

# DESENVOLVIMENTO, EFEITOS E MITIGAÇÃO DE LIQUEFAÇÃO INDUZIDA POR SISMOS: UM ESTUDO EXAUSTIVO BASEADO EM MODELAÇÃO FÍSICA DINÂMICA NA CENTRIFUGADORA

Development, effects and mitigation of earthquake-induced liquefaction: a comprehensive study based on dynamic centrifuge modelling

Paulo A. Lopes de F. Coelho\*

Stuart K. Haigh\*\*

S. P. Gopal Madabhushi\*\*\*

**RESUMO** – A liquefacção de areias saturadas é uma ameaça séria para estruturas construídas sobre fundações superficiais em regiões sísmicamente activas. A implementação do dimensionamento baseado no desempenho nestes casos é condicionada pelo fraco conhecimento sobre os mecanismos relacionados com o desenvolvimento, magnitude dos efeitos e mitigação da liquefacção induzida por sismos, os quais foram estudados através de um projecto de investigação conjugando técnicas experimentais e numéricas. Este artigo foca a componente experimental do trabalho baseada em modelação física na centrífugadora, descrevendo a forma como a técnica é aplicada no estudo de problemas de liquefacção e apresentando algumas das observações e conclusões preliminares obtidas. Tanto as características mais importantes do comportamento do sistema solo-estrutura quando o solo sofre liquefacção, como as que determinam o desempenho da densificação enquanto medida de mitigação dos efeitos da liquefacção são consideradas.

**SYNOPSIS** – Liquefaction of saturated sands is a serious threat to structures built on shallow foundations in seismically active regions. The implementation of performance-based design in these cases is affected by a poor understanding on the mechanisms related to the development, magnitude of the effects and mitigation of earthquake-induced liquefaction, which were investigated as part of a research project combining experimental and numerical techniques. This paper concentrates on the experimental component of the research based on centrifuge modelling, the use of this technique for investigation of liquefaction problems being described. Some of the experimental observations and preliminary conclusions are presented. Both the most important characteristics of the soil-structure system behaviour when the soil liquefies and those determining the performance of densification as a liquefaction resistance measure are considered.

**Palavras Chave** – Liquefacção induzida por sismos, areia saturada, modelação física na centrífugadora.

---

\* Mestre (DEC-FCTUC), Estudante de Doutoramento, Schofield Centre, Cambridge University Engineering Dep., UK, pal37@cam.ac.uk e Assistente do Dep. de Eng. Civil da Universidade de Coimbra, Portugal, pac@dec.uc.pt.

\*\* PhD (Cantab), Post-doc & Senior Engineer, Schofield Centre, Cambridge University Engineering Department, UK, skh20@cam.ac.uk

\*\*\* PhD (Cantab), Senior Lecturer & Assistant Director, Schofield Centre, Cambridge University Engineering Department, UK, mspg1@cam.ac.uk

## 1 – INTRODUÇÃO

A liquefacção de maciços granulares constitui uma preocupação significativa que deve ser tida em conta no dimensionamento de estruturas construídas em depósitos saturados de areia solta em regiões sismicamente activas. Os efeitos da liquefacção induzida por sismos têm em geral consequências extremamente nefastas sobre as estruturas fundadas nos depósitos afectados, sendo urgente melhorar o conhecimento sobre o fenómeno, quer no que respeita ao seu desenvolvimento quer no que se refere aos seus efeitos. Além disso, é fundamental aperfeiçoar as técnicas de previsão do comportamento de maciços e estruturas sujeitos a liquefacção assim como otimizar o desempenho das técnicas que possibilitam a mitigação dos efeitos deste fenómeno. Estes aspectos tornam-se particularmente importantes numa época em que existe um esforço internacional conjunto no sentido de promover a adopção da filosofia de projecto baseada no desempenho da estrutura relativamente a problemas de engenharia sísmica geotécnica, nomeadamente quando envolvam liquefacção.

Devido à sua localização, frequentemente ocupando zonas inundadas formadas por solos granulares, as pontes são estruturas extremamente vulneráveis aos efeitos da liquefacção. Tal como tem sido demonstrado em eventos sísmicos passados, as pontes são frequentemente afectadas de forma mais ou menos severa pelos efeitos de liquefacção induzida por sismos. Tal problema é particularmente relevante em países em vias de desenvolvimento, onde nem sempre o problema é devidamente acautelado no projecto, e afecta sobretudo estruturas de dimensão relativamente pequena e construídas sobre fundações superficiais. Nestes casos, a análise de casos de acidentes frequentemente sugere que o colapso de pontes resulta do assentamento e/ou rotação das fundações dos pilares alegadamente causados por perda significativa de capacidade de carga da fundação durante e/ou após o sismo (Hamada et al., 1992). O mecanismo de colapso envolve frequentemente tabuleiros da ponte que são deslocados dos seus apoios, causando eventualmente colapso em cadeia da superestrutura. Felizmente, o colapso destas estruturas, ainda que muitas vezes dramático, não é usualmente acompanhado de um número significativo de vítimas, uma vez que o processo decorre usualmente de forma relativamente lenta e o colapso ocorre em geral algum tempo após o fim do sismo (Yong et al., 1988). Tal facto não reduz o carácter catastrófico do colapso de pontes devido a liquefacção induzida por sismos, uma vez que tais acontecimentos afectam de forma crítica o funcionamento dos meios urgentes de salvamento imediatamente após a catástrofe e prolongam significativamente o tempo de perturbação das actividades sociais e económicas afectadas pelo problema.

Actualmente, a verificação da segurança de estruturas relativamente ao problema de liquefacção das fundações é essencialmente baseada em regras semi-empíricas, as quais não se adequam convenientemente aos requisitos modernos do projecto baseado no desempenho. Do mesmo modo, a implementação de técnicas destinadas a mitigar os efeitos da liquefacção não obedece a princípios fundamentais sólidos. Este aspecto é particularmente notório no caso da densificação, que apesar de ser a técnica mais popular para aumentar a resistência dos maciços à liquefacção continua a ser habitualmente implementada com base em princípios semi-empíricos suportados essencialmente pela experiência deduzida com base em acontecimentos reais. Embora alguns programas de elementos finitos actuais, utilizados em conjunto com modelos reológicos avançados capazes de descrever o comportamento de solos saturados sob solicitações dinâmicas, apresentem um potencial elevado, a sua utilização e o seu desempenho na prática mantêm-se abaixo das expectativas. Uma das razões para tal é o fraco conhecimento dos mecanismos físicos que contribuem para as consequências do fenómeno da liquefacção, o que deriva das limitações da informação providenciada tanto pela análise de casos reais resultantes de sismos anteriores como pelos resultados de ensaios laboratoriais realizados em amostras de pequena dimensão. No caso da análise de consequências de casos reais, é em geral insuficiente o conhecimento sobre as condições do terreno antes do sismo, sobre as características do próprio sismo e ainda sobre a forma como a estrutura e o maciço se

comportam durante e após o sismo. De facto, face à usual ausência de instrumentos de medição de acelerações, deformações e pressões neutras no terreno e na estrutura, a única informação disponível com alguma certeza refere-se à identificação de sinais indicadores de ocorrência de liquefacção e à avaliação das consequências finais dos efeitos deste fenómeno. No caso dos ensaios de laboratório realizados em condições controladas sobre amostras de pequena dimensão, as suas inegáveis virtudes não permitem ignorar que o ensaio permite apenas simular o comportamento de um elemento singular do depósito sujeito a uma acção cíclica que representa uma versão idealizada ou simplificada da acção real. Apesar de este tipo de ensaios serem inquestionavelmente uma ferramenta essencial para a aplicação futura de técnicas numéricas ao projecto sísmico geotécnico baseado no desempenho, a sua contribuição dificilmente esclarecerá sobre os mecanismos que contribuem para o comportamento de estruturas sujeitas a liquefacção da fundação induzida por sismos.

Tendo em conta as limitações do conhecimento relativamente ao fenómeno de liquefacção, nomeadamente no que se refere aos mecanismos que controlam os seus efeitos em estruturas construídas em depósitos susceptíveis à liquefacção com ou sem técnicas de mitigação, a modelação dinâmica na centrífugadora oferece uma ferramenta de investigação única capaz de superar as limitações da observação de casos reais e dos ensaios laboratoriais em amostras de pequena dimensão. Para além disso, a descrição detalhada do comportamento dos modelos físicos ensaiados na centrífugadora permite calibrar as técnicas numéricas disponíveis e melhorar a confiança na sua validade ao ponto de que estas possam ser utilizadas na prática com eficácia. Finalmente, a avaliação da necessidade de técnicas destinadas a melhorar a resistência do maciço à liquefacção e a optimização da sua aplicação poderão também beneficiar do conhecimento científico proporcionado por esta técnica de modelação física dos solos.

## **2 – DESCRIÇÃO DO PROJECTO DE INVESTIGAÇÃO**

Com o objectivo de melhorar o conhecimento relativamente ao fenómeno da liquefacção, nomeadamente no que se refere ao seu desenvolvimento e aos seus efeitos sobre fundações superficiais de pontes de pequena dimensão, assim como em relação à mitigação dos seus efeitos através de densificação, um programa de investigação tem sido desenvolvido no Schofield Centre, Cambridge University Engineering Department desde 2002. Este programa de investigação é financeiramente suportado pelo EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) e pela Mott MacDonald, UK, que também colabora na componente técnica do projecto relativamente à implementação da técnica de densificação. O projecto de investigação visa os diferentes aspectos do problema, desde a sua caracterização científica até ao aperfeiçoamento de ferramentas experimentais e numéricas que tornem viável a implementação na prática do projecto baseado no desempenho.

### **2.1 – Definição do problema**

Apesar da segurança de pontes relativamente pequenas construídas sobre fundações superficiais em depósitos de areia saturada sujeitos a liquefacção induzida por sismos estar frequentemente comprometida, o comportamento destas estruturas não está claramente estabelecido. Tal deficiência estende-se ao caso em que zonas densificadas são criadas sob a fundação para minimizar os efeitos da liquefacção do maciço. Neste caso, importantes questões como a geometria que proporciona a melhor relação benefício/custo ou a importância da migração do excesso de pressão neutra entre diferentes zonas do maciço continuam por esclarecer. Os meios laboratoriais e numéricos necessários à implementação na prática do projecto baseado no desempenho, para problemas de liquefacção, sofrem da falta de elementos que permitam a sua validação e calibração, pelo que a aplica-

ção desta técnica de dimensionamento se encontra seriamente comprometida. Este problema é agravado pelas consequências do fenómeno de interacção solo-estrutura presente em acções sísmicas assim como pela influência do estado de tensão efectiva inicial e da densidade relativa da areia relativamente ao excesso de pressão neutra gerado durante uma solicitação dinâmica.

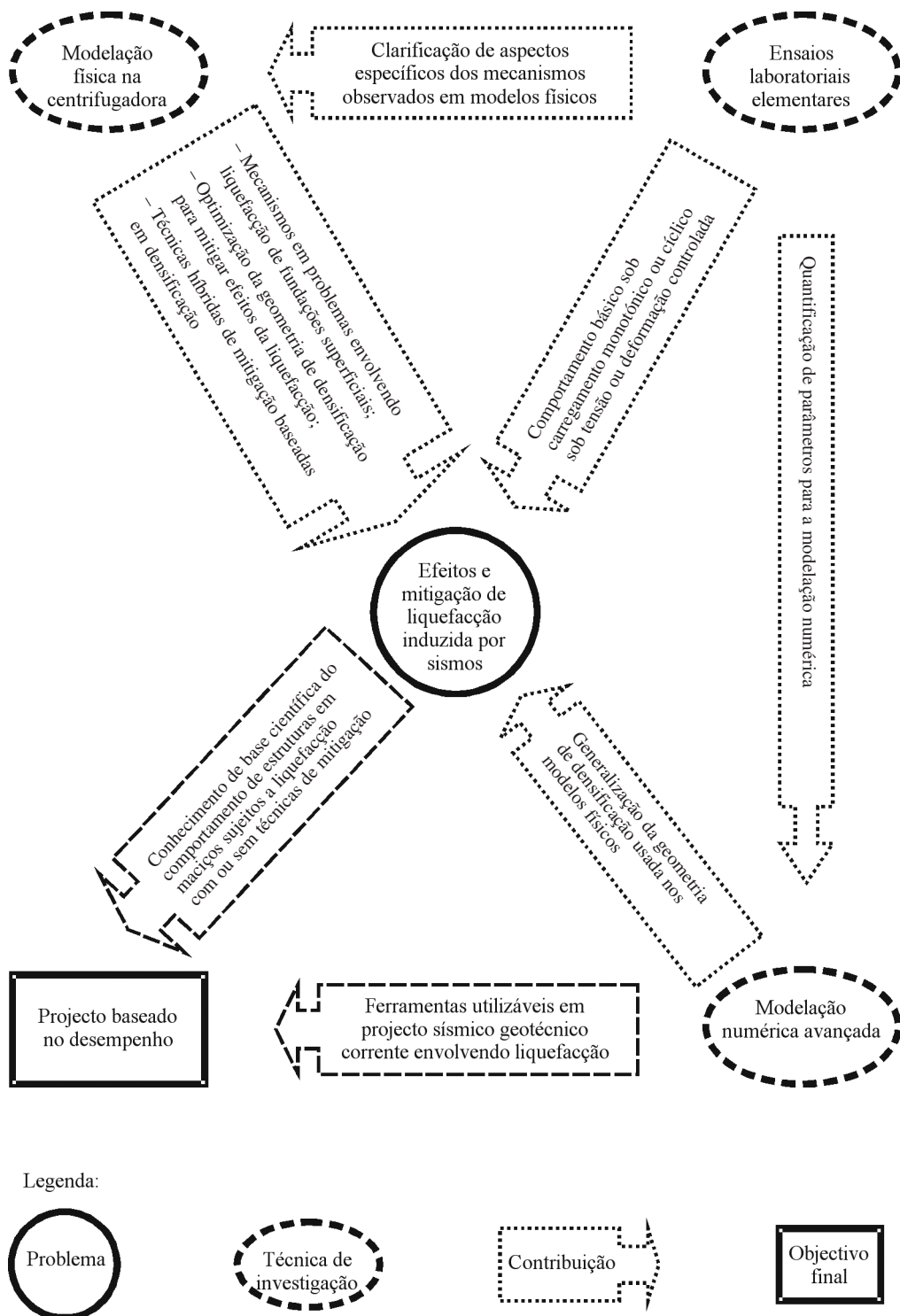
## **2.2 – Objectivos da investigação**

Tendo em conta as características do problema em estudo, o projecto de investigação pretende focar os seguintes aspectos:

- a) caracterização do comportamento de pontes relativamente pequenas construídas sobre fundações superficiais em depósitos de areia saturada sujeitos a liquefacção induzida por sismos, com especial ênfase nos mecanismos responsáveis pelas deformações excessivas ou pelo colapso frequentemente observados nestas estruturas em consequência de sismos reais;
- b) caracterização do comportamento de pontes relativamente pequenas construídas sobre fundações superficiais inseridas em zonas densificadas destinadas a aumentar a resistência do depósito à liquefacção induzida por sismos, com especial ênfase nos mecanismos responsáveis pelas deformações da fundação;
- c) optimização da geometria da zona densificada quando utilizada como medida de mitigação da liquefacção induzida por sismos, esclarecendo cientificamente as razões pelas quais zonas densificadas extensas parecem conferir maior protecção às estruturas relativamente aos efeitos da liquefacção;
- d) desenvolvimento de técnicas híbridas de melhoramento e/ou reforço de solos baseadas em densificação que melhorem o desempenho em relação ao uso isolado desta técnica enquanto medida de protecção de estruturas relativamente ao fenómeno da liquefacção;
- e) caracterização detalhada do comportamento da areia, susceptível à liquefacção, usado no estudo, sob solicitações aplicadas em laboratório em condições de drenagem e carregamento controladas, avaliando a validade dos resultados para avaliação da resistência de depósitos reais à liquefacção e para quantificação de parâmetros necessários à aplicação de técnicas numéricas de previsão do comportamento;
- f) avaliação da capacidade de técnicas numéricas avançadas para modelação e previsão do comportamento de pontes construídas sobre fundações superficiais em depósitos susceptíveis à liquefacção induzida por sismos, com ou sem uso de densificação para aumentar a resistência do depósito à liquefacção.

## **2.3 – Metodologia seguida na investigação**

Tendo em conta as limitações e potencialidades associadas às diversas técnicas de caracterização e modelação do comportamento de solos, assim como as características do problema e os objectivos que se pretendem atingir, o projecto de investigação foi desenvolvido com base na complementaridade da modelação física na centrífugadora, dos ensaios laboratoriais realizados sobre amostras de pequena dimensão, ditos elementares, e da modelação numérica. A Figura 1 esquematiza o modo como estas técnicas foram exploradas de forma a atingir os objectivos propostos, cuja diversidade e complexidade impossibilitam a utilização isolada de qualquer dos métodos de investigação descritos.



**Fig. 1** – Representação esquemática da metodologia utilizada no projecto de investigação.

A componente experimental do programa de investigação baseia-se sobretudo na modelação física realizada na centrífugadora, através da qual se procurou clarificar alguns dos principais aspectos mal esclarecidos do problema. Em particular, procurou-se definir os mecanismos relevantes para o comportamento de estruturas construídas sobre fundações superficiais em solos susceptíveis à liquefacção, com ou sem técnicas para melhoramento da resistência à liquefacção induzida por sismos. A importância de vários fenómenos, como a migração do excesso de pressão neutra entre diferentes zonas do depósito, a interacção solo-estrutura, quer no que se refere à geração de pressão neutra no depósito, quer no que se refere às deformações da fundação, entre outros, foi avaliada durante e após a ocorrência do sismo. Foi ainda realizado um estudo paramétrico com o objectivo de definir a geometria de densificação com a melhor relação benefício-custo, utilizado ainda para clarificar o modo como a existência de zonas densificadas melhora o comportamento das estruturas sujeitas aos efeitos da liquefacção. Finalmente, tendo por base as observações realizadas nos ensaios precedentes, avaliou-se a possibilidade de complementar a técnica de densificação com outras técnicas capazes de melhorar o seu desempenho relativamente à mitigação da liquefacção.

A fim de avaliar os diferentes aspectos do problema, os 14 ensaios dinâmicos realizados na centrífugadora foram agrupados da seguinte forma:

- a) Grupo I- 3 ensaios realizados sobre modelos representativos de depósitos uniformes e saturados de areia com densidade relativa de 50, 60 e 80 %, destinados a esclarecer aspectos básicos da liquefacção de maciços granulares saturados induzida por sismos e caracterizar o comportamento da parte do depósito do sistema solo-estrutura em estudo que se encontra afastado da influência da estrutura, dito campo livre (free-field);
- b) Grupo II- 2 ensaios realizados sobre modelos representativos de pontes de pequena dimensão construídas sobre depósitos sujeitos a liquefacção, destinados a esclarecer os mecanismos que levam ao eventual colapso das estruturas durante ou após a acção sísmica;
- c) Grupo III- 5 ensaios realizados sobre modelos representativos de pontes construídas sobre zonas densificadas de diferente geometria, destinados a clarificar os mecanismos que tornam esta técnica tão atractiva na mitigação da liquefacção e tentar optimizar o volume de material a densificar para maximizar a razão benefício-custo;
- d) Grupo IV- 4 ensaios em que se procura avaliar a possibilidade de melhorar o desempenho da densificação enquanto medida de mitigação da liquefacção induzida por sismos, tendo por base os mecanismos relevantes observados nos restantes modelos físicos.

De modo a confirmar alguns dos mecanismos observados nos modelos físicos testados na centrífugadora, relativamente aos quais a medição de tensões e extensões no solo é usualmente limitada, assim como caracterizar o comportamento do solo durante solicitação triaxial monotónica e cíclica aplicada sob tensão ou deformação controlada e ainda providenciar informação qualitativa relativamente aos parâmetros a utilizar nos modelos numéricos, foram realizados os seguintes ensaios triaxiais sobre amostras de areia saturada:

- a) Grupo I- 2 ensaios de consolidação isotrópica realizados sobre amostras preparadas com densidades relativas de 50 e 80 %;
- b) Grupo II- 4 ensaios de compressão triaxial drenada realizados sobre amostras preparadas com densidades relativas de 50 e 80 % e consolidadas sob dois diferentes níveis de tensão (40 e 120 kPa);
- c) Grupo III- 4 ensaios de compressão triaxial não drenada realizados sobre amostras preparadas com densidades relativas de 50 e 80 % e consolidadas sob dois diferentes níveis de tensão (40 e 120 kPa);

- d) Grupo III- 4 ensaios triaxiais cíclicos não drenados realizados sobre amostras preparadas com densidades relativas de 50 e 80 %, consolidadas sob dois diferentes níveis de tensão (40 e 120 kPa) e ciclicamente solicitadas sob ratios  $\tau/\sigma'_{v0}$  de 0.2.
- e) Grupo IV- 2 ensaios triaxiais não convencionais destinados a clarificar alguns dos aspectos dos mecanismos globalmente identificados nos modelos físicos ensaiados na centrífugadora.

Tendo em conta os objectivos a atingir, a componente numérica do projecto de investigação, que foi desenvolvida com base no programa de elementos finitos Swandyné (Chan, 1988) utilizando o modelo de Pastor- Zienkiewicz Mark-III (Zienkiewicz et al., 1985, Pastor et al., 1985, Pastor e Zienkiewicz, 1986 e Pastor et al., 1990), foi organizada em 3 fases distintas:

- a) Fase I- quantificação dos 15 parâmetros do modelo P-Z-III que permitem simular convenientemente o comportamento da areia sob os diversos tipos de solicitações aplicadas em condições controladas no triaxial;
- b) Fase II- simulação dos ensaios físicos realizados na centrífugadora, procurando identificar a similitude dos mecanismos que determinam o comportamento dos modelos físicos e dos modelos numéricos;
- c) Fase III- simulação de modelos que possuam uma geometria da zona densificada que, por limitações físicas da centrífugadora, não foi considerada nos modelos físicos, permitindo analisar a importância da extensão da zona densificada para além do que é possível observar pelos modelos físicos.

Este artigo concentra-se fundamentalmente na apresentação das conclusões preliminares obtidas com base nos modelos físicos ensaiados na centrífugadora, sendo feita referência a resultados de ensaios elementares ou de modelação numérica quando tal facilitar a discussão dos resultados. Algum do progresso atingido até ao momento no projecto de investigação relativamente à modelação numérica é descrito por Haigh et al. (2005).

### 3 – MODELAÇÃO DE PROBLEMAS DE LIQUEFACÇÃO NA CENTRIFUGADORA

O projecto de investigação descrito neste artigo assenta fortemente no uso das potencialidades da modelação física dinâmica na centrífugadora para a investigação de problemas de liquefacção de maciços não coesivos saturados sob acções sísmicas. Tal opção justifica-se pelas limitações associadas ao uso de ensaios laboratoriais sobre amostras de pequena escala e à aplicação de técnicas de modelação numérica. De facto, apesar da forma notável como Ishihara (1993, 1996) e outros investigadores racionalizaram o conhecimento relativo ao fenómeno da liquefacção, utilizando sobretudo resultados de ensaios laboratoriais de rigor científico inquestionável, esta padece das limitações que tais ensaios envolvem na investigação de problemas desta natureza, em que o tipo de solicitação, a grandeza das deformações ou as condições de fronteira e de drenagem da situação real dificilmente se podem reproduzir num mesmo ensaio. Talvez por isso e pelo facto de os modelos numéricos apresentados como capazes de reproduzir o comportamento não drenado de solos não coesivos sob acções cíclicas apresentarem frequentemente sérias limitações (Manzari e Dafalias, 1997), o projecto de colaboração internacional VELACS tenha provado a falibilidade das previsões numéricas neste campo da engenharia sísmica geotécnica (Manzari et al, 1994). Tais problemas são significativamente agravados pelo facto de que, de uma forma geral, os mecanismos que determinam o comportamento de estruturas sobre maciços liquefeitos serem mal conhecidos.



### 3.1 – Uso da modelação física na centrífugadora em problemas geotécnicos

A modelação física na centrífugadora envolve o ensaio de modelos construídos a uma escala reduzida sujeitos a campos de gravidade de magnitude muito superior à gravidade da Terra, sendo consensualmente aceite como uma técnica valiosa em engenharia geotécnica. A sua aplicação ao estudo do comportamento dinâmico de solos conheceu um interesse crescente nas duas últimas décadas, tendo contribuído decisivamente para a evolução do conhecimento nesta área. O desenvolvimento de novos e mais versáteis contentores, actuadores sísmicos e instrumentos em miniatura tem contribuído para a utilização desta técnica em geotecnia. O Schofield Centre, pólo do Departamento de Engenharia da Universidade de Cambridge dedicado à modelação de processos e construção em geotecnia, é um dos mais antigos centros mundiais que usa a modelação na centrífugadora em investigação geotécnica.

O uso da modelação física na centrífugadora como técnica de investigação de problemas geotécnicos baseia-se no uso da aceleração centrífuga para impor no modelo o nível de tensão presente no protótipo. Esta técnica potencia as virtudes da modelação física convencional, conduzida a 1-g, como sejam a possibilidade de reproduzir o estado físico do solo e de aplicar solicitações realistas, de forma controlada, sob condições de fronteira adequadas ao problema em questão. Assim, a modelação na centrífugadora é usualmente aceite como um complemento bastante útil do método de observação de obras geotécnicas reais (Schofield, 1998). Randolph e House (2001) defendem ainda a complementaridade da modelação física na centrífugadora e da modelação numérica em problemas geotécnicos, pois se a segunda proporciona um meio muito mais económico para analisar o comportamento de uma estrutura geotécnica, a primeira permite identificar os aspectos mais importantes que determinam o comportamento assim como proporcionar observações valiosas que permitem a calibração dos modelos numéricos.

Se as virtudes da modelação física na centrífugadora se aplicam à grande maioria dos problemas geotécnicos, elas são particularmente visíveis no caso de engenharia sísmica geotécnica envolvendo liquefacção, em que a complexidade do problema se conjuga com a quase total ausência de observações reais detalhadas do comportamento de conjunto solo-estrutura. De facto, o estudo do comportamento de maciços granulares saturados sob a acção de sismos fortes é um dos problemas mais complexos em geotecnia, pois a redução do estado de tensão efectiva causada pela geração de excessos de pressão neutra durante a acção dinâmica resulta, por si só, numa degradação dramática das propriedades mecânicas do solo. Além disso, as propriedades mecânicas do solo tendem a variar consideravelmente em cada ciclo com o nível de deformação e também com o número de ciclos, num comportamento descrito como exibindo histerese com degradação (Ishihara, 1996). Por outro lado, atendendo ao carácter imprevisível das acções sísmicas, quer quanto ao momento como quanto ao local da sua ocorrência, as observações à escala real destes fenómenos têm valor consideravelmente limitado, uma vez que é geralmente impossível obter informação detalhada sobre as características locais do sismo, as condições originais do maciço e o comportamento do solo e das estruturas durante e imediatamente após a solicitação dinâmica. É por esta razão que grande parte do conhecimento em engenharia sísmica geotécnica se baseia em análises pós-evento das consequências de sismos, o que exige em geral interpretações bastante subjectivas sobre as características mais elementares do sismo e do comportamento do solo. Pelo facto de recriar os estados físico e de tensão do maciço natural, assim como reproduzir as suas variações durante a aplicação de solicitações dinâmicas controladas que geram excessos de pressão neutra realistas, a modelação na centrífugadora tem no estudo da liquefacção de maciços granulares saturados sob acções sísmicas uma das aplicações mais promissoras. A importância desta técnica é ainda reforçada pela inexistência de alternativas de mérito incontestável que permitam identificar os mecanismos que determinam o comportamento do sistema solo-estrutura.



### 3.2 – Técnica da modelação dinâmica na centrífugadora em engenharia sísmica geotécnica

Na modelação na centrífugadora, um modelo construído com materiais geotécnicos é sujeito a uma solicitação equivalente à que actua no protótipo, o qual é uma representação simplificada do problema real que inclui apenas os aspectos tidos como determinantes para a sua compreensão. O uso, durante o ensaio, de um campo de aceleração gravítica, gerado pela rotação da centrífugadora, muito superior ao real, justifica-se pelo facto de o comportamento do solo ser altamente dependente do estado de tensão a que se encontra sujeito, pelo que um modelo à escala reduzida não pode, por si só, representar fielmente o comportamento real. Caso a modelação seja bem conduzida, a resposta do modelo pode ser extrapolada para o protótipo e ser tomada como representativa da realidade. A validade da técnica depende de vários aspectos que a seguir se descrevem com base na experiência do Schofield Centre.

#### 3.2.1 – Leis de escala

O estudo da resposta de um maciço sob uma acção sísmica, com base num modelo ensaiado na centrífugadora, requer a aplicação de leis de escala adequadas, as quais relacionam a acção sísmica real com a acção equivalente a aplicar ao modelo e permitem extrapolar os resultados experimentais obtidos no modelo para a escala real (protótipo). O Quadro 1 ilustra as leis de escala fundamentais utilizadas em modelação na centrífugadora, estabelecidas com base na necessidade de garantir a semelhança do estado de tensão no modelo e no protótipo a profundidades equivalentes. Por exemplo, num ensaio realizado sob uma aceleração centrífuga igual a  $N$  vezes a aceleração gravítica ( $g$ ), o modelo é uma representação à escala de  $1/N$  do protótipo e a acção sísmica que se lhe transmite tem uma frequência e amplitude de acelerações  $N$  vezes superiores às do protótipo. Os deslocamentos medidos no modelo são multiplicados por  $N$  para obter os valores no protótipo. Como se ilustra no Quadro 1, a lei de escala a aplicar ao tempo depende do tipo de problema em questão: se num problema de percolação o tempo no protótipo é  $N^2$  vezes superior ao medido no modelo, no caso de uma acção dinâmica num depósito granular seco, o tempo no protótipo é apenas  $N$  vezes superior ao do modelo. Este facto gera conflitos na modelação na centrífugadora de problemas em que a acção dinâmica ocorre em simultâneo com processos de fluxo, como acontece em maciços granulares saturados sob acções sísmicas. Nestes casos, a fim de reduzir  $N$  vezes a velo-

**Quadro 1** – Leis de escala utilizadas em modelação física na centrífugadora (Schofield, 1981).

Parâmetro	Escala: modelo/protótipo	Dimensões
Dimensão linear	$1/N$	$L$
Massa	$1/N^3$	$M$
Tempo (fenómeno de fluxo)	$1/N^2$ (b)	$T$
Tempo (fenómeno dinâmico)	$1/N$	$T$
Velocidade	$1$	$LT^{-1}$
Velocidade de fluxo	$N$ (b)	$LT^{-1}$
Aceleração	$N$	$LT^{-2}$
Frequência	$N$	$1/T$
Força	$1/N^2$	$MLT^{-2}$
Tensão	$1$	$ML^{-1}T^{-2}$
Extensão	$1$	$1$

a) considerando um nível de aceleração centrífuga de  $N$

b) utilizando o mesmo fluido no modelo e no protótipo

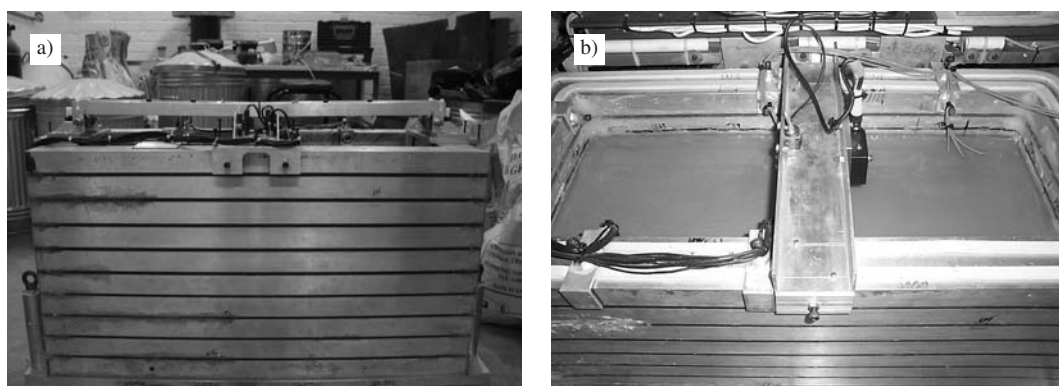
cidade de fluxo e aumentar na mesma razão o tempo, é necessário saturar o modelo com um fluido com uma viscosidade  $N$  vezes superior à do fluido presente no protótipo, no que usualmente se designa por escalamento através da viscosidade dos fluidos. Deste modo é eliminado o conflito entre a lei de escala do tempo deduzida do fenómeno dinâmico e do processo de fluxo, sendo o tempo no protótipo  $N$  vezes superior ao tempo no modelo.

### 3.2.2 – Preparação dos modelos

A preparação dos modelos e as condições em que estes são ensaiados são aspectos fundamentais da modelação na centrífugadora, pois estes determinam a qualidade dos resultados obtidos. O objectivo é que o modelo se comporte como o protótipo e os resultados representem a realidade, ainda que de um modo geral os modelos sejam construídos com solo reconstituído, o qual exhibe as conhecidas limitações no que se refere à representação do comportamento de solos reais, devido à questão da diferença das estruturas presentes no solo natural e reconstituído. De particular importância são as condições de fronteira impostas aos modelos. Uma vez que estes possuem em geral dimensão limitada, é importante que as fronteiras físicas não determinem o comportamento do modelo geotécnico que se pretende avaliar, nomeadamente na modelação de acções dinâmicas.

#### – Condições de fronteira

Nas centrífugas de maior capacidade, os modelos são preparados no interior de um contentor que define a fronteira física do modelo durante o ensaio. No caso de ensaios dinâmicos, é essencial utilizar contentores com paredes que imitem o comportamento do solo durante o ensaio, de forma a simular uma extensão lateral infinita do modelo e minimizar os designados efeitos de fronteira. Por esta razão, em ensaios dinâmicos na centrífugadora, os contentores primitivos do tipo rígido usados em problemas estáticos são substituídos por contentores tipo “ESB” (“Equivalent Shear Beam”), formados por anéis intercalados de metal e neoprene com rigidez global equivalente à do solo em estudo (Zeng e Schofield, 1996). O mais recente contentor tipo “ESB” construído no Schofield Centre (Fig. 2), possui dimensões internas ( $L \times B \times H$ ) de 673 mm x 253 mm x 427 mm, sendo as suas características detalhadas por Brennan e Madabhushi (2002).



**Fig. 2** – Vistas lateral (a) e superior (b) do mais recente contentor “ESB” do Schofield Centre.

Embora o princípio subjacente ao funcionamento dos contentores tipo ESB seja sólido, a utilização destes na prática mostra algumas dificuldades, até porque por um lado, o seu funcionamento,

em rigor, só é válido para as condições de dimensionamento, as quais se baseiam necessariamente num só tipo de areia colocada com uma determinada densidade. Por outro lado, sobretudo em problemas de liquefacção, em que as propriedades mecânicas da areia sofrem degradação significativa durante o ensaio, os efeitos de fronteira tendem a aumentar à medida que as propriedades da areia se afastam das exibidas pelas paredes, as quais mantêm uma rigidez constante ao longo do ensaio. No caso de problemas de liquefacção, tal obriga a que apenas a zona central dos modelos deva ser considerada para a avaliação do comportamento de maciços e estruturas durante acções sísmicas (Coelho et al., 2003).

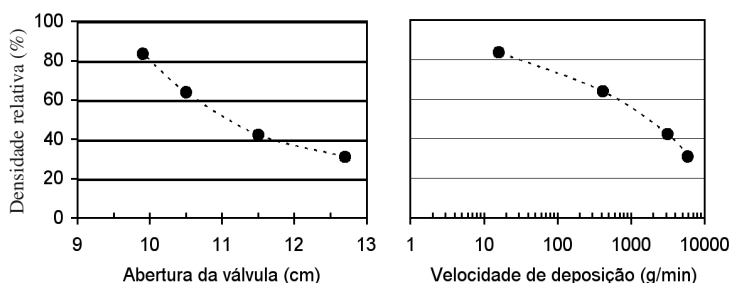
### – Colocação da areia

Devido à dimensão dos modelos e às dificuldades em recolher amostras intactas de solos arenosos, os ensaios na centrífugadora destinados a estudar problemas de liquefacção são usualmente realizados sobre modelos formados com solo reconstituído. Ishihara (1993, 1996) descreve os métodos mais comuns de preparação de solos reconstituídos de areia, como sejam a compactação por camadas de areia seca ou húmida, a pluviação aérea de areia seca ou mesmo a sedimentação num fluido, relatando de forma pormenorizada as características dos solos obtidos por cada uma das técnicas. Supõe-se que a técnica mais adequada para a preparação de amostras reconstituídas de areia dependa do ambiente de deposição do depósito natural a estudar e dos efeitos pós-deposicionais a que este tenha estado sujeito durante a sua existência.

Em geral, o método de deposição da areia deve ser reprodutível e garantir uma elevada uniformidade do modelo, qualquer que seja a sua geometria, para além de que deve permitir obter uma variedade de densidades relativas adequada ao problema em estudo. Tendo em conta que, no caso de preparação de modelos com areia uniforme, o método de pluviação aérea de areia seca é o que garante melhores resultados no conjunto destes critérios fundamentais, este é o método geralmente adoptado na preparação de modelos para estudo de problemas de liquefacção no Schofield Centre. A Figura 3 ilustra as características do sistema básico de pluviação de areia seca utilizado na preparação dos modelos ensaiados como parte deste projecto de investigação. A areia seca colocada num silo de altura regulável é libertada a uma velocidade regulada por uma válvula, caindo inicialmente no interior de um tubo e, na fase inicial, caindo livremente sob acção da gravidade. A abertura da válvula determina a velocidade de pluviação e a densidade relativa da areia que constitui o modelo.



a) calibração do sistema de pluviação de areia seca

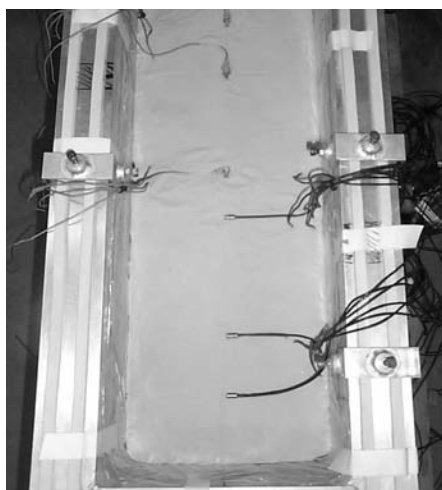


b) abertura da válvula e correspondente velocidade de deposição para obter uma determinada densidade relativa no modelo

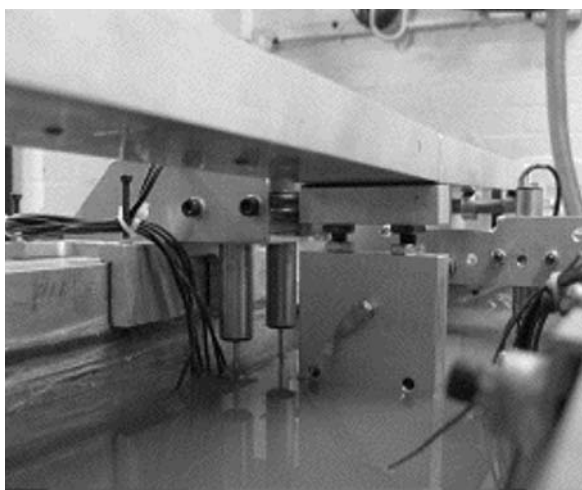
**Fig. 3** – Características do sistema de pluviação de areia seca usado na preparação dos modelos.

### – Instrumentação

O comportamento dos modelos durante o ensaio na centrífugadora é avaliado através de instrumentação apropriada colocada no interior do solo durante a preparação ou instalada no final nas fronteiras acessíveis do modelo. Um modelo destinado a estudar a liquefacção de areias induzida por sismos pode incluir, para registo de leituras, acelerómetros, transdutores de pressão (PPT) e/ou de deslocamento (LVDT), células de pressão, sensores de medição à distância por laser, entre outros. Os instrumentos devem, simultaneamente, ser relativamente pequenos, para minimizar a perturbação do comportamento do modelo, mas suficientemente resistentes para resistir a uma aceleração centrífuga várias vezes superior à aceleração gravítica. Os cabos de ligação devem obedecer aos mesmos princípios dos próprios instrumentos, para além de que a sua instalação no interior do modelo deve ser planeada de modo a evitar significativo reforço do solo ou criação de caminhos preferenciais de percolação (Fig. 4). Deste modo tenta-se compatibilizar a necessidade de colocar um número significativo de instrumentos capazes de registar detalhadamente o comportamento do modelo com a obrigatoriedade de evitar uma perturbação significativa do comportamento do modelo. Os instrumentos devem também ter uma capacidade de resposta compatível com a frequência da acção dinâmica aplicada que se situa, frequentemente, em redor de 50 Hz. Por isso, não é raro exigir instrumentos capazes de disponibilizar uma frequência de leituras que pode atingir ou mesmo exceder 4 kHz.



a) acelerómetros e transdutores de pressão neutra instalados no solo



b) transdutores de deslocamento e acelerómetros instalados numa ponte e em suportes auxiliares

**Fig. 4** – Colocação de instrumentação num modelo a ensaiar na centrífugadora minimizando a perturbação induzida no comportamento.

### – Saturação dos modelos

Os ensaios realizados na centrífugadora com o objectivo de caracterizar o comportamento de maciços granulares saturados sob acções sísmicas são normalmente realizados com correcção da viscosidade do fluido. O óleo de silicone de viscosidade seleccionada de acordo com o nível de aceleração gravítica do ensaio era, no passado, o fluido utilizado nos modelos. Recentemente, por razões fundamentalmente económicas e ambientais, os modelos passaram a ser saturados com uma mistura de água com um derivado da celulose (HPMC, Hydroxypropyl Methylcellulose). Neste ca-

so, os custos de preparação e de deposição após o ensaio são uma ínfima parte dos requeridos pelo óleo de silicone, uma vez que o material é barato, fácil de preparar e não produz efeitos adversos significativos sobre o meio ambiente quando diluído em água, pelo que não requer nenhum tratamento especial após a sua utilização. O uso de Methylcellulose em modelação na centrífuga é descrito por Dewoolkar et al. (1999).

A fim de garantir a eficácia do processo de saturação e evitar a formação de bolhas de ar que afectem o comportamento do modelo e o funcionamento dos transdutores de pressão neutra, a saturação é feita sob vácuo. O modelo, temporariamente selado por uma tampa, é sujeito a uma sucção próxima do vácuo absoluto, enquanto o fluido, sob uma pressão superior, entra lentamente por orifícios localizados na base do contentor. O processo é mantido até toda a quantidade de fluido necessária para saturar o modelo ter sido introduzida.

### 3.2.3 – A centrífuga tipo viga do Schofield Centre

A centrífuga de maior capacidade do Schofield Centre é a centrífuga tipo viga (“beam centrifuge”), a qual foi construída há mais de 30 anos e é presentemente utilizada para realizar os ensaios dinâmicos. Esta centrífuga, ilustrada na Figura 5, possui um diâmetro de 10 m e atinge até 150 g com uma massa de 1 tonelada no braço. Como a figura mostra, a máquina consiste essencialmente num braço horizontal, ou viga, que roda em torno de um eixo vertical central. Em cada uma das extremidades existem plataformas capazes de balançar no plano vertical e que suportam o modelo, num dos lados, e o contrapeso, do lado oposto. Em ensaios dinâmicos, a base do modelo encontra-se a 4.125 m do eixo de rotação e atinge uma aceleração centrífuga máxima de 130 g, que em geral é reduzida para 50 g. Por razões de segurança, a centrífuga está alojada num compartimento enterrado rodeado por uma parede de betão com 1 m de espessura, sendo o ensaio controlado numa sala de controlo remoto.

Os sistemas eléctricos e hidráulicos instalados na centrífuga permitem o uso de corrente eléctrica, água e ar comprimido no modelo, durante a rotação do sistema, garantindo o funcionamento dos diversos actuadores necessários e dos instrumentos de medida durante o ensaio. Um sistema de aquisição de dados especial é utilizado nos ensaios dinâmicos, a fim de evitar que o ruído electromagnético significativo gerado pelo actuador sísmico afecte os dados obtidos durante o seu funcionamento.



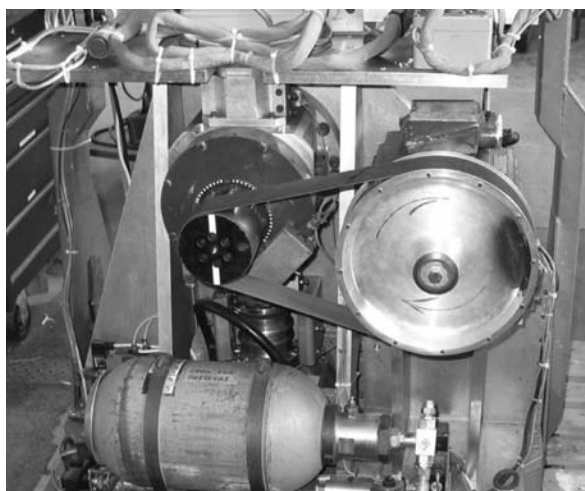
**Fig. 5** – Vista da “beam centrifuge” usada no Schofield Centre para ensaios dinâmicos

### 3.2.4 – O actuador sísmico SAM

A realização de ensaios dinâmicos na centrífugadora requer um actuador sísmico que, durante a rotação da centrífugadora, gere solicitações dinâmicas de características bem definidas e reproduzíveis. O actuador sísmico tem ainda de ser capaz de produzir acelerações com frequência e magnitude elevadas que correspondam, face às leis de escala aplicáveis, a solicitações realistas. Tal implica que, caso se pretenda reproduzir um evento sísmico real, caracterizado por uma frequência dominante entre 0,2 a 5 Hz (Steedman e Zeng, 1995) e em que as acelerações possam atingir 0,2 g, o actuador sísmico tem de gerar, num ensaio realizado a 50 g, uma simulação com uma frequência dominante de 10 a 250 Hz e com acelerações máximas de 10 g. Os tipos de actuador mais comuns são os do tipo mecânico e hidráulico, sendo estes últimos os mais utilizados nos centros em que a capacidade das centrífugadoras é menos limitada ou em que se dá maior importância à simulação de acções sísmicas irregulares.

Desde 1995 que os ensaios dinâmicos realizados no Schofield Centre são realizados com base num actuador sísmico designado por SAM (“Stored Angular Momentum”), o qual é ilustrado na Figura 6.a e descrito em pormenor por Madabhushi et al. (1998). Tal como os seus antecessores no centro, este actuador é do tipo mecânico e possui como principal vantagem o baixo custo de construção, manutenção e operação. A energia é armazenada em pás rotativas impulsionadas por um motor trifásico e que, por via de um sistema mecânico adequado, permite solicitar dinamicamente a base do modelo num movimento planar enquanto uma garra de actuação rápida, controlada por ar comprimido, permanece activada. O actuador é colocado em conjunto com o modelo na plataforma instalada no braço da centrífugadora (Figura 6.b).

A Figura 7 ilustra uma simulação sísmica gerada pelo actuador SAM, o qual permite gerar solicitações dinâmicas do tipo sinusoidal, com duração e frequência dominante pré-definidas, e em que os picos de aceleração aplicadas ao modelo são controlados de forma essencialmente qualitativa. Para além de permitir gerar simulações dinâmicas com frequência constante, o actuador sísmico possui ainda a capacidade para gerar eventos em que a frequência varia de forma constante com o tempo, o que nalguns casos permite avaliar a importância da frequência no comportamento do solo.



a) vista frontal quando instalado na plataforma de ensaio



b) vista superior quando carregado no braço da centrífugadora com modelo

**Fig. 6** – Vistas do actuador sísmico SAM utilizado no Schofield Centre.



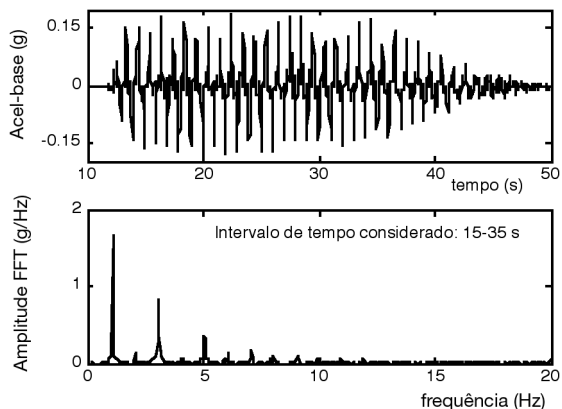


Fig. 7 – Exemplo de história temporal e FFT de simulação sísmica gerada pelo actuador SAM.

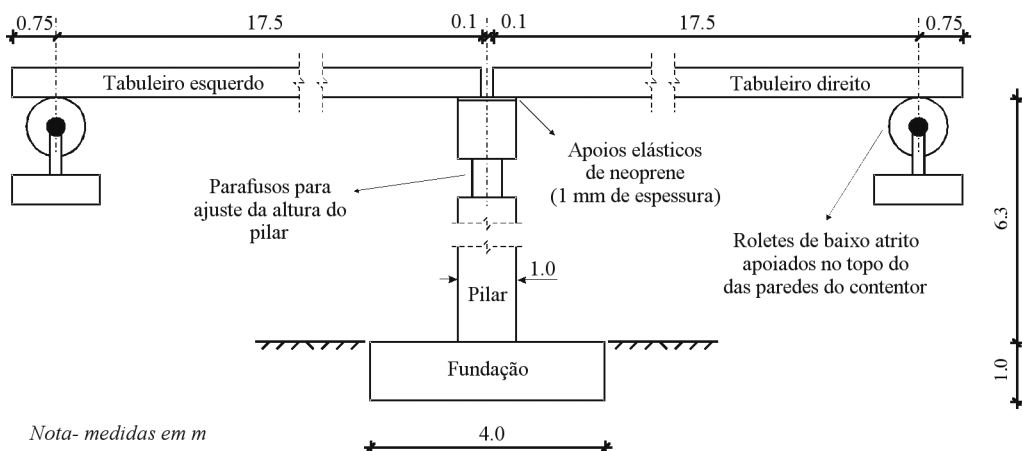
#### 4 – CONCLUSÕES PRELIMINARES DO PROJECTO BASEADAS EM MODELAÇÃO FÍSICA NA CENTRIFUGADORA

Os resultados experimentais produzidos pela modelação física na centrífugadora, integrada no projecto de investigação mais abrangente anteriormente descrito, permitem desde já inferir algumas conclusões sobre o problema em estudo. De seguida apresentam-se algumas das conclusões preliminares mais relevantes, organizadas em função da forma como os ensaios realizados na centrífugadora foram agrupados na descrição da metodologia de projecto (§ 2.3).

Os ensaios na centrífugadora foram realizados de acordo com a melhor prática adoptada do Schofield Centre, a qual foi descrita em termos gerais na secção anterior. Os ensaios foram conduzidos na “Beam Centrifuge” sob uma aceleração centrífuga de 50 g, medida a meia altura do modelo físico. Dadas as características do actuador sísmico utilizado, as simulações sísmicas aplicadas aos modelos representam acções dinâmicas quase sinusoidais que, à escala real, possuem uma frequência predominante de 1 Hz e picos de aceleração de valor até 0,3 g. Embora a resposta não drenada de areias saturadas sob solicitações irregulares seja distinta (Ishihara e Nagase, 1988), vários autores demonstram a validade do uso de solicitações sinusoidais uni-frequência em investigação sobre liquefacção (Ghosh e Madabhushi, 2003). A duração, à escala real, dos eventos gerados variou entre 10 e 25 s, os eventos mais longos usados em modelos puramente geotécnicos, para estudar detalhadamente o seu comportamento numa condição liquefeita, e os mais curtos aplicados a modelos incluindo réplicas de estruturas, para observar o comportamento do sistema numa situação mais realista.

Os modelos, na sua componente geotécnica, foram criados com Fracção E de areia de sílica de Leighton Buzzard, uma areia fina e uniforme altamente susceptível à liquefacção. Os depósitos, com 18 m de profundidade, foram formados por pluviação de areia seca, pelo que o seu comportamento pode não reflectir fielmente o de maciços naturais formados em ambientes deposicionais distintos. A velocidade de deposição foi regulada para obter densidades relativas entre 50 e 80 %, sendo estes valores considerados como representativos de areia solta e densa, respectivamente. A densidade relativa correspondente à areia solta foi escolhida pela incapacidade de preparar modelos saturados menos compactos devido à estrutura extremamente colapsível obtida. A densidade relativa correspondente à areia densa foi seleccionada com base nos valores que em geral se aceitam para a compacidade mínima que pode ser atingida no campo com os métodos de densificação in situ.





**Fig. 8** – Geometria do modelo de ponte utilizado nos ensaios na centrífugadora.

Para eliminar o conflito entre leis de escala, os modelos foram saturados com solução aquosa de Methylcellulose com viscosidade de 50 cSt.

De modo a minimizar os efeitos de fronteira, os modelos foram construídos e testados no interior de um contentor tipo “ESB”, o qual tenta simular o comportamento dinâmico do solo. A fim de permitir modelos representando depósitos com 18 m de profundidade, o contentor tipo “ESB” mais profundo disponível no laboratório, que possui uma profundidade interior de 427 mm e é descrito por Brennan e Madabhushi (2002) foi utilizado na realização dos ensaios.

A Figura 8 ilustra o modelo de ponte utilizado nos modelos ensaiados na centrífugadora em que uma estrutura foi incluída. O modelo de ponte foi construído com peças rígidas produzidas com uma liga de alumínio, sendo constituído por:

- uma fundação directa instalada a 1 de profundidade, com 4 m de largura e comprimento semelhante à largura do contentor, de modo a que o estado de deformação instalado no maciço seja aproximadamente plano e as análises numéricas bidimensionais sejam adequadas;
- um pilar central com mais de 6 m de altura, de altura regulável para corrigir pequenas diferenças na posição da fundação antes do ensaio;
- 2 tabuleiros simplesmente apoiados com vãos de 17,5 m, um apoio duplo formado no topo do pilar através de um apoio elástico de neoprene representativo de apoios reais utilizados nas pontes construídas em zonas sísmicas, e um apoio simples formado por roletes no topo do contentor tipo “ESB”, os quais pretendem evitar acções dinâmicas parasitas transmitidas à estrutura pelas paredes do contentor.

O uso de múltiplos pilares e fundações na estrutura foi condicionado pela dimensão máxima do contentor e pelos efeitos de fronteira próximo das suas paredes, o que desaconselha o uso de zonas do depósito fora do centro para investigar o comportamento do sistema (Coelho *et al.*, 2003). No modelo de ponte mais utilizado nos ensaios, a tensão de contacto transmitida pela base da fundação é de 100 kPa, dos quais 60 % provêm dos tabuleiros e os restantes 40 % se distribuem igualmente pela fundação e pelo pilar. O centro de massa da estrutura está situado sobre o eixo vertical do pilar a uma altura de aproximadamente 0,7 da altura total da ponte medida desde a base da fundação. Num primeiro ensaio foi utilizada uma versão do modelo transmitindo uma tensão de contacto de 75 kPa, com o centro de gravidade a meia altura.

Os modelos foram convenientemente instrumentados, tanto na sua componente geotécnica como estrutural, tendo sido distribuídos, pelo solo e pela estrutura, acelerómetros, transdutores de pressão neutra, de deslocamento e de carga para medir a resposta do modelo às simulações sísmicas aplicadas.

#### 4.1 – Depósitos uniformes e horizontais de areia saturada

O comportamento de maciços uniformes e horizontais de materiais não coesivos saturados, durante acções sísmicas, define o comportamento da zona do depósito não afectada pela estrutura, designada por campo livre (free-field). Este comportamento define a resposta do material numa sollicitação puramente cíclica e pode influenciar o comportamento dinâmico do sistema solo-estrutura quando o depósito sofre liquefacção. A influência da densidade relativa sobre o comportamento do campo livre foi avaliada por 3 modelos testados na centrífugadora, representando depósitos horizontais, uniformes e saturados de areia com densidade relativa de 50, 60 e 80 %. Os modelos foram submetidos a simulações dinâmicas semelhantes para poder comparar a resposta do maciço, conforme discutido em detalhe por Coelho *et al.* (2004a).

##### 4.1.1 – Comportamento durante a acção sísmica

A Figura 9 apresenta as observações realizadas durante a simulação sísmica, nos modelos mais solto e denso, relativamente ao assentamento da superfície, acelerações e excesso de pressão neutra medidos a duas profundidades distintas no interior do depósito e acelerações aplicadas à base do depósito. Os resultados mostram que, durante a acção sísmica, o aumento da densidade relativa do modelo tem os seguintes efeitos:

- redução significativa dos assentamentos à superfície que ocorrem durante o sismo;
- redução limitada da velocidade de geração de excesso de pressão neutra induzida pelos ciclos de carga, embora o valor final do excesso de pressão neutra seja idêntico (as diferenças observadas à superfície parecem ser consequência das dificuldades de avaliar a posição exacta do instrumento superficial no modelo de areia solta);
- aumento significativo dos picos de aceleração transmitidos à zona superficial do depósito, observando-se, relativamente à sollicitação aplicada na base, significativa atenuação das acelerações em areia solta, e considerável amplificação na fase inicial, no caso de areia densa.

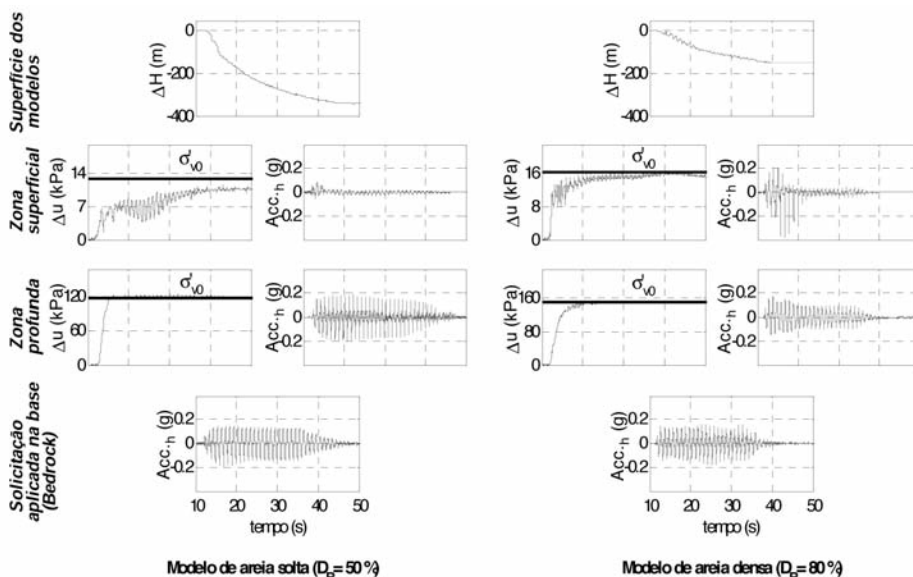
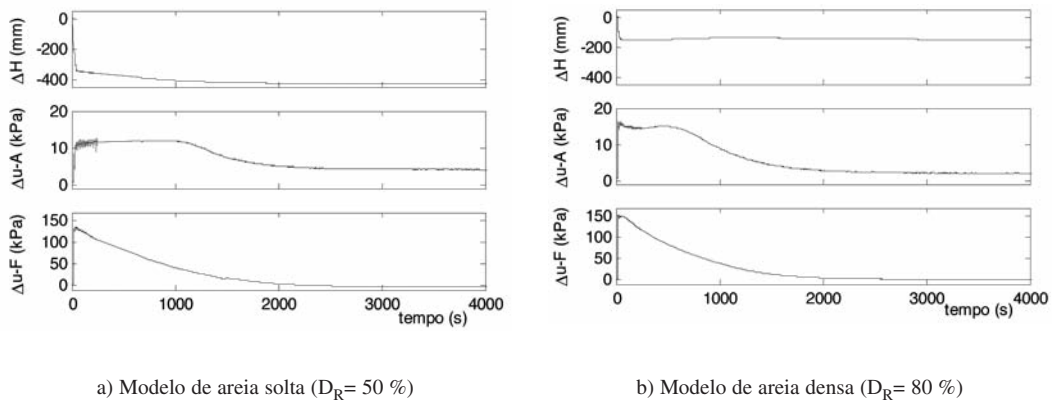


Fig. 9 – Observações durante o sismo em modelos horizontais e uniformes de areia saturada.



**Fig. 10** – Assentamentos e excesso de pressão neutra em modelos horizontais e uniformes de areia saturada durante e muito tempo após o sismo.

#### 4.1.2 – Comportamento após a acção sísmica

A Figura 10 apresenta os assentamentos superficiais e os excessos de pressão neutra junto à superfície (A) e próximo da base do depósito (F), nos mesmos modelos, durante e após a simulação sísmica. Os resultados mostram que, para qualquer densidade relativa do depósito:

- os assentamentos da superfície ocorrem maioritariamente durante a simulação sísmica, sendo quase nulos os assentamentos pós-sismo observados no caso do maciço mais denso;
- maciços que sofram liquefacção induzida por sismos podem manter-se liquefeitos por bastante tempo após o fim do evento, em particular à superfície e no caso de areia solta, sendo a dissipação do excesso de pressão neutra iniciada a partir da base do maciço;
- apesar dos gradientes hidráulicos serem muito semelhantes, as velocidades de assentamento da superfície do terreno correspondentes aos instantes imediatamente antes e imediatamente após o fim do evento sísmico são consideravelmente distintas;

#### 4.1.3 – Fenómeno de liquefacção nos modelos enquanto fenómeno não drenado

A evolução dos assentamentos durante e após a ocorrência do sismo, descrita nas Figuras 9 e 10 e quantificada no Quadro 2, sugere que, nos modelos de depósitos uniformes e horizontais de areia saturada ensaiados na centrífugadora, o fenómeno de liquefacção induzido pela simulação sísmica não se pode descrever como não drenado. De facto, o assentamento da superfície de um depósito uniforme e saturado sob uma solicitação sísmica requer expulsão de um determinado volume de água dos vazios do solo. Uma vez que entre 80 e 95 % do assentamento, de magnitude significativa, se processa durante o sismo, ao mesmo tempo que o solo apresenta valores elevados de excesso de pressão neutra, o comportamento durante este período da areia que forma o modelo pode antes ser descrito como parcialmente drenado.

**Quadro 2** – Assentamento da superfície dos modelos horizontais e uniformes de areia saturada.

Densidade relativa do areia no modelo físico (%)	Assentamento absoluto da superfície			Deformação volumétrica média- $\varepsilon_v$ (%)
	Durante o sismo (mm)	Após o sismo (mm)	Total (mm)	
50	342 (80 % <sup>(a)</sup> )	88 (20 % <sup>(a)</sup> )	430	2.50
80	148 (95 % <sup>(a)</sup> )	7 (5 % <sup>(a)</sup> )	155	0.86

<sup>(a)</sup>percentagem relativamente ao assentamento total

Aceitando que o comportamento dos modelos físicos ensaiados reflecte, pelo menos de forma qualitativa, o comportamento de maciços naturais, 2 questões podem ser formuladas:

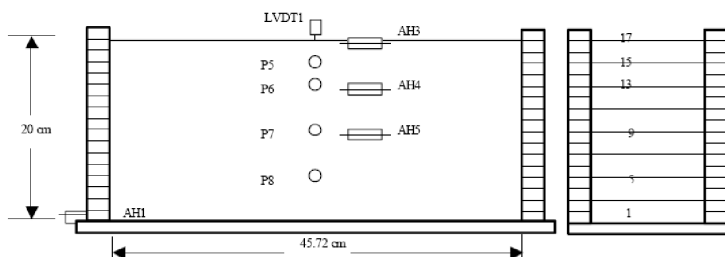
- de que modo podem os ensaios elementares realizados em laboratório sob condições não drenadas ser utilizados para avaliar a resistência de depósitos granulares e saturados à liquefacção, que parece ser um fenómeno parcialmente drenado?;
- qual a influência que o fluxo vertical e ascendente de água tem no desenvolvimento da liquefacção num maciço de areia saturada?

Relativamente à primeira questão, os ensaios laboratoriais não drenados podem fornecer uma imagem distorcida do desenvolvimento da liquefacção num depósito natural, uma vez que não levam em consideração os efeitos dos fluxos de água entre diferentes zonas do maciço durante o sismo. De qualquer modo, tendo em conta o seu mérito na comparação do excesso de pressão neutra gerado em condições não drenadas em diferentes situações e o potencial único para calibração de modelos numéricos, estes ensaios continuam a ser interessantes no estudo de problemas de liquefacção. Porém, a transposição directa de conclusões obtidas nestes ensaios para descrever o comportamento de maciços naturais deve ser feita com bastante cuidado.

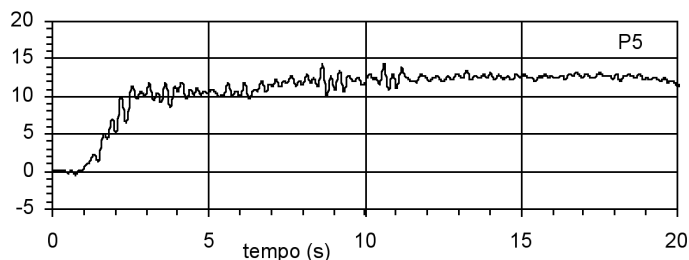
No que se refere ao problema da consideração do fluxo ascendente num maciço com as características dos modelos ensaiados na centrífugadora, a sua existência pode contribuir para a liquefacção de zonas mais superficiais do maciço. Tal deve-se a dois factores principais, que determinam o facto de a maior profundidade ser maior o excesso de pressão neutra gerado. Por um lado, caso o rácio do excesso de pressão neutra contra a tensão efectiva inicial,  $\Delta u/\sigma'_{v0}$ , cresça a igual ritmo a qualquer profundidade, conclui-se que quanto maior a profundidade maior o excesso de pressão neutra gerado no mesmo número de ciclos. Por outro lado, verifica-se que as areias tendem a comportar-se como mais soltas para maiores tensões efectivas de consolidação, pelo que o diferencial do excesso de pressão neutra entre a base e o topo é reforçado. Este fluxo vertical e ascendente tem certamente efeitos sobre o excesso de pressão neutra à superfície, os quais se adicionam ao excesso de pressão neutra gerado localmente.

A importância do fluxo vertical sobre o excesso de pressão neutra junto à superfície de um depósito uniforme de areia saturada durante uma acção sísmica pode também ser avaliada através de análise numérica, como demonstram Prachathananukit e Manzari (2000). Os autores comparam as observações do excesso de pressão neutra gerado por um sismo no modelo 1 de areia saturada realizado durante o projecto VELACS (Taboada e Dobry, 1994), com os resultados da simulação numérica realizada através de um programa de elementos finitos que permite análise acoplada não linear em termos de tensões efectivas, utilizando o modelo constitutivo proposto por Manzari e Dafalias (1997). Verificou-se que, utilizando parâmetros calibrados com base em ensaios laboratoriais monotónicos e cíclicos, é possível reproduzir razoavelmente o excesso de pressão neutra medido (Figura 11b) usando modelação numérica (Figura 11c). É ainda demonstrado (Figura 11d) que o excesso de pressão neutra observado à superfície não pode apenas ser simulado com base na pressão neutra gerada nessa zona, sendo necessário que um fluxo vertical ascendente, actuando em conjunto com a acção dinâmica, seja imposto na fronteira inferior de um modelo numérico que considere apenas a zona superior do maciço para que os resultados coincidam com os obtidos no modelo numérico completo.

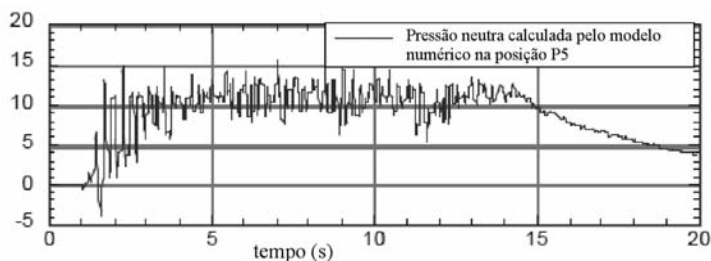
Os modelos físicos sugerem uma modificação significativa da permeabilidade logo que o sismo termina, pois para gradientes hidráulicos idênticos a velocidade de assentamento reduz-se fortemente. Tal observação é reforçada pela modelação numérica apresentada na Figura 11 realizada com permeabilidade constante do depósito. Verifica-se que tal modelação aproxima adequadamente o comportamento durante o sismo, mas sobrestima a velocidade de dissipação pós-sismo. O



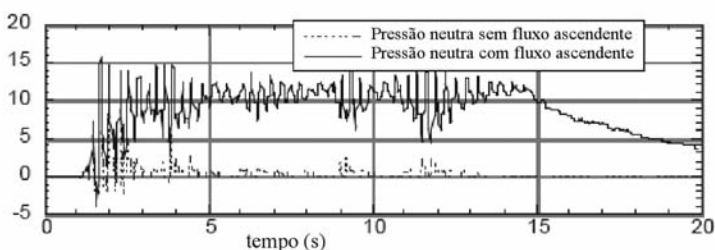
a) modelo físico (Taboada e Dobry, 1994), à esquerda, e malha de elementos finitos (Prachathananukit e Manzari, 2000), à direita, usados na análise.



b) excesso de pressão neutra em P5 medido no modelo físico (Taboada e Dobry, 1994).



c) modelação numérica do excesso de pressão neutra em P5 (Prachathananukit e Manzari, 2000).



d) modelação numérica do excesso de pressão neutra em P5 considerando apenas a zona superficial do depósito sujeita à acção dinâmica na base deduzida da análise numérica completa, com e sem consideração de fluxo na fronteira (Prachathananukit e Manzari, 2000).

**Fig. 11** – Comparação do excesso de pressão neutra na zona superficial de um depósito de areia saturada sujeito a acção sísmica obtido por modelação numérica e modelação na centrífugadora.

aumento da permeabilidade de depósitos liquefeitos foi referido pela primeira vez por Ishihara (1994), que refere a possibilidade de tal resultar da formação transitória de tubos ou fendas durante o sismo, fenómeno entretanto simulado numericamente (Gudehus, 2004).

#### 4.1.4 – Dependência do assentamento superficial em relação à densidade relativa

Tal como se demonstra no Quadro 2, o incremento da densidade relativa da areia que constitui o depósito saturado reduz significativamente o assentamento superficial induzido pela liquefacção do maciço. Foi observado que um aumento da densidade relativa da areia de 50 para 80 % resulta numa redução da deformação volumétrica média do depósito em cerca de 2/3. Tal facto resulta naturalmente da menor propensão que uma areia densa possui para sofrer deformações volumétricas sob qualquer tipo de solicitação, sendo uma das razões pela qual o método de densificação continua a ser usado na mitigação dos efeitos da liquefacção.

#### 4.1.5 – Dependência do excesso de pressão neutra em relação à densidade relativa

Tal como ilustrado na Figura 9, o excesso de pressão neutra observado, a diferentes profundidades, nos modelos representando depósitos uniformes e horizontais de areia saturada devido a uma acção sísmica, não é tão diferente como se poderia supor em função dos resultados usualmente obtidos em ensaios laboratoriais não drenados. Tal como descrito na secção 4.1.3, tal pode ser devido aos efeitos do fluxo vertical ascendente instalado num depósito liquefeito durante uma acção sísmica. De qualquer modo, a ideia geralmente aceite de que o uso da densificação na mitigação dos efeitos da liquefacção é essencialmente determinada pela capacidade da areia densa de gerar menos excesso de pressão neutra durante solicitações dinâmicas pode ter de ser repensada à luz das observações dos modelos ensaiados na centrífugadora. De facto, embora os modelos de areia densa tendam a exibir um crescimento ligeiramente mais lento da pressão neutra com os ciclos de carga, nem a diferença da velocidade de geração nem os valores finais atingidos para o excesso de pressão neutra parecem suportar tal hipótese.

#### 4.1.6 – Dependência da propagação de acelerações no depósito em relação à densidade relativa

A Figura 9 mostra que a propagação vertical e ascendente das acelerações horizontais num depósito liquefeito é altamente dependente da densidade relativa da areia. Como prova a Figura 12, enquanto num maciço de areia solta os picos de aceleração horizontal que atingem a superfície são consideravelmente atenuados desde o primeiro ciclo, já num maciço denso verifica-se que, numa fase inicial que dura vários ciclos, os picos de aceleração superficial reflectem amplificações consideráveis dos valores aplicados na base do modelo (Coelho et al., 2004a). Este comportamento reforça o receio de vários autores de que a densificação possa aumentar a solicitação dinâmica imposta às estruturas a proteger (Mitchell et al., 1998).

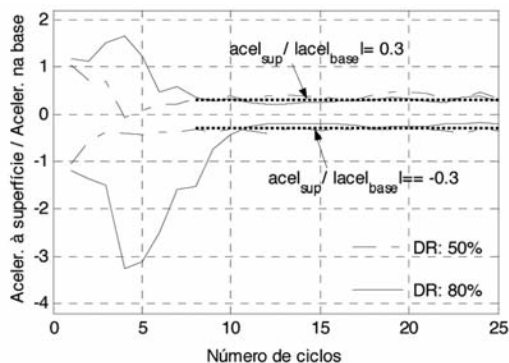


Fig. 12 – Amplificação/atenuação das acelerações horizontais medidas na superfície do modelo.

## 4.2 – Pontes construídas sobre maciços sujeitos a liquefacção

Dois modelos foram ensaiados na centrífugadora para avaliar o comportamento de pontes construídas sobre maciços susceptíveis à liquefacção, sem utilizar meios de melhoramento do solo para mitigar os efeitos da liquefacção. As características dos modelos de pontes testados, identificados por M-75 e M-100 consoante a tensão de contacto transmitida ao depósito, são descritas no início da secção. Tais modelos foram instalados sobre o maciço do modelo, preparado com areia solta e saturada, e submetidos a simulações sísmicas com 10 s de duração, frequência predominante de 1 Hz e picos de aceleração excedendo 0,2 g (Coelho et al., 2004b).

### 4.2.1 – Assentamentos da sapata dos modelos de ponte

O Quadro 3 resume as medições dos assentamentos registados nos modelos ensaiados na centrífugadora. Verifica-se que, em qualquer dos casos, as deformações totais sofridas pelas fundações das pontes são enormes, não podendo ser aceites no dimensionamento de estruturas deste tipo. Verifica-se que, tanto os assentamentos como as inclinações finais da estrutura, deduzidas do diferencial de assentamento entre os bordos esquerdo e direito da fundação, tendem a crescer com a tensão de contacto transmitida à fundação, ocorrendo o aumento mais significativo no período pós sismo. Para um aumento da tensão de contacto de 75 para 100 kPa, os assentamentos médios da fundação crescem 30 %, durante o sismo, e mais de 100 % após o sismo. Verifica-se também que inclinações significativas da sapata só ocorrem após o fim do sismo, sendo a sua importância maior no caso do modelo M-100. De facto, foi observado que durante a acção sísmica parece formar-se um mecanismo que atenua a inclinação da sapata, uma vez que sempre que esta se inclina num ciclo, ciclos posteriores tendem a reequilibrar a sua posição. Este mecanismo resulta aparentemente da resposta do solo liquefeito ao corte, o qual exhibe dilatação acentuada mesmo para densidades relativas de 50 %. Assim, quando a sapata produz deformações mais significativas do solo sob um dos seus bordos, o decréscimo de tensão neutra aí gerado produz uma resposta mais rígida do solo em ciclos posteriores, o que resulta num mecanismo auto-correctivo da inclinação da sapata. Este mecanismo, que deixa de actuar logo que a solicitação passa de dinâmica a estática, pode justificar o facto de roturas de pontes associadas a liquefacção induzida por sismos ocorrer em geral algum tempo após o fim do sismo. Naturalmente que o fenómeno observado pode ser típico apenas da situação particular considerada, em que quer a simulação sísmica quer as características geométricas e mecânicas do modelo, tanto na sua componente estrutural como geotécnica, exibem simetria quase perfeita. Finalmente, é de referir que o assentamento da superfície do terreno medido numa zona relativamente afastada da estrutura, que se pode assemelhar ao campo livre, foi de cerca de 150 mm, pelo que a estrutura assenta consideravelmente mais do que o campo livre.

**Quadro 3** – Assentamentos da sapata da ponte durante e após a simulação sísmica.

Modelo de ponte (tensão de contacto)	Local de medição do assentamento no topo da sapata	Assentamento absoluto da superfície		
		Total (mm)	Durante o sismo (mm)	Após o sismo (mm)
M-75 (75 kPa)	Bordo esquerdo	543	410 <sup>(a)</sup> (76% <sup>(b)</sup> )	133 (24% <sup>(b)</sup> )
	Bordo direito	546	410 <sup>(a)</sup> (75% <sup>(b)</sup> )	136 (25% <sup>(b)</sup> )
M-100 (100 kPa)	Bordo esquerdo	826	530 (64% <sup>(b)</sup> )	296 (36% <sup>(b)</sup> )
	Bordo direito	793	533 (67% <sup>(b)</sup> )	260 (33% <sup>(b)</sup> )

<sup>(a)</sup>valores aproximados.

<sup>(b)</sup>percentagem relativamente ao assentamento total.



#### ***4.2.2 – Excesso de pressão neutra gerado sob a sapata durante a acção sísmica***

Uma das observações mais interessantes obtidas relativamente ao comportamento dos modelos de pontes sobre maciços não melhorados susceptíveis à liquefacção refere-se ao excesso de pressão neutra gerado no maciço durante o sismo. Verificou-se que, durante os primeiros ciclos de carga, o excesso de pressão neutra significativo gerado causa progressiva degradação do comportamento mecânico e, sob acção combinada da acção dinâmica e da estrutura, deformação do solo sob a sapata. Quando as deformações no solo atingem um valor crítico, o solo começa a dilatar e em cada ciclo adicional de carga o excesso de pressão neutra não varia ou pode mesmo ser reduzido, mantendo-se sempre abaixo dos valores presentes no campo livre. Deste modo, uma perda total do estado de tensão efectiva no solo de fundação nunca ocorre, embora a acção sísmica produza uma degradação assinalável das propriedades do solo, devido ao excesso de pressão neutra gerado, que no entanto não se compara a verificada no campo livre. Nesta fase, é de prever que se forme sob a sapata uma coluna de solo relativamente estreita que suporta a carga transmitida pela fundação, a concentração de tensões nessa zona sendo determinada pela diferença de rigidez do solo totalmente liquefeito no campo livre e o solo debaixo da sapata que preserva um valor de tensão efectiva significativo. Finalmente, logo que o sismo termina, um novo acréscimo do excesso de pressão neutra é observado, este resultante do fluxo de água das zonas circundantes do campo livre devido ao diferencial de excesso de pressão neutra gerado durante a acção sísmica. Este processo pós-sismo causa degradação adicional das propriedades mecânicas do solo e promove eventualmente uma nova redistribuição de tensões para as zonas envolventes.

#### ***4.2.3 – Acção dinâmica transmitida à estrutura durante a acção sísmica***

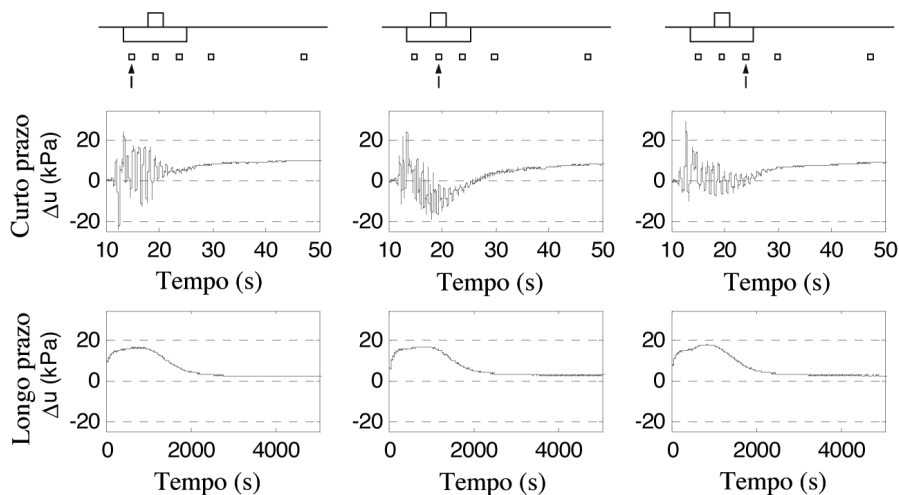
A comparação das acções dinâmicas transmitida à base dos modelos e aplicada à sapata mostram que existe uma atenuação considerável da acção sísmica transmitida à estrutura através do solo sujeito a uma redução significativa do estado de tensão efectiva. Ainda que este factor seja positivo relativamente à solicitação da estrutura durante uma acção sísmica, a magnitude das deformações resultantes da liquefacção do maciço tornam tal vantagem perfeitamente irrelevante.

### **4.3 – Pontes construídas sobre zonas densificadas em maciços sujeitos a liquefacção**

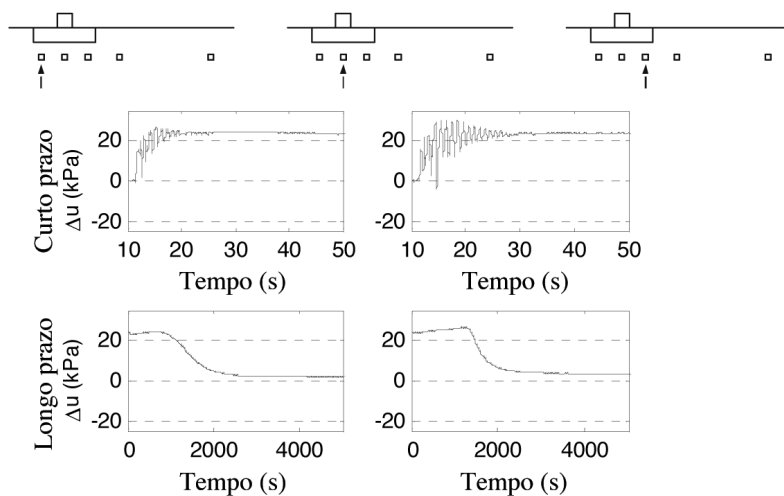
O modelo de ponte descrito na secção anterior como M-100 foi utilizado em diferentes modelos ensaiados na centrífuga em que uma zona densificada foi criada sob a sapata da estrutura para mitigar os efeitos de liquefacção do maciço de areia saturada. A zona densificada foi criada através da deposição de areia a uma velocidade de deposição menor, o que gera uma maior densidade relativa na areia, embora não reproduza o processo de densificação da areia *in situ*. A zona densificada criada possui, em qualquer dos modelos, uma profundidade coincidente com a profundidade do maciço de areia solta, uma vez que tal é visto na prática como sendo vantajoso em termos de segurança, tendo custos aceitáveis e não sendo causador de transtornos significativos na sua implementação. De modo a manter a condição próxima de um estado plano de deformação no maciço, a zona de densificação estende-se, em planta, na direcção maior da sapata, pela quase totalidade da largura do contentor de ensaio. Na direcção perpendicular, a zona densificada possui uma dimensão variável descrita em função da largura  $B$  da sapata. Assim, são apresentados nesta secção os resultados dos modelos designados por M-1B, M-2B e M-3B, onde a razão da dimensão da zona densificada sobre a largura da sapata é igual a, respectivamente, 1, 2 e 3. Todos os modelos foram submetidos a simulações sísmicas semelhantes às aplicadas aos modelos construídos sem qualquer tipo de melhoramento de solo.

### 4.3.1 – Excesso de pressão neutra observado no modelo

A Figura 13 ilustra, para um dos modelos, o excesso de pressão neutra gerado durante o sismo, assim como o resultante da migração do excesso de pressão neutra que ocorre após o sismo, a um nível relativamente superficial. O comportamento apresentado é representativo do observado em modelos exibindo diferentes geometrias para a zona densificada.



a) zonas sob a influência da estrutura.



b) zonas no campo livre (free-field).

**Fig. 13** – Excesso de pressão neutra medido durante e após o sismo no modelo 1-B a pouco mais de 2 m de profundidade.

Durante a simulação sísmica, verifica-se que os primeiros ciclos de carga geram um excesso de pressão neutra relativamente reduzido sob a fundação e mais significativo no campo livre. Após os primeiros dois ciclos de carga, o excesso de pressão neutra começa a decrescer sob a fundação enquanto continua a crescer no campo livre até a tensão efectiva praticamente se anular. Mal termina a simulação sísmica, a pressão neutra mantém-se relativamente constante durante algum tempo no campo livre e aumenta claramente sob a fundação até um equilíbrio temporário ser atingido. Este fenómeno, usualmente designado por migração de excesso de pressão neutra pós-sismo, deve-se ao gradiente hidráulico estabelecido a cada nível, durante o sismo, entre as zonas sob a fundação e o campo livre. O fenómeno ocorre igualmente a maiores profundidades, embora a sua magnitude e o tempo requerido para que as pressões neutras após o sismo se equilibrem sejam menores. O comportamento deste modelo exhibe grandes semelhanças com o descrito na secção 4.2.2., relativamente aos modelos sem melhoramento de solo, distinguindo-se desse sobretudo pelo facto de a geração inicial de pressão neutra ser menor e o seu decréscimo posterior, induzido por dilatação da areia densa, ter início mais cedo e ser maior, podendo até causar aumento temporário da tensão efectiva.

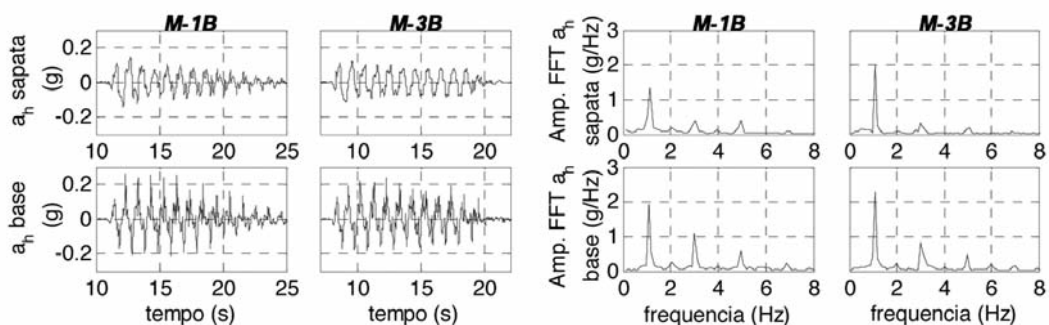
A observação da variação da pressão neutra sob a fundação sugere que dois fenómenos diferentes influenciam a estabilidade de uma estrutura assente em fundação superficial num solo sujeito a liquefacção induzida por sismos. Se durante a acção sísmica, a geração de excesso de pressão neutra positivo ou negativo sob a fundação é determinada pela solicitação dinâmica e estática do solo, após o fim do sismo, a pressão neutra e consequentemente as tensões efectivas remanescentes dependem sobretudo da migração do excesso de pressão neutra oriundo do campo livre. De notar que, entre os valores mínimo e máximo de pressão neutra média medidos antes e após o fim do sismo sob o centro da fundação, um acréscimo de quase 30 kPa foi observado no modelo em causa. Em termos de estabilidade da fundação, a situação crítica ocorre cerca de 15 minutos após o fim do sismo, uma vez que é neste instante que a pressão neutra sob a fundação atinge o seu pico enquanto no campo livre se mantém alta.

#### ***4.3.2 – Energia transmitida à estrutura durante os sismos***

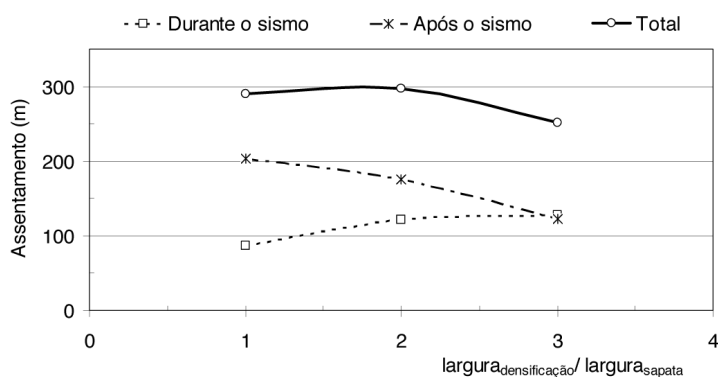
Um dos maiores receios relativamente ao uso da densificação para mitigar os efeitos da liquefacção tem a ver com o receio de um eventual aumento da energia sísmica transmitido à estrutura a proteger (Mitchell et al., 1998). Como seria de esperar, verificou-se que a energia sísmica transmitida à estrutura, no caso de uma zona densificada ser criada sob a estrutura, é muito maior do que quando o solo não é melhorado, caso em que uma atenuação substancial da energia sísmica é causado pelo solo mais próximo da liquefacção (Coelho et al., 2004c). Comparando apenas os modelos em que o solo foi melhorado por densificação, verifica-se que a energia transmitida à estrutura tende a crescer com a dimensão da zona densificada, nomeadamente depois de o solo no campo livre ter atingido a liquefacção. Conforme se ilustra na Figura 14 para os modelos M-1B e M-3B, o movimento induzido na sapata pelo sismo é mais intenso para maiores larguras de densificação. Este facto, compatível com a influência da densidade relativa sobre o comportamento do campo livre descrita em 4.1.6., não deve ser ignorado no dimensionamento de estruturas em que a densificação seja usada para mitigar a liquefacção, sob pena de subestimar as solicitações dinâmicas sobre a estrutura a proteger.

#### ***4.3.3 – Assentamentos da fundação***

Os valores médios dos assentamentos medidos em cada um dos modelos em que a densificação foi utilizada como meio de mitigação dos efeitos da liquefacção são apresentados na Figura 15.



**Fig. 14** – Análise da acção sísmica transmitida à sapata da estrutura nos modelos M-1B e M-3B construídos com zonas densificadas sob a fundação (Coelho et al., 2004c).



**Fig. 15** – Assentamento da sapata da estrutura nos modelos construídos com zonas densificadas.

Comparando os resultados com os obtidos no modelo M-100, sem melhoramento do solo (Quadro 3), prova-se a virtude da densificação na redução do assentamento da estrutura induzido por liquefacção do maciço. Verifica-se ainda que, tal como acontece na prática, o assentamento tende a diminuir com o aumento da largura de densificação. Uma análise cuidada das componentes do assentamento, ocorrendo antes e depois do sismo, revela porém que o efeito positivo do aumento da dimensão da zona densificada advém apenas da grande redução do assentamento pós-sismo, o qual domina os assentamentos da estrutura em zonas densificadas estreitas. Pelo contrário, o aumento da zona densificada causa aumento do assentamento que ocorre durante o sismo, embora os resultados sugiram que este estabilize para maiores larguras de densificação. O facto de os assentamentos, antes e após o sismo, variarem inversamente com o aumento da zona densificada, sugere que sejam distintos os mecanismos que determinam cada uma dessas componentes, o que é importante esclarecer para compreender o problema.

#### 4.3.4 – Mecanismos que controlam o assentamento da fundação

Os resultados experimentais obtidos mostram que o aumento da zona densificada se traduz numa redução dos assentamentos de uma sapata sujeita a acção sísmica que cause liquefacção da fundação. Tal é conseguido à custa de uma maior solicitação dinâmica da estrutura e de uma maior assentamento da sua sapata, pelo que a melhoria resulta de uma redução significativa do assentamento pós-sismo. No entanto, tal não se deve à migração de excesso de pressão neutra pós-sismo, pois a variação de pressão neutra observada nos diferentes modelos, com larguras de

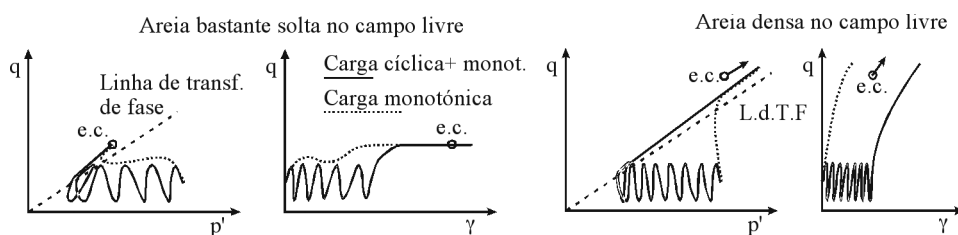
densificação variáveis, é, a qualquer profundidade, muito semelhante (Coelho et al., 2004c). Tal facto é de alguma forma congruente com a observação de que a geração de pressão neutra no campo livre não é tão dependente da densidade relativa como suposto.

Durante o evento sísmico, o sistema parece comportar-se do seguinte modo:

- a) devido à enorme disparidade de rigidez gerada entre o solo sob a fundação e no campo livre, causada pelas diferenças de tensão efectiva mantida em cada caso, uma coluna estreita de solo sujeita a elevada concentração de tensões é criada sob a fundação, a qual determina o comportamento do sistema em relação ao maciço;
- b) a coluna estreita e sobrecarregada de solo rígido sob a fundação fica rodeada de areia que, independentemente da densidade relativa, pouco acrescenta à capacidade de carga e rigidez da fundação, pois a sua tensão efectiva é nula;
- c) sendo a resistência do maciço dominada pela estreita coluna de solo sob a fundação, o aumento dos assentamentos com a largura de densificação resultam apenas do maior carregamento dinâmico transmitido ao sistema solo-estrutura.

Após o sismo, o comportamento do sistema é determinado pelos seguintes acontecimentos:

- a) independentemente da largura de densificação, o excesso de pressão neutra migra do campo livre para a coluna de solo sob a sapata, o processo só se concluindo quando os gradientes hidráulicos são eliminados, algum tempo após o sismo;
- b) a degradação da rigidez do solo na coluna estreita de solo sob a sapata leva a uma redistribuição de esforços que induz carregamento adicional do solo circundante liquefeito, cuja resposta é altamente dependente da densidade relativa (Figura 16).



**Fig. 16** – Resposta tensão-deformação de areia liquefeita em função da densidade relativa.

Como corolário dos mecanismos identificadas como determinantes no comportamento de uma fundação superficial construída sobre zona densificada como meio de mitigação dos efeitos da liquefacção induzida por sismos, pode-se inferir que o bom desempenho deste meio de melhoramento de solos se encontra ligado ao comportamento tensão-deformação mais rígido oferecido pela areia densa numa condição liquefeita no campo livre. De facto, como se ilustra na Figura 16, encontra-se bem definido, através de ensaios elementares de laboratório, o comportamento de areias liquefeitas por acções dinâmicas quando sujeitas a carregamento monotónico (Ishihara, 1993; Yoshimine e Ishihara, 1998), como acontece no caso da areia envolvendo a coluna de solo sob a fundação após o fim da acção sísmica. Nos casos em que a zona de densificação se estende para além da largura da sapata, a resposta da areia densa, mesmo que liquefeita, é muito mais rígida e permite um aumento significativo da tensão de corte até que o estado crítico seja atingido. Ao contrário, quando a zona envolvente da sapata é constituída por areia solta, como no caso de zonas densificadas estreitas, a tensão de corte que pode ser transmitida ao solo liquefeito é menor e para a atingir as deformações envolvidas são muito maiores, o que se traduz em maiores deformações da estrutura a proteger.

#### 4.4 – Técnicas híbridas para melhorar o desempenho da densificação contra liquefacção

Os resultados exibidos provam que os efeitos da liquefacção são eficazmente mitigados por zonas densificadas significativamente mais largas que a fundação superficial, como utilizado na prática corrente. Uma vez que tal é pouco económico e gera problemas legais e técnicos em relação ao uso de espaço envolvente, e tendo em conta que o uso de largas zonas densificadas produz maior solicitação dinâmica da estrutura e apenas reduz as deformações pós-sismo, soluções mais eficientes podem ser desenvolvidas. Face aos mecanismos que determinam o comportamento, tais soluções deverão apresentar:

- a) zonas densificadas estreitas, idealmente com a largura da sapata, para minimizar as deformações durante o sismo e a solicitação dinâmica da estrutura;
- b) medidas adicionais para minimizar a redistribuição de tensões pós-sismo causadas por migração do excesso de pressão neutra (barreiras impermeáveis ou drenantes).

Soluções deste tipo serão consideradas numa fase posterior deste projecto de investigação.

### 5 – CONCLUSÕES

Um vasto projecto de investigação centrado no esclarecimento do fenómeno de liquefacção, nos seus efeitos sobre pontes de pequena dimensão construídas sobre fundações superficiais e na técnica de densificação enquanto medida de mitigação dos seus efeitos tem sido desenvolvido no Schofield Centre da Universidade de Cambridge, UK. O projecto envolve a conjugação de técnicas experimentais e numéricas com o objectivo de estabelecer uma base científica sólida para a compreensão do problema, através da qual se espera contribuir para a implementação do dimensionamento baseado no desempenho no caso de estruturas sujeitas aos efeitos da liquefacção de maciços granulares saturados induzida por sismos. O trabalho realizado até ao momento sugere que só através da exploração das virtudes das várias técnicas de investigação se podem atingir os objectivos propostos.

Este artigo descreve e analisa os resultados obtidos neste projecto através da sua componente experimental baseada em modelação física na centrífugadora. Esta técnica experimental possui inúmeras vantagens, nomeadamente a de permitir observar o desenvolvimento de mecanismos de deformação ou rotura em modelos tão representativos do problema real quanto necessário e sujeitos a solicitações realistas sob um estado de tensão semelhante ao presente in situ. As suas vantagens são particularmente importantes na análise de problemas não completamente esclarecidos e em que a observação do comportamento em situações reais oferece imensas limitações, como no caso de liquefacção induzida por sismos. O artigo dá particular ênfase à forma como a modelação física na centrífugadora pode ser utilizada para investigar problemas de engenharia sísmica geotécnica.

Os resultados obtidos por modelação na centrífugadora, baseados no ensaio de modelos com componentes geotécnica e estrutural com o objectivo de esclarecer o comportamento de pontes sobre maciços susceptíveis à liquefacção, induzem as seguintes conclusões principais:

- a) areia densa no campo livre liquefaz mais facilmente sob sismos num modelo testado na centrífugadora do que o sugerido por ensaios elementares cíclicos não drenados, o que, tal como a velocidade de assentamento da superfície do modelo, faz questionar a validade de encarar a liquefacção como fenómeno não drenado;
- b) quer a densificação seja ou não usada como meio de mitigação dos efeitos da liquefacção, os mecanismos de rotura ou deformação de fundações são complexos e envolvem geração, positiva e negativa, e migração de excesso de pressão neutra;

- c) o assentamento de estruturas durante o sismo, que é mínimo para uma largura do melhoramento igual ao da sapata, é controlado pelo desempenho de uma coluna estreita de solo sob a fundação e pela solicitação sísmica transmitida à zona superficial do sistema solo-estrutura, a qual cresce com a largura de densificação;
- d) o assentamento pós-sismo de estruturas é instigado sobretudo pela migração de excesso de pressão neutra do campo livre para a coluna de solo sob a fundação e consequente redistribuição de esforços que solicitam a areia liquefeita envolvente; a resposta desta ao carregamento monotónico, que é altamente dependente da densidade relativa, determina a magnitude desta parcela do assentamento;

Face aos mecanismos identificados como determinantes no comportamento de fundações superficiais construídas em solos sujeitos a liquefacção, sugere-se que a mitigação do problema através de densificação possa ser mais eficiente se o uso de zonas densificadas estreitas for complementado com sistemas que reduzam a migração do excesso de pressão neutra pós-sismo.

As conclusões obtidas reforçam a limitação de observações reais pós-sismo na descrição de mecanismos tão complexos, assim como o interesse do uso de modelação na centrífugadora no estudo da liquefacção. Embora os modelos ensaiados não reproduzam a estrutura natural do solo, os resultados obtidos devem representar qualitativamente o comportamento in situ.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer o apoio financeiro concedido pela EPSRC (UK's Engineering and Physical Sciences Research Council), através da bolsa de investigação No. GR/R20328, assim como o apoio técnico e financeiro da Mott MacDonald, UK, para este projecto de investigação, orçamentado em £270.000. Os autores agradecem ainda aos técnicos do Schofield Centre envolvidos na realização dos ensaios na centrífugadora, em particular ao Sr. Chris Collison, por partilhar a sua valiosa experiência em modelação física.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brennan, A. J., Madabhushi, S. P. G. (2002). *Design and Performance of a New Deep Model Container for Dynamic Centrifuge Modelling*. Proc. Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics, Newfoundland, Balkema, Rotterdam, pp. 183-188.
- Chan, A. H. C. (1988). *A unified finite element solution to static and dynamic problems of Geomechanics*. PhD Thesis, University of Wales, Swansea.
- Coelho, P. A. L. F, Haigh, S. K., Madabhushi, S. P. G. (2003). *Boundary effects in dynamic centrifuge modelling of liquefaction in sand deposits*, Proc. 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conf., Seattle, US.
- Coelho, P. A. L. F, Haigh, S. K., Madabhushi, S. P. G. (2004a). *Centrifuge modelling of liquefaction of saturated sand under cyclic loading*. Proc. Intern. Conf. on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, Bochum, Germany, pp. 349-354.
- Coelho, P. A. L. F, Haigh, S. K., Madabhushi, S. P. G. (2004b). *Centrifuge modelling of the effects of earthquake-induced liquefaction on bridge foundations*. Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Eng. & 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, US, 2004, Vol.2, pp. 404-411.



- Coelho, P. A. L. F., Haigh, S. K., Madabhushi, S. P. G., O'Brien T. (2004c). Centrifuge modelling of the use of densification as a liquefaction resistance measure for bridge foundations. Proc. 13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Dewoolkar, M. M., Ko, H.-Y., Stadler, A. T., Astaneh, S. M. F. (1999). *A Substitute Pore Fluid for Seismic Centrifuge Modelling*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 22, No. 3.
- Ghosh, B., Madabhushi, S. P. G. (2003). *A numerical investigation into the effects of single and multiple frequency earthquake motions*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, pp. 691- 704.
- Gudehus G. (2004). *Seismic decay of psammoids and peloids with and without hypoplasticity*. Proc. Intern. Conf. on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, Bochum, Germany, pp. 11-20.
- Haigh, S. K., Coelho, P. A. L. F., Madabhushi, S. P. G. (2005). *On the prediction of dynamic behaviour using numerical and physical modelling*. Proc. XVI<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan.
- Hamada, M., Yasuda, S., Wakamatsu, K. (1992). *Large ground deformations and their effects on lifelines: 1948 Fukui earthquake*. Technical Report NCEER-92-0001. M. Hamada and T. D. O'Rourke (eds); pp. 2.1-2.35.
- Ishihara, K. (1993). *Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes*, 33<sup>rd</sup> Rankine Lecture, Geotechnique, Vol. 43, No.3, 351-415.
- Ishihara, K. (1994). *Review of the predictions for Model 1 in the VELACS program*. Proc. Intern. Conf. on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Arulanandan & Scott (Eds), Balkema, Rotterdam.
- Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford, UK.
- Ishihara, K., Nagase, H. (1988). *Multi-directional irregular loading tests on sand*. Soils Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 201-212.
- Madabhushi, S. P. G., Schofield, A. N., Lesley, S. (1998). *A new Stored Angular Momentum (SAM) based Earthquake Actuator*, Centrifuge'98. Proc. Intern. Conf. on Centrifuge Modelling, Tokyo, Japan, Vol.1, pp. 111-116.
- Manzari, M. T., Arulanandan, K., Scott, R. F. (1994). *VELACS Project: a summary of achievements*, Proc. 5<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-94-0026, Buffalo, US.
- Manzari, M. T., Dafalias, Y. F. (1997). *A critical state two-surface plasticity model for sands*. Geotechnique; 47(2), pp. 255-272.
- Mitchell, J. K., Cooke, H. G., Schaeffer, J. (1998). *Design considerations in ground improvement for seismic risk mitigation*, Proc. of Specialty Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Seattle, Washington, ASCE Geotechnical Publication No. 75, Vol. 1.
- Pastor, M., Zienkiewicz, O. C. (1986). *A Generalised Plasticity, Hierarchical Model for Sand under Monotonic and Cycle Loading*. Proc. Int. Conf. Numog-II, Ghent, G. N. Pande & W.F. Van Impe (eds.), April, 1986, pp. 131-150.
- Pastor, M., Zienkiewicz, O. C., Chan, A. H. C. (1990). *Generalized Plasticity and the Modelling of Soil Behaviour*. Int J. Numer. Anal. Methods Geomech.14, pp.151-190.

- Pastor, M., Zienkiewicz, O. C., Leung, K. H. (1985). *Simple model for transient soil loading in earthquake analysis. II. Non-associative models for sands*, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 9, pp.477-498.
- Prachathananukit, R., Manzari, M.T. (2000). *Significance of pore water flow in soil liquefaction analysis*. Proc. EM2000- Proc. 14<sup>th</sup> Engineering Mechanics Conf. ASCE, May 2000, Austin Texas, US.
- Randolph, M. F., House, A. R. (2001). *The complementary roles of physical and computational modelling*, International Journal of Physical Modelling and Geotechnics, Vol. 1, No. 1.
- Schofield, A. N. (1998). *Geotechnical centrifuge development can correct soil mechanics errors*, Centrifuge'98, Proc. Int. Conf. on Centrifuge Modelling, Tokyo, Japan.
- Schofield, A. N. (1981). *Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modelling*. Proc. Intern. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol. 3.
- Steedman, R. S., Zeng, X. (1995). *Geotechnical centrifuge technology, Section 7- Dynamics*. Edited by R.N. Taylor, Blackie Academic & Professional, London.
- Taboada V. M., Dobry R. (1994). *Experimental results of Model No 1 at RPI*. Arulanandan & Scott (eds) Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Balkema, Rotterdam, pp. 3-17.
- Yong, C., Tsoi, K., Feibi, C., Zhenhuan, G., Qijia, Z., Zhangli, C., Eds. (1988). *The Great Tangshan earthquake of 1976: an anatomy of disaster*. State Seismological Bureau of P.R. China, Pergamon Press, UK, 153p.
- Yoshimine, M., Ishihara, K. (1998). *Flow potential of sand during liquefaction*. Soils and Foundations, Vol. 38, No. 3, pp. 189- 198.
- Zeng, X., Schofield, A. N. (1996). *Design and Performance of an Equivalent-Shear-Beam (ESB) Container for Earthquake Centrifuge Modelling*. Geotechnique, Vol. 46, No.1.
- Zienkiewicz, O. C., Leung, K. H., Pastor, M. (1985). *Simple Model for Transient Soil Loading in Earthquake Analysis. I. Basic Model and Its Application*. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 9, pp. 453-476.