

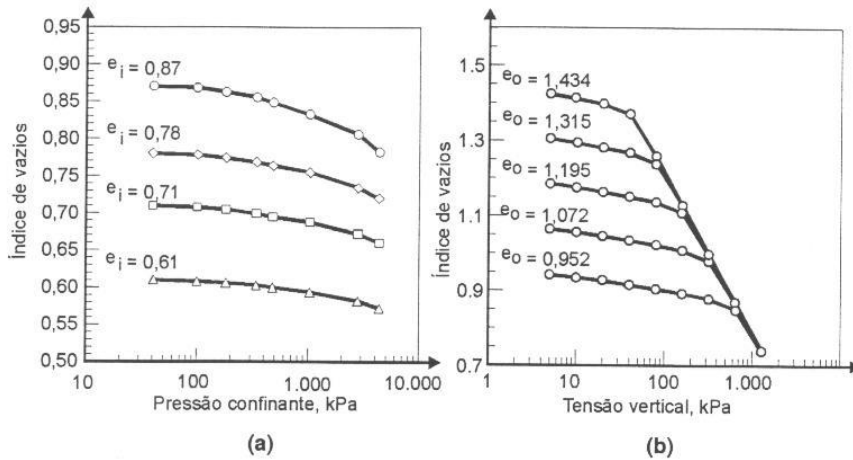
Resistência ao Cisalhamento das Argilas

Prof. Maristâni G. Spannenberg F.

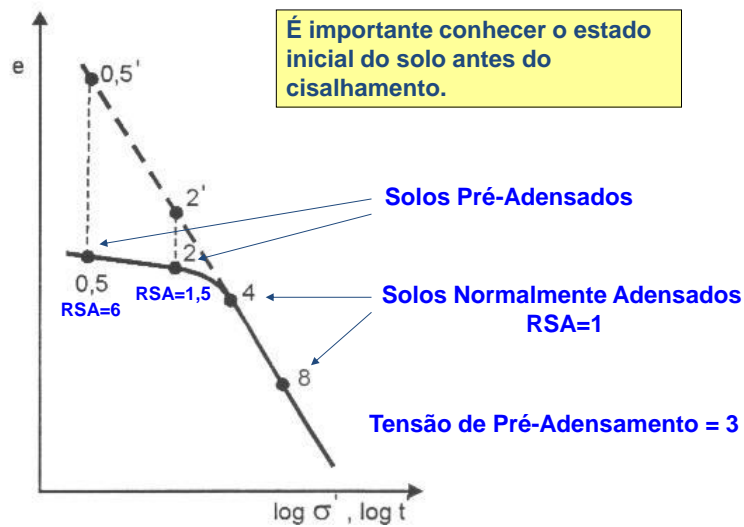
Princípios Básicos

- O comportamento é comandado pelo atrito entre as partículas, assim como nas areias.
- Influência da permeabilidade frente á velocidade do carregamento:
 - Comportamento drenado
 - Comportamento não drenado
- Influência do índice de vazios inicial e a razão de pré-adensamento:
 - O índice de vazios de uma areia é conseqüente das condições de sua deposição na natureza.
 - As argilas sedimentares se formam sempre com elevados índices de vazios.
 - Argilas com índices de vazios baixos são conseqüentes de um pré-adensamento.

Influência do Índice de Vazios Inicial e do Pré-Adensamento

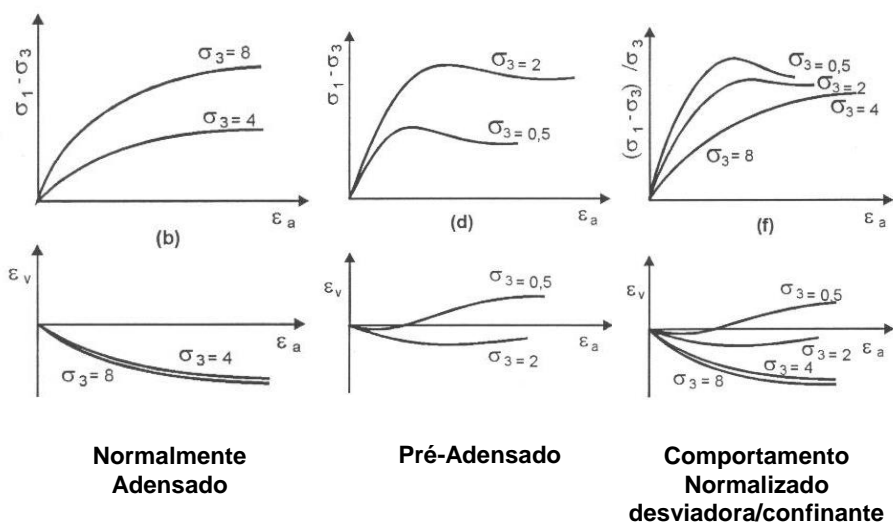


Influência do Índice de Vazios Inicial e do Pré-Adensamento

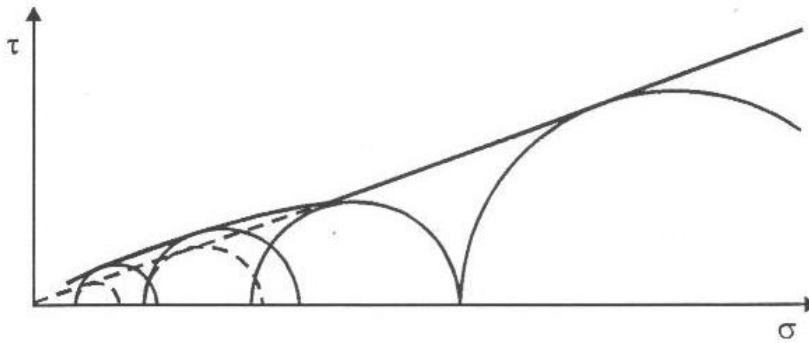


Comportamento Drenado de Argilas

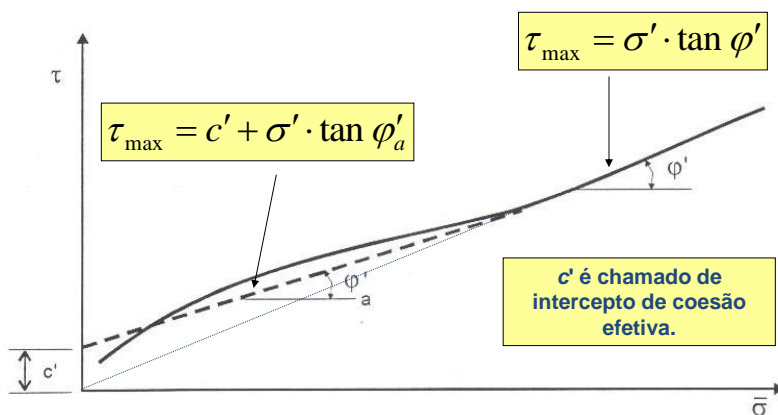
Comportamento Típico em Ensaios CD



Envoltórias de Resistência



Envoltórias de Resistência



Comportamento Drenado das Argilas

- Solos Normalmente Adensados ($RSA=1$)
 - No início do cisalhamento o solo se encontra sobre a reta de compressão virgem.
 - A tensão desviadora máxima ocorre para grandes deformações axiais (15 a 20%).
 - As argilas normalmente adensadas sofrem compressão durante o cisalhamento, ligeiramente maior quanto maior a tensão de confinamento.
 - O comportamento tensão-deformação é normalizável em relação às tensões de confinamento.
 - Como consequência, a envoltória de resistência é uma reta passando pela origem.

Comportamento Drenado das Argilas

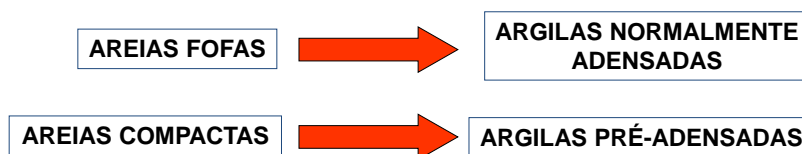
- Solos Pré-Adensados ($RSA>1$)
 - A máxima tensão desviadora ocorre para menores deformações, tanto menores quanto maior a razão de sobre-adensamento.
 - A máxima tensão desviadora é maior do que a correspondente à mesma tensão confinante para o mesmo solo na situação de normalmente adensado, e a diferença é tanto maior quanto maior a razão de sobre-adensamento.
 - Um pico de resistência é claramente observado na curva tensão-deformação.
 - A diminuição de volume durante o carregamento axial é menos acentuada, podendo ocorrer um aumento de volume, no caso da razão de sobre-adensamento ser elevada ($RSA>4$).

Valores Típicos de Resistência Drenada para Argilas

Índice de Plasticidade	Ângulo de atrito interno efetivo (°)	
	Geral	São Paulo
10	30 a 38	30 a 35
20	26 a 34	27 a 32
40	20 a 29	20 a 25
60	18 a 25	15 a 17

- O intercepto de coesão é tanto maior quanto maior a tensão de pré-adensamento do solo. Valores usuais de intercepto de coesão situam-se em torno de 5 a 50 kPa.
- Os valores a adotar em situações de projeto dependem da tensão de pré-adensamento do solo e do nível de tensões de interesse.

Comparação entre Areias e Argilas



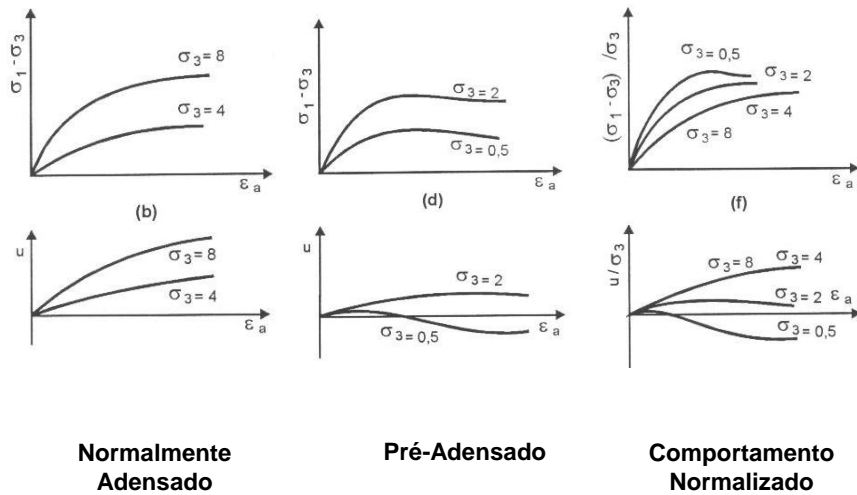
- Índice de vazios crítico / Tensão de pré-adensamento crítica
- Comportamento semelhante perante às tensões confinantes.
- Da mesma maneira que nas areias, o comportamento tensão-deformação-resistência das argilas é comandado pelo atrito entre as partículas e pelas tensões efetivas.

Análise de Tensões Totais ou Efetivas?

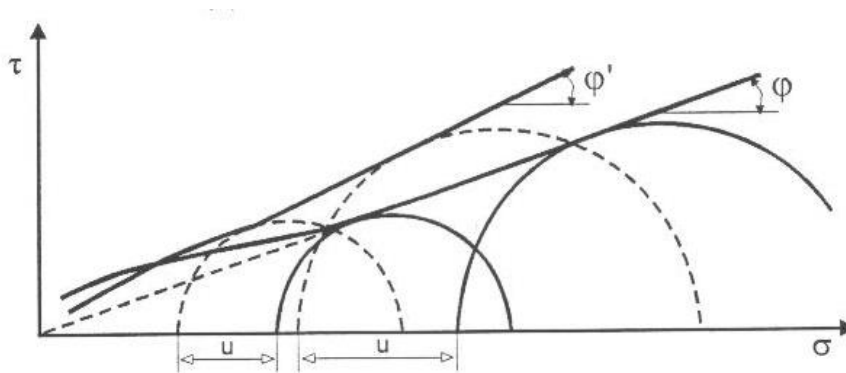
- Na análise de um problema de estabilidade do solo as tensões totais aplicadas sempre são conhecidas.
- A análise por tensões efetivas é sempre preferível.
- É necessário, portanto, o conhecimento das pressões neutras (nível d'água, percolação, carregamento externo), cuja estimativa pode ser, na prática, muito difícil.
- O ensaio triaxial realizado, em termos de tensões totais, deve procurar representar o problema específico em estudo.

Comportamento Não-Drenado de Argilas

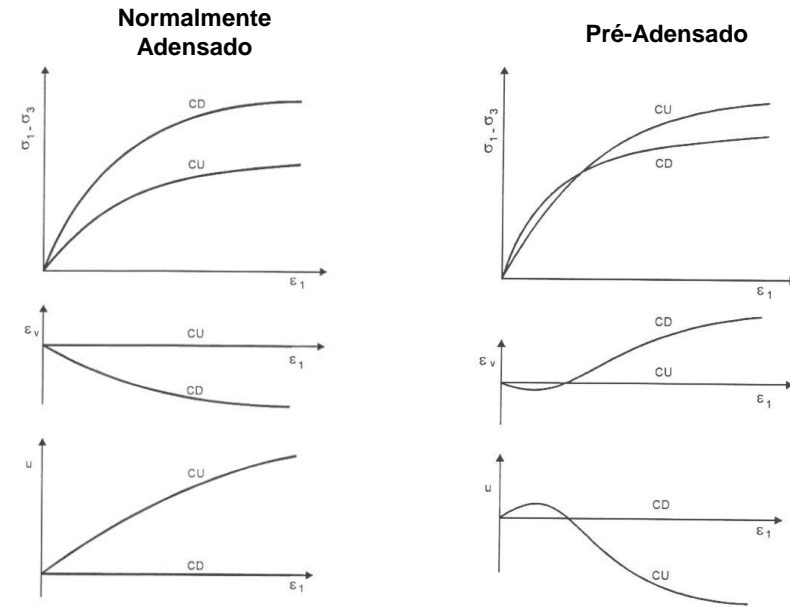
Comportamento Típico em Ensaio CU



Envoltórias de Resistência



Comparação entre os Ensaios CU e CD



Comportamento Não-Drenado das Argilas

- Solos Normalmente Adensados ($RSA=1$)
 - Se o solo está saturado, não há variação de volume mas a poro-pressão é positiva.
 - A existência da pressão neutra reduz a tensão confinante efetiva sobre o corpo de prova, o que diminui a resistência da argila.
 - A tensão desviadora máxima é menor do que seria no ensaio CD para as mesmas deformações específicas.
 - O comportamento tensão-deformação é normalizável em relação à pressão confinante.

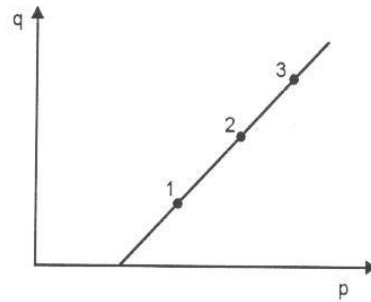
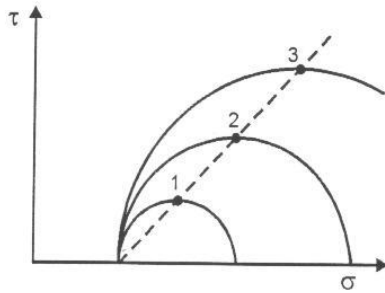
Comportamento Não-Drenado das Argilas

- Solos Normalmente Adensados (RSA=1)
 - A interpretação correta deste ensaio é a caracterização da resistência não drenada em função da tensão de adensamento, que é a pressão confinante do ensaio.
 - Acima da tensão de pré-adensamento, a resistência não-drenada é proporcional à tensão de adensamento.
 - A envoltória de tensões totais é uma reta cujo prolongamento passa pela origem, e cuja inclinação é dada pelo ângulo de atrito ϕ_{cu} .
 - Se as pressões neutras são conhecidas, as tensões efetivas na ruptura e a envoltória efetiva de resistência podem ser determinadas.

Comportamento Não-Drenado das Argilas

- Solos Pré-Adensados (RSA>1)
 - Quando a tensão confinante é muito menor do que a tensão de pré-adensamento, no ensaio CD, ocorre aumento de volume durante o carregamento axial, o que provoca a entrada de água no corpo de prova. No ensaio CU, não havendo drenagem, a água nos vazios do solo fica submetida a um estado de sucção, isto é, a uma pressão neutra negativa.
 - Na ruptura, a tensão desviadora no ensaio CU é maior do que no ensaio CD, a pressão neutra é negativa e não há variação de volume.
 - A envoltória de resistência se apresenta como uma curva para tensões abaixo da pressão de pré-adensamento.

Trajétórias de Tensões



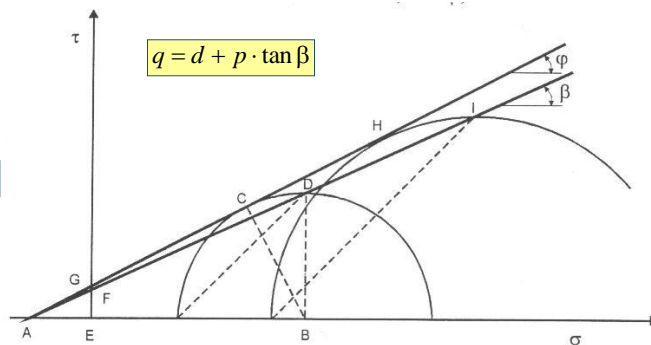
$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Trajétórias de Tensões

$$c = \frac{d}{\cos \phi}$$

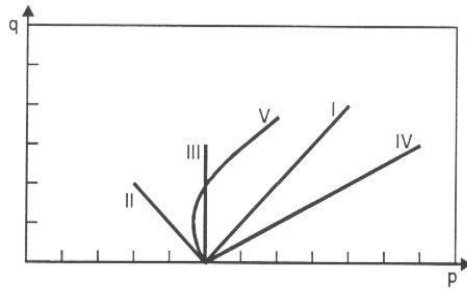
$$\text{sen} \phi = \tan \beta$$



$$q = d + p \cdot \tan \beta$$

Envoltória de resistência a partir das trajetória de tensões

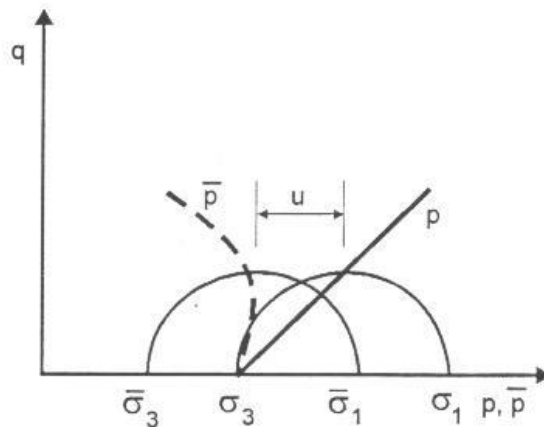
Trajetórias de Tensões



Exemplos de trajetórias de tensões em ensaios triaxiais

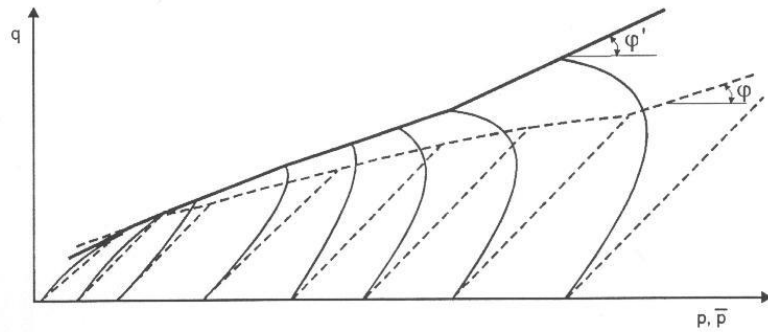
- **Curva I:** confinante constante e axial crescente.
- **Curva II:** confinante decrescente e axial constante.
- **Curva III:** confinante decrescente e axial crescente com iguais valores absolutos.
- **Curva IV:** confinante e axial crescentes numa razão constante.
- **Curva V:** confinante e axial variáveis em razões diversas.

Trajetórias de Tensões



Trajetória de tensões efetivas

Trajétórias de Tensões

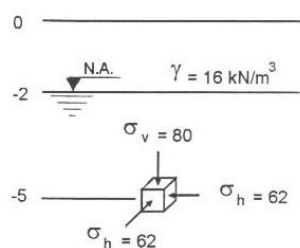


Comparação entre os Ensaios CD e CU

RESISTÊNCIA NÃO-DRENADA DAS ARGILAS (S_u)

Comportamento Típico em Ensaio UU

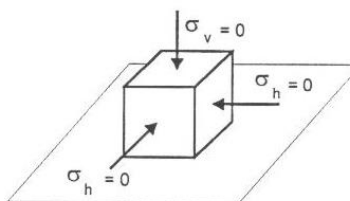
- Fornece a resistência não-drenada do solo (S_u) no estado em que ele se encontra no campo.



$$u = 30 \quad \sigma'_v = 50 \quad \sigma'_{oc+} = 38$$

$$\sigma'_h = 32$$

(a) solo no terreno



$$u = -38 \quad \sigma'_v = 38 \quad \sigma'_{oc+} = 38$$

$$\sigma'_h = 38$$

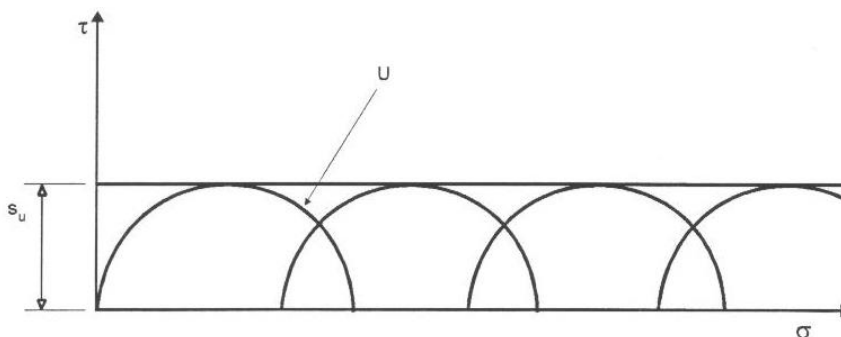
(b) amostra no laboratório

Comportamento Típico em Ensaio UU

- Em ensaios UU, quando se aplica a pressão confinante, surge uma pressão neutra de igual valor (não há drenagem).
- Qualquer que seja a pressão confinante aplicada, a tensão efetiva é a mesma, igual à pressão efetiva que existia inicialmente na amostra, que é igual, em valor absoluto, à pressão neutra negativa da amostra, e que é, ainda, igual à média das tensões principais efetivas que existia no terreno na posição em que a amostra foi retirada.
- Independentemente das pressões confinantes de ensaio, todos os corpos de prova estão sob a mesma tensão confinante efetiva, todos apresentarão a mesma resistência.

Comportamento Típico em Ensaio UU

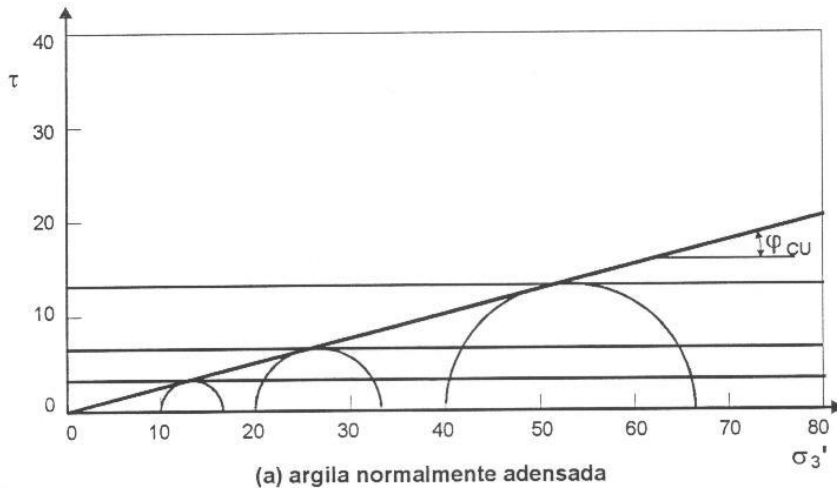
- A envoltória é uma reta horizontal, cuja ordenada é a resistência não drenada da argila s_u , que é uma constante, também chamada de coesão da argila.



Determinação de s_u em Ensaio CU

- Um ensaio CU realizado com pressão confinante igual à tensão efetiva inicial da amostra apresenta resultado igual ao de um ensaio UU realizado sobre a mesma amostra.
- Cada ensaio CU indica a resistência não-drenada para o estado de tensões efetivas correspondente à tensão confinante do ensaio.

Determinação de s_u em Ensaios CU



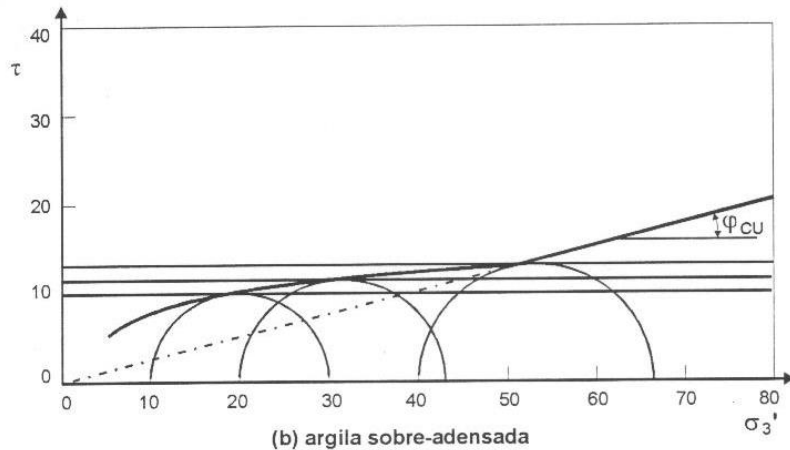
Determinação de s_u em Ensaios CU

- Para amostras adensadas ao longo da reta virgem, a resistência não-drenada s_u é proporcional à tensão confinante de adensamento, dando origem à expressão:

$$\frac{s_u}{\sigma'_0} = RR_{NA}$$

- RR_{NA} é a razão de resistência para a situação normalmente adensada.

Determinação de s_u em Ensaios CU



Determinação de s_u em Ensaios CU

- Para solos sobre-adensados, a análise de resultados experimentais mostrou que a razão de resistência para qualquer situação de sobre-adensamento é constante e função da razão de resistência para a situação de normalmente adensada e da razão de sobre-adensamento considerada:

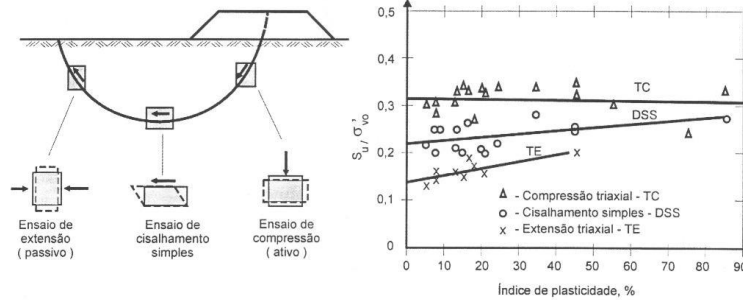
$$\left(\frac{s_u}{\sigma'_0} \right)_{SA} = \left(\frac{s_u}{\sigma'_0} \right)_{NA} \cdot (RSA)^m$$

- sendo m da ordem de 0,8 e $RSA = \sigma'_a / \sigma'_0$

$$s_u = RR_{NA} \cdot (\sigma'_0)^{1-m} \cdot (\sigma'_a)^m$$

Fatores que afetam s_u

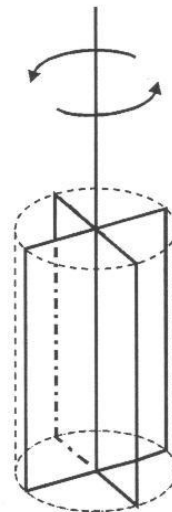
- Amostragem: amolgamento
- Estocagem: queda da tensão neutra negativa inicial
- Tempo de solitação: velocidade de carregamento
- Estrutura da argila: arranjo entre as partículas.
- Anisotropia:



Determinação de s_u em Ensaio de Campo

ENSAIO DE PALHETAS (VANE TEST)

- Extremamente simples.
- Economicamente vantajoso.
- Apresenta alguns problemas:
 - Velocidade
 - Superfície de ruptura
- Valores de resistência necessitam ser corrigidos em função do IP.



Determinação de s_u através de Correlações

- SKEMPTON, Imperial College

$$\frac{s_u}{\sigma'_0} = 0,11 + 0,0037 \cdot IP$$

- Esta correlação se refere a ensaios, principalmente a ensaios de vane, onde a elevada velocidade de carregamento resulta em valores de resistência muito elevados, principalmente para os solos mais argilosos.
- A correlação é boa para se comparar resultados de ensaios, mas não deve, NUNCA, ser empregada para estimar resistência para projeto.

Determinação de s_u através de Correlações

- MESRI, University of Chicago

$$\frac{(s_u)_{PROJ}}{\sigma'_a} = 0,22$$

- Considera a anisotropia e o fator tempo de solitação.
 - Baseia-se em ensaios e retro-análise de aterros sobre solos moles.
- JAMIOLKOWSKI & LADD, Univ. de Milão/M.I.T

$$\frac{(s_u)_{PROJ}}{\sigma'_0} = (0,23 \pm 0,04) \cdot (RSA)^{0,8}$$