

## 2 Mecânica dos Solos Não Saturados

### 2.1 Solos Não Saturados

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), os estudos envolvendo solos não saturados são de interesse da mecânica dos solos desde a instituição da mesma como uma ciência de engenharia. Esse interesse é justificado por existirem diversas obras de engenharia envolvendo solos não saturados, como aterros, barragens, estabilização de taludes. Além disso, esta condição de não saturação ocorre em uma grande extensão do planeta, já que regiões de clima árido e semi-árido representam cerca de 60% dos países do mundo e em países de clima tropical, como o Brasil, ocorrem longos períodos secos, suficientes para causar a dessaturação do solo.

Como dito anteriormente, a Mecânica dos Solos Clássica foi baseada em observações feitas sobre o comportamento de solos sedimentares, típicos de regiões de clima temperado. Além disso, é feita uma hipótese do solo ser um sistema estrutural bifásico, ou seja, o mesmo encontra-se saturado e, portanto, somente constituído por partículas sólidas e água. A condição não saturada associada à diferenciação estrutural dos solos residuais faz com que o comportamento geomecânico desses solos não seja bem descrito pelos parâmetros geotécnicos convencionais, tornando tal descrição pouco realista (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Nos últimos quarenta anos, a base teórica da Mecânica dos Solos para solos não saturados vem sendo desenvolvida e foram obtidos avanços significativos. Esses estudos foram amplamente discutidos e divulgados em periódicos e anais de congressos e seminários nacionais e internacionais, tais como o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados (ÑSAT), a Conferência Internacional de Solos Não Saturados (International Conference of Unsaturated Soils – UNSAT), dentre outros. Para melhor entendimento do comportamento geomecânico de solos não saturados, alguns aspectos dessa ciência da engenharia são abordados a seguir.

## 2.2 Fases Constituintes dos Solos Não Saturados

Uma fase é parte de uma mistura com propriedades diferentes daquelas apresentadas pelos materiais adjacentes, possuindo também superfícies de contorno bem definidas (e.g. Green e Naghdi, 1965; Gove, 1967). Um solo não saturado é considerado uma mistura de várias fases que influenciam diretamente seu estado de tensão. Assim sendo, é importante definir o número de fases constituintes de um solo não saturado assim como suas propriedades.

Segundo Lambe e Whitman (1969), um solo não saturado é considerado como um sistema trifásico, isto é, é constituído de três fases: líquida (água), gasosa (ar) e sólida (partículas de minerais). Fredlund e Morgenstern (1977), com base na definição de fase, postulam que se deve considerar uma quarta fase independente, a interface ar-água, conhecida também como membrana contrátil. A Figura 2.1 mostra um modelo idealizado de solo não saturado.

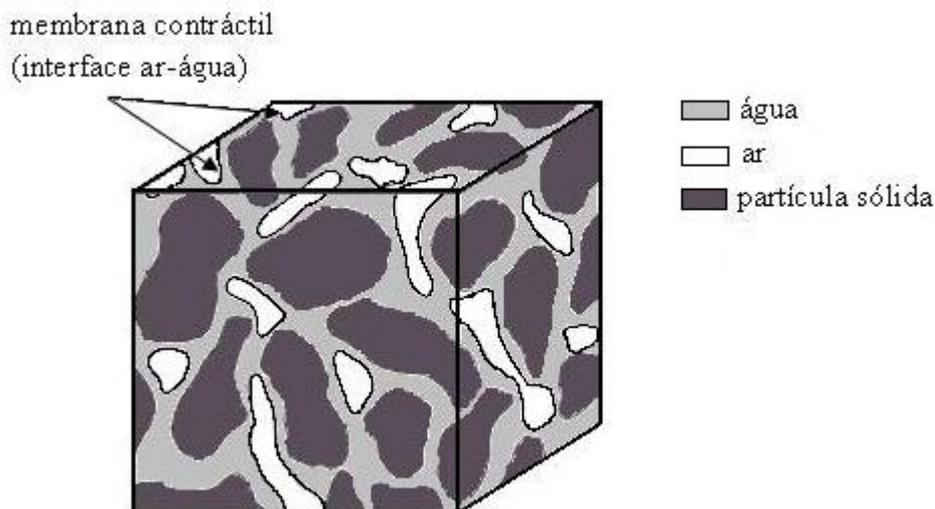


Figura 2.1 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua. (adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977).

A característica mais importante da membrana contrátil é a possibilidade da mesma exercer uma tensão de tração nos materiais contíguos, denominada tensão superficial. Devido à ação dessa tensão, a interface ar-água comporta-se como uma membrana elástica. Se a fase gasosa for contínua, tal membrana interage com as partículas sólidas, influenciando no comportamento mecânico do solo.

Existindo água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo, diz-se que o meio multifásico não é mais um meio contínuo. Assim, o solo não saturado pode

ser analisado como um sistema bifásico, como os solos saturados, desde que se assuma que um fluido compressível preencha os poros (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Do ponto de vista comportamental, o solo não saturado pode ser considerado um sistema de duas fases que entram em equilíbrio (partículas de solo e membrana contrátil) e outras duas que fluem (ar e água) ao se aplicar um gradiente de tensão. Nas correlações massa-volume, é possível considerá-lo um sistema trifásico, visto que o volume da interface ar-água é muito pequeno e sua massa pode ser considerada como parte da massa de água. Entretanto, quando se analisa o estado de tensão de um sistema multifásico contínuo é necessário fazer que a interface ar-água se comporte como uma fase independente (Fredlund e Rahardjo, 1993).

### 2.3 Variáveis do Estado de Tensão

No estudo dos solos saturados apenas uma variável, denominada por tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ) (Terzaghi, 1936), é suficiente para definir o estado de tensão e descrever o comportamento mecânico dos mesmos. O princípio das tensões efetivas para solos na condição saturada foi discutido e confirmado por diversos autores (e.g. Rendulic, 1936; Bishop e Eldin, 1950; Skempton, 1953). A equação 2.1 mostra a relação entre as tensões atuantes no solo e a variável do estado de tensão para solos saturados.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.1)$$

Onde  $\sigma'$  é a tensão normal efetiva;  $\sigma$  é a tensão normal total e  $u_w$  é a poro-pressão atuante no elemento de solo.

Porém, quando se analisa o solo em seu estado não saturado, tal princípio torna-se inválido, principalmente pelo aparecimento de uma pressão negativa nos poros do solo, denominada sucção. A não saturação faz com que o estado de tensões seja diferente, devendo, então, ser considerada a influência de outras variáveis no comportamento dos solos não saturados (Fredlund e Morgenstern, 1977).

A fim de ampliar o uso do conceito de tensão efetiva para a condição não saturada dos solos, diversos pesquisadores apresentaram diferentes expressões na busca de uma solução única. As principais equações propostas estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais expressões para a avaliação da tensão efetiva para solos não saturados (Adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977).

Expressão proposta	Descrição dos parâmetros	Autor
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	$\sigma'$ = tensão normal efetiva $\sigma$ = tensão normal total $u_w$ = poro-pressão $\beta'$ = fator de ligação, que é uma medida do número de ligações sob tensão	Croney <i>et al.</i> (1958)
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	$u_a$ = pressão de ar $\chi$ = parâmetro relacionado com o grau de saturação	Bishop (1959)
$\sigma' = \sigma \cdot a_m + u_a \cdot a_a + u_w \cdot a_w + R + A$	$a_a$ = parte da área total ocupada pelo ar $a_w$ = parte da área total ocupada pela água $R$ = resultante das forças de repulsão $A$ = resultante das forças de atração elétrica $a_m$ = área de contato ocupada pelos sólidos	Lambe (1960)
$\sigma' = \sigma + \psi \cdot p''$	$p''$ = deficiência de poro-pressão $\psi$ = parâmetro que varia de 0 a 1	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta \cdot p''$	$p''$ = poro-pressão negativa tomada como um valor positivo $\beta$ = fator estatístico do mesmo tipo da área de contato, medido experimentalmente.	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m(h_m + u_a) + \chi_s(h_s + u_a)$	$\chi_m$ = parâmetro de tensão efetiva para a sucção mátrica $h_m$ = sucção mátrica $\chi_s$ = parâmetro de tensão efetiva para a solução de soluto $h_s$ = solução de soluto	Richards (1966)
$\sigma' = \sigma + \chi_m p_m'' + \chi_s p_s''$	$p_m''$ = sucção mátrica $p_s''$ = sucção de soluto $\chi_m$ e $\chi_s$ = parâmetros que variam de 0 a 1 dependendo da trajetória de tensões	Aitchison (1973)

As equações da Tabela 2.1 se distinguem principalmente na forma de quantificação das variações da pressão de ar e da sucção. Em comum elas têm um parâmetro que é característico do comportamento do solo na descrição do estado de tensão, ressaltando que a determinação experimental desses parâmetros é um tanto complexa. Além disso, todas tentam expressar o estado de tensão através de uma única variável, como na teoria clássica.

Fredlund e Morgenstern (1977) formularam equações de equilíbrio de forças baseada na mecânica de meios multi-fásicos contínuos. Consideraram o solo não saturado como um sistema de quatro fases: suas partículas sólidas incompressíveis, o fluido intersticial inerte quimicamente, o ar e a membrana contrátil. Concluíram que as variáveis de estado de tensão que influenciam o comportamento geomecânico dos solos não saturados são obtidas arranjando as tensões fisicamente medidas, tensão normal ( $\sigma$ ), pressão de ar ( $u_a$ ) e pressão de água ( $u_w$ ), sendo elas  $(\sigma - u_a)$ ,  $(\sigma - u_w)$  e  $(u_a - u_w)$ . Concluíram também que qualquer combinação em pares destas, isto é,  $(\sigma - u_a)$  e  $(u_a - u_w)$ ;  $(\sigma - u_w)$  e  $(u_a - u_w)$ ; ou  $(\sigma - u_a)$  e  $(\sigma - u_w)$ , pode representar o estado de tensão de um elemento de solo não saturado. Na Figura 2.2, são mostrados os tensores de tensão independentes para a combinação em pares de  $(\sigma - u_w)$  e  $(u_a - u_w)$ .

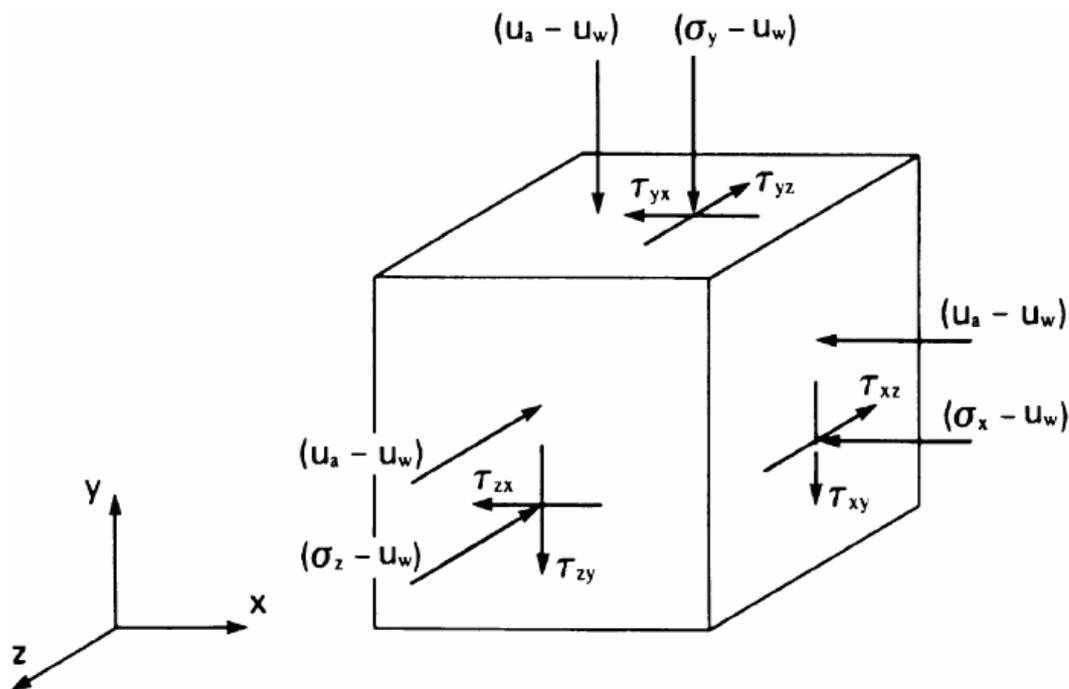


Figura 2.2: Variáveis de estado de tensão para solos não saturados (adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977).

Em 1978, Fredlund *et al.* adotaram duas dessas variáveis independentes de estado de tensão, chamadas de tensão normal líquida ( $\sigma - u_a$ ) e sucção mátrica ( $u_a - u_w$ ) para avaliar o comportamento geomecânico dos solos em condição não saturada. Desde então essas duas variáveis são as mais usadas para expressar o estado de tensão de solos não saturados, assim como no presente trabalho.

## 2.4 Sucção

Um dos principais fatores de alteração do comportamento mecânico dos solos não saturados é o aparecimento de uma pressão de água negativa nos poros, chamada de sucção. Assim, para uma previsão mais próxima da situação real e bom entendimento do comportamento de campo, o estudo da resistência ao cisalhamento dos solos não saturados deve considerar tal componente.

Marinho (1997) define a sucção como sendo “a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz como que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação”. Em outras palavras, a sucção é uma tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água.

Os estudos envolvendo a sucção foram iniciados ainda no século XIX, focados no intuito de desenvolver a agricultura (e.g. Briggs, 1897). No entanto, apenas nas décadas de 50 e 60 foram obtidos avanços significativos nas correlações entre a sucção e o comportamento geotécnico dos solos não saturados, resultando nas primeiras conferências e seminários relacionados ao assunto (e.g. I Symposium on Expansive Clays, África do Sul, 1957; I Symposium on Expansive Soils, EUA, 1958; Conference on Pore pressure and suction soil, Londres, 1960; I Internacional Conference on Expansive Soils, Texas, 1965).

### 2.4.1 Componentes da Sucção

Quando ocorre fluxo da água livre num solo não saturado, a mesma poderá ser retida ou adsorvida por ele. Neste caso, é necessária a aplicação de uma força externa para desprendê-la. Tal energia aplicada por unidade de volume de água é a sucção (Lee e Wray, 1995).

A energia disponível para realizar trabalho pode ser descrita em termos de potencial equivalente, chamado de potencial total ( $\phi_t$ ). Segundo a Sociedade Internacional de Ciência de Solo (SSSA, 2006), o potencial total é a quantidade de trabalho realizado para transportar, reversa e isotropicamente, uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório de água pura submetido à pressão atmosférica, a uma elevação específica, até a água dos poros do solo. Aitchison (1965) dividiu esse potencial em parcelas menores de acordo com a equação a seguir.

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m + \phi_g + \phi_a + \phi_p \quad (2.2)$$

Onde:  $\phi_o$  é o potencial osmótico ou de soluto, associado à pressão osmótica da água do solo;  $\phi_m$  é o potencial mátrico, resultante de forças capilares ou de adsorção;  $\phi_g$  é o potencial gravitacional, obtido pela elevação do ponto em questão relativa ao nível de referência;  $\phi_a$  é o potencial pneumático, respectivo à pressão na fase gasosa; e  $\phi_p$  é o potencial de adensamento, associado à sobrecarga aplicada no terreno, transmitida pela água intersticial.

Algumas considerações podem ser feitas a fim de simplificar a equação 2.2. O potencial gravitacional é desprezível, assim como o potencial de adensamento, se não há processo de adensamento. Se for admitido que os poros do solo estejam interligados com a atmosfera, também se torna irrelevante a parcela de potencial pneumático. Assim a equação 2.2 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m \quad (2.3)$$

Pode-se também escrever a equação acima em termos de suas pressões equivalentes. Esses potenciais, osmótico e mátrico, são equivalentes à sucção osmótica ( $S_o$ ) e à sucção mátrica ( $S_m$ ) respectivamente. Assim, a sucção total ( $S_t$ ) é a soma das pressões associadas aos potenciais anteriormente descritos (equação 2.4).

$$S_t = S_o + S_m \quad (2.4)$$

A sucção mátrica é definida como a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos da capilaridade e das forças de adsorção. É referente à matriz do solo, isto é, à combinação do tipo de partículas e do arranjo estrutural do solo. A sucção osmótica está associada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre. Blight (1983) afirma que esta parcela da sucção total está diretamente relacionada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos na água intersticial.

Através de ensaios triaxiais com sucção controlada, Edil *et al.* (1981) comprovaram que, essencialmente, apenas a sucção mátrica afeta o

comportamento do solo não saturado. Outros pesquisadores, como Fredlund, 1979 e Alonso *et al.*, 1987, confirmam que tal componente seria suficiente para descrever o comportamento mecânico do solo na condição não saturada.

Neste trabalho será considerada apenas a sucção mátrica como elemento influenciador da resistência ao cisalhamento dos solos não saturados. Esta hipótese é válida para os solos estudados uma vez que estes solos residuais apresentam pouca ou nenhuma salinidade.

## 2.4.2 Métodos de Medição da Sucção

A medição da sucção motivou várias pesquisas tanto para desenvolver métodos de medição como para testar a eficácia dos mesmos. Para isso os dispositivos devem interagir de alguma forma com o solo, direta ou indiretamente. Dessa forma podem ser classificados como métodos diretos, aqueles que medem a energia da água dos poros. Nos métodos indiretos, se obtém um parâmetro a ser correlacionado com a sucção do solo através de uma calibração, por exemplo, umidade relativa, resistividade ou condutividade.

As técnicas mais utilizadas no meio geotécnico estão apresentadas na Tabela 2.2. No presente trabalho, foi utilizado a técnica do papel filtro para se obter as curvas de retenção de umidade. Os outros métodos foram bem descritos por vários autores, como, por exemplo, de Campos *et al.* (1992), Fredlund e Rahardjo (1993); de Campos (1994); Marinho (1997); Ridley e Wray, (1996).

Tabela 2.2 – Técnicas para a medição da sucção em solos (Adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993; Marinho, 1997).

Técnica	Medida de sucção	Intervalo (kPa)	Tempo de equilíbrio
Psicrômetro	total	100 a 71000	minutos
Papel filtro (com contato)	mátrica	30 a 30000	7 dias
Papel filtro (sem contato)	total	400 a 30000	7-14 dias
Bloco poroso	mátrica	30 a 30000	semanas
Sensor de condutividade térmica	mátrica	0 a 300	semanas
Placa de sucção	mátrica	0 a -90	horas
Placa de pressão	mátrica	0 a 1500	horas
Tensiômetro padrão	mátrica	0 a -100	minutos
Tensiômetro osmótico	mátrica	0 a 1500	horas
Tensiômetro tipo Imperial College	mátrica	0 a -1800	Minutos

### Método do Papel Filtro

A aceitação do método do papel filtro como uma técnica indireta de medição da sucção em solos é recente, já que apenas em 1993 que o método foi normalizado pela ASTM. O primeiro trabalho utilizando o método foi em 1937 desenvolvido por Gardner (Fredlund e Rahardjo, 1993), mas foi a partir do final da década de 70 que tentativas da sua utilização para fins geotécnicos foram apresentadas (e. g. Ho, 1979; Tang, 1979; McKeen, 1981; Khan, 1981; Ching e Fredlund, 1984; Gallen, 1985; Mackeen, 1985; Chandler e Gutierrez, 1986).

O princípio básico do método consiste na habilidade de meios porosos de absorver ou perder certa quantidade de água quando estão em contato, direto ou indireto, em um ambiente fechado, até entrarem em equilíbrio de pressão. Nesse ponto de equilíbrio, os valores de umidade do solo e do papel filtro são diferentes, porém, possuem a mesma sucção. O equilíbrio é atingido quando o fluxo de fluido ou vapor cessar. Se a água trocada pelo sistema é em forma de vapor, se estará medindo a sucção total. Caso o fluxo seja de líquido, a sucção medida é a mátrica.

Para ocorrer o fluxo de líquido deve existir contato direto entre o solo e o papel filtro. Existem diversas discussões em torno de como se garantir um contato eficiente entre o solo e o papel filtro na obtenção da sucção mátrica. Porém, estudos como de Greacen *et al.* (1987) e Marinho (1994) atestam que este contanto pouco influencia nos resultados obtidos, desde que o período de equilíbrio seja atendido. Para a medição de sucção mátrica, o tempo de equalização de 7 dias é suficiente (Marinho 1997).

Ainda, Marinho (1997) afirma que, na determinação da sucção total, o tempo de equilíbrio de pressão entre o solo e o papel filtro é relativamente pequeno para altos níveis de sucção (sucções acima de 1,5 MPa). Para sucções baixas, esse tempo passa a ser maior, podendo ser mais que 30 dias quando se atinge sucções menores que 100 kPa. A Tabela 2.3 apresenta tempos de equilíbrio para o papel filtro medindo várias faixas de sucção total.

Tabela 2.3 – Tempo de equilíbrio sugerido para o papel filtro na medição da sucção total (Marinho 1994).

<b>Nível de Sucção (kPa)</b>	<b>Tempo de equilíbrio (dias)</b>
0 - 100	Indeterminado, > 30
100 – 250	30
250 – 1000	15
> 1000	7

OBS.: Distância entre o papel e a fonte de água: 8 mm

Os papéis filtro mais utilizados nesse tipo de ensaio são o Whatman n°. 42 e o Schleicher & Schuell n°. 589. Esses foram calibrados por vários pesquisadores e algumas dessas curvas de calibração estão mostradas na Figura 2.3. Destas curvas foram obtidas as relações entre a umidade do papel filtro e a sucção, apresentadas na Tabela 2.4. De acordo com Marinho (1997), as curvas originais de calibração podem ser adotadas, sendo que o mais importante é se respeitar o tempo de equalização recomendado.

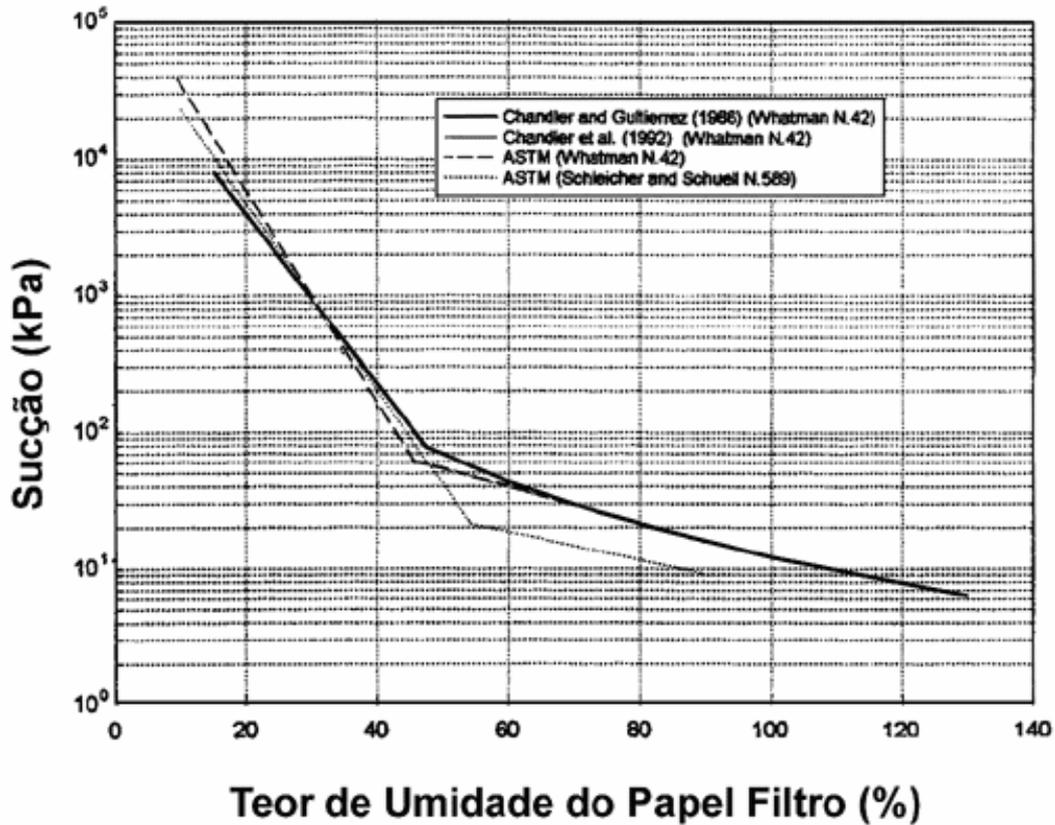


Figura 2.3 – Curvas de calibração para os papéis filtro Whatman n°. 42 e Schleicher & Schuell n°. 589. (Marinho, 1994)

Tabela 2.4 – Equações que relacionam teor de umidade do papel filtro e sucção (adaptado de Marinho, 1997).

Papel Filtro	Faixa de umidade	Equação
Whatman n°. 42 (Chandler e Gutierrez, 1986)	$w \leq 47\%$	$Sucção \text{ (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622 \log w)}$
	$w > 47\%$	$Sucção \text{ (kPa)} = 10^{(6,05-2,48 \log w)}$
Schleicher & Schuell n°. 589 (ASTM D5298-92)	$w \leq 54\%$	$Sucção \text{ (kPa)} = 10^{(5,056-0,0688 w)}$
	$w > 54\%$	$Sucção \text{ (kPa)} = 10^{(1,882-0,01202 w)}$

O papel filtro Whatman nº. 42 é recomendado por ser mais espesso e possuir poros menores (Chandler e Gutierrez, 1986). Leong *et al.* (2002), com base em experimentos realizados, também observaram um melhor desempenho do Whatman nº. 42 comparado com o Schleicher e Schuell nº. 589. No presente trabalho foi usado o papel filtro Whatman nº. 42, adotando as recomendações supracitadas, além de ser o disponível no laboratório da PUC-Rio. Para a determinação da sucção, adotou-se a calibração de Chandler *et al.* (1992).

Segundo Woodburn e Lucas (1995), alguns outros fatores podem influenciar o método do papel filtro como o efeito da variação da temperatura, contornado pela colocação das amostras em um recipiente isolado termicamente. Ainda segundo os autores citados anteriormente, também é importante a correta medição das massas dos papéis filtro, assegurando-se da acurácia e calibração da balança usada. Isso se deve ao fato desta medida variar muito imediatamente após retirar o papel filtro do contato com o solo e da estufa após a secagem.

### **2.4.3 Curva Característica de Sucção**

A expressão gráfica da relação constitutiva entre o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) do solo e a sucção é chamada de curva característica de sucção ou de retenção de água, que também pode ser expressa em termos do grau de saturação do solo. Considerando a sucção, a curva pode ser em função da sucção mátrica ou da sucção total. A forma de como se expressar a sucção ou a quantidade de água do solo fica a critério do autor e do tipo de problema a ser resolvido.

Obtém-se esta curva pelo uso de uma ou mais técnicas de medição de sucção em solos citadas anteriormente. Como pode ser visto na Figura 2.4, os diversos métodos de medição de sucção em solos fornecem resultados parecidos, desde que bem calibrados e executados.

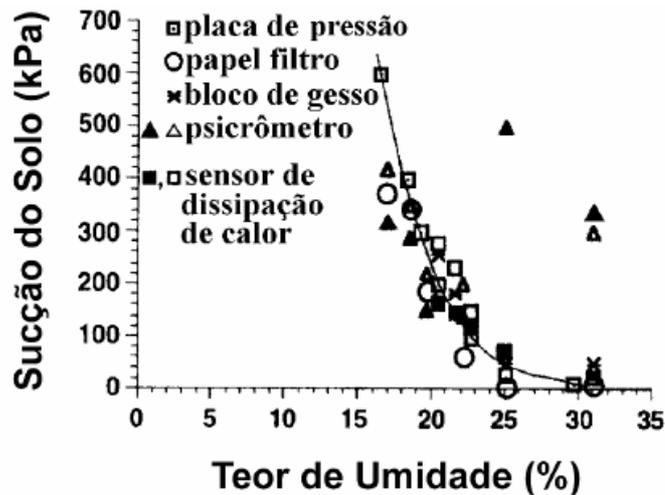


Figura 2.4 – Comparação entre diversas técnicas de medição de sucção (Lee e Wray, 1995).

Esta relação característica, ultimamente muito utilizada na Geotecnia, é um modelo conceitual do comportamento do solo com respeito à variação de umidade. Sua função nos estudos de solos não saturados assemelha-se à da curva de adensamento para solos saturados (Martínez, 2003). Por isso, alguns autores basearam-se nesta relação constitutiva para a previsão de parâmetros dos solos não saturados assim como seu comportamento (e.g. Brooks e Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Mualem, 1986; Fredlund *et al.*, 1994; Lytton, 1995; Vanapalli *et al.*, 1996; Fredlund *et al.*, 1996; Öberg e Sällfors, 1997).

Existem dois pontos na curva característica que merecem destaque (ver Figura 2.5). Um corresponde à pressão de entrada de ar que representa o diferencial de pressões entre a água e o ar necessário para causar a drenagem do maior poro do solo. O outro se associa ao início do estágio residual de desaturação do solo, no qual o efeito da sucção para causar uma perda adicional de água diminui e a remoção da água requer o fluxo do vapor.

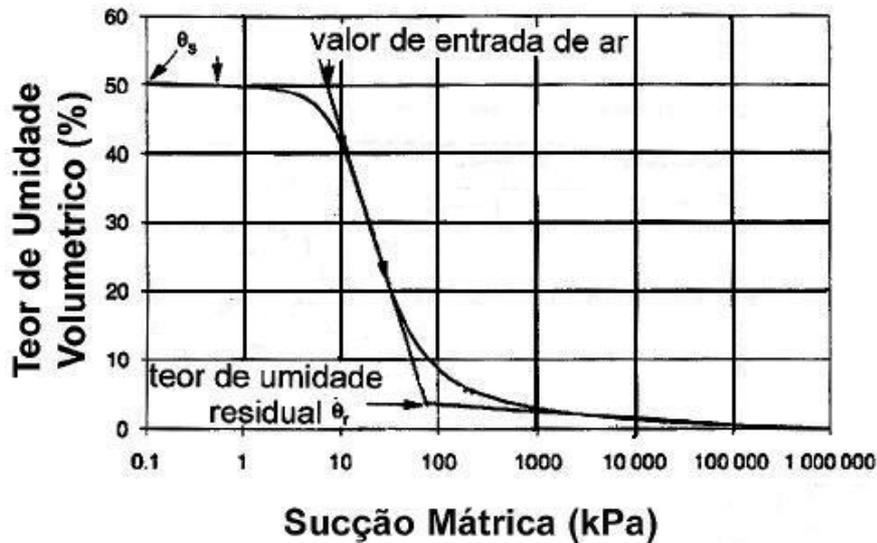


Figura 2.5 – Pontos principais na curva característica de retenção de água (Adaptado de Fredlund e Xing, 1994)

Vanapalli *et al.* (1999) dizem que características do solo como estrutura do solo e a história de tensões influenciam na curva característica. Outros fatores como agregações/cimentação, índices de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, teor de umidade inicial (trajetória de umedecimento ou secagem) também a afetam. A influência de alguns desses fatores será discutida a seguir.

Considerando as características dependentes da estrutura do solo, quando este está submetido a baixos níveis de sucção, o efeito da capilaridade e a distribuição dos poros regem a quantidade de água existente no solo. Para valores mais altos de sucção, fatores como a textura e a superfície específica afetam em maior grau a forma da curva característica, desde que a água esteja adsorvida às partículas sólidas (McQueen e Miller, 1974). A Figura 2.6 mostra como cada parcela de faixa de sucção da curva característica é afetada por estes fatores.

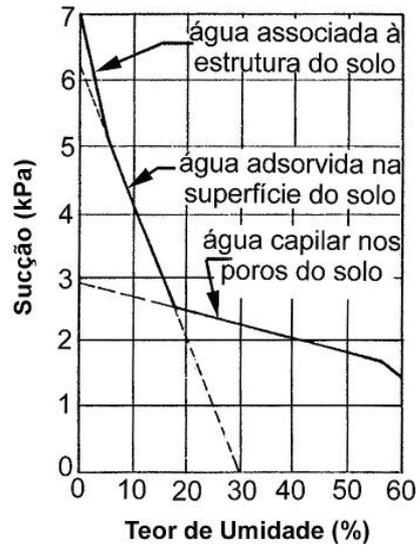


Figura 2.6 – Influência das parcelas de sucção na curva característica (MacQueen e Miller, 1974).

É experimentalmente comprovado (Hillel, 1971; Presa, 1982; dentre outros), que a trajetória de umedecimento e secagem provoca uma histerese na curva característica de sucção. Geralmente, a quantidade de água retida durante o processo de umedecimento é menor que aquela do processo de secagem. A Figura 2.7 mostra esse efeito em uma curva característica típica. A causa dessa histerese são alguns fatores tais como a geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais; influência do ângulo de contato solo-água que varia segundo o avanço ou recuo do menisco devido à rugosidade da superfície do grão; ocorrência de ar aprisionado nos poros, reduzindo o teor de umidade no processo de umedecimento; história de secagem e umedecimento do material; liberação gradual do ar dissolvido na água (Presa, 1982)



Figura 2.7 – Efeito da histerese na curva característica de sucção (Hillel, 1971).

A distribuição granulométrica do solo também é um fator que afeta a relação sucção-umidade. Normalmente, quanto maior a quantidade da fração argila maior será o teor de umidade para um mesmo valor de sucção (Fredlund *et al.*, 1994). Segundo Antunes (2005), isso se deve ao fato dos solos mais argilosos possuírem vazios muito pequenos, o que aumenta o efeito da capilaridade. Também se pode atribuir este efeito à maior superfície específica apresentada pelos grãos menores, o que implica num aumento das forças de adsorção.

Outro ponto relevante é a uniformidade dos poros de solos argilosos, que faz com que a relação entre a sucção e a quantidade de água retida seja gradual, devido a esses poros estarem menos interconectados (Vanapalli *et al.*, 1999). Quando se analisa solos arenosos, observa-se que estes não possuem essa relação gradual, e sim uma variação brusca na curva característica de sucção. Basicamente, isso se deve a presença de poros maiores dos solos arenosos e mais conectados, quando comparados aos argilosos, uma vez estes solos mostram uma tendência de mudar o grau de saturação rapidamente à medida que a sucção aumenta (Vanapalli *et al.*, 1999). Quanto mais uniforme a granulometria do solo arenoso, mais abrupta a variação entre a umidade e a sucção. Na Figura 2.8 observa-se as diferenças nas curvas características de sucção em função da granulometria dos solos.

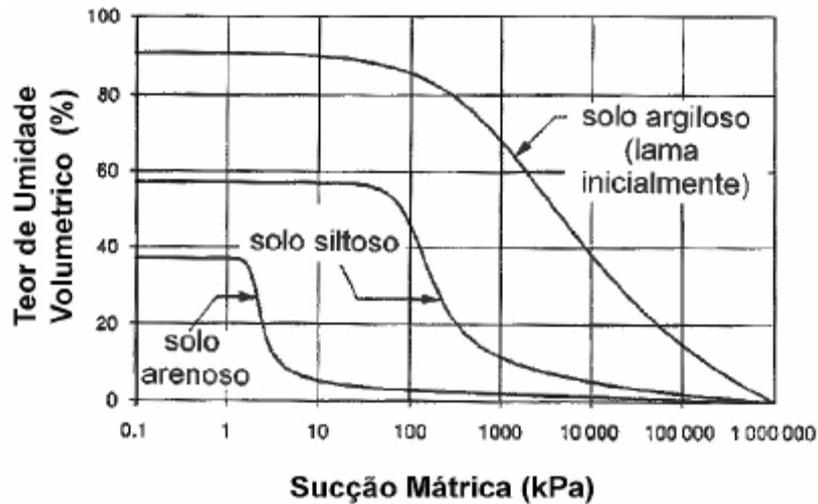


Figura 2.8 – Diferenças nas curvas características de sucção em função da granulometria dos solos (adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

A influência da mineralogia dos solos na retenção de água é significativa, principalmente, em solos argilosos. Isso porque os argilominerais presentes nesses solos apresentam forças de adsorção diferentes, que são afetadas pela natureza da superfície das partículas e pelos tipos de cátions trocáveis. Quanto menor o tamanho dos íons, maior é a camada de água adsorvida na superfície das partículas. Por isso a esmectita retém mais água que a caulinita, por exemplo. Também, atribui-se esse fato, à maior superfície específica da esmectita (Presa, 1982; Jucá, 1990; de Campos *et al.*, 1992; Antunes, 2005).

Quando aumenta-se a temperatura provoca-se uma diminuição na interface solo-água, conseqüentemente ocorre uma diminuição na curvatura do menisco, afetando assim a sucção. Ressalta-se que, no caso de existir ar ocluído na massa do solo, tal aumento de temperatura induziria um aumento no diâmetro dos poros causado pela expansão do ar. Assim, a estrutura do solo também se alteraria, afetando a forma da curva característica. Segundo Hopmans e Dane (1986) citado por Duarte (2004), a combinação das variações de volume de ar ocluído e da tensão superficial pode minimizar os efeitos da temperatura na curva característica.

## 2.5 Técnica de Translação dos Eixos

Segundo Schofield (1935), a pressão de água numa amostra de solo poderia ser aumentada ao se aplicar uma pressão de ar na mesma. Partindo

dessa proposição e do princípio que a sucção no solo é a diferença entre a pressão de ar e pressão de água, Hilf (1956) desenvolveu uma técnica que permite medir a sucção em solos ou controlá-la durante a execução de ensaios em laboratório. Para isso, se aumenta a pressão de ar até que a pressão de água passe a ser positiva, evitando assim a possibilidade de ocorrer o fenômeno de cavitação no sensor. Dessa forma a pressão de água pode ser medida por um transdutor comum.

Conceitualmente, a técnica é válida tendo em vista que um acréscimo de pressão de ar não altera a curvatura do menisco formado pela água intersticial e, portanto, a diferença entre as pressões de água e ar ( $u_w - u_a$ ), considerando-se a água como um líquido incompressível.

Contudo, algumas restrições da técnica foram apontadas por alguns autores. Por exemplo, o uso da técnica está restrito a amostras com a fase gasosa contínua, isto é, o ar existente deve estar totalmente interconectado para evitar qualquer variação de volume durante a aplicação da pressão de ar (Olson e Langfelder, 1965). Também a difusão do ar pela pedra porosa de alto valor de entrada de ar pode subestimar a sucção (Bocking e Fredlund, 1980).

Não se sabe ao certo como a aplicação de uma pressão elevada de ar influencia nos mecanismos de desaturação e o movimento de água pelo solo. As teorias que tentam explicar os fenômenos de movimento de água nos solo consideram que ocorre tração no fluido dos poros. O uso da técnica pode interferir na desaturação do corpo de prova e afetar o movimento e a distribuição da umidade no solo, uma vez que a pressão de água nos poros é sempre positiva (Carvalho, 2001).

## 2.6 Resistência ao Cisalhamento

Como dito anteriormente, o aparecimento da pressão negativa nos poros do solo, isto é, a sucção, modifica o comportamento mecânico dos solos não saturados. Ela causa um aumento significativo na resistência do solo, que pode ser suficiente, por exemplo, para estabilizar um talude natural, mesmo quando seu valor não é muito elevado (e.g. Fredlund e Rahardjo, 1993). Também muitos dos processos de instabilização são deflagrados justamente pela diminuição desta componente devido, por exemplo, a saturação provocada pelas chuvas.

Os estudos sobre a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados iniciaram-se no século XX, quando Haines (1925) apresentou a influência das

tensões capilares sobre a resistência destes solos. Daí, vários autores passaram a pesquisar a resistência de solos não saturados (por exemplo, Fisher, 1926; Leonards, 1955; Donald, 1956; Bishop *et al.*, 1960).

A primeira relação amplamente conhecida para a resistência ao cisalhamento de solos não saturados foi formulada por Bishop *et al.* (1960). Esta relação se baseou no conceito de tensões efetivas de Terzaghi e considerou o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a)_r \operatorname{tg} \phi' + \chi (u_a - u_w)_r \operatorname{tg} \phi' \quad (2.5)$$

Onde  $\tau_r$  é a resistência ao cisalhamento não saturado na ruptura;  $c'$  e  $\phi'$  são os parâmetros de resistência do solo saturado;  $(\sigma - u_a)_r$  é a tensão normal líquida atuante no plano de ruptura no momento da ruptura;  $(u_a - u_w)_r$  é a sucção mátrica na ruptura;  $\chi$  é um parâmetro dependente do grau de saturação do solo.

Conforme originalmente proposto, a determinação experimental do parâmetro  $\chi$  não é trivial. Na prática, assume-se um valor entre 0 (solo totalmente saturado) e 1 (solo totalmente seco). Os valores dentro deste intervalo variam de forma não linear e dependem do tipo de solo.

Fredlund *et al.* (1978) propuseram uma equação para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos na condição não saturada, tendo em vista o conceito de variáveis de tensão. Esta proposta contorna eventuais dificuldades de determinação experimental do parâmetro  $\chi$  (ver equação 2.6).

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a)_r \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w)_r \operatorname{tg} \phi^b \quad (2.6)$$

Onde  $\phi^b$  é o parâmetro que quantifica um acréscimo de resistência relativo ao aumento da sucção mátrica. Ou seja, é a inclinação da curva tensão cisalhante vs sucção mátrica.

Comparando as duas proposições anteriores, Bishop *et al.* (1960) e Fredlund *et al.* (1978), pode-se concluir que ambas levam a equações de resistência equivalentes, apesar das mesmas serem conceitualmente diferentes (de Campos, 1997). As mesmas estão correlacionadas pela expressão 2.7.

$$\operatorname{tg} \phi^b = \chi \operatorname{tg} \phi' \quad (2.7)$$

A determinação experimental do parâmetro  $\phi^b$  não apresenta maiores dificuldades. Assim, a proposição de Fredlund *et al.* (1978) é a mais difundida na determinação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados.

A equação 2.6 que representa a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado em função das variáveis de tensão  $(\sigma - u_a)_r$  e  $(u_a - u_w)_r$  pode ser reescrita em duas equações (equações 2.8 e 2.9).

$$\tau_r = c + (\sigma - u_a)_r \operatorname{tg} \phi' \quad (2.8)$$

$$c = c' + (u_a - u_w)_r \operatorname{tg} \phi^b \quad (2.9)$$

Onde  $c$  é a coesão aparente do solo devido ao acréscimo da sucção mátrica.

Pode-se obter uma envoltória de resistência tridimensional a partir das equações 2.8 e 2.9. Fredlund *et al.* (1978) afirmam que esta envoltória é um plano, uma vez que os ângulos  $\phi'$  e  $\phi^b$  são constantes e chama-a de envoltória estendida de Mohr-Coulomb (ver Figura 2.9).

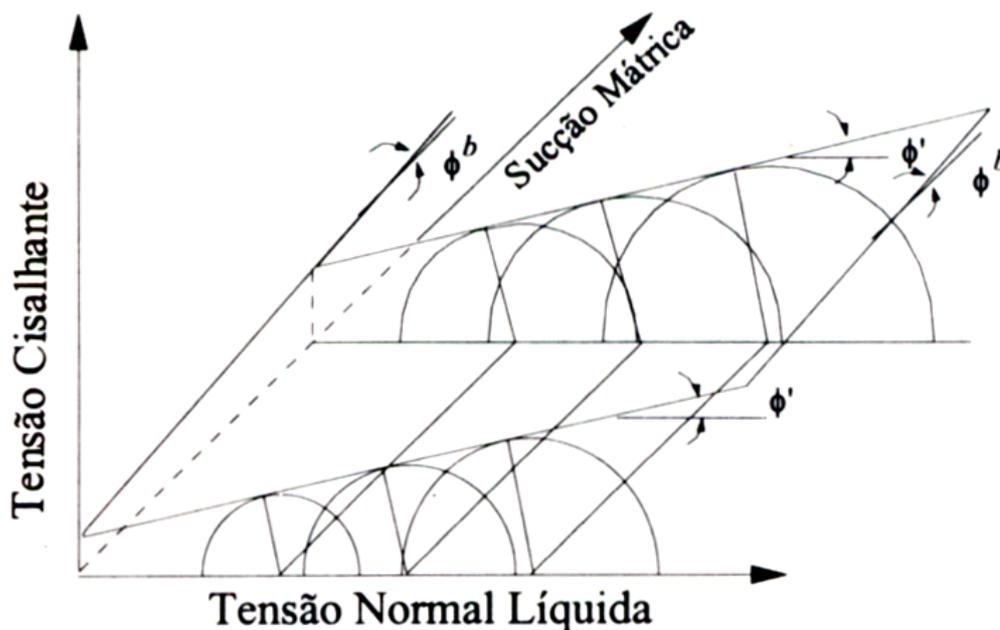


Figura 2.9 – Envoltória estendida de Mohr-Coulomb (Fredlund e Rahardjo, 1993)

As projeções horizontais da envoltória de resistência na origem dos planos  $\tau$  vs.  $(u_a - u_w)$  e  $\tau$  vs.  $(\sigma - u_a)$  permitem analisar a influência de cada variável de

tensão na resistência ao cisalhamento. A Figura 2.10 apresenta envoltórias em função da sucção mátrica e a Figura 2.11, envoltórias em função da tensão normal líquida.

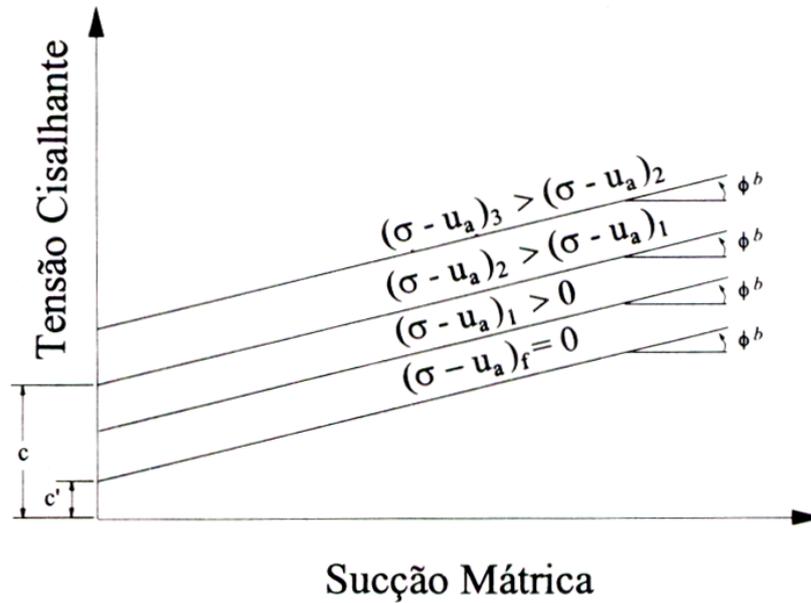


Figura 2.10 – Envoltórias de resistência de um solo não saturado em função da sucção mátrica. (Fredlund e Rahardjo, 1993)

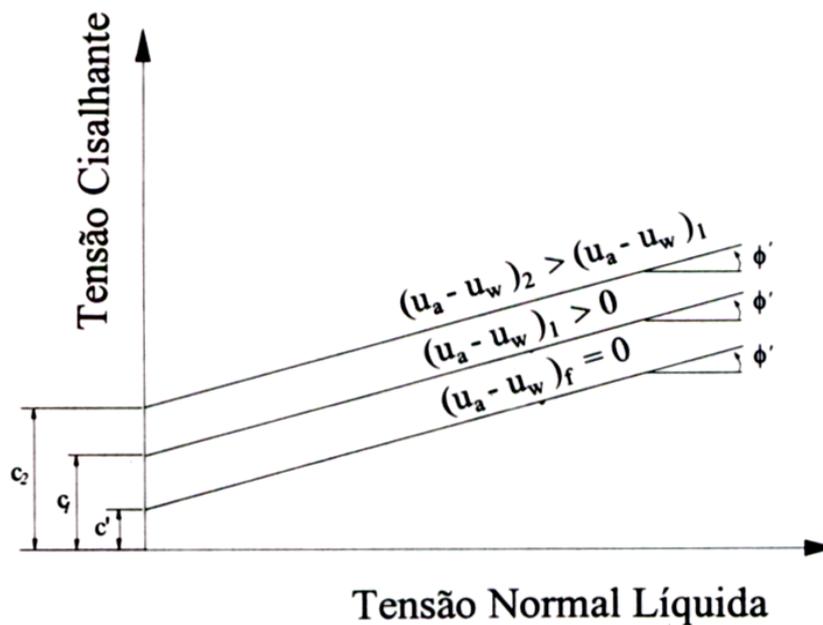


Figura 2.11 – Envoltórias de resistência de um solo não saturado em função da tensão normal líquida. (Fredlund e Rahardjo, 1993)

A hipótese da envoltória tridimensional ser um plano foi verificada por alguns autores tais como Fredlund *et al.* (1978), Gulhati e Satija, 1981; Ho e Fredlund, 1982. A partir de novos estudos, em diversos materiais, vários pesquisadores obtiveram uma variação não linear de  $\phi^b$  (e.g. Escario e Sáez, 1986; Fredlund *et al.*, 1987; Gan e Fredlund, 1988; Abramento e Carvalho, 1989; de Campos e Delgado, 1995; Rohm e Vilar, 1995; Teixeira e Vilar, 1997; Bressani *et al.*, 1997; Futai *et al.*, 2004; Reis e Vilar, 2004; Soares, 2005). Essa variação não linear com a sucção é mostrada na Figura 2.12 e na Figura 2.13.

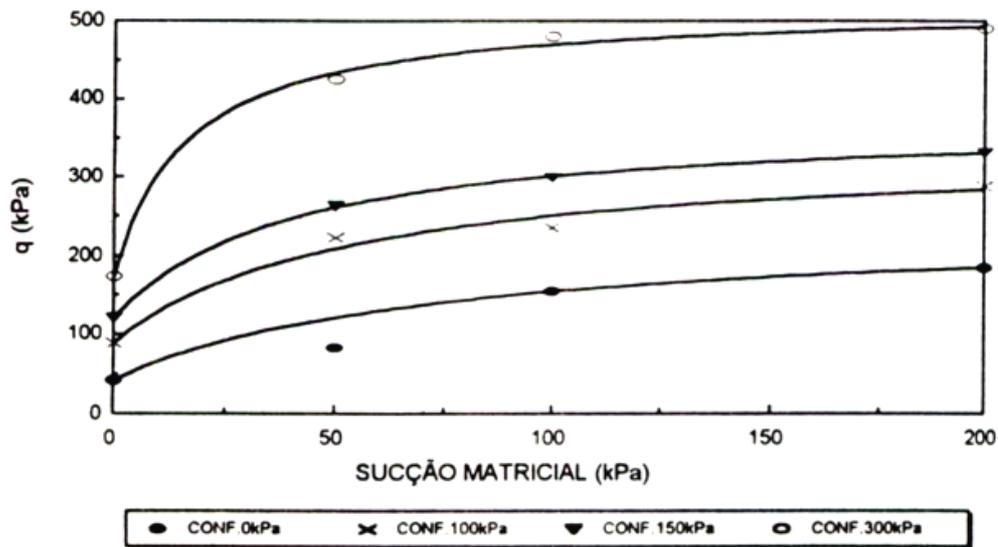


Figura 2.12 - Envoltória de resistência não linear no plano  $q$  vs  $(u_a - u_w)$  (Teixeira e Vilar, 1997).

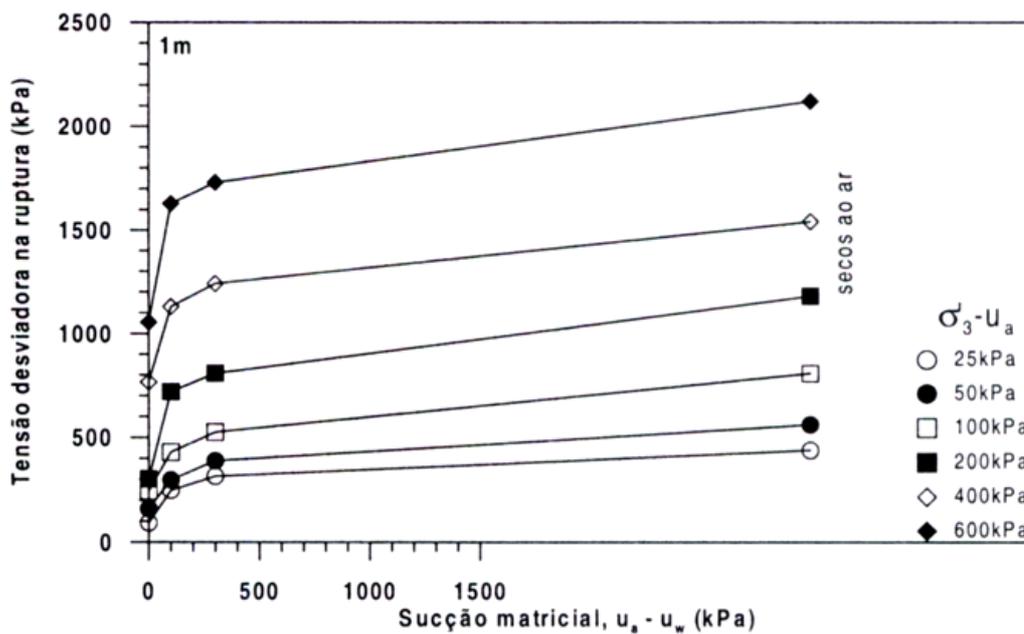


Figura 2.13 – Envoltória de resistência não linear no plano tensão desviadora na ruptura vs sucção mátrica (Futai *et al.*, 2004).

Na literatura, grande parte dos trabalhos encontrados apresenta valores do ângulo  $\phi'$  maiores que o ângulo  $\phi^b$ , indicando que a resistência ao cisalhamento é mais afetada por um acréscimo de tensão normal líquida que de sucção mátrica. Porém, pesquisas recentes feitas em solos distintos, mostram que o parâmetro  $\phi'$  aumenta com o nível de sucção aplicado em ensaios onde se manteve a sucção constante e variou-se  $(\sigma - u_a)$ , como pode ser visto na Figura 2.14 (Rohm e Vilar, 1995) e na Figura 2.15 (Futai *et al.* 2004).

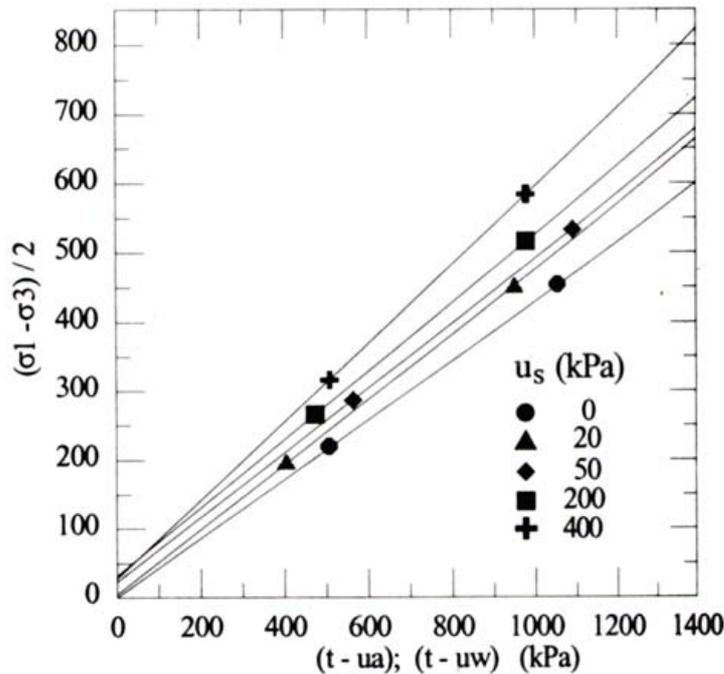


Figura 2.14 - Variação de  $\phi'$  com a sucção (Rohm e Vilar, 1995).

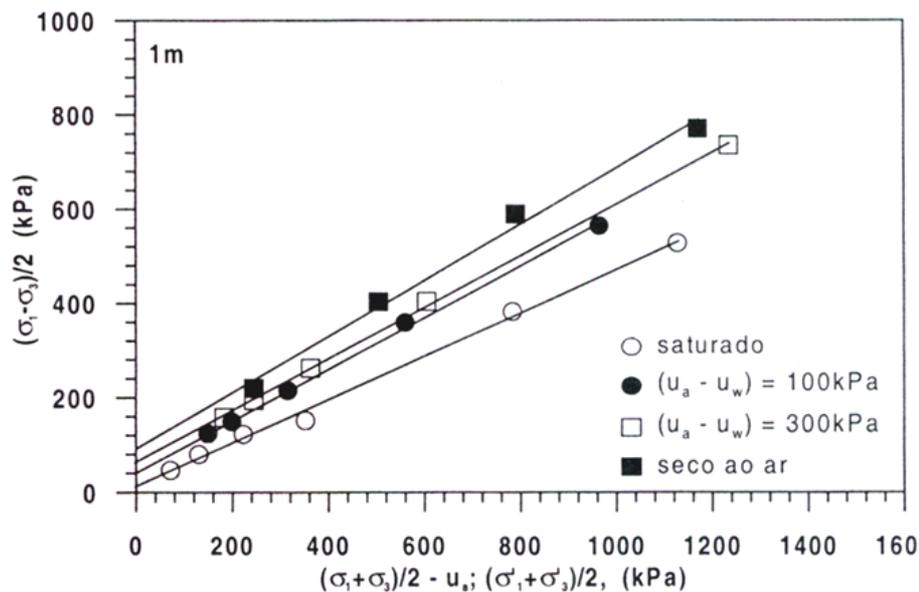


Figura 2.15: Variação de  $\phi'$  com a sucção (Futai *et al.*, 2004).

De acordo com de Campos (1997), o comportamento da envoltória tridimensional não é simplesmente planar, e deve-se analisar as variações nos parâmetros  $\phi^b$  e  $\phi^r$  de cada caso separadamente. Assim, concluiu que a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado pode ser representada por uma curva como a mostrada na Figura 2.16.

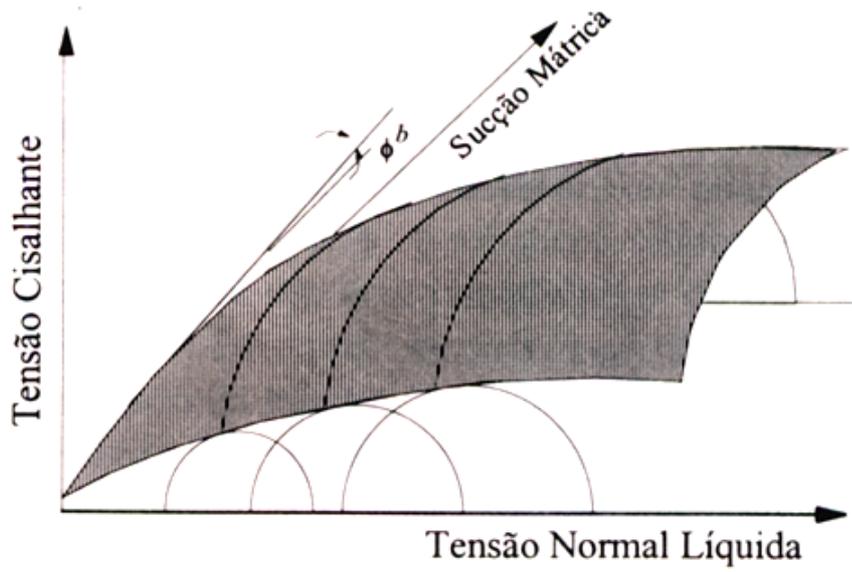


Figura 2.16 – Envoltória possível de resistência de um solo residual não saturado (de Campos, 1997).