

# **INFLUÊNCIA DE SÉRIES TEMPORAIS NA RESPOSTA SÍSMICA DE DEPÓSITOS DE AREIA EM CONDIÇÕES DRENADAS**

## **INFLUENCE OF TIME-HISTORIES IN THE SEISMIC RESPONSE OF SAND DEPOSITS IN DRAINED CONDITIONS**

Gomes, Rui Carrilho, *ESTBarreiro, IPSetúbal, Portugal, rui.gomes@estbarreiro.ips.pt*  
Santos, Jaime A., *Instituto Superior Técnico, UTLisboa, Portugal, jaime@civil.ist.utl.pt*

### **RESUMO**

Neste trabalho recorre-se a séries temporais compatíveis com espectros de resposta geradas com base na teoria dos processos estocásticos por via de um procedimento de correcção-compatibilização. Este processo dá origem a séries temporais com elevada dispersão ao nível das suas propriedades, nomeadamente a aceleração de pico e o número equivalente de ciclos uniformes. O estudo desenvolvido pretende ilustrar a sensibilidade da resposta sísmica unidimensional de depósitos de areia excitados na base por diferentes séries temporais. As séries temporais são compatíveis com o espectro de resposta e exibem a mesma aceleração de pico. No estudo considerou-se que o depósito de solo era constituído por areia Toyoura, tendo-se adoptado nas análises o método linear equivalente e o modelo elastopástico de Hujeux.

### **ABSTRACT**

In this work spectrum-compatible time histories are used. The iterative procedure for generation of time histories is based on random vibration theory. The time histories obtained exhibit significant scatter of their properties, namely peak acceleration and the equivalent number of uniform cycles. This study shows the sensitivity of the one-dimensional seismic response of sand deposits excited at the base by a set of time histories. These time histories are spectrum-compatible and have the same peak acceleration. The soil deposit is composed by Toyoura sand. Linear equivalent approach and the Hujeux elastoplastic model were used in the analyses.

### **1. INTRODUÇÃO**

Em análises sísmicas não lineares recorre-se, em geral, a séries temporais de aceleração para representar a acção sísmica.

As séries temporais utilizadas neste trabalho são geradas com base na teoria dos processos estocásticos por via de um procedimento de correcção-compatibilização para assegurar a compatibilidade das séries com um determinado espectro de resposta de referência. No entanto, este processo dá origem a séries temporais com elevada dispersão ao nível das suas propriedades, nomeadamente do valor de pico da aceleração e do número equivalente de ciclos uniformes. São seleccionadas algumas séries temporais para avaliar a sua influência na resposta sísmica de um depósito de areia em condições drenadas.

A primeira parte deste trabalho descreve os modelos utilizados e as características das séries temporais utilizadas no presente estudo. A segunda parte apresenta os resultados do estudo efectuado e as principais conclusões.

## 2. MODELOS DE CÁLCULO

### 2.1 Método linear equivalente

Na análise da resposta sísmica do terreno, o comportamento não linear do solo é habitualmente modelado de forma aproximada utilizando o método linear equivalente. Este método, de natureza iterativa, consiste em compatibilizar a distorção e os respectivos valores secantes de  $G$  e  $\xi$  no ponto médio de cada camada de solo, de acordo com a discretização geométrica do problema. Esta compatibilização é efectuada recorrendo a curvas  $G/G_0-\gamma$  e  $\xi-\gamma$  obtidas em laboratório através de ensaios de carregamento sinusoidal considerando os valores máximos da distorção em cada ciclo de histerese.

Porém, durante a actuação de um sismo, as distorções no solo variam de forma irregular atingindo poucas vezes os valores de pico. Seed *et al.* [1], no contexto da verificação à susceptibilidade de liquefacção das areias, introduziram uma metodologia para converter a história irregular das tensões de corte num número equivalente de ciclos uniformes de acções sinusoidais com amplitude igual a 65% do valor máximo do módulo da tensão de corte. Convém frisar, que este procedimento foi originalmente estabelecido para amplitudes de distorção elevadas e suficientes para provocar a liquefacção das areias. Posteriormente, admitiu-se que de forma aproximada se poderia admitir o mesmo tipo de relação para níveis de distorção mais baixos, sugerindo que a resposta do solo fosse calculada com base num valor representativo da distorção. Este valor é tomado como uma fracção do valor máximo da distorção ocorrido durante o tempo de actuação do sismo [2]. A este valor representativo da distorção é-lhe atribuído, na literatura, a designação de distorção cíclica equivalente ou efectiva,  $\gamma_{ef}$ . Idriss e Sun [3] propuseram que o valor de  $\gamma_{ef}$  fosse calculado com base na relação empírica seguinte:

$$\gamma_{ef} = R_\gamma \gamma_{m\acute{a}x} = 0.1 (M-1) \gamma_{m\acute{a}x} \quad (1)$$

em que  $M$  é a magnitude do sismo e  $\gamma_{m\acute{a}x}$  é o valor máximo da distorção.

O valor do coeficiente  $R$  varia então entre 0.5 e 0.7 para sismos com magnitude entre 6 e 8, respectivamente. No entanto, segundo aqueles autores, a resposta dinâmica do sistema não é muito sensível àquele coeficiente, sendo o valor de 0.65 referido frequentemente na literatura. Na utilização deste conceito de distorção cíclica equivalente impõe-se que as propriedades compatíveis do solo  $G/G_0-\gamma$  e  $\xi-\gamma$  se mantenham invariáveis durante a actuação do sismo, independentemente se a distorção num determinado instante for pequena ou elevada. Este método é incapaz de modelar a variação da rigidez do solo que ocorre na realidade durante a actuação de um sismo. Assim, poderão ocorrer resultados menos precisos em algumas situações particulares, tais como:

- dado que a rigidez do sistema não varia durante o tempo de análise, caso haja uma coincidência entre o período predominante da acção sísmica e o período fundamental do sistema, obter-se-iam efeitos de sobreamplificação que não ocorreriam na realidade;
- a utilização dos parâmetros compatíveis conduzem, em geral, a uma resposta mais amortecida ou atenuada, sobretudo quando a história de distorções tiver um valor de pico bem pronunciado.

A acção sísmica pode ser introduzida através de séries temporais, obtendo-se a resposta em qualquer ponto do depósito de solo, sendo esta via conhecida como determinística. Em alternativa, a acção sísmica pode ser descrita pela densidade espectral de potência, sendo necessário recorrer a teoria dos processos estocásticos para obter o valor da resposta com uma dada probabilidade de ocorrência (normalmente 50%), designando-se esta via como probabilística.

## 2.2 Lei elastoplástica de Hujeux

A lei constitutiva de Hujeux [4] é do tipo elastoplástico com endurecimento (ou amolecimento) cinemático. O modelo baseia-se numa formulação escrita em tensões efectivas e permite descrever o comportamento dos solos sob acções cíclicas. Esta lei integra 3 mecanismos de deformação deviatórica plana em planos ortogonais e um mecanismo de deformação isotrópica. A cada mecanismo deviatórico está associado uma superfície de cedência, uma lei de fluxo e uma variável de endurecimento,  $r_k$ , correspondente ao nível de distorção no respectivo plano.

O critério de cedência de cada mecanismo deviatórico é definido por:

$$f_k(p', q, \varepsilon_v^p, \varepsilon_d^p) = q_k - p'_k \sin \phi'_{pp} \cdot F_k \cdot r_k \quad (2)$$

onde

$$F_k = 1 - b \ln \left( \frac{p'_k}{p'_c} \right) \quad (3)$$

em que  $\phi'_{pp}$  corresponde ao ângulo de atrito do solo em plasticidade perfeita. O parâmetro  $b$  é função da natureza do solo, condicionando o raio de curvatura da superfície de cedência. Este parâmetro controla a influência da razão  $p'_k/p'_c$ , sendo particularmente relevante para areias densas ou argilas sobreconsolidadas em que  $p'_k \ll p'_c$ . Se  $b=0$ , o critério de cedência reduz-se ao critério de Mohr-Coulomb, enquanto que para  $b=1$ , o critério de cedência é do tipo Cam-Clay.

A variável  $r_k$  está associada à deformação plástica deviatórica,  $\varepsilon_d^p$ , através da seguinte relação hiperbólica:

$$r_k = r_k^{el} + \frac{\varepsilon_{d,k}^p}{a + \varepsilon_{d,k}^p} \quad (4)$$

com:

$$a = a_1 + (a_2 - a_1) \cdot \alpha_k(r_k) \quad (5)$$

Para cada mecanismo deviatórico  $k$ , com base na lei de dilatância de Roscoe, o incremento de deformação volumétrica plástica é dado por:

$$\dot{\varepsilon}_{v,k}^p = -\lambda_k^p \alpha_\psi \alpha_k(r_k) \left( \sin \psi + \frac{q_k}{p'_k} \right) \quad (6)$$

em que  $\psi$  representa o ângulo que define a linha do estado característico e  $\alpha_\psi$  é um escalar que controla a amplitude da dilatância.

O endurecimento volumétrico é comum a cada mecanismo, sendo expresso a partir da tensão efectiva média no estado de plasticidade perfeita,  $p'_c$  (pressão crítica) e da deformação volumétrica plástica,  $\varepsilon_v^p$ :

$$p'_c = p'_{c0} \cdot \exp(\beta \cdot \varepsilon_v^p) \Leftrightarrow \varepsilon_v^p = \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{p'_c}{p'_{c0}} \quad (7)$$

em que o módulo de compressibilidade plástico,  $\beta$ , representa o declive da linha de estados críticos, LEC, no plano  $(\varepsilon_v^p, \ln p')$ . Note-se que os mecanismos distorcionais estão ligados entre si pela variável  $\varepsilon_v^p$  e pela tensão média,  $p'$ .

No mecanismo isotrópico apenas se produzem deformações volumétricas puras. O critério de cedência do mecanismo isotrópico, dependente da variável de escoamento isotrópico  $r_{iso}$ , que é definida por:

$$f_{iso} = |p'| - d \cdot p_c \cdot r_{iso} \quad (8)$$

com:

$$r_{iso} = r_{iso}^{el} + \frac{\varepsilon_{v,iso}^p}{c \frac{p_c}{p_{ref}} + \varepsilon_{v,iso}^p} \quad (9)$$

em que  $d$  representa a distância entre a linha de estados críticos, LEC, e a linha de consolidação isotrópica, LCI, no plano  $(e, \ln(p'))$ . A variável  $c$  assume o valor  $c_1$  em carregamentos monotónicos e o valor  $c_2$  em carregamentos cíclicos.

Como se pode constatar, alguns dos parâmetros têm significado físico bem definido e podem ser obtidos através de ensaios de caracterização física e mecânica convencionais, enquanto que outros são de difícil obtenção ou são meramente numéricos. A identificação e calibração dos parâmetros do modelo torna-se assim uma tarefa essencial para a sua validação.

### 3. PERFIL GEOTÉCNICO DE ESTUDO

Para efeitos do estudo, definiu-se um cenário geotécnico constituído por um depósito de areia com 20 m de espessura sem nível freático assente sobre meio elástico semi-infinito com reduzido contraste de rigidez. Para o material do depósito, adoptaram-se as propriedades da areia Toyoura, em virtude de ser um solo bem conhecido com imensos resultados de ensaios laboratoriais publicados na bibliografia.

Para o estudo que se pretende realizar, interessa sobretudo caracterizar o comportamento do solo sob acções cíclicas de corte simples em condições drenadas, pelo que a calibração dos parâmetros do modelo elastoplástico foi efectuada de modo a reproduzir o andamento das curvas  $G/G_0-\gamma$  e  $\xi-\gamma$ . Assim, foi possível calibrar os parâmetros de acordo com a metodologia definida por Santos *et al.* [5].

Os parâmetros do modelo elastoplástico considerados são indicados no Quadro 1, admitindo para a areia Toyoura uma densidade relativa  $Dr=64\%$ .

O módulo de distorção inicial relaciona-se com a tensão efectiva média através da relação:

$$G_0 = G_{ref} \cdot \left( \frac{p'}{p_{ref}} \right)^n \quad (10)$$

em que  $G_{ref}$  e  $p_{ref}$  representam o módulo de distorção e a tensão média de referência.

Quadro 1 - Parâmetros geotécnicos do cenário de estudo.

Depósito de solo			
Prof. (m)	Camada	$r_{el}$	$a_2$
0 a 5	1	2,43E-3	1,05E-3
5 a 10	2	1,23E-3	1,89E-3
10 a 15	3	1,02E-3	1,94E-3
15 a 20	4	8,90E-4	1,53E-3
$b=0,2$ ; $d=4,62$ ; $\alpha=1$ ; $\beta=13,3$ ; $\phi_{pp}=31^\circ$ ; $c_1=0,06$ ; $c_2=0,03$ ; $a_1=2,50 \times 10^{-5}$ ; $r_{hys}=r_{el}$ ; $p'_{co}=2,50\text{MPa}$ ; $n=0,4$ ; $m=1$ ; $G_{ref}=262,6\text{MPa}$ ; $K_{ref}=350,2\text{MPa}$ ; $p_{ref}=1\text{MPa}$			
Semi-espaço $E=370\text{MPa}$ ; $\nu=0,2$			

Aos parâmetros mensuráveis e com significado físico bem definido foram atribuídos valores em consonância com os resultados de ensaios laboratoriais sobre o material. Quanto aos restantes parâmetros numéricos, a calibração resultou do ajustamento dos parâmetros ao andamento das curvas  $G/G_0-\gamma$  e  $\xi-\gamma$ .

Com base nos parâmetros indicados no Quadro 1, determinaram-se as curvas  $G/G_0-\gamma$  e  $\xi-\gamma$  indicadas na Figura 1.

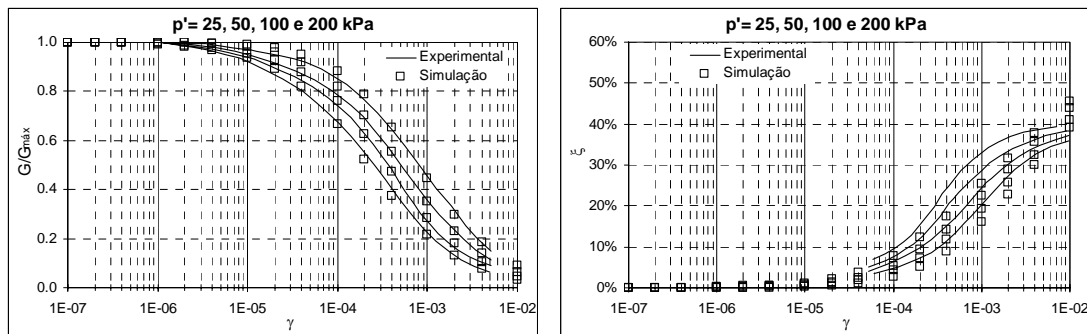


Figura 1 - Curvas  $G/G_0-\gamma$  e  $\xi-\gamma$  para a areia Toyoura.

Verifica-se que a lei reproduz adequadamente as curvas de  $G/G_0-\gamma$  e  $\xi-\gamma$ , embora manifeste valores do amortecimento relativamente elevados para grandes deformações.

#### 4. SÉRIES TEMPORAIS COMPATÍVEIS COM ESPECTRO DE RESPOSTA

Para desenvolver análises através do método linear equivalente ou fisicamente não lineares no domínio do tempo é necessário recorrer a séries temporais. No entanto, tanto a regulamentação nacional em vigor, RSAEEP [7], como a regulamentação europeia, Eurocódigo 8 [8], definem a acção sísmica de referência através de espectros de resposta elásticos.

Neste trabalho, adoptaram-se séries temporais compatíveis com espectros de resposta, geradas com base na teoria dos processos estocásticos através de um procedimento de correcção-compatibilização [9]. Esta via dá origem a séries temporais com elevada dispersão ao nível das suas propriedades, nomeadamente do número equivalente de ciclos uniformes e do valor de pico da aceleração, como se ilustra na Figura 2.

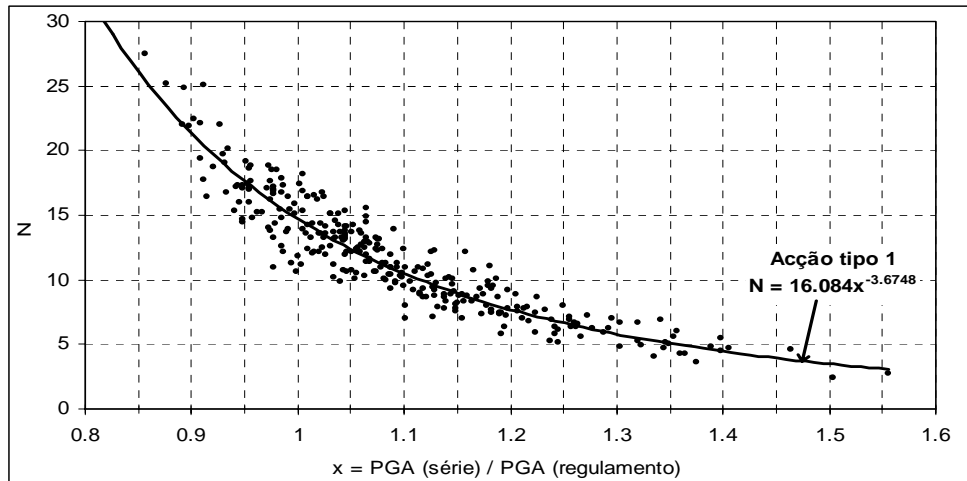
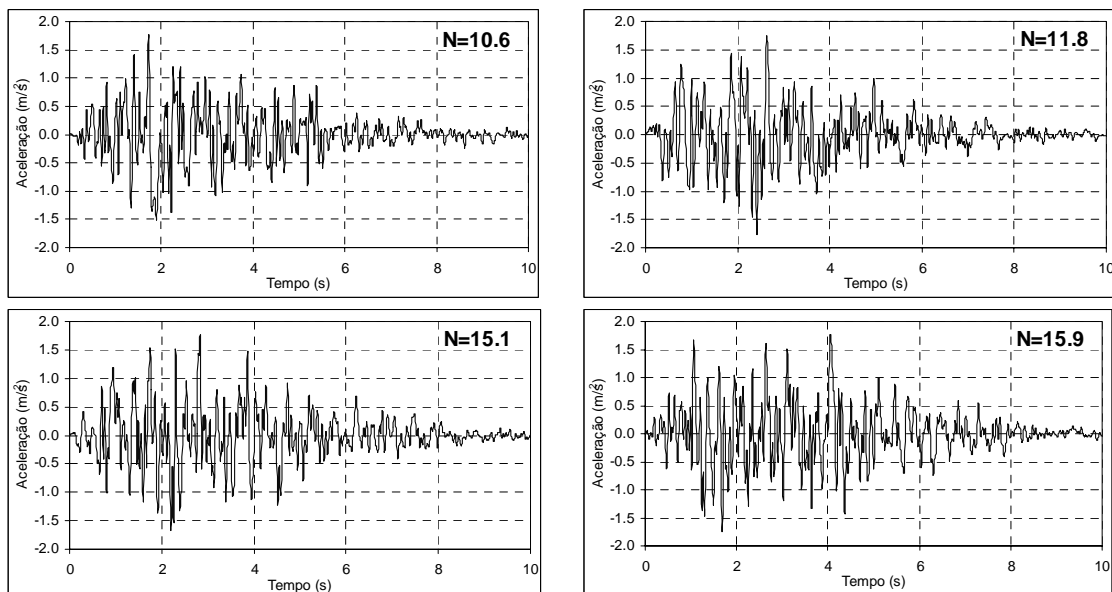


Figura 2- Número equivalente de ciclos uniformes, N, em função da aceleração de pico normalizada.

O Eurocódigo 8 [8] estabelece condições entre o espectro de referência e o espectro médio das séries artificiais. As condições apresentadas são as seguintes:

- 1) utilização de um mínimo de 3 séries;
- 2) para período nulo, o valor do espectro de resposta médio das séries não deve ser inferior ao valor do espectro de resposta elástico regulamentar;
- 3) nenhum valor do espectro de resposta médio das séries deve ser inferior a 90% do valor correspondente do espectro de resposta elástico regulamentar;
- 4) para uma gama intermédia de períodos, os valores do espectro de resposta médio das séries não deve ser inferior a 2,5 vezes o valor esperado da aceleração de pico.

Neste estudo seleccionaram-se 6 séries temporais compatíveis com a acção tipo 1 para terreno tipo 1 do RSAEEP [7], cuja aceleração de pico coincide com o valor regulamentar ( $x=1$ ) (ver Figura 2). No entanto, o número equivalente de ciclos uniformes, N, varia entre 10,6 e 18,2 ( $\pm 70\%$ ).



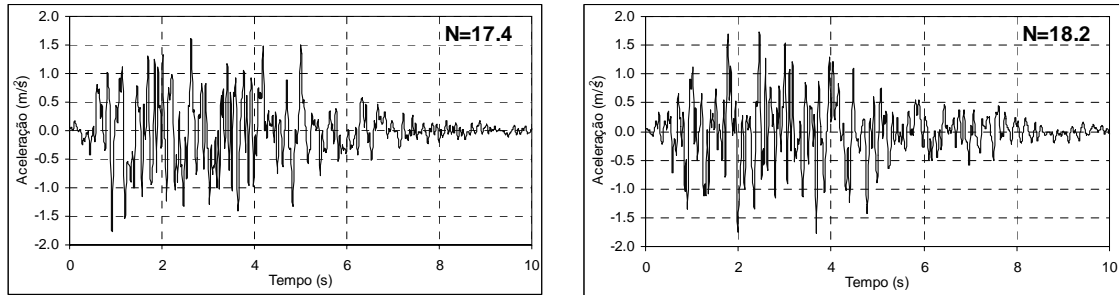


Figura 3 - Séries temporais de aceleração.

Na Figura 4 apresenta-se o espectro de resposta elástico médio das séries temporais em comparação com o espectro de resposta elástico de referência definido no RSAEEP [7].

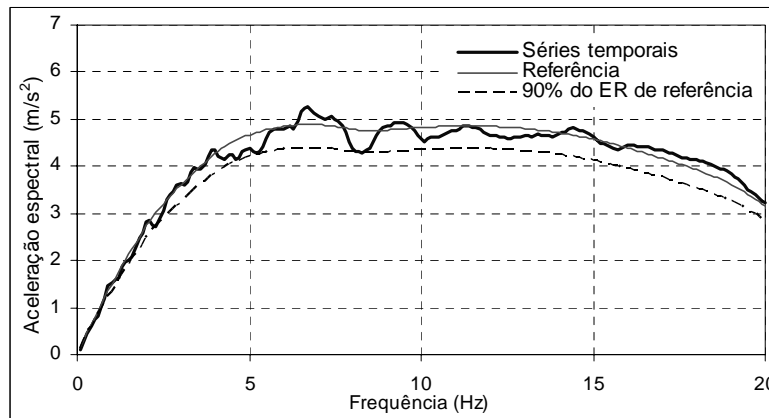


Figura 4 - Espectros de resposta.

No Quadro 2 apresentam-se os valores do factor de forma  $\delta$  e da frequência central  $\Omega$  associados a cada uma das séries temporais e à acção sísmica regulamentar, determinados de acordo com a teoria dos processos estocásticos:

$$\Omega = \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} ; \delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}} \quad (11)$$

em que  $\lambda_i$  representa o momento espectral de ordem  $i$ :

$$\lambda_i = \int_0^{\infty} S(\omega) \omega^i d\omega \quad (12)$$

onde  $S(\omega)$  representa a densidade espectral de potência para a frequência  $\omega$ .

Quadro 2 – Número equivalente de ciclos uniformes, factor de forma e frequência central.

	N	Factor de forma	Frequência central (Hz)
Séries temporais	10.6	0.59	7.7
	11.8	0.59	7.3
	15.1	0.60	7.4
	15.9	0.59	7.4
	17.9	0.60	7.3
	18.2	0.58	7.5
Acção tipo 1, terreno tipo 1 [7]		0.56	7.1

Do quadro anterior, constata-se uma grande semelhança entre os valores do factor de forma e da frequência central das séries temporais quando comparadas entre si e com a acção sísmica de referência. Este resultado é uma consequência do processo adoptado para a geração das séries temporais, baseado na compatibilização do espectro de resposta das séries com o espectro de referência.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nas Figuras 5 e 6 representam-se os principais resultados da resposta sísmica máxima em função do número equivalente de ciclos uniformes,  $N$ . Nestas figuras estão apresentados os resultados recorrendo à lei elastoplástica, EP, e ao método linear equivalente, LE, recorrendo às vias determinística e probabilística.

Para o método linear equivalente, consideraram-se camadas com 2,5 m de espessura para o depósito de solo sobrejacente ao meio elástico semi-infinito. Para as análises elastoplásticas, utilizou-se o programa Gefdyn [6] que incorpora a lei constitutiva de Hujeux. O modelo numérico consistiu numa coluna de elementos finitos quadrangulares de 4 nós com 0,25x1,0m sobre elementos do tipo paraxial, que simulavam o meio elástico semi-infinito.

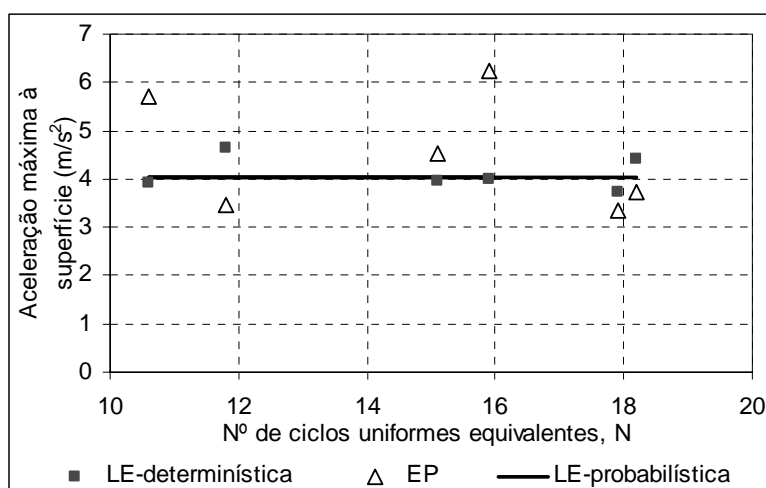


Figura 5 - Aceleração máxima à superfície para cada série temporal.

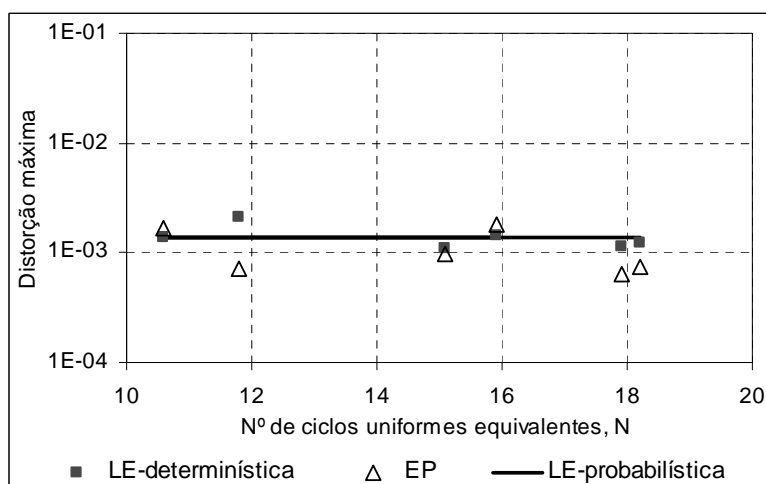


Figura 6 - Distorção máxima no depósito arenoso para cada série temporal.



Quadro 3 - Síntese dos valores máximos da resposta.

Lei constitutiva	Aceleração máxima à superfície (m/s <sup>2</sup> )		Distorção máxima	
	LE-determinística	EP	LE-determinística	EP
Média	4.1	4.5	1.4E-03	1.1E-03
Máximo	4.7	6.2	2.1E-03	1.8E-03
Mínimo	3.7	3.4	1.1E-03	6.3E-04
Coef. de variação	9%	27%	26%	48%

As Figuras 5 e 6 e o Quadro 3 anteriores permitem constatar que:

- não se evidencia nenhuma correlação entre o número equivalente de ciclos uniformes e os máximos da resposta quer em termos da aceleração à superfície, quer em termos da distorção;
- regista-se maior dispersão nos máximos da resposta quando é utilizada a lei elastoplástica de Hujeux;
- para o nível de acção estudado, as leis constitutivas deram origem a estimativas dos máximos globalmente semelhantes.

A ausência de influência do número equivalente de ciclos uniformes,  $N$ , na resposta sísmica pode ser compreendida tomando em consideração o nível de deformação alcançado neste estudo e pelo facto de a análise ter decorrido em condições drenadas. A distorção máxima foi da ordem de  $2 \times 10^{-3}$ , exibindo o solo, nesta gama de distorções, ciclos histeréticos estáveis. Desta forma, a ocorrência de um maior ou menor número de ciclos de carregamento não condiciona significativamente os máximos da resposta.

A dispersão registada na resposta prende-se essencialmente com o conteúdo de frequências da acção sísmica introduzida.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo pretendeu ilustrar a influência de séries temporais compatíveis com um dado espectro de resposta e com o mesmo valor de pico da aceleração na resposta sísmica de depósitos de areia, utilizando o método linear equivalente e a lei elastoplástica de Hujeux.

O estudo comparativo realizado permitiu estabelecer as seguintes conclusões gerais:

- na gama de deformações em que os ciclos histeréticos são estáveis, não se evidencia nenhuma relação entre o número equivalente de ciclos uniformes e os máximos da resposta sísmica do terreno;
- a variabilidade registada na resposta deve-se essencialmente à variabilidade do conteúdo de frequências da acção introduzida.

Mais estudos serão necessários para avaliar as tendências apontadas, nomeadamente para gamas de deformações mais elevadas onde os ciclos histeréticos se tornam não estáveis, particularmente em condições não drenadas onde a geração de pressões intersticiais pode originar, em casos extremos, fenómenos de liquefacção ou de mobilidade cíclica.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores desta comunicação desejam expressar os agradecimentos ao GRICES - Gabinete de Relações Internacionais da Ciência e do Ensino Superior e ao CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique pelo apoio proporcionado no âmbito do protocolo estabelecido entre as duas instituições.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Seed, H.B.; Idriss, I.M.; Makdisi, F. e Banerjee, N. (1975). *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses*. EERC75-29, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [2] Makdisi, F.I. e Seed, H.B. (1979). *Simplified procedure for evaluating embankment response*. JGED. ASCE, vol. 105, no. GT12.
- [3] Idriss, I.M. e Sun, J.I. (1992). *SHAKE91 a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits, user's manual*. Department of Civil Engineering & Environmental Engineering, University of California, Davis, California.
- [4] Hujeux, J.C. (1985). *Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols*. Génie Parasismique, V. Davidovici (ed.), Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 287-302.
- [5] Santos, J.A.; Gomes Correia, A.; Modaressi, A.; Lopez-Caballero, F. e Gomes, R.C. (2003). *Validation of an elastoplastic model to predict secant shear modulus of natural soils by experimental results*. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Lyon, September 22 - 24.
- [6] Aubry, D. e Modaressi, A. (1996). *GEFDYN, Manuel scientifique*, École Centrale Paris, LMSS-Mat.
- [7] RSAEEP (1986). *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Imprensa Nacional, Casa da Moeda, E.P., Lisboa.
- [8] EC8 (2002). Eurocode 8 - *Design provisions for earthquake resistance of structures*. Final Draft, European Prestandard.
- [9] Gomes, R.C.; Santos, J.A. e Oliveira, C.S. (2005). *Design spectrum-compatible time histories for numerical analysis: generation, correction and selection*. Relatório interno do ICIST.