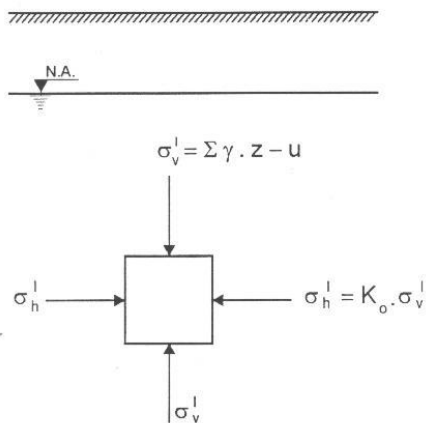


# Estado de Tensões no Solo e Critérios de Ruptura

Prof. Maristâni G. Spannenberg F.

## Coeficiente de Empuxo no Repouso



- **Situação geostática:** a superfície do terreno é horizontal e as poropressões são hidrostáticas.
- Os planos horizontais e verticais são planos principais.

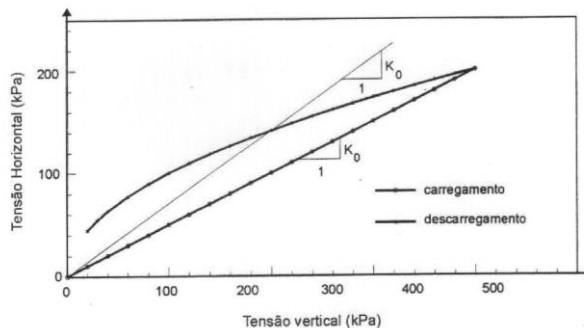
# Tensões Horizontais

## Coefficiente de Empuxo no Repouso – $K_0$

- A relação entre tensão horizontal efetiva e a tensão vertical efetiva é denominada coeficiente de empuxo no repouso e é indicada pelo símbolo  $K_0$ .
- O valor de  $K_0$  é normalmente menor do que a unidade, situando-se entre 0,4 a 0,5 para areias e 0,5 a 0,7 para as argilas.
- Resultados de laboratório indicam que ele é tanto maior quanto maior o índice de plasticidade do solo.

# Tensões Horizontais

## Estado de Tensões no Ensaio Edométrico



- O efeito da formação de um solo sedimentar é bem representado pelo ensaio de compressão edométrica.
- Nos dois casos, carregamentos verticais são feitos, sem que haja possibilidade de deformação lateral.

# Tensões Horizontais

## Influência da História de Tensões

- O sobre-adensamento age no sentido de impedir o alívio da tensão horizontal quando as tensões verticais são reduzidas.
- O coeficiente de empuxo em repouso é tanto maior quanto maior for a razão de sobre-adensamento (RSA), podendo mesmo ser superior a 1.
- A estimativa de  $K_0$  pode ser feita através da relação empírica ( $\varphi'$  é o ângulo de atrito do solo):

$$K_0 = (1 - \text{sen } \varphi') \cdot (RSA)^{\text{sen } \varphi'}$$

# Tensões Horizontais

## Solos Residuais

- As observações feitas até aqui só se aplicam a solos sedimentares. Solos residuais e solos que sofreram transformações pedológicas posteriores apresentam tensões horizontais que dependem das tensões internas originais da rocha ou do processo de evolução que sofreram. O valor de K, destes solos é de muito difícil avaliação.

# Tensões Atuantes em um Plano Genérico

Forças na direção normal ao plano considerado:

$$\sigma_{\alpha} \cdot A = \sigma_1 \cdot A \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cdot A \cdot \sin^2 \alpha$$

Forças na direção tangencial ao plano considerado:

$$\tau_{\alpha} \cdot A = \sigma_1 \cdot A \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \sigma_3 \cdot A \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

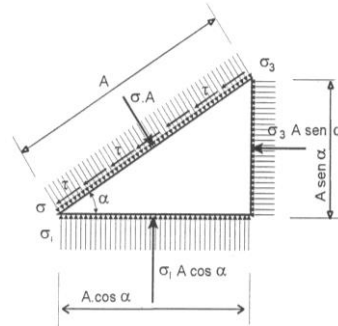
Transformações geométricas:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cdot \sin^2 \alpha$$

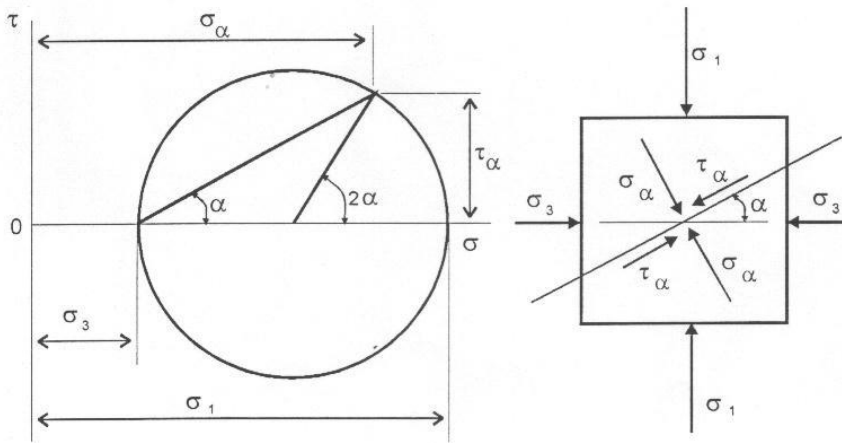
$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1}{2} \cdot (1 + \cos 2\alpha) + \frac{\sigma_3}{2} \cdot (1 - \cos 2\alpha) \quad \tau_{\alpha} = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos 2\alpha$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\alpha$$



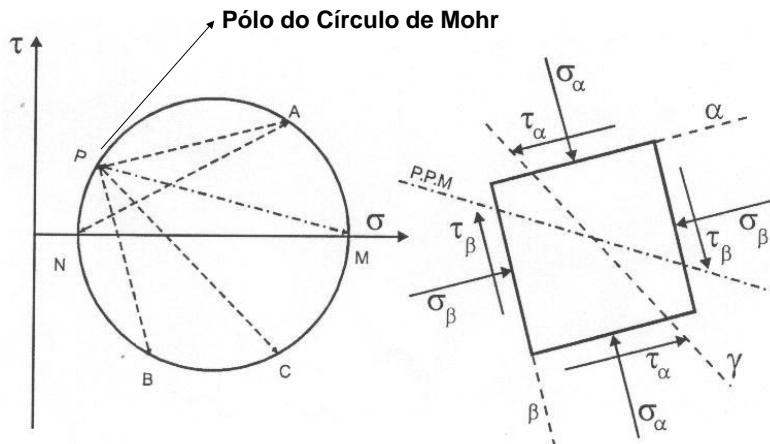
# Círculo de Mohr de Tensões



## Círculo de Mohr de Tensões

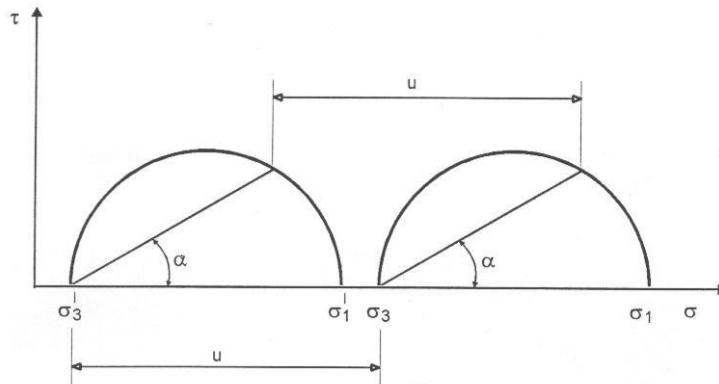
- Conclusões tiradas a partir do Círculo de Mohr:
  - Tensão de cisalhamento máxima: ocorre em planos que formam um ângulo de  $45^\circ$  com o plano principal maior; o seu valor é numericamente igual ao raio do círculo de Mohr, isto é .
  - Em planos ortogonais, as tensões de cisalhamento são numericamente iguais mas de sinais opostos.
  - Em dois planos formando o mesmo ângulo com o plano principal maior , mas com sentido contrário, ocorrem tensões normais iguais e tensões de cisalhamento numericamente iguais mas de sentido contrário.
  - Em Mecânica dos Solos raramente se considera o sinal das tensões de cisalhamento, bastando portanto a representação de metade do círculo de Mohr.

## Círculo de Mohr de Tensões



## Círculo de Mohr de Tensões

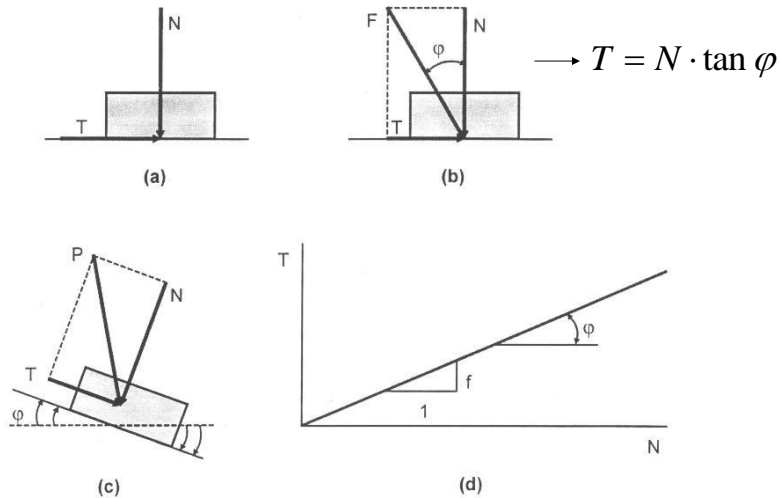
- O estado de tensões pode ser determinado tanto em termos de tensões totais como efetivas.



## A Resistência dos Solos

- A ruptura dos solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento. Só em condições especiais ocorrem rupturas por tensões de tração.
- A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo.
- Em termos físicos, a resistência ao cisalhamento depende da mobilização do ATRITO e da COESÃO disponíveis no plano onde atua a tensão cisalhante.

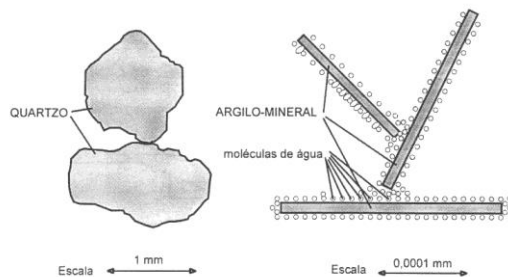
## Mobilização da Resistência ao Cisalhamento: Atrito



## Mobilização da Resistência ao Cisalhamento: Atrito

- O coeficiente de atrito é independente da área de contato e da força normal aplicada.
- O fenômeno de atrito nos solos se diferencia do fenômeno de atrito entre dois corpos, pois envolve um grande número de partículas.
- Existe também uma diferença entre as forças transmitidas nos contatos entre os grãos de areia e os grãos de argila

- Areia – contatos entre grãos expulsam a água;
- Argila – muitos contatos água adsorvidas – adensamento secundário.



## Mobilização da Resistência ao Cisalhamento: Coesão

- A atração química entre as partículas pode provocar uma resistência independente da tensão normal atuante no plano e que constitui uma coesão real.
- A parcela de coesão em solos sedimentares, em geral, é muito pequena perante a resistência devida ao atrito entre os grãos.
- Existem solos naturalmente cimentados por agentes diversos que apresentam parcelas de coesão real de significativo valor.
- **A coesão real deve ser bem diferenciada da coesão aparente.** A coesão aparente é, na realidade, um fenômeno de atrito, onde a tensão normal que a determina é conseqüente da pressão capilar.

## Critérios de Ruptura

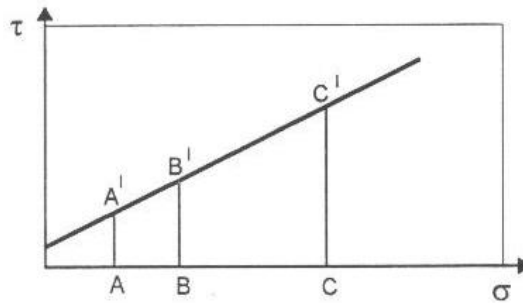
- Critérios de ruptura são formulações que procuram refletir as condições em que ocorre a ruptura dos materiais.
  - máximas tensões de compressão, de tração ou de cisalhamento
  - máximas deformações.
  - energia de deformação.
- A análise do estado de tensões que provoca a ruptura é o estudo da resistência ao cisalhamento dos solos.



# Critério de Coulomb

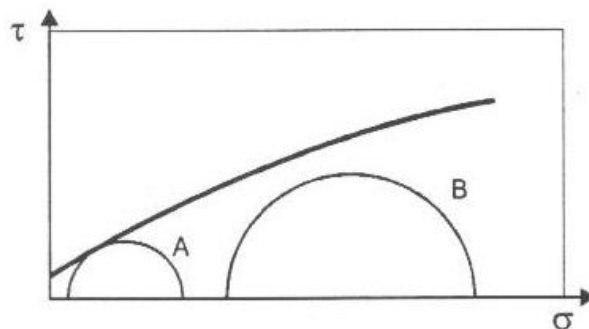
Não há ruptura se a tensão cisalhante atuante em um plano for menor que:  $\tau_{\max} = c + \sigma \cdot \tan \phi$

Onde  $\tau_{\max}$  é a máxima tensão de cisalhamento possível no plano (resistência),  $c$  é a coesão,  $\phi$  é o ângulo de atrito, e  $\sigma$  é a tensão normal ao plano.



# Critério de Mohr

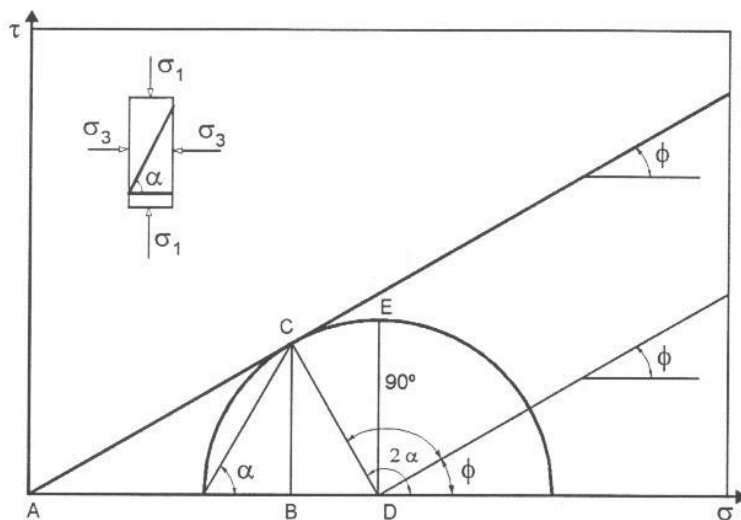
Há ruptura quando o círculo representativo do estado de tensões tangenciar uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura para o material, e é denominada envoltória de Mohr.



# Critério de Mohr

- Envoltórias de ruptura são geralmente curvas, que são, no entanto, de difícil aplicação. Por esta razão, são frequentemente substituídas por retas que melhor se ajustam à envoltória.
- Fazendo-se uma reta como a envoltória de Mohr, seu critério de resistência fica análogo ao de Coulomb, justificando a expressão **Critério de Mohr-Coulomb**

## Critério de Mohr-Coulomb



# Critério de Mohr-Coulomb

- EQUAÇÃO GERAL DA RUPTURA

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \left( \frac{1 + \operatorname{sen}\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} \right) + 2c \cdot \left( \frac{1 + \operatorname{sen}\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} \right)^{1/2}$$

- Se  $c = 0$ ,  $\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \left( \frac{1 + \operatorname{sen}\phi}{1 - \operatorname{sen}\phi} \right)$  ou  $\operatorname{sen}\phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$

- PLANO DE RUPTURA

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$$

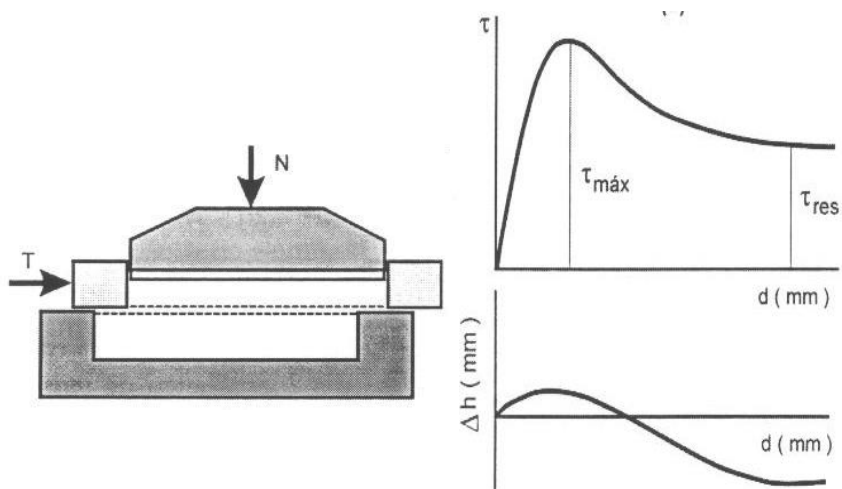
## Ensaio para Determinação da Resistência dos Solos

- **Ensaio de compressão não-confinada (compressão simples)**
- **Ensaio de cisalhamento direto**
- **Ensaio de compressão triaxial convencional**
- Ensaio de compressão triaxial verdadeiro
- Ensaio de cisalhamento simples
- Ensaio “ring shear”

## Ensaio de Cisalhamento Direto

- O ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Coulomb.

## Ensaio de Cisalhamento Direto



## Ensaio de Cisalhamento Direto



## Ensaio de Cisalhamento Direto

- Realizando-se ensaios com diversas tensões normais, obtém-se a envoltória de resistências de Mohr.
- A análise do estado de tensões durante o carregamento é bastante complexa. O plano horizontal, antes da aplicação das tensões cisalhantes, é o plano principal maior. Com a aplicação das forças  $T$ , ocorre rotação dos planos principais. As tensões só são conhecidas num plano.
- O ensaio de cisalhamento direto não permite a determinação de parâmetros de deformabilidade do solo (distorção).

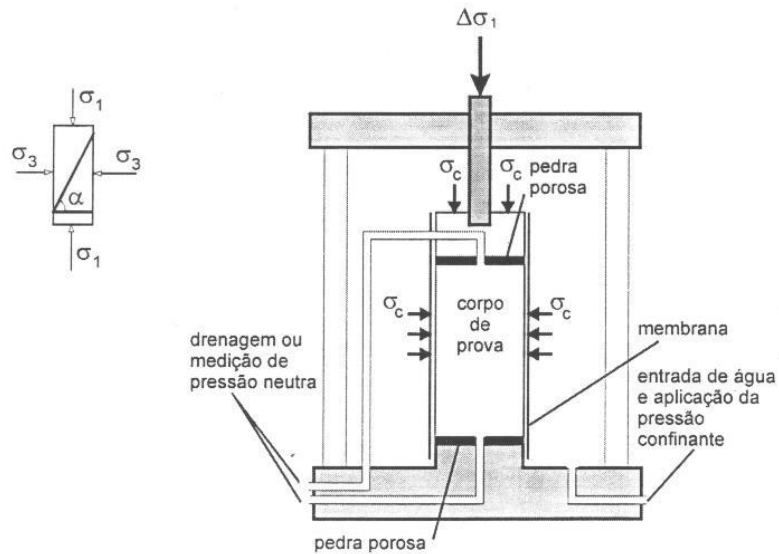
## Ensaio de Cisalhamento Direto

- O controle das condições de drenagem é difícil, pois não há como impedi-la. Ensaios em areias são feitos sempre de forma a que as pressões neutras se dissipem, e os resultados são considerados em termos de tensões efetivas. No caso de argilas, pode-se realizar ensaios drenados, que são lentos, ou não drenados. Neste caso, os carregamentos devem ser muito rápidos.
- O ensaio de cisalhamento direto é considerado menos interessante que o ensaio de compressão triaxial. Entretanto, pela sua simplicidade, ele é muito útil quando se deseja medir simplesmente a resistência, e, principalmente, quando se deseja conhecer a resistência residual.

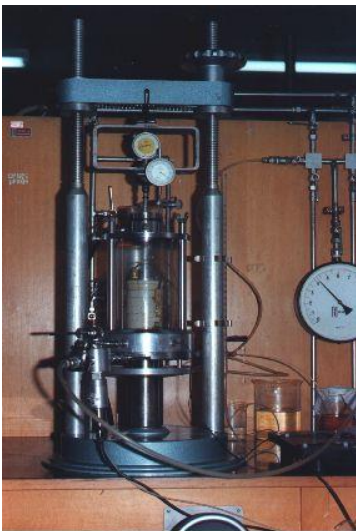
## Ensaio de Compressão Triaxial Convencional

- Consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico de solo (estado axissimétrico). Para tanto, o corpo de prova é colocado no interior de uma câmara de ensaio, chamada câmara triaxial.

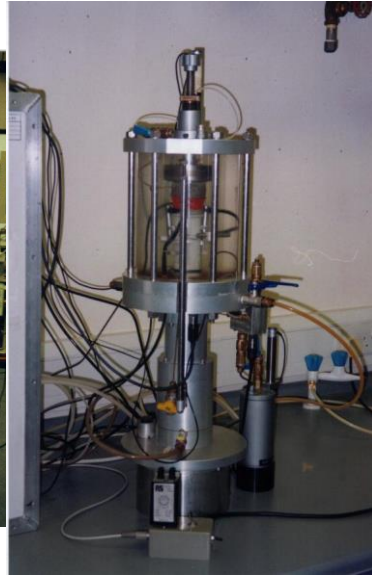
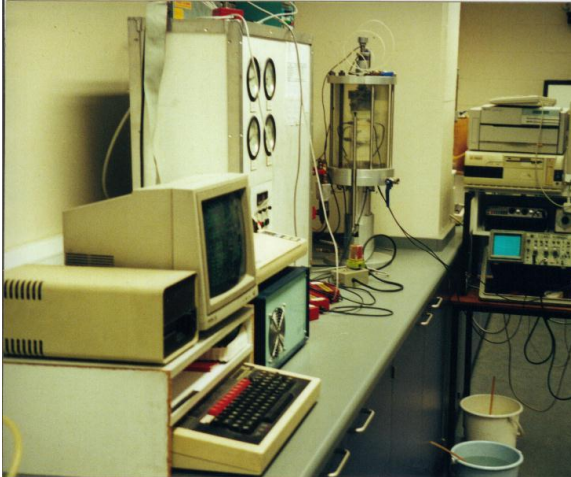
## Ensaio de Compressão Triaxial Convencional



## Ensaio de Compressão Triaxial Convencional



## Ensaio de Compressão Triaxial Convencional



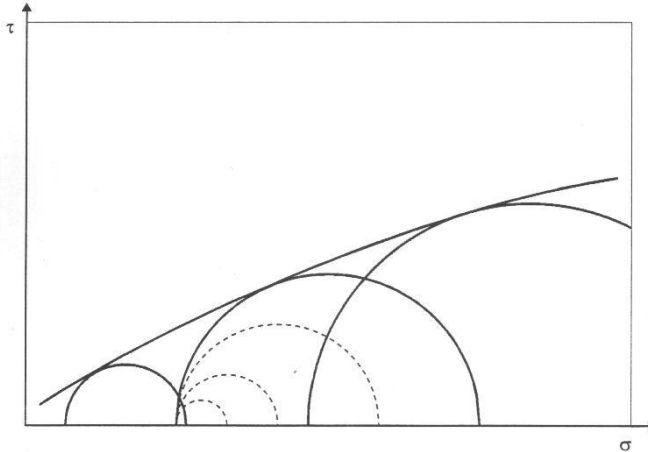
## Ensaio de Compressão Triaxial Convencional

- Os planos horizontais e verticais são os planos principais. Se o ensaio é de carregamento, o plano horizontal é o plano principal maior. No plano vertical, o plano principal menor, atua a pressão confinante.
- A tensão devida ao carregamento axial é denominada tensão desviadora.
- Durante o carregamento, medem-se, a diversos intervalos de tempo, o acréscimo de tensão axial que está atuando e a deformação vertical do corpo de prova. Esta deformação vertical é dividida pela altura inicial do corpo de prova, dando origem à deformação axial, em função da qual se expressam as tensões desviadoras, bem como as variações de volume ou de pressão neutra.
- A tensão desviadora é representada em função da deformação axial, indicando o valor máximo, que corresponde à ruptura, a partir do qual fica definido o círculo de Mohr, correspondente à situação de ruptura.



## Ensaio de Compressão Triaxial Convencional

- Envoltória de ruptura determinada a partir de um ensaio triaxial convencional:



## Ensaio de Compressão Triaxial Convencional

- Na base do corpo de prova e no cabeçote superior são colocadas pedras porosas, permitindo-se a drenagem através destas peças, que são permeáveis. A drenagem pode ser impedida por meio de registros apropriados.
- Se a drenagem for permitida e o corpo de prova estiver saturado ou com elevado grau de saturação, a variação de volume do solo durante o ensaio pode ser determinada pela medida do volume de água que sai ou entra no corpo de prova.
- No caso de solos secos, a medida de variação de volume só é possível com a colocação de sensores no corpo de prova, internamente à câmara.
- Se a drenagem não for permitida, em qualquer fase do ensaio, a água ficará sob pressão. As pressões neutras induzidas pelo carregamento podem ser medidas por meio de transdutores conectados aos tubos de drenagem.

## Tipos de Ensaio Triaxiais Convencionais

- **Ensaio adensado drenado (CD)**
  - Há permanente drenagem do corpo de prova.
  - Aplica-se a pressão confinante e espera-se que o corpo de prova adense, ou seja, que a pressão neutra se dissipe.
  - A seguir, a tensão axial é aumentada lentamente, para que a água sob pressão possa sair.
  - A pressão neutra durante todo o carregamento é praticamente nula, e as tensões totais aplicadas indicam as tensões efetivas que estavam ocorrendo. A quantidade de água que sai do corpo de prova durante o carregamento axial pode ser medida e, se o corpo de prova estiver saturado, indica a variação de volume.

## Tipos de Ensaio Triaxiais Convencionais

- **Ensaio adensado não drenado (CU)**
  - Aplica-se a pressão confinante e deixa-se dissipar a pressão neutra correspondente.
  - A seguir, carrega-se axialmente sem drenagem.
  - Este ensaio indica a resistência não drenada em função da tensão de adensamento.
  - Se as pressões neutras forem medidas, a resistência em termos de tensões efetivas também é determinada.

## Tipos de Ensaio Triaxiais Convencionais

- **Ensaio não adensado não drenado (UU)**
  - Neste ensaio, o corpo de prova é submetido à pressão confinante e, a seguir, ao carregamento axial, sem que se permita qualquer drenagem.
  - O teor de umidade permanece constante, e, se o corpo de prova estiver saturado, não haverá variação de volume.
  - O ensaio é geralmente interpretado em termos de tensões totais.