

Estabilidade de Taludes em Solo

Introdução

Conceitos Básicos e Parâmetros

Fernando A. M. Marinho
2019

Por que as Coisas Caem?

Devido a força da gravidade.
As coisas sempre caíram e vão continuar caindo.



Anúbis pesando o coração de uma sacerdotisa. O órgão é colocado no prato da esquerda, enquanto no prato da direita tem-se a representação da verdade.

A “Gravidade” dos Fatos



Santa Catarina 2008

A “Gravidade” dos Fatos



Santa Catarina 2008

A “Gravidade” dos Fatos



Andrade/Folha imagens



Roosevelt Pinheiros/ABR

Angra dos Reis 2010

Consequências



- F.S. próximo de 1 após a ruptura
- F.S. aumenta com o tempo, mas depende das condições ambientais



Consequências



Consequências



Benedito Novo – Rio das Antas



Consequências



Vegetação Natural e Ambiente modificado pelo Homem



Sem entrar na "mata" não se percebe as rupturas.



Consequências



Consequências



Como atuar na reconstrução?



Consequências



Consequências



Como atuar na reconstrução?

A “Gravidade” dos Fatos

1. Grande parte dos conhecimentos que adquirimos vem de experiências com acidentes.
2. Os métodos de análise que iremos usar devem estar associado a nossa experiência com eles e não apenas com suas características teórico/científicas.
3. Problemas com taludes podem sempre ser diferentes. Sempre teremos o que aprender com os novos casos.
4. Nem sempre o aparente refinamento de uma análise pode nos levar a uma correta avaliação.
5. Os métodos de análise baseados na experiência devem sempre serem reavaliados.
6. É fundamental se entender os agentes de instabilização.
7. A compreensão destes agentes permitirá: um melhor projeto e método construtivo e possibilitará a solução de eventuais rupturas.

Uma constatação

“O requerimento fundamental para a estabilidade de taludes é:

A resistência ao cisalhamento do solo deve ser maior do que resistência ao cisalhamento necessária ao equilíbrio.”

Como induzir uma instabilidade?

Reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo ou aumentando as tensões cisalhantes.

Fator de Segurança

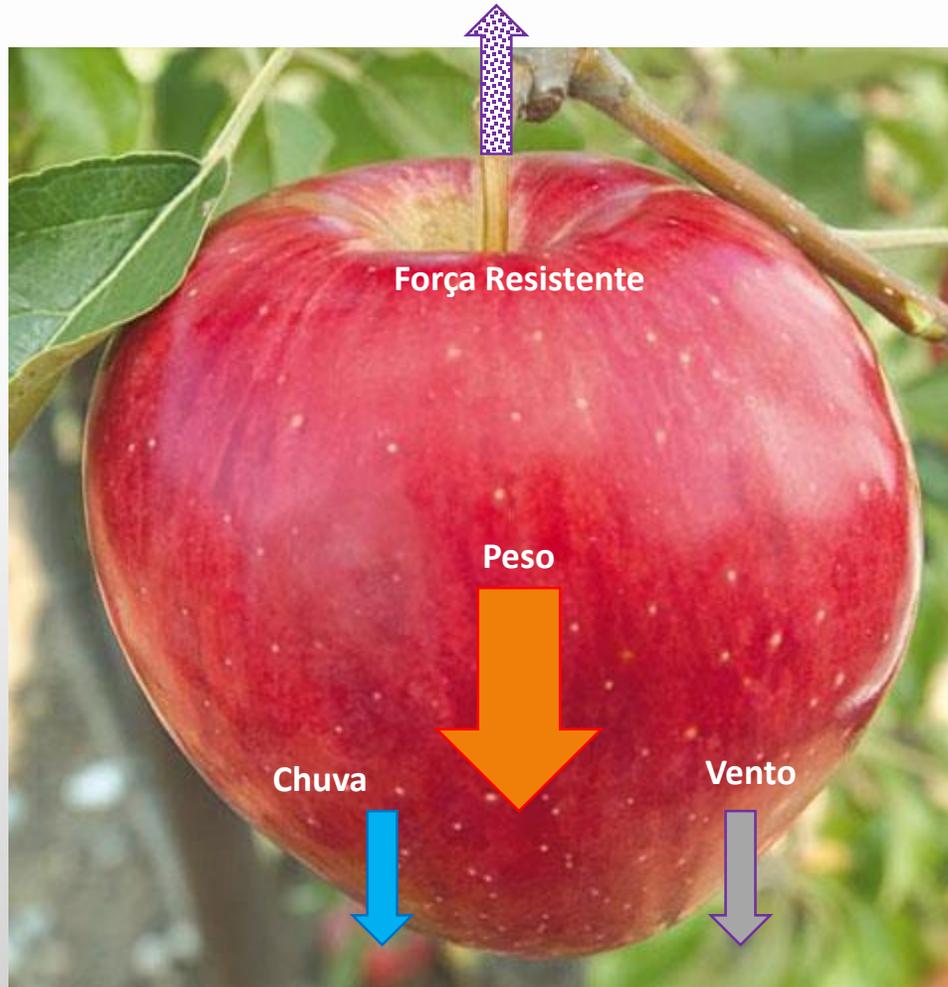
$$FS = \frac{s}{\tau}$$

s ← Resistência ao cisalhamento disponível

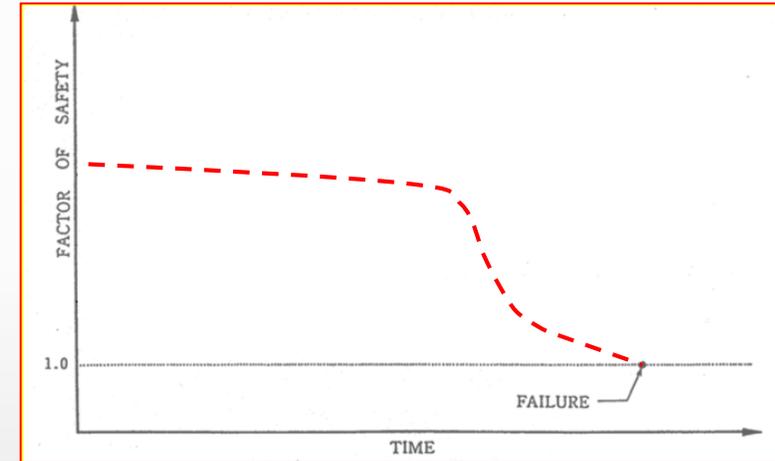
τ ← Resistência ao cisalhamento de equilíbrio

$$\text{se } \tau = s \Rightarrow FS = 1$$

Por que as coisas caem?
Por que as coisas não caem?
Quando as coisas vão cair?



Se a força resistente = peso \Rightarrow Fator de Segurança = 1



Redução da Resistência ao Cisalhamento

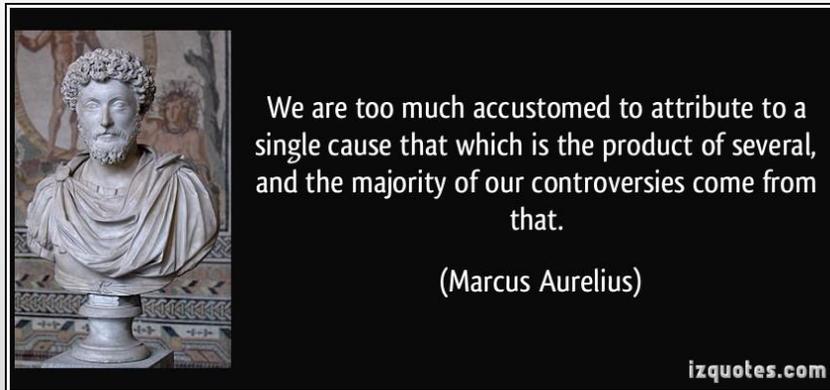
1. Aumento da pressão da água dos poros
2. Trincas
3. Expansão
4. "Slickensides"
5. Creep
6. Lixiviação
7. Intemperização
8. Carga cíclica

Aumento da tensão Cisalhante

1. Carga no topo do talude.
2. Pressão de água em trincas no topo do talude.
3. Aumento do peso do solo devido ao aumento do teor de umidade.
4. Escavação no pé do talude.
5. Redução da água sobre a superfície do talude no pé.
6. Terremoto

“Conclusões sobre as Causas de uma Ruptura”

O evento B aconteceu imediatamente após o evento A.
Logo, o evento A é a causa do evento B.

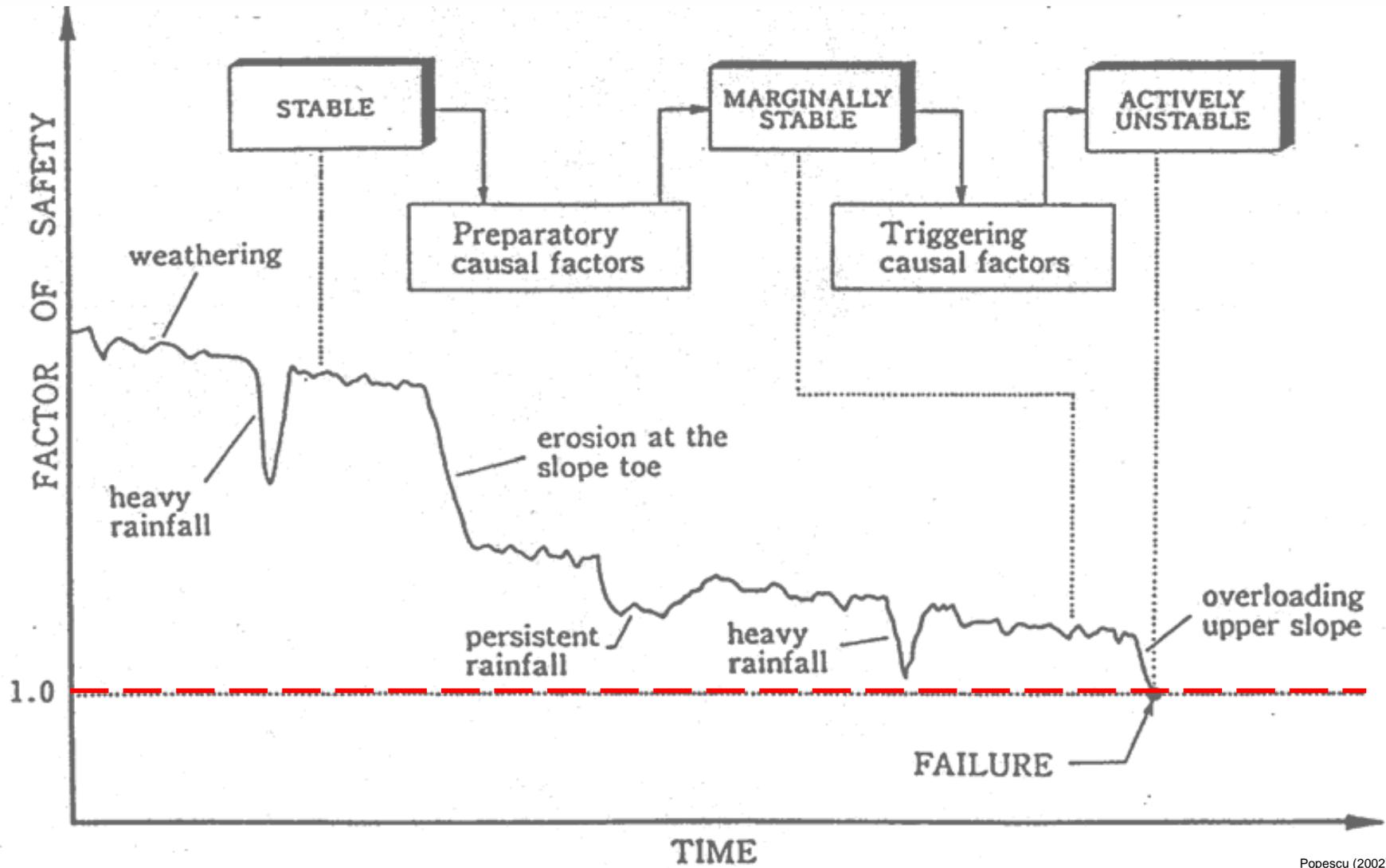


Causa Única x Várias Causas

Degradação do FS com o tempo

“Calling the final factor the cause is like calling the match that lit the fuse that detonated the dynamite that destroyed the building the cause of the disaster”

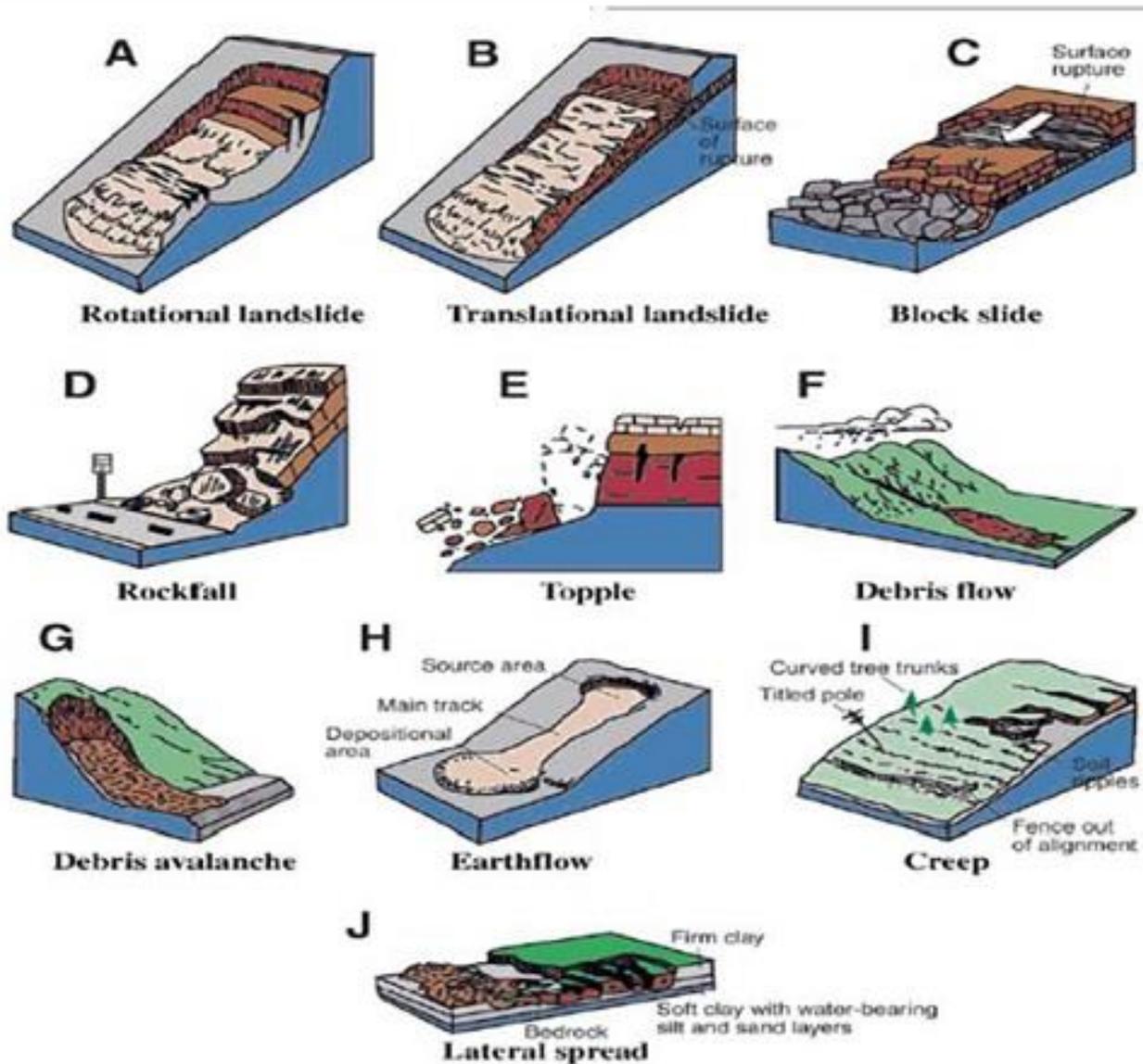
Sowers (1979).





**A Natureza Trabalha com um Fator de
Segurança Pouco Acima de 1**

Mecanismos de Ruptura



Combinação de Fatores

Chuva

Inclinação

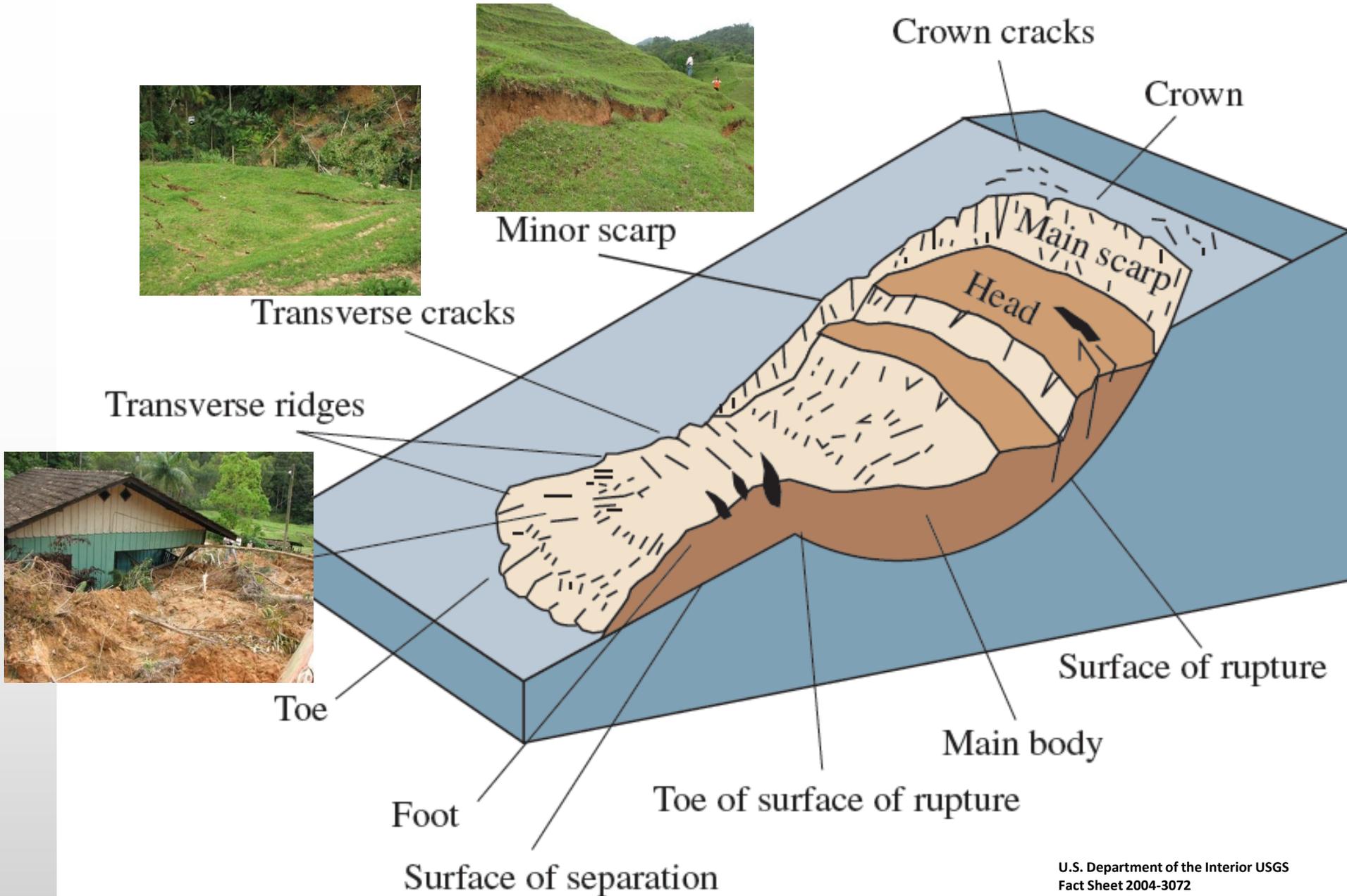
Declividade

Área da bacia

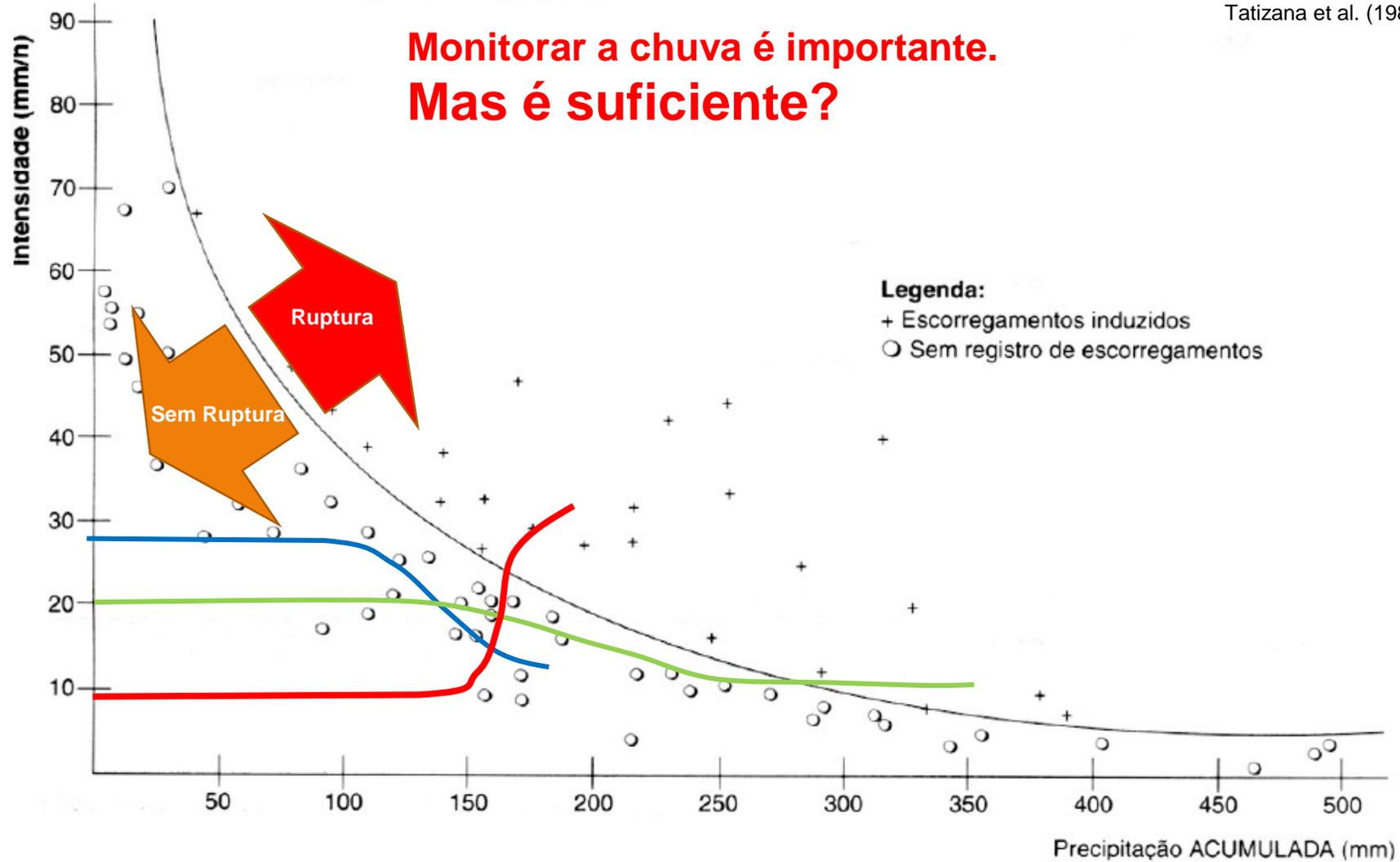
Altura da encosta

Uso e ocupação

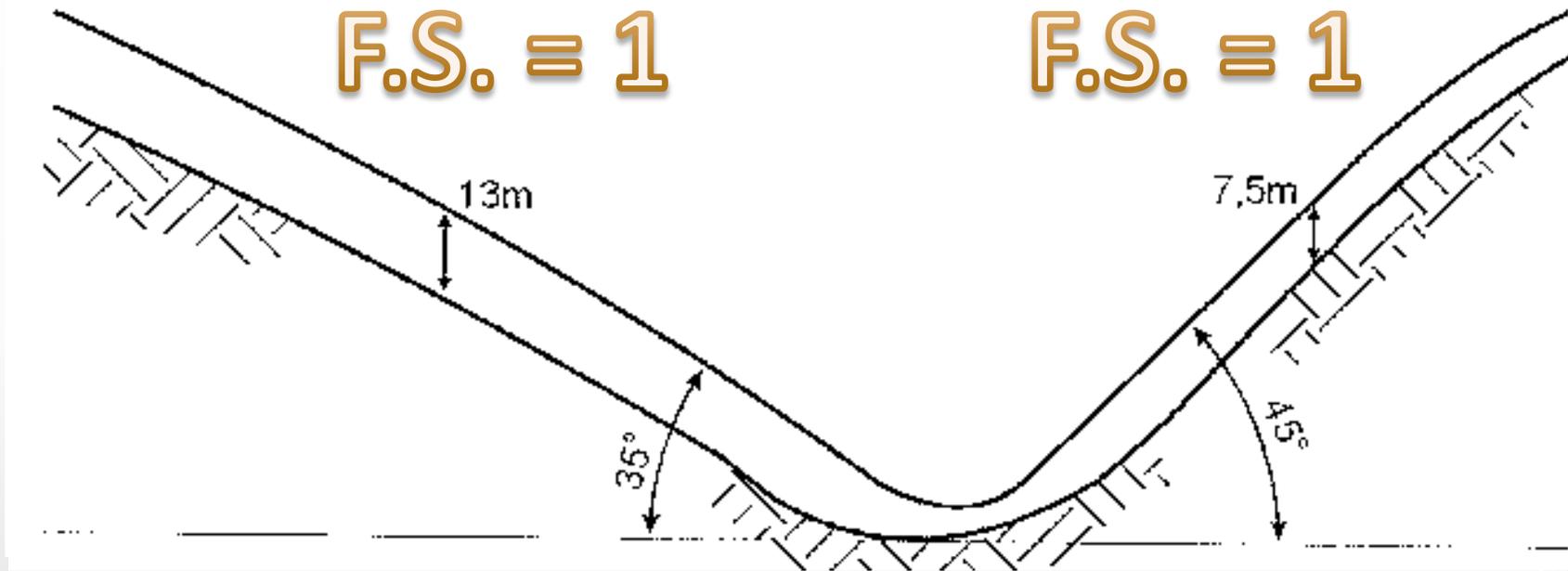
Aspectos geológicos e Geotécnicos



Monitorar a chuva é importante. Mas é suficiente?



Qual o talude mais estável?



Massad (2003)

$$F.S. = \frac{2c'}{\gamma H \sin 2\alpha} + \frac{\text{tg}\phi'}{\text{tg}\alpha}$$

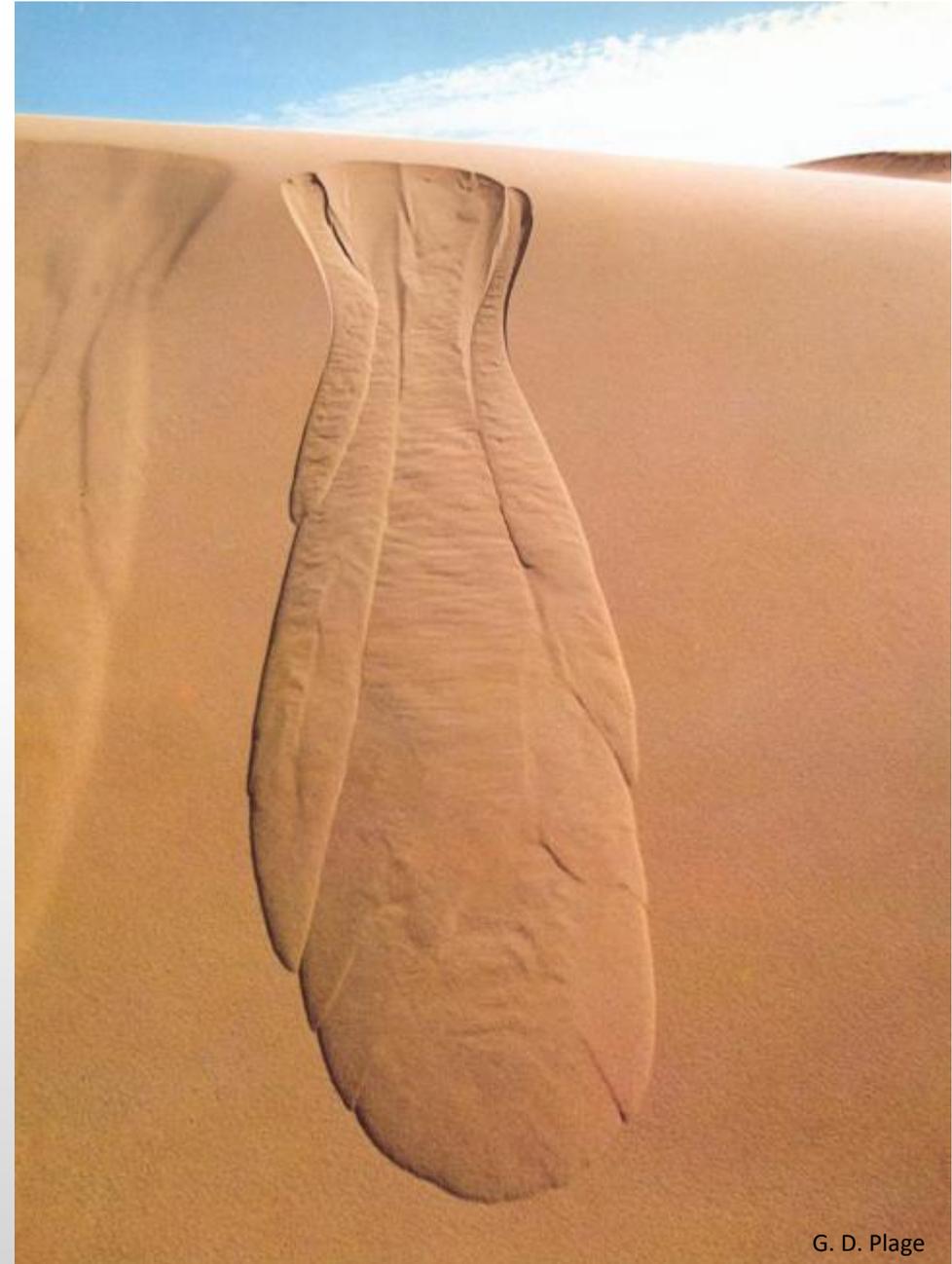
Princípios de Mecânica dos Solos

Para se obter um bom projeto ou uma análise de ruptura adequada é necessário se ter uma correta compressão do problema, e o mesmo deve ser adequadamente formulado.

Para que estas simples condições sejam atendidas é necessário:

- Conhecer profundamente os princípios de mecânica dos solos
- Conhecer a geologia e as condições do local
- Conhecer as propriedades dos solos do local

Escorregamento de areia seca



Princípios de Mecânica dos Solos

Condição Drenada e Não Drenada

Drenado

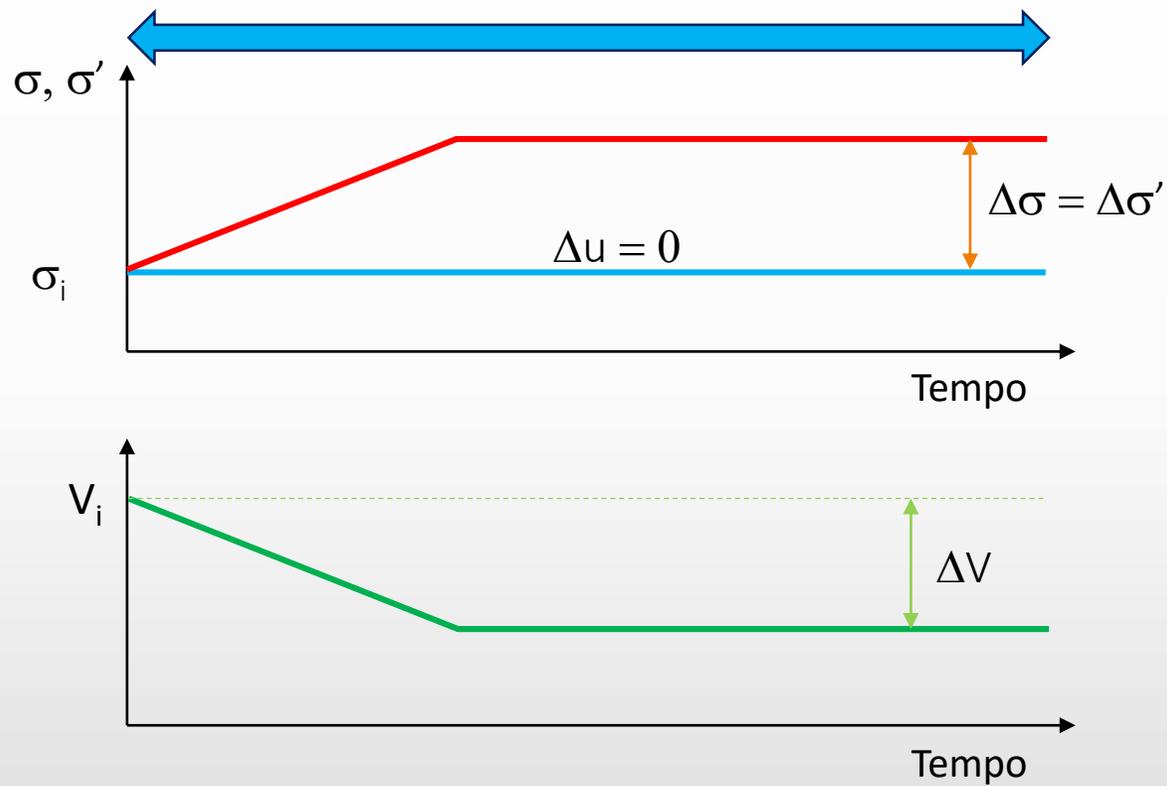
- A água flui livremente para dentro ou para fora do solo como resposta a algum carregamento ou descarregamento.
- Na condição drenada uma alteração na carga não causa nenhuma mudança na pressão da água.

Não Drenado

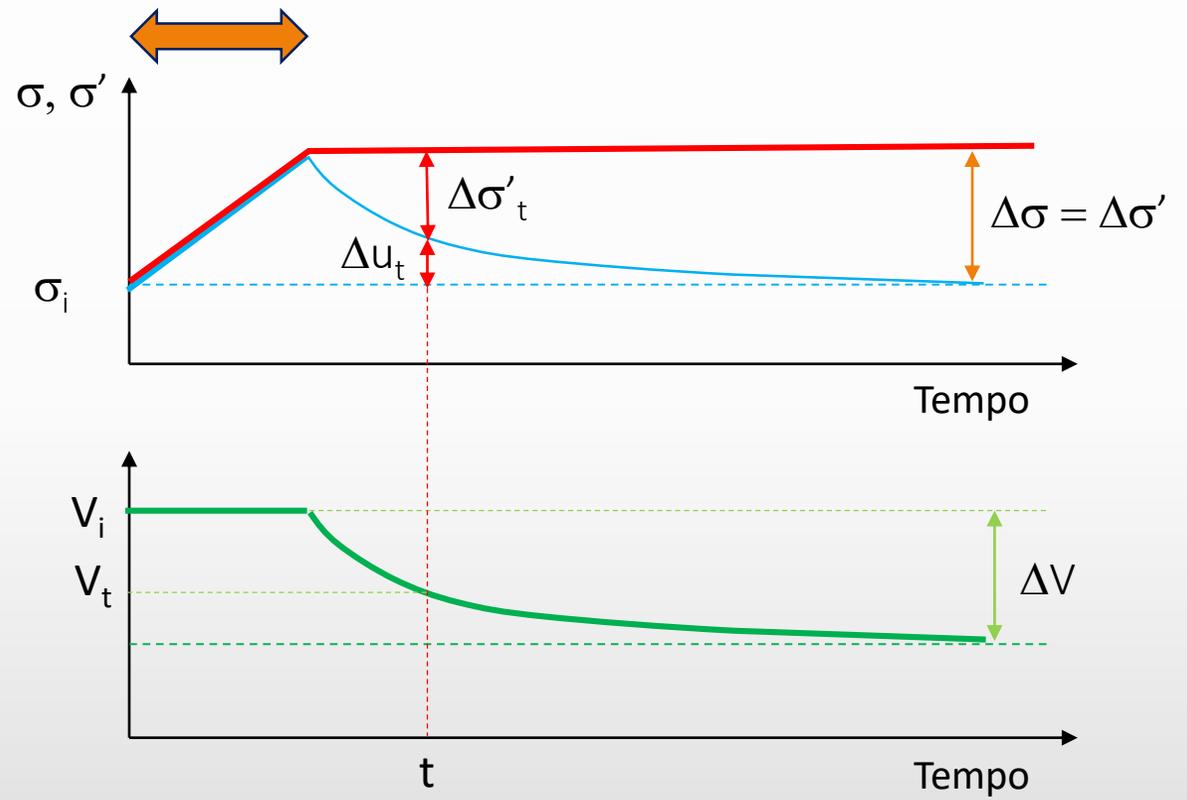
- A água flui nem para dentro nem para fora do solo como resposta a carregamento ou descarregamento.
- Na condição não drenada uma alteração na carga causa mudança na pressão da água já que não há possibilidade da água se mover na tão rápido quanto o solo é carregado ou descarregado.

Princípios de Mecânica dos Solos

Condição Drenada



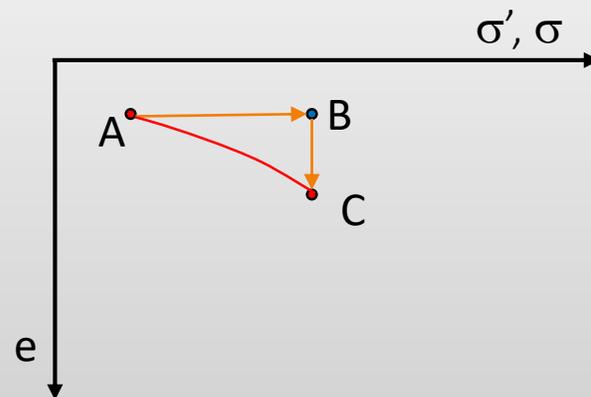
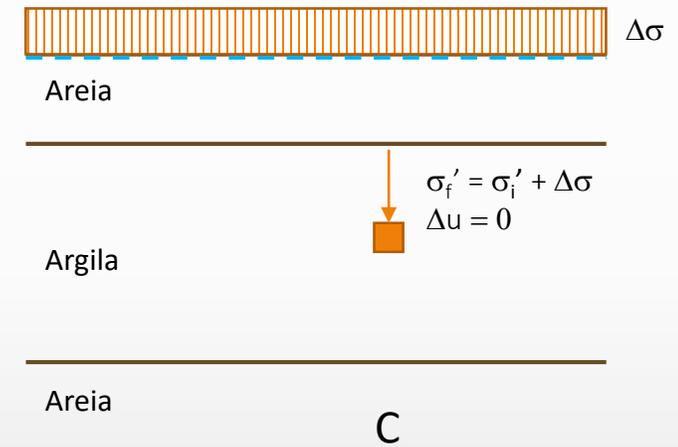
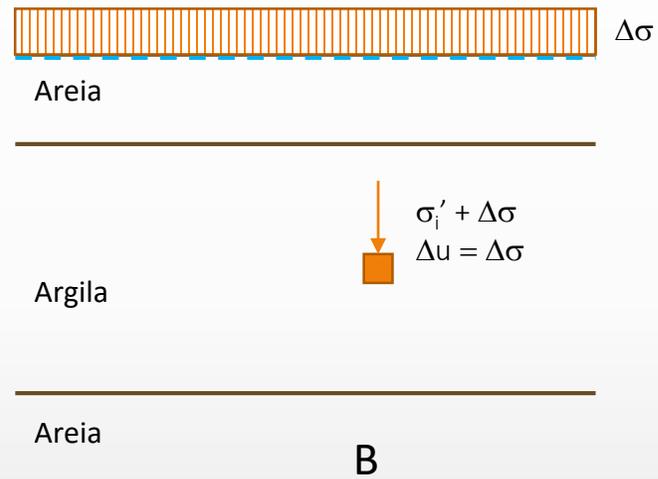
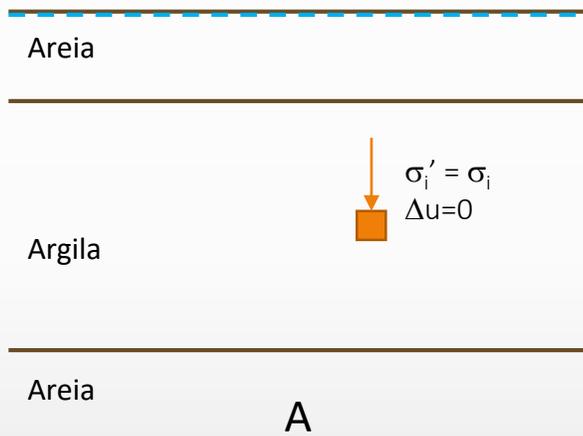
Condição Não Drenada



Princípios de Mecânica dos Solos

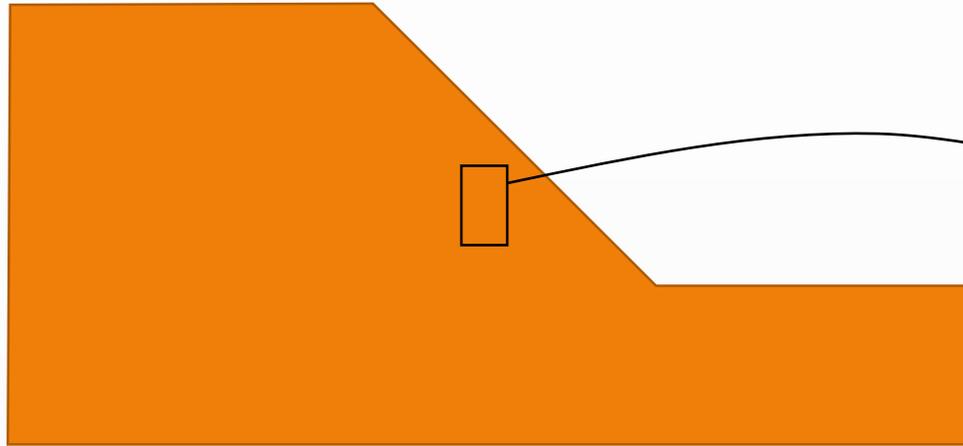
Princípio das tensões efetivas

$$\sigma' = \sigma - u$$

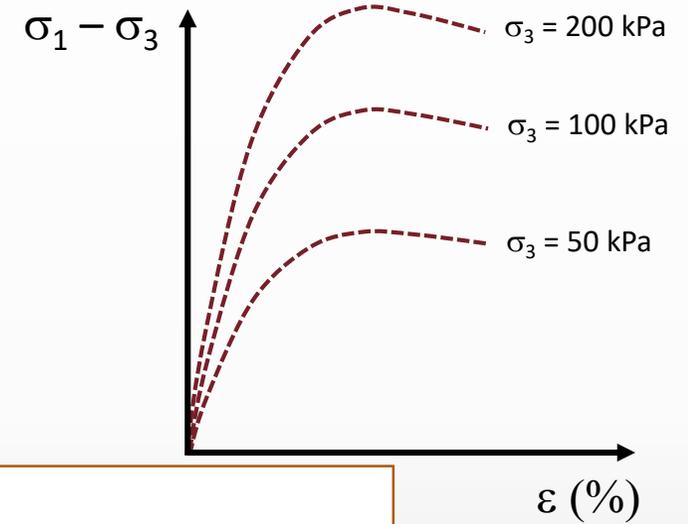
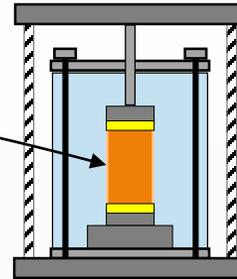


Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento



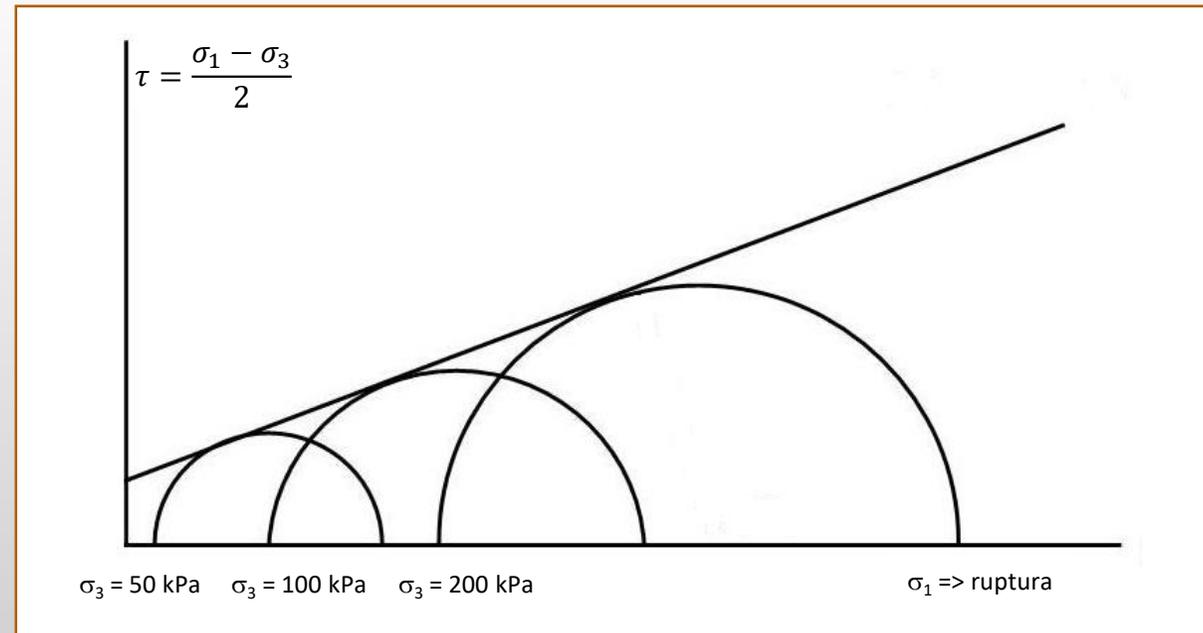
Ensaio triaxial



Força cisalhante

Tensão cisalhante $\tau = \frac{T}{A}$

Área



Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

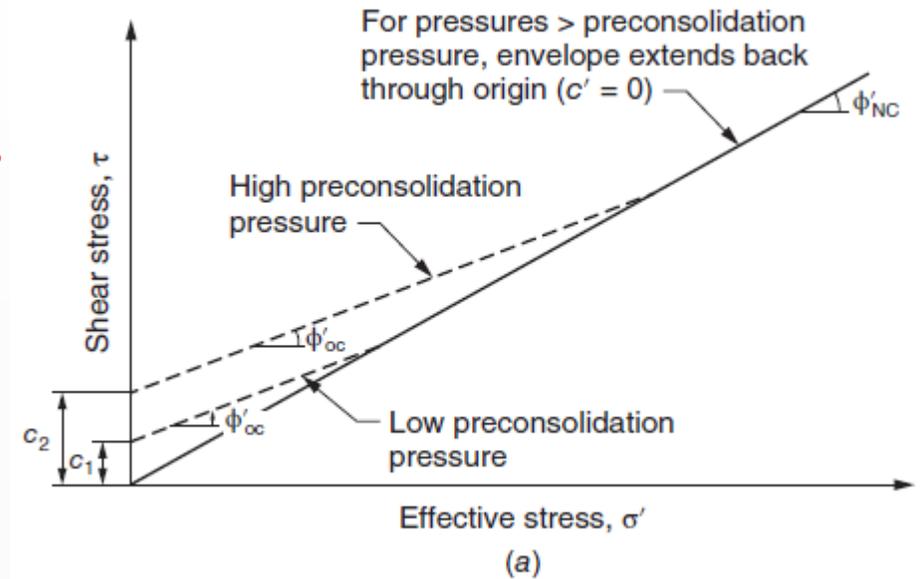
Os fatores mais importante na definição da magnitude da resistência ao cisalhamento são:

- Forças de contato entre partículas (depende da tensão efetiva)
- Densidade do solo

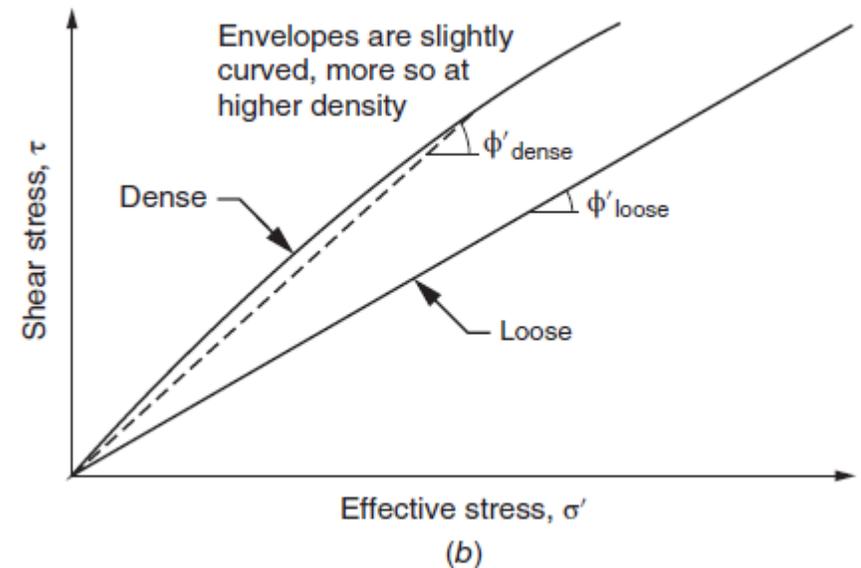
Equação da envoltória de resistência

$$s = c' + \sigma'_r \tan \phi'$$

Argilas



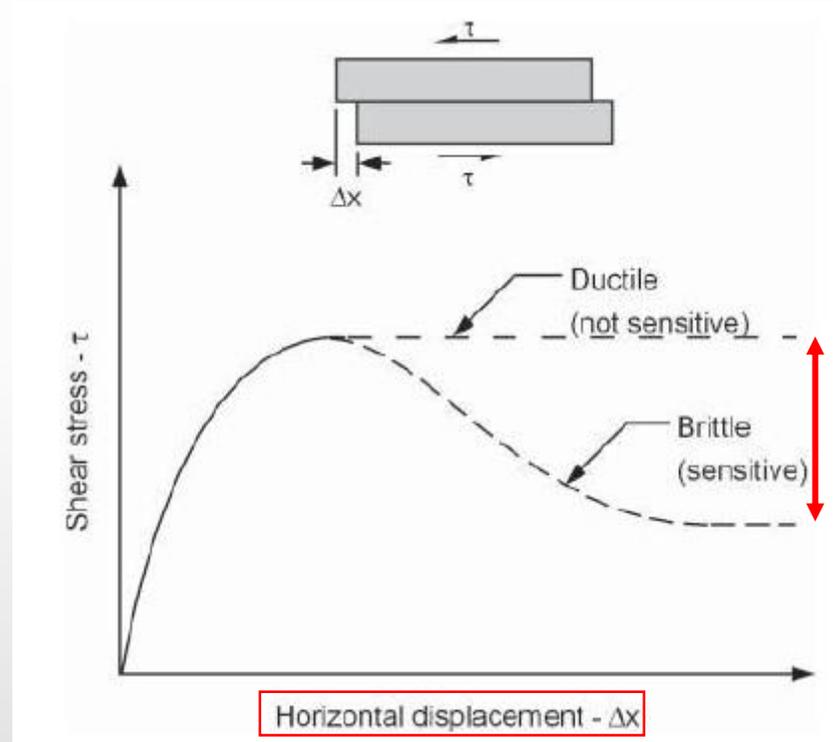
Areias



Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

Ensaio de cisalhamento direto



- A resistência do solo é mobilizada pelo deslocamento.
- Um maior deslocamento pode induzir uma redução na resistência.

Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

Resistência Drenada

- É a resistência do solo quando ele é carregado de forma que não haja indução de excesso de pressão de água. Ou quando o excesso é drenado com o tempo.

Variação de volume durante uma solitação drenada

- Durante o processo de cisalhamento o solo pode comprimir ou dilatar.
- Isto depende da tensão efetiva e da densidade do solo.
- Solos com maior densidade tendem a aumentar o volume (dilatar).
- Quando submetidos a uma tensão efetiva elevada a uma tendência a restringir a dilatação.
- Solos com baixa densidade tendem a diminuir de volume (contrair).
- Quanto maior a tensão efetiva em solos pouco denso maior a compressão durante o cisalhamento.
- Nas argilas a densidade é governada pela máxima tensão efetiva que o solo esteve sujeito (tensão de pré-adensamento).

Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

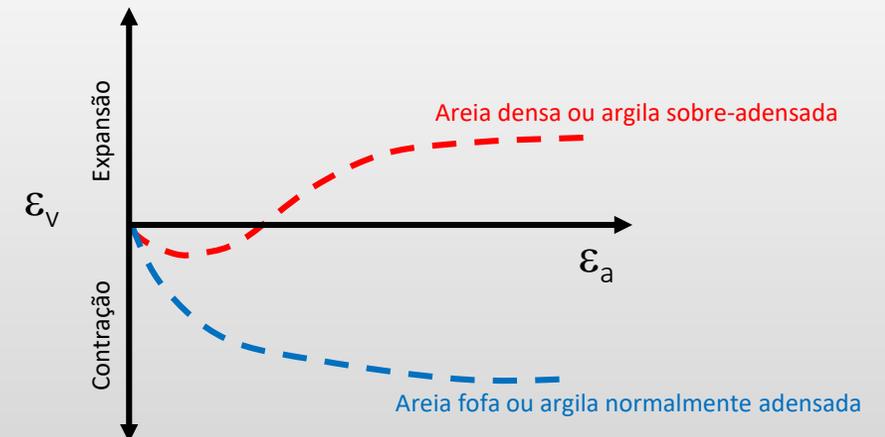
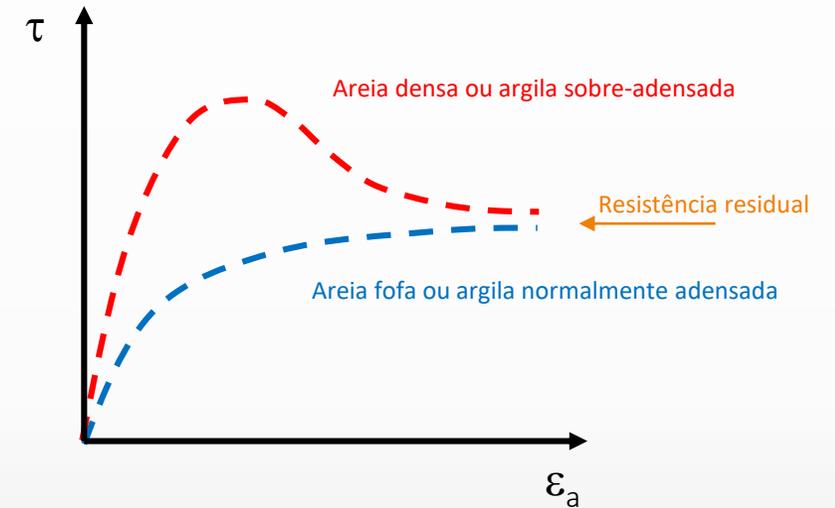
Ensaio drenado

Solo normalmente adensado

- É um solo que nunca esteve submetido a um estado de tensão efetivo maior do que o atual. Sua densidade é a menor possível para qualquer estado de tensão efetivo.
- Sob condições drenadas o material não apresenta pico de resistência e reduz o volume ao ser solicitado

Solo sobre-adensado

- É um solo que foi submetido a um estado de tensão efetivo maior do que o estado atual. Possui uma densidade maior do que a do estado normalmente adensado sob a mesma tensão efetiva.
- Sob condições drenadas o material apresenta um pico e em seguida uma redução da resistência e aumenta de volume na proximidade da ruptura.



Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

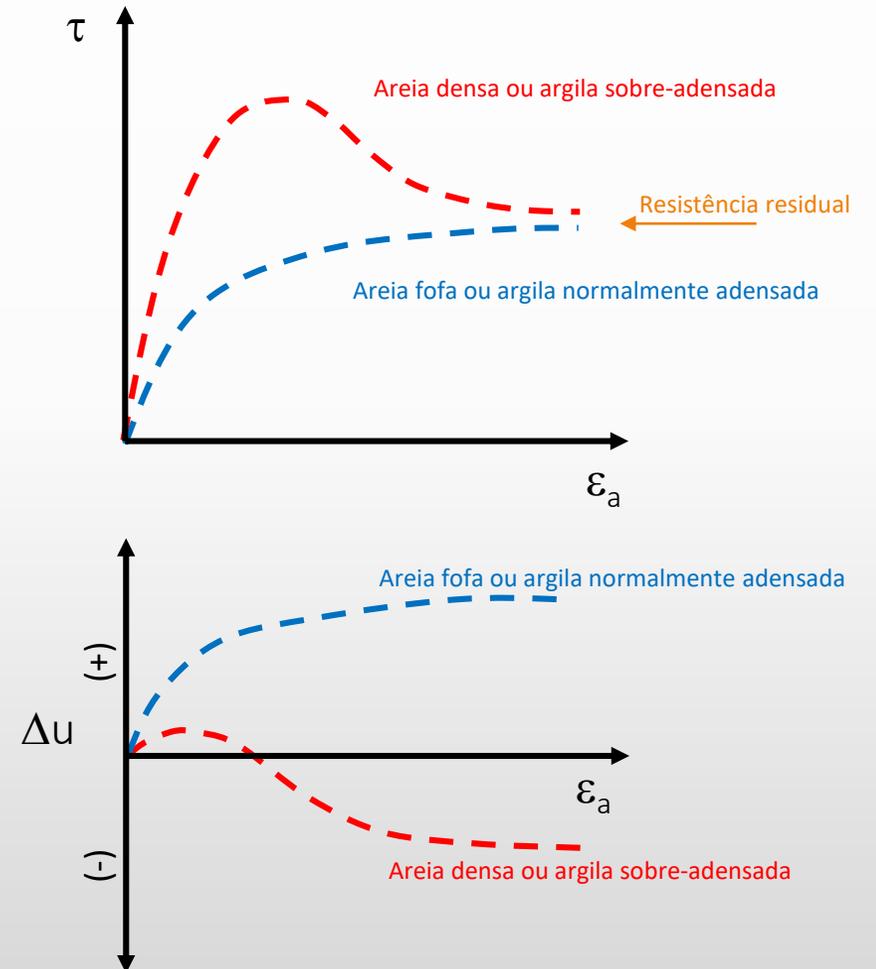
Ensaio Não drenado

Solo normalmente adensado

- Sob condições não drenada de solicitação apresenta um aumento da pressão de água.

Solo sobre-adensado

- Sob condições não drenada de carregamento apresenta uma redução na pressão da água.



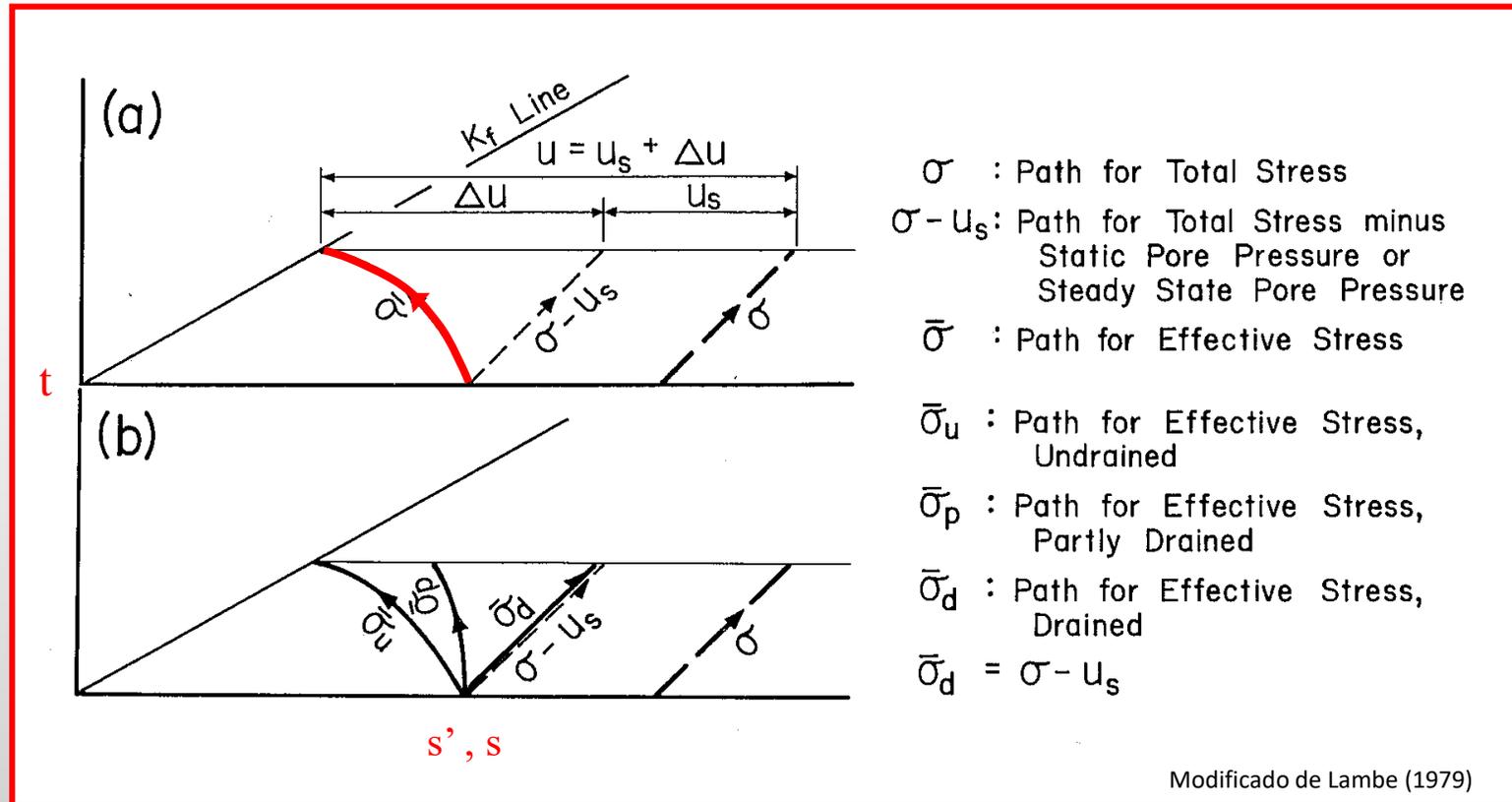
Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

Resistência Não Drenada

- É a resistência do solo quando ele é carregado de forma que não haja saída ou entrada de água do solo. O carregamento é aplicado de forma mais rápida do que a água pode se movimentar para fora ou para dentro do solo.

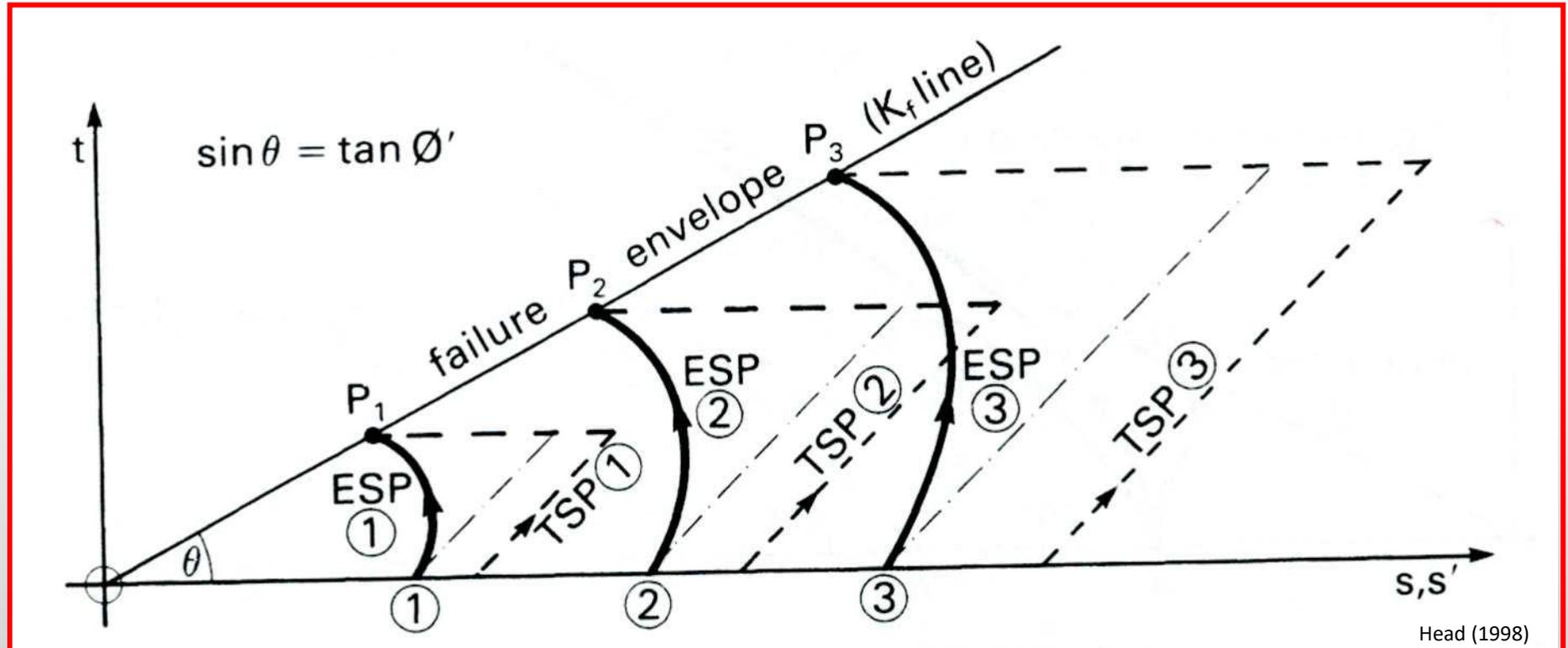
Trajetória de tensão



Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

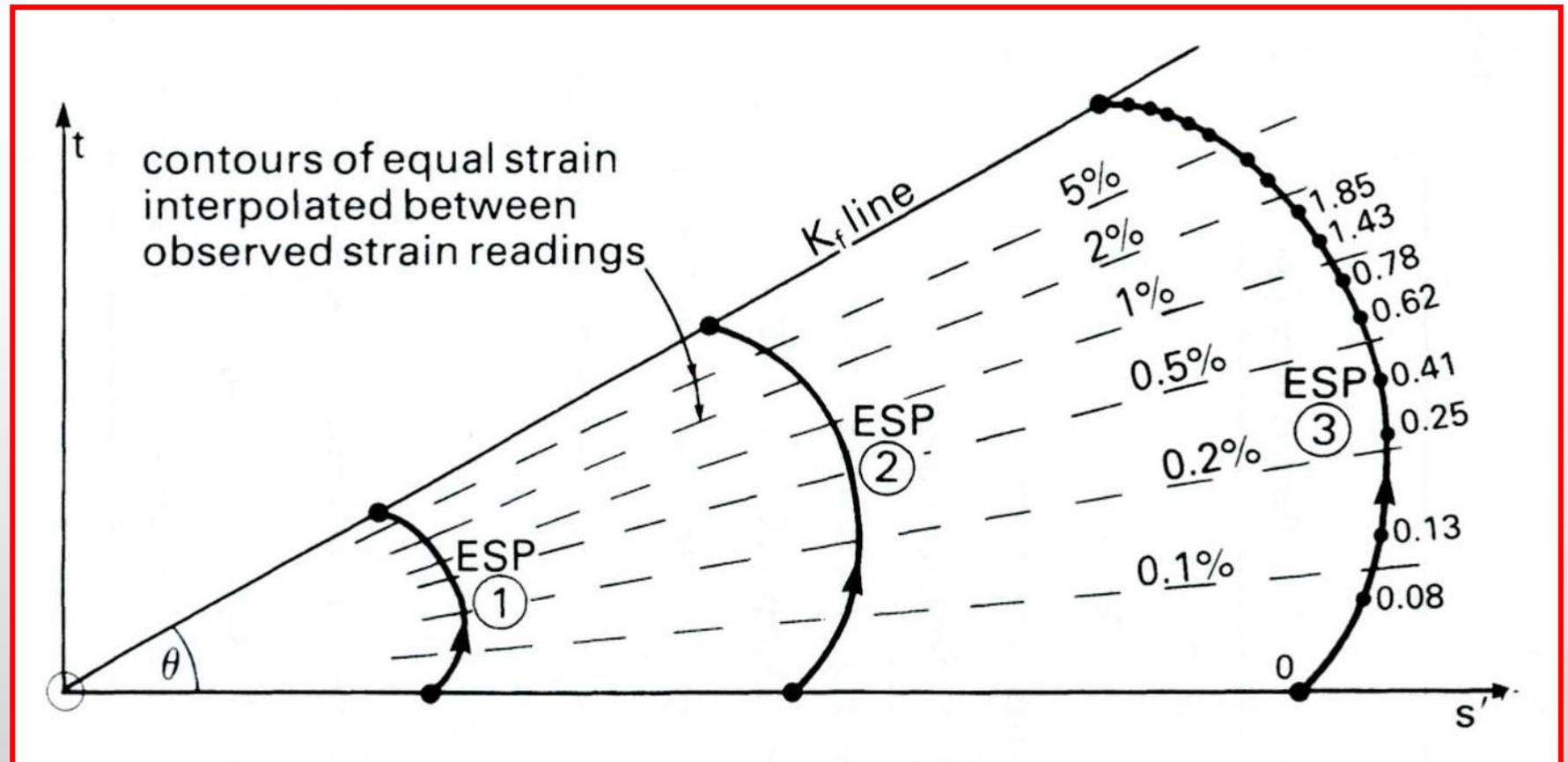
Trajetória de tensão de Ensaio Triaxiais Não Drenados



Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

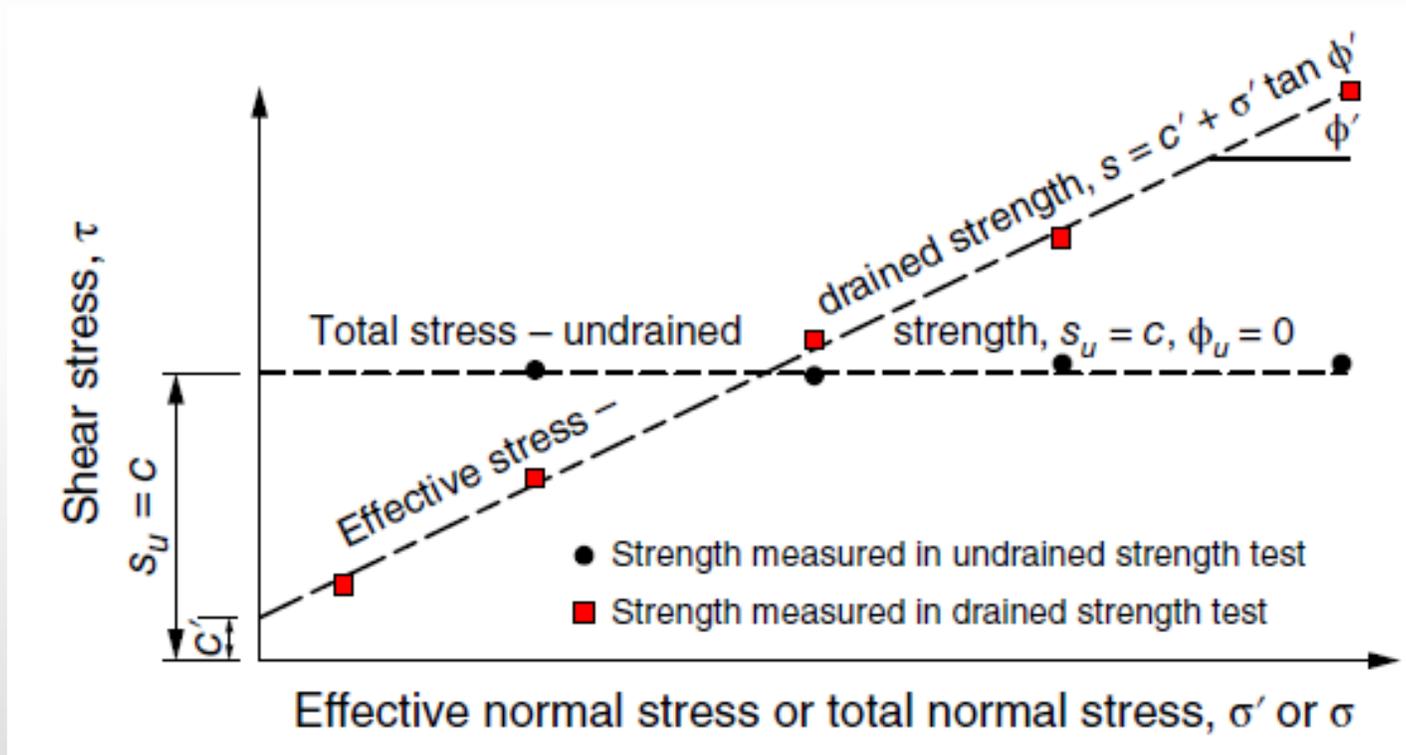
Trajetória de tensão de Ensaio Triaxiais Não Drenados com contornos de deformação



Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

Envoltórias de Resistência – Solo Saturado

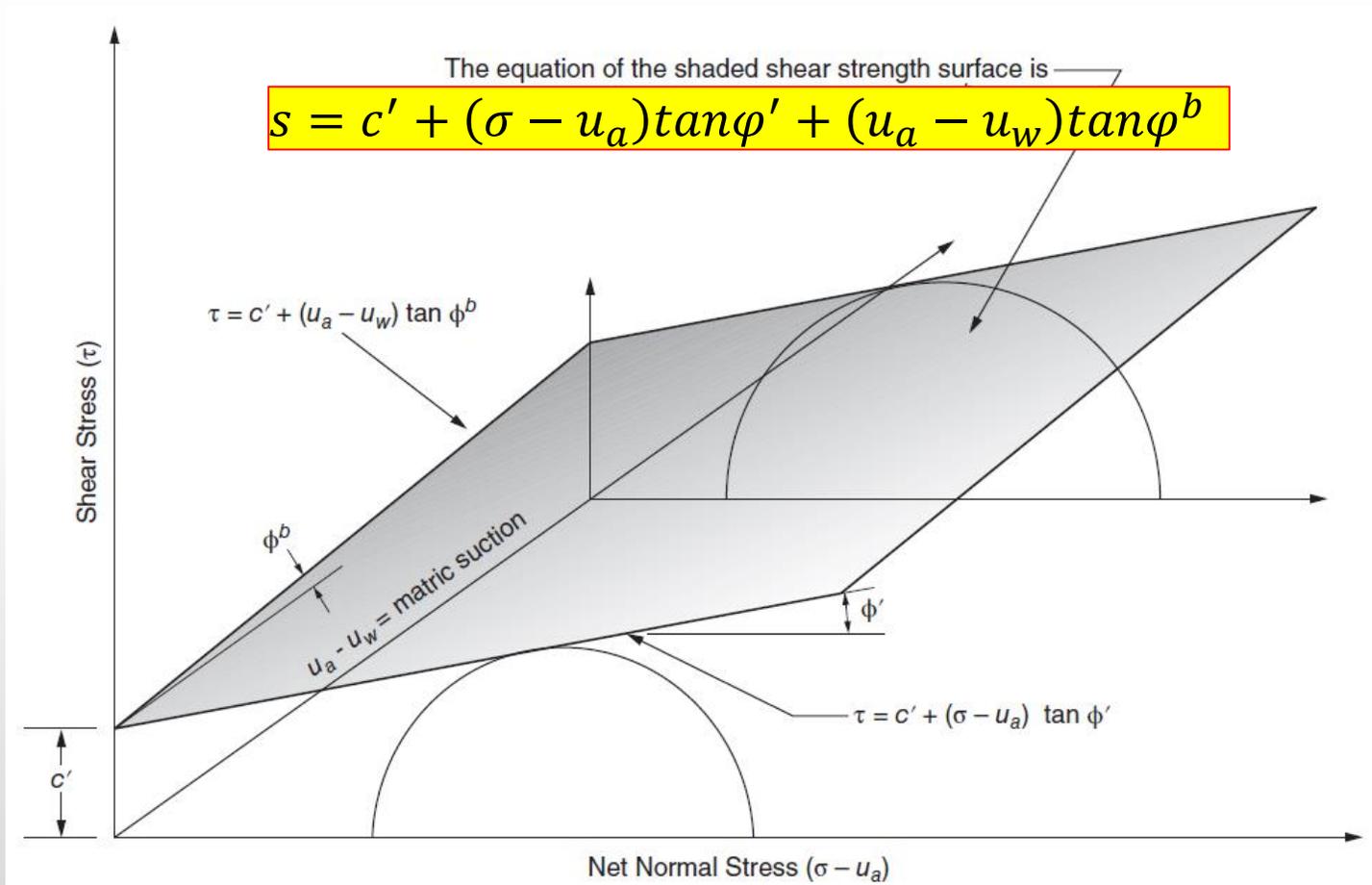


$$s = c' + \sigma_r' \tan \phi'$$

Princípios de Mecânica dos Solos

Resistência ao Cisalhamento

Envoltórias de Resistência – Solo Não Saturado



Princípios de Mecânica dos Solos

Avaliação dos Parâmetros de Resistência

Table 11.1 Experimental Values Measured for ϕ^b

Soil Type	c' (kPa)	ϕ' (deg)	ϕ^b (deg)	Test Procedure	Reference
Compacted shale; $w = 18.6\%$	15.8	24.8	18.1	Constant water content triaxial	Bishop et al. (1960)
Boulder clay; $w = 11.6\%$	9.6	27.3	21.7	Constant water content triaxial	Bishop et al. (1960)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	37.3	28.5	16.2	Consolidated drained triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	20.3	29.0	12.6	Constant drained triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	15.5	28.5	22.6	Consolidated water content triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	11.3	29.0	16.5	Constant water content triaxial	Satija (1978)
Madrid grey clay; $w = 29\%$	23.7	22.5 ^a	16.1	Consolidated drained direct shear	Escario (1980)
Undisturbed decomposed granite; Hong Kong	28.9	33.4	15.3	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Undisturbed decomposed rhyolite; Hong Kong	7.4	35.3	13.8	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Tappen-Notch Hill silt; $w = 21.5\%$, $\rho_d = 1590 \text{ kg/m}^3$	0.0	35.0	16.0	Consolidated drained multistage triaxial	Krahn et al. (1989)
Compacted glacial till; $w = 12.2\%$, $\rho_d = 1810 \text{ kg/m}^3$	10.0	25.3	7–25.5	Consolidated drained multistage direct shear	Gan et al. (1988)

^a Average value.