

DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS FLEXÍVEIS PARA ENSAIO DE OBRAS GEOTÉCNICAS EM SIMULADORES SÍSMICOS 1g

FLEXIBLE CONTAINERS DESIGN FOR GEOTECHNICAL TESTS USING 1g SEISMIC SIMULATORS

Monteiro Silva, Mónica, *FCTUNL, Caparica, Portugal, mgms@fct.unl.pt*

Varatojo, Paula, *FCTUNL, Caparica, Portugal, pv@fct.unl.pt*

Maranha, João, *LNEC, Lisboa, Portugal, jmaranha@lnec.pt*

RESUMO

Em engenharia sísmica geotécnica a modelação física tem desempenhado um papel importante compensando a falta de dados sobre estruturas reais e auxiliando na compreensão de mecanismos de rotura, e modos de deformação de sistemas complexos. Os resultados obtidos em ensaios sísmicos de modelos reduzidos são usualmente utilizados na validação de métodos analíticos e calibração de modelos numéricos. Estes ensaios pressupõem a existência de um reservatório para contenção do modelo da obra geotécnica em estudo. O reservatório ideal é aquele que permite uma resposta sísmica do modelo do terreno idêntica à obtida no protótipo na condição de campo livre. Neste artigo resumem-se os principais aspectos relativos a este tipo de reservatórios e apresenta-se um reservatório flexível do tipo “viga de corte” dimensionado para ensaios de obras geotécnicas em areias no simulador sísmico uniaxial do LNEC.

ABSTRACT

Physical modelling has been important in seismic geotechnical engineering problems due to lack of data on real structures and also to assist in the understanding of mechanisms of rupture and deformation on complex systems. These results are usually used in the validation of analytical methods and calibration of numerical models. For these tests a special container for confinement of the geotechnical model is needed. The ideal container is the one that allows a similar soil seismic response of the model comparing with the same prototype response on a free-field condition. In this article the main aspects of this kind of containers are summarized and a flexible equivalent shear beam container for sand soil tests in the LNEC seismic simulator 1g is also presented.

1. INTRODUÇÃO

A modelação física emergiu nos anos 60, em parte devido ao grande desenvolvimento que se verificava na modelação numérica, permitindo o estudo de sistemas complexos sob condições controladas e também a exploração dos mecanismos fundamentais envolvidos nesses sistemas (Idriss, 2001). A modelação física apresenta uma série de vantagens das quais se destaca a possibilidade de estudar fenómenos específicos, conduzir estudos paramétricos, verificar métodos analíticos ou calibrar/validar modelos numéricos e visualizar/investigar mecanismos de colapso, e modos de deformação. Os primeiros simuladores sísmicos utilizados eram 1g e consistiam em pequenas mesas sísmicas unidireccionais. Foi a partir da década de 90 que vários investigadores se concentraram no desenvolvimento de equipamento de vibração para ensaios geotécnicos em centrifugadoras (simuladores sísmicos N_g , $N > 1$). Actualmente contamos já com mesas sísmicas de grande escala, pluridireccionais e centrifugadoras com actuadores dinâmicos num grande número de países (Teymur, 2002). Uma análise bibliográfica detalhada permite constatar que actualmente têm recebido menor atenção os ensaios em simuladores sísmicos 1g,

devido a limitações várias, nomeadamente, na simulação do campo de tensões do protótipo. Em Portugal existe uma centrífugadora no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) que actualmente carece de equipamento acessório que permita a concretização de ensaios sísmicos, estando o seu uso limitado ao caso estático, a casos pseudo-dinâmicos (sendo ainda necessário criar sistemas mecânicos acessórios para o efeito) e a casos dinâmicos de rebentamento de explosivos. Existem ainda no LNEC dois simuladores sísmicos 1g principais, um deles unidireccional e outro pluridireccional. Todos os simuladores sísmicos referidos carecem de reservatório próprio para ensaios de obras geotécnicas. Anote-se que existem pequenos simuladores sísmicos espalhados por várias universidades e laboratórios do país que não são aqui enunciados. O presente artigo refere-se ao dimensionamento de um reservatório adequado para a contenção dum modelo representativo de uma camada de areia com estacas de fundação a ser ensaiado no simulador sísmico unidireccional 1g do LNEC.

2. RESERVATÓRIOS PARA ENSAIOS DE OBRAS GEOTÉCNICAS EM SIMULADORES SÍSMICOS

Os principais aspectos a ter em conta no planeamento de ensaios em simuladores sísmicos 1g são:

- Factores de escala
- Equipamento (características do simulador sísmico e reservatório para contenção do modelo)
- Instrumentação

O correcto dimensionamento do reservatório de contenção do modelo a ensaiar é muito importante, obtendo-se resultados substancialmente diferentes consoante a sua geometria e materiais constituintes. O reservatório ideal é aquele que permite uma resposta sísmica do terreno no modelo idêntica à obtida no protótipo na condição de campo livre (Madabhusi, 1994). No estado actual da investigação acerca deste tema, as principais conclusões são que estes reservatórios devem ser flexíveis de forma a aproximar o perfil de deslocamentos horizontais das suas paredes com o respectivo perfil de deslocamentos do terreno no protótipo. A solução que permite obter melhores resultados no que se refere à similitude da resposta em campo livre do protótipo e do modelo é, em traços gerais, um reservatório com geometria cilíndrica (Figura 1) e comportamento lateral flexível, mas com elementos rígidos que restrinjam radialmente o movimento (Riemer e Meymand, 1996).



Figura 1 – Reservatório flexível de geometria cilíndrica (adaptado de Riemer e Meymand, 1996)

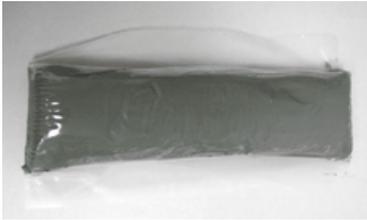
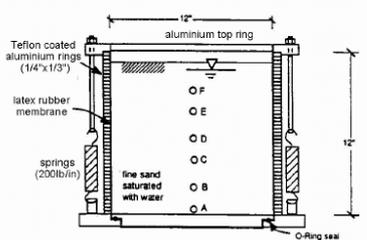
Este tipo de reservatório permite também a realização de ensaios com vibração simultânea em mais do que uma direcção. A sua principal desvantagem é a baixa relação altura/raio que cria um efeito tridimensional difícil de analisar (Zeng e Schofield, 1996). Para garantir a relevância dos resultados obtidos nos ensaios em simuladores sísmicos torna-se necessário proporcionar ao modelo as condições de fronteira o mais idênticas possível ao espaço semi-infinito

do protótipo. O modelo a ensaiar encontra-se confinado pelas paredes do contentor e isso introduz perturbações nos resultados que importa conhecer. A essas “perturbações” chamam-se “efeitos de fronteira”. De seguida designam-se por ordem cronológica o tipo de reservatórios que têm sido utilizados nestes ensaios e que têm evoluído no sentido de minimizar esses efeitos de fronteira nos resultados obtidos (Quadro 1). Para otimizar o seu desempenho pode-se proceder à “picagem” do fundo e quando é importante garantir a estanqueidade usam-se películas apropriadas nas suas paredes interiores, sendo usual o uso de películas de látex. Enumeram-se as características principais dum reservatório ideal (Whitman *et al.*, 1981, 1986):

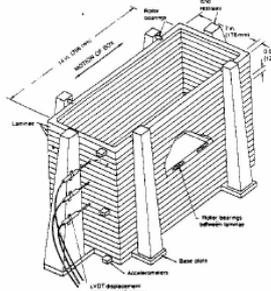
- a) ter secção horizontal constante durante a vibração;

- b) durante a vibração e na interface vertical solo-parede, as tensões tangenciais dinâmicas desenvolvidas devem igualar as que ocorrem no solo em planos horizontais;
- c) ter massa nula;
- d) ter rigidez nula para o deslocamento horizontal;
- e) não oferecer resistência ao assentamento do solo quer durante a sua colocação, quer durante a vibração;
- f) estanqueidade.

Quadro 1 – Tipos de reservatórios para contenção dos modelos em simuladores sísmicos

Designação	Desvantagens	Observações	Exemplos
Rígidos	O comportamento rígido das paredes de fundo gera ondas P; Grandes diferenças entre o modelo e o protótipo no campo de tensões e deformações; Necessárias grandes dimensões para reduzir os efeitos de fronteira	Fáceis de construir; A utilização de paredes de fundo rugosas no interior permite eliminar a diferença no campo de tensões	 http://cgm.engr.ucdavis.edu/Facilities/model/rigid.htm
Rígidos com fronteiras absorventes (utilização de <i>Duxseal</i> ¹ nas paredes de fundo)	Diferenças entre o modelo e o protótipo no campo de tensões e deformações difíceis de quantificar pela dificuldade em determinar com ensaios usuais a rigidez e o ângulo de atrito interno do <i>Duxseal</i> ; Dificuldade em modelar estas fronteiras nas análises numéricas	O <i>Duxseal</i> reduz eficazmente a energia reflectida nas paredes de fundo do reservatório (Coe <i>et al.</i> , 1985); Cerca de 1/3 das ondas incidentes são reflectidas (Steedman e Madabhushi, 1991); Diminuição dos efeitos de fronteira comparativamente às fronteiras rígidas, mas não é ainda uma solução satisfatória (Campbell <i>et al.</i> , 1991)	<i>Duxseal</i> : 
“MIT” (sobreposição simples de anéis de alumínio lubrificado, Whitman, Lambe & Kutter, 1981)	O livre deslocamento relativo entre os anéis origina concentração de deformação a várias cotas da coluna de solo no modelo; A superfície interior lisa do reservatório origina diferenças entre o modelo e o protótipo no campo de tensões	A geometria cilíndrica cria um problema tridimensional difícil de analisar	 (Schofield e Steedman, 1988)

¹ Mistura industrial que forma um mastique selante de cor acastanhada a cinzento esverdeado, tipo argila

Designação	Desvantagens	Observações	Exemplos
Laminares (sobreposição de grelhas rectangulares com rolamentos entre elas e elementos rígidos verticais nas paredes de fundo que limitam o seu movimento)	Nas situações em que não ocorre liquefacção ou em que apenas ocorre liquefacção parcial há diferenças entre o modelo e o protótipo no campo de tensões (Zeng e Schofield, 1996)	Bons resultados para modelos em que se espera a liquefacção total da areia (Law <i>et al.</i> , 1991)	 <p>(Hushmand <i>et al.</i>, 1988)</p>
Flexível tipo “viga de corte” (colagem intercalada de grelhas rectangulares de alumínio e de borracha)	Nos casos com solo saturado, observam-se efeitos de fronteira significativos onde há pressões intersticiais elevadas junto à superfície do modelo e nas regiões mais próximas das paredes de fundo	Bons resultados para modelos com solo seco ou com solo saturado sujeito a pequenos sismos (Zeng e Schofield, 1996)	 <p>(Steedman e Sharp, 2001)</p>

O reservatório flexível tipo “viga de corte” (Quadro 1) é referido na bibliografia como contentor tipo *ESB* (*Equivalent Shear Beam*). A utilização destes reservatórios que seguem o modelo “viga de corte” (viga de Timoshenko), com areias saturadas revela efeitos de fronteira significativos nas regiões do modelo junto à superfície e nas regiões mais próximas das paredes de fundo (paredes perpendiculares à acção sísmica) em que haja pressões intersticiais elevadas, ou seja, nas cotas superficiais dos perfis de fundo do modelo em que se verifique uma “suavização” nos acelerogramas, devido à diminuição da resistência em areias soltas, ou aparecimento de “picos”/encrespamento nos acelerogramas devidos à dilatação em areias densas, obtendo-se bons resultados na região central do modelo (Coelho *et al.*, 2003). Os estudos realizados permitem propôr, como primeira aproximação, uma expectativa de bons resultados no intervalo: $0,25L < x < 0,75L$, para $H/L \approx 0,50$ (Figura 2).

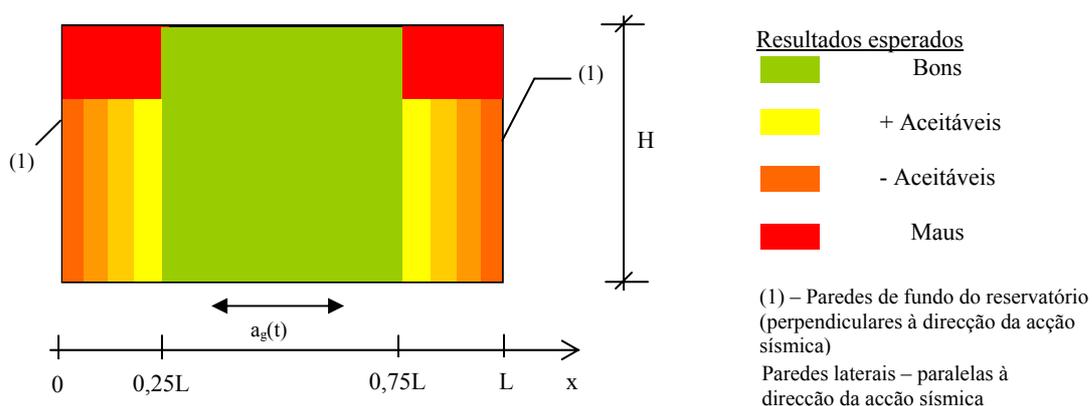


Figura 2 – Zonamento esquemático 2D das limitações de utilização com areias saturadas dos reservatórios flexíveis tipo “viga de corte” com geometria rectangular (sem escala)

Para os modelos secos, os efeitos de fronteira resumem-se à diferença entre o modelo e o protótipo na distribuição de tensões junto às paredes de fundo devido à flexão local dos níveis de borracha. Um aspecto importante e que constitui uma desvantagem destes reservatórios, é que a rigidez das suas paredes mantem-se fixa durante o ensaio e a rigidez do solo varia durante a vibração. Esta desvantagem traduz-se em resultados menos precisos durante um intervalo de

tempo da resposta limitado (intervalo em que a rigidez do solo, função do índice de vazios, tensão efectiva e nível de distorção, mais se afasta da rigidez das paredes de fundo). Recentemente estes reservatórios do tipo “viga de corte”, passaram a ser construídos com espessuras crescentes de borracha da base para o topo, por forma a melhor modelar a perda de rigidez do solo junto à superfície (Brennan e Madabhushi, 2002).

3. MODELO NUMÉRICO GENERALIZADO PARA DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS FLEXÍVEIS DO TIPO “VIGA DE CORTE”

Para o dimensionamento do reservatório a utilizar no simulador sísmico uniaxial 1g do LNEC foi construído um modelo numérico (REFLEXSS²) com a linguagem, comandos e funções do programa comercial FLAC3D. Adicionalmente com a mesma ferramenta foi também construído o modelo numérico quer para os ensaios (ANESEA³) quer para o dimensionamento das estacas no protótipo (SISSES⁴). Os resultados obtidos nestes ensaios vão permitir aferir o modelo SISSES. O modelo numérico REFLEXSS tem como principal objectivo permitir dimensionar um reservatório flexível do tipo “viga de corte” (Figura 3) satisfazendo a similitude modelo-protótipo, no que se refere aos campos de tensões e deformações, e minimizar a geração de ondas P nas fronteiras do modelo físico.

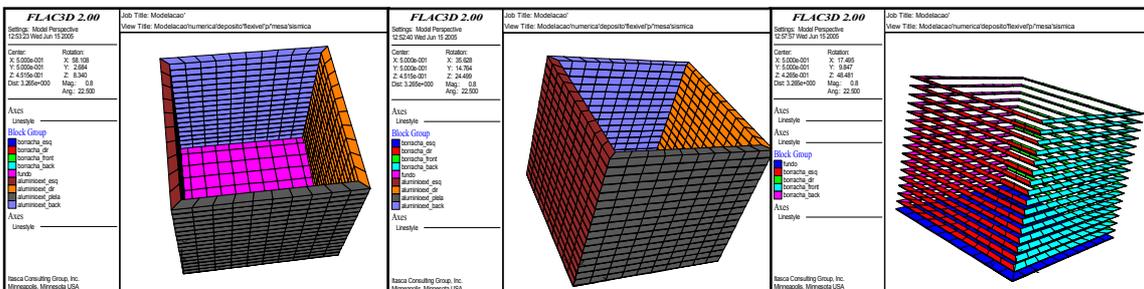


Figura 3 – Exemplo de reservatório flexível tipo “viga de corte” dimensionado com o REFLEXSS (geometria quadrada alternando grelhas de alumínio com grelhas de borracha)

Todos os dados necessários para o REFLEXSS são questionados interactivamente ao utilizador, nomeadamente, dados relativos à geometria, materiais e dimensões das grelhas que constituem o reservatório, existência ou não de nível freático, membranas extra entre as paredes do reservatório e o solo (Madabhushi, Schoefield e Zeng, 1994), inclusão ou não de elementos de interface numérica entre o solo e outros materiais, dimensão máxima dos elementos da malha (Kuhlemeyer e Lysmer, 1973), modelo numérico para o comportamento dos materiais (sendo usado o modelo elástico e linear para os materiais do reservatório, opção de modelo Von Mises para o alumínio, e opção entre modelo elástico, Mohr-Coulomb ou Finn (Martin *et al.*, 1975) para a areia durante a vibração), acção sísmica de dimensionamento (sob a forma de séries de aceleração no tempo) e escolha do amortecimento extra ao inerente à lei constitutiva do solo, tipo Rayleigh,

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

ou tipo hysterético, chamado “local” no FLAC3D,

$$\alpha_L = \pi \cdot D \quad (2)$$

Os parâmetros dos modelos para a areia podem ser constantes no domínio ou podem variar em profundidade tendo por base a seguinte relação empírica para o G_{max} :

$$G = 3230 \frac{(2,973 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0,5} \quad [kN / m^2] \quad (3)$$

² Reservatório Flexível para Simulador Sísmico

³ Análise dos Ensaios Sísmicos de Estacas em Areia

⁴ Simulação da Interação Sísmica Solo-Estacas-Superestrutura

Esta relação foi proposta para areias por Hardin e Drnevich em 1972 (Zeng e Schofield, 1996) tendo por base resultados experimentais de diversos tipos de solos.

$$K = \frac{2G}{3} \frac{1+\nu}{1-2\nu} \quad [kN/m^2] \quad (4)$$

As condições de fronteira dinâmicas são de base rígida e de fronteiras laterais com campo livre (Itasca, 1997). Com os dados introduzidos, são calculados pelo modelo os perfis de deslocamento horizontal do solo no protótipo e das paredes de fundo do reservatório sem solo. O critério de dimensionamento consiste em verificar a aproximação entre estes dois perfis (Figura 4), o que equivale a dimensionar paredes de fundo com a mesma frequência natural do solo. Os campos de tensões e deformações são calculados. Para obtenção de valores de referência, está também incorporado no REFLEXSS o cálculo unidimensional expedito do perfil de deslocamentos horizontais do solo usando o modelo hiperbólico de Hardin e Drnevich (1972).

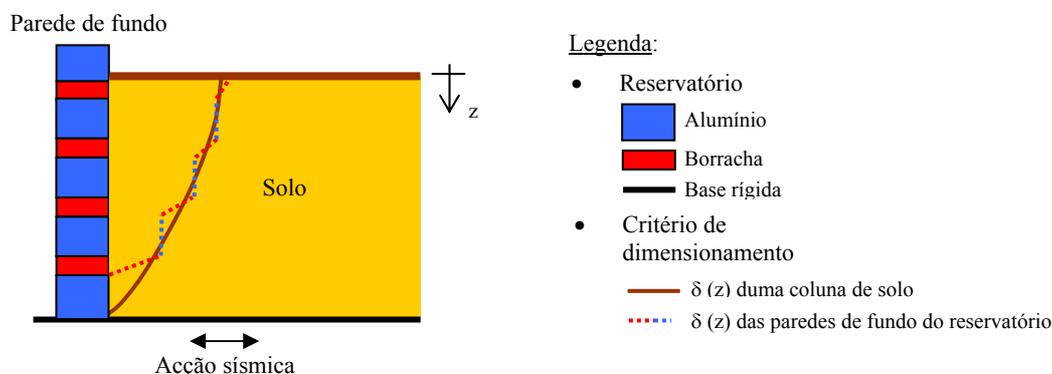


Figura 4 – Principal critério de dimensionamento usado no REFLEXSS

A transformação de escala entre protótipo e modelo é feita usando os factores de escala generalizados aplicáveis aos ensaios em simuladores sísmicos 1g, especificados em função dos factores de escala para as grandezas comprimento (λ), densidade (λ_ρ) e deformação (λ_ε) (Quadro 2).

Quadro 2 – Factores de escala generalizados para ensaios em simuladores sísmicos 1g (adaptado de Iai e Sugano, 1999)

Grandeza	Factor de escala (protótipo/modelo)			
	Factores de escala generalizados	Factores de escala utilizados na prática corrente		
		Tipo I	Tipo II	Tipo III
		$\lambda_\rho=1$	$\lambda_\varepsilon=\lambda^{0.5}$ $\lambda_\rho=1$	$\lambda_\varepsilon=1$ $\lambda_\rho=1$
Comprimento	λ	λ	λ	λ
Densidade	λ_ρ	1	1	1
Tempo	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Aceleração	1	1	1	1
Velocidade	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Deslocamento	$\lambda\lambda_\varepsilon$	$\lambda\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
Tensão	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
Deformação	λ_ε	λ_ε	$\lambda^{0.5}$	1
Módulos de rigidez	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\varepsilon$	$\lambda/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{0.5}$	λ
Permeabilidade	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}/\lambda_\rho$	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Pressão intersticial	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
Rigidez à flexão	$\lambda^5\lambda_\rho/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^5/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{4.5}$	λ^5
Rigidez axial	$\lambda^3\lambda_\rho/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^3/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{2.5}$	λ^3
Momentos flectores e torsões	$\lambda^4\lambda_\rho$	λ^4	λ^4	λ^4
Esforços de corte	$\lambda^3\lambda_\rho$	λ^3	λ^3	λ^3

Grandeza	Factor de escala (protótipo/modelo)			
	Factores de escala generalizados	Factores de escala utilizados na prática corrente		
		Tipo I	Tipo II	Tipo III
		$\lambda_p=1$	$\lambda_e=\lambda^{0,5}$ $\lambda_p=1$	$\lambda_e=1$ $\lambda_p=1$
Esforços normais	$\lambda^3\lambda_p$	λ^3	λ^3	λ^3

Os factores de escala acima descritos não são perfeitamente consensuais e adequados para todas as situações, tal como é discutido no trabalho de Iai e Sugano. No entanto, diversos estudos comparando os resultados de ensaios em centrífugadora e os resultados de ensaios em simuladores sísmicos 1g (Gibson e Scott 1995, e Hayashi *et al.*, 1997) permitem considerar aqueles factores adequados para o problema em estudo, tendo sido os factores utilizados nos exemplos de calibração do modelo numérico REFLEXSS.

4. RESERVATÓRIO FLEXÍVEL DO TIPO “VIGA DE CORTE” PARA O SIMULADOR SÍSMICO UNIAXIAL 1g DO LNEC

O simulador sísmico uniaxial 1g (Figura 5) é composto por um circuito hidráulico, electrónica associada e plataforma sísmica. A plataforma pode ser usada para vibração horizontal ou vertical, sendo apenas necessário alterar a posição do actuador hidráulico. Para o dimensionamento do reservatório flexível do tipo “viga de corte” atendeu-se às principais características deste simulador (Quadro 3) utilizando a sua plataforma sísmica horizontal que permite uma velocidade máxima de 35,2 cm/s para o intervalo de frequências especificado e para uma carga total de 50 kN.



Figura 5 – Simulador sísmico uniaxial do LNEC

Quadro 3 – Principais características do simulador sísmico uniaxial 1g do LNEC

ESPECIFICAÇÃO	VALOR
Carga máxima	60 kN
Intervalo permitido de frequências	0 – 22 Hz
Dimensões (entre eixos)	3 x 2 (m)
Furação	1 x 0,5 (m)
Peso da mesa	30 kN

Enumeram-se os critérios de dimensionamento (Schofield e Zeng, 1992; Madabhushi, 1994; Zeng e Schofield, 1996) usados na concepção do reservatório a utilizar no simulador uniaxial do LNEC:

- a) paredes de fundo flexíveis com comportamento tipo “viga de corte” e com rigidez dinâmica equivalente ao solo adjacente (para obter perfil de deslocamentos idêntico, minimizar a interacção parede-solo e assim diminuir a quantidade de ondas P geradas);
- b) paredes de fundo com atrito parede-solo igual ao do solo adjacente (para obter uma distribuição de tensões similar à do protótipo);
- c) paredes laterais com o menor atrito possível parede-solo (para reduzir os efeitos tridimensionais).

A acção sísmica de dimensionamento considerada no REFLEXSS foi o acelerograma representado na Figura 6.

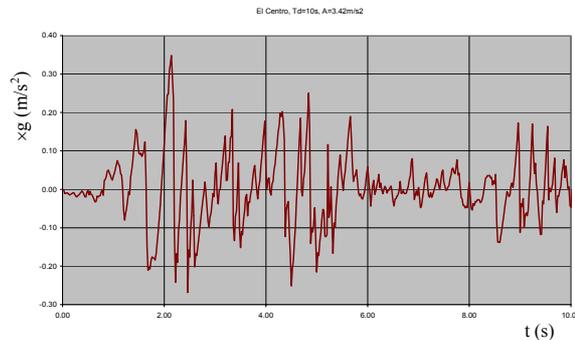


Figura 6 – Acelerograma de dimensionamento (El Centro, 1940)

O reservatório pré-dimensionado (Figura 7) tem geometria quadrada em planta e consiste na colagem alternada de um número máximo de onze perfis de alumínio (secção vazada 65×65×2mm) e de dez perfis de borracha (secção cheia 65×3,5mm), com as seguintes dimensões interiores: 765×765×750mm. Com o objectivo de reduzir a rotação do modelo em relação à direcção perpendicular à acção durante a vibração, coloca-se entre as paredes de fundo e o solo uma chapa metálica com areia projectada sobre cola. Esta chapa é presa ao fundo do reservatório. Entre as paredes laterais e o solo coloca-se uma membrana de borracha lubrificada. O fundo do reservatório dimensionado é quadrado em alumínio reforçado com dimensões máximas 1170×1170mm. A sua superfície interior é “picada” aumentando o atrito com o solo. O fundo fixa o reservatório ao simulador. Nas abas laterais do fundo do reservatório fixam-se batentes que minimizam a vibração parasita na direcção perpendicular à acção.

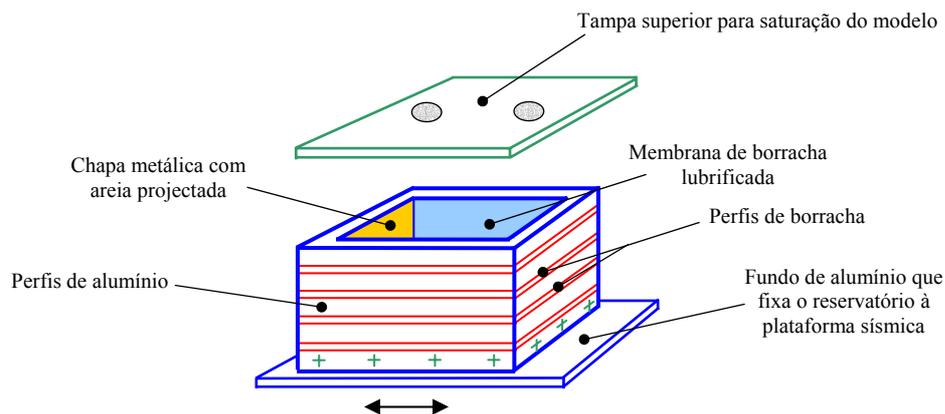


Figura 7 – Esquema do reservatório flexível do tipo “viga de corte” dimensionado para o simulador sísmico uniaxial do LNEC (sem escala)

Para a possibilidade de saturação dos modelos por vácuo prevê-se uma tampa que permita também a observação do modelo através de dois discos plásticos transparentes. Na primeira grelha da base do reservatório colocam-se pequenos tubos para a drenagem final dos modelos saturados. Para garantir a estanqueidade do reservatório é aplicado silicone no exterior e nas juntas entre perfis. Na Figura 8 apresenta-se a comparação de perfis de deslocamentos horizontais para várias espessuras de borracha, utilizando o modelo elástico para os materiais e

as propriedades do Quadro 4. A areia foi considerada com rigidez variável em profundidade adoptando-se um índice de vazios inicial de 0,7 e $\phi'_{crit.}=33^\circ$. Para o estudo detalhado da resposta quer do solo, quer do contentor, o modelo numérico REFLEXSS faz a análise FFT das séries de acelerações obtidas em vários pontos do modelo.

Quadro 4 – Propriedades dos materiais do contentor para modelo elástico

Material	E (kPa)	ν
Alumínio	7×10^7	0,33
Borracha	1×10^3	0,5

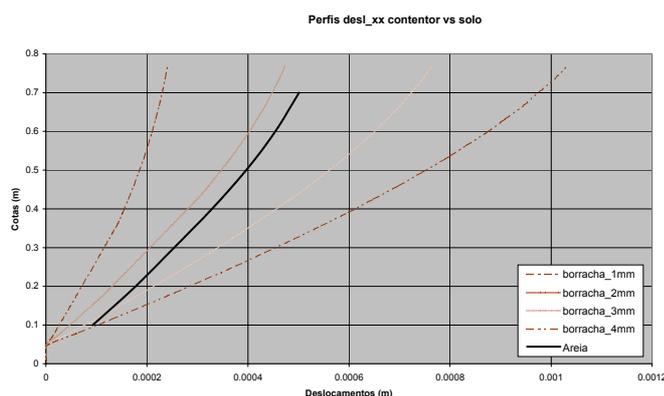


Figura 8 - Comparação entre o perfil de deslocamentos do solo e do reservatório (escala do modelo, $\lambda=9$)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que os grandes sismos não são muito frequentes e não se repetem com as mesmas características, há grande dificuldade em obter os dados pretendidos para estudar os seus efeitos através de investigações de campo pós-sismo. Também a instrumentação de estruturas reais (quando possível) é muito cara, devido aos custos de manutenção durante o período de tempo que separa os sismos principais e, para além disso, a instrumentação pode não se revelar colocada nos locais mais convenientes. Estes são alguns dos motivos que favorecem as vantagens de grande versatilidade e controlo que os ensaios em simuladores sísmicos oferecem. Nestes ensaios as condições do solo no modelo (quando adequadamente instrumentado de forma a observar acelerações, deslocamentos e pressões intersticiais) podem ser bem controladas e variadas. Os resultados de ensaios de modelos de obras geotécnicas em simuladores sísmicos 1g têm sido amplamente utilizados, nomeadamente, para investigar a resposta sísmica de estruturas em solo (fenómenos de interacção solo-estrutura) e para validar modelos numéricos mais ou menos complexos, sendo justificados não só em trabalhos de investigação, mas também nos casos práticos em que se prevê uma resposta complexa do solo sob acção sísmica relevante, nos casos de geometrias complexas ou de construção difícil e atípica em zonas de elevada sismicidade, e ainda no teste de novas soluções anti-sísmicas. Num simulador sísmico o espaço disponível não é ilimitado, pelo que se torna necessário limitar o modelo com fronteiras finitas definidas por um “reservatório”. Os efeitos da fronteira do reservatório na resposta do modelo pode conduzir a simulações imprecisas numa situação real (protótipo) que tem extensão lateral infinita. Para minimizar os efeitos de fronteira do reservatório nos resultados, as suas paredes de fundo devem ser flexíveis, dimensionadas como “vigas de corte” com a mesma resposta dinâmica do que o solo adjacente. Ainda assim, a utilização destes reservatórios tipo “viga de corte” com areias saturadas revela efeitos de fronteira significativos nas regiões do modelo junto à superfície e nas regiões mais próximas das paredes de fundo em que haja pressões intersticiais elevadas. Na região central do modelo obtêm-se bons resultados. Para os modelos secos, verifica-se uma diferença entre o modelo e o

protótipo na distribuição de tensões junto às paredes de fundo. Outra limitação importante consiste no facto da rigidez das suas paredes manter-se fixa durante o ensaio e a rigidez do solo variar durante a vibração. Para além das limitações já apontadas, acrescenta-se ainda a desvantagem de a sua geometria depender da acção sísmica de dimensionamento, confinando a sua aplicabilidade.

SIMBOLOGIA

C – matriz de amortecimento de Rayleigh; α - constante de amortecimento proporcional à massa; M – matriz de massas; β - constante de amortecimento proporcional à rigidez; K – matriz de rigidez; α_L – amortecimento “local” (Itasca, 1997); D – fracção de amortecimento crítico; G – módulo de distorção; e – índice de vazios; σ'_m – tensão efectiva média; K – módulo de compressibilidade volumétrica; ν - coeficiente de Poisson

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Sector de Ensaio Sísmico do Centro de Estudos e Equipamento de Engenharia Sísmica (C3ES) do LNEC a disponibilização de condições para a realização de ensaios dinâmicos em simulador sísmico uniaxial e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia a bolsa de investigação no âmbito do POCI 2010.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Idriss I. M. (2001), “The role of modeling in geotechnical earthquake engineering”, NSF International Workshop on Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering, Case Western University, November 2001, USA
- Teymur, B. (2002), “The significance of boundary conditions in dynamic centrifuge modeling”, PhD Dissertation, Cambridge University, UK
- Madabhushi, S. P. G. (1994), “Dynamic response of the equivalent shear beam (ESB) container”, CUED/D-SOILS/TR270 (1994)
- Riemer, M. e Meymand, P. (1996), “1-g Modeling of Seismic Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay”, Fourth Caltrans Seismic Research Workshop, July 1996, Sacramento, California
- Zeng e Schoefield (1996), “Design and performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modelling”, *Geotechnique*, 46, N°1, pp83-102
- Whitman, R. et al. (1981), “Initial results from a stacked ring apparatus for simulation of a soil profile”, *Proc. of the Int. Conference on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, UMR-Rolla, MO, pp1105-1110
- Whitman, R. V. e Lambe (1986), “Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation”, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 9, N°2, pp61-71
- Coe et al. (1985), “Dynamic stress wave reflection/attenuation: earthquake simulation in centrifuge soil models. *Proc. J. Earthquake Eng. Soil Dyn.*, 13, pp109-128
- Steedman e Madabhushi (1991), “Wave propagation in sands”, *Proc. Int. Conf. on Seismic Zonation*, California
- Campbell et al., (1991), “Boundary effects in dynamic centrifuge model tests”, *Proc. Schoefield e Steedman (1988), “Recent development of dynamic model testing in geotechnical engineering. Proc. 9th World Conf. Earthquake Eng.*, Tokyo
- Law et al. (1991), “Development and performance of a laminar container for earthquake liquefaction studies”, *Proc. Centrifuge 91*, Balkema, pp369-376
- Husmand et al. (1988), “Centrifuge liquefaction tests in a laminar box”, *Geotechnique*, 38, N°2, pp253-262
- Steedman e Sharp (2001), “Liquefaction of deep saturated sands under high effective confining stress”, *Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics March 26-31, 2001 and Symposium to Commemorate Professor W.D. Liam Finn March 28, 2001*
- Coelho et al. (2003), “Boundary effects in dynamic centrifuge modelling of liquefaction in sand deposits”, *Proc. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, pp667-769

Brennan e Madabhushi (2002), "Design and performance of a new deep model container for dynamic centrifuge modelling", Proc. Of the Int. Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Balkema, pp183-188

Madabhushi et al. (1994), "Complementary shear stresses in dynamic centrifuge modeling, Dynamic Geotechnical Testing: Second Volume, ASTM STP1213, ASTM

Kuhlemeyer e Lysmer (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems," J. Soil Mech. & Foundations, Div. ASCE, 99(SM5), 421-427

Martin et al. (1975), "Fundamentals of liquefaction under cyclic loading," J. Geotech., Div. ASCE, 101(GT5), 423-438

Itasca (1997), "FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions", version 2.0, User's Manual, Itasca Consulting Group Inc., 1997

Hardin e Drnevich (1972), "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves". J. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98, N°SM7, 667-992

Iai, S. e Sugano, T. (1999), "Soil-structure interaction studies through shaking table tests", Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering proceedings, June 1999, LNEC, Lisboa

Gibson e Scott (1995), "Comparison of a 1g and centrifuge model dynamic liquefaction test: Preliminary results", Earthquake Geotechnical Engineering, IS-Tokyo '95, Balkema, 773-778

Hayashi et al. (1997), "Direct comparison of gravity model and centrifuge model for the seismic problem, Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, III-41(582):207-216

Schoefield e Zeng (1992), "Design and performance of an equivalent-shear-beam (ESB) container for earthquake centrifuge modeling. Technical Report, CUED/D-Soils/TR245, Cambridge University, London