

2 ESTUDO DA SUCÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES

2.1 Considerações Iniciais

A prática da engenharia geotécnica, ao longo dos anos, demonstra a dificuldade de se aplicarem os princípios da Mecânica dos Solos Clássica, fundamentada em observações feitas sobre o comportamento de solos sedimentares, característicos de regiões de clima temperado e que considera solos saturados ou secos, para a condição onde os solos se encontram não saturados. Muitas situações cotidianas, que envolvem solos não saturados, requerem um entendimento maior com relação às suas características de drenagem, deformabilidade e resistência ao cisalhamento.

Fredlund e Rahardjo (1993) consideram que solos não saturados podem ocorrer em qualquer depósito geológico, porém, existem algumas categorias que têm recebido importante atenção dos pesquisadores, como os solos residuais tropicais e solos expansivos. A presença de uma pressão negativa nos poros, também conhecida como sucção, é um dos principais fatores de alteração do comportamento geomecânico dos solos residuais, podendo causar a estabilização de um talude natural a partir de um acréscimo na resistência do solo ou, de uma forma inversa, instabilizá-lo a partir de uma diminuição em sua resistência, através de sua saturação.

Portanto, sob a condição não saturada e considerando as características estruturais peculiares de alguns solos, uma descrição realizada a partir de parâmetros geotécnicos convencionais torna-se pouco realista.

Assim, o problema se estende por muitos países no mundo, com vários relatos de catástrofes associadas a deslizamentos de encostas e rupturas de taludes, geralmente envolvendo solos residuais.

O estudo da sucção em solos, inicialmente desenvolvido para fins agrícolas, tem seus primeiros registros no século XIX. Livingsgton (1906), com o objetivo de estudar plantas características do deserto utilizou o princípio osmótico para investigar a capacidade dos solos de absorver água.

Shull (1916), provavelmente, foi o primeiro a utilizar o fenômeno de absorção como ferramenta para a quantificação da sucção. Através de sementes de plantas tomadas como um artifício de absorção de água apresentou um procedimento para a determinação indireta da sucção. Em 1937, Gardner aprimorou o método anteriormente apresentado e forneceu subsídios para a técnica de medição, atualmente muito utilizada, do papel filtro.

Marinho (1997) cita que, na Mecânica dos Solos Clássica, Terzaghi foi o primeiro a considerar a capacidade dos solos argilosos apresentarem elevada sucção, em 1925.

Nos últimos anos muito se desenvolveu com relação à Mecânica dos Solos Não Saturados, com significativos avanços nos aspectos teóricos e experimentais. Estes estudos são continuamente discutidos e divulgados em periódicos e encontros específicos, desde as primeiras conferências e seminários tais como I Symposium on Expansive Clays, África do Sul, 1957, I Symposium on Expansive Soils, EUA, 1958, Conference on Pore Pressure na Suction Soil, Londres, 1960, como nos atuais congressos e seminários nacionais e internacionais, por exemplo, o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados (ÑSAT) e a Conferência Internacional de Solos Não Saturados (International Conference of Unsaturated Soils – UNSAT).

A seguir abordam-se alguns aspectos considerados relevantes para o desenvolvimento da pesquisa e melhor compreensão desse ramo da engenharia.

2.1.1 Sucção

De acordo com Villar (2002), a sucção dos solos pode ser definida como uma quantidade energética para avaliar sua capacidade de reter água. Quando ocorre fluxo da água livre para dentro de um solo, ela poderá ser retida ou adsorvida por

ele. Para desprender essa água adsorvida, é necessária a aplicação de uma força externa que vai de encontro às forças de retenção do solo. Esta energia aplicada por unidade de volume de água é a sucção (LEE et al., 1983). Assim, quanto mais secos os solos, maior será a sucção.

Normalmente, a sucção é expressa como pressão e, portanto, as unidades mais utilizadas são kPa, atm, bars. Porém, em vários trabalhos, observa-se o uso do número denominado pF, que representa o logaritmo da altura de coluna de água em centímetros da pressão correspondente (e.g. 1pF = 0,1m.c.a. = 1kPa ou 10pF = 1m.c.a. = 10kPa). A escala pF foi criada por Schofield, em 1935. Essa escala é uma referência à escala pH (escala de acidez) e muito utilizada na agronomia (MARINHO, 1997).

De uma forma geral, a sucção total (S_t) de um solo é formada pela soma de duas parcelas, que são a sucção mátrica (S_m) e a sucção osmótica (S_o), ou seja:

$$S_t = S_m + S_o \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Alguns autores como Aitchison (1965) dividem a sucção total em parcelas menores, como:

- o potencial gravitacional (S_g), que é elevação do ponto em questão relativo ao nível de referência;
- o potencial pneumático (S_a), referente à pressão na fase gasosa; e
- o potencial de adensamento (S_p), referente à tensão aplicada na superfície.

Considerando que não há processo de adensamento, os potenciais gravitacional e de adensamento podem ser desprezados. Admitindo-se, também, que os poros dos solos estejam interligados com a atmosfera, também é insignificativa a parcela de potencial pneumático (LOPES, 2006). Assim, valida-se a definição representada pela Eq. 2.1.

A pressão negativa da água intersticial, devido aos efeitos da capilaridade e das forças de adsorção, é a sucção mátrica e está relacionada com a matriz do solo, ou seja, ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural. Pode ser descrita, também pela seguinte equação:

$$S_m = u_a + u_w \quad (\text{Eq. 2.2})$$

em que:

u_a = pressão do ar; e

u_w = pressão da água.

A sucção osmótica se refere à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre e, portanto, está relacionada à concentração química da água do solo.

A Figura 2.1 apresenta um sistema que ilustra os conceitos de sucção total, mátrica e osmótica.

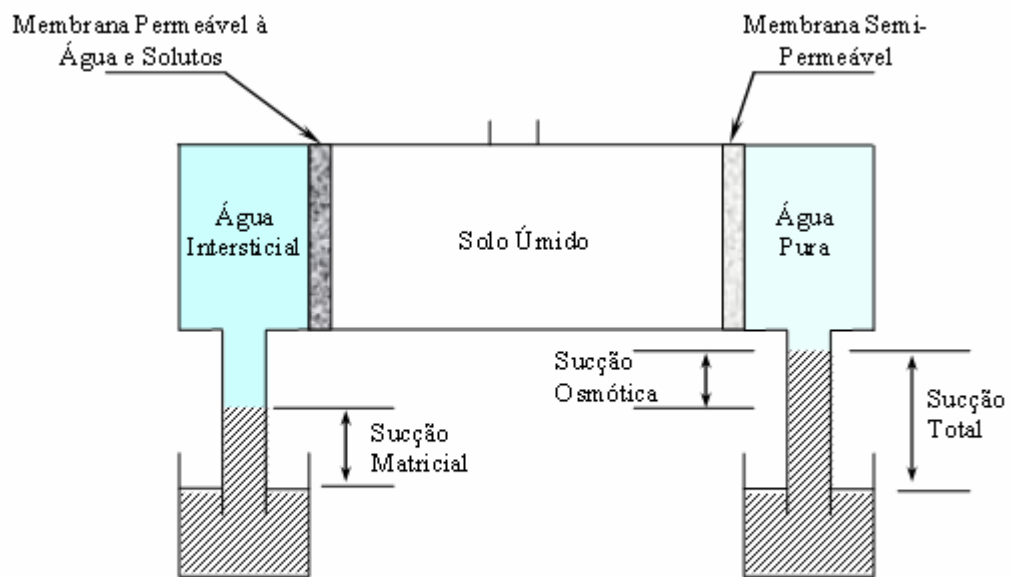


Figura 2.1 - Representação esquemática dos conceitos de sucção (MARINHO, 1997).

Alguns pesquisadores, como Edil et al. (1981), Fredlund et al. (1978) e Alonso et al. (2001), asseguram que a sucção osmótica não influencia o comportamento do solo em relação ao ganho de resistência ao cisalhamento e que, para descrever o comportamento de solos não saturados, a sucção mátrica mostra-se satisfatória, consideração também sugerida por Lee et al. (1983).

Marinho (1997) ressalta que as variações na sucção osmótica são, em geral, menos significativas que aquelas observadas na sucção mátrica. Entretanto, para estudos de contaminação e em técnicas de ensaio de laboratório, as alterações na sucção osmótica devem ser consideradas.

Segundo Fredlund e Xing (1994), para valores de sucção acima de 1500kPa a sucção mátrica e a total podem ser consideradas equivalentes.

Diante do exposto, ressalta-se que para este trabalho, será considerada somente a sucção mátrica para a avaliação do comportamento do solo estudado.

2.1.2 Técnicas para Medidas de Sucção

Aitchison (1965) classificou os ensaios de sucção em solos em dois grupos:

- métodos que controlam a sucção; e
- métodos que medem a sucção.

O Quadro 2.1 apresenta uma classificação geral desses dois grupos, segundo Campos (1984).

Quadro 1 - Classificação dos tipos de ensaios para a avaliação da sucção

TIPO DE ENSAIO DE SUCÇÃO	MÉTODO DE ENSAIO DE SUCÇÃO	
que controla a sucção	realizado em laboratório	Placa de Pressão; Placa de Sucção; Membrana de Pressão; Centrífuga e Dessecador de Vazios.
que mede a sucção	realizado em laboratório	Psicrômetro; Balança de Sorção; Depressão do Ponto de Congelamento e Papel Filtro.
	realizado em campo	Psicrômetro; Tensiômetro; Célula de Gesso e Piezômetro de Pressão.

Ressalta-se que a técnica utilizada no presente trabalho foi a do papel filtro e este será descrito com maiores detalhes no Capítulo 5. Observa-se, ainda, que os outros métodos citados encontram-se descritos e comentados em trabalhos realizados por Aitchison (1965), Hillel (1971), Presa (1982), Lee et al. (1983), Fredlund e Rahardjo (1993), de Campos (1994), Marinho (1997), Gasmo et al. (1999) e Villar e de Campos (2001).

A Figura 2.2 apresenta uma comparação entre as diversas técnicas disponibilizadas atualmente para a medição da sucção e demonstram coerência entre elas, desde que sejam realizados criteriosamente (LEE e WRAY, 1995).

O Quadro 2.2 apresenta uma síntese de algumas técnicas utilizadas para a medição da sucção em solos e suas características básicas. Essas técnicas são

classificadas como métodos diretos ou indiretos em função da forma de interação dos mesmos com o solo, a partir de correlações e calibrações.

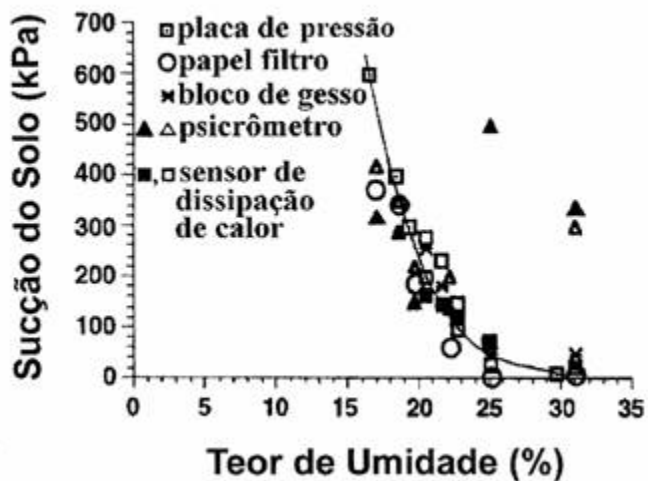


Figura 2.2 - Comparação entre algumas técnicas de medição de sucção (LEE e WRAY, 1995).

Quadro 2.2 - Medidas de sucção em solos (adaptado de Lee et al., 1983; Fredlund e Rahardjo, 1993 e Marinho, 1997)

TIPO DE EQUIPAMENTO	MEDIDA OBTIDA	INTERVALO (kPa)	TEMPO DE EQUILÍBRIO
Placa de sucção	mátrica	0 a -90	horas
Placa de pressão	mátrica	0 a 1.500	horas
Tensiômetro padrão	mátrica	0 a -100	minutos
Tensiômetro osmótico	mátrica	0 a 1.500	horas
Tensiômetro Imperial College	mátrica	0 a -1.800	minutos
Bloco poroso	mátrica	30 a 30.000	semanas
Psicrômetro	total	100 a 71.000	minutos
Papel Filtro (com contato)	mátrica	30 a 30.000	7 dias
Papel Filtro (sem contato)	total	400 a 30.000	7 a 14 dias

2.2 Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados

Para a Mecânica dos Solos Clássica, a envoltória de resistência ao cisalhamento baseia-se no princípio da tensão efetiva, primeiramente proposto por Terzaghi, e confirmada por diversos autores, sendo expressa por:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (\text{Eq. 2.3})$$

em que:

σ' = tensão normal efetiva;

σ = tensão normal total; e

u = poro-pressão.

Segundo Lee et al. (1983), esta equação, mesmo extremamente simples em conceito, tem mostrado ser uma excelente aproximação da realidade para solos saturados e *é, provavelmente, a mais simples e importante equação na Mecânica dos Solos.*

Entretanto, o conceito acima não se aplica no caso de solos não saturados porque ambas as fases, ar e água, estão presentes nos vazios e, geralmente, sob diferentes pressões. Complicações surgem durante a investigação do comportamento de solos não saturados por várias razões. Estas incluem a compressibilidade da fase gasosa (poro de ar) e sua habilidade para se dissolver sob altas pressões, e os efeitos da tensão superficial na água originando a sucção mátrica do solo.

Normalmente os espaços entre as partículas de solo são preenchidos por alguma quantidade de água (LOPES, 2006). Quando todos os espaços estão tomados por água o solo é considerado saturado e quando a água está presente apenas nos poros menores, o solo é denominado não saturado. Alguns autores como Lambe e Whitman (1969) consideram o solo não saturado como um sistema trifásico constituído pela fase líquida, gasosa e sólida. Porém, uma quarta fase é admitida por Fredlund e Morgenstern (1977), a interface ar-água, também conhecida como membrana contrátil.

Ainda segundo Lopes (2006), a tensão superficial é a característica mais importante da membrana contrátil, ou seja, a possibilidade da mesma exercer uma tensão de tração nos materiais contíguos. Devido à ação dessa tensão, a interface ar-água comporta-se como uma membrana elástica. Para o caso da fase gasosa se

apresentar contínua, tal membrana interage com as partículas sólidas, influenciando o comportamento mecânico do solo.

O meio multifásico deixa de ser contínuo caso exista água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo. Assim, desde que se assuma que um fluido compressível preencha os poros, o solo não saturado pode ser analisado como um sistema bifásico, como os solos saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Um modelo simples, que se aproxima da lei de tensão efetiva é apresentado por Lee et al. (1983) e mostrado na Figura 2.3 a seguir. Esta figura mostra uma seção a partir de uma camada de solo, submetida a uma tensão total σ . Como o interesse são as condições de tensão no contato das partículas, considera-se o equilíbrio por meio de uma superfície de seção horizontalmente “ondulada” que se desenvolve através dos pontos de contato.

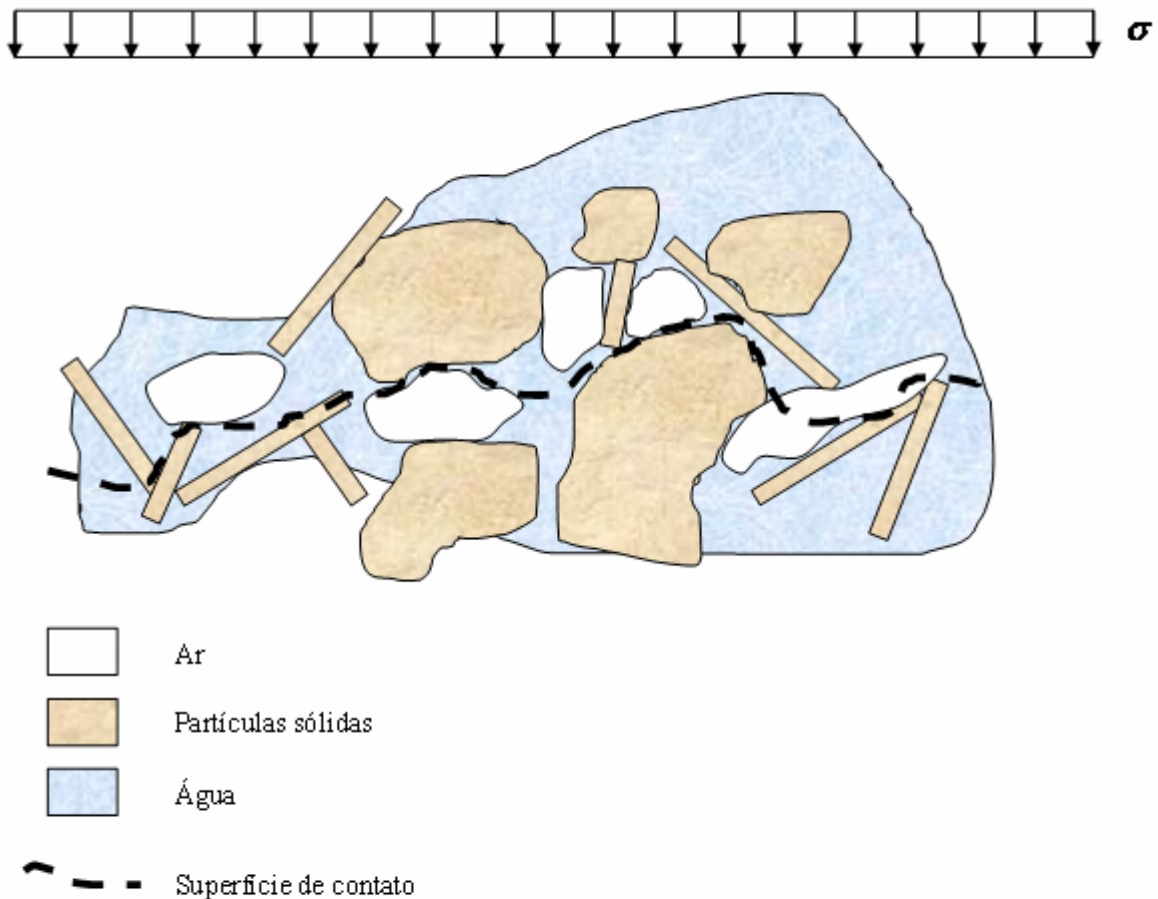


Figura 2.3 - Modelo de equilíbrio para solos não saturados (LEE et al., 1983).

Assim,

σ_s = tensão de contato entre os grãos;

A_s = área de contato dos grãos;

u_w = pressão da água;

u_a = pressão do ar;

A_w = área da superfície da água;

A_a = área da superfície do ar, sendo $A = A - A_s - A_w$; e

A = área total.

Para o equilíbrio, tem-se:

$$\sigma A = \sigma A_s + u_w A_w + u_a A_a \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$\sigma = \sigma_s \frac{A_s}{A} + u_w \frac{A_w}{A} + u_a \left(1 - \frac{A_s}{A} - \frac{A_w}{A} \right) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Considerando $\sigma' = \sigma_s A_s / A$ como tensão efetiva e, como reconhecidamente o termo $A_s / A \ll 1\%$, este pode ser desprezado, obtém-se:

$$\sigma = \sigma' + u_w \frac{A_w}{A} + u_a - u_a \frac{A_w}{A} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

ou

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

em que:

$\chi = \frac{A_w}{A}$ = porção da seção com água;

$(\sigma - u_a)$ = tensão normal líquida; e

$(u_a - u_w)$ = sucção mátrica.

A Eq.2.7 é a equação da tensão efetiva para solos não saturados, apresentada por Bishop (1955), o qual tinha como idéia básica reformular o princípio das tensões efetivas proposto por Terzaghi, por meio da inclusão de um parâmetro que representasse a influência da sucção na tensão efetiva dos solos (MACHADO e VILAR, 1998). Para um solo saturado, o parâmetro χ será igual a 1 e 0 para o caso de solo seco. Para o caso de solos não saturados, χ será função do grau de saturação e vários outros parâmetros, incluindo tamanho das partículas, forma, sucção, história de tensão etc.

A resistência de um solo pode ser descrita, a partir da equação de Bishop, incorporando essa equação no critério de resistência de Mohr-Coulomb. Assim:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)] \operatorname{tg} \phi' \quad (\text{Eq. 2.8})$$

em que:

- τ_f = resistência ao cisalhamento na ruptura;
- c' = intercepto da coesão efetiva; e
- ϕ' = ângulo de atrito efetivo.

Porém, dificuldades associadas à determinação experimental e teórica na determinação do parâmetro χ limitam a aplicabilidade da proposta de Bishop (LU e LIKOS, 2006). Embora apresente resultados satisfatórios na previsão da resistência ao cisalhamento do solo, a Eq. 2.8 mostra-se deficiente na previsão do comportamento volumétrico dos solos não saturados.

O caso de colapso, normalmente ocorrido quando alterada as condições de saturação de um solo, ou seja, deformações com diminuição da sucção, em que forças capilares aparecem imediatamente ao aumento da tensão ou por mudanças volumétricas, foi analisado por vários autores como Jennings e Burland (1962), Matyas e Radhakrishna (1968), Lu e Likos (2006). Estas observações introduziram o conceito de variáveis de estado, no qual o comportamento de solo não saturado deve ser avaliado por intermédio de variáveis de estado independentes.

A partir de considerações de Fredlund e Morgenstern (1977), a resistência ao cisalhamento de solos, considerando o estado de tensão variável, pode ser descrita como:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi^b \quad (\text{Eq. 2.9})$$

em que:

ϕ^b = taxa de ganho de ângulo de atrito do solo com relação à sucção matricial; e

c = coesão, que é equivalente a

$$c = c' + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \phi^b \quad (\text{Eq. 2.10})$$

O modelo acima considera um aumento da sucção mátrica linearmente ao acréscimo da resistência ao cisalhamento, mais especificamente ao acréscimo da coesão.

Fredlund e Morgenstern (1973) mostraram que o estado de tensão de um solo, e assim, seu comportamento geomecânico, pode ser completamente definido por uma combinação das três variáveis de estado:

- $(\sigma - u_a)$;
- $(\sigma - u_w)$; e
- $(u_a - u_w)$;

uma vez que mudanças na pressão de água afetam somente a segunda variável de estado, foi considerado o uso do primeiro e terceiro par de variáveis para sua formulação, ou seja, a tensão normal líquida e a sucção mátrica, respectivamente (MACHADO e VILAR, 1998).

A Eq. 2.9 pode ser visualizada por meio de um gráfico tridimensional (envoltória de Mohr-Coulomb modificada), tomando-se como abscissas as variáveis de estado de tensão. O círculo de tensões, que corresponde à condição de ruptura, pode ser representado em um diagrama tridimensional com as duas variáveis do estado de tensão representadas nos eixos horizontais e a resistência ao cisalhamento representada no eixo das ordenadas, como mostrado na Figura 2.4 a seguir.

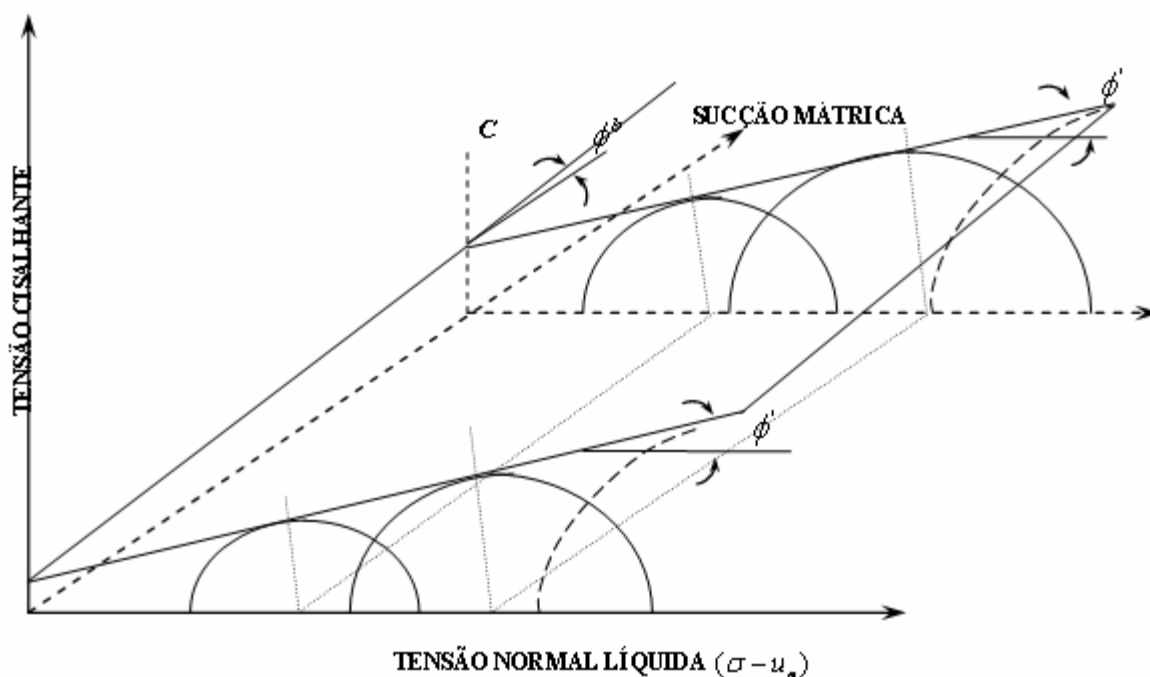


Figura 2.4 - Envoltória de Mohr-Coulomb modificada (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Diversos autores têm apresentado resultados de ensaios realizados com controle de sucção nos quais uma relação não linear entre resistência ao cisalhamento e sucção é obtida, entre eles Escario e Saez (1986, 1987), Delage et al. (1987), Fredlund et al. (1987), Escario e Jucá (1989), Gan et al. (1988), Abramento e Carvalho (1989), de Campos e Delgado (1995), Rohm e Vilar (1995), Futai et al. (2004), Soares (2005).

Escario (1988), a partir de ensaios com sucção controlada, ajusta os resultados experimentais e os relaciona com a sucção por meio de uma elipse. Abramento (1988) admite que a relação entre sucção mátrica e coesão pode ser representada por uma função exponencial com expoente menor que a unidade. Alonso et al. (1990) expandiu os conceitos de estado crítico para incluir a tensão volumétrica devido à sucção mátrica. Rohm (1992), a partir de ensaios triaxiais, admite uma relação hiperbólica entre a resistência ao cisalhamento e a sucção mátrica. Gallipoli et al. (2003) propuseram uma variável de tensão que depende do grau de saturação e da sucção mátrica para análises elasto-plástica. Heath et al. (2004) demonstraram

que é possível expandir a teoria clássica da mecânica dos solos e o conceito de tensões efetivas para descrever o comportamento tensão x deformação para material de pavimentos não saturados. Lu e Griffiths (2004) utilizaram os conceitos de sucção para modelar perfis próximos a depósitos não saturados sob condições de infiltração e evaporação.

As muitas formulações propostas de variação de τ e $(u_a - u_w)$, ou entre c e $(u_a - u_w)$, têm em comum o fato de apresentarem valores de ϕ^b decrescentes com a sucção mátrica aplicada, sendo que em algumas delas se verifica uma tendência de valor constante da resistência com a sucção.

Comparando-se as duas postulações apresentadas pelas Eq. 2.8 e Eq.2.9, apesar de serem conceitualmente diferentes mas conduzirem a equações de resistência equivalentes (de CAMPOS, 1997), se obtém a igualdade:

$$\chi = \frac{\text{tg } \phi^b}{\text{tg } \phi'} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Observa-se que esta equação sugere uma relação não proporcional entre coesão e sucção mátrica, uma vez que o parâmetro χ varia em função do grau de saturação do solo de forma não linear. Assim, admite-se que ϕ^b não é constante com relação à sucção mátrica.

A Figura 2.5 apresenta uma representação sugerida por de Campos (1997) para a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado, em que se admite um comportamento não linear da envoltória tridimensional.

Maiores detalhes e considerações podem ser encontrados nos trabalhos apresentados por Campos (1984), de Campos (1997) e Lopes (2006).

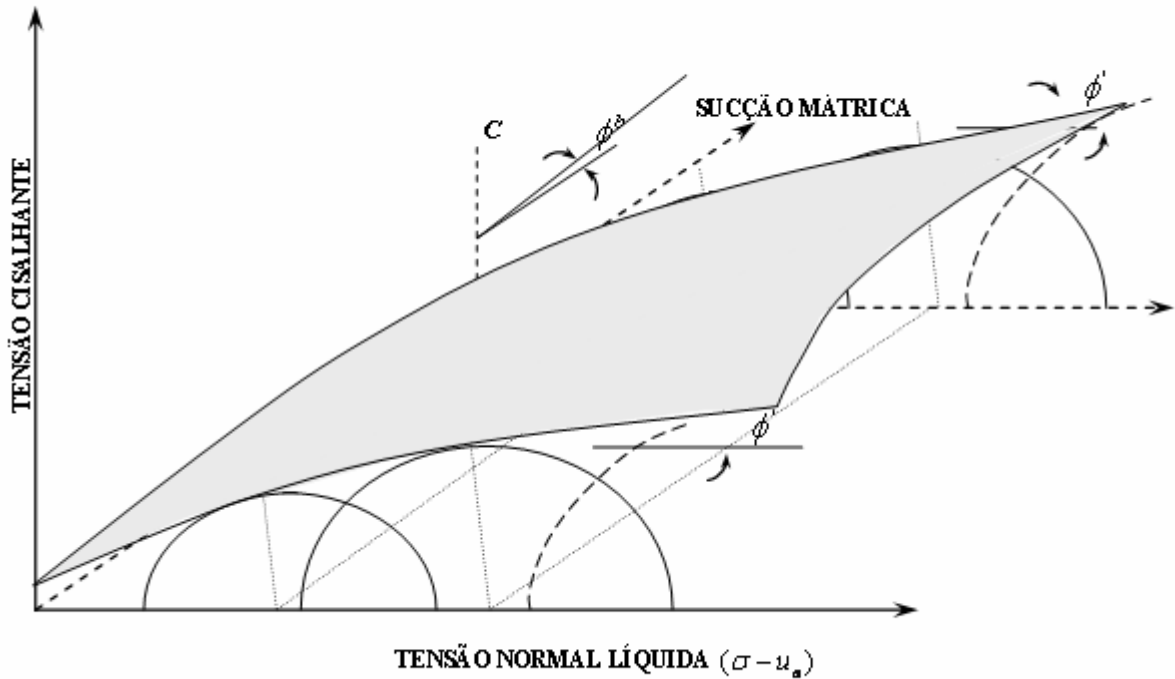


Figura 2.5 - Envoltória de resistência de um solo residual não saturado (de CAMPOS, 1997).

Outros autores apresentam trabalhos que relacionam a curva característica do solo com a formulação de resistência proposta pela Eq. 2.8, entre eles Öberg e Sällfors (1995, 1997) e Fredlund et al. (1995). A conceituação básica desses trabalhos está na relação da sucção mátrica de um solo com o seu grau de saturação (S_r) e a conseqüente influência na resistência ao cisalhamento. Assim, para valores de sucção menores que o valor de entrada de ar do solo, para os quais $S_r = 1$, têm-se que $\phi^b = \phi'$ (MACHADO e VILAR, 1998). A equação para representar a resistência do solo com a sucção, segundo Öberg e Sällfors (1997), para $u_a = S_r u_w$ e $S_r = \chi$, é a seguinte:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - S_r u_w) + S_r (u_a - u_w)] \operatorname{tg} \phi'$$

$$\tau_f = c' + [(\sigma - S_r u_w) + (S_r u_a - S_r u_w)] \operatorname{tg} \phi'$$

$$\tau_f = c' + [(\sigma - S_r u_w) - u_a (S_r - 1)] \operatorname{tg} \phi' \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Para a obtenção dos valores de u_a e S_r , Öberg e Sällfors (1995) sugerem a utilização da curva característica do solo. De acordo com Fredlund et al. (1995), valores de sucção superiores ao valor da entrada de ar do solo, implicam em menor contribuição da sucção na resistência com a dessaturação e resulta em uma variação não linear dessas duas componentes estudadas.

Vilar (2007) apresenta um método expedito para a previsão da tensão de cisalhamento para solos não saturados, descrito a seguir, que utiliza dados de amostras saturadas (parâmetros de tensão efetiva) e amostras secas ao ar, ou alternativamente, a partir de amostras ensaiadas com uma sucção maior que a esperada.

Usualmente são realizados ensaios triaxiais drenados, em que as pressões de ar e água são mantidas constantes durante todo o experimento, e ensaios de cisalhamento direto. Os resultados são analisados utilizando-se as abordagens de Bishop, 1955 (Eq. 2.8), ou a partir das variáveis independentes do estado de tensão, de Fredlund e Morgenstern (1977) (Eq. 2.9). Nesta linha, Vilar (2007) apresenta uma equação hiperbólica (Eq. 2.13) para representar a influência da sucção mátrica na resistência ao cisalhamento de alguns solos brasileiros.

$$c = c' + \frac{\psi}{a + b\psi} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

em que:

$$\begin{aligned} a \text{ e } b &= \text{parâmetros de ajuste; e} \\ \psi &= \text{sucção mátrica, } (u_a - u_w). \end{aligned}$$

A Eq. 2.13 foi aplicada em resultados de ensaios de muitos solos apresentados na literatura. Foram escolhidos solos que abrangessem uma grande extensão de características e condições de ensaios, como amostras indeformadas, compactadas, e ensaios de cisalhamento direto, triaxiais e ensaios de compressão com sucção controlada. A equação apresentou pequenas dispersões, ilustrando sua utilidade em representar os efeitos da sucção na resistência ao cisalhamento de solos não saturados.

A Figura 2.6 mostra um esquema da função hiperbólica para representar a variação da tensão de cisalhamento com relação à sucção e sua ligação com a curva característica do solo

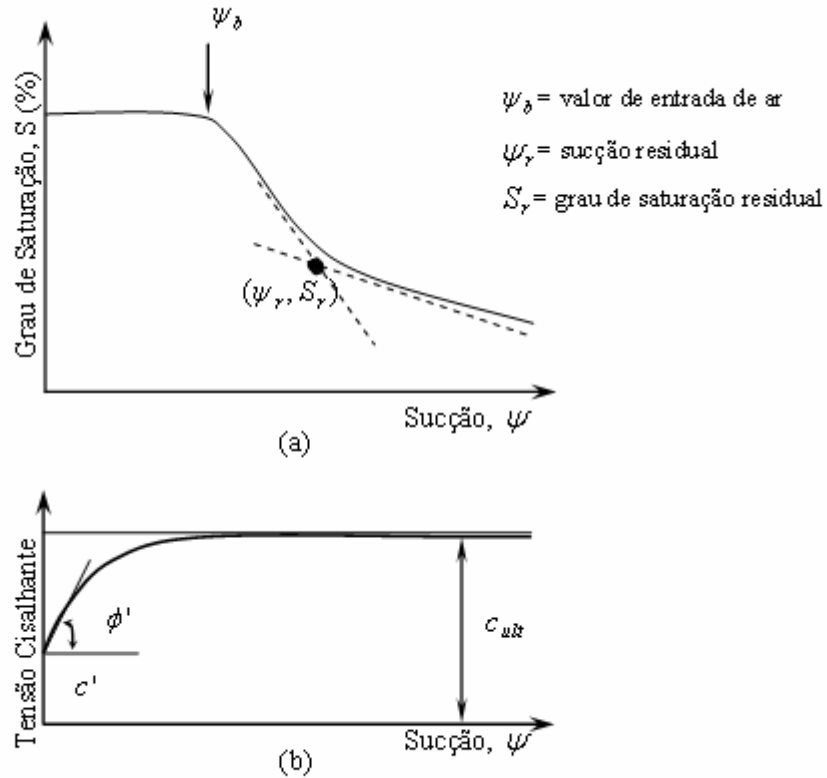


Figura 2.6 - (a) Curva característica do solo - típica, (b) função hiperbólica e condições consideradas para a obtenção dos parâmetros a e b (VILAR, 2007).

Admite-se que abaixo do valor de entrada do ar, o solo continua saturado e o princípio da tensão efetiva permanece válido. Se a Eq. 2.9 for considerada, para o estado saturado, $\phi^b = \phi'$. A metodologia proposta considera que a relação entre c e ψ , com ψ tendendo a zero, é igual a $tg \phi'$, ou seja:

$$\left. \frac{dc}{d\psi} \right|_{\psi \rightarrow 0} = \frac{1}{a} = tg \phi' \quad (\text{Eq. 2.14})$$

quando a sucção aumenta, o solo começa a dessaturação e muitos dos resultados publicados mostram um acréscimo na resistência ao cisalhamento até atingir a sucção mátrica máxima. Em seguida, na maioria dos solos, a resistência ao

cisalhamento permanece quase constante. Assim a metodologia admite que a resistência ao cisalhamento atinja um valor residual, em todos os casos, ou seja, c_{ult} ou τ_{ult} , expresso pela Eq. 2.15.

$$\lim_{\psi \rightarrow \infty} c = c_{ult} = c' + \frac{1}{b} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

ou

$$b = \frac{1}{c_{ult} - c'} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

Portanto, se os parâmetros efetivos de resistência saturados e residuais são conhecidos, os valores de a e b podem ser obtidos e a tensão de cisalhamento não saturada estimada a partir da equação hiperbólica proposta (Eq. 2.13).

Vilar (2007) assume ainda duas hipóteses de interesse prático para a sua proposição.

A primeira consideração admite que, quando o solo se aproxima da dessaturação, a migração da água se torna muito difícil, sendo comandada pelo fluxo de vapor. Torna-se razoável admitir que, em amostras sob estas condições, a variação da sucção mátrica durante o cisalhamento não irá produzir mudanças significativas nas propriedades mecânicas, como na resistência. Uma vez que a proposta apresentada pode ser desenvolvida a partir da consideração de coesão residual não saturada, por meio da Eq. 2.16, sugere-se ensaiar amostras secas ao ar, para determinar a coesão residual. O autor mostra várias verificações, a partir de dados apresentados por pesquisadores como Escario (1988) e Futai (2002) e confirma o bom desempenho da metodologia proposta. Ressalta que, para este caso, o maior valor da sucção utilizada no ensaio era assumido como o valor para a condição residual.

A segunda consideração pondera que muitos resultados apresentados na literatura foram obtidos a partir de solos ensaiados com valores limitados para a sucção e ainda assim apresentaram uma tendência ao acréscimo da resistência. Portanto, é bem provável que a resistência residual não tenha sido alcançada. Neste caso, o parâmetro b deverá ser obtido a partir da expressão:

$$b = \frac{1}{c_m - c} - \frac{a}{\psi_m} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

em que:

c_m = medida máxima obtida para a coesão;

τ_m = medida máxima obtida para a tensão de cisalhamento; e

ψ_m = máximo valor para a sucção mátrica.

substituindo a da Eq. 2.14, tem-se:

$$b = \frac{1}{c_m - c} - \frac{1}{\psi_m \operatorname{tg} \phi'} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

O uso das Eq. 2.13, 2.14 e 2.18 fornecem os parâmetros necessários para a estimativa da tensão de cisalhamento. Também foram desenvolvidas e apresentadas várias verificações a fim de se comparar os bons resultados obtidos.

Segundo o autor, a metodologia apresenta algumas limitações, como:

- para o caso de alguns solos granulares que têm diminuição da resistência depois de obtido um valor máximo; e
- para o caso de solos lateríticos, que apresentem ϕ^b maiores que ϕ' .

Ressalta-se que esta metodologia apresentada será considerada para a avaliação da resistência não saturada no Capítulo 6.

2.3 Importância da Sucção no Estudo da Estabilidade de Solos Não Saturados

A ação da água, em taludes de solos residuais, tem função decisiva nos mecanismos que influenciam a sua estabilidade. A água pode alterar a geometria a partir do desenvolvimento de erosões, atua como fator determinante nos processos de intemperismo e altera o comportamento dos solos não saturados, por meio da variação das pressões desenvolvidas.

Diversos autores têm apresentado estudos que consideram a relação estabilidade, saturação e processo de evaporação de taludes, entre eles Campos (1984), Lim et al. (1996), Gasmo et al. (1999), Luis (1999) e Babu e Mukesh (2003).

Ignacius (1991), apresenta um estudo em que exemplifica a redução do fator de segurança em função da redução da sucção. A Figura 2.7 apresenta os resultados obtidos por ele em análises de estabilidade de taludes envolvendo condições de rupturas rasas, com aproximadamente 1,0m de profundidade, planares, em solos não saturados da Serra do Mar, na região de Cubatão, São Paulo.

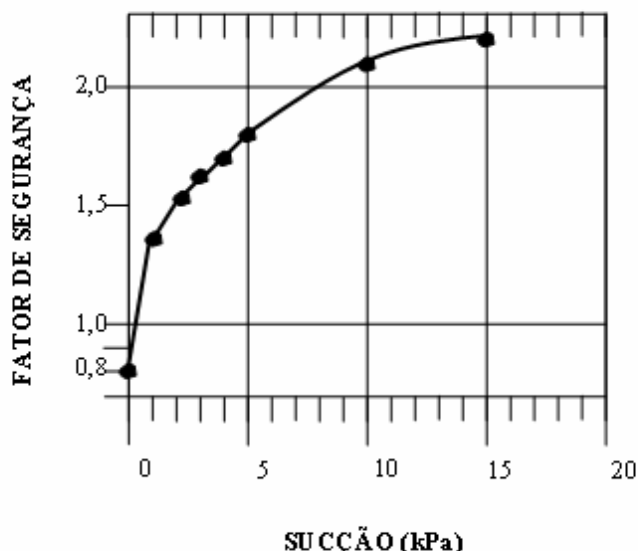


Figura 2.7 - Variação do fator de segurança de uma encosta não saturada em função da sucção (IGNACIUS et al., 1991), apud SOARES, 2005.

Mesmo para as análises que focam os conceitos probabilísticos em estabilidade de taludes, os aspectos de sucção e os efeitos das incertezas devido à variabilidade dos parâmetros dos solos não saturados também têm sido analisados por vários autores, entre eles Finlay e Fell (1997), com estudos na Austrália e Hong Kong, Tuncay e Ulusay (2001), taludes de mineração a noroeste da Turquia, e Babu e Mukesh (2003) e Babu e Murthy (2005) na região do Himalaia.

Rahhal et al. (2003), apresentaram um trabalho em que são analisados cinco grandes deslizamentos ocorridos no Líbano, com o objetivo de entender os fatores que provocaram a instabilidade e desenvolver uma análise probabilística, mesmo considerando que cada deslizamento possuía características próprias que causaram a ruptura.

Soares (1996) apresenta um estudo probabilístico, também para análise de um deslizamento, ocorrido no Quadrilátero Ferrífero, e considera como sendo prática

cotidiana em análise de estabilidade de taludes de mineração a utilização de métodos determinísticos e seus resultados expressos em termos de fatores de segurança. Porém, tendo em vista a natureza do material estudado, sua anisotropia e heterogeneidade, torna-se de maior interesse a utilização também, de forma isolada ou conjunta, dos métodos probabilísticos.

Maiores detalhes e considerações sobre abordagem probabilística e análise de confiabilidade podem ser encontrados em Neves (1994) e Hong e Lo (2002).

Como mencionado anteriormente, análises de estabilidade de taludes que abordam os conceitos determinísticos, considerados no presente estudo, têm se tornado ferramenta analítica comum para a avaliação do fator de segurança e do risco associado à sua ruptura. Qualquer um dos numerosos métodos bidimensionais são normalmente empregados na prática. Esses métodos basearam-se nos princípios da estática, ou seja, equilíbrio estático de forças e/ou momentos. Diversas considerações básicas e princípios utilizados nas formulações dessas análises de equilíbrio limite são delineados previamente a fim de derivar as equações gerais para os fatores de segurança.

Na prática, parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento são geralmente utilizados mesmo quando as análises de estabilidade são desenvolvidas para solos não saturados. As contribuições na resistência ao cisalhamento que provêm da sucção acima da linha freática normalmente são desprezadas. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), as dificuldades associadas à quantificação da sucção e sua incorporação dentro das análises de estabilidade seriam as principais razões para esta prática. Talvez uma hipótese razoável para se ignorar as poro-pressões negativas seja em situações onde a maior parcela da superfície de ruptura esteja localizada abaixo do nível de água. Entretanto, para situações em que o nível de água é profundo ou em que o interesse é a possibilidade de superfícies de rupturas profundas, as parcelas referentes à sucção não devem ser ignoradas.

2.4 Mecanismos de Ruptura em Taludes

Atualmente, considera-se que os escorregamentos ocorridos em solos residuais em épocas de chuvas se desenvolvem pela perda da sucção com conseqüente redução da resistência ao cisalhamento e não com o aparecimento de

pressões neutras positivas provenientes de redes de percolação, como eram analisados há alguns anos atrás.

Campos (1984), destaca que muitos escorregamentos estudados em taludes naturais, de solos residuais de granito e gnaiss, apresentavam o nível freático abaixo da superfície de ruptura não podendo, portanto, serem analisados pelo mecanismo de pressão neutra positiva. Nesta linha de pesquisa, Morgenstern (1975) apresenta uma proposição em que a instabilização de um solo é provocada pela redução da resistência ao cisalhamento associada à sua saturação. Considera, neste caso, o fluxo de água definido pela infiltração e que o deslizamento ocorre ao longo da superfície determinada pela frente de saturação.

Nas obras e projetos que têm por objetivo estabilizar taludes, o conhecimento dos mecanismos que conduzem à sua instabilização é de fundamental importância, uma vez que sistemas de drenagem e contenções, frequentemente utilizados em situações com presença de pressão neutra positiva, seriam ineficazes onde o mecanismo que provoca o escorregamento seja a redução da sucção.

Os mecanismos de instabilização são descritos por Campos (1984) e considera que, antes do início da estação das chuvas, taludes de solos residuais apresentam grau de saturação entre 40% e 60%, apresentando-se estáveis e não saturados, com condutividade hidráulica que varia com o teor de umidade. Observa-se que, no caso de solos não saturados, a condutividade hidráulica representa a velocidade de avanço da água sendo aumentada em função do acréscimo do grau de saturação. Para o solo saturado, a condutividade hidráulica coincide com a permeabilidade do solo.

A camada superior de solo atingida pela chuva absorve a água, com conseqüente saturação e aumento da condutividade hidráulica. A partir daí, há o avanço da zona saturada, denominada frente de saturação, que depende do grau de saturação inicial, ou seja, antes da infiltração, do seu índice de vazios e da intensidade e tempo de ocorrência da chuva.

Um avanço mais rápido da frente de saturação ocorrerá no caso de nova chuva com a mesma intensidade, por encontrar o solo com maior teor de umidade e conseqüente maior condutividade hidráulica. Assim, durante as épocas de chuvas acontece um contínuo e gradual aumento do grau de saturação, com avanços mais rápidos da frente de saturação e, assim, com maiores riscos de deslizamentos.

Geralmente o deslizamento causado pela situação descrita é superficial, uma vez que a perda de resistência acontece paralela à geometria do terreno. Malone e Shelton (1982) relataram resultados de estudos de escorregamentos de taludes em Hong Kong em que 70% apresentavam uma relação entre profundidade e comprimento de massa escorregada da ordem de 0,05 a 0,25. Essa relação foi ratificada através de observações de escorregamentos em taludes em regiões próximas à cidade do Rio de Janeiro, considerando a semelhança dos solos entre os dois locais (CAMPOS, 1984).

Para autores com Lumb (1962), a análise do modelo de infiltração em solos homogêneos sugere que a quantidade de água infiltrada não é suficiente para saturar um manto espesso de solo, sendo o efeito da precipitação restrito aos seis primeiros metros.

Ressalta-se que nos casos de maciços heterogêneos ou que apresentem descontinuidades, o avanço da frente de saturação não será paralelo à superfície do terreno, com isso haverá um perfil irregular da região sujeita ao deslizamento.

Atualmente, um melhor entendimento do desempenho da sucção no aumento da resistência ao cisalhamento dos solos tem se desenvolvido, como mostrado nos itens anteriores. Pesquisas recentes têm conduzido a vários dispositivos capazes de permitir medidas mais eficientes da sucção. Desta forma, as análises de estabilidade de taludes que incluam a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento são, hoje em dia, as apropriadas. Estes tipos de análises são uma extensão das convencionais análises de equilíbrio limite. A importância de se dispor de ferramentas apropriadas para análises de estabilidade, ao lado do conhecimento técnico dos condicionantes geológico-geotécnicos, que podem impor formas particulares de comportamento ao maciço, é um ponto inquestionável na análise de estabilidade de taludes (SOARES, 1996).

Ressalta-se que vários aspectos de um estudo de estabilidade de taludes permanecem os mesmos para solos saturados e não saturados. Por exemplo, as investigações de campo e a correta interpretação e definição do perfil geológico-geotécnico. Por outro lado, complementações nos ensaios convencionais são necessárias com respeito à caracterização das propriedades referentes à resistência ao cisalhamento dos solos. As ferramentas analíticas utilizadas para incorporar a sucção e calcular os fatores de segurança também necessitam de adequações.