



## AVALIAÇÃO E MITIGAÇÃO DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO NA ZONA DO TERREIRO DO PAÇO EM LISBOA

**Francisco Salgado**

LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [fsalgado@lnec.pt](mailto:fsalgado@lnec.pt)

**Palavras-chave:** aluviões, liquefação estática e dinâmica, aceleração crítica, mobilidade cíclica, EC8

**Sumário:** O incidente que ocorreu em junho de 2000 na obra da construção da estação do Metropolitano de Lisboa no Terreiro do Paço deveu-se a um fenómeno de “Liquefação Estática”. Este facto levou o LNEC a recomendar ao Metropolitano de Lisboa a necessidade de um estudo detalhado, do ponto de vista sísmico, do potencial de liquefação e de mobilidade cíclica das aluviões localizadas na envolvente do túnel do Metropolitano de Lisboa e zonas adjacentes.

### 1. FENÓMENOS DE LIQUEFAÇÃO E DE MOBILIDADE CÍCLICA

Fenómenos de Liquefação e (ou) de Mobilidade Cíclica podem ocorrer em depósitos aluvionares submersos, durante e após acções sísmicas, cujas consequências se traduzem pela mobilização de deslocamentos permanentes (horizontais e verticais) no interior dessas formações aluvionares.

A magnitude desses deslocamentos depende de vários factores, nomeadamente das características da acção sísmica (aceleração máxima,  $a_{\max}$ , e magnitude,  $M$ ) e das características de resistência à liquefação e à mobilidade cíclica das aluviões.

Enquanto o fenómeno de Liquefação ocorre geralmente em aluviões arenosas o fenómeno de Mobilidade Cíclica ocorre geralmente em aluviões de natureza argilosa.

O fenómeno de Liquefação é despolotado quando as pressões intersticiais igualam a pressão efectiva de confinamento no solo. Embora, possa ocorrer em condições estáticas, o fenómeno de Liquefação ocorre, sobretudo, em condições dinâmicas durante a acção sísmica, em solos susceptíveis a estes fenómenos. As consequências do fenómeno de liquefação, geralmente, traduzem-se na perda (ou diminuição) temporária da rigidez e da resistência ao corte do solo durante a acção sísmica, e no desenvolvimento de uma rigidez e uma resistência residuais, após o final da acção sísmica, que são, geralmente, bastante inferiores às que existiam previamente à acção sísmica.

O fenómeno de Mobilidade Cíclica ocorre, durante o sismo, quando o factor de segurança é temporariamente inferior à unidade, i.e., quando o valor da aceleração excede o valor da aceleração crítica. Os deslocamentos induzidos por este fenómeno são bastante menores do que os induzidos por Liquefação porque os solos argilosos não são tão propensos a grandes perdas de rigidez e de resistência durante e após a acção sísmica.

Paea estudar a possibilidade da ocorrência destes fenómenos foram efetuados programas geológico-geotécnicos, coordenados pelo LNEC, que consideraram diversos ensaios *in situ* e em laboratório das aluviões locais, e estudos efetuados ao nível do Estado da Arte pelo LNEC em 2005, que confirmaram a susceptibilidade à liquefação e à mobilidade cíclica de algumas zonas nas aluviões locais quando sujeitas ao efeito da acção sísmica regulamentar. Com base nos resultados obtidos, em análises de risco, efectuadas pelo LNEC, que avaliaram as possíveis consequências destes fenómenos na estabilidade local, a Administração do Metropolitano de Lisboa (ML) decidiu efectuar o reforço das aluviões locais, durante 2007, antes da abertura ao público, no dia 19 de Dezembro desse ano, da linha azul entre a estação Baixa Chiado e as estações do Terreiro do Paço e Santa Apolónia. Posteriormente, em 2009, o LNEC efectuou, a pedido da SIMTEJO, um

estudo de avaliação das consequências do potencial de liquefação e mobilidade cíclica das aluviões localizadas na envolvente do “Sistema dos interceptores do Largo do Chafariz de Dentro – Terreiro do Paço e Terreiro do Paço – Cais do Sodré e respectivos interceptores nos colectores unitários. Sistema elevatório da Ribeira das Naus e sistema de câmara de válvulas do Terreiro do Paço”, e efectuou um outro estudo, da mesma natureza, para o Metropolitano de Lisboa designado: “Interface do Terreiro do Paço - Terminal fluvial. Optimização do tratamento dos solos localizados na fundação do terminal e zonas adjacentes”. Na apresentação serão ilustrados os resultados mais relevantes relativos aos estudos efectuados pelo LNEC entre 2005 e 2009.

## 2. CONSEQUÊNCIAS DOS FENÓMENOS DE LIQUEFAÇÃO E DE MOBILIDADE CÍCLICA

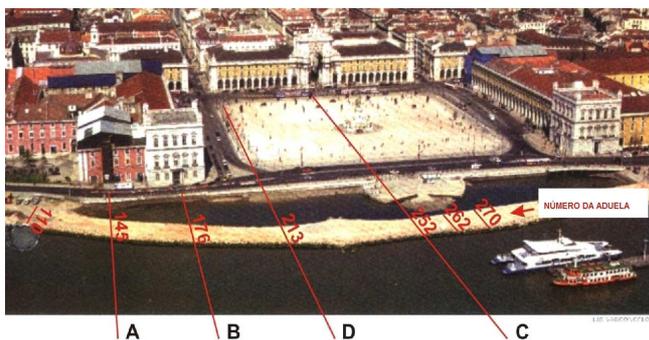


Fig. 1 - Planta de localização

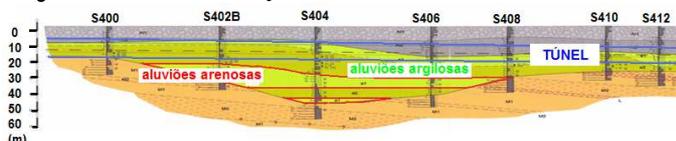


Fig. 2 - Perfil longitudinal

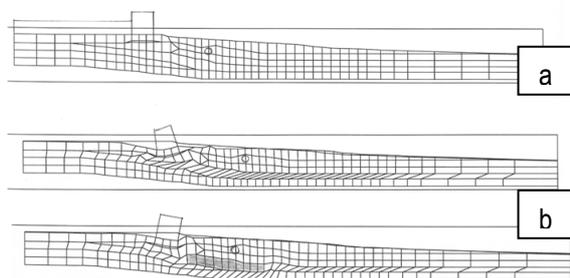


Fig. 3 - Resultados: a) Liquefação; b) Mobilidade cíclica



Fig. 4 - Resultados após tratamento (perfil B)

As investigações geológico geotécnicas (Figs 1 e 2) confirmaram que o túnel do Metropolitano de Lisboa foi construído no interior de aluviões sobretudo de natureza argilosa e que em profundidade existem camadas alternadas de aluviões arenosas, susceptíveis à liquefação, com camadas de aluviões argilosas susceptíveis à mobilidade cíclica. Com base nos resultados obtidos em análises dinâmicas de Bloco e Pseudo-Dinâmicas, efectuadas pelo LNEC em 2005, foi possível estimar, para o local do perfil B, que os deslocamentos, horizontais e verticais, induzidos pelo fenómeno de liquefação poderiam ser, respectivamente, da ordem dos 2,26 m e - 0,09 m na zona do túnel e de cerca dos 2,15 m e - 0,99 m na zona do Torreão da Marinha (Fig. 3 a). Contudo, se as aluviões arenosas fossem tratadas (Figura 3 b) os deslocamentos seriam induzidos unicamente pelo fenómeno de Mobilidade Cíclica obtendo-se deslocamentos, horizontais e verticais, da ordem dos 0,27 m e - 0,13 m no túnel, e no Torreão de 0,22 m e - 0,18 m respectivamente.

Com base nestes resultados foi decidido efectuar o tratamento não só das aluviões arenosas, mas também, das aluviões argilosas, através de colunas de jet-grout e estacas de largo diâmetro, na zona sombreada na Fig. 4, obtendo-se deslocamentos, horizontais e verticais, da ordem dos 0,018 m e - 0,004 m no túnel, e no Torreão de 0,010 m e - 0,004 m respectivamente. O projeto de tratamento foi desenvolvido, com a colaboração do LNEC, por uma Comissão Técnica constituída pelos Prof.s Mineiro, Maranha das Neves e Matos Fernandes.

Deste estudo várias comunicações internacionais foram desenvolvidas onde são feitas comparações importantes de algumas recomendações divergentes do EC8 e do Estado da Arte e da Prática [1].

## 3. REFERÊNCIA

[1] Salgado, F.M.\_ “Siting – Downtown Lisbon Metro Blue Line”. Invited Paper by the organizing Committee of the MERCEA’08. Based on the invited Lecture (with the same name) at the MERCEA’08, Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, May 2009.