

19^a AULA

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO
DAS ARGILAS DRENADAS SATURADAS**

1. Introdução

As argilas se diferenciam das areias por duas características principais, que têm conseqüências fundamentais em seu comportamento.

A primeira é sua baixa permeabilidade e, portanto, apresentam drenagem bastante lenta. A dissipação das pressões neutras oriundas de carregamentos aplicados sobre a argila se dá muito lentamente, muito tempo após a aplicação do carregamento. Por essa razão é importante o conhecimento de sua resistência tanto em termos de carregamento drenado, simulando uma condição a muito longo prazo, como em termos de carregamento não drenado, situação que ocorre logo após o período construtivo.

Nesta aula será estudado o comportamento drenado das argilas, utilizando ensaios triaxiais adensados drenados e triaxiais adensados não drenados. Na aula 20 será estudado seu comportamento não drenado.

A segunda característica peculiar das argilas é que elas apresentam uma tensão de pré-adensamento, sendo o seu comportamento abaixo da tensão de pré-adensamento bastante distinto daquele acima da tensão de pré-adensamento.

Assim, em ensaios triaxiais adensados drenados, o comportamento tensão – deformação de uma argila depende da situação relativa da tensão confinante aplicada perante a sua tensão de pré-adensamento. Por este motivo, a seguir serão analisados

separadamente o comportamento para tensões confinantes acima da tensão de pré-adensamento (quando o corpo de prova está normalmente adensado na tensão de ensaio) e para tensões confinantes abaixo da tensão de pré-adensamento da amostra (quando o corpo de prova está sobreadensado).

2. Resistência de Argilas Normalmente Adensadas

Considere-se uma argila cuja relação índice de vazios em função da pressão hidrostática de adensamento seja a indicada na figura 1(a). Esta argila terá sido adensada, no passado, segundo a curva tracejada na figura, até uma tensão efetiva igual a 300 kPa que é a sua tensão de pré-adensamento no campo. Esta argila apresenta, atualmente, a curva de índice de vazios em função da tensão confinante indicada pela linha contínua.

Considere-se a realização de dois ensaios, com tensões confinantes de 400 e 800 kPa. Quando aplicadas estas tensões, os corpos de prova adensam sob os seus efeitos, e estarão normalmente adensados sob estes valores. Ao se fazer o carregamento axial, nestes ensaios, serão obtidas curvas com o aspecto mostrado na parte (b) da figura. O valor de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ cresce lentamente com a deformação axial, sendo que o máximo acréscimo de tensão é atingido a deformações específicas da ordem de 15 a 20%. Nota-se que os acréscimos de tensão são proporcionais às tensões confinantes, de forma que se os resultados forem apresentados como na figura 1(f), na qual as ordenadas indicam os acréscimos de tensão divididos pela tensão confinante do ensaio, as duas curvas se sobrepõem. Este tipo de representação é denominado gráfico normalizado.

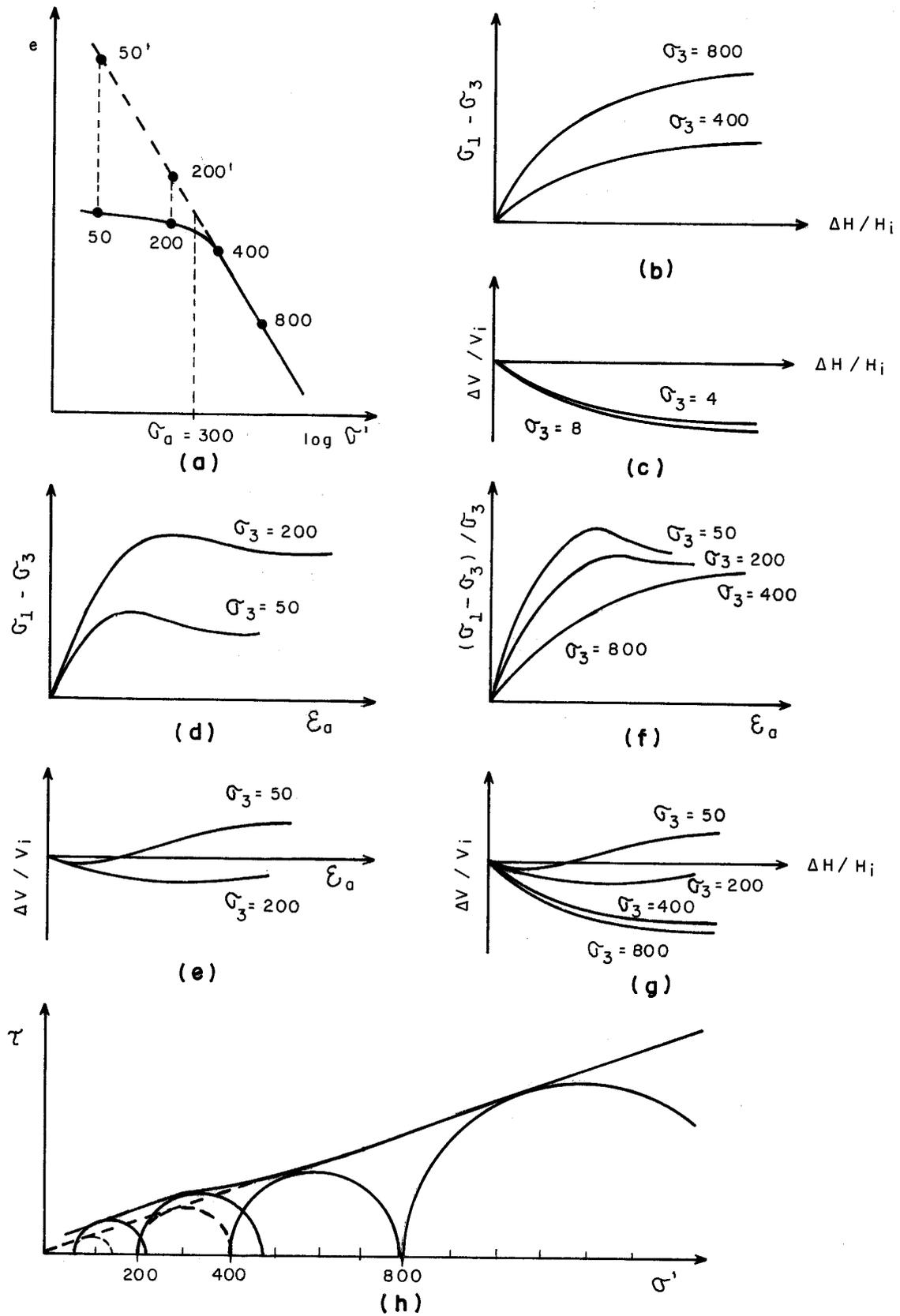


Fig. 1 – Resultados de ensaios triaxiais adensados drenados em argila saturada

Como consequência da proporcionalidade dos acréscimos de tensão com a tensão confinante, os círculos de Mohr representativos dos estados de tensão na ruptura são círculos que definem uma envoltória reta, cujo prolongamento passa pela origem, como indicado na figura 1(h). A resistência de uma argila, nestas condições, é, portanto, caracterizada somente por um ângulo de atrito e dada pela expressão:

$$\tau_{\max} = \sigma' \operatorname{tg}\varphi'$$

Por outro lado, observa-se que, durante o carregamento axial, o corpo de prova apresenta redução de volume, da mesma ordem de grandeza, sendo só ligeiramente maior para confinantes maiores. Este resultado está indicado nas figuras 1(c) e 1(g).

3. Resistência de Argilas Abaixo da Tensão de Pré-Adensamento

Considere-se agora que da amostra com tensão de pré-adensamento igual a 300 kPa, moldem-se dois corpos de prova para a realização de ensaios triaxiais adensados drenados, com tensões confinantes iguais a 50 e 200 kPa, portanto abaixo da tensão de pré-adensamento.

Considere-se, inicialmente, que se este solo não tivesse sido pré-adensado sob a tensão de 300 kPa, mas sim sob uma tensão menor do que 50, aos se fazerem os ensaios citados, os corpos de prova estariam, após o adensamento sob a tensão confinante, nas posições indicadas pelos símbolos 50' e 200' na figura 1(a). Neste caso, estes corpos de prova estariam normalmente adensados e os seus resultados seriam semelhantes aos dos corpos de prova ensaiados nas condições indicadas pelas tensões confinantes de 400 e 800, já estudados. Os resultados no gráfico normalizado (figura 1(f)) seriam os mesmos, e os círculos de Mohr na ruptura tangenciariam a envoltória retilínea que passa pela origem (figura 1(h)).

Entretanto, o pré-adensamento sob a pressão de 300 kPa fez com que estes corpos de prova ficassem nas condições 50 e 200 indicadas na parte (a) da figura, ou seja, com índices de vazios menores do que os correspondentes aos corpos de prova nas condições 50' e 200'. Menor índice de vazios significa maior proximidade entre as partículas, donde resulta um comportamento diferente que se manifesta pelos resultados indicados nas figuras 1(d) e 1(e).

É interessante usar aqui o conceito de razão de sobreadensamento. Define-se razão de sobreadensamento (RSA) como sendo a relação entre a tensão de pré-adensamento e a tensão efetiva atuante no solo. Seu valor é sempre igual ou superior a 1. Quando a argila é normalmente adensada, tem-se $RSA = 1$, uma vez que neste caso, a tensão de pré-adensamento é a própria tensão atuante.

A transposição dos resultados dos ensaios nas amostras sobreadensadas para o gráfico normalizado na figura 1(f) permite as seguintes observações:

- a) Quando o solo é ensaiado sob uma tensão confinante menor do que sua tensão de pré-adensamento, o crescimento da tensão axial em função da deformação se faz mais rapidamente, e o máximo acréscimo de tensão axial ocorre para menores deformações, tanto menores quanto maior a razão de sobreadensamento (no ensaio com confinante 50, $RSA = 6$, a deformação específica na ruptura é menor do que no ensaio com confinante 200, $RSA = 1,5$).
- b) O máximo acréscimo de tensão suportado é maior do que o 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 sobreadensamento.

- c) O máximo acréscimo de tensão é bem distinto, havendo sensível redução da tensão axial para maiores deformações.
- d) A diminuição de volume durante o carregamento axial é menos acentuada do que no caso do solo ser normalmente adensado, podendo ocorrer mesmo que o solo apresente um aumento de volume, após uma inicial redução, no caso da razão de sobreadensamento ser elevada. Geralmente, aumentos de volume correspondem a razões de sobreadensamento maiores do que 4, o que é o caso do ensaio com confinante 50 kPa, como se apresenta nas figuras 1(e) e 1(g).

Com base nos resultados acima discutidos, observa-se que o comportamento das argilas normalmente adensadas é bastante semelhante ao das areias fofas: lento acréscimo de tensão axial com a deformação e diminuição de volume durante o carregamento.

Por outro lado, o comportamento de argilas confinadas a tensão muito menores do que a tensão de pré-adensamento (razões de sobreadensamento superiores a 4) é bastante semelhante ao das areias compactas: acréscimos mais rápidos da tensão axial, resistência de pico para pequenas deformações específicas, queda de resistência após ter sido atingido o valor máximo e aumento de volume durante o processo de cisalhamento.

4. Envoltória e Valores Típicos de Resistência de Argilas

Uma argila, no estado natural, sempre apresenta uma tensão de pré-adensamento. Portanto, ao ser submetida a ensaios de compressão triaxial, alguns ensaios poderão ser feitos com tensões confinantes abaixo e outros com tensões confinantes acima da tensão de pré-adensamento. O resultado final é aquele indicado na figura 1(h).

A envoltória de resistência é uma curva até a tensão de pré-adensamento, e uma reta, cujo prolongamento passa pela origem, acima desta tensão.

Não sendo prático se trabalhar com envoltórias curvas, costuma-se substituir o trecho curvo da envoltória por uma reta que melhor o represente. Há, naturalmente, várias retas possíveis, devendo-se procurar a reta que melhor se ajuste à envoltória, no nível das tensões do problema prático que se estiver estudando. Esta envoltória retilínea, como a indicada na Figura 2, é então definida pela equação:

$$\tau_{\max} = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$$

sendo c' chamado de coesão efetiva, ou, mais apropriadamente, intercepto de coesão efetiva. Note-se que o intercepto de coesão não tem significado físico de coesão, mas, na realidade, é somente o coeficiente linear da reta que se ajustou à envoltória curvilínea.

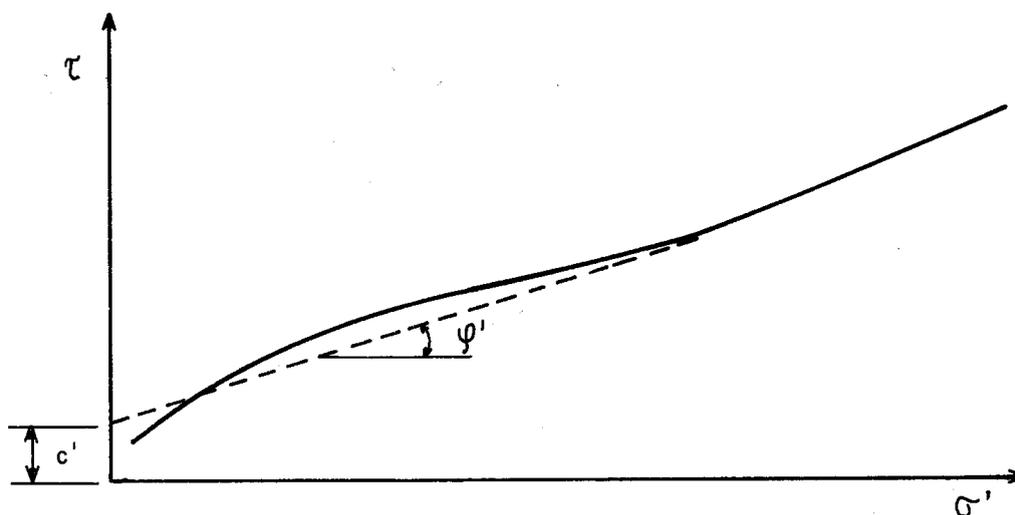


Fig. 2 - Ajuste de equação linear à envoltória de resistência curva

A Figura 3 a seguir mostra que o intercepto de coesão é tanto maior quanto maior a tensão de pré-adensamento do solo.

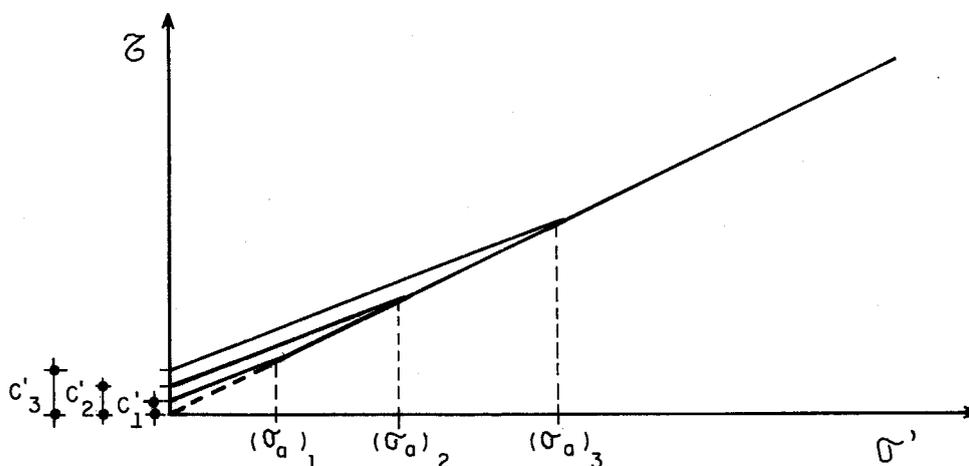


Fig. 3 – Influência da pressão de pré-adensamento no valor do intercepto de coesão

Acima da tensão de pré-adensamento, a resistência das argilas caracteriza-se somente pelo ângulo de atrito efetivo. O seu valor é variável conforme a constituição da argila, mas se observa que, em geral, ele é tanto menor quanto mais argiloso é o solo, como mostra a figura 4, onde se tem a variação do $\text{sen } \varphi'$ com o IP do solo.

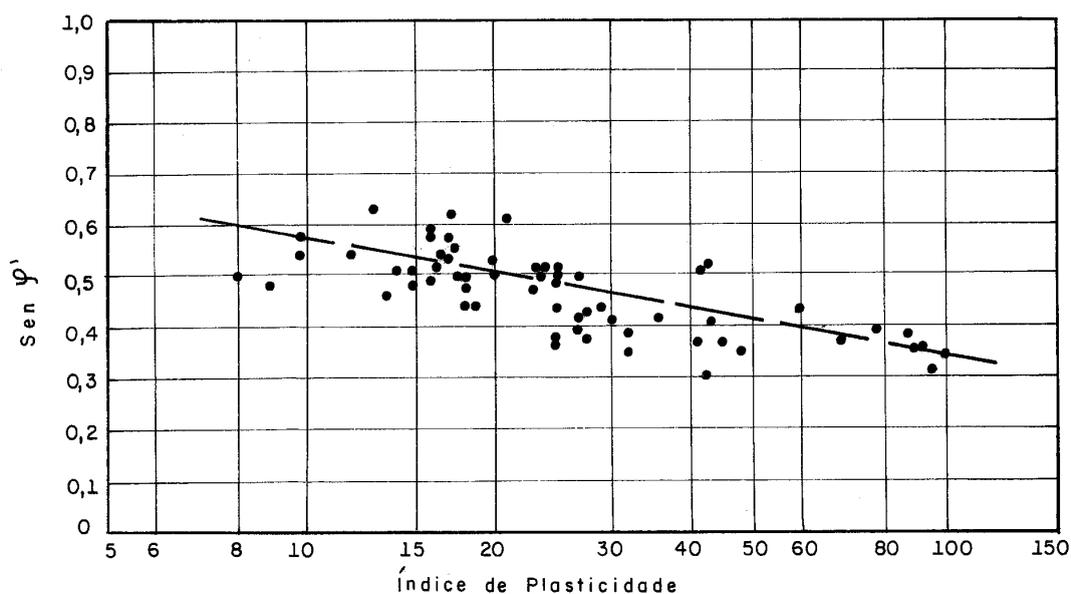


Fig. 4 – Variação do $\text{sen } \varphi'$ com o Índice de Plasticidade para argilas normalmente adensadas

5. Obtenção da Envoltória de Resistência por Meio de Ensaio Adensados Não Drenados

A obtenção, para argilas, da envoltória efetiva de resistência indicada na figura 1(h), por meio de ensaios adensados drenados, é extremamente demorada (vários dias ou até semanas), particularmente na segunda fase de ensaio, correspondente ao carregamento axial. Por essa razão esse ensaio era também conhecido no passado como ensaio triaxial lento. Felizmente, essa envoltória pode também ser obtida por meio de ensaios adensados não drenados, cuja fase de carregamento axial é bem menos demorada (algumas horas).

No ensaio adensado não drenado, o corpo de prova, como visto, é inicialmente submetido à pressão confinante e sob ela adensado. Isto em geral requer um dia de ensaio. Ao final deste procedimento a tensão efetiva de confinamento é igual à pressão confinante aplicada; a pressão neutra é nula. A seguir, o sistema de drenagem é fechado e o carregamento axial aplicado. Em argilas saturadas, este ensaio pode ser considerado como ensaio sem variação de volume ou ensaio a volume constante.

Considere-se, como foi feito para o estudo da resistência das argilas em ensaio drenado, uma argila saturada cuja relação do índice de vazios em função da pressão hidrostática de adensamento seja a indicada na Figura 5(a).

a) Argilas normalmente adensadas

Considere-se a realização de ensaio com pressão confinante acima da tensão de pré-adensamento, a pressão de 400 kPa, por exemplo. Após a aplicação da pressão confinante e do adensamento correspondente, o corpo de prova se encontra como se o ensaio fosse do tipo adensado drenado. Neste ensaio, ele apresentaria o

comportamento estudado anteriormente, reproduzido na figura 6(a): diminuição de volume durante o carregamento axial e nenhuma pressão neutra, pois havia drenagem.

No ensaio adensado não drenado agora considerado, não há drenagem. Em conseqüência, o carregamento axial provoca o aparecimento de pressão neutra. Esta, por sua vez, reduz a tensão confinante efetiva sobre o corpo de prova. A redução da tensão efetiva diminui a resistência da argila e, em conseqüência, como mostrado na figura 6(a), o acréscimo de tensão suportado é menor do que seria no ensaio adensado drenado para as mesmas deformações específicas.

Este comportamento se mantém até que, na ruptura, o acréscimo de tensão axial é menor do que o do ensaio adensado drenado, a pressão neutra é positiva e não há variação de volume.

Comportamento semelhante é observado em ensaios com outras pressões confinantes acima da tensão de pré-adensamento, como se mostra nas figuras 5(b) e 5(c). Tanto os máximos acréscimos de tensão axial como as pressões neutras na ruptura são proporcionais às pressões confinantes. Desta forma, se os resultados forem apresentados em gráficos normalizados (as tensões divididas pela pressão confinante), como se mostra na figuras 5(f) e 5(g), para ensaios com confinante de 400 e 800 kPa, as curvas se confundem.

Da proporcionalidade entre o máximo acréscimo de tensão axial e a pressão confinante resulta que os círculos de Mohr representativos do estado de tensões totais na ruptura determinam, como envoltória, uma reta, cujo prolongamento passa pela origem, como se mostra na figura 5(h). A envoltória, portanto, acima da pressão de pré-adensamento, caracteriza-se só por um ângulo de atrito interno ϕ .

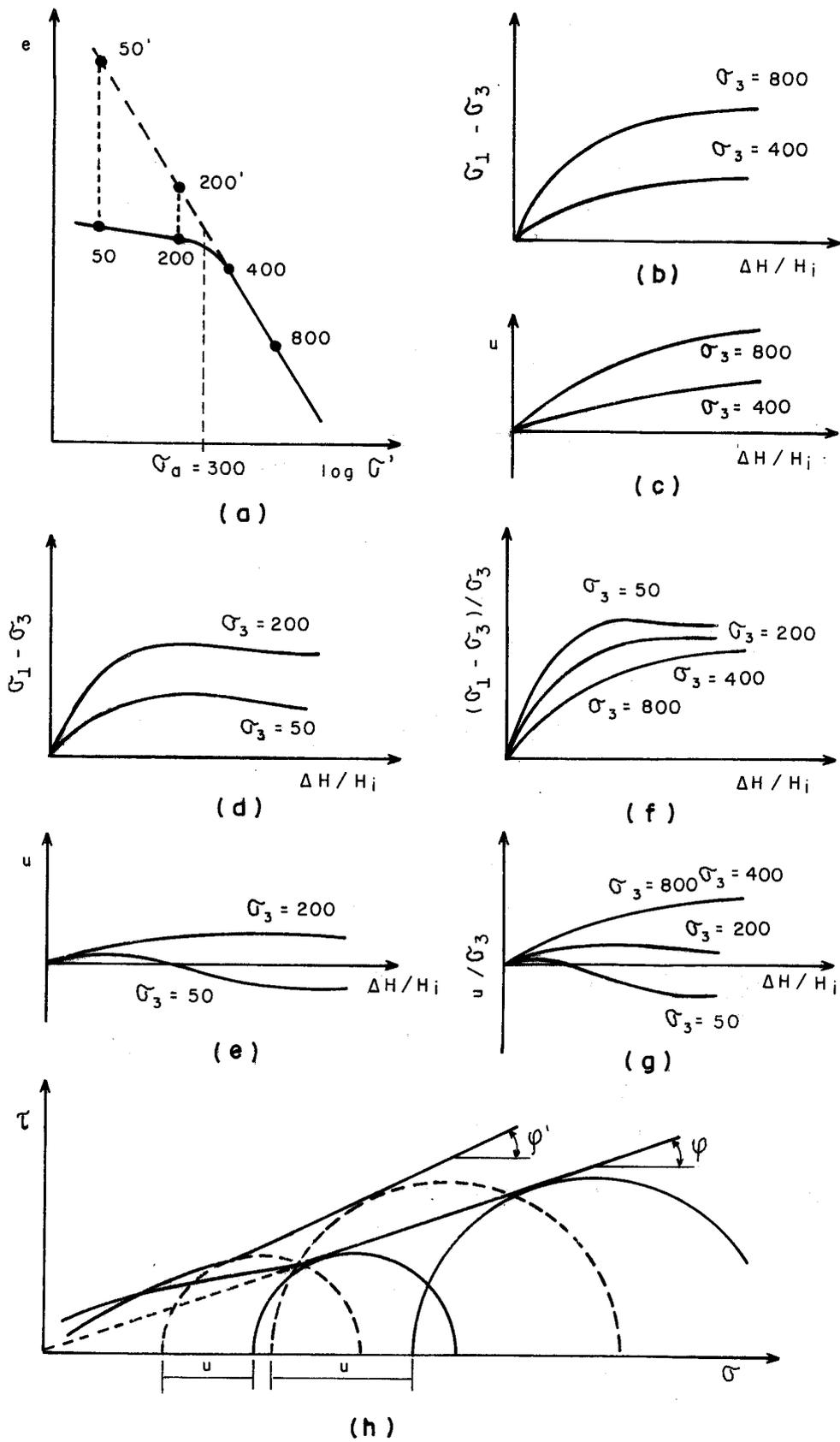


Fig. 5 – Resultados de ensaios triaxiais adensados não drenados em argila saturada

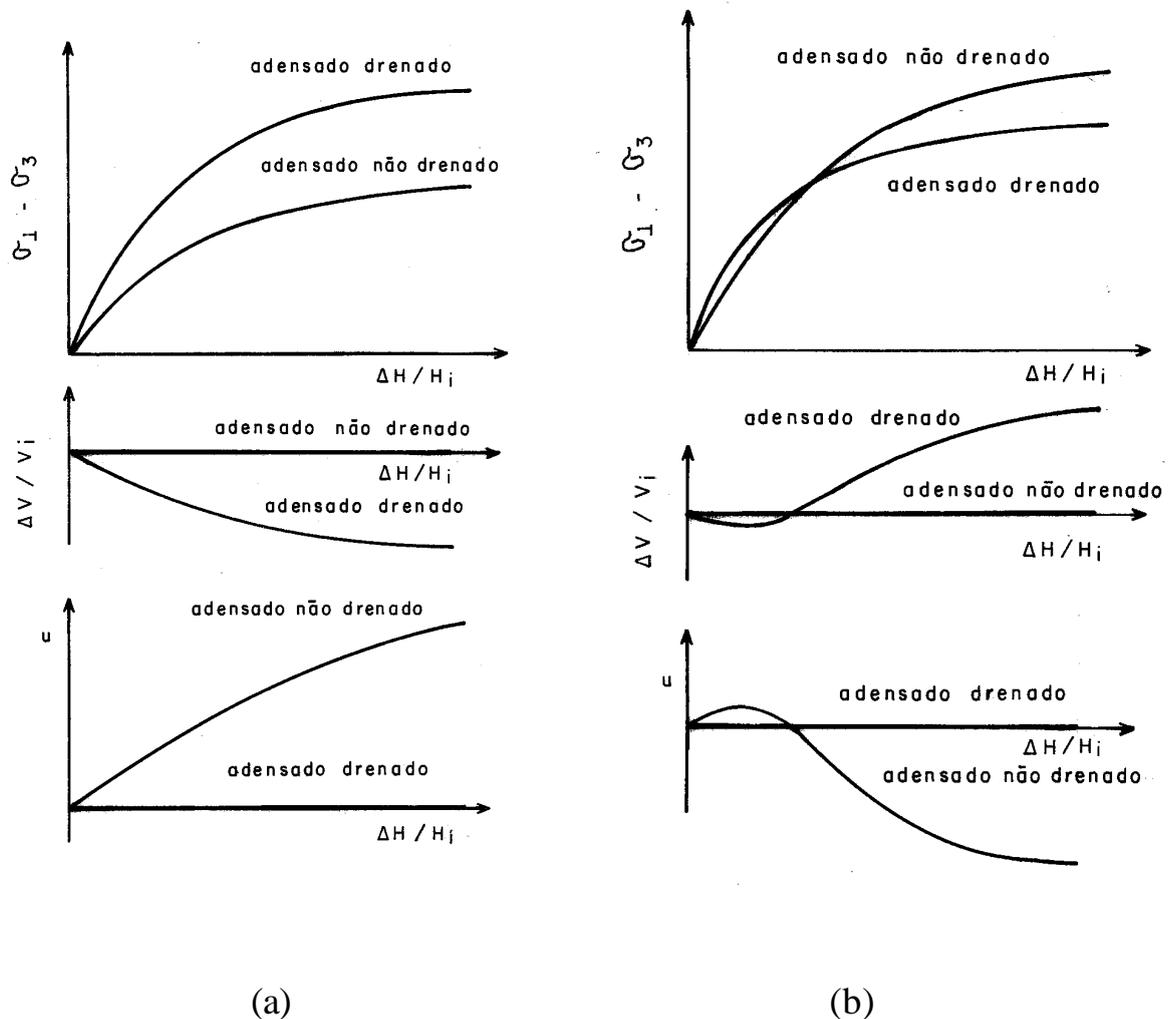


Fig. 6 – Comparação entre o comportamento de argila em carregamento axial em ensaio adensado drenado e em ensaio adensado não drenado, estando o solo (a) normalmente adensado ou (b) muito sobreadensado.

Quando o ensaio é feito com medida das pressões neutras, ficam conhecidas as tensões efetivas na ruptura. Representando-se os círculos de Mohr em termos de tensões efetivas (que são círculos de diâmetro igual aos das tensões totais deslocados para a esquerda do valor da pressão neutra), pode-se determinar a envoltória de resistência em termos de tensões efetivas, como se mostra na figura 5(h). Esta envoltória é igual à envoltória obtida nos ensaios adensados drenados e é caracterizada pelo ângulo de atrito interno efetivo ϕ' .

b) Argilas sobreadensadas

Quando a tensão confinante de ensaio é menor do que a tensão de pré-adensamento do solo, após a primeira etapa do ensaio, quando o corpo de prova é adensado sob a pressão de confinamento, o solo se encontra sobreadensado. Isto acontece quando, no exemplo apresentado na Figura 5, a pressão confinante é igual a 200 kPa.

Se o carregamento axial, após o adensamento, fosse feito com drenagem, este corpo de prova apresentaria uma diminuição de volume menor do que no caso do solo na condição normalmente adensada, como visto anteriormente. Não havendo drenagem, ocorre um desenvolvimento de pressão neutra, só que ela será menor que a que se desenvolveria se amostra estivesse normalmente adensada, pois menor é a tendência de redução de volume que foi impedida. O resultado típico, nestas condições, é o apresentado na figura 5(e), para a situação correspondente à pressão de 200kPa.

Quando a tensão confinante é muito menor do que a tensão de pré-adensamento, no ensaio adensado drenado, ocorre aumento de volume durante o carregamento axial, o que provoca a entrada de água no corpo de prova. No ensaio adensado não drenado, não havendo drenagem, a água nos vazios do solo fica submetida a um estado de tensão de tração (da mesma maneira como ocorre numa seringa de injeção quando se puxa o pistão sem permitir a entrada de líquido). É o caso do ensaio com tensão confinante igual a 50 kPa, no exemplo mostrado na figura 5, estando o desenvolvimento da pressão neutra indicado nas figuras 5(e) e 5(g).

Água sob pressão de tração significa pressão neutra negativa. Logo, a tensão confinante efetiva aumenta de igual valor. A este aumento de tensão confinante efetiva corresponde um aumento de resistência e, em conseqüência, o acréscimo de

tensão axial suportado é maior do que seria no ensaio adensado drenado, para as mesmas deformações específicas. Comparação entre os dois ensaios para a mesma pressão confinante está indicada na figura 6(b). Na ruptura, o acréscimo de tensão no ensaio adensado não drenado é maior do que no ensaio adensado drenado, a pressão neutra é negativa e, naturalmente, não há variação de volume.

Se os resultados dos ensaios adensados não drenados forem interpretados em termos de tensões totais, como se mostra na figura 5(h), constata-se que a envoltória de resistência se apresenta como uma curva para tensões abaixo da pressão de pré-adensamento.

Comparando-se as duas envoltórias, observa-se que a envoltória em tensões totais dos ensaios adensados não drenados fica acima da envoltória em tensões efetivas, para tensões normais pequenas, justamente no caso em que a pressão neutra é negativa no ensaio adensado não drenado ou que a variação de volume é de dilatação no ensaio adensado drenado.

Também no trecho sobreadensado, a envoltória em tensões efetivas dos ensaios adensados não drenados é a mesma da dos ensaios adensados drenados. Em resumo, independentemente do tipo de ensaio, a envoltória efetiva de resistência da argila é única.

Por essa razão, os ensaios adensados não drenados com medida de pressão neutra são empregados, com muita freqüência, para a determinação da resistência em termos de tensões efetivas. Como dito anteriormente, são muito mais rápidos e menos dispendiosos do que os ensaios adensados drenados.

6. Expressões válidas para argilas

a) Trecho normalmente adensado

Para tensões superiores à tensão de pré-adensamento, a envoltória efetiva de resistência, independentemente do tipo de ensaio utilizado para determiná-la, é dada por:

$$\tau_{\max} = \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$$

São válidas ainda as seguintes expressões:

- Para os ensaios adensados drenados:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}}{\sigma_3} = \operatorname{cons} \tan \varphi'$$

$$\operatorname{sen} \varphi' = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

- Para os ensaios adensados não drenados:

$$\tau_{\max} = \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}}{\sigma_3} = \operatorname{cons} \tan \varphi$$

$$\operatorname{sen} \varphi' = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} = \frac{(\sigma_1 - u) - (\sigma_3 - u)}{(\sigma_1 - u) + (\sigma_3 - u)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2u}$$

$$\operatorname{sen} \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

b) Trecho sobreadensado

No trecho sobreadensado, a envoltória efetiva de resistência, independentemente do tipo de ensaio utilizado para determiná-la, é dada pela equação:

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

e para os ensaios adensados não drenados, em termos de tensões totais vale a seguinte expressão:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

Obviamente, não são mais válidas as expressões que indicam a proporcionalidade entre os acréscimos de tensão e a pressão confinante nos dois tipos de ensaios e a proporcionalidade entre a pressão neutra e a pressão confinante no ensaio adensado não drenado.