# 2 Revisão Bibliográfica

Os solos na condição não saturada foram ignorados por muitos anos nas análises de projetos de engenharia civil e construção, devido a que a mecânica de solos clássica considerava o solo só nas duas condições extremas, saturado ou seco.

Ao longo dos últimos 50 anos surgiu a necessidade de uma teoria que represente o solo em seu estado intermediário, ou seja, na condição não saturada.

Essa necessidade tem-se tornado muito importante nas ultimas décadas, uma vez que esses materiais são encontrados em todos os continentes, particularmente nos países de clima árido e semiárido (mais de 60 % dos países do mundo) e em regiões de clima tropical como Brasil.

No que se segue apresenta-se uma breve, limitada, revisão da literatura envolvendo, essencialmente, aspectos de interesse ao presente trabalho.

## 2.1. Origem dos Solos não saturados

O tamanho e dimensão da zona de solo não saturado perto da superfície são extremamente sensíveis a mudanças do clima local e regional. O clima é um fator importante na formação dos solos não saturados, pelo fato de que a água presente no solo é removida através de evaporação ou de evapotranspiração da cobertura vegetal (Lu e Likos, 2004). Portanto, a parte do solo próxima à superfície está constantemente exposta a um processo de dessaturação, desenvolvendo pressões negativas de água (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Alguns solos não saturados originam-se a partir da condição saturada, como por exemplo, os solos do fundo de um lago, que por processos de evaporação o nível de água foi diminuindo até a secagem do solo ali depositado.

Consequentemente, o valor da poropressão tem seu valor reduzido e se torna negativo, em relação à pressão atmosférica sobre o nível de água.

Outro exemplo está relacionado com o crescimento da vegetação, que produz uma pressão negativa na fase água gerada por evapotranspiração.

Além disso, Fredlund (1979) propõe mais um modo de dessaturação associado ao desenvolvimento de pressões negativas dentro do solo, maiores que as pressões de confinamento, chamado de fissuração. Com o decorrer do tempo, o solo é sujeito a mudanças climáticas e ambientais (ciclos de umedecimento e secagem), que produzem variações nos valores de poropressão, gerando processos de colapso ou expansão na estrutura do solo. A figura 2.1 mostra um diagrama esquemático da formação do solo não saturado dentro do ciclo hidrológico.



Figura 2.1 – Formação do solo não saturado no ciclo hidrológico. Lu and Likos (2004).

#### 2.2. Fases constituintes dos solos não saturados

Comumente o solo não saturado é considerado como trifásico constituído por uma fase sólida, líquida e gasosa.

Entretanto, Fredlund e Morgensterm (1977) propõem a interface ar-água como uma quarta fase constituinte do solo, também chamada de membrana contráctil, por apresentar propriedades diferentes dos materiais que as rodeiam e superfícies de fronteira definidas que faz qualifica-la como um material independente de uma mistura. (Figura 2.2)

Por outro lado, do ponto de vista peso-volume, pode-se considerar o solo não saturado como um sistema trifásico, uma vez que o volume da membrana contráctil é pequeno e seu peso é praticamente imperceptível.

26

Neste trabalho, o solo é considerado como um sistema trifásico, constituído pelo esqueleto sólido, com seus poros preenchidos por água e ar. Estas fases estão descritas abaixo.

Fase Sólida - Constituída pelas partículas sólidas, que compõem a estrutura do solo. Estas partículas podem apresentar características diversas tais como forma, tamanho, textura, composição, mineralogia, etc.

Fase Líquida - Constituída geralmente por água, a qual pode conter sais dissolvidos que, por sua vez, podem afetar a formação da camada dupla de argilominerais, influenciando as características de resistência e variação de volume do solo. De uma forma clássica, a água do solo tem sido classificada em: água capilar, que permanece no solo por ação das forças capilares e pode se deslocar pela ação das mesmas; água adsorvida na partícula ou fazendo parte da camada dupla, a qual não pode ser removida por ações hidrodinâmicas; e a água gravitacional, a qual o solo pode perder em condições de drenagem livre pela ação da gravidade. Pode-se considerar do ponto de vista hidrodinâmico, que a água gravitacional e a capilar formam uma só unidade, denominada de água livre.

Fase Gasosa – Formada geralmente por ar livre e vapor de água. No que se refere ao ar, uma característica muito importante é sua compressibilidade. A não continuidade desta fase no material pode invalidar as técnicas de ensaios utilizadas (técnica de translação de eixos) para solos não saturados (Carrillo, 1993).



Figura 2.2 – Elemento de solo não saturado com a fase gasosa continua. (adaptado de Fredlund e Morgenstern, 1977).

27

## 2.3. Sucção

A sucção do solo também definida como sucção total tem duas componentes. A primeira chamada de sucção matricial e a segunda sucção osmótica. A sucção mátrica está relacionada ao arranjo das partículas do solo, bem como com a capacidade das mesmas de reter água. A sucção osmótica é decorrente da interação da água com o campo de forças exercido por substâncias ou sais dissolvidos.

Aitchison (1965) define a sucção total como uma medida de pressão negativa relativa à pressão de gás externa no solo com água, para o qual uma quantidade de água deve estar sujeita ao equilíbrio por uma membrana semipermeável com o solo com água.

Marinho (2000) apresentou uma definição da sucção total através de uma membrana semipermeável que separa a água pura de um sistema constituído pelo solo e água intersticial. A membrana é permeável à agua, mas não permite a passagem dos solutos, logo pode existir uma diferença de concentração química entre a água livre e a água do solo. A sucção mátrica é a diferença de pressão através de uma membrana que separa o sistema solo/água intersticial de uma solução idêntica à da água intersticial, mas sem o solo. Esta membrana é permeável à solução, portanto não há diferença de concentração química de um ponto a outro do poro fluido. A sucção osmótica é obtida pela diferença entre as sucções total e mátrica, como é mostrado na figura 2.3.

A sucção mátrica é definida como a pressão negativa devido aos efeitos da capilaridade e das forças de absorção. É referente à matriz do solo. A sucção osmótica está associada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre (Lopes, 2006).



Figura 2.3 – Definição de Sucção Total e suas componentes através de uma membrana semipermeável, Marinho (2000).

## 2.4. Curva de Retenção do solo não saturado

A curva de retenção define a função que relaciona a quantidade de água retida nos poros do solo com a energia que se precisa para tirar essa quantidade de água. Esta quantidade de água é comumente referida à umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica ( $\theta_w$ ), ou grau de saturação (S).

Na figura 2.4 apresenta-se a curva de retenção para um solo siltoso mostrando seus principais pontos característicos como, por exemplo: valor de entrada de ar  $\psi_b$  (valor de sucção na qual a água começa a ser retirada dos poros do solo), umidade residual  $\theta_r$  (umidade associada ao valor de sucção necessário para retirar água do solo) e a umidade correspondente à saturação  $\theta_s$ .



Figura 2.4 – Curva de Retenção típica para um solo siltoso, segundo Fredlund e Xing (1994).

O valor de entrada de ar (sucção) é determinado através da intersecção da reta horizontal que passa pela a umidade de saturação com a reta inclinada que passa pelo ponto de inflexão. A umidade residual é obtida da mesma forma intersectando a reta anterior inclinada com a reta que aproxima a curva para valores altos de sucção, como mostrado na figura 2.4.

A curva pode ser obtida seguindo uma trajetória típica de secagem ou umedecimento das amostras do solo. O processo da secagem consiste em uma prévia saturação das amostras e posteriormente secagem ao ar, o que origina uma diminuição da sua umidade e paralelamente um acréscimo da sucção.

No processo de umedecimento é o contrário, já que as amostras partem de uma condição seca e posteriormente vão se umedecendo promovendo um aumento da umidade, enquanto a sucção diminui. Quando ambas as curvas são comparadas mostram um afastamento uma da outra, chamado de Histerese, sendo que a curva obtida por processo de secagem para um mesmo valor de sucção apresenta maiores valores de umidade volumétrica.

Segundo Hillel (1971) o comportamento histérico da curva característica é atribuído à geometria dos poros, ao aprisionamento de ar nos vazios do solo e ao efeito do ângulo de molhamento em processos de drenagem e de umedecimento.

## 2.4.1. Fatores que influenciam a forma da curva de retenção

Vários autores têm pesquisado sobre os fatores que determinam a posição, inclinação e forma da curva de retenção, entre eles Tinjum et al. (1997), Vanapalli et al.(1999) e Gerscovich (2001) que demostraram vários fatores, tais como: tipo de solo (representado pelo tamanho de grãos e composição mineralógica), arranjo estrutural, teor de umidade inicial, história de tensões, índice de vazios, histerese, entre outros, Os itens a seguir descrevem os principais fatores:

#### 2.4.1.1.Tipo de solo

Segundo Fredlund e Xing (1994), o teor de umidade aumenta com a plasticidade do solo como é mostrado na figura 2.5 para três solos típicos (areia, silte e argila). Valores mais baixos de sucção estão associados às forças capilares enquanto que os valores mais altos de sucção estão principalmente relacionados aos mecanismos de absorção que são influenciados pela composição mineralógica.

Pedregulhos ou areias, solos de granulometria grossa, apresentam largos poros interconectados e uma rápida variação no grau de saturação com a sucção (curva mais íngreme). O início do estágio residual da não saturação nesses solos é bem definido. Os solos com maior teor de finos, como as argilas, tendem a apresentar uma curva mais suave e, consequentemente, uma maior capacidade de armazenar água. Já os solos siltosos apresentam um comportamento intermediário, ficando normalmente entre as duas primeiras curvas. Na figura 2.5 percebe-se que quanto maior o teor de finos, maior o valor de entrada de ar e umidade residual.



Figura 2.5 – Influência do tipo de solo na curva de característica, Fredlund e Xing (1994).

Segundo Futai (2002), os solos tropicais podem apresentar comportamento diferente ao mencionado anteriormente. Como por exemplo, um solo laterítico, mesmo sendo mais argiloso que outro solo saprolítico, pode ter um valor de entrada de ar maior.



Figura 2.6 – Curvas de retenção para dois solos tropicais, Futai (2002).

#### 2.4.1.2. Arranjo Estrutural

Lambe (1958) identificou dois tipos de disposição das partículas: estrutura floculada, onde o contato entre partículas se localiza nas arestas enquanto que na estrutura dispersa se posiciona paralelamente uma com outra.

No caso dos solos compactados, a compactação no trecho seco gera uma estrutura floculada enquanto que no trecho úmido, a estrutura é dispersa.

Oliveira (2004) seguindo a mesma metodologia que foi utilizada por Vanapalli em ensaios anteriores, mostrou a influência da estrutura do solo compactado na forma da curva de característica, sendo que a curva obtida no trecho seco da compactação apresentou menor capacidade de retenção de agua que a curva obtida no trecho úmido.



Figura 2.7 – Curvas de retenção obtidas no trecho seco e trecho úmido da compactação, Oliveira (2002).

#### 2.4.1.3. Histerese

A curva de retenção pode ser determinada seguindo uma trajetória de umedecimento ou uma de secagem, dependendo da umidade inicial do solo. Porém estas curvas apresentam formas diferentes estando afastadas uma da outra, como é mostrado na figura 2.8.

Dineen e Ridley (1999) notaram que na trajetória de secagem a sucção está associada ao poro maior, devido a que o poro maior encontra-se preenchido com água, enquanto que no umedecimento a sucção está associada ao poro menor, já que o interior fica preenchido de ar.



Figura 2.8 – Curvas características obtidas seguindo trajetórias de umedecimento e secagem, Ng e Pang (2000).

#### 2.4.1.4.História de Tensões

Feuerharmel (2007) mediante ensaios realizados em uma placa de pressão e com amostras naturais carregadas a diferentes níveis de tensões líquidas observou que quanto maior é a tensão vertical, maior é o valor de entrada de ar, mas a taxa de dessaturação é menor como são apresentados na figura 2.9.

Huang (1994), citado em Barbour (1998), observou em ensaios similares que a tensão de pré-adensamento influência a curva característica para baixos valores de sucção e que para sucções maiores, o comportamento das três curvas torna-se semelhante (para altas sucções, o adensamento não afeta a estrutura dos poros). Quanto maior a tensão de pré-adensamento, mais elevado é o valor de entrada de ar, pois as amostras submetidas a uma tensão maior apresentam poros menores e dessaturam mais lentamente.



Figura 2.9 – Curvas características obtidas para diferentes tensões liquidas, Ng e Pang (2000).

## 2.4.2. Métodos de obtenção da Curva de Retenção

Atualmente, diferentes instrumentos de medição da sucção do solo e posterior obtenção da curva de retenção estão disponíveis, tanto para campo como no laboratório. Estes instrumentos, baseados em diferentes técnicas, podem ser divididos em duas categorias segundo Kumar et al. (2002).

O método direto baseia-se no principio da medição direta da energia da poropressão (sucção) e o método indireto é baseado em correlações com outras propriedades do solo. Os métodos mais utilizados são apresentados tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Técnicas utilizadas para a medição da sucção do solo, 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

Neste capitulo só se descreverá as técnicas utilizadas na obtenção das curvas características dos solos estudados. Detalhes sobre as outras técnicas apresentadas na tabela 2.1 podem ser encontradas em Fredlund e Rahardjo (1993).

## 2.4.2.1.Papel Filtro

A técnica do papel filtro é uma das técnicas mais usadas, provavelmente pela sua facilidade de uso em laboratório, além da ampla faixa de medição de sucções que possui e pelo baixo custo. Esta técnica está baseada no princípio de que dois materiais porosos com um determinado teor de umidade, postos em contato, realizam uma troca de água até alcançarem uma condição de equilíbrio. Nesse ponto de equilíbrio, o valor de teor de umidade é diferente, porém possuem a mesma sucção. Seguindo este princípio, o papel filtro é posto em contato com as amostras de solo até chegar ao ponto de equilíbrio, ponto onde a sucção do solo será a mesma que do papel filtro.

Cabe ressaltar que se o papel filtro é posto em contato direto com a amostra, tem-se a medição da sucção matricial, mas se o papel filtro não tem contato com o solo, ou seja, a troca de agua é por vapor, mede-se a sucção total.

Para obter a sucção osmótica, de acordo com Ridley (1995), o único método que fornece resultados satisfatórios é o do papel filtro, sendo que sucção osmótica é dada pela diferença das medições da sucção total e da sucção mátrica.

Um ponto importante deste método é o tempo que se requer para chegar ao ponto de equilíbrio e assegurar a completa equalização do sistema papel filtro – solo: Segundo Marinho (1997) para medições de sucção mátrica o tempo mínimo de equalização é de 7 dias. No caso de medições de sucção total, Marinho (1994) na tabela 2.2, define tempos de equilíbrio necessários dependendo do nível de sucção total que se deseja medir.

Tabela 2.2 – Tempos de equilíbrio necessários para medições de sucção total; Marinho

(1997)

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

A sucção atingida no ponto de equilíbrio é determinada a partir do teor de umidade do papel filtro mediante uma curva de calibração, a qual pode ser estimada mediante outros métodos como placa de pressão ou placa de sucção (técnica de translação de eixos) e dessecadores (controle da umidade relativa).

Na literatura, diversos autores determinaram equações de calibração para vários tipos de papel filtro, entre os mais utilizados são papel filtro Schleider & Schuell No. 589 e Whatman N° 42; este último foi utilizado no presente trabalho junto com a equação proposta por Chandler e Gutierrez (1986).

A tabela 2.3 apresentam algumas destas equações propostas para ambos os papéis mencionados.

Referência	Curva de calibra	ição
	Whatman No. 42	
Chandler et al. (1986)	$\log \psi = 4.84 - 0.0622 w_f$	$w_{f} < 47$
Chandler et al. (1992)	$\log \psi = 6.05 - 2.48 \log w_f$	$w_f \ge 47$
Greacen et al. (1987)	$\log \psi = 5.327 - 0.0779 w_f$	$w_f < 45.3$
ASIM (1994)	$\log \psi = 2.413 - 0.0135 w_f$	$w_f \ge 45.3$
Schle	eicher & Schuell No. 589	
Al-Khafaf e Hanks (1974)	$\log \psi = 4.136 - 0.0337 w_f$	$w_f < 85$
	$\log \psi = 2.0021 - 0.009 w_f$	$w_f \ge 85$
McKeen (1980)	$\log \psi = 4.9 - 0.0624 w_f$	$w_{f} < 66$
	$\log \psi = 1.25 - 0.0069 w_f$	$w_f \ge 66$
Greacen et al. (1987)	$\log \psi = 5.056 - 0.0688 w_f$	$w_f < 54$
ASIM (1994)	$\log \psi = 1.882 - 0.0102 w_f$	$w_f \ge 54$

Tabela 2.3 – Equações de calibração dos papeis filtro Schleider & Schuell No. 589. e Whatman No 42, Feuerharmel (2007).

 $\Psi$  = sucção (kPa);  $w_f$  = teor de umidade do papel filtro (%)

#### 2.4.2.2.Translação de Eixos

Devido a que a pressão de ar é a atmosférica, a máxima sucção que se poderia medir diretamente seria no máximo 1 atm, pois a água cavita dentro de sistemas de medição para pressões negativas abaixo deste valor. Hilf (1956) desenvolveu a técnica de translação de eixos a qual consiste em elevar as pressões negativas da água contida nos poros do solo a valores positivos, através da aplicação de pressões de ar, de tal forma que a diferença u<sub>a</sub>-u<sub>w</sub>, que é a sucção do solo a que estaria submetido, fique sempre maior que a pressão atmosférica (e.g Carrillo, 1993).

Cabe ressaltar que esta técnica não só permite a medição da sucção, como também o controle da mesma, como foi utilizado nos ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada do presente trabalho.

A validade desta técnica já foi verificada em vários trabalhos anteriores como, por exemplo: Bishop e Blight (1963); Bocking e Fredlund (1980). Porém foram apresentadas algumas limitações, como:

 Bocking e Fredlund (1980) sugerem que a técnica é valida em solos onde a fase de ar é interconectada.

 Segundo Zhan (2003) devido a que a técnica elimina em laboratório a possibilidade de ocorrência da cavitação, impossibilita a análise da mesma no comportamento do solo em campo.

 Além disso, Feuerharmel (2007) recomenda a incorporação de equipamentos auxiliares que permitam transportar ou aprisionar bolhas de ar difuso, que eventualmente poderiam vir do disco DAVE.

#### 2.4.2.3.Controle da sucção por imposição da Umidade Relativa

Esta técnica, baseada nas leis termodinâmicas como a energia livre de Gibbs, determina a sucção total através da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água do solo. O controle da sucção total se dá por meio da utilização de soluções salinas saturadas ou em determinadas concentrações.

A relação da pressão relativa da água e a sucção total esta definida mediante a seguinte equação 2.1:

 $u_a \cdot u_w = \frac{RT}{Mg} \cdot \ln \cdot \frac{P}{P_o}$ 

(2.1)

Onde:

U <sub>a</sub> ,U <sub>w</sub>	: pressão do ar e da água respectivamente.
R	: constante de gases perfeitos (8,3143 Jmol K <sup>-1</sup> ).
Т	: temperatura absoluta (293 °K)
М	: massa molar da água ( 18,016 gmol <sup>′1</sup> )
g.	: aceleração gravitacional (9,81 ms <sup>-2</sup> )
P/Po	: umidade relativa, relação entre a pressão parcial de
	vapor (P), e a pressão de vapor de saturação (Po).

Conforme mostrado na figura 2.10, esta técnica é aplicada comumente em recipientes chamados Dessecadores, os quais contém uma solução aquosa (neste caso foi NaCl pureza 99%). De acordo com a solução e concentração, uma sucção é imposta dentro do dessecador. As amostras colocadas dentro do dessecador começam a ter uma troca de água por transferências de vapor entre a solução e a amostra, até atingir o ponto de equilíbrio e obter a sucção desejada.



Figura 2.10 – Aplicação de sucção por imposição da umidade relativa através dos dessecadores, Soto (2004).

Entre as principais desvantagens do método têm-se as seguintes: (a) susceptível a mudanças de temperatura, o que requer um controle rigoroso; (b) limitações para sucções abaixo de 1000 kPa; (c) o tempo de equalização pode chegar a ser muito demorado (Blight, 1966).

and Likos (2004).

NaCl Molality	Temperature				
	0°C	7.5℃	15°C	25°C	35°C
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2	836	860	884	915	946
0.5	2070	2136	2200	2281	2362
0.7	2901	2998	3091	3210	3328
1.0	4169	4318	4459	4640	4815
1.5	6359	6606	6837	7134	7411
1.7	7260	7550	7820	8170	8490
1.8	7730	8035	8330	8700	9040
1.9	8190	8530	8840	9240	9600
2.0	8670	9025	9360	9780	10,160

Tabela 2.4 – Níveis de sucção total para diferentes concentrações de NaCl, Lu

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213252/CA

#### 2.4.2.4. Porosimetria por injeção de Mercúrio

Trabalhos anteriores como Romero et al. (1999), Aung et al. (2001), Simms e Yanful (2002) e Moncada (2008) utilizaram o ensaio de porosimetria de mercúrio na previsão da curva de retenção.

De acordo com Moncada (2008), o ensaio de porosimetria é baseado nas leis da capilaridade que governam a intrusão do fluido. No caso da água, é governado pela equação de Laplace, no caso do mercúrio, pela equação de Washburn. Ambas as equações consideram os poros como cilindros e expressam o diâmetro como uma função da pressão aplicada, do ângulo de contato e da tensão superficial do fluido.

O procedimento se assemelha a uma curva de secagem, devido a que o mercúrio, por ser um fluido não molhante, entra no solo (seco, ou seja, saturado de ar) e começa a expulsar o ar como se fosse a água na secagem.

Considerando a água como fluido molhante, é possível relacionar a sucção com os diâmetros dos poros na equação 2.2 a partir da equação de Laplace:

u .u =	4T <sub>w</sub> cosθ <sub>w</sub>	(2.2)
ua-uw-	D	(2.2)
Onde:		

Θw : ângulo de contato (180°)

Tw : Tensão superficial (72,75 x 10-3 N/m)

D : Diâmetro dos poros

u<sub>a</sub> - u<sub>w</sub> : sucção do solo

No caso do mercúrio onde é considerado como fluido não molhante, podese relacionar a pressão de injeção com os diâmetros de poros a partir de equação de Washburn:

$$P = \frac{4T_{nw}\cos\theta_{nw}}{D}$$
(2.3)

Onde:

Θnw	: ângulo de contato (130°)
Tnw	: Tensão superficial (485 x 10 <sup>-3</sup> N/m)
D	: Diâmetro dos poros.
Р	: pressão da injeção do mercúrio no solo.

Igualando as duas equações anteriores, tem-se:

$$u_a \cdot u_w = -\frac{4T_w \cos \theta_w}{4T_{nw} \cos \theta_{nw}} P = 0.233P$$

A partir desta equação é possível calcular a sucção equivalente a cada pressão de mercúrio aplicada. O grau de saturação equivalente é calculado como:

 $Sr = 1 - Sr_{nw}$ 

 $Sr_{nw} = n/n_o$ 

Onde:

n	: Porosidade com mercúrio
n <sub>o</sub>	: Porosidade total
Sr	: Grau de Saturação relativo

No presente trabalho comparou-se a previsão de retenção baseada na injeção de mercúrio com a curva de retenção obtida experimentalmente com papel filtro visando a aplicabilidade da técnica.

## 2.5. Equação de Resistência ao Cisalhamento de solos não saturados

Bishop (1959), na procura de um novo princípio de tensões efetivas que englobasse os solos não saturados reformulou o princípio proposto por Terzaghi para solos saturados, levando em consideração o aporte que representava a sucção, o qual é definido por um parâmetro  $\chi$  multiplicado pela sucção, como é mostrado na equação 2.4.

(2.4)

 $\sigma' = (\sigma \cdot u_a) + ((u_a \cdot u_w))$ 

Onde:

 $\sigma$ -u<sub>a</sub> : Tensão Normal líquida.

 $u_a$ - $u_w$  : sucção mátrica.

 $\chi$  : parâmetro de Bishop.

Bishop et al. (1960) a partir de seu princípio de tensões efetivas para solos não saturados, estendeu o critério de ruptura de Mohr-Coulomb conseguindo definir uma das primeiras equações de resistência para solos não saturados, (equação 2.5).

(2.5)

 $(= c' + (\sigma - u_a) \tan \emptyset' + ((u_a - u_w) \tan \emptyset')$ Onde:

σ-u<sub>a</sub> : Tensão Normal líquida.

u<sub>w</sub>-u<sub>a</sub> : sucção mátrica.

 $\chi$  : parâmetro de Bishop.

Ø' : ângulo de atrito.

com o parâmetro  $\chi$  variando de 0, para solos secos, até 1, para solos completamente saturados.

O uso deste parâmetro de Bishop apresentou inconvenientes devido a que experimentalmente não representava adequadamente o comportamento da deformação volumétrica do solo não saturado.

Segundo Matyas e Radhakrishna (1968), o comportamento do solo não saturado deveria ser avaliado através das variáveis de estado independentes.

Fredlund et al. (1973) propuseram a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados utilizando combinações com as variáveis de estado.

A primeira, utilizando as variáveis ( $\sigma$ -u<sub>w</sub>) e (u<sub>a</sub>-u<sub>w</sub>), apresentou o inconveniente de que para uma mudança da poropressão mudavam as duas variáveis deixando de ser uma independente da outra.

A segunda combinação foi utilizando as variáveis ( $\sigma$ -u<sub>a</sub>) e (u<sub>a</sub>-u<sub>w</sub>), apresentando mais vantagens como a mudança só de uma variável quando muda a poropressão, e quando a sucção é anulada torna-se na equação de Terzaghi de tensões efetivas.

Baseado nisto, Fredlund et al. (1978) desenvolveram uma equação para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, tendo em vista o conceito de variáveis de tensão. Esta nova proposta tirou as dificuldades de determinação experimental do parâmetro  $\chi$ , ver equação 2.6.

 $(=c' + (\sigma \cdot u_a) \tan \emptyset' + (u_a \cdot u_w) \tan \emptyset^b$ (2.6)

Onde:

Ø<sup>b</sup> : ângulo que indica a razão de acréscimo de resistência com relação ao aumento da sucção mátrica

Plotando-se num gráfico tridimensional a tensão cisalhante versus as duas variáveis de tensão, ou seja,  $\tau$  vs. ( $\sigma$ -u<sub>a</sub>) e  $\tau$  vs. ( $u_a$ -u<sub>w</sub>), a superfície resultante poderia ser planar ou não planar dependendo do tipo de solo, do intervalo de sucção e da trajetória de tensões a que o solo tenha sido submetido (e.g, Abramento e Carvalho, 1989).



Figura 2.11 – Possíveis envoltórias de ruptura para um solo não saturado, adaptado de Fredlund (2002).

Inicialmente a envoltória idealizada por Fredlund et al. (1978) assume uma superfície de ruptura planar, porém autores como Escário e Sáez (1986, 1987), Fredlund e Rajhardo (1993), Abramento (1988), Carrillo (1993), Soares (2005) e Lopes (2006), obtiveram que o aumento da resistência com o aumento da sucção não é necessariamente constante (não linear), diferentemente da resistência com relação a tensão normal líquida a qual apresenta um comportamento mais linear, como é mostrado na figura 2.12.



Figura 2.12 – Resultados obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada plotados nos planos  $\tau$  vs. ( $\sigma$ -u<sub>a</sub>) e  $\tau$  vs. ( $u_a$ -u<sub>w</sub>), Escário e Sáez (1986).

Fredlund et al. (1987) explicaram a variação no ângulo  $\emptyset^{b}$  considerando o volume do poro no qual a pressão na água age. Para baixas sucções, o solo permanece saturado e todo o poro é preenchido por água. Neste caso, os efeitos da pressão na água e da tensão normal total na resistência são caraterizados pelo mesmo ângulo de atrito  $\emptyset'$  e, portanto, um aumento na sucção matricial produz o mesmo aumento na resistência ao cisalhamento do que um aumento na tensão normal líquida. Com o aumento da sucção matricial, a água é drenada do solo e quando o valor de entrada de ar é atingido, o ar começa retirar a água nos poros. Nesta fase, um acréscimo adicional na sucção matricial demostra não ser tão efetivo quanto um aumento na tensão normal líquida em aumentar a resistência ao cisalhamento do solo, indicando uma redução no ângulo  $\emptyset^{b}$  para um valor menor que  $\emptyset'$  (ver figura 2.13).



Figura 2.13 – Não linearidade da envoltória de resistência no plano  $\tau$  vs. (u<sub>a</sub>-u<sub>w</sub>) Fredlund et al. (1987).

Além disso, Vanapalli et al. (1996); Fredlund e Vanapalli (2002) definiram uma relação entre a taxa com que a resistência ao cisalhamento varia e a área do menisco de água em contato com as partículas do solo. Este fato é refletido na curva característica como se mostra na figura 2.14, onde se mostra a variação da resistência ao cisalhamento ao longo da trajetória de secagem na curva de retenção.



Figura 2.14 – Relação entre curva característica e envoltória de resistência ao cisalhamento, Fredlund (2002)

Da figura 2.15, nota-se que a resistência ao cisalhamento aumenta linearmente com a sucção até atingir o valor de entrada de ar do solo. Após esse valor, começa a diminuir o acréscimo tornando-se a curva não linear.

Portanto, segundo esta proposta, a não linearidade também dependerá do valor de entrada de ar do solo, que por sua vez depende do tipo de solo.



Figura 2.15 – Envoltória de resistência no plano  $\tau$  vs. (u<sub>a</sub>-u<sub>w</sub>) para diferentes solos, Rassam e Cook (2002).

# 2.6. Principais equações para representar a curva de retenção

Os valores experimentais da curva de retenção podem ser ajustados através de diversas equações. A tabela 2.5 apresenta as equações mais utilizadas na literatura.

Autores	Ano	Equação	Parâmetros
Brooks e Corey	1964	$\Theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^{\lambda}; \theta \leq 1$	Ψ <sub>b</sub> : Valor da entrada e ar. Ψ: sucção Matricial. λ: Parâmetro obtido graficamente.
Van Genunchtem	1980	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + \alpha \psi^n}\right]^m$	Ψ: sucção Matricial. α,m e n: Parâmetro de ajuste.
Fredlung e Xing	1994	$\theta = \frac{C(\psi)\theta_s}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m}$	Ψ: sucção Matricial. a,m e n: Parâmetro de ajuste. θ <sub>s</sub> :Umidade volumétrica de saturação.

Tabela 2.5 – Principais equações de ajuste da Curva de Retenção. Ada	ptado de
Oliveira (2004).	

No presente trabalho utilizou-se a equação de ajuste de Fredlund e Xing (1994) para o ajuste da curva de retenção e previsão da permeabilidade não saturada, ambas necessárias para a determinação da velocidade de cisalhamento na condição não saturada.

A equação proposta por Fredlund e Xing (1994) é afetada por um fator de correção  $C(\psi)$ , o qual pode ser determinado pela equação 2.7.

$$C(\psi) = 1 - \left[ \frac{ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{1 + \left(\frac{1000000}{\psi_r}\right)} \right]$$
(2.7)

Além disso, os valores dos parâmetros de ajuste podem ser obtidos através das equações 2.8 á 2.12.

$$a = \psi_i$$
 (2.8)

$$m = 3,67 ln \left[ \frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right]$$
(2.9)

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3.72S^* \tag{2.10}$$

$$S^{*} = \frac{S}{\theta_{s}} - \frac{\psi_{i}}{1.31^{m}(\psi_{i} - \psi_{r})ln\left(1 + \left(\frac{1000000}{\psi_{r}}\right)\right)}$$
(2.11)

$$S = \frac{\theta_i}{\ln\left(\frac{\psi p}{\psi_i}\right)} \tag{2.12}$$

Os valores de  $\psi_i$ , $\theta_i$ ,  $\theta_s$ ,  $\psi_r e \psi_p s$ ão obtidas graficamente como indicado na figura 2.16.



Figura 2.16 – Determinação gráfica dos parâmetros necessários para calcular os valores de a, n e m. Fredlund e Xing (1994).

#### 2.7. Modelos de Previsão da Resistencia de um solo não saturado

Muitos procedimentos têm sido propostos nos últimos 20 anos para estimar a resistência ao cisalhamento do solo não saturado.

Esses procedimentos usam a curva característica como ferramenta direta ou indireta junto com os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo saturado, c' e Ø', para estimar a função da resistência do solo não saturado. Entre os mais relevantes tem-se: Lytton (1996), Oberg & Sallfors (1997), Khallili and Khabbaz(1998), Vanapalli and Fredlund (1996), Vanapalli et al. (1996). A seguir apresentam-se quatro das principais formulações utilizadas na avaliação da resistência do solo não saturado.

Lytton (1996) utilizou a equação proposta por Bishop (1959), onde substituiu o parâmetro  $\chi$  pelo teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ) para a obtenção da resistência ao cisalhamento do solo na condição não saturada(equação 7.6).

# $T=c'+(\sigma_n \cdot u_n) tg\emptyset' + (u_n \cdot u_m)[\theta, tg\emptyset']$

Oberg & Sallfors (1997), de maneira similar, propuseram uma equação, (equação 7.7) substituindo naquela equação o parâmetro  $\chi$  pelo grau de saturação, na tentativa de estimar a resistência ao cisalhamento de solos não argilosos como as areias ou siltes.

(7.6)

## $\mathbf{T} = \mathbf{c}' + (\boldsymbol{\sigma}_n \cdot \mathbf{u}_a) \operatorname{tg} \boldsymbol{\emptyset}' + (\mathbf{u}_a \cdot \mathbf{u}_w) [S. \operatorname{tg} \boldsymbol{\emptyset}']$ (7.7)

Khallili and Khabbaz (1998), reexaminaram a equação de Bishop e forneceram uma relação entre o parâmetro  $\chi$  e uma razão de sucção definida

como a sucção dividida pelo valor de entrada de ar  $\frac{(u_a - u_w)f}{(u_a - u_w)b}$ .

O parâmetro exponencial de ajuste é considerado -0,55, o qual está baseado em dados experimentais de 13 solos.

A equação 7.8 apresenta a previsão definida por estes autores.

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}' + (\boldsymbol{\sigma}_{n} \cdot \mathbf{u}_{a}) \operatorname{tg} \boldsymbol{\emptyset}' + (\mathbf{u}_{a} \cdot \mathbf{u}_{w}) \left[ \frac{(\mathbf{u}_{a} \cdot \mathbf{u}_{w})_{f}}{(\mathbf{u}_{a} \cdot \mathbf{u}_{w})_{b}} \cdot \right]^{-0.55} \cdot \operatorname{tg} \boldsymbol{\emptyset}'$$
(7.8)

Onde:

$$\frac{\left(\mathbf{u}_{a}\cdot\mathbf{u}_{w}\right)_{f}}{\left(\mathbf{u}_{a}\cdot\mathbf{u}_{w}\right)_{b}} = \chi, \text{ razão de sucção.}$$

Vanapalli and Fredlund (1996), propuseram uma função não linear para estimar a resistência do solo não saturado usando completamente a curva característica na faixa de 0 até 1,000,000 kPa e o parâmetro de ajuste k como é mostrada na equação 7.9.

$$\mathsf{T=c'+}(\sigma_{n} \cdot \mathbf{u}_{a}) \mathsf{tg} \emptyset' + (\mathbf{u}_{a} \cdot \mathbf{u}_{w}) \left[ \Theta^{k} \cdot \mathsf{tg} \emptyset' \right]$$
(7.9)

Onde:

k=parâmetro de ajuste

 $\Theta$ =teor de umidade volumétrico normalizado  $\Theta$ = $\theta/\theta$ s.

Vanapalli and Fredlund (2000), propuseram uma relação entre o parâmetro de ajuste k, e o índice de plasticidade obtida através de uma série de dados experimentais de diversos autores. A relação é apresentada na figura 7.18.





Por último, Vanapalli et al. (1996) propõem a equação 7.9 com o fim de poder determinar a resistência dos solos não saturados sem usar o parâmetro de ajuste k, só levando em conta parâmetros de umidade volumétrica da curva característica:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}' + (\boldsymbol{\sigma}_{n} \cdot \mathbf{u}_{a}) \operatorname{tg} \boldsymbol{\emptyset}' + (\mathbf{u}_{a} \cdot \mathbf{u}_{w}) \left[ \frac{(\boldsymbol{\theta} \cdot \boldsymbol{\theta}_{r})}{(\boldsymbol{\theta}_{s} \cdot \boldsymbol{\theta}_{r})} \operatorname{tg} \boldsymbol{\emptyset}' \right]$$
(7.9)

Onde:

 $\theta_s$ =teor de umidade volumétrico do solo saturado.  $\theta_r$ =teor de umidade volumétrico residual.

# 2.8. Estudos dos efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem na resistência ao cisalhamento do solo.

Utomo (1980) encontrou que devido aos processos de umedecimento e secagem, o solo está submetido constamente a tensões que fazem com que o solo dilate e contraia. Além disso, influencia a formação de agregados novos que incialmente poderiam se encontrar desagregados. A sua vez, verificou que nos grãos maiores as trincas ocorrem mais facilmente que nos grãos menores em consequência na queda na resistência e mais significativa nos grãos maiores que nos grãos menores.

Com o objetivo de dar resposta à diferença que se tinha entre a resistência obtida no campo e no laboratório, Rogers e Wrigth (1986) estudaram argilas altamente plásticas mediante ensaios de cisalhamento direto e triaxiais visando avaliar a influencia do umedecimento e secagem no campo.

Os resultados mostraram uma diminuição da resistência ao cisalhamento refletida principalmente pela diminuição do intercepto coesivo. Além disso, foi notado que não tem muita influência o numero de ciclos a que foram expostas as amostras, já que a maior mudança observou-se no primeiro ciclo.

Rajaram e Erbaoh (1999) concluíram que um ciclo de umedecimento e secagem é suficiente para alterar as propriedades mecânicas numa argila, mudando a coesão, ângulo de atrito e tamanho dos agregados, com a estabilidade mecânica do agregado diminuindo em decorrência das tensões da secagem.

Cafaro e Coteccha (2001), avaliando material argiloso do sul da Itália por meio de microscopia eletrônica, sugerem a secagem como sendo o principal processo de desgaste, possivelmente associado à oxidação das argilas. A secagem pode ser também responsável pela união entre partículas de argilas, formando grãos mais grossos (grumos).

Os resultados dos ensaios evidenciaram que os ciclos de umedecimento e secagem geraram uma contração progressiva nas argilas, modificando sua estrutura.

Analises dos processos do intemperismo reproduzido por ciclos de umedecimento e secagem realizados por Gulla e Mandaglio (2006) levaram até as seguintes conclusões:

Os efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem geram mudanças na estrutura natural e a união dos agregados.

Resultados obtidos em ensaios edométricos mostraram que a estrutura se torna instável e a união é mais fraca. Nos ensaios de resistência, os picos obtidos diminuíram e, por sua vez, as curvas tensão deslocamento mostraram um comportamento de um material mais frágil.

Tse e Ng (2008) estudaram amostras remoldadas de solo residual da cidade de Hong Kong. Essas amostras foram cisalhadas com CDSC, tentando avaliar a influencia da histerese da resistência ao cisalhamento decorrente da histerese da curva características do solo.

Os resultados obtidos mostraram que a resistência na trajetória de secagem é maior que a obtida na trajetória de umedecimento.

Guan e Rahardjo (2010), baseados em ensaios triaxiais com amostras de areia e caulim verificaram o encontrado por Tse e Ng. Além disso, observaram que a areia-caulim sob a trajetória de secagem se comporta como normalmente adensada, enquanto que sob a trajetória de umedecimento se comporta como pré-adensada.