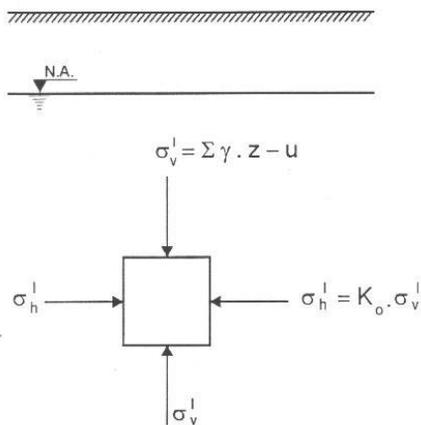


Estado de Tensões no Solo e Critérios de Ruptura

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.

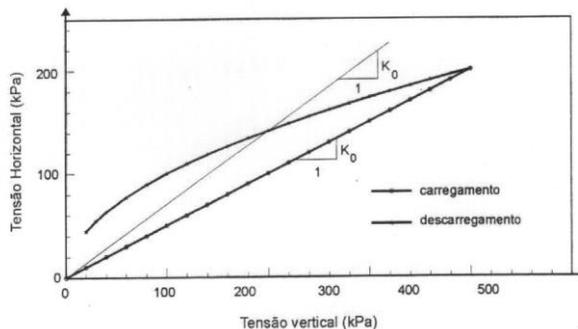
Tensões Horizontais

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 (φ' 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:

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

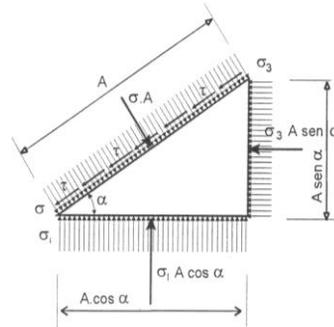
Transformações geométricas:

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

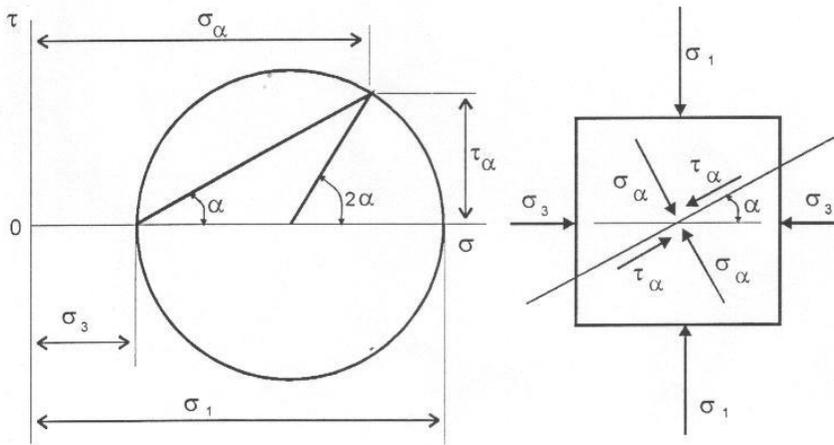
$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1}{2} \cdot (1 + \cos 2\alpha) + \frac{\sigma_3}{2} \cdot (1 - \cos 2\alpha) \quad \tau_{\alpha} = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

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

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



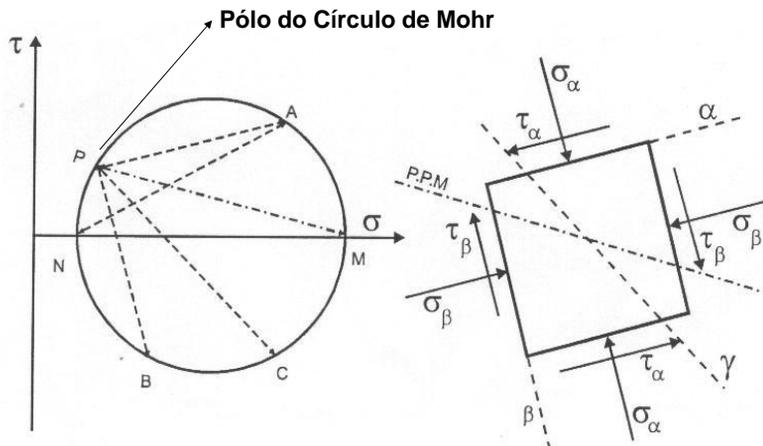
Círculo de Mohr de Tensões



Círculo de Mohr de Tensões

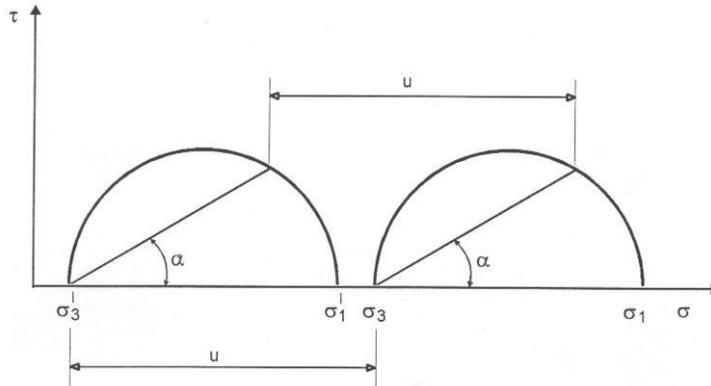
- Conclusões tiradas a partir do Círculo de Mohr:
 - Tensão de cisalhamento máxima: ocorre em planos que formam um ângulo de 45° com o plano principal maior; o seu valor é numericamente igual ao raio do círculo de Mohr, isto é .
 - Em planos ortogonais, as tensões de cisalhamento são numericamente iguais 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

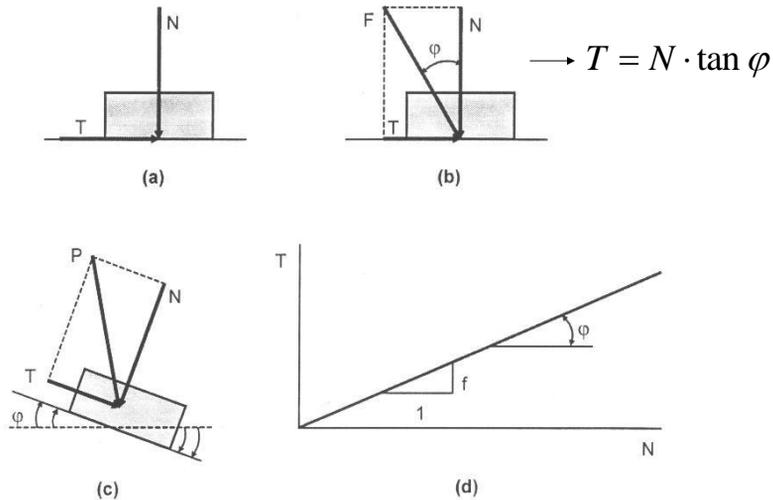
- O estado de tensões pode ser determinado tanto em termos de tensões totais como efetivas.



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.

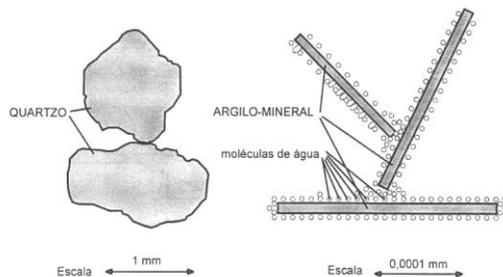
Mobilização da Resistência ao Cisalhamento: Atrito



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.

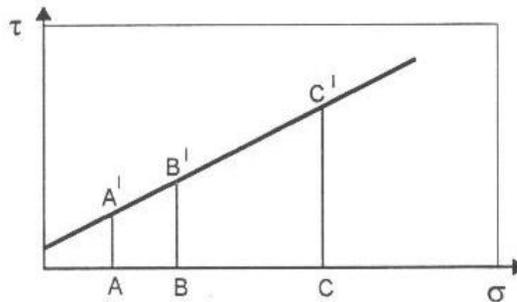
Critérios de Ruptura

- 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

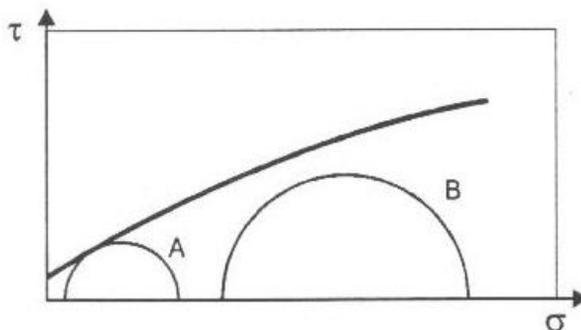
Não há ruptura se a tensão cisalhante atuante em um plano for menor que: $\tau_{\max} = c + \sigma \cdot \tan \phi$

Onde τ_{\max} é a máxima tensão de cisalhamento possível no plano (resistência), c é a coesão, ϕ é o ângulo de atrito, e σ 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-Coulomb

- EQUAÇÃO GERAL DA RUPTURA

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

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

- PLANO DE RUPTURA

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

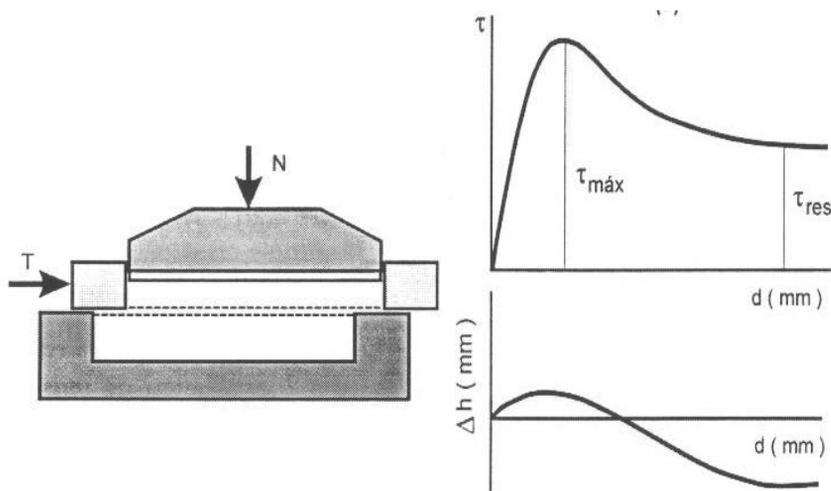
Ensaio para Determinação da Resistência dos Solos

- **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).

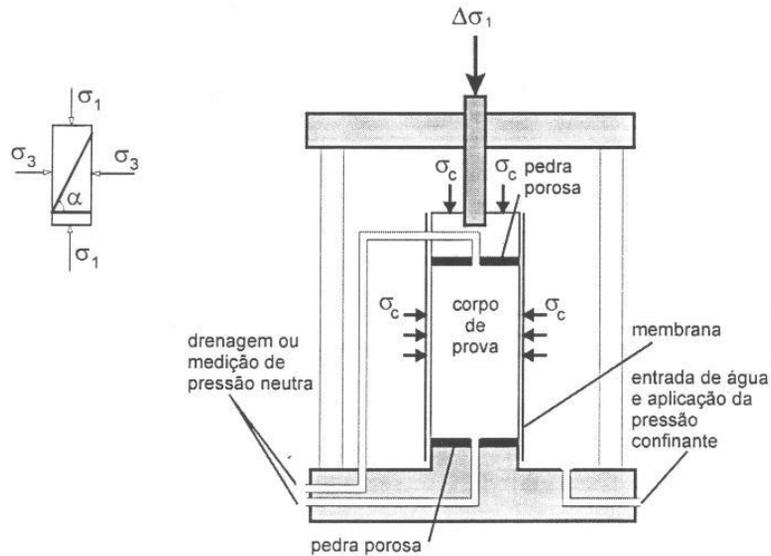
Ensaio de Cisalhamento Direto

- 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.

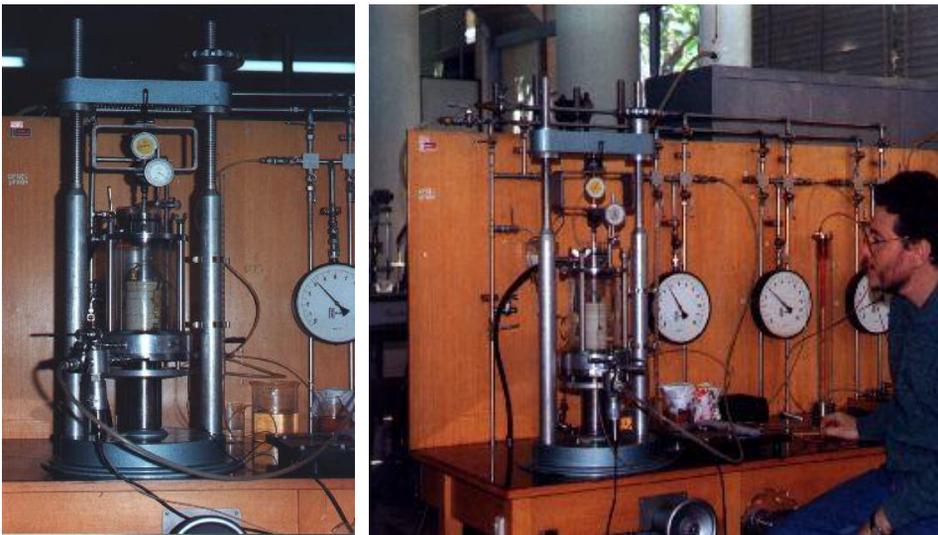
Ensaio de Compressão Triaxial Convencional

- 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.

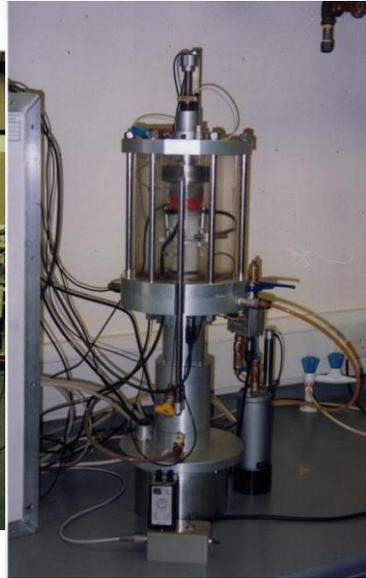
Ensaio de Compressão Triaxial Convencional



Ensaio de Compressão Triaxial Convencional



Ensaio de Compressão Triaxial Convencional

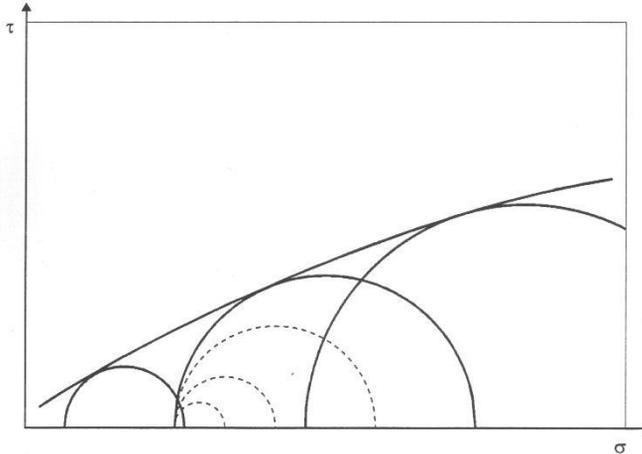


Ensaio de Compressão Triaxial Convencional

- 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.