

# Sobre Algumas Grandezas, Unidades e Definições em Geotecnia

Clube de Engenharia - Divisão Técnica de Geotecnia

março de 2017

Apresentado originalmente na UFPe – dezembro de 2016

Ian Schumann Marques Martins

Professor Associado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro

[ian@coc.ufrj.br](mailto:ian@coc.ufrj.br)

1) Introdução

2) Sistema de unidades

3) Grandezas que confundem

4) Emprego inadequado de termos

5) Uma só palavra e vários significados

6) Conclusão

Galileo Galilei (1564 – 1642) – mov. unif. acelerado – refer. inercial – mov. pendular – res. materiais

Isaac Newton (1643 – 1727) – lei da gravitação – viscosidade – cálculo diferencial

Euler (1707 – 1783) – mecânica – mecânica dos fluidos – flambagem -

Coulomb (1736 – 1806) – mecânica aplicada – lei do atrito – empuxo de terras

Navier (1785 – 1836) – teoria da elasticidade – modulo de elasticidade – resistência dos materiais

Cauchy (1789 – 1857) – teoria da elasticidade

Saint Venant (1797 – 1886) – teoria da elasticidade – resistência dos materiais – estudo da flexão

Stokes (1819 – 1903) – hidrodinâmica – queda de uma esfera num meio viscoso

Rankine (1820 – 1872) – distribuição de forças em estruturas, especialmente no âmbito da mec. dos solos

Betti (1823 – 1892) – estruturas hiperestáticas – teorema de Betti-Maxwell (deflexões recíprocas)

Maxwell (1831 – 1879) – teorema de Betti-Maxwell (deflexões recíprocas) – análise de treliças

Mohr (1835 – 1918) – análise de tensões – teoria de resistência

Castigliano (1847 – 1884) – teorema de Castigliano – análise de estruturas

**Terzaghi (1883 – 1963) – princípio das tensões efetivas – teoria do adensamento**

# 1) Introdução

Geotecnia → ramo recente da Engenharia Civil

Geotecnia = Mecânica dos Solos + Mecânica das Rochas + Geologia de Engenharia

Ramo relativamente novo  
da Engenharia Civil



Tendência à confusão

Uso inadequado de termos

Definições pouco precisas

Objetivo

identificar alguns destes termos

discutir os seus significados ilustrando-os com exemplos

identificar seu uso inadequado

propor termos e expressões alternativas consideradas adequadas

## 2) Sistema de unidades

Brasil Imperial  Adotava-se o sistema técnico de unidades

Grandezas básicas  
do sistema técnico }  **FORÇA** — **COMPRIMENTO** — **TEMPO**

Grandezas básicas do sistema técnico e suas unidades

grandeza	unidade	
nome	nome	símbolo
força	quilograma-força	kgf
comprimento	metro	m
tempo	segundo	s

No sistema técnico a massa é uma grandeza derivada da força e da aceleração

# Sistema Internacional de Unidades — S. I.

Grandezas básicas do S.I.  **MASSA** — **COMPRIMENTO** — **TEMPO**

## Grandezas básicas do S.I. e suas unidades

grandeza	unidade	
<b>nome</b>	nome	símbolo
<b>massa</b>	quilograma	kg
<b>comprimento</b>	metro	m
<b>tempo</b>	segundo	s

No S.I a força é uma grandeza derivada da massa e da aceleração

Apesar de o S.I. ser o sistema legalmente vigente no País



muitos instrumentos de medição apresentam suas escalas no sistema técnico



caso das balanças, que dão os pesos em *kgf* (*quilogramas força*) ou *gf* (*gramas força*)



É preciso converter unidades do sistema técnico para unidades do Sistema Internacional

Conversões de unidades que causam confusão são as das grandezas que fazem uso da grandeza força em sua definição (por exemplo, as unidades de tensão)

sistema técnico → força é grandeza básica → unidade *quilograma-força* ( *kgf* )

no S.I. → força (unidade *newton*) é grandeza derivada da combinação da massa (dada em *kg*) e da aceleração (dada em  $m/s^2$ ) (lembrar da 2ª lei de Newton  $\vec{F} = m\vec{a}$  )

1 newton, denotado por *N*, é a força necessária para imprimir a uma massa de *1 kg* uma aceleração de *1 m/s<sup>2</sup>*.

1 quilograma-força, denotado por *kgf*, é a força exercida pela gravidade da Terra sobre a massa de *1 kg*.



1 newton ( $N$ ) é a força que imprime a uma massa de  $1\text{ kg}$  uma aceleração de  $1\text{ m/s}^2$ .

1 quilograma-força ( $kgf$ ) é a força exercida pela gravidade da Terra sobre a massa de  $1\text{ kg}$ .


Tomando-se o valor da aceleração da gravidade ao nível do mar na latitude  $45^\circ$ , com 3 algarismos significativos, este valor é de  $9,81\text{ m/s}^2$

$$1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot 1\text{ m/s}^2 \quad (1)$$

$$1\text{ kgf} = 1\text{ kg} \cdot 9,81\text{ m/s}^2 \quad (2)$$

$$1\text{ kgf} = 9,81\text{ N} \quad (3)$$

A expressão (2) revela que o peso de  $1\text{ kg}$  massa vale  $1\text{ kgf}$ , isto é, que o peso de um corpo no sistema técnico e sua massa no S.I. são numericamente iguais, o que tem conduzido a uma grande confusão entre peso e massa.

Alguns instrumentos usam para unidades de força múltiplos e submúltiplos do *quilograma-força*  caso das balanças usadas em laboratórios de geotecnia.

É comum, por exemplo, o uso do *grama-força*, denotado por *gf*, correspondente a *1/1000 kgf*.

$$1 \text{ gf} = 9,81 \times 10^{-3} \text{ N} \quad (4)$$

Em outros casos, expressa-se a força em *toneladas-força (tf)*, correspondente a *1000 kgf*.

$$1 \text{ tf} = 1000 \text{ kgf} = 9,81 \times 10^3 \text{ N} \quad (5)$$

Para evitar números com muitos dígitos, empregam-se múltiplos de uma certa unidade. No caso da unidade de força do S.I., usa-se o *quilonewton* (*kN*) para  $10^3$  N e o *meganewton* (*MN*) para  $10^6$  N.

No caso do S.I.  $\longrightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{quilonewton (kN) para } 10^3 \text{ N} \\ \text{meganewton (MN) para } 10^6 \text{ N.} \end{array} \right.$

## Unidades de tensão comumente usadas em Geotecnia e seus equivalentes

grandeza	unidades equivalentes		
tensão	1 kgf/cm <sup>2</sup>	10 tf/m <sup>2</sup>	98,1 kN/m <sup>2</sup> (*)
peso específico	1,0 gf/cm <sup>3</sup>	1,0 tf/m <sup>3</sup>	9,81 kN/m <sup>3</sup>

(\*)

$$1 \text{ kN/m}^2 = 1 \text{ kPa}$$

### 3) Grandezas que confundem

massa específica x peso específico x densidade

*Peso específico = unit weight*

*Densidade = specific gravity*

*Massa específica = density*



Termos na língua inglesa  
fizeram a confusão ?


*Taylor (1948)*

O *peso específico (unit weight)* ( $\gamma$ ) de um solo é a razão entre o peso ( $W$ ) dos grãos sólidos mais água, contidos num dado volume ( $V$ ) deste solo, e o referido volume ( $V$ )

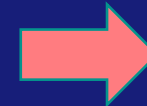


$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (6)$$


o peso específico tem dimensão de força por unidade de volume e é expresso em  $tf/m^3$ ,  $kN/m^3$  ou  $gf/cm^3$

peso específico da água destilada a 4°C   $(\gamma_0) = 1 \text{ gf/cm}^3$  ( $\cong$  pois depende da gravidade) valor adotado com suficiente acurácia para o peso específico da água ( $\gamma_w$ ) em Geotecnia

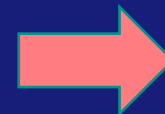
o *peso específico dos sólidos (ou peso específico dos grãos)* ( $\gamma_s$ ) de um solo é a razão entre o peso de grãos sólidos ( $W_s$ ) e o volume dos sólidos ( $V_s$ )



$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (7)$$

A *densidade (specific gravity)* ( $G$ ) de uma substância é definida como a razão entre o peso específico desta substância e o peso específico da água destilada a 4°C  *adimensional*

a *densidade dos grãos de um solo (specific gravity)* ( $G_s$ ) é a razão entre o peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) e o peso específico da água destilada a 4°C ( $\gamma_0$ )



$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} \quad (8)$$

No caso dos solos as definições de peso específico dos grãos e densidade dos grãos deveriam incluir a palavra “*média*”, porque um solo pode ser constituído de um ou mais minerais.


A densidade (média) dos grãos é uma propriedade de um solo, pois ela é independente de outras variáveis que não os minerais constituintes do solo em questão.

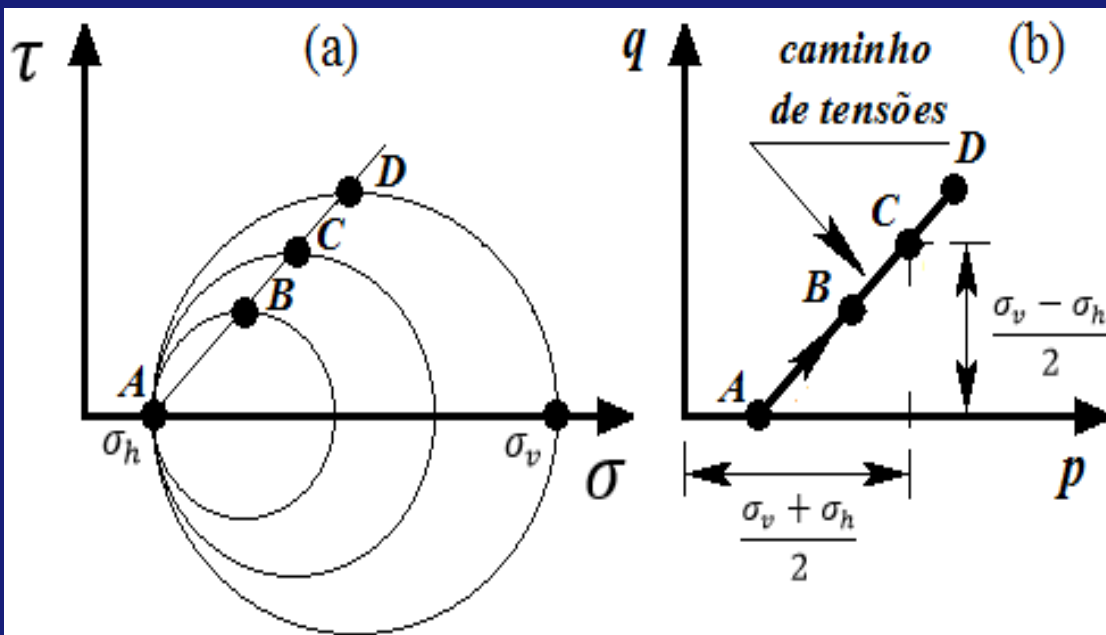
A *massa específica (density)* de uma substância é definida como massa por unidade de volume. A massa específica pode ser expressa, por exemplo, em *kg/m<sup>3</sup>* ou *g/cm<sup>3</sup>*, sendo os símbolos *kg* e *g* as unidades de massa *quilograma e grama*, respectivamente.

A confusão entre massa e peso e o fato de, na língua inglesa, a massa específica ser chamada de “density” contribuem para a confusão entre peso específico, massa específica e densidade. Em Geotecnia não se faz uso da massa específica para o entendimento de algum fenômeno.

## 4) Emprego inadequado de termos

### 4.1) Caminho ou trajetória de tensões ?

Caminho de tensões  representação gráfica dos sucessivos estados de tensão pelos quais um corpo de prova passa durante um carregamento.



$$p = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} ; q = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \begin{cases} \sigma_v = \text{tensão vertical} \\ \sigma_h = \text{tensão horizontal} \end{cases}$$

(a) Círculos de Mohr de sucessivos estados de tensão.

(b) Caminho de tensões associado (Lambe e Whitman, 1969).

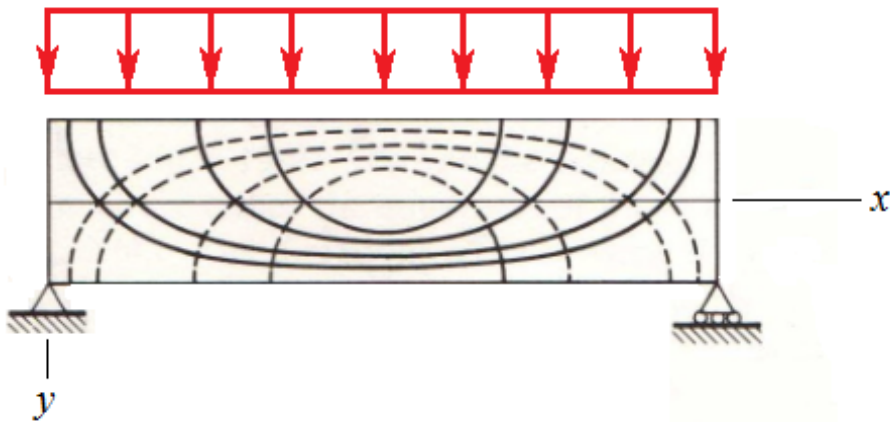
Por que caminho de tensões (“*Stress Paths*”) e não trajetória de tensões (“*Stress Trajectories*”) ?

Lambe e Whitman (1979, p.112)

*“The terms **stress trajectory** and **vector curve** are also used to denote curves depicting successive states of stress, but the definitions of these other curves are somewhat different”.*

Timoshenko e Gere (1972, p.132)

*“... two systems of orthogonal curves , called **stress trajectories**, that give the directions of the principal stresses...”*



Trajatórias das tensões principais numa viga bi-apoiada sob carregamento uniformemente distribuído.

Timoshenko e Gere – Mechanics of Materials p. 134



## 4.2) Adensamento ou Compressão ?

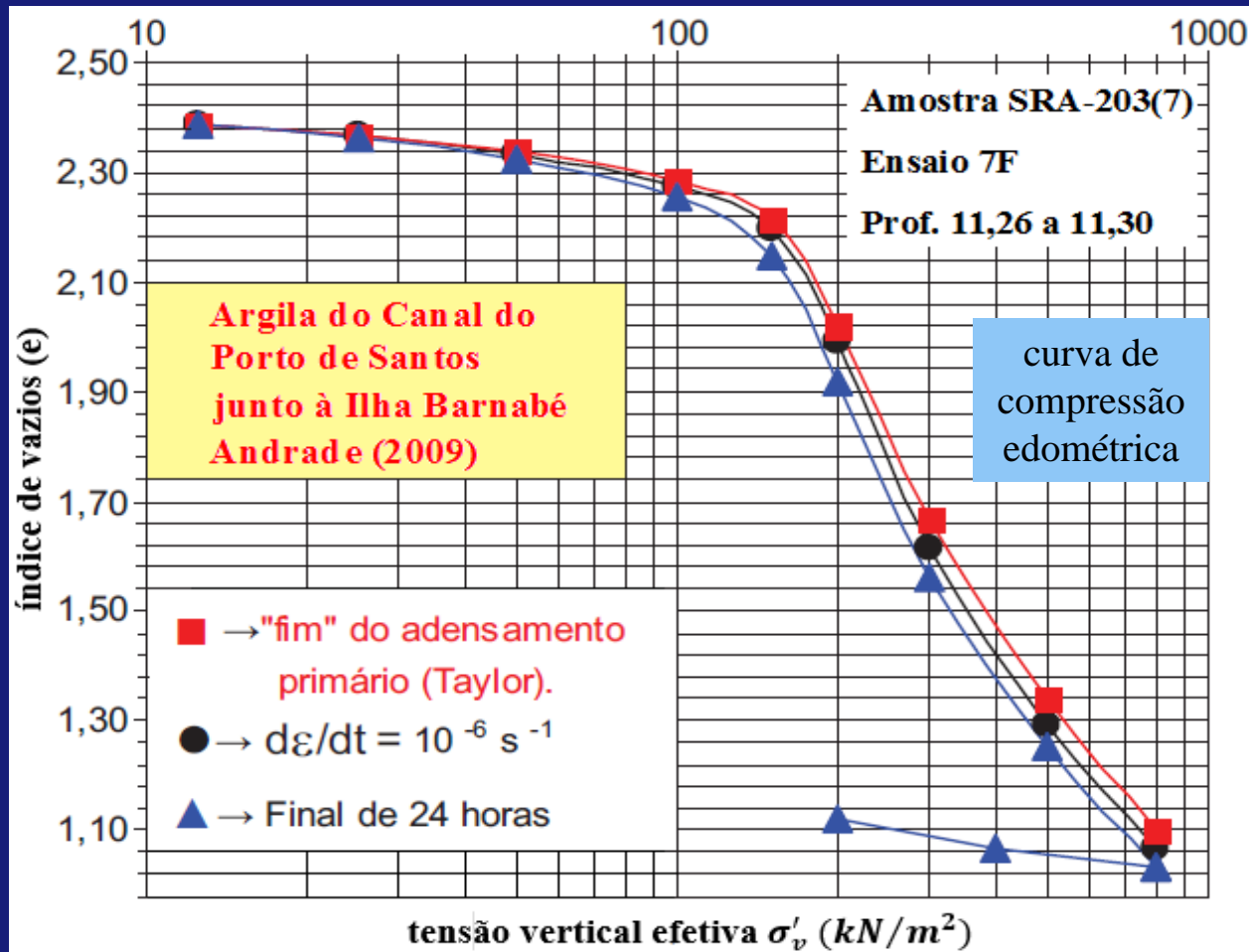
*Adensamento é o processo de redução de volume ao longo do tempo, de um solo saturado, ocasionado pela saída de uma quantidade de água igual à redução do volume de vazios, como resultado da transferência gradual do excesso de poro-pressão, gerado por um carregamento, para a tensão efetiva.*

*A compressão de um elemento de solo é a redução de volume do referido elemento relacionada à variação do estado de tensões efetivas a que foi submetido, sem levar em consideração o tempo.*

Na definição acima, a expressão “sem levar em consideração o tempo” refere-se às condições estacionárias (relacionadas ao tempo) ou “quasi-estacionárias” (caso do fim do adensamento primário), em que se devem encontrar tanto o volume quanto o estado de tensões efetivas.

Há em Mecânica dos Solos “tipos” de compressão de especial interesse

*compressão edométrica*  $\Rightarrow \epsilon_h = 0$  *compressão hidrostática*  $\Rightarrow \sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$



A quantificação da compressão é feita por uma curva de compressão. Uma *curva de compressão edométrica*, por exemplo, relaciona os índices de vazios ( $e$ ) ao fim de cada estágio de carregamento do ensaio de adensamento edométrico às tensões verticais efetivas ( $\sigma'_v$ ) correspondentes ao fim do referido estágio.

## 4.3 Adensamento ou Consolidação ?

No idioma inglês, o termo usado para adensamento é “*consolidation*”. Assim, é comum encontrar os termos *adensamento* e *consolidação* utilizados como sinônimos.

Dicionário Houaiss da  
Língua Portuguesa

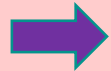
consolidação



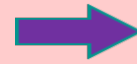
1. Ato ou efeito de passar (uma substância) do estado líquido para o sólido; solidificação, endurecimento.

2. Ato ou efeito de tornar(-se) sólido, firme, estável.

*Consolidação*



termo usado com os  
significados acima  
para definir.



*rochas ígneas e sedimentares*

Teixeira et. al. (2000, p.329) ➡ “Na geologia, magma é qualquer material rochoso fundido, de consistência pastosa...e que, ao **consolidar** constitui as rochas ígneas”

Chiossi (1975, p. 32) ➡ “Quando o magma não consegue romper as camadas superiores da Crosta, sua **consolidação** ocorre internamente, formando as rochas intrusivas”

## No que diz respeito às rochas sedimentares ...

“...a *diagênese* pode conduzir à transformação do depósito sedimentar inconsolidado em rocha ... processo conhecido como *litificação*.” (Teixeira et. al., 2000, p. 289).

**Consolidação  
em Geologia**



*resfriamento e endurecimento  
do magma*



*formação das  
rochas ígneas*

*litificação* ou *petrificação* (Rodrigues, 1976)  
*dos sedimentos* através da *diagênese*



*formação  
das rochas  
sedimentares*

É a *consolidação*, entendida como *litificação*, que confere às rochas a *coesão verdadeira*, quantificada por uma resistência à tração ( a ser discutida mais adiante)

## 4.4 Adensamento Isotrópico ou Hidrostático ?

Notação do MIT  
(ensaio triaxial)



*Ensaio*  
 $\overline{CIU}$

Consolidated  
Isotropically (?)  
Undrained

A barra superior  
significa que o ensaio foi  
realizado com medição  
da poro-pressão

No Brasil



ensaio  $\overline{CIU}$

Adensado  
Isotropicamente (?)  
Não drenado

Adensado isotropicamente significa  
adensamento sob  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$



estado  
**hidrostático**  
de tensões

**Mas isotropia é propriedade de um material e não de um estado de tensões !!!**



*Ensaio Triaxial Adensado Hidrostaticamente – Não Drenado – Com medida de poro-pressão*

## 5) Significados de coesão

### 5.1) Introdução



*“When I use a word”, Humpty Dumpty said, in rather a scornful tone, “it means just what I choose it to mean — neither more nor less”.*

*“The question is” said Alice, “whether you can make words mean so many different things”*

(Lewis Carroll – Through the Looking Glass)

– *Quando eu uso uma palavra, – Humpty Dumpty disse com certo desprezo – ela significa o que eu quiser que ela signifique... Nem mais nem menos.*

– *A questão é – disse Alice – se você pode fazer as palavras significarem tantas coisas diferentes.*

(Lewis Carroll – Através do Espelho)

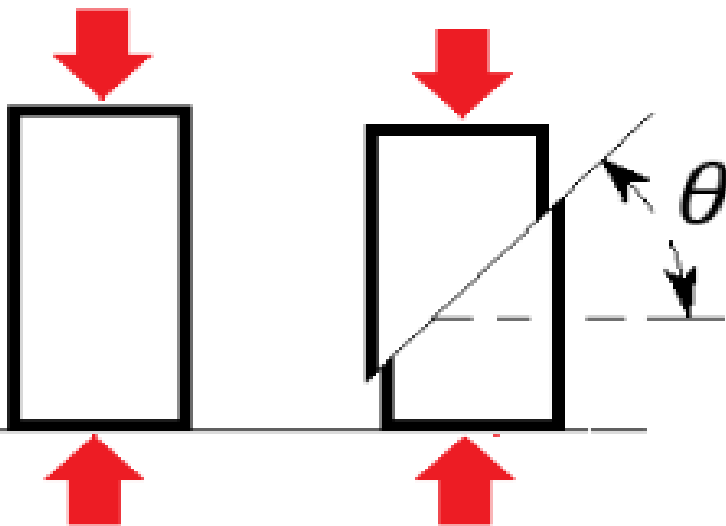
O termo *coesão* é um dos que mais causam confusão. Afinal o que significam *“coesão verdadeira”*, *“coesão aparente”*, *“intercepto de coesão”* e *“resistência não drenada”* ?

## 5.2) Como os materiais rompem ?

Duas formas pelas quais os materiais rompem:  
por separação e por cisalhamento (Lobo Carneiro, 1990)

compressão simples

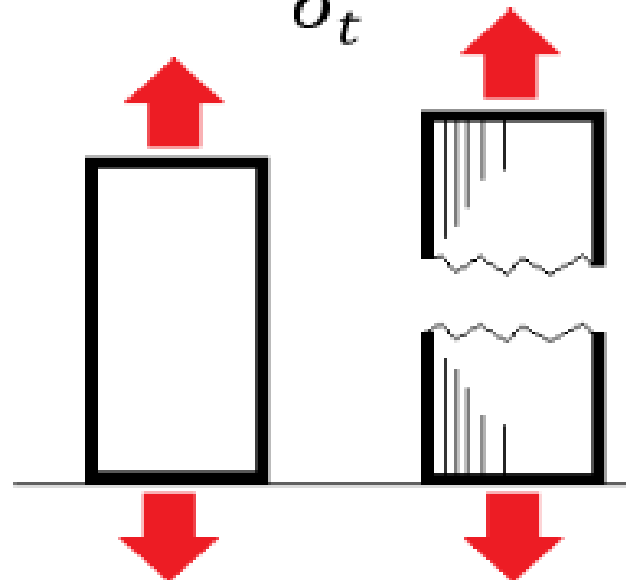
$\sigma'_c$



ruptura por cisalhamento

tração simples

$\sigma'_t$



ruptura por separação

Admitindo-se uma rocha onde a poro-pressão seja nula e para a qual valha o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, a sua envoltória de ruptura, definida pelos ensaios da Figura 3, seria dada por

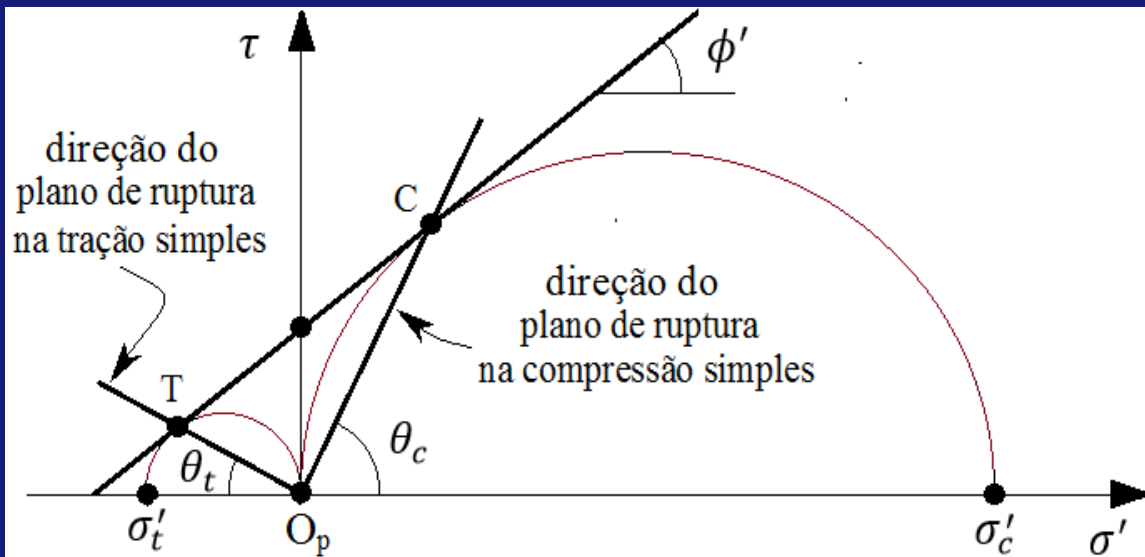
$$s = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$$

$s$  a resistência ao cisalhamento

$c'$  chamada aqui genericamente de coesão efetiva (a ser discutida adiante)

$\sigma'$  a tensão normal efetiva no plano de ruptura na ruptura

$\phi'$  o ângulo de atrito efetivo.



De acordo com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb

$$\theta_c = 45^\circ + \phi' / 2$$

e

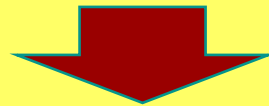
$$\theta_t = 45^\circ - \phi' / 2 \quad (???)$$



Quando um corpo de prova homogêneo de rocha é rompido sob compressão simples, os ângulos que os planos de ruptura fazem com a horizontal são de fato  $45^\circ + \phi' / 2$ .

Sob tração simples, o plano de ruptura observado, definido pelas duas partes do corpo de prova que se separam (**ruptura por separação**), é horizontal e não  $45^\circ - \phi' / 2$ .

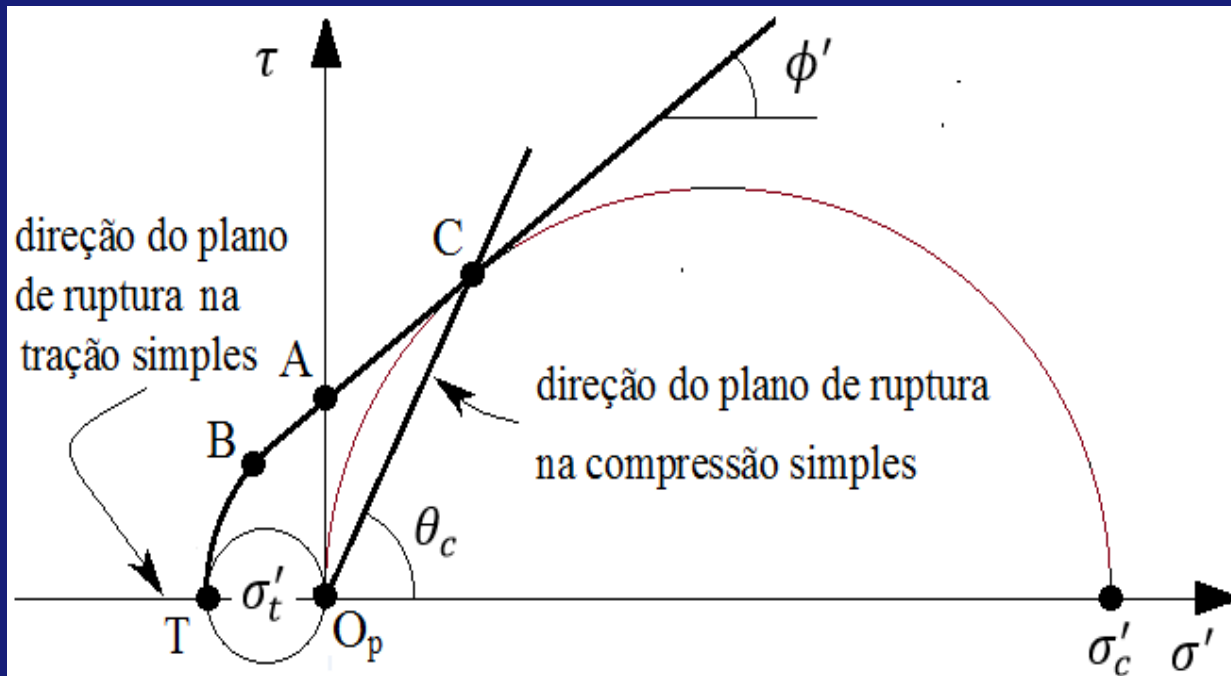
Na tração simples, o ponto de tangência da envoltória ao Círculo de Mohr (condição de ruptura), está sobre o eixo  $\sigma'$  e tem abscissa  $\sigma'_t$  (por que ?)



A parte da envoltória correspondente à tração não pode ser a reta de inclinação  $\phi'$ . Sob tração, à esquerda da origem, a envoltória tem que tangenciar verticalmente o Círculo de Mohr correspondente à tração simples, na ruptura, no ponto de abscissa  $\sigma'_t$ .

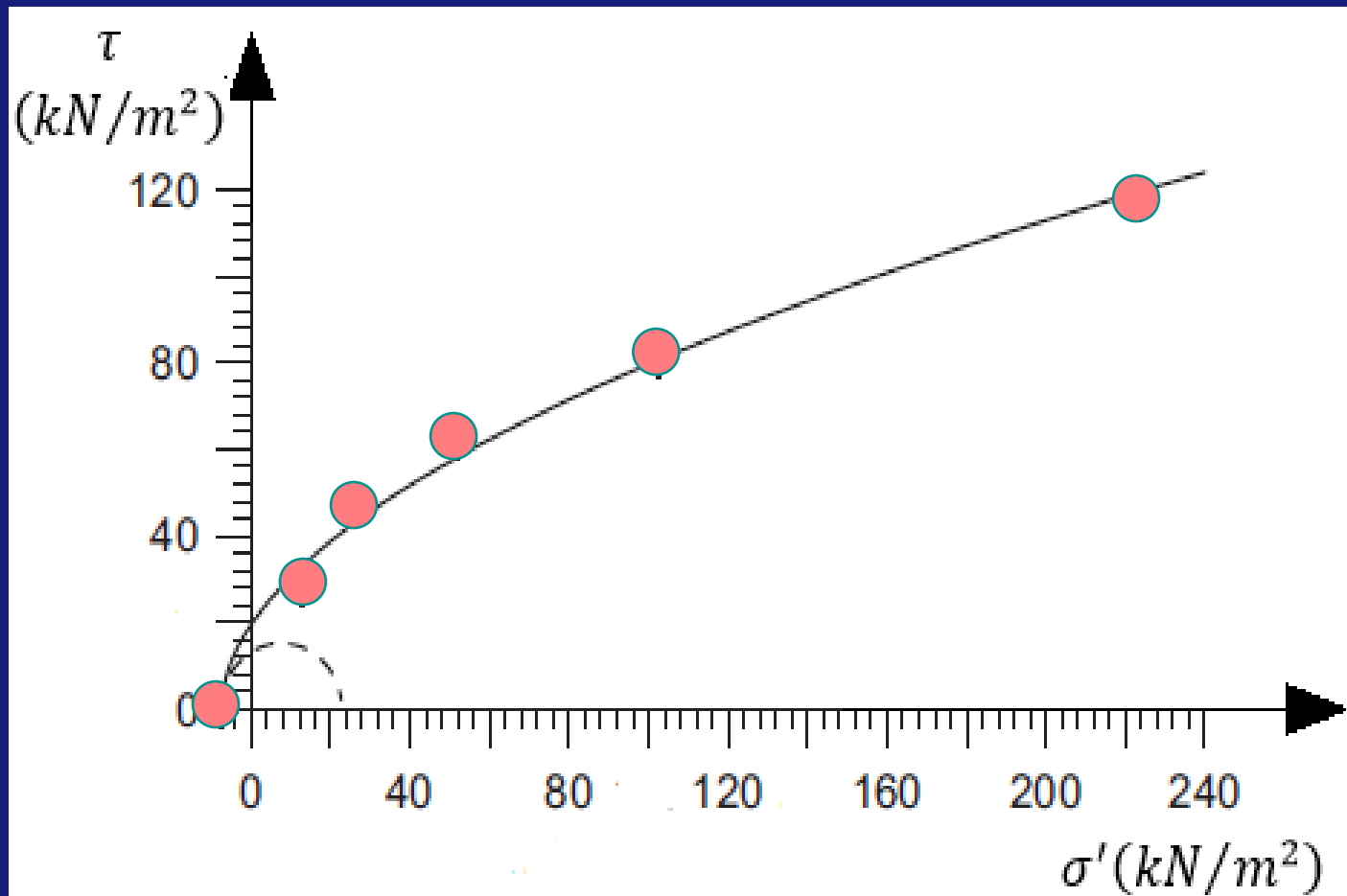
### 5.3) Coesão Verdadeira

Envoltória de resistência como linha composta por um arco de círculo TB e uma semi-reta BC

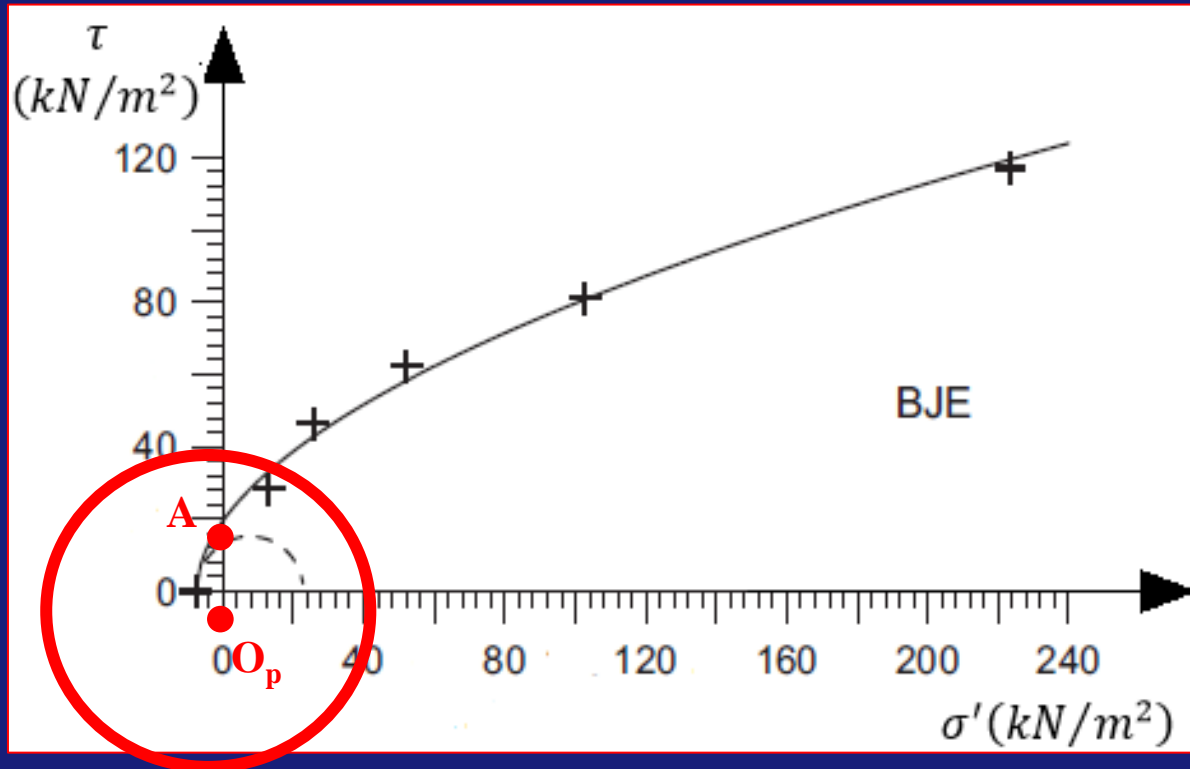


O modo de ruptura, *cisalhamento ou separação*, é definido pelo ponto onde o Círculo de Mohr na ruptura toca a envoltória.

Envoltória de resistência com trecho de tração, obtida a partir de ensaios drenados de cisalhamento direto e compressão diametral (tração indireta). Solo residual de Bom Jardim - RJ (Rodriguez, 2005).



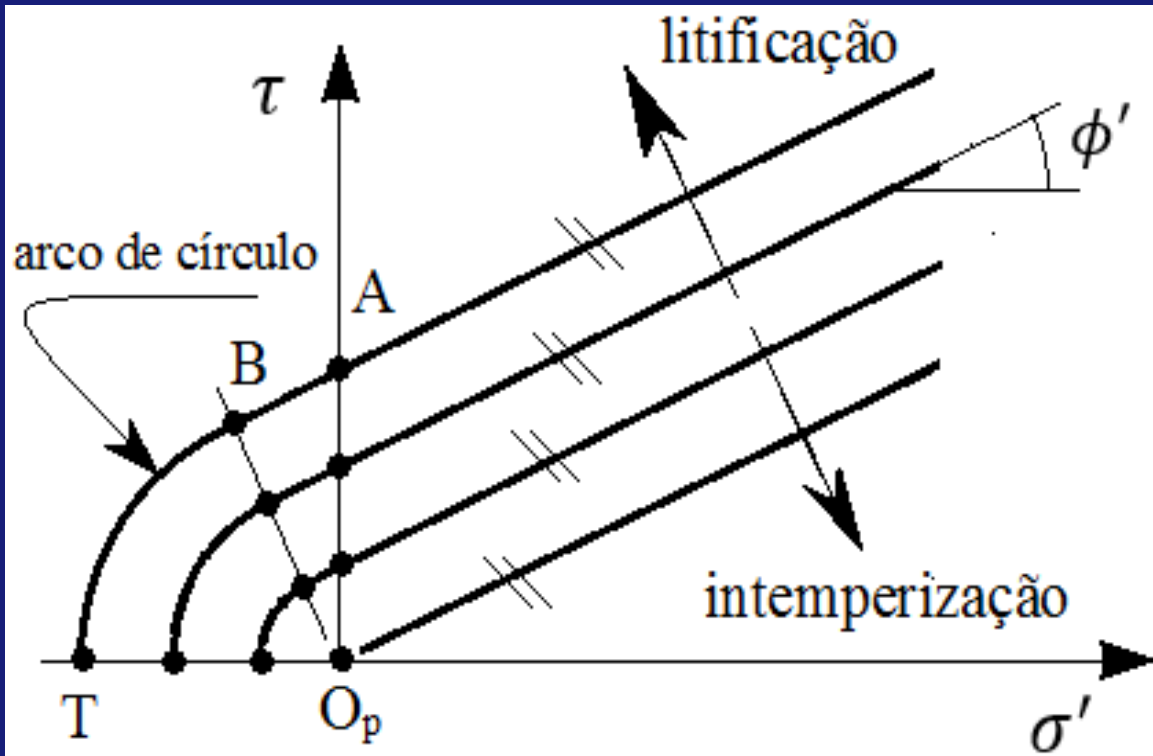
Envoltória de resistência com trecho de tração, obtida a partir de ensaios drenados de cisalhamento direto e compressão diametral (tração indireta). **Solo residual** de Bom Jardim - RJ (Rodriguez, 2005).



$\overline{O_p A}$  = coesão verdadeira  
resistência ao cisalhamento  
sob tensão efetiva NULA

A que se deve esta resistência à tração ? Às “**cimentações**” entre grãos remanescentes do processo de **intemperização**. O solo é residual !

a *intemperização*, processo pelo qual as rochas se transformam em solos, se dá pela perda de *coesão verdadeira* das rochas ao longo do tempo (cimentação entre os grãos)



rocha sã  
↓  
rocha alterada (saprolito)  
↓  
solo residual jovem  
↓  
solo residual maduro

Intemperização

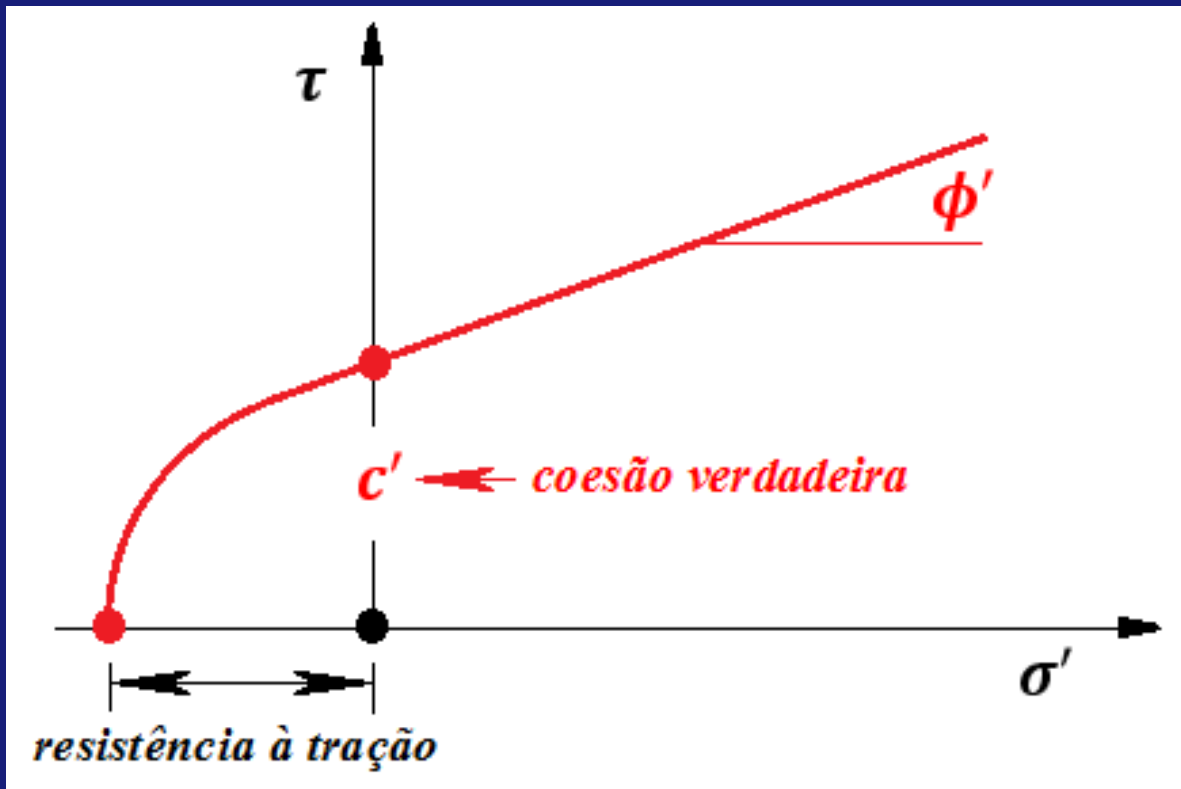
perda total da coesão verdadeira



envoltória passa pela origem

Formação de uma rocha sedimentar pela *diagênese* → processo “inverso” ao da *Intemperização*. *Consolidação* ou *litificação* dos sedimentos fazendo com que seja criada uma *coesão verdadeira*.

A resistência à tração simples (medida sob condições drenadas) é uma medida indireta da *coesão verdadeira*.



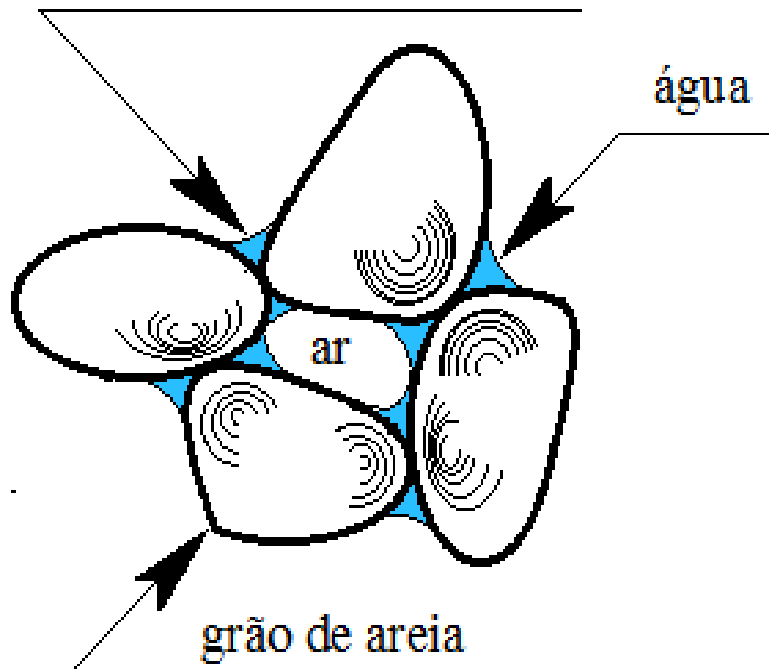
Quando há coesão verdadeira, a amostra mantém-se intacta se mergulhada num recipiente com água.

Medição feita sob condições drenadas para que não haja poro-pressões negativas (sucção). ex. compressão diametral com a amostra submersa.

## 5.4) Coesão Aparente

*“A presença de água, em condições de não saturação, cria uma situação em que os meniscos de interfaces ar-água provocam a existência de uma pressão neutra negativa na água; é a pressão de sucção. Esta tensão provoca uma tensão efetiva e a ela corresponde um ganho de resistência...que desaparece com a saturação ou a secagem”. (Pinto, C.S., 2006)*

meniscos na interface ar-água

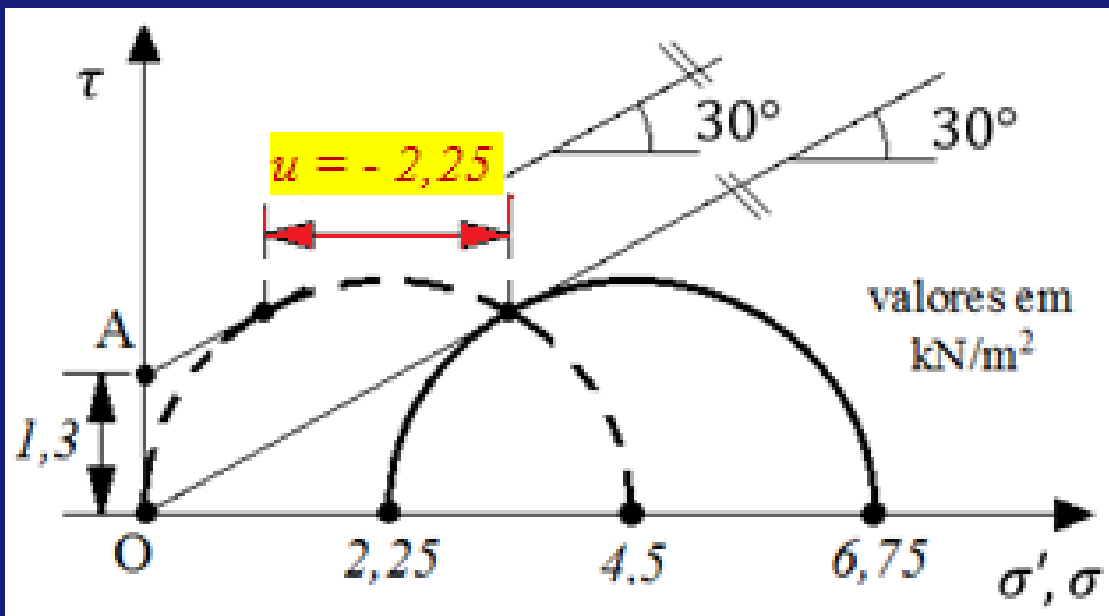


Quando há coesão aparente, a amostra “desmancha-se” se for mergulhada num recipiente com água (por quanto tempo ela deve ser mergulhada ?) Por que ?

Os meniscos podem ser vistos a olho nu em areias úmidas, porém não saturadas. Tais meniscos permitem erigir torres e castelos de areia úmida na praia.

## Exemplo ilustrativo de coesão aparente.

- Areia úmida (não saturada) com peso específico  $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$
- Ângulo de atrito interno  $\phi' = 30^\circ$ .
- Hipótese altura máxima de uma torre cilíndrica feita com tal areia =  $0,30 \text{ m}$ .
- Tensão vertical total na base da torre =  $4,5 \text{ kN/m}^2$  e tensão horizontal total = ZERO.



➤  $\overline{OA} = \text{coesão aparente}$

- Areias não têm coesão verdadeira.
- Envoltória em termos de tensões efetivas, é a reta inclinada de  $\phi' = 30^\circ$  que passa pela origem
- Círculo ➡ Mohr das tensões efetivas na ruptura deslocado para a direita e a poro-pressão na ruptura é negativa.



## 5.5) Intercepto Efetivo de Coesão

- Muitas vezes a envoltória de resistência de um solo é curva e não retilínea.
- Comum em argilas sobreadensadas e areias num intervalo amplo de tensões.

➤ Nestes casos, como explica Pinto (2006, p.287), “*Não sendo prático se trabalhar com envoltórias curvas, costuma-se substituir (ajustar) o trecho curvo da envoltória por uma reta que melhor a represente. Há, naturalmente, várias retas possíveis, devendo-se procurar a reta que melhor se ajuste à envoltória...*”.

➤ O ajuste de uma reta à envoltória curva deve ser feito dentro do domínio de tensões de interesse do problema prático a enfrentar.

➤ Esta reta ajustada à envoltória curva no intervalo de tensões de interesse é dada por

$$s = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$$

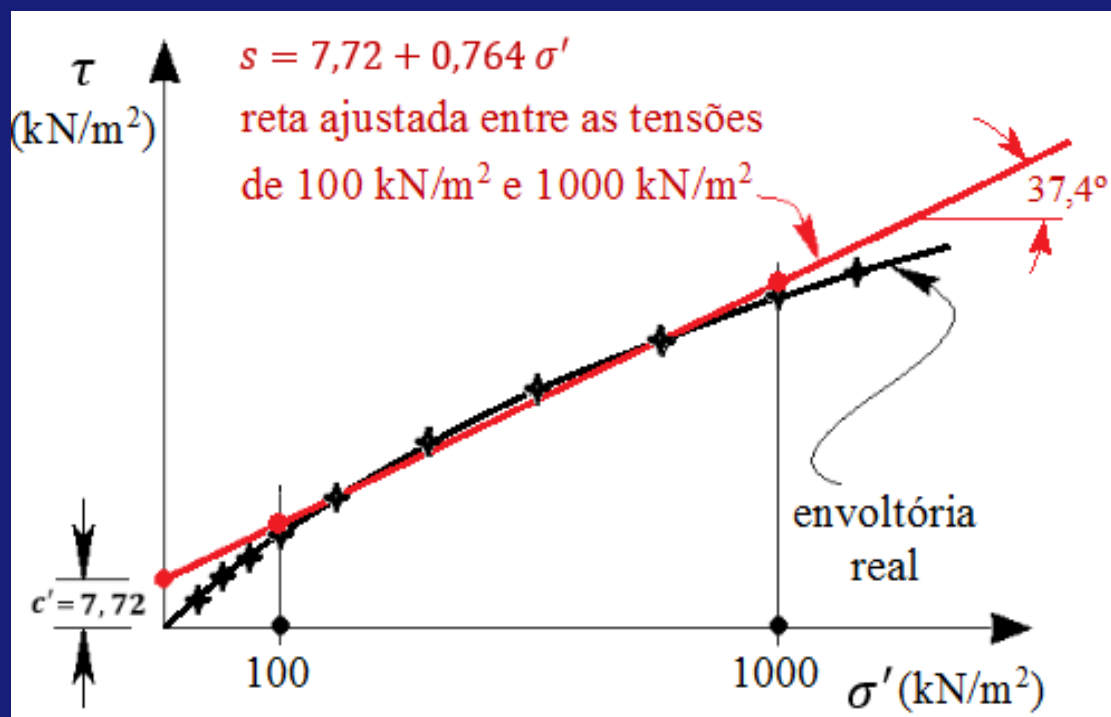
➤ No caso em questão  $c'$  é chamado de *intercepto efetivo de coesão*.

➤ O *intercepto efetivo de coesão* não tem significado físico.

➤ É apenas o coeficiente linear da reta ajustada à envoltória curva.

Exemplo : cisalhamento direto na Areia da Praia de Ipanema – Rio de Janeiro com índices de vazios entre  $0,648 \pm 0,01$  e  $25 \text{ kPa} \leq \sigma' \leq 1250 \text{ kPa}$  (Simões, 2015).

a envoltória de resistência entre as tensões  $100 \text{ kN/m}^2$  e  $1000 \text{ kN/m}^2$  pode ser representada por



↓

$$s = 7,72 + 0,764 \sigma'$$

ou

$$s = 7,72 + \sigma' \text{tg } 37,4^\circ$$

com erros relativos entre  $\pm 2,5\%$

$7,72 \text{ kN/m}^2$  → **intercepto efetivo de coesão**

o intercepto efetivo de coesão não tem significado físico. A Areia da Praia de Ipanema não tem **coesão verdadeira** → sua envoltória em termos de tensões efetivas passa pela origem.

## 5.5) Resistência não drenada

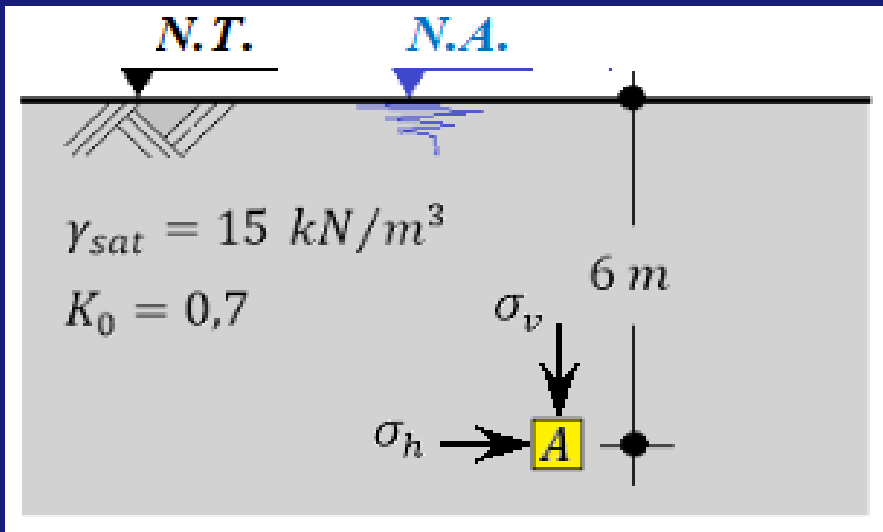
Esta é uma outra grandeza à qual muitas vezes também é dado o nome de coesão

Neste caso, melhor do que definir é trabalhar com um exemplo.

Depósito de argila mole saturada com

$N.T. \equiv N.A$

Amostra  $A$  retirada na prof. de 6 m.



Tensões na amostra antes da amostragem

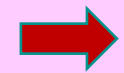
tensão vertical total  $\sigma_v = 90 \text{ kPa}$ ,

poro-pressão  $u = 60 \text{ kPa}$

$\sigma'_v = 30 \text{ kPa}$ ,  $\sigma'_h = 21 \text{ kPa}$

$\sigma_h = 81 \text{ kPa}$ ,  $\sigma'_{oct} = 24 \text{ kPa}$

amostragem  
perfeita  
não-drenada



não há variação  
de volume e não  
há variação da  
tensão octaédrica  
efetiva ( $\sigma'_{oct}$ )

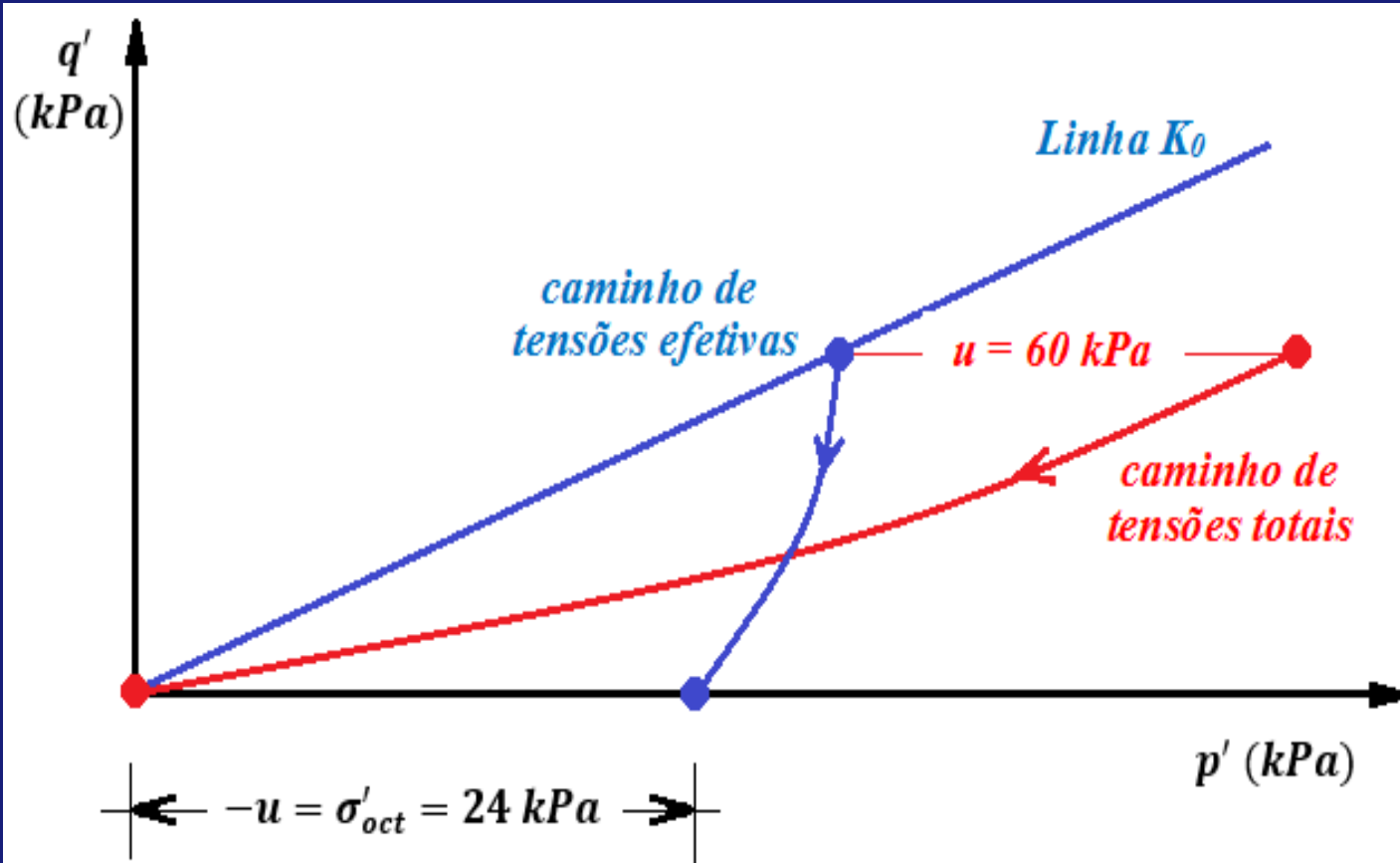
amostragem  
perfeita



há descarregamento sem variação de volume.

sob regime elástico, se  $\Delta\varepsilon_v = ZERO \rightarrow \Delta\sigma'_{oct} = ZERO$

# Caminhos de tensões totais e efetivas na amostragem perfeita



$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2}, \quad p = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2}$$

e

$$q' = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$$

- $\sigma'_v$  a tensão efetiva vertical
- $\sigma'_h$  a tensão efetiva horizontal
- $\sigma_v$  a tensão total vertical
- $\sigma_h$  a tensão total horizontal

# Ensaio UU em c. ps. da amostra A sob tensões confinantes de 50, 100 e 150 kPa

Estado inicial de tensões do c.p. 1

$$\sigma_v = \sigma_h = 0$$

$$u = -24 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_{oct} = 24 \text{ kPa}$$



Após a aplicação de  $\Delta\sigma = 50 \text{ kPa}$

(sob condição não-drenada)

$$\sigma_v = \sigma_h = 50 \text{ kPa}$$

$$u = -24 + 50 = 26 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_{oct} = 24 \text{ kPa}$$

Estado hidrostático  
de tensões com  
 $\sigma' = 24 \text{ kPa}$

Estado inicial de tensões do c. p. 2

$$\sigma_v = \sigma_h = 0$$

$$u = -24 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_{oct} = 24 \text{ kPa}$$



Após a aplicação de  $\Delta\sigma = 100 \text{ kPa}$

(sob condição não-drenada)

$$\sigma_v = \sigma_h = 100 \text{ kPa}$$

$$u = -24 + 100 = 76 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_{oct} = 24 \text{ kPa}$$

Estado hidrostático  
de tensões com  
 $\sigma' = 24 \text{ kPa}$

Estado inicial de tensões do c. p. 3

$$\sigma_v = \sigma_h = 0$$

$$u = -24 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_{oct} = 24 \text{ kPa}$$



Após a aplicação de  $\Delta\sigma = 150 \text{ kPa}$

(sob condição não-drenada)

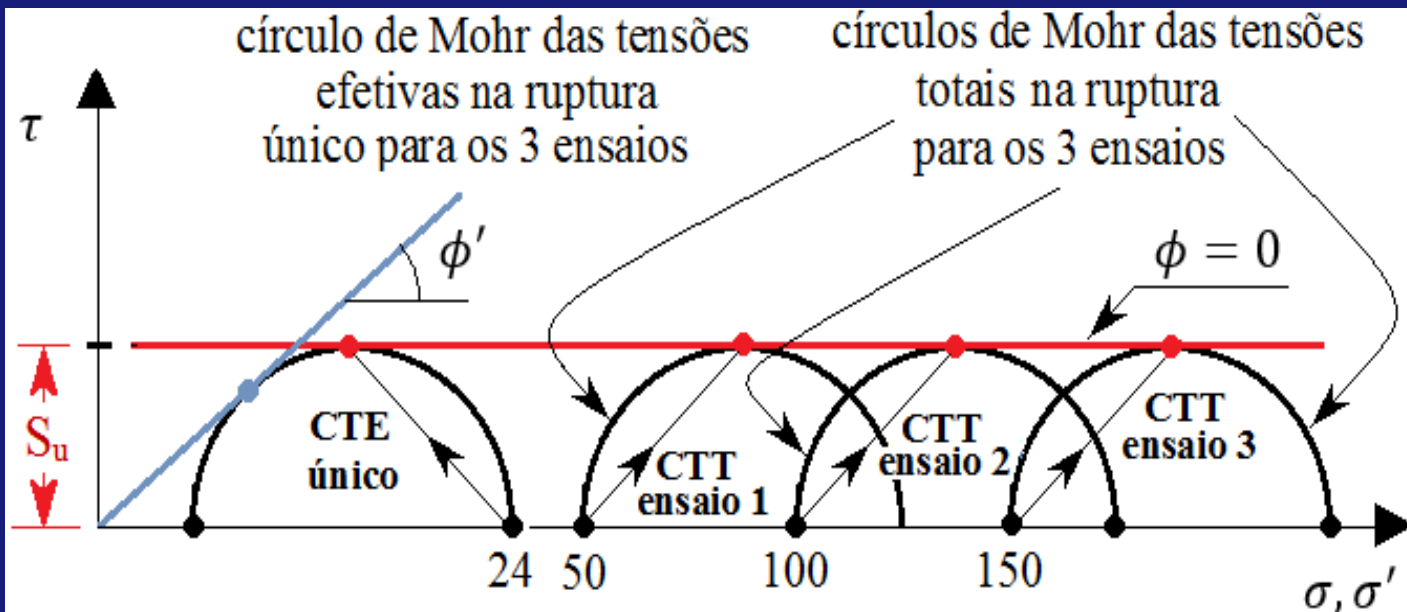
$$\sigma_v = \sigma_h = 0$$

$$u = -24 \text{ kPa} + 150 = 126 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma'_h = \sigma'_{oct} = 24 \text{ kPa}$$

Estado hidrostático  
de tensões com  
 $\sigma' = 24 \text{ kPa}$

- Os estados de tensão efetiva de partida de todos os ensaios são os mesmos, todos os corpos de prova apresentarão, qualquer que seja a tensão confinante, a mesma resistência.
- Os círculos de Mohr das tensões totais na ruptura, terão o mesmo diâmetro e estarão distantes entre si de um valor igual à diferença entre suas tensões confinantes.
- A envoltória em termos de tensões totais é horizontal ➡ “condição  $\phi = ZERO$ ”.



Por esta razão os **solos argilosos** eram chamados erroneamente de solos puramente coesivos

No caso, a resistência ao cisalhamento não é a coesão mas a resistência não-drenada ( $S_u$ )

## 6) Conclusão e resumo

- No sistema técnico as grandezas básicas são

Força - unidade quilograma força (kgf)

Comprimento – unidade metro (m)

Tempo – unidade segundo (s)

- No S.I. as grandezas básicas são

Massa - unidade quilograma (kg)

Comprimento – unidade metro (m)

Tempo – unidade segundo (s)

No S.I. a força é uma grandeza derivada da massa e da aceleração e sua unidade é o newton (N).

- $1 \text{ newton} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ kgf} = 9,81 \text{ N}$$



Daí vem a confusão entre kgf e kg → a força em kgf é numericamente igual à massa em kg.

- peso específico ( $\gamma = \rho g$ ) (peso / volume)  $\neq$  massa específica ( $\rho$ ) (massa / volume)  $\neq$  densidade (média) dos grãos (G) (adimensional)



- **Caminho de tensões** → representação gráfica dos sucessivos estados de tensão pelos quais um corpo de prova passa durante um carregamento.
- **Trajectoria de tensões** → dois sistemas de curvas ortogonais entre si que dão as direções das tensões principais num sólido submetido a um carregamento.
- **Adensamento** → redução de volume ao longo do tempo - solo saturado - saída de água - resultado da transferência excessiva de poro-pressão - sob um carregamento - para a tensão efetiva.
- **Compressão** → redução de volume de um solo relacionada à variação do estado de tensões efetivas a que foi submetido, sem levar em consideração o tempo (curva de compressão edométrica).
- **Consolidação** → resfriamento e endurecimento do magma → formação das rochas ígneas. litificação ou petrificação (Rodrigues, 1976) dos sedimentos (diagênese) → rochas sedimentares.

➤ **Adensamento Isotrópico ou Hidrostático ?** ➡ Hidrostático, isotropia é uma propriedade da matéria e não de um estado de tensões.

➤ **Como os materiais rompem ?** Separação (tração) e Cisalhamento

➤ **Coesão verdadeira** resistência ao cisalhamento sob tensão efetiva NULA. Pode ser quantificada pela resistência à tração sob poro-pressão nula ou positiva .

➤ **Intemperização** ➡ rochas se transformam em solos ➡ **perda de coesão verdadeira**

➤ **Diagênese** ➡ **consolidação ou litificação** dos sedimentos ➡ **ganho de coesão verdadeira**

➤ **Coesão aparente** ➡ resistência decorrente das tensões efetivas positivas geradas por poro-pressões negativas. Exemplo ➡ torres dos castelos de areia.

- **Intercepto Efetivo de Coesão** → coeficiente linear da reta ajustada à envoltória de resistência (em geral curva) no domínio de tensões que interessam ao problema prático.
- **Intercepto Efetivo de Coesão** → não tem significado físico.
- **Resistência não-drenada ( $S_u$ )** → é por definição a metade da tensão desviadora na ruptura obtida em ensaios triaxiais não-drenados.
- **Resistência não-drenada** → no início da Mecânica dos Solos, quando não se conhecia o Princípio das Tensões Efetivas, os ensaios em solos argilosos saturados eram feitos de forma não-drenada e forneciam, em termos de tensões totais, uma envoltória horizontal. Isto fazia com que se pensasse que nestes solos  $\phi = ZERO$ , daí os solos argilosos saturados terem recebido o nome de solos puramente coesivos conceito errado à luz do PTE.

Esta palestra está baseada num artigo escrito para o livro comemorativo dos 80 anos do Professor Willy Lacerda.

Portanto, esta palestra é dedicada a ele pelos conhecimentos a mim transmitidos, pelo incentivo e por sua amizade.

Muito obrigado a todos pela atenção.

FIM