



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

## **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE**

**Parecer sobre o “Estudo Prévio P853-A2P-EPR-EST-MD-002-A  
das Fundações e Estruturas da Plataforma e Reforço  
Complementar” no que respeita à segurança antissísmica**

Associação de Turismo de Lisboa

Lisboa • junho de 2019

**I&D** GEOTECNIA

RELATÓRIO 202/2019 – DG/Chefia

## **Título**

### **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE**

Parecer sobre o “Estudo Prévio P853-A2P-EPR-EST-MD-002-A das Fundações e Estruturas da Plataforma e Reforço Complementar” no que respeita à segurança antissísmica

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

### **João Bilé Serra**

Investigador Principal

### **Laura Caldeira**

Investigadora-Coordenadora, Diretora do Departamento

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 202/2019

Proc. 0501/122/20265

## TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE

Parecer sobre o “Estudo Prévio P853-A2P-EPR-EST-MD-002-A das Fundações e Estruturas da Plataforma e Reforço Complementar” no que respeita à segurança antissísmica

### Resumo

---

Neste relatório é apresentada a apreciação final do Estudo Prévio das fundações e estruturas da plataforma e reforço complementar do Terminal Fluvial sul e sueste no que respeita à segurança antissísmica.

São avaliados os aspetos relacionados com o modelo geotécnico considerado pelos autores do Estudo Prévio, com as metodologias de análise de segurança dos taludes em situações de projeto sísmicas e com as interferências com as infraestruturas do Metropolitano de Lisboa no Terreiro do Paço.

É emitido um Parecer de sentido positivo face às soluções de obra baseado nos resultados de análise de desempenho sísmico, condicional à observância de recomendações na elaboração do Projeto de Execução as quais visam a confirmação daqueles resultados, cuja representatividade é naturalmente limitada pela natureza simplificada própria de uma análise em estudo prévio.

Palavras-chave: Terminal Fluvial sul e sueste/ Estudo prévio / Fundações / Reforço / Metropolitano de Lisboa / Terreiro do Paço / Segurança antissísmica

## SOUTH AND SOUTHEAST FLUVIAL TERMINAL

Assessment of the Preliminary Design P853-A2P-EPR-EST-MD-002-A of the foundations and structures of the platform and complementary reinforcement regarding seismic safety

### Abstract

---

The final evaluation of the Preliminary Design of the foundations and structures of the platform and complementary reinforcement of the south and southeast fluvial terminal regarding seismic safety is presented in this report.

The technical provisions related with the geotechnical model, the assessment methodologies for the seismic safety analysis of the immersed slopes and the interference with Lisbon Underground infrastructures nearby are analysed.

A conditional positive assessment is awarded to the reinforcement solutions given the seismic performance results expressed in terms of residual (post-earthquake) displacements of the immersed slopes. This positive outcome must be confirmed in the Design to Build documents, with due consideration of the recommendations here presented, since the naturally simplified nature of the methods used in the Preliminary Design limits the representativeness of the results therein.

Keywords: South and Southeast Fluvial terminal / Preliminary Design / Foundations / Reinforcement / Lisbon Underground / Terreiro do Paço / Seismic safety

## Índice

1	Introdução .....	1
2	Análise das soluções de fundações e estruturas da plataforma e reforço complementar do Terminal Fluvial Sul e Sueste .....	2
3	Parecer .....	10
	Referências bibliográficas .....	12

## Índice de figuras

Figura 2.1 – Perfil esquemático PC0 revisto e informação geotécnica de base (CONSULGEO, 2019b)	3
Figura 2.2 – Perfil esquemático PT revisto e informação geotécnica de base (CONSULGEO, 2019b)	4
Figura 2.3 – Círculos de deslizamento na análise de estabilidade sísmica com sensibilidade das aluviões argilosas de 2 na sequência estratigráfica SCS no lado do rio (pág. 75 de CONSULGEO (2019b))	6
Figura 2.4 – Curvas adimensionais de redução do módulo de distorção vs. amplitude de distorção cíclica para (a) solos de baixa plasticidade (até 15%) ou (c) plásticos (Guerreiro et <i>al.</i> , 2012)	8

# 1 | Introdução

A Associação de Turismo de Lisboa (ATL) solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil a apreciação do Estudo Prévio P853-A2P-EPR-EST-MD-002-0 (A2P Estudos e Projectos, junho de 2018) das Fundações e Estruturas da Plataforma e Reforço Complementar do Terminal Fluvial Sul e Sueste, no que respeita à segurança antissísmica desta estrutura e das infraestruturas do Metropolitano de Lisboa a ela adjacentes, a estação do Terreiro do Paço e o túnel de ligação entre esta e a estação do Chiado.

O Estudo Prévio incide sobre a frente ribeirinha sul (zona 1 do corpo B), a frente ribeirinha poente e a respetiva plataforma.

O LNEC elaborou em novembro de 2018 um Memorando com recomendações e pedidos de esclarecimento. Na sua sequência, e após reuniões com os autores do Estudo Prévio e com a ATL, foi apresentado, em fevereiro de 2019, o relatório (CONSULGEO, 2019a), como complemento dos documentos até então apresentados. Este não constituiu, portanto, uma revisão/reformulação do Estudo Prévio, conforme seria de antecipar face ao objetivo de elaboração do memorando.

Posteriormente, em março de 2019, foi elaborado o relatório (LNEC, 2019) com a apreciação do Estudo Prévio (A2P, 2018a e 2018b) e dos documentos da autoria da CONSULGEO e da Tecnasol listados como referências bibliográficas no final do presente relatório.

Na sequência deste relatório e de reuniões com a empresa CONSULGEO, esta empresa apresentou em maio de 2019 um novo documento (CONSULGEO, 2019b) integrando as recomendações de (LNEC, 2019) relativas à modelação geotécnica da zona envolvente à obra em estudo, à sua segurança antissísmica e à segurança antissísmica das infraestruturas adjacentes do ML.

Assim, neste relatório procede-se à apresentação da apreciação solicitada. Para tal, no capítulo 2 é analisado o conteúdo de CONSULGEO (2019b). No capítulo 3 apresenta-se, justificadamente, o Parecer do LNEC quanto à segurança antissísmica do Terminal e às implicações indiretas sobre as infraestruturas do ML das disposições construtivas previstas no Estudo Prévio.

## 2 | **Análise das soluções de fundações e estruturas da plataforma e reforço complementar do Terminal Fluvial Sul e Sueste**

Os trabalhos previstos no Estudo Prévio para a zona 1 do corpo B da estação para o “reforço complementar na frente ribeirinha” consistem na construção de uma solução em laje suportada por uma grelha assente em estacas.

Por sua vez, na frente ribeirinha poente está prevista a construção de uma plataforma para restabelecimento do alinhamento da praça com a fachada poente do torreão nascente do Terreiro do Paço. Envolve a remoção do aterro adjacente, o reperfilamento da zona – com dragagem de fundos lodosos e construção de aterros –, a construção de um passadiço sobre a estação do Metropolitano e de um sistema estacas ligadas superiormente por grelha, com a função supletiva de reforço do meio de fundação relativamente à deformação e à rotura por corte sob ação sísmica.

Na eventualidade de movimentos sísmicos intensos no local, as características texturais e as deficientes características mecânicas dos solos potenciam a ocorrência de fenómenos de liquefação e de mobilidade cíclica no caso de solos grosseiros; de amolecimento cíclico no caso de solos finos; e de deslizamento pós-sísmico de taludes imersos.

Para além do funcionamento como elemento de fundação para resistir a forças verticais, aqueles sistemas de estacas introduzem um elemento de rigidificação e de resistência a movimentos horizontais, visando diminuir a vulnerabilidade àqueles fenómenos de deformação sísmica do terreno.

A reconhecida heterogeneidade do maciço e a limitação da informação geotécnica de base na zona de fundação da estação levaram à definição pela CONSULGEO de uma campanha complementar de prospeção e de caracterização geotécnica com sondagens, ensaios de campo (SPT, CPT e de corte rotativo) e ensaios laboratoriais de identificação com incidência expressiva na zona do rio, portanto no exterior do perímetro da solução de estacas.

A circunstância de não ter sido mobilizada um equipamento com características adequadas para estabilização georreferenciada da posição de ensaio impediu a obtenção de dados adicionais sobre as aluviões na zona do rio, tanto a sul como a poente. De outro modo, na zona entre o Terminal Sul e Sueste e a estação do Terreiro do Paço foi obtida informação relevante para a caracterização geotécnica dos terrenos.

A análise conjunta dos resultados desta campanha e da informação anteriormente disponível permitiu à CONSULGEO identificar quatro unidades geotécnicas de acordo com critérios granulométricos e de idade geológica.

Foram definidas de forma simplificada quatro unidades: (i) a unidade A, constituída por aterros, areias com calhaus dispersos e enrocamentos, (ii) as aluviões arenosas (unidade H1, Holocénica), (iii) as aluviões argilosas (unidade H2, Holocénica) e (iv) as argilas Miocénicas (unidade M1). Apesar da



natural dificuldade em efetuar a distinção entre as unidades Holocénicas, considera-se como adequada esta subdivisão dos materiais geotécnicos ocorrentes na zona.

A distribuição espacial destas unidades revela-se de dificuldade significativa pela dinâmica sedimentar própria de zonas estuarinas e pela ocorrência passada de fenómenos sísmicos e de intervenções portuárias que revolveram os solos na zona.

Como consequência, os perfis geotécnicos transversais (norte-sul) e longitudinais (este-oeste) apresentados em CONSULGEO (2019a) contêm interpenetrações mútuas das unidades Holocénicas, cuja definição espacial não apresenta o necessário grau de fiabilidade para a definição de zonas potencialmente liqueficáveis e de zonas preferenciais para a mobilização de resistência ao corte na definição de superfícies de rotura por deslizamento.

A compatibilização de informação entre perfis longitudinais e transversais revela-se difícil pelo carácter pontual (linear vertical) da informação e pela já referida heterogeneidade.

Em CONSULGEO (2019b) foi apresentada a sua revisão de acordo com as recomendações do LNEC e, com base na informação disponível nas diversas campanhas de reconhecimento geotécnico, foram considerados dois perfis transversais PC0 e PT (cf. Figura 2.1 e Figura 2.2).

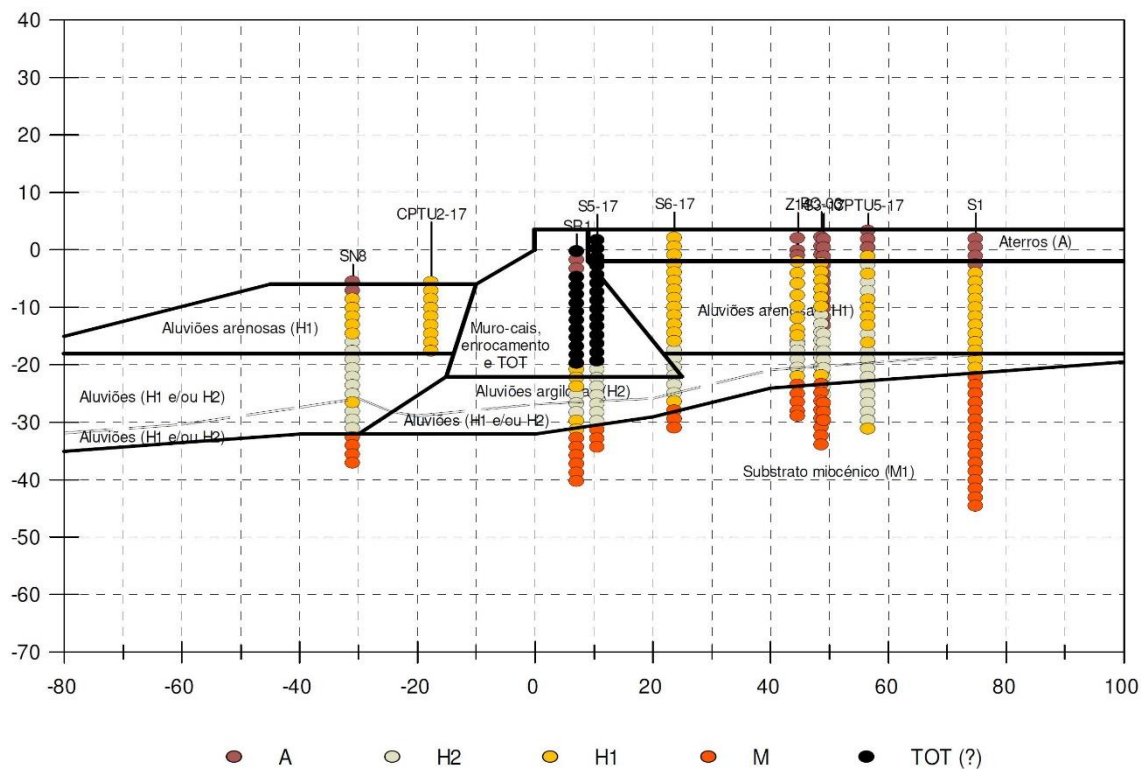


Figura 2.1 – Perfil esquemático PC0 revisto e informação geotécnica de base (CONSULGEO, 2019b)

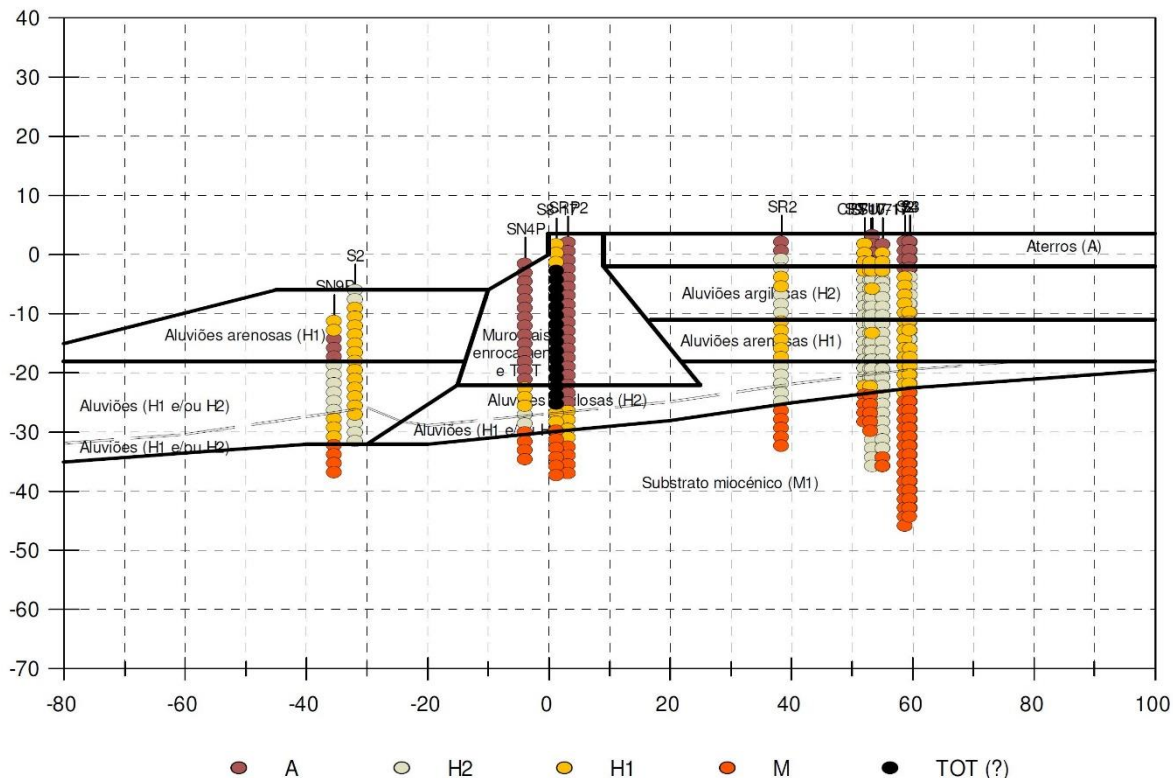


Figura 2.2 – Perfil esquemático PT revisto e informação geotécnica de base (CONSULGEO, 2019b)

Face a esta dificuldade, para efeitos de realização de análises de estabilidade sísmica e de estimativa de deslocamentos residuais pós-sísmicos, nas zonas exteriores ao Terminal Sul e Sueste em que a variedade ou a indefinição litológicas dificultassem a definição espacial clara da ocorrência de cada tipo aluvião, foi recomendado pelo LNEC a consideração de cenários envolventes da distribuição espacial das unidades.

Assim, em CONSULGEO (2019b) nas duas zonas identificadas com “Aluviões (H1 e/ou H2)” na Figura 2.1 e na Figura 2.2 foram consideradas a presença exclusiva de aluviões arenosas ou argilosas, resultando em três cenários alternativos para cada perfil PC0 ou PT. Em cada cenário, a zona superior é ocupada por aluviões arenosas e consideram-se as duas zonas inferiores como de aluviões arenosas (S) ou argilosas (C), resultando nas seguintes sequências:

SSS – sequência de aluviões arenosas nas três zonas;

SCS – sequência de aluviões arenosas, sobrepostas a aluviões argilosas, por sua vez sobrepostas a aluviões arenosas;

SCC – sequência de aluviões arenosas, sobrepostas a aluviões argilosas, por sua vez sobrepostas a aluviões argilosas.

A reduzida sensibilidade dos resultados das análises em termos de coeficientes de segurança, levou à decisão da Consulgeo de não estudar a sequência SSC.

Para efeitos da avaliação da resistência ao deslizamento pós-sísmico foi considerado de forma pessimista (conservativa) que as zonas adjacentes às superfícies de rotura testadas na análise pseudoestática de equilíbrio limite haviam sofrido liquefação (no caso das aluviões arenosas) ou mobilidade cíclica (no caso das aluviões argilosas) na totalidade da sua extensão. Esta opção é parcialmente suportada pelas análises de resistência à liquefação apresentadas em CONSULGEO (2018e e 2019a) com base em formulações baseadas em resultados de ensaios SPT<sup>1</sup> e ensaios CPT<sup>2</sup>. Estas permitiram identificar zonas extensas de insuficiência de resistência àqueles fenómenos cíclicos.

Foi considerado o valor de 8° para o ângulo de resistência interna pós-cíclico das aluviões arenosas. Este valor tem um suporte experimental em ensaios de corte simples monotónico pós-cíclico realizados anteriormente no LNEC e um suporte bibliográfico, de acordo com Olson e Stark (2002). Nestes estudos, a retroanálise de episódios de rotura de liquefação com espraçamento (*flow failure*) permitiu relacionar o número de pancadas SPT normalizado  $N_{1,60}$  com a resistência ao corte adimensionalizada relativamente à tensão vertical efetiva pré-sísmica. Esta razão é diretamente relacionável com o ângulo de resistência interna.

No seguimento das reuniões entre a CONSULGEO e o LNEC, foram definidas duas envolventes, superior e inferior, e uma linha de tendência média para a resistência ao corte de pico em função da tensão efetiva vertical para as aluviões argilosas. Foi, ainda, definido que seriam conduzidos estudos comparativos dos coeficientes de segurança ao deslizamento com consideração da incerteza quanto à sensibilidade destes materiais, ou seja, à razão entre as resistências de pico e residual em corte rotativo de campo (ensaio com molinete). Foram definidos os valores de 2 e de 3 para esse índice de sensibilidade. Face à natureza repetitiva da ação, considera-se o valor de 3 como mais razoável neste âmbito. Foi, também, definido que a resistência de cálculo seria determinada com base na resistência residual.

Consideram-se adequadas as hipóteses de base para definição da ação sísmica de dimensionamento. Concretizando, refere-se a opção pela ação do tipo 1 e pela classificação do tipo de terreno como E, e a atribuição da classe de importância II para as estruturas afetadas pela sismicidade de dimensionamento, face à importância da Estação e da plataforma poente e à opção anteriormente tomada no dimensionamento da Estação do Terreiro do Paço<sup>3</sup>.

A análise pseudoestática foi realizada pelo método de equilíbrio limite de Bishop simplificado. Apesar das limitações inerentes aos métodos de equilíbrio limite na estimativa da resistência ao deslizamento em situações sísmicas (especialmente significativas para vibrações sísmicas longas, em cuja categoria se integra a ação do tipo 1 da NP EN 1998-1) e em terrenos de heterogeneidade significativa, considera-se que, face à natureza do estudo em análise, a metodologia utilizada é adequada.

---

<sup>1</sup> De acordo com os resultados do Workshop do NCEER descritos em Youd e Idriss (2001).

<sup>2</sup> De acordo com Boulanger e Idriss (2014)

<sup>3</sup> Em que foi considerada como classe de importância II

Foi tomada em consideração a componente vertical da ação sísmica, com análises distintas considerando os sentidos ascendente e descendente.

Foi considerado como valor representativo da aceleração de pico atuante na massa potencialmente deslizante o valor da aceleração a meia altura da mesma, o que se considera adequado no âmbito da análise simplificada desenvolvida.

A análise de estabilidade foi conduzida considerando a presença de um sistema de reforço de estacas verticais formado por estacas de betão armado com diâmetro de 1,2 m penetrando francamente no substrato miocénico. Neste sistema, consideram-se alinhamentos transversais de quatro estacas afastadas entre si de aproximadamente 5 m e com distância entre eixos de alinhamento de 6 m. Este último valor afigura-se excessivo para a mobilização eficaz do efeito de arco no solo entre as estacas, sendo, por isso, apresentadas recomendações no capítulo seguinte deste relatório para otimização da solução.

Com a devida consideração dos coeficientes parciais previstos na NP EN 1997-1 e NP EN 1998-5 os coeficientes de segurança das figuras de desestabilização que alcançam a zona entre a Terminal Sul e Sueste e a Estação do Terreiro do Paço do ML situam-se entre 0,54 e 0,62 (cf. Figura 2.3)

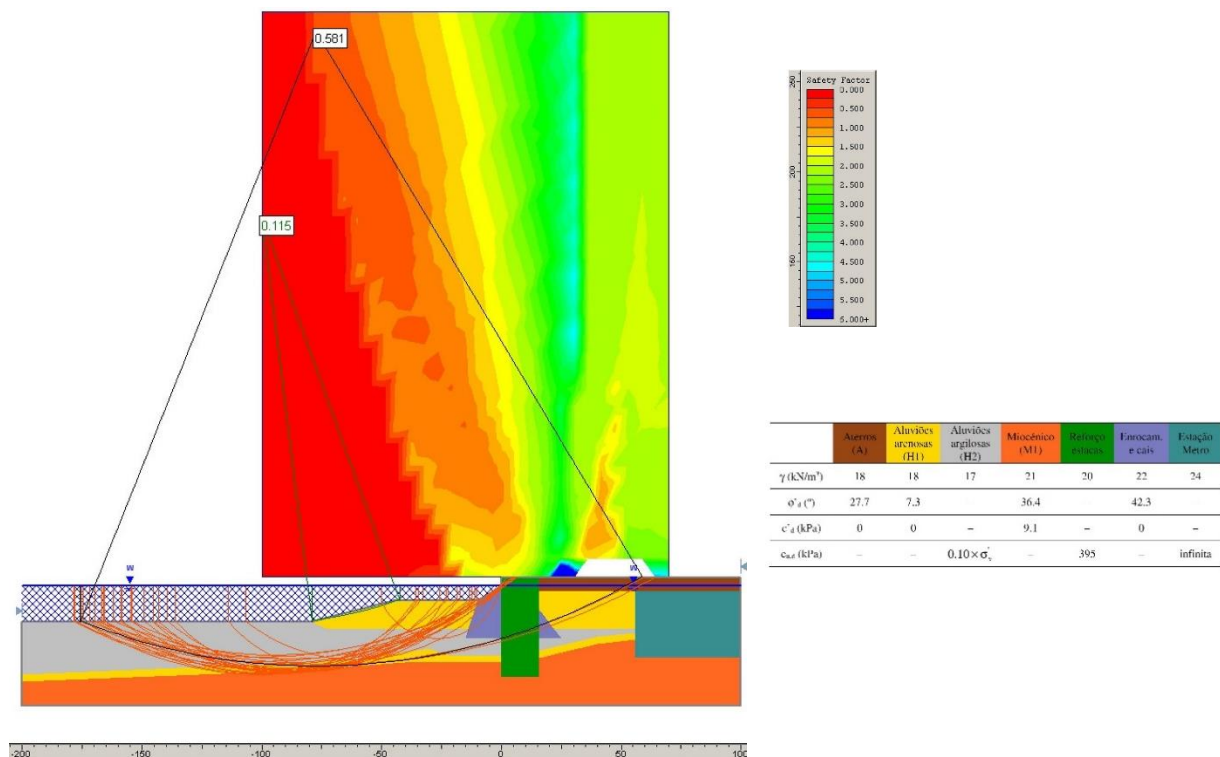


Figura 2.3 – Círculos de deslizamento na análise de estabilidade sísmica com sensibilidade das aluviões argilosas de 2 na sequência estratigráfica SCS no lado do rio (pág. 75 de CONSULGEO (2019b))

Tendo sido obtidos nos diversos estudos anteriores valores dos coeficientes de segurança ao deslizamento em situação sísmica inferiores à unidade, havia sido recomendado em LNEC (2019) a obtenção da estimativa dos deslocamentos residuais ao longo das superfícies de deslizamento. Este

cálculo permitiria avaliar o seu efeito potencial sobre as estruturas do Metropolitano de Lisboa adjacentes.

Tal foi somente realizado em CONSULGEO (2019b). Para tal, utilizaram-se três métodos simplificados de base estatística, cuja variável fundamental é a razão entre a aceleração crítica<sup>4</sup> e a aceleração máxima, de dimensionamento. Trata-se dos métodos de Makdisi e Seed (1978), Bray e Rathje (1998) e de Bray e Travasarou (2007), dos quais o segundo se afigura como não aplicável ao caso em estudo.

A aplicação do primeiro e do terceiro métodos requer a estimativa do período próprio fundamental da massa em vibração,  $T_0$ , para cuja obtenção fiável é necessário estimar, por sua vez, o módulo de distorção representativo das condições de vibração sísmica. É referido o valor de 0,69 s para  $T_0$  em ambos os perfis analisados, não sendo indicado o valor do módulo de distorção (ou a equivalente velocidade de propagação de ondas de corte) considerado no cálculo.

Admitindo uma espessura média representativa de 20 m (máximo compatível com a atribuição do tipo E ao terreno) obtém-se, para aquele período, uma velocidade  $V_s$  de 115 m/s, o que corresponde a uma razão adimensional  $G_{sec} / G_{max}$  de 0,4 (cf. Figura 2.4)<sup>5</sup>, associada a valores aproximados de amplitude de distorção cíclica de  $10^{-3}$  para a gama de tensão média efetiva de confinamento relevante, portanto, pelo menos uma ordem de grandeza abaixo do expectável numa resposta sísmica com mobilidade ou amolecimento cíclicos. Por exemplo, para uma distorção de  $10^{-2}$  corresponderia uma razão  $G_{sec} / G_{max}$  próxima de 0,15 e portanto  $V_s$  de 100 m/s e  $T_0$  de 0,80 s. Esta diferença tem implicações potenciais em termos da estimativa de deslocamentos residuais. Fica, assim, evidenciada a necessidade de realizar análises de tensão-deformação cíclicas no âmbito do desenvolvimento do projeto de execução.

Embora o âmbito de aplicação dos métodos referidos seja parcialmente exorbitado no estudo apresentado em CONSULGEO, (2019b), considera-se adequada a sua aplicação, dado tratar-se de um estudo prévio. Os valores medianos dos deslocamentos residuais ao longo das superfícies de deslizamento situam-se maioritariamente próximos de 10 cm, com a exceção da sequência SCC com sentido de atuação de cima para baixo, em que o valor é próximo de 20 cm.

---

<sup>4</sup> Aceleração de dimensionamento a que corresponderia um coeficiente de segurança unitário. Importa referir que a um valor unitário do coeficiente de segurança em situação sísmica não corresponde necessariamente a inexistência de deslocamentos, pois estes valores limites são frequentemente calibrados para corresponderem a deslocamentos residuais de pequena expressão.

<sup>5</sup> Nestas figuras as legendas D (2001), I&Z (1993) e V&D (1991) correspondem, respetivamente, às seguintes entradas na lista de referências deste relatório: Darendeli (2001); Ishibashi; Zhang (1993); e Vucetic; Dobry (1991).

Consideram-se estes valores como compatíveis com a segurança estrutural das infra-estruturas vizinhas do Metropolitano de Lisboa. No entanto, deverão ser confirmados no âmbito do projeto de execução através de métodos computacionais mais robustos.

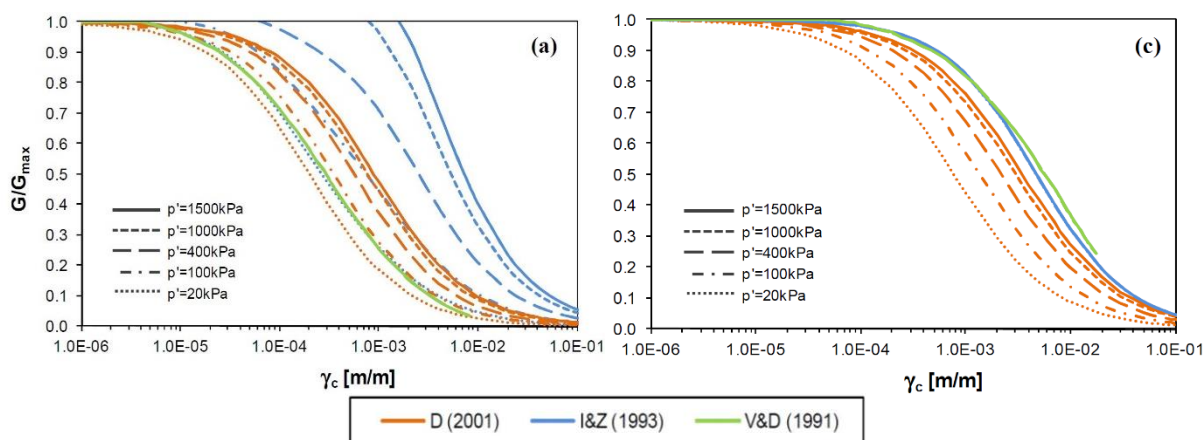


Figura 2.4 – Curvas adimensionais de redução do módulo de distorção vs. amplitude de distorção cíclica para (a) solos de baixa plasticidade (até 15%) ou (c) plásticos (Guerreiro et al., 2012)

A natureza estatística dos métodos empregues recomenda a consideração da dispersão estatística do erro das equações de regressão correspondentes.

A equação de regressão log-log de Bray e Travasarou (2007)

$$\ln U = -1,10 - 2,83y - 0,333y^2 + 0,566yz + 3,04z - 0,244z^2 + 1,5T_0 + 0,278(M - 7) \pm \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon = 0,67)$$

em que  $y = \ln(k_y)$  e  $z = \ln(S_a(1,5T_0))$ , relaciona o deslocamento sísmico residual  $U$  com a aceleração crítica  $k_y$  (adimensionalizada por  $g$ ) e com a ordenada espectral de aceleração  $S_a(1,5T_0)$ .

Dada a natureza logarítmica da variável dependente nesta equação e o facto de incluir uma variável (normal) de erro  $\varepsilon$ , a consideração de um percentil superior à mediana pode conduzir a valores significativamente majorados do deslocamento residual<sup>6</sup>. Também por este motivo se recomenda, em fase de elaboração do projeto de execução, o recurso a métodos computacionais mais robustos para a estimativa dos valores residuais de deslocamento.

Os círculos de deslizamento totalmente exteriores ao perímetro das estacas (“no lado do rio”) (cf. Figura 2.3) apresentam valores de coeficientes de segurança residuais (da ordem de 0,1), o que indicia a ocorrência de movimentos de desestabilização significativos em resultado de uma ocorrência sísmica equivalente à ação sísmica de dimensionamento. O método de análise utilizado em CONSULGEO (2019b) não permitiu a estimativa da amplitude daqueles movimentos. Tal estimativa deverá ser obtida no decurso da elaboração do projeto de execução e, no mesmo âmbito, avaliado o

<sup>6</sup> Por exemplo, o percentil 84 da distribuição de  $\varepsilon$  é igual ao seu desvio padrão  $\sigma_\varepsilon$ , o que significa duplicar a estimativa mediana de  $U$ , portanto para valores entre 20 e 40 cm.

efeito sobre a estabilidade global causado pelo desconfinamento parcial das estacas. Deste modo, será possível confirmar a expectativa expressa em CONSULGEO (2019b) de que este efeito será desprezável.

### 3 | Parecer

Os diversos documentos apresentados no âmbito do Estudo Prévio analisado carecem de um documento unificador e último cujo conteúdo seja auto-explicativo, portanto dispensando a consulta de outros documentos parciais ou de versões anteriores.

Deste modo a análise efetuada pelo LNEC em três documentos (o memorando de recomendações e pedido de esclarecimentos, e o relatório de apreciação, acima referidos, e o presente relatório) resultam de um processo iterativo e interativo com os autores do Estudo Prévio, visando a compatibilização e o apuramento da informação relevante.

Considera-se que o conjunto de documentos, com especial relevância do relatório CONSULGEO (2019b):

- a) caracteriza a informação geotécnica de base e define a ação sísmica de projeto;
- b) identifica os modos de rotura essenciais do cenário sísmico (liquefação, mobilidade cíclica, desestabilização pós-sísmica dos taludes submersos);
- c) define (ainda que sob a forma de intervalos de variação) os parâmetros físicos e mecânicos dos materiais de aterro, aluvionares e miocénicos;
- d) analisa de forma adequada, na ótica restrita de um estudo prévio, os efeitos sísmicos relevantes para o desempenho das infraestruturas do Metropolitano de Lisboa no Terreiro do Paço;
- e) apresenta resultados de deslocamentos residuais pós-sísmicos segundo a diretriz das superfícies de desestabilização compatíveis com a segurança antissísmica destas infraestruturas;
- f) não evidencia a consideração do efeito do nível de distorção cíclica na identificação das propriedades de deformabilidade e de amortecimento, o qual poderá até ser benéfico nas respostas calculadas;
- g) não apresenta a verificação de segurança estrutural das estacas para os esforços sísmicos e para as forças de interação com os deslizamentos analisados.

O Parecer do LNEC sobre a solução de estabilização por reforço de fundação por estacas é condicionalmente positivo, por se entender:

- que a solução estudada no Estudo Prévio tem o potencial para diminuir significativamente a probabilidade de ocorrência de danos sísmicos nas infraestruturas do ML;
- na eventual ocorrência de um episódio sísmico compatível com ou inferior à ação de dimensionamento, os resultados aqui apresentados, validados face à natureza do Estudo Prévio, sugerem os deslocamentos residuais dos taludes imersos e dos terrenos entre o



Terminal e a Estação do ML poderão ser compatíveis com a segurança antissísmica daquelas infraestruturas;

Para a confirmação deste potencial permanecem, porém, diversos aspetos que necessitam de análise com métodos mais adequados à natureza cíclica dos fenómenos em análise e ainda aspetos omissos, os quais deverão ser desenvolvidos no âmbito da elaboração do projeto de execução, sendo necessária a avaliação das disposições finais de projeto para confirmação.

Desse modo, adicionalmente às recomendações apresentadas em LNEC (2019) formulam-se as recomendações seguintes.

- a) O efeito de reforço de resistência pelos alinhamentos de estacas está dependente da mobilização do efeito de arco no solo e conseqüente transmissão das forças sísmicas para estes elementos estruturais. A principal variável geométrica condicionante da eficácia deste efeito é a distância entre as estacas, pelo que importará limitá-la. Procurando manter o número e o diâmetro das estacas e, portanto, os custos, recomenda-se a disposição destas em quincôncio;
- b) Deverá ser verificada a segurança estrutural das estacas e revista a sua tipologia ou disposição espacial em conformidade com as exigências de verificação dos estados limites STR e GEO;
- c) Recomenda-se especial cuidado no dimensionamento das estacas nas zonas de transição entre formações de rigidez contrastante, nomeadamente na transição entre as aluviões e o substrato miocénico.
- d) Recomenda-se a utilização de ferramentas computacionais de análise no domínio do tempo para consideração robusta das características mecânicas (deformabilidade e amortecimento) dos materiais e estimativa dos deslocamentos residuais pós-sísmicos.

Lisboa, LNEC, maio de 2019

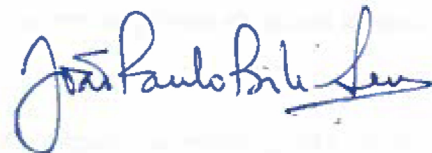
VISTO

AUTORIA

A Diretora do Departamento de Geotecnia



Laura Caldeira



João Bilé Serra

Investigador Principal



Laura Caldeira

Investigadora-Coordenadora

## Referências bibliográficas

- A2P, 2018a – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE. Estudo Prévio de Fundações e Estruturas da Plataforma e Reforço Complementar. Memória Descritiva P853-A2P-EPR-EST-MD-002-0.** Junho.
- A2P, 2018b – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE. Estudo Prévio de Fundações e Estruturas da Plataforma e Reforço Complementar. Memória Descritiva P853-A2P-EPR-EST-MD-002-A.** Julho.
- BRAY, J.; RATHJE, E., 1998 – **Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 124(3), 242-253.
- BRAY, J.; TRAVASAROU, T., 2007 – **Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 133(4), 381-392.
- CONSULGEO, 2016 – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Avaliação do potencial de liquefacção dos solos aluvionares da fundação.** Novembro.
- CONSULGEO, 2017a – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Nota Técnica sobre a avaliação do potencial de liquefacção dos solos aluvionares da fundação.** Janeiro.
- CONSULGEO, 2017b – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Estudo das fundações de um passadiço (relatório preliminar).** Março.
- CONSULGEO, 2017c – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Estudo Geotécnico para as fundações de um passadiço.** Março.
- CONSULGEO, 2017d – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Características das estacas e os métodos construtivos a adoptar para a execução do passadiço.** Abril.
- CONSULGEO, 2017e – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Nota Técnica sobre a estabilidade dos aterros a executar no âmbito da construção do passadiço.** Abril.
- CONSULGEO, 2017f – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Nota Técnica sobre a protecção dos taludes de aterro.** Abril.
- CONSULGEO, 2017g – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Nota Técnica sobre a estabilidade dos aterros a executar no âmbito da construção do passadiço (Revisão).** Julho.
- CONSULGEO, 2017h – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Nota técnica sobre a remoção de aterros e dragagens de lodos.** Novembro.
- CONSULGEO, 2018a – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Nota Técnica sobre a estabilidade dos aterros a executar no âmbito da construção do passadiço (Segunda revisão).** Maio.

- CONSULGEO, 2018b – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Revisão do Estudo Geotécnico com base nos resultados da campanha de prospeção complementar de 2017-2018.** Maio.
- CONSULGEO, 2018c – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Estudos geotécnicos para o tratamento dos terrenos de fundação.** Junho.
- CONSULGEO, 2018d – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Avaliação do potencial de liquefacção dos solos aluvionares da fundação com base nos resultados da campanha de prospeção complementar de 2017-2018.** Junho.
- CONSULGEO, 2018e – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Enquadramento geral dos estudos geotécnicos realizados.** Julho.
- CONSULGEO, 2019 – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE, TERREIRO DO PAÇO, LISBOA. Estudos geotécnicos para o tratamento dos terrenos de fundação (complemento ao relatório de Junho de 2018).** Fevereiro de 2019.
- DARENDELI, M., 2001 – **Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves.** Doctor of Philosophy. University of Texas at Austin.
- GUERREIRO, P.; KONTAE, S.; TABORDA, D., 2012 – **Comparative Study of Stiffness Reduction and Damping Curves,** 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa.
- ISHIBASHI, I.; ZHANG, X., 1993 – **Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay.** Soils and Foundations, 33:1, 182-191.
- LNEC, 2017 – **Avaliação, do ponto de vista sísmico, dos projetos relativos à reabilitação e requalificação do terminal fluvial sul e sueste e da zona ribeirinha adjacente, no Terreiro do Paço.** LNEC - Proc. 0503/01/16722. Relatório 305/2017 – DG/NGUT.
- LNEC, 2019 – **TERMINAL FLUVIAL SUL E SUESTE. Apreciação do Estudo Prévio P853-A2P-EPR-EST-MD-002-A das Fundações e Estruturas da Plataforma e Reforço Complementar.** LNEC - Proc. 0501/122/20265. Relatório /2019 – DG/Chefia (no prelo).
- MAKDISI, F.; SEED, H., 1978 – **Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations.** Journal of Geotechnical Engineering, 104(7), 849-867.
- METROPOLITANO DE LISBOA, 2010 – **Interferências de terceiros em estruturas ML em exploração. Projectos e monitorização das estruturas do ML. Procedimentos.** Março.
- TECNASOL, 2018 – **ESTAÇÃO FLUVIAL SUL E SUESTE LISBOA. Prospeção geológico – geotécnica complementar.** Relatório. Maio.
- YOUNG, T.; IDRIS, I., 2001 – **Liquefaction resistance of soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction resistance of Soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 4, April.
- VUCETIC, M.; DOBRY, R., 1991 – **Effect of soil plasticity on cyclic response.** Journal of Geotechnical Engineering, 117:1, 87-107.

