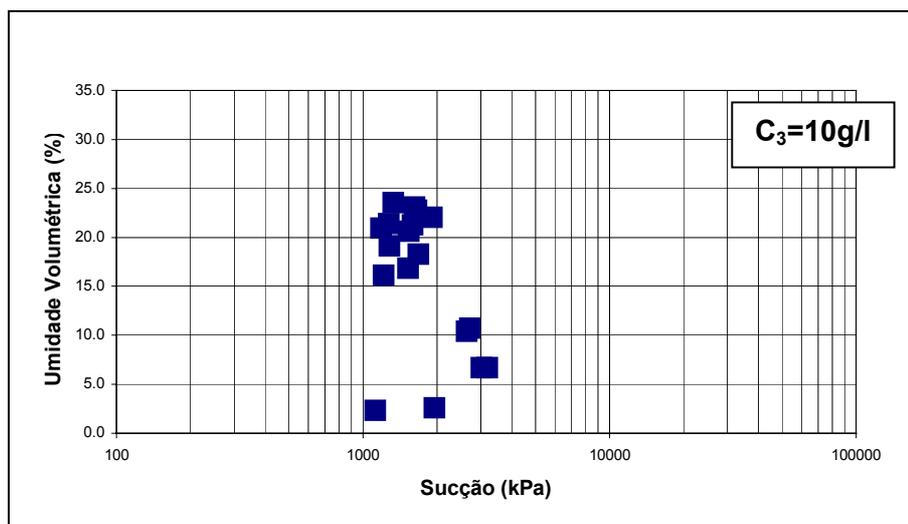


Figura 7.29 – Curva Característica de sucção osmótica para o material contaminado – Ensaio C₃

7.4. Comentários Finais

Como se pode observar das curvas para os materiais naturais, os valores de sucção mátrica e total são praticamente iguais. As pequenas diferenças podem ser explicadas por ter-se utilizado um tempo de equalização insuficiente para os valores de sucção total apresentados, sobretudo para as amostras com grau de saturação mais elevados.

Um outro dado interessante com respeito à repetibilidade do método do papel filtro, está na coincidência das curvas características obtidas para os materiais sem contaminar dos ensaio C_1 e C_2 . O solo ensaiado é o mesmo, porém, as amostras foram moldadas de blocos diferentes; para o ensaio C_1 , da cava sul e, para o ensaio C_2 , da cava norte. Os ensaios foram totalmente independentes e realizados em tempos diferentes, mas os resultados achados são coincidentes, como pode observar-se na figura 7.30.

Outro fato interessante do comportamento do material, é que a curva apresenta dois comportamentos diferenciados segundo o nível de sucção, ou o grau de saturação. Até uma sucção de 100 a 200 kPa a curva característica é similar à de um material arenoso, apresentando valores de entrada de ar menores de 10 kPa; a partir daí o comportamento da curva muda e passa a ser similar ao de um material argiloso, com valores de entrada secundária de ar da ordem de 2000 kpa.

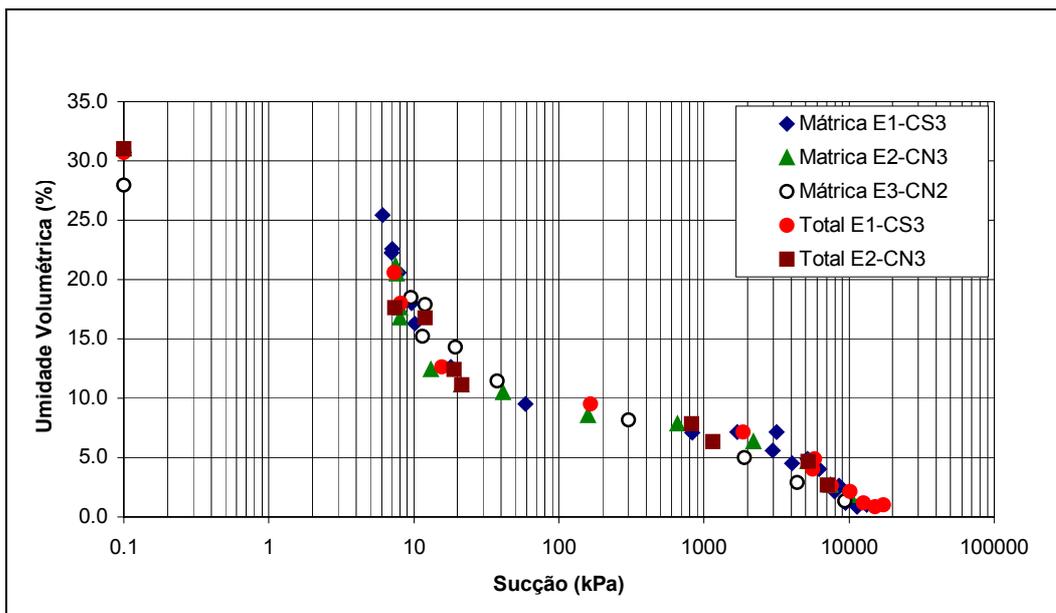


Figura 7.30 –Curvas características dos materiais naturais.