

Aparato para a Realização de Ensaios Triaxiais Verdadeiros, com Capacidade Dinâmica.

João Luiz Armelin

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., Goiânia, GO, Brasil, armelin@furnas.com.br

RESUMO: A validação de modelos constitutivos tem-se constituído em um importante esforço realizado nas últimas duas décadas e envolve uma forte interação e mútua realimentação entre as atividades analíticas e experimentais. Modelos gerais de ruptura e de comportamento tensão-deformação requerem a variação independente das tensões principais e para tanto, as formas cúbica e prismática surgem como soluções óbvias. Os resultados experimentais obtidos em ensaios triaxiais verdadeiros têm-se tornado referências na avaliação das capacidades dos modelos analíticos e a possibilidade de conduzir esses ensaios em espécimes cúbicos ou prismáticos tornou-se exequível a partir dos anos 60. Por outro lado, muitos projetos de engenharia geotécnica são elaborados considerando-se ações dinâmicas cíclicas, que atuarão durante toda a vida útil da obra e necessário se faz o estudo do comportamento do solo sob essas condições. Ressalta-se que a resposta do solo a esse tipo de solicitação é muito mais complexa do que aquelas que se obtêm quando se conduzem análises estáticas, o que requer a investigação do comportamento dinâmico dos solos no laboratório e no campo. No ambiente de laboratório, o ensaio triaxial apresenta-se como um método conveniente e versátil para se atingir o conhecimento do comportamento dos solos e pode ser realizado com carregamentos estáticos ou dinâmicos. Este artigo trata da análise de diferentes tipos de sistemas para a realização de ensaios triaxiais verdadeiros com base nos três tipos de fronteiras neles utilizados e, principalmente, da apresentação de um aparato desse tipo, porém com a capacidade adicional de aplicar solicitações dinâmicas segundo dois eixos, constituindo-se em um sistema de ensaios que amplia significativamente os limites da experimentação em solos sob as mais variadas solicitações.

PALAVRAS CHAVE: Solos, Triaxial Verdadeiro, Capacidade Dinâmica, Modelos de comportamento.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas para a realização de ensaios triaxiais verdadeiros teve início nos anos 30 mas, foi somente nos anos 70, com o advento dos computadores e sistemas de controle e aquisição de dados é que esses sistemas foram difundidos. Por outro lado, a validação de modelos constitutivos tem-se constituído em um importante esforço realizado nas últimas duas décadas e envolve uma forte interação e mútua realimentação entre as atividades analíticas e experimentais.

Modelos gerais de ruptura e de comportamento tensão-deformação requerem a variação independente das tensões principais e para tanto, as formas cúbica e prismática

surgem como soluções óbvias. Os resultados experimentais obtidos em ensaios triaxiais verdadeiros têm-se tornado referências na avaliação das capacidades dos modelos analíticos e a possibilidade de conduzir esses ensaios em espécimes cúbicos ou prismáticos tornou-se exequível a partir dos anos 60. Por outro lado, muitos projetos de engenharia geotécnica são elaborados considerando-se ações dinâmicas cíclicas, que atuarão durante toda a vida útil da obra e necessário se faz o estudo do comportamento do solo sob essas condições. Ressalta-se que a resposta do solo a esse tipo de solicitação é muito mais complexa do que aquelas que se obtêm quando se

conduzem análises estáticas, o que requer a investigação do comportamento dinâmico dos solos no laboratório e no campo.

No ambiente de laboratório, o ensaio triaxial apresenta-se como um método conveniente e versátil para se atingir o conhecimento do comportamento dos solos e pode ser realizado com carregamentos estáticos ou dinâmicos. Este artigo trata da análise de diferentes tipos de sistemas para a realização de ensaios triaxiais verdadeiros com base nos três tipos de fronteiras neles utilizados e, principalmente, da apresentação de um aparato desse tipo, porém com a capacidade adicional de aplicar solicitações dinâmicas segundo dois eixos, constituindo-se em um sistema de ensaios que amplia significativamente os limites da experimentação em solos sob as mais variadas solicitações.

2 TIPOS DE SISTEMAS

Os sistemas para a realização de ensaios triaxiais verdadeiros são classificados em três grupos:

- Fronteiras rígidas;
- Fronteiras flexíveis;
- Fronteiras mistas

O termo fronteira, como aqui considerado, significa o tipo de elemento que aplica a tensão em cada face, o que, no caso das fronteiras rígidas são peças metálicas e no caso de fronteiras flexíveis são utilizadas membranas.

No equipamento objeto deste texto, as fronteiras rígidas estão localizadas no topo e na base e em duas faces laterais opostas e as fronteiras flexíveis estão localizadas nas outras duas faces opostas do prisma, uma vez que as amostras têm forma prismática com dimensões de 15 cm de altura e seção reta de (7,5 x 7,5) cm. Trata-se, portanto, de um equipamento do tipo fronteiras mistas. A Figura 1 mostra uma amostra de solo moldada.

Adicionalmente o equipamento aqui descrito possui capacidade dinâmica segundo o eixo vertical e um dos eixos horizontais, não havendo capacidade dinâmica no outro eixo



Figura 1. Amostra de solo não coesivo aguardando ensaio.

eixo horizontal (fronteira flexível).

Quanto à capacidade de controle das condições nas fronteiras o equipamento possibilita o controle da tensão normal média e tensão cisalhante média. Quanto à uniformidade da tensão normal e de cisalhamento o controle dependerá da fronteira considerada.

No que se refere à uniformidade dos deslocamentos na fronteira, tudo dependerá da fronteira analisada. Já a uniformidade das deformações em toda a amostra não pode ser assumida.

Nas aplicações a estudos consideram-se três condicionantes:

- Tipo de material
- Comportamento tensão/deformação
- Ruptura

No primeiro caso podem ser estudados materiais com endurecimento homogêneo e com endurecimento/amolecimento homogêneos. Para amostras de material heterogêneo há restrições ao seu estudo.

No caso do comportamento tensão/deformação é possível estudar o cisalhamento drenado e não drenado e a variação independente das tensões principais. A Tabela 1 sintetiza as capacidades de sistemas como o aqui descrito.

Tabela 1 – Capacidades dos sistemas para ensaios em amostras cúbicas.

Aparato para ensaios em amostras cúbicas		Condições das superfícies/fronteiras	Fronteiras rígidas	Fronteiras flexíveis	Fronteiras mistas
Capacidade e de controle das fronteiras	Tensão	Tensão normal média	Sim	Sim	Sim
		Tensão cisalhante média	Sim	Sim	Sim
		Tensão normal uniforme	Restrita	Sim	Sim/Não dependendo da fronteira considerada
		Tensão de cisalhamento uniforme	Não	Sim	
	Deformação	Deslocamento uniforme na fronteira	Sim	Restrita	Não pode ser assumida
		Deformação uniforme na amostra	Não pode ser assumida	Não pode ser assumida	
Aplicações a estudos	Tipo de material	Endurecimento homogêneo	Sim	Sim	Sim
		Endurecimento/ amolecimento homogêneos	Sim	Sim	Sim
		Amostra ou material heterogêneo	Restrita R*	Sim R*	Restrita R*
	Comportamento tensão/ deformação	Cisalhamento drenado e não drenado		Ambos	Ambos
		Variação independente das tensões principais		Sim	Sim
		Rotação das direções das tensões principais		Muito restrita	Somente restrição planar
		Deformação pós pico (após formação da superfície de ruptura)		Restrita R*	Restrita R*
		Níveis de tensão excepcionais	Alto	Sim	Sim
			Baixo	Difícil R*	Difícil R*
	Ruptura	Medição da resistência ao cisalhamento		Sim	Sim
		Formação da superfície de ruptura (fenômeno da bifurcação)		Restrita R*	Sim

R* = Necessária radiografia.

Fonte: (Arthur, J. R. F., 1988)

O estudo da rotação das direções das tensões principais dependerá da fronteira considerada.

Há restrições para o estudo da deformação pós-pico, ou seja, após formação da superfície

de ruptura. Nesses casos pode ser necessária a utilização da técnica de raios-X.

Não há possibilidade de emprego do equipamento aqui considerado quando níveis de tensão elevados são de interesse aos estudos.

No que diz respeito à ruptura, o equipamento possibilita a medição da resistência ao cisalhamento com a formação da superfície de ruptura (fenômeno da bifurcação).

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema em questão é constituído por uma câmara triaxial fabricada em alumínio, com capacidade para suportar pressões até 2000 kPa. A esta câmara estão acoplados dois pares de atuadores eletromecânicos que incluem células de carga imersas na câmara que, neste caso, possuem capacidades de 2, 8 e 20 kN. A câmara possui dois visores de PERSPEX, um em cada porta. A Figura 2 permite uma visão geral do sistema.



Figura 2. Vista do conjunto destacando-se a câmara triaxial, os atuadores eletromecânicos e os controladores da contrapressão e da pressão de câmara.

A Figura 3 possibilita uma visão geral de um arranjo para ensaio com a lâmina de alumínio colada à amostra. Essa lâmina serve para a medição das deformações ortogonalmente ao plano da página, por meio dos sensores de proximidade que se baseiam no efeito Hall.

Cada par de atuadores eletromecânicos é composto por um atuador mestre e outro escravo de forma a assegurar o sincronismo entre ambos. Um algoritmo impede a colisão entre os pares de placas interrompendo o ensaio antes que tal ocorrência se verifique. A frequência máxima dos atuadores é de 5 Hz. A Figura 4 representa esquematicamente o dispositivo anticolisão.

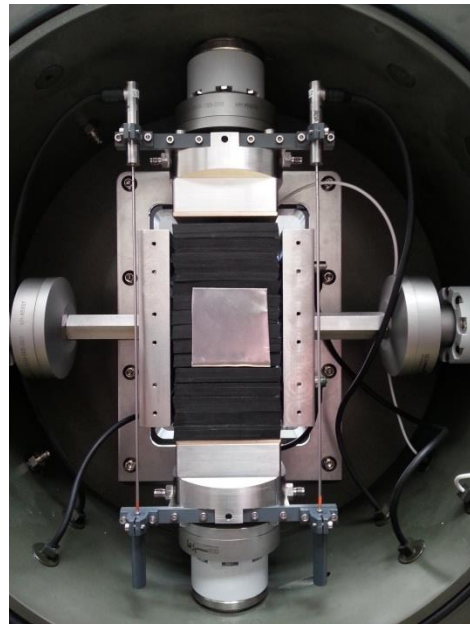


Figura 3. Simulação de arranjo para ensaio.

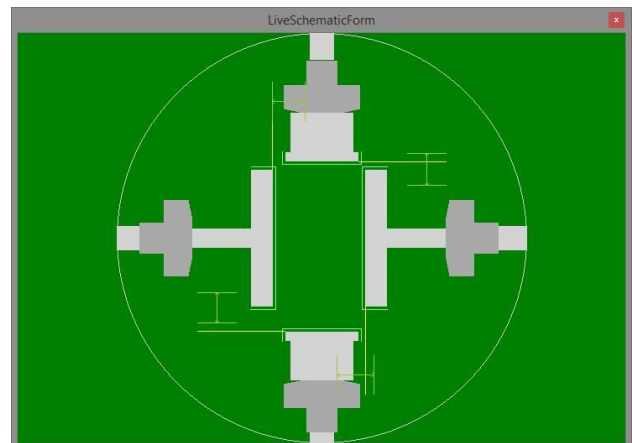


Figura 4. Representação esquemática do dispositivo anticolisão entre as placas, realçado pelas linhas amarelas. Fonte: GDS Instruments.

As deformações originadas pelas solicitações aplicadas nas amostras são lidas por dois LVDT's dispostos verticalmente e fixados às placas metálicas, superior e inferior, e outros dois, dispostos horizontalmente, fixados às placas verticais para a aquisição dos valores das deformações transversais. A faixa de medição desses LVDT's é de ± 5 mm. A Figura 5 mostra este arranjo.

Nas duas faces onde a pressão é aplicada pela pressão de câmara, as deformações são lidas por meio de um par de sensores de proximidade fixados aos visores da câmara. As Figuras 5 e 6 mostram esse detalhe.



Figura 5. – Visão interna da câmara mostrando os LVDT's.

A câmara conta ainda com sensores de poropressão e de contrapressão tanto para a base quanto para o topo da amostra. As pedras porosas fixadas às placas superior e inferior são de bronze sinterizado. A pressão de câmara é mantida constante durante os ensaios por meio de um controlador de pressão pneumática ligado a um compressor ou à rede de ar comprimido e um dispositivo com interface ar/água.

Há ainda a possibilidade de inserção de sensores adicionais na câmara triaxial. Como recurso opcional, o fabricante pode ofertar dispositivo que permite que a pressão de câmara seja pulsante, em sincronismo com os atuadores eletromecânicos, porém tal dispositivo não se encontra instalado no equipamento aqui descrito.



Figura 6. Visão interna da câmara com as duas portas abertas onde se visualizam as células de carga e um dos sensores de proximidade fixado ao visor da câmara à direita.

4. CAPACIDADE DINÂMICA

Uma vez que muitos projetos de engenharia geotécnica são elaborados considerando-se ações dinâmicas cíclicas que atuarão durante toda a vida útil da obra, necessário se faz o estudo do comportamento do solo sob essas condições. Esse tipo de solicitação pode advir de fatores ambientais, tais como atividade sísmica e tempestades oceânicas como também da atividade humana como o tráfego de veículos e vibrações de máquinas instaladas em estruturas.

Ressalta-se que a resposta do solo a esse tipo de solicitação é muito mais complexa do que aquelas que se obtêm quando se conduzem análises estáticas, o que requer a investigação do comportamento dinâmico dos solos no laboratório e no campo.

No ambiente de laboratório, o ensaio triaxial apresenta-se como um método conveniente e versátil para se atingir o conhecimento do comportamento dos solos e pode ser realizado com carregamentos estáticos ou dinâmicos.

A natureza da solicitação dinâmica aplicada a um solo *in situ* é fortemente dependente de sua fonte geradora. Em alguns casos pode ser relativamente uniforme, consistindo essencialmente de uma única frequência como no caso da vibração de máquinas ou, randômica, contendo uma gama de frequências, como é o caso dos abalos sísmicos (Rees, S).

A aplicação dessas solicitações dinâmicas complexas requer sistemas de testes sofisticados e, mesmo nesses sistemas, as formas de onda são aproximadas para formas senoidal uniforme, quadrada ou triangular, com uma única frequência (Rees, S).

A divisão comumente aceita para definir a separação entre condições estáticas e dinâmicas é da ordem de 0,05 a 0,1 Hz [2].

A resposta do solo a solicitações dinâmicas difere da resposta às solicitações estáticas por dois aspectos importantes (Rees, S):

- A reversão da tensão aplicada;
- A dependência da resposta da taxa de aplicação da solicitação.

A reversão das tensões aplicadas implica numa variação de sinal da taxa de aumento da

tensão aplicada. Num ensaio triaxial isso significa uma oscilação entre aumento e diminuição da magnitude da tensão desvio q aplicada à amostra em teste. Esse conceito evidencia que a reversão da tensão aplicada não é, necessariamente, única em termos de solicitação dinâmica, sendo apenas uma das solicitações cíclicas aplicadas aos solos nas condições naturais.

Outros fenômenos importantes como a ressonância, não são abordados aqui.

Os principais aspectos da resposta do solo às solicitações dinâmicas são (Rees, S):

- Acumulação das deformações plásticas;
- Geração de excesso de poropressão.

Esses dois aspectos somente ocorrem quando o comportamento do solo se torna elasto-plástico, o que corresponde a aplicar deformações de cisalhamento da ordem de 0,01% ou maiores (Ishihara, K., 1966). Em geral, com deformações de cisalhamento abaixo de 0,01% o comportamento do solo tende a ser puramente elástico (Rees, S).

A taxa com que a solicitação é aplicada representa também um efeito importante na resposta do solo. Em geral, carregamentos rápidos resultam em respostas com aumento da rigidez e da resistência nos solos coesivos. Também aqui, o efeito da taxa de aplicação da solicitação somente é notado quando as deformações por cisalhamento atingem o regime elasto-plástico (Rees, S).

Esta dependência da taxa de aplicação da solicitação é devida a dois fatores:

- Viscosidade devida à interação entre partículas (viscosidade inter-partículas);
- Capacidade de dissipação da poropressão.

Como a viscosidade inter-partículas não é uma característica de solos granulares, somente a geração de excesso de poropressão afeta o comportamento desses solos. Isto significa que a resposta de solos granulares é independente da taxa de aplicação da solicitação nos ensaios em laboratório, assumindo que as condições de drenagem que ocorrem *in situ* sejam mantidas

por exemplo, no caso de amostras não drenadas, modeladas em condições de carregamento cíclico rápido.

A Tabela 4.1 sintetiza as frequências adotadas em ensaios que simulam diversos tipos de solicitações que podem atuar sobre os solos.

Note-se que a divisão entre frequências estáticas e dinâmicas, geralmente, é considerada como situada entre 0,05 a 0,1 Hz (Ishihara, K., 1966).

Tabela 2. Frequências adotadas nos ensaios [3].

Tipo de solicitação	Frequência adotada nos ensaios
Ação de ondas	0,1 Hz
Ação do vento	0,1 – 1 Hz
Abalo sísmico	1Hz
Trânsito de veículos	> 1Hz
Vibração de máquinas	$\leq 20\text{Hz}$

5. CONCLUSÕES

O alto grau de complexidade existente nos fenômenos relacionados ao comportamento dos solos perante solicitações exige equipamentos sofisticados e complexos que permitem simular, ainda que com simplificações, as condições que se verificam na natureza e também, a possibilidade de aplicar as três tensões de forma independente para estudar o comportamento dos solos em regime elasto-plástico e a resposta a solicitações dinâmicas justificam o emprego de um sistema como o aqui descrito, um sistema com concepção recente e de elevada complexidade, que abre diversas possibilidades no campo das simulações geotécnicas em laboratório.

AGRADECIMENTOS

O autor expressa seus agradecimentos a FURNAS CENTRAIS ELÉRICAS S.A. pela possibilidade de divulgação concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

Arthur, J. R. F. (1988). *Cubical Devices: Versatility and Constraints*, ASTM STP 977, pp. 743 – 765.

Ishihara, K. (1966). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford, Claredon Press, 1966.

Rees, S. Part Three: *Dinamic Triaxial Testing*, GDS website www.gdsinstruments.com, pp. 1-5.