

2

Mecânica Dos Solos Para Meios Não-Saturados

2.1.

Fases Constituintes Do Solo Não Saturado e Suas Propriedades

O solo não saturado geralmente é compreendido por um sistema trifásico (Lambe & Whitman, 1969), constituído por uma fase sólida (partículas minerais), por uma fase líquida (em geral, a água) e por outra fase gasosa (ar). Em 1977, Fredlund & Morgenstern propuseram a introdução de uma quarta fase independente, referente à interface ar-água, conhecida como “membrana contráctil”. O elemento de solo não saturado com fase contínua de ar é idealizado na figura 2.

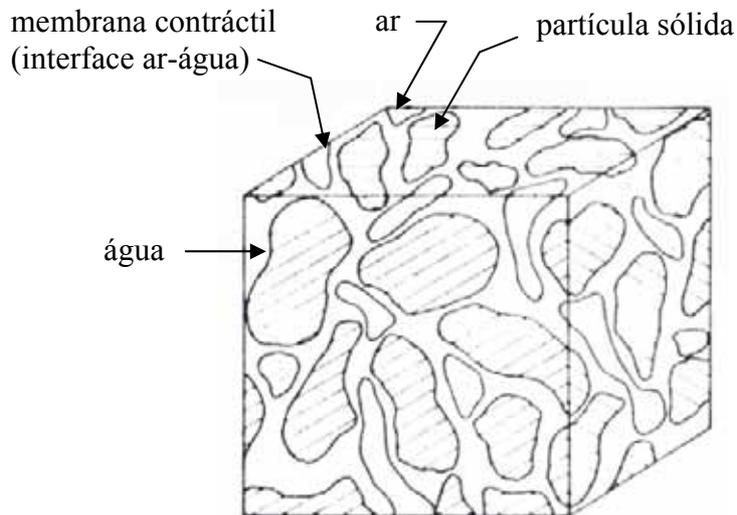


Figura 2: Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar (adaptado de Fredlund & Rahardjo, 1993).

A interface ar-água, ou membrana contráctil, possui uma propriedade chamada tensão superficial. Essa tensão superficial tem a capacidade de exercer uma tensão de tração que é causada por forças intermoleculares atuando dentro dessa membrana contráctil. Essa tensão superficial faz com que a membrana contráctil se comporte como uma membrana elástica. Quando a fase de ar é contínua, a membrana contráctil interage com as partículas de solo, influenciando no comportamento mecânico do solo.

Pode-se então, considerar o solo não saturado como uma mistura de duas fases que entram em equilíbrio sob aplicação de gradientes de tensão (partículas sólidas e membrana contráctil) e duas que fluem (ar e água).

Em termos de relação massa-volume, a membrana contráctil pode ser considerada como parte da fase líquida sem acrescentar erros significativos (Fredlund & Rahardjo, 1993). Neste caso, o solo não saturado é considerado como um sistema trifásico. No caso da fase gasosa consistir de ar ocluso, ou seja, a fase gasosa não é mas contínua, o solo não saturado pode ser considerado como um sistema bifásico, assumindo-se que um fluido compressível preenche os poros.

2.2.

Variáveis do Estado Tensional

O comportamento de resistência ao cisalhamento de solos saturados é descrito através de uma variável de estado de tensão chamada de tensão efetiva, definida por Terzaghi (1936), sendo descrita por:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

onde:

σ = tensão normal total;

u_w = pressão de água nos poros do solo.

O princípio das tensões efetivas foi comprovado experimentalmente por diversos pesquisadores (Redulic, 1936; Bishop & Eldin, 1950; Skempton, 1953, etc) para o comportamento de solos saturados. Entretanto o mesmo não pode ser aplicado para solos não saturados.

Na tentativa de estender o conceito de tensão efetiva para solos não saturados, diversos pesquisadores propuseram diferentes expressões na busca de uma única solução. As principais propostas estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Principais expressões para a avaliação da tensão efetiva para solos não saturados.

Expressão proposta	Descrição dos parâmetros	Autor
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	σ' = tensão normal efetiva σ = tensão normal total u_w = poro-pressão β' = fator de ligação, que é uma medida do número de ligações sob tensão	Croney et al. (1958)
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	u_a = pressão de ar χ = 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 ψ = parâmetro que varia de 0 a 1	Aitchison (1961)
$\sigma' = \sigma + \beta \cdot p''$	p'' = poro-pressão negativa tomada como um valor positivo β = fator estatístico do mesmo tipo da área de contato, medido experimentalmente.	Jennings (1961)
$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m(h_m + u_a) + \chi_s(h_s + u_a)$	χ_m = parâmetro de tensão efetiva para a sucção mátrica h_m = sucção mátrica χ_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 χ_m e χ_s = parâmetros que variam de 0 a 1 dependendo da trajetória de tensões	Aitchison (1973)

Todas as equações acima incorporam algum parâmetro do solo na tentativa de estabelecer uma única variável de tensão efetiva. Esses parâmetros de solo usado nas equações de tensão efetiva, são de difícil determinação. Na busca da solução desse problema, Fredlund & Morgenstern (1977) apresentaram uma análise teórica de tensões de solos não saturados com base na mecânica de multi-fases contínuas. Dessa análise, concluiu-se que quaisquer duas das três variáveis de tensão podem ser utilizadas para descrever o estado de tensões de um solo não saturado, uma vez que estas são independentes. Em outras palavras, existem três combinações possíveis que podem ser usadas como variáveis de estado de tensões para solos não saturados. São elas: $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$; $(\sigma - u_w)$ e $(u_a - u_w)$; e $(\sigma - u_a)$ e $(\sigma - u_w)$.

Fredlund et al. (1978) incorporou duas dessas variáveis independentes de estado de tensão, conhecidas como tensão normal líquida $(\sigma - u_a)$ e sucção mátrica $(u_a - u_w)$, para a avaliação do comportamento mecânico dos solos não saturados. A figura 3 ilustra esses dois tensores de tensão independentes.

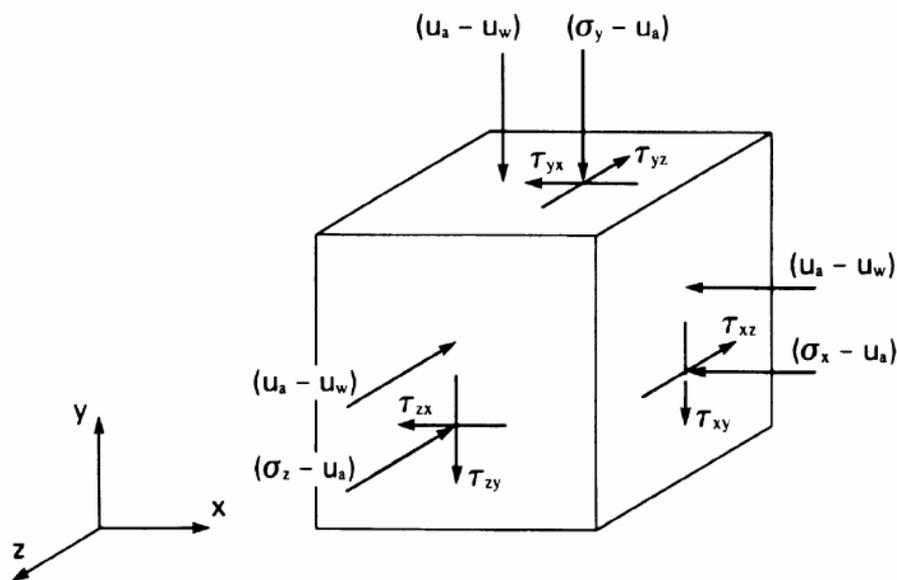


Figura 3: Variáveis de estado de tensão para solos não saturados.

2.3.

Sucção

A sucção tem grande importância na compreensão do comportamento mecânico e de deformabilidade dos solos não saturados. Esta pode ser compreendida como sendo 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 (Marinho, 1997).

A sucção tem sido objeto de estudos desde o início do século XIX, com interesse principal na agricultura. Mas somente nas décadas de 50 e 60 é que se avançou no estudo da influência da sucção no comportamento de deformabilidade e de resistência dos solos não saturados.

2.3.1.

Componentes da Sucção

O gradiente que provoca fluxo pode ser expresso em termos da energia disponível na água no interior do solo, em relação à água livre. Esta energia disponível para realizar trabalho pode ser expressa em termos de potencial equivalente, sendo denominada de potencial total. O potencial total é definido, pela Sociedade Internacional de Ciência de Solo, como a quantidade de trabalho que deve ser realizado para transportar, reversa e isotropicamente, uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório de água pura, a uma elevação específica, até a água do solo, estando o reservatório submetido a uma pressão atmosférica.

O potencial total pode ser dividido em parcelas menores segundo a equação abaixo (Aitchison et al., 1965):

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m + \phi_g + \phi_a + \phi_p \quad (2)$$

onde:

ϕ_o = potencial osmótico ou de soluto, correspondente à pressão osmótica da água do solo;

ϕ_m = potencial mátrico, resultante de forças capilares e de adsorção;

ϕ_g = potencial gravitacional, determinado pela elevação do ponto considerado em relação ao nível de referencia;

ϕ_a = potencial pneumático, que corresponde a pressão na fase gasosa;

ϕ_p = potencial de consolidação, que corresponde à parcela de sobrecarga aplicada no terreno que é transmitida a pressão da água intersticial.

Admitindo que não há nenhum processo de adensamento e que o ar existente nos poros do solo esteja interligado com a atmosfera, as parcelas correspondentes ao potencial de consolidação e potencial pneumático podem ser desprezadas. Desprezando também o potencial gravitacional, o potencial total pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m \quad (3)$$

Os potenciais mátrico e osmótico podem ser tratados pelas suas pressões correspondentes que são, respectivamente, a sucção mátrica e a sucção osmótica. A sucção total é então a soma das parcelas mátrica e osmótica.

$$S_t = S_m + S_o \quad (4)$$

S_t = sucção total;

S_m = sucção mátrica;

S_o = sucção osmótica.

Edil et al. (1981), através de ensaios triaxiais com sucção controlada, verificou que o comportamento mecânico do solo não saturado é afetado basicamente pela sucção mátrica. Outros autores (Fredlund, 1979; Alonso et al., 1987) também consideram que esta componente seja suficiente para descrever o

comportamento de resistência dos solos não saturados. A parcela osmótica estaria associada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos no solo. Acredita-se que esta não contribua significativamente para sua resistência ao cisalhamento (Blight, 1983).

A sucção mátrica por sua vez é definida como sendo a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos de capilaridade e as forças de adsorção. Já a componente osmótica é a sucção equivalente relacionada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre.

No presente trabalho, o estudo da influência da sucção na resistência ao cisalhamento de solos não saturados será tratado apenas em termos da sucção mátrica, desprezando assim a parcela referente à sucção osmótica. Isso é devido às evidências já mencionadas acima e também pelo fato de que os solos tropicais brasileiros apresentam pouca ou nenhuma salinidade (De Campos, 1984).

2.3.2.

Métodos de Medição da Sucção

Nos últimos anos, grandes esforços têm sido feitos para a compreensão dos processos envolvidos na medição da sucção em solos. Instrumentos de medição da sucção podem ser divididos em duas categorias, aqueles que medem diretamente e outros que medem indiretamente a sucção. Instrumentos de medição direta medem a quantidade de energia da água dos poros. Na medição indireta, parâmetros como umidade relativa, resistividade e condutividade são medidos e estes são relacionados com a sucção atuante através de uma calibração.

Na tabela 2 estão apresentadas algumas técnicas utilizadas para a determinação da sucção em solos. A única técnica que será abordada neste trabalho será a do papel filtro, por se tratar o método aqui utilizado para a determinação da relação sucção-umidade. As demais técnicas encontram-se detalhadas em trabalhos de diversos pesquisadores como: Fredlund & Rahardjo (1993); de Campos (1994); Ridley & Wray (1995); Marinho (1997); Villar & de Campos (2001); entre outros.

Tabela 2: Técnicas para a medição da sucção em solos.

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

2.3.2.1.

Método do Papel Filtro

O método do papel filtro tem sido utilizado por muito tempo na ciência dos solos e na agronomia e na década passada foi aceito como método indireto para a medição da sucção em solos devido a suas vantagens sobre outras técnicas. Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), o método do papel filtro como dispositivo de medida de sucção em solo foi primeiramente testado por Gardner (1937). A partir do final da década de 70, vários autores (Ho, 1979; McKeen, 1981; Khan, 1981; Ching & Fredlund, 1984; Gallen, 1985; Gutierrez, 1985; McKeen, 1985; Chandler & Gutierrez, 1986; Marinho, 1994; Swarbrick, 1995) tentaram utilizar o método do papel filtro na prática da engenharia geotécnica.

Basicamente, o método baseia-se no princípio de que o papel filtro entra em equilíbrio com o solo através de fluxo de vapor, para a medida da sucção total sem que haja contato do papel com o solo, ou fluxo de líquido, quando se mede sucção mátrica com o papel em contato com o solo.

Um aspecto muito discutido é a dificuldade de se garantir um bom contato entre o papel e o solo, quando da medição da sucção mátrica. Porém alguns estudos mostram que este contato tem pouca influência desde que seja atendido o tempo de equilíbrio adequado (e.g. Greacen et al., 1987; Marinho, 1994).

Quando colocado em contato com a água do solo, o papel filtro absorve esta água através do contato físico ou através do vapor d'água. O equilíbrio de pressão será alcançado quando essa absorção ao longo do tempo cessar, ou seja, quando não há mais fluxo entre o solo e o papel. No ponto de equilíbrio, o valor da sucção no papel filtro e no solo será a mesma, porém as umidades serão diferentes.

O ensaio foi aceito como um método de medição da sucção em solos pela ASTM em 1993. Os dois papéis filtro mais utilizados na determinação da sucção em solos são o Whatman N°42 e o Schleicher & Schuell N°589. Na figura 4 estão apresentadas as curvas de calibração obtidas por diversos pesquisadores para os dois papéis filtro citados acima.

As relações que representam as calibrações dos dois papéis filtro são apresentadas a seguir.

Para o papel filtro Whatman N°42, as relações em função do teor de umidade do papel são (Chandler et al., 1992):

Para $w > 47\%$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48 \log w)} \quad (5)$$

Para $w \leq 47\%$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622 \log w)} \quad (6)$$

Para o papel filtro Schleicher & Schuell N°589, as relações em função do teor de umidade do papel são (ASTM D5298-92):

Para $w > 54\%$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(1,882-0,01202 w)} \quad (7)$$

Para $w \leq 54\%$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(5,056-0,0688 w)} \quad (8)$$

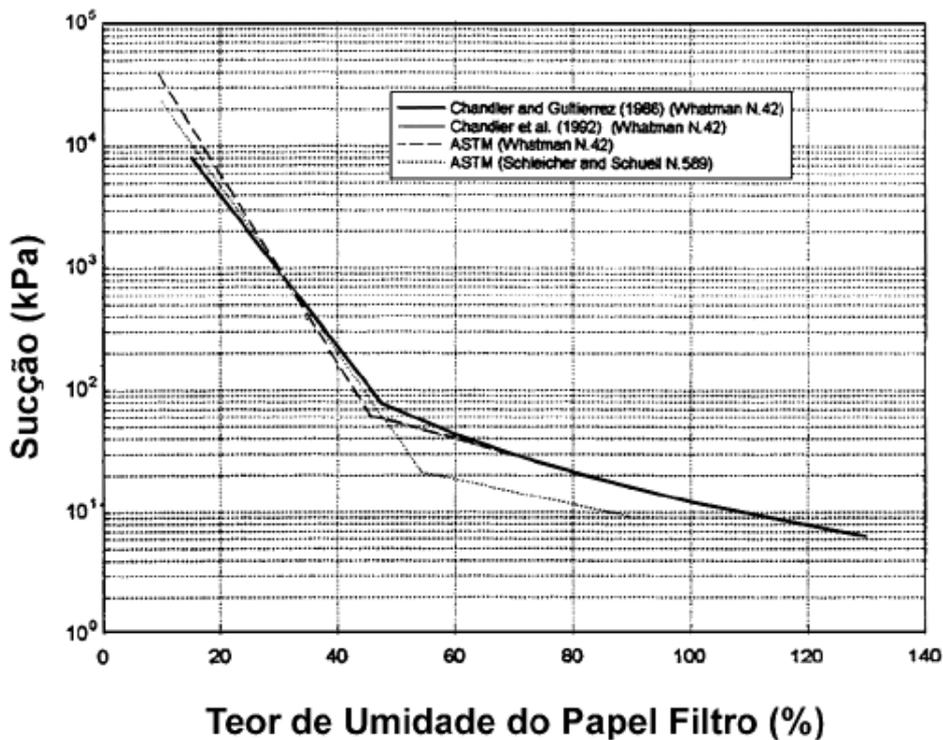


Figura 4: Curvas de calibração para os papéis filtro Whatman N°42 e o Schleicher & Schuell N°589 (apud de Marinho, 1994).

Chandler & Gutierrez (1986) acham o papel filtro Whatman N°42 mais apropriado para uso por ser mais espesso e por apresentar um tamanho de poro pequeno. Leong et al. (2002) afirmam que nos seus experimentos, a performance do papel filtro Whatman N°42 foi mais consistente do que a do papel filtro Schleicher & Schuell N°589. No presente trabalho foi utilizado as curvas de calibração de Chandler et al. (1992) para o papel filtro Whatman N°42. A escolha desse papel filtro se deu exclusivamente pela sua disponibilidade no laboratório e pelas citações feitas anteriormente.

O tempo de equilíbrio a ser considerado é um dos aspectos fundamentais para uma correta obtenção do valor de sucção. Este é um ponto ainda muito

discutido e segundo Marinho (1997) deveria ser levado em consideração nas curvas de calibração. Para a medição de sucção mátrica, Marinho (1997) afirma que o tempo de equalização de 7 dias é suficiente. Já para sucções totais, o mesmo Marinho (1997) sugere tempos de equalização dependentes do nível de sucção. Esses tempos estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Tempo de equilíbrio sugerido para o papel filtro na medição da sucção total (Marinho, 1997).

Nível de Sucção (kPa)	Tempo de equilíbrio (dias)
0 - 100	Indeterminado, > 30
100 – 250	30
250 – 1000	15
> 1000	7
Distancia entre o papel e a fonte de água: 8mm	

Além do tipo de papel filtro, da calibração e do tempo de equalização, outros fatores que também podem influenciar no método, segundo Woodburn & Lucas (1995), são: o efeito da variação da temperatura e a exigência para medições muito precisas da massa do papel filtro, que varia muito imediatamente após ser retirada do recipiente, onde está em contato com o solo, e da estufa.

2.3.3.

Curva Característica de Sucção

A curva característica de sucção, ou curva de retenção de água, expressa graficamente a relação entre o teor de umidade (ou grau de saturação), seja expresso em termos de peso ou volume, com a sucção. Nessa relação a sucção varia inversamente com o teor de umidade, ou seja, a sucção tende a zero quando o solo atinge o estado de total saturação, e a um valor máximo quando o grau de

saturação tende a zero. Essa relação sucção-umidade pode ser obtida através do uso de uma ou mais técnicas. Algumas dessas técnicas foram citadas anteriormente.

A relação sucção-umidade, através da curva característica, expressa a influência do volume e distribuição dos poros, bem como a adsorção e a estrutura do solo, sobre a quantidade de água contida no mesmo. Para valores de sucção baixos, o efeito capilar e a distribuição dos poros determinam a umidade presente no solo. Já para valores maiores de sucção, a textura e a superfície específica têm uma influência maior que a estrutura do solo, considerando que a água esteja adsorvida as partículas sólidas. McQueen & Miller (1974) apresentam na figura 5 o comportamento de cada parcela de sucção na curva característica.

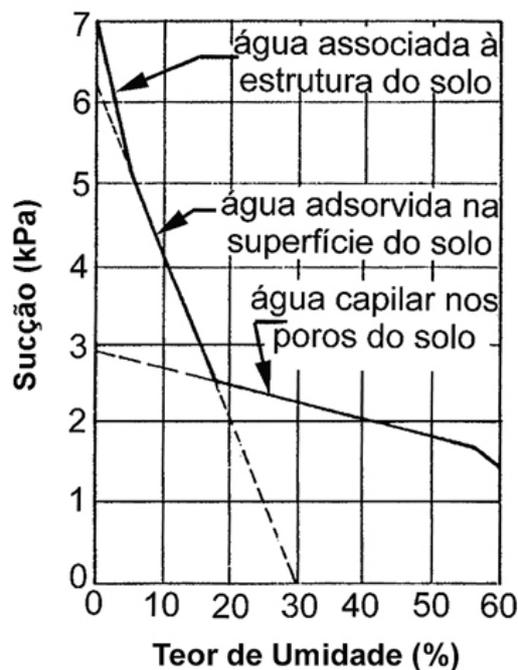


Figura 5: Influência das parcelas de sucção na curva característica (McQueen & Miller, 1974).

Diversos são os fatores que influenciam a curva característica. Entre eles estão a histerese da trajetória de secagem e umedecimento, a composição granulométrica, a composição mineralógica, a estrutura do solo e o efeito da temperatura. A seguir serão discutidos esses fatores em detalhe.

Foi verificado experimentalmente por diversos pesquisadores (Hillel, 1971; Presa, 1982; entre outros) que a curva característica de sucção é dependente da trajetória de secagem ou umedecimentos seguida. De forma geral, a quantidade de água retida durante o processo de secagem é maior do que aquela obtida no processo de umedecimento. Esse fenômeno pode ser observado na figura 6.

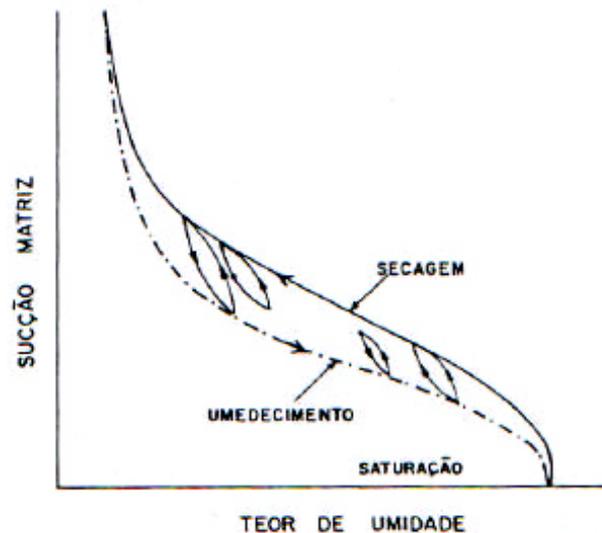


Figura 6: Efeito da histerese na curva característica de sucção (Hillel, 1971).

De acordo com Presa (1982), este efeito de histerese pode ser atribuído aos seguintes fatores:

- Geometria não uniforme dos poros individuais interconectados por pequenos canais.
- Influência do ângulo de contato solo-água, que devido à rugosidade da superfície do grão, varia segundo o avanço ou recuo do menisco.
- 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.

Outro fator que tem grande influência na curva característica, é a composição granulométrica do solo. Em geral, quanto maior for a quantidade da fração argila maior será o teor de umidade para o mesmo valor de sucção. Esse alto valor do teor de umidade dos solos argilosos é explicado pelo fato que estes apresentam vazios muito pequenos e uma superfície específica grande. Essa alta retenção de água é devido ao efeito de capilaridade e também principalmente ao efeito proveniente das forças de adsorção. Solos argilosos apresentam uma relação gradual entre o teor de umidade e a sucção. Isso é explicado devido a sua uniformidade dos poros. Já solos arenosos apresentam uma variação mais brusca dessa relação, uma vez que estes possuem poros com grandes dimensões quando comparado aos solos argilosos. Quanto mais uniforme for o solo arenoso, mais brusca será a variação entre o teor de umidade e a sucção. A figura 7 mostra curvas características típicas para solos com diferentes granulometrias.

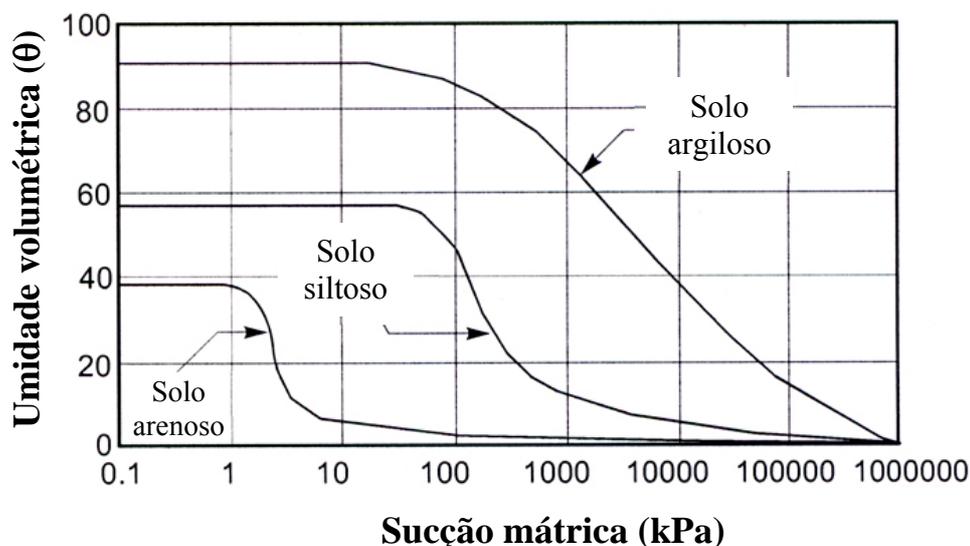


Figura 7: Curva característica típica de diferentes tipos de solo (adaptado de Fredlund & Xing, 1994).

A composição mineralógica é outro fator que afeta sensivelmente a curva característica. Sua influência na retenção de umidade nos solos argilosos se dá pelo fato que os argilo-minerais apresentam diferentes forças de adsorção. A natureza da superfície das partículas e os tipos de cátions trocáveis afetam a energia de adsorção. À medida que se aumenta o tamanho dos íons, a adsorção de

água diminui, logo a camada de água adsorvida junto à superfície das partículas será mais espessa na montmorilonita do que na caulinita. Além disso, a montmorilonita possui uma superfície específica maior do que a caulinita. Juntos, esses dois fatos explicam a maior retenção de água na montmorilonita quando comparada com a caulinita.

A estrutura do solo também influencia bastante na relação sucção-umidade, já que o sistema de poros controla as forças capilares. Esse comportamento está discutido na figura 5.

A temperatura é um fator que também deve ser levado em consideração porque o seu aumento causa uma diminuição na tensão superficial na interface solo-água, diminuindo a curvatura do menisco e, conseqüentemente, a sucção. Caso haja a existência de ar ocluso na massa de solo, esse aumento de temperatura forçaria um aumento no diâmetro dos poros devido à expansão do ar. Isso provocaria uma alteração da estrutura do solo, mudando o aspecto da curva característica.

2.4.

Resistência ao Cisalhamento de Solo Não Saturados

Baseado no conceito de tensões efetivas de Bishop (1959), Bishop et al. (1960), considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, apresentaram a seguinte equação de resistência ao cisalhamento para solos não saturados:

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a)_r \cdot \text{tg} \phi' + \chi \cdot (u_a - u_w)_r \cdot \text{tg} \phi' \quad (9)$$

onde:

τ_r = resistência ao cisalhamento não saturado na ruptura;

c' e ϕ' = parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;

$(\sigma - u_a)_r$ = tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura;

$(u_a - u_w)_r$ = sucção mátrica na ruptura;

χ = parâmetro dependente do grau de saturação.

É assumido que valor de χ varia dentro de uma faixa de 0 a 1, correspondente a condição de total saturação a uma condição de completa secagem. Várias investigações mostram limitações na tentativa da quantificação do parâmetro χ , tanto experimentalmente como teoricamente.

Devido a dificuldade de obtenção do parâmetro χ , Fredlund et al. (1978), baseado no conceito de variáveis de tensão, propuseram a seguinte equação de resistência ao cisalhamento para solos não saturados:

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a)_r \cdot \text{tg} \phi' + (u_a - u_w)_r \cdot \text{tg} \phi^b \quad (10)$$

onde:

ϕ^b = parâmetro que quantifica um aumento na resistência devido a um aumento na sucção mátrica.

Comparando as equações (9) e (10), observa-se que as propostas de Bishop et al. (1960) e Fredlund et al. (1978), apesar de serem conceitualmente diferentes, fornecem equações de resistência equivalentes, como mostrado abaixo:

$$\text{tg} \phi^b = \chi \cdot \text{tg} \phi' \quad (11)$$

Na prática o parâmetro ϕ^b é experimentalmente mais fácil de ser determinado do que parâmetro χ . Este fato explica porque a proposta de Fredlund et al. (1978) é a mais difundida na avaliação da resistência ao cisalhamento para solos não saturados.

A equação 10 que define resistência ao cisalhamento para solos não saturados pode ser reescrita como:

$$\tau_r = c + (\sigma - u_a)_r \cdot \text{tg} \phi' \quad (12)$$

$$c = c' + (u_a - u_w)_r \cdot \text{tg} \phi^b \quad (13)$$

onde:

c = coesão aparente do solo devido ao acréscimo de sucção mátrica.

Segundo Fredlund et al. (1978), a envoltória de ruptura é planar onde são plotados em um gráfico tridimensional os valores de τ_r na ordenada e as duas variáveis de tensão independente ($\sigma - u_a$) e $(u_a - u_w)$ nas abcissas. Essa envoltória é denominada de envoltória de ruptura extendida de Mohr-Coulomb, sendo mostrada na figura 8.

As figuras 9 e 10 mostram as projeções horizontais da envoltória de resistência na origem dos planos $\tau \times (u_a - u_w)$ e $\tau \times (\sigma - u_a)$. Nelas são mostradas as influências individualizadas da tensão normal líquida e da sucção mátrica na envoltória de resistência, assumindo ϕ' e ϕ^b como valores constantes.

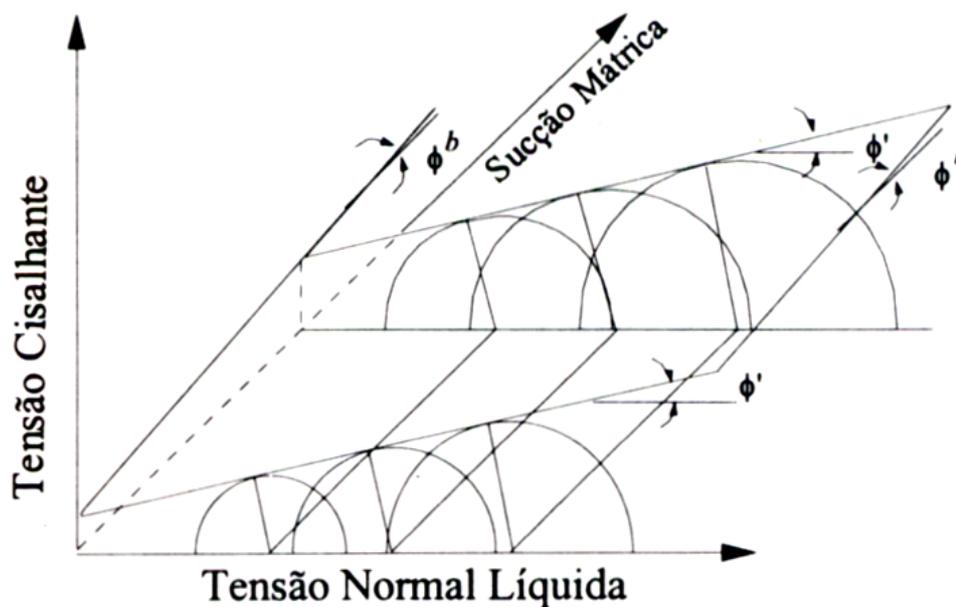


Figura 8: Envoltória de resistência de solos não saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).

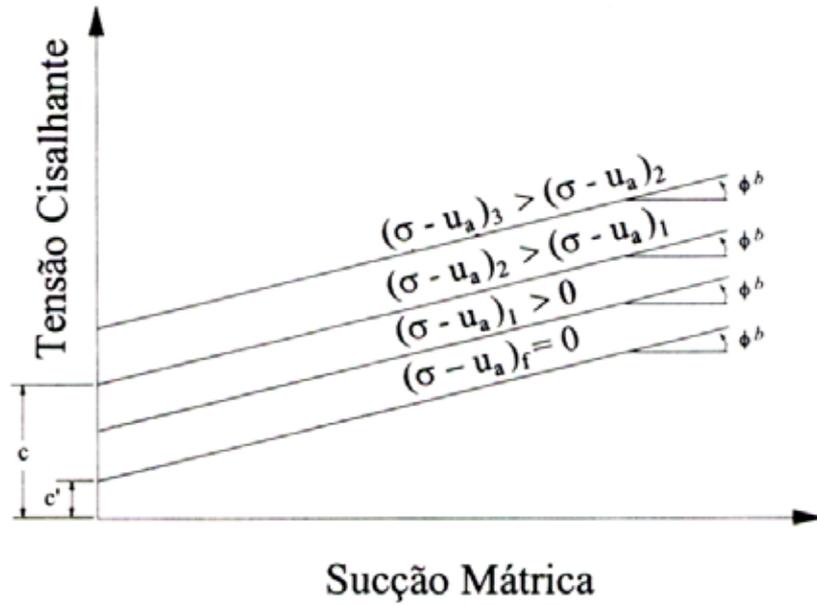


Figura 9: Projeção da envoltória no plano $\tau \times (u_a - u_w)$ (Fredlund & Rahardjo, 1993).

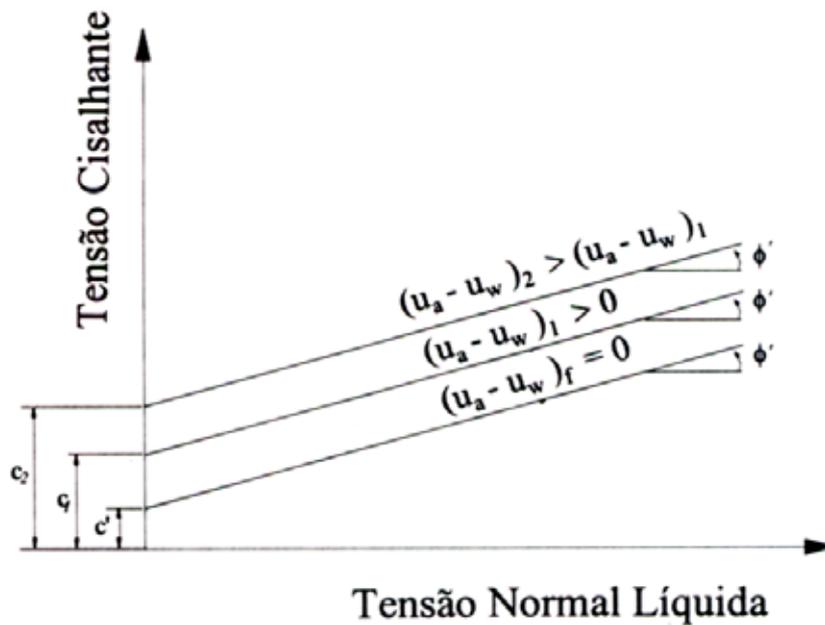


Figura 10: Projeção da envoltória no plano $\tau \times (\sigma - u_a)$ (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Fredlund et al. (1978), analisaram os resultados de ensaios triaxiais reportados por Bishop et al. (1960) e verificaram que a proposta inicial, de que o ângulo ϕ^b era constante, mostrava-se coerente. Outros autores como Gulhati & Satija (1981) e Ho & Fredlund (1982), analisaram resultados apresentados por

Satija (1978) e Escário (1980) e também chegaram a uma envoltória linear de ruptura.

Mais recentemente, diversos autores (e.g. Escário & Sãez, 1986; Fredlund et al., 1987; Gan & Fredlund, 1988; Abramento & Carvalho, 1989; Fonseca et al., 1994; de Campos & Carrillo, 1995; Rohm & Vilar, 1995; Teixeira & Vilar, 1997; Bressani et al., 1997; Futai et al., 2004; Reis & Vilar, 2004) ensaiando diferentes tipos de materiais, mostram que o valor de ϕ^b não é constante, mas varia com o nível de sucção aplicado. As figuras 11 e 12 mostram que a envoltória de resistência não saturada não é linear, ou seja, o ângulo ϕ^b varia com a sucção.

Na grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura, existe um consenso de que o ângulo ϕ^b é menor que o ângulo ϕ' . Isso indica que um incremento de $(\sigma - u_a)$ tem uma maior contribuição na resistência ao cisalhamento do que o mesmo incremento de $(u_a - u_w)$.

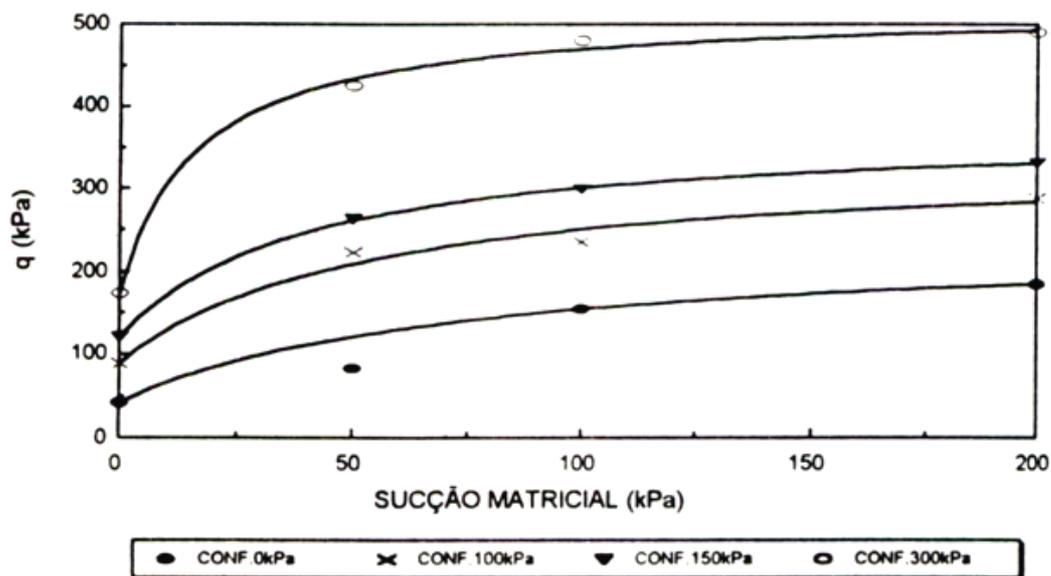


Figura 11: Envoltória de resistência não linear no plano q vs sucção mátrica (Teixeira & Vilar, 1997).

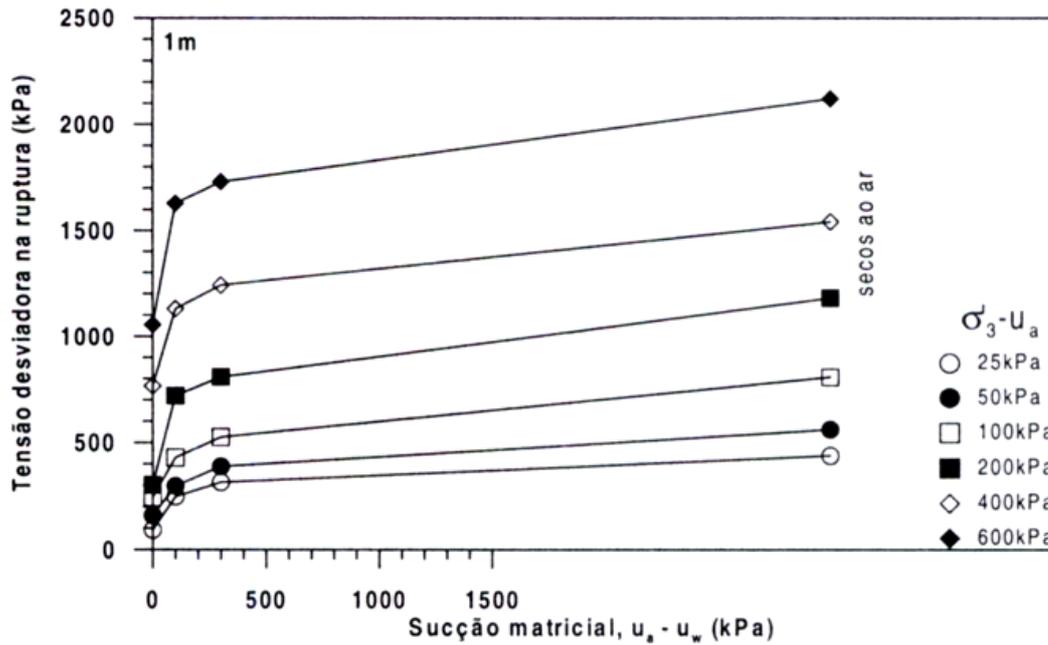


Figura 12: Envoltória de resistência não linear no plano tensão desviadora na ruptura vs sucção mátrica (Funtai et al., 2004).

Rohm & Vilar (1995), em ensaios realizados em um solo arenoso laterítico, e Futai et al. (2004), em ensaios realizados em um solo argiloso laterítico, mostram que o parâmetro ϕ' aumenta com o nível de sucção aplicado em ensaios onde manteve-se a sucção constante e variou-se $(\sigma - u_a)$. Essa variação é mostrada nas figura 13 e 14.

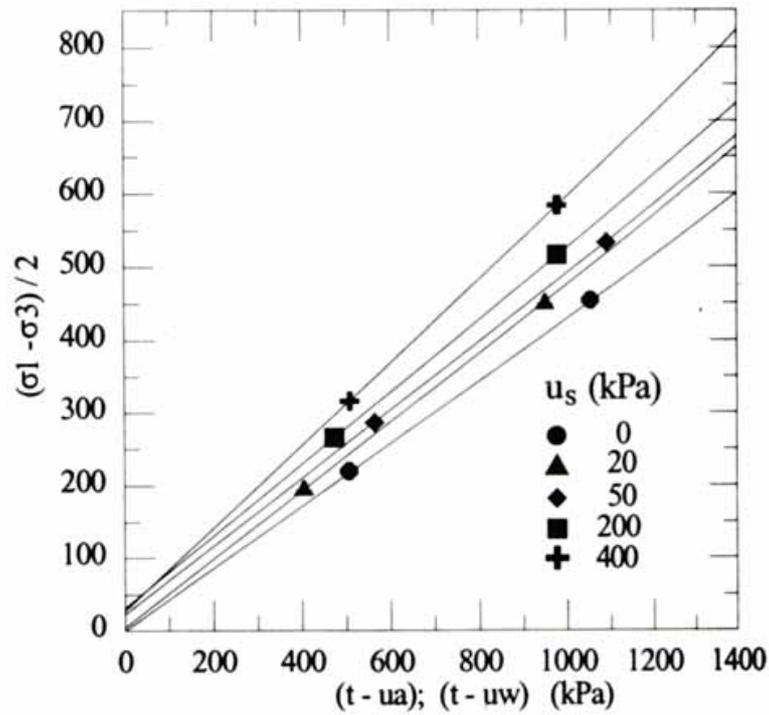


Figura 13: Variação de ϕ' com a sucção (Rohm & Vilar, 1995).

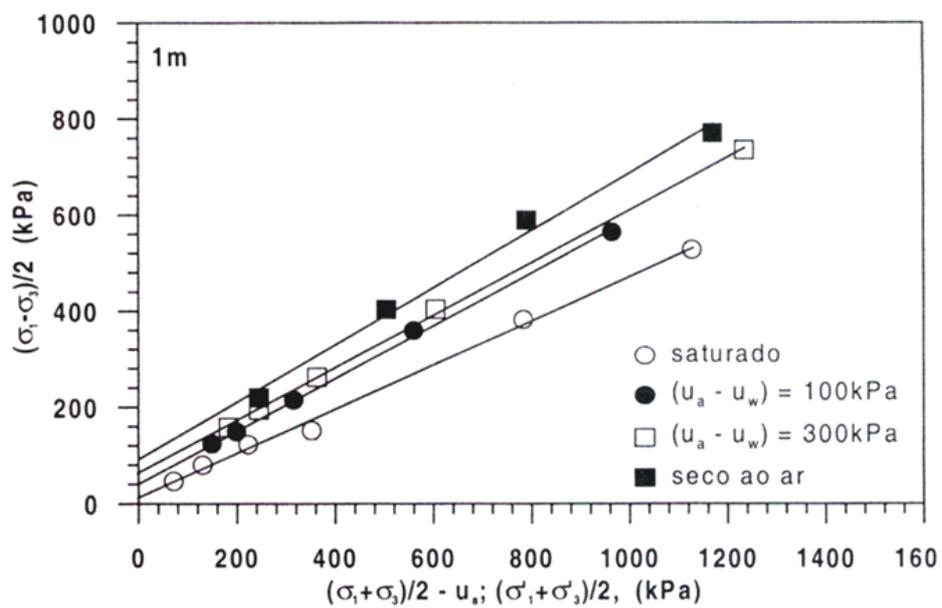


Figura 14: Variação de ϕ' com a sucção (Futai et al., 2004).

De Campos (1997) discute detalhadamente as variações nos parâmetros ϕ^b e ϕ' e sugere que a envoltória geral de resistência de solos não saturados deve ser

representada por uma superfície curva. Uma possível forma dessa superfície curva é apresentada na figura 15.

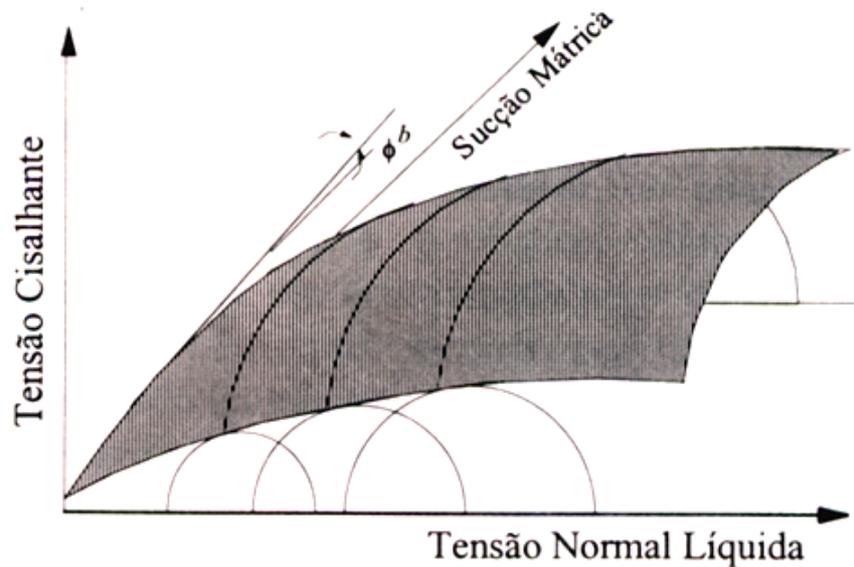


Figura 15: Provável forma da envoltória de resistência de um solo residual não saturado.

2.5.

Técnica de Translação de Eixos

A técnica de translação de eixos foi desenvolvida por Hilf (1956) com o objetivo de atingir medições de sucção acima da pressão atmosférica (100kPa), sem que ocorra cavitação no sistema de leitura de pressão de água.

Através do princípio de que a sucção mátrica no solo é equivalente à diferença entre as pressões no ar e na água dos poros, Hilf (1956) propôs um aumento na pressão de água dos poros, impedindo que haja perda de umidade na amostra. Isso causará um mesmo incremento de pressão de ar e quando a pressão na água dos poros tornar-se positiva, ela pode ser medida usando-se um transdutor convencional.

Em princípio, essa técnica pode ser utilizada tanto para a medição quanto para o controle de sucções durante ensaios. Essa diferenciação é feita através da condição de drenagem. Quando a drenagem de água é permitida, o ensaio controla a sucção e quando não há drenagem, o ensaio permite a medição da sucção.

A seguir serão apresentadas algumas limitações da técnica de translação de eixos:

- Olson & Langfelder (1965) concluíram em seu trabalho que o uso dessa técnica só é válida quando o ar existente na amostra for totalmente interconectado, para evitar qualquer variação de volume quando da aplicação da pressão de ar.
- Bocking & Fredlund (1980) afirmam que a sucção pode ser superestimada quando existe a presença de ar ocluso e que a difusão do ar através da pedra porosa de alto valor de entrada de ar leva a uma subestimativa da sucção.
- Carvalho (2001) afirma que o uso dessa técnica pode afetar o movimento e a distribuição da umidade no solo.