

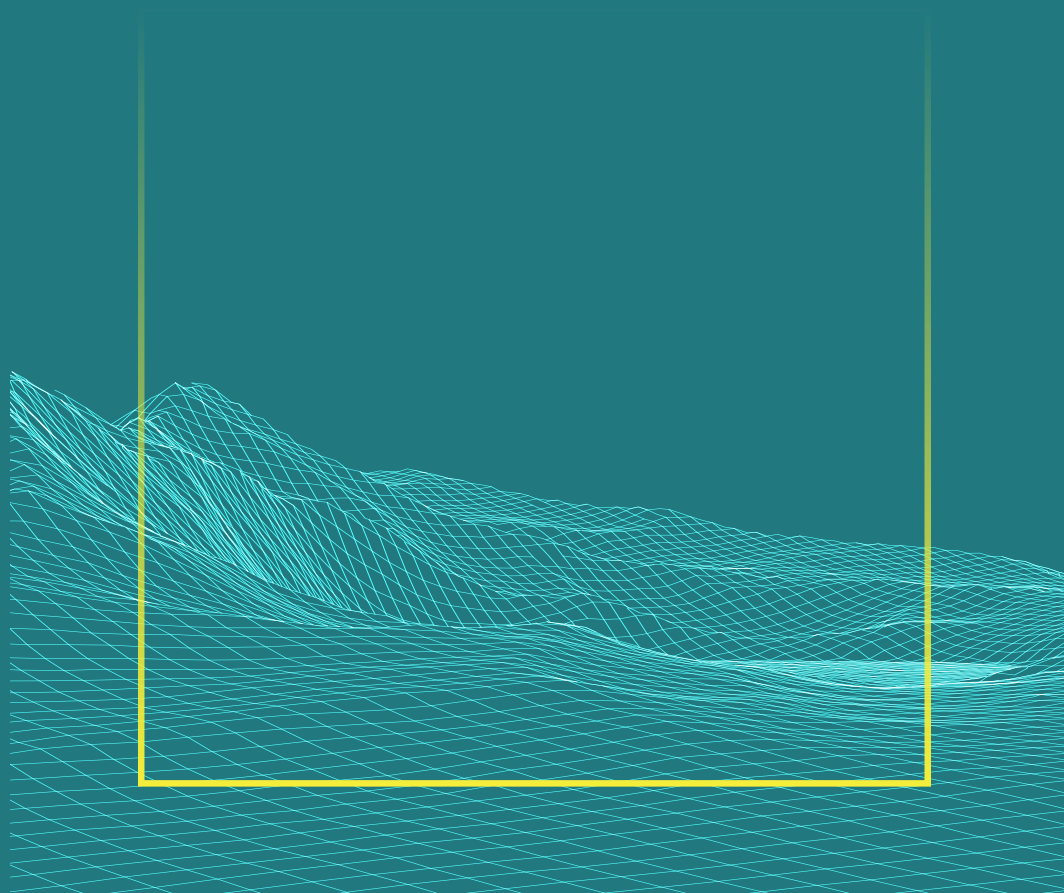
utad



Sociedade  
Portuguesa  
de Geotecnia

19.º Congresso Nacional  
**Ge****tecnia**

11-14 Maio 2026



---

# FICHA TÉCNICA

**Título:**

Atas do 19º Congresso Nacional de Geotecnia (19CNG), Desafios e Inovação da Geotecnia, Vila Real, 11 a 14 de maio de 2026

**Editores:**

João Marcelino, Nuno Cristelo, Luis Sousa, Cristiana Ferreira, Ana Sá, Rute Pinto e Diana Carvalho

**Grafismo:**

Rute Pinto e Diana Carvalho

**Publicação:**

Maio de 2026  
Sociedade Portuguesa de Geotecnia  
ISBN:978-989-35507-4-8

**Ferramentas de Software:**

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

 python™

 Canonical  
Ubuntu

 BASH  
THE BOURNE-AGAIN SHELL



**AVALIAÇÃO DO POTENTIAL DE LIQUEFAÇÃO SÍSMICA DE SOLOS  
ALUVIONARES DE LISBOA COM BASE EM ENSAIOS SPT  
ASSESSMENT OF THE SEISMIC LIQUEFACTION POTENTIAL OF  
ALLUVIAL SOILS IN LISBON USING SPT DATA**

Oliveira, António, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*  
*ajoliveira@lnec.pt\**

Ramos, Rute, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*  
*rmos@lnec.pt*

Jeremias, Filipe Telmo, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*  
*ftelmo@lnec.pt*

Pereira, Carlos, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*  
*cpereira@lnec.pt*

Serra, João Bilé, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*  
*biles@lnec.pt*

Catarino, Bruno, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal,*  
*bcatarino@lnec.pt*

Pinto, Cláudia, *Câmara Municipal de Lisboa, Lisboa, Portugal,*  
*claudia.pinto@cm-lisboa.pt*

**RESUMO**

A liquefação cíclica é um fenómeno relevante em regiões sísmicamente ativas. Caracteriza-se pela redução severa de resistência ao corte ou da rigidez de corte em solos saturados devido ao aumento da pressão intersticial durante sismos intensos, associada a deformações permanentes significativas. Ocorre predominantemente em solos arenosos pouco compactos e pode criar danos significativos, como assentamentos, deslizamentos e colapso de estruturas. Introduce-se um estudo, no âmbito da Ação ICM2 do programa ReSist da Câmara Municipal de Lisboa, para avaliação da suscetibilidade à liquefação dos solos de Lisboa, baseado na análise de sondagens geotécnicas com ensaios SPT. Foram utilizadas mais de 4800 sondagens, maioritariamente da base de dados GEOSIG da CML e complementadas por trabalhos de reconhecimento. A metodologia adotada baseia-se em: (i) determinar o fator de segurança à liquefação para cada ensaio SPT; (ii) definir a aceleração sísmica à superfície; e (iii) cartografar o índice de potencial de liquefação sísmica. A área de estudo foi subdividida em cinco lotes, sendo apresentados os resultados do Lote 1 (Algés-Alcântara), baseados na análise de 452 sondagens. Foram mapeadas as áreas suscetíveis à liquefação (aquelas com sondagens com pelo menos um ensaio SPT indicando probabilidade significativa de liquefação). Esta área corresponde a cerca de 60% do Lote 1, sobretudo nas zonas próximas do rio Tejo, onde predominam depósitos arenosos naturais e/ou antropogénicos. A cartografia obtida constitui uma ferramenta de apoio à decisão, contribuindo para a gestão territorial e a mitigação do risco sísmico em Lisboa. Não dispensa os estudos específicos para cada empreendimento.

**ABSTRACT**

Seismic liquefaction is a relevant phenomenon in seismically active regions, characterised by the loss of shear strength in saturated soils due to elevated pore pressures during severe earthquakes. Severe consequences, such as settlement,

landslide and structural collapse, may arise from such a process, which mostly affects poorly compacted sandy soils. This study, developed within the scope of the municipal program ReSist, aims to evaluate the seismic liquefaction susceptibility of soils from Lisbon, based on the analysis of geotechnical boreholes with SPT tests. For this purpose, a database with more than 4800 boreholes was used, mostly provided by CML, and complementary geological and geotechnical surveying campaigns were carried out. The methodology employed is based on: (i) the determination of the seismic liquefaction safety factor for each SPT test; (ii) the definition of surface ground accelerations (Type 1 earthquake for importance class II, current buildings); and (iii) the mapping of the seismic liquefaction potential index (LPI). The study area was subdivided into five zones. The results presented herein concern Zone 1 (Algés-Alcântara), following the analysis of 452 boreholes. Areas susceptible to seismic liquefaction were defined based on spatial analysis of the aforementioned results, suggesting that approximately 60% of Zone 1 is susceptible, particularly in areas closest to the Tagus River, which are predominantly characterised by natural and/or anthropogenic sandy deposits. The resulting map provides a preliminary tool for decision-making, urban planning, and seismic risk management strategies in Lisbon.

## 1. INTRODUÇÃO

Em regiões com atividade sísmica relevante, a liquefação cíclica é um dos fenómenos geotécnicos associados mais impactantes, podendo gerar potenciais perdas económicas, sociais e ambientais significativas. A liquefação sísmica está associada à perda de resistência ao corte em solos saturados, devido a incrementos de pressões intersticiais, provocados por carregamentos cíclicos induzidos por sismos intensos. No decurso de um terramoto, a propagação das ondas sísmicas causa o rearranjo da fábrica do solo e, no caso de solos grosseiros de baixa compactidade, o aumento da pressão intersticial de água. As consequências mais severas da liquefação sísmica incluem assentamentos diferenciais, instabilidade de taludes, colapso de fundações e estruturas, e inundações (Lai *et al.*, 2021; Tsukamoto e Ishihara, 2022; Çinar *et al.*, 2026).

O fenómeno de liquefação sísmica pode ser desencadeado num dado local quer por sismos de elevada magnitude com epicentro a grande distância, quer por sismos próximos de magnitude inferior, desde que sejam verificadas determinadas condições geológicas e hidrogeológicas (Jorge e Coelho, 1998). Contudo, a liquefação sísmica está predominantemente associada a sismos de magnitude 5,5 ou superior (Vallejo e Ferrer, 2011). Os solos mais suscetíveis à liquefação são compostos por areias finas e fracamente graduadas ou siltes, de baixa compactidade, e com menos de 10% de finos com comportamento plástico ( $IP > 7$ ). Estes solos são, geralmente, de idade holocénica, ocorrendo frequentemente em leques aluviais, deltas, dunas, áreas ribeirinhas e zonas costeiras (Lai *et al.*, 2021; Tsukamoto e Ishihara, 2022; Çinar *et al.*, 2026). Os aterros arenosos (*sensu lato*) são também propensos a este fenómeno. A ocorrência de liquefação sísmica requer que os terrenos se encontrem abaixo do nível freático, sendo mais comum a sua manifestação em profundidades inferiores a 15–20 m (Vallejo e Ferrer, 2011). Consequentemente, a avaliação da suscetibilidade à liquefação sísmica requer conhecimento detalhado sobre as propriedades geotécnicas do solo, sobre as condições hidrogeológicas locais, e sobre a sismicidade regional, recorrendo-se, frequentemente, na sua avaliação aos métodos semi-empíricos propostos por Seed e Idriss (1971, 1982), Boulanger e Idriss (2004, 2014) e Iwasaki *et al.* (1984).

Os estudos de liquefação sísmica à escala regional enquadram-se nas competências das autoridades municipais. Neste contexto, relata-se nesta comunicação um estudo que visa dotar o Município de Lisboa de uma ferramenta de apoio ao planeamento urbano e à tomada de decisão na gestão do risco sísmico, quer para edifícios e infraestruturas existentes, quer para futuros projetos de construção. Corresponde à ação ICM2 do programa ReSist da Câmara Municipal de Lisboa (ReSist, 2021). Adicionalmente, a análise da extensa base de dados de sondagens permitiu efetuar uma revisão da cartografia geológica, bem como estudar a paleogeomorfologia da área de estudo.

## 2. METODOLOGIA

A análise da suscetibilidade à liquefação sísmica à escala local e regional corresponde à avaliação pormenorizada do comportamento de perfis de solo quando sujeitos a solicitações cíclicas induzidas por sismos intensos e à cartografia de índices representativos. Este tipo de análise requer a utilização de informação detalhada sobre a geologia local, sobre as condições hidrogeológicas, e sobre as características geotécnicas dos diversos terrenos em apreço, nomeadamente a percentagem de finos, o índice de plasticidade (IP), o peso volúmico saturado ( $\gamma$ ) e a velocidade das ondas de corte ( $v_s$ ).

As metodologias semi-empíricas, originariamente propostas por Seed e Idriss (1971, 1982) e consolidadas por Boulanger e Idriss (2004, 2014), são habitualmente aplicadas devido ao carácter binário dos resultados, em que cada nível de solo é classificado como suscetível ou insuscetível à liquefação sísmica. A sua aplicação está prevista na NP EN 1998-5:2010, através do cálculo do fator de segurança (FS):

$$FS = \frac{CRR}{1,25 \cdot CSR} \quad (1)$$

em que CRR é o rácio de resistência cíclica, CSR é o rácio de tensão cíclica atuante, e 1,25 é o coeficiente de segurança (NP EN 1998-5:2010) correspondente à fração de 80% da tensão de corte crítica capaz de causar liquefação. Um nível de solo é considerado suscetível à liquefação sísmica quando FS for inferior à unidade.

O rácio CSR traduz a intensidade da tensão cíclica de corte em planos horizontais imposta ao solo pela propagação das ondas SH, em função da aceleração máxima do terreno e da profundidade, adimensionalizada pelo valor da tensão efetiva vertical geostática, pré-sísmica. O CRR é o valor de CSR correspondente à capacidade intrínseca do solo de resistir a solicitações cíclicas sem atingir a liquefação ou sem acumular deformações plásticas excessivas. O CRR é tipicamente estimado a partir de resultados de ensaios SPT (ensaios de penetração dinâmica) ou CPTu (ensaios de penetração com cone). Neste estudo, o CRR foi calculado com base nos resultados de ensaios SPT e segundo Boulanger e Idriss (2004, 2014), enquanto o CSR foi determinado de acordo com as normas NP EN 1998-1:2010 e NP EN 1998-5:2010.

Em Portugal Continental, a influência das condições do terreno na propagação das ondas sísmicas pode ser considerada através da individualização de cinco principais tipos de perfis estratigráficos de solo (A, B, C, D e E), com base na velocidade média das ondas de corte ao longo dos primeiros 30 m de profundidade, na espessura dos depósitos superficiais e na profundidade do substrato rochoso (NP EN 1998-1:2010). Na consideração do movimento sísmico à superfície é, igualmente, necessário

considerar a classe de importância das estruturas afetadas, associada ao período de retorno de referência da ação sísmica, o zonamento sísmico regional estabelecido pelas autoridades nacionais e a magnitude do sismo, com base nos critérios definidos na norma anteriormente referida. Uma vez que num estudo de âmbito municipal não é razoável particularizar a classe de importância do edificado, neste trabalho foi adotada a classe de importância II (edifícios correntes), a que corresponde o período de retorno de referência de 475 anos para a não ocorrência de colapso.

Para estudos efetuados à escala regional recomenda-se a apresentação dos resultados sob a forma de mapeamentos, criados em ambiente SIG. O mapeamento da suscetibilidade à liquefação sísmica foi desenvolvido através da delimitação de áreas suscetíveis e insuscetíveis. Considerou-se um local de sondagem como suscetível à liquefação quando se obteve um fator de segurança inferior a 1, em pelo menos um dos ensaios SPT realizados ao longo do respetivo perfil de solo até uma profundidade de 20 m. Atendeu-se, igualmente, a critérios geológicos, em particular, ao limite dos depósitos aluvionares.

O fator de segurança FS quantifica, num dado nível de solo, a suscetibilidade à liquefação sísmica. No entanto, não fornece qualquer informação sobre eventuais danos daí decorrentes (e.g., Çinar *et al.*, 2026), em primeiro lugar, por se tratar de um indicador pontual, que não integra a suscetibilidade de toda a sequência estratigráfica. Ao invés, o Índice de Potencial de Liquefação (LPI), proposto por Iwasaki *et al.* (1984) pondera o potencial da liquefação em cada nível de solo com a sua profundidade (até a um máximo de 20 m) e espessura, culminando os resultados numa medida única, totalizadora. É extremamente útil para o mapeamento e a gestão do risco sísmico, pois facilita a cartografia da perigosidade da liquefação sísmica. O LPI é calculado com recurso às equações (2), (3) e (4):

$$LPI = \int_0^{20\text{ m}} F(z)W(z)dz \quad (2)$$

$$F(z) = \begin{cases} 1 - \frac{CRR}{CSR}, & \frac{CRR}{CSR} \leq 1 \\ 0, & \frac{CRR}{CSR} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$W(z) = 10 - 0,5z \quad (4)$$

em que  $F(z)$  é o potencial de liquefação numa dada profundidade  $z$ , e  $W(z)$  é um fator de ponderação que atribui maior peso ao potencial de liquefação dos níveis mais superficiais. Iwasaki *et al.* (1984) propõem que o risco de liquefação em função do LPI seja interpretado da seguinte forma: se o LPI for igual a zero, o risco é muito baixo; para valores de LPI entre 0 e 5, o risco é baixo; para valores de LPI entre 5 e 15, o risco é elevado; e se o valor de LPI for superior a 15, o risco de liquefação é muito elevado.

### 3. CASO DE ESTUDO

O presente estudo foi desenvolvido no âmbito do programa ReSist (Programa Municipal de Promoção da Resiliência Sísmica do Parque Edificado, privado e municipal e das infraestruturas urbanas municipais), promovido pelo Município de Lisboa (ReSist, 2021). O concelho de Lisboa possui uma extensa zona ribeirinha, caracterizada pela ocorrência de depósitos superficiais (aluvião e aterro) holocénicos que podem atingir cerca de 50 m de espessura, sobrejacentes a formações do substrato com idades compreendidas entre o Cretácico e o Miocénico (Figura 1A). A sismicidade característica da região deve-se à proximidade aos limites que separam as placas tectónicas da Eurásia e África,

assim como a diversas falhas ativas situadas ao longo da costa e no continente (Pais *et al.*, 2006). A área de estudo foi definida com base na Folha 34-D (Lisboa) da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000 (Pais *et al.*, 2005), tendo em conta as zonas mapeadas como aluvião e/ou aterros, e estendida até à cota +10 m Nível Médio do Mar (NMM), devido às incertezas na cartografia de depósitos superficiais. Tendo em conta a sua elevada extensão, a área de estudo foi dividida em cinco lotes: os Lotes 1 a 4 representam os setores de poente a nascente da zona ribeirinha de Lisboa (junto ao rio Tejo), enquanto o Lote 5 corresponde às zonas dos principais vales fluviais de Lisboa preenchidas por depósitos superficiais (Figuras 1B e 1C).

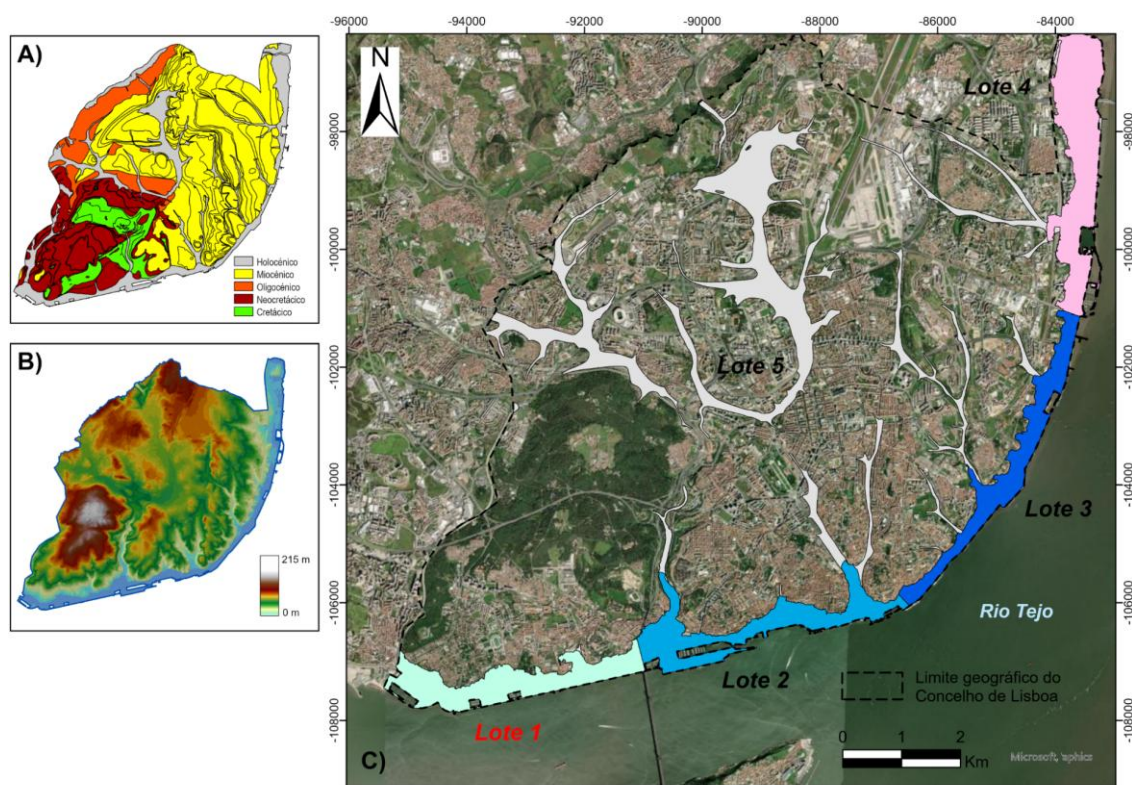


Figura 1 – Área do concelho de Lisboa. A) Mapa geológico simplificado; B) Modelo digital do terreno; C) Localização geográfica da área de estudo e delimitação dos seus cinco lotes. Coordenadas retangulares referenciadas ao Datum ETRS89 Portugal TM06.

Para a realização do estudo, foram inicialmente disponibilizados/compilados dados geológicos e geotécnicos referentes a 4782 sondagens, executadas na área de estudo entre 1935 e 2025, reportados em 756 relatórios de campanhas de prospeção geológico-geotécnica. No entanto, uma análise espacial preliminar demonstrou a ausência de informação geológico-geotécnica com qualidade em certos locais, o que determinou a necessidade de se efetuar uma campanha de prospeção complementar em 2024/2025. Esta campanha incluiu a realização de 83 sondagens com um comprimento máximo de 24 m e com execução de ensaios de penetração dinâmica (SPT) em curso de furação, a colheita de 167 amostras para análises laboratoriais (ensaios de caracterização) e a instalação de 21 piezómetros.

A diversidade de formações geológicas ocorrentes e das suas descrições nos relatórios geológico-geotécnicos implicou a adoção de um processo de uniformização, através do qual foram estabelecidas 20 unidades litológicas. As dez unidades representativas dos depósitos superficiais foram definidas com base nas características composicionais e texturais das amostras colhidas nas sondagens complementares executadas, bem

como na interpretação das descrições registadas nos relatórios de campanhas de prospeção geológico-geotécnica prévios. Por outro lado, as dez unidades do substrato rochoso foram derivadas fundamentalmente das unidades litoestratigráficas identificadas na cartografia geológica de Lisboa, nomeadamente na Folha 34-D (Lisboa) da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000 (Pais *et al.*, 2005) e na Folha 3 da Carta Geológica à escala 1:10 000 (Moitinho de Almeida, 1985).

Para a análise da suscetibilidade e do potencial de liquefação sísmica, recorreu-se a dados dos ensaios SPT disponíveis em 3767 sondagens, a fim de caracterizar a resistência dos terrenos. No que se refere à ação sísmica, foi considerado um sismo intraplaca com magnitude 7,5, com período de retorno de referência de 475 anos. Adicionalmente, assumiu-se um nível freático constante, situado à cota +2 m NMM, correspondente a um cenário conservador face aos resultados registados em campanhas de monitorização hidrogeológica.

Este estudo ainda está em curso, pelo que, nesta comunicação, serão apenas apresentados os resultados relativos ao Lote 1.

## **4. RESULTADOS**

O Lote 1 corresponde à zona ribeirinha de Lisboa entre Algés e a Doca de Santo Amaro (Alcântara), estendida até à cota +10 m NMM. Trata-se da secção mais ocidental da zona ribeirinha, com uma área de cerca de 2 km<sup>2</sup> e extensão aproximada de 4,5 km.

### **4.1. Condições geológicas e geotécnicas**

As condições geológicas e geotécnicas na área do Lote 1 foram analisadas com base nos dados de 452 sondagens. Neste lote, foram apenas identificadas 15 unidades litológicas, conforme ilustrado na Figura 2. O substrato rochoso é constituído por calcários cristalinos da Formação da Bica (identificados em 92 sondagens), basaltos e tufos do Complexo Vulcânico de Lisboa (CVL) (reconhecidos em 396 sondagens), e depósitos de idade miocénica (inter-setados apenas em 20 sondagens). O substrato exhibe, maioritariamente, uma paleotopografia caracterizada por uma superfície inclinada para sul (cotas decrescentes em direção ao rio Tejo) com zonas deprimidas criadas pelas ribeiras pertencentes à rede hidrográfica (Figura 3). Na área do Lote 1, o substrato foi inter-setado a uma profundidade máxima de cerca de 32 m, no domínio mais oriental do lote (junto a Alcântara).

Os depósitos superficiais são compostos por aluviões e aterros. A espessura destes materiais tende a aumentar em direção ao rio Tejo e ao centro dos paleovales das ribeiras. Possuem geralmente espessura compreendida entre 3,5 e 6,5 m, embora o valor máximo registado tenha sido de cerca de 32 m (Figura 4). Os depósitos aluvionares preenchem as antigas depressões fluviais e consistem em níveis alternados de materiais granulometricamente variáveis desde as argilas até às cascalheiras. Estes depósitos foram divididos em seis unidades litológicas: cascalheira, silte, lodo e argila, areia com mais de 35% de finos, areia com 5 a 35% de finos, e areia com menos de 5% de finos. A unidade de cascalheira foi predominantemente detetada na porção oriental do Lote 1 (em 41 sondagens), na base da sequência aluvionar. A unidade siltosa foi somente identificada em duas sondagens junto ao extremo oriental do Lote 1, ocorrendo a uma profundidade de cerca de 28 m. A unidade lodosa/argilosa ocorre dispersa por todo o lote, no topo ou na base da sequência aluvionar. Contudo, estes materiais não foram encontrados em alguns locais devido a terem sido escavados e substituídos por

aterros. As areias com mais de 35% de finos foram reconhecidas apenas em 47 sondagens, exclusivamente situadas na proximidade à Doca de Pedrouços. As areias com 5 a 35% de finos foram identificadas em 111 sondagens e representam a unidade aluvionar mais comum neste lote (Figura 2). Estas areias estão concentradas sobretudo nas zonas mais próximas ao rio Tejo. Finalmente, as areias aluvionares com menos de 5% de finos estão geograficamente confinadas ao extremo oriental do Lote 1 (Figura 2) e foram reconhecidas em 28 sondagens.

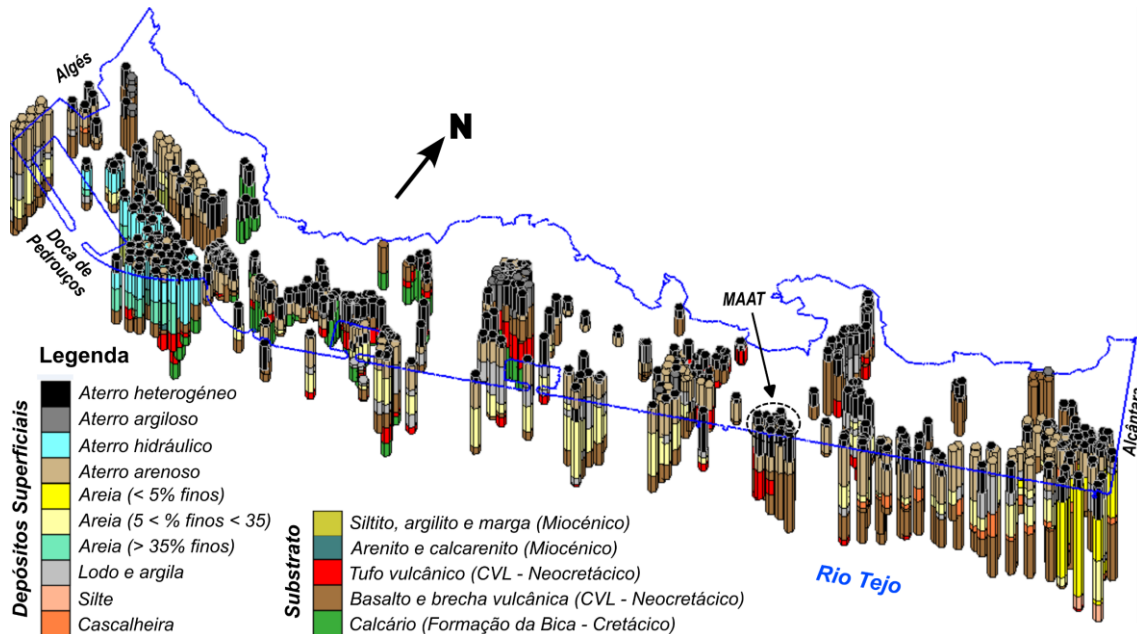


Figura 2 – Representação tridimensional das sondagens geológico-geotécnicas utilizadas e reinterpretadas no âmbito do estudo. O contorno anil delimita a área do Lote 1.

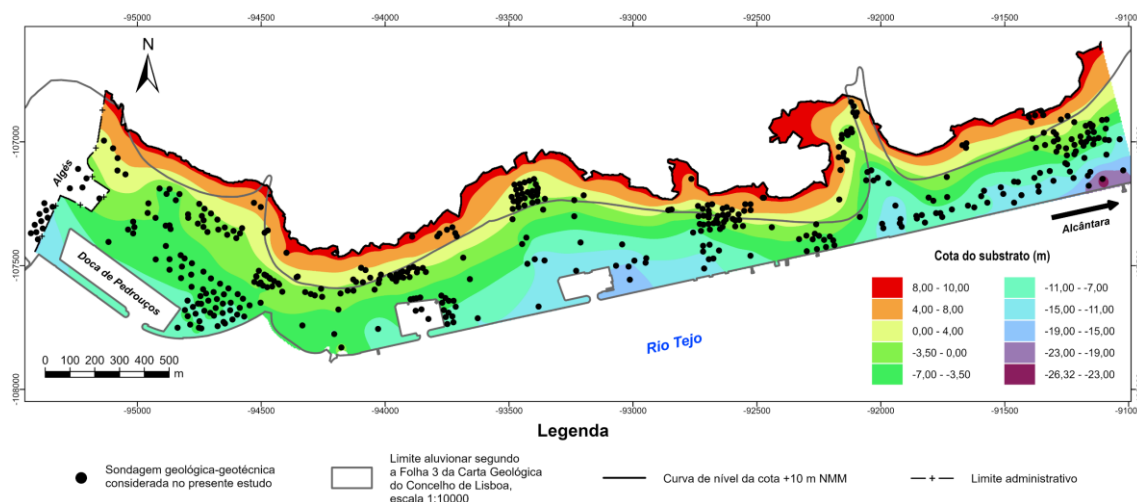


Figura 3 – Paleotopografia do topo do substrato rochoso na área do Lote 1.

Os depósitos de aterro situam-se sobre as aluviões ou sobre o substrato rochoso, tendo sido utilizados na construção da plataforma para o Porto de Lisboa, que se encontra à cota aproximada de +3,8 m NMM. A espessura total de aterros aumenta, em geral, para sul e varia entre 0,5 e 12,0 m, exibindo maioritariamente entre 4 e 7 m (Figura 5). Os depósitos de aterro foram subdivididos em quatro unidades: aterro arenoso, aterro hidráulico, aterro argiloso e aterro heterogéneo. Os aterros arenosos ocorrem dispersos

por toda a área do Lote 1, tendo sido identificados em 230 sondagens (Figura 2). Por outro lado, os aterros hidráulicos foram intersetados em 57 sondagens, exclusivamente junto ao extremo ocidental do Lote 1 (Figura 2), tendo resultado da construção da Doca de Pedrouços. Os aterros argilosos foram reconhecidos em 36 sondagens, situadas em locais próximos do limite interno setentrional do lote. Por fim, os aterros heterogêneos tendem a ocorrer no topo da maioria das sondagens do Lote 1, habitualmente sobre outros tipos de aterro.

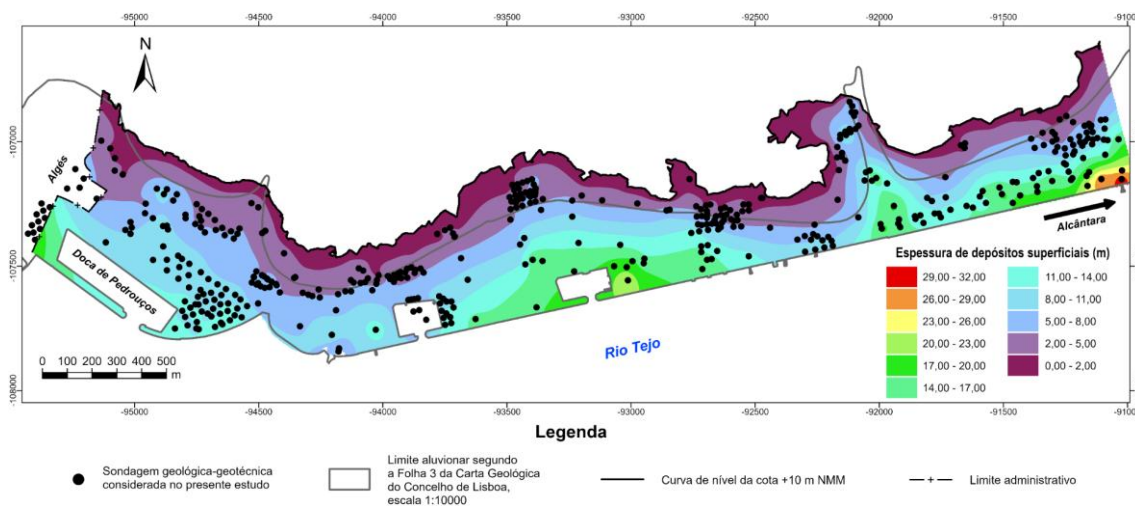


Figura 4 – Distribuição da espessura total de depósitos superficiais na área do Lote 1.

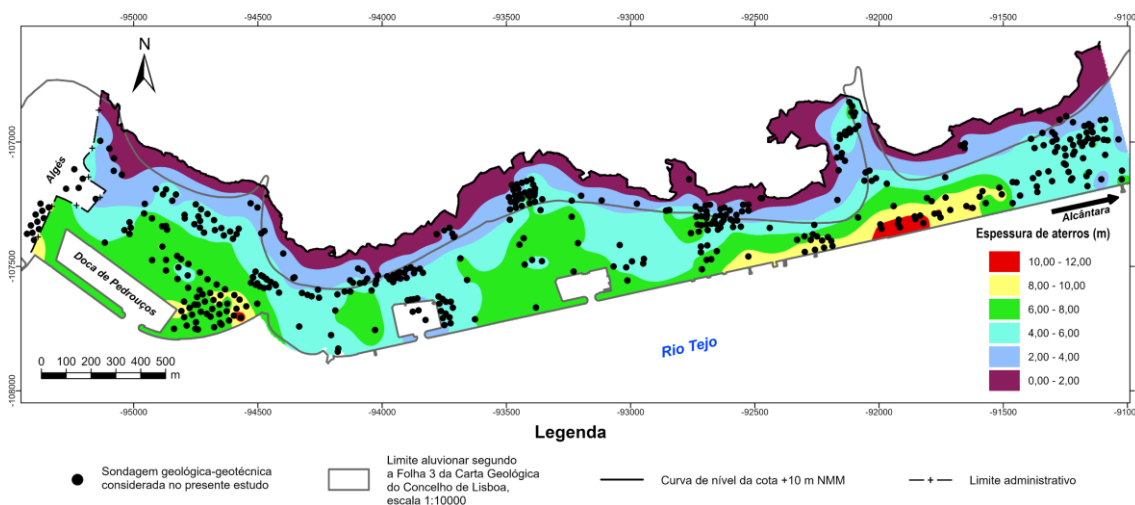


Figura 5 – Distribuição da espessura total de aterros na área do Lote 1.

No Quadro 1 são apresentadas as principais características das unidades representativas dos depósitos superficiais na área de estudo.

#### 4.2. Análise e mapeamento da suscetibilidade à liquefação sísmica

Para a análise da suscetibilidade à liquefação sísmica e do seu potencial, recorreu-se a um total de 433 sondagens, uma vez que dezanove foram excluídas dos cálculos por intersetarem apenas alguns metros de aterro (profundidade  $\leq 6$  m). Esta informação é fundamental para definir a tipologia de terreno, que por sua vez é importante para estabelecer a aceleração sísmica máxima superficial. Atendendo aos critérios estipulados na norma NP EN 1998-1:2010, na área do Lote 1 foram identificadas 155 sondagens em terreno do tipo A (formação rochosa compacta sob material menos

resistente com espessura até 5 m), 27 em terreno tipo C (depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, cascalho ou argila rija, com espessura de várias dezenas a centenas de metros, caracterizados por  $v_{s,30}$  entre 180 e 360 m/s), e 251 sondagens em terreno tipo E (solos aluvionares com espessura entre 5 e 20 m, bem como  $v_s$  até 360 m/s, sobre substrato rochoso resistente com  $v_s$  superior a 800 m/s). Com base nesta classificação, foi elaborada uma cartografia de tipos de terreno no Lote 1 (Figura 6). Os setores definidos como terreno tipo C ocupam cerca de 4,2% da área do Lote 1, ocorrendo quer junto ao extremo ocidental na zona da Doca de Pedrouços, onde o substrato é de idade miocénica, quer no extremo oriental onde foram executadas sondagens com mais de 20 m de depósitos aluvionares. Por sua vez, os terrenos do tipo A e E abrangem cerca de 38,6% e 57,2% da área do Lote 1, respetivamente. Os limites entre tipos de terreno foram estabelecidos com auxílio de métodos de interpolação espacial (Hutchinson, 2006) e critérios geológicos (contactos geológicos).

Quadro 1 – Propriedades das unidades definidas nos depósitos superficiais

| Unidades            | Propriedades |                               |         |                                                                        |               |                  |
|---------------------|--------------|-------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|
|                     | Finos (%)    | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | IP (%)  | $v_s$ (m/s) (*)                                                        | Espessura (m) | N <sub>SPT</sub> |
| Aterro heterogéneo  | 5 - 75       | 20 - 22                       | NP - 30 | 120 - 510                                                              | 0,1 - 9,0     | 1 - 60           |
| Aterro argiloso     | ≥ 25         | 16 - 21                       | 10 - 40 | 140 - 270                                                              | 0,5 - 8,6     | 1 - 39           |
| Aterro hidráulico   | 0 - 5        | 17 - 21                       | NP      | 120 - 220                                                              | 3,5 - 11,0    | 0 - 17           |
| Aterro arenoso      | 1 - 25       | 17 - 21                       | NP      | 130 - 380                                                              | 0,4 - 10,5    | 1 - 60           |
| Areia (≤ 5% finos)  | 0 - 5        | 18 - 21                       | NP      | 150 - 180 (N <sub>SPT</sub> ≤ 10)<br>150 - 400 (N <sub>SPT</sub> > 10) | 1,1 - 26,0    | 7 - 60           |
| Areia (5–35% finos) | 5 - 35       | 18 - 21                       | NP      | 120 - 310                                                              | 0,5 - 13,5    | 0 - 60           |
| Areia (> 35% finos) | 35 - 50      | 18 - 21                       | NP - 15 | 190 - 360 (**)                                                         | 0,7 - 8,0     | 0 - 46           |
| Lodo e argila       | ≥ 50         | 16 - 21                       | 5 - 35  | 70 - 190 (N <sub>SPT</sub> ≤ 4)<br>140 - 310 (N <sub>SPT</sub> > 4)    | 0,4 - 9,0     | 0 - 60           |
| Silte               | ≥ 50         | 17 - 21                       | NP - 20 | 310 (**)                                                               | 3,0 - 4,0     | 27 - 57          |
| Cascalheira         | 10 - 25      | 18 - 20                       | NP      | 270 - 680                                                              | 0,5 - 5,5     | 7 - 60           |

$\gamma$  – peso volúmico saturado, IP – índice de plasticidade,  $v_s$  – velocidade de ondas de corte, N<sub>SPT</sub> – número de pancadas dos ensaios SPT

(\*) Valores determinados tendo em conta 37 ensaios sísmicos entre furos (*crosshole*), maioritariamente realizados pelo LNEC, nas zonas aluvionares de Lisboa (Lotes 1 a 5) nos últimos 30 anos (Coelho *et al.*, 2026)

(\*\*) Dados limitados (quantidade inferior a 10).

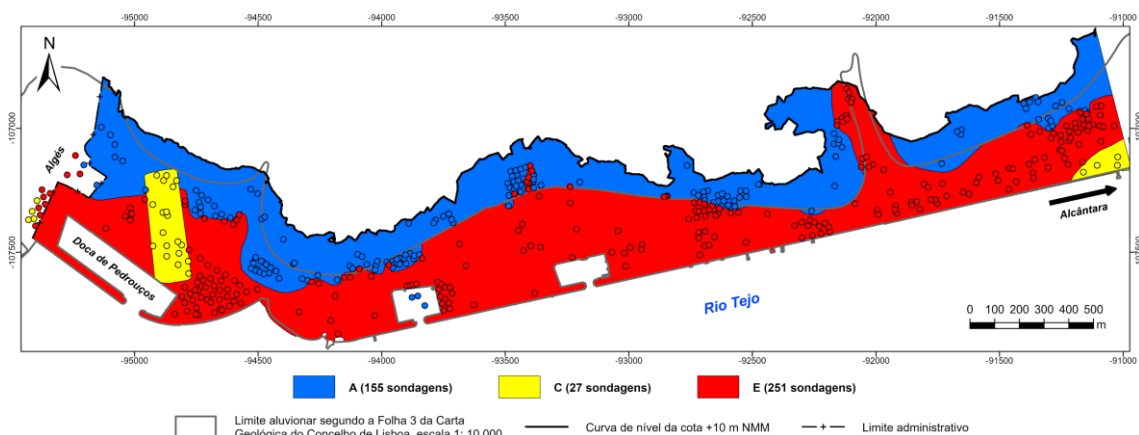


Figura 6 – Mapa dos tipos de terreno, segundo o EC8, no Lote 1 da área de estudo.

O cálculo do fator de segurança (FS) foi efetuado para as mesmas 433 sondagens, em todas as profundidades com ensaios SPT considerados válidos (ou seja, ensaios com penetração numa única unidade litológica), avaliando-se a suscetibilidade à liquefação sísmica segundo a metodologia apresentada na secção 2. Desta forma, foram identificados 224 e 209 perfis de terreno como suscetíveis e insuscetíveis à liquefação sísmica, respetivamente, cuja representação espacial permitiu a definição de áreas suscetíveis e insuscetíveis ao fenómeno em causa (Figura 7). Nos locais sem informação ou com menor densidade de sondagens, o limite que separa os domínios suscetível e insuscetível foi definido de forma conservadora, tendo-se dado prioridade à área mais suscetível. Da análise da Figura 7 verifica-se que a área suscetível à ocorrência de liquefação sísmica, ocupa cerca de 60 % do Lote 1. Localiza-se na zona mais próxima da frente ribeirinha, devido à grande espessura e fraca resistência dos depósitos arenosos ocorrentes, de origem natural e/ou antropogénica. Atendendo ao conjunto de unidades litológicas definidas no contexto deste estudo, as mais suscetíveis à liquefação sísmica no Lote 1 são os aterros arenosos (34%), as areias com 5 a 35% de finos (32%) e os aterros hidráulicos (22%).

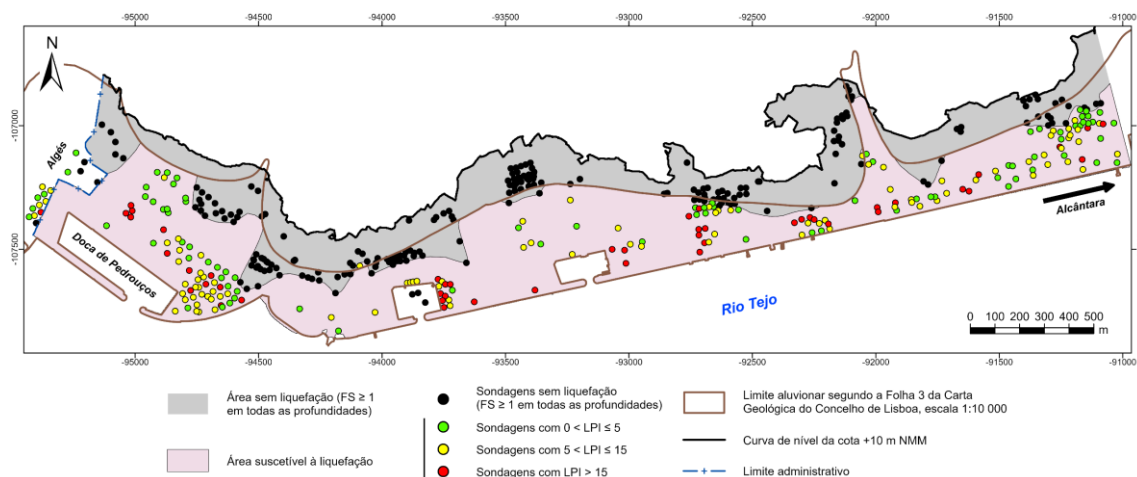


Figura 7 – Mapa de suscetibilidade à liquefação sísmica do Lote 1 da área de estudo.

No que se refere ao LPI, as 433 sondagens contempladas nos cálculos foram categorizadas nas quatro classes propostas por Iwasaki *et al.* (1984). Na área caracterizada como insuscetível à liquefação sísmica, todas as sondagens revelaram LPI = 0, indicando que na manifestação de um sismo, não deverá ocorrer liquefação. Uma situação excecional diz respeito às sondagens imersas, as quais não acarretam riscos de liquefazer, uma vez que os depósitos superficiais constituintes são exclusivamente de natureza lodosa/argilosa. Na área definida como suscetível à liquefação, a probabilidade de ocorrência foi classificada como baixa (LPI entre 0 e 5) em 78 perfis de terreno, elevada em 87 perfis (LPI entre 5 e 15) e muito elevada (LPI > 15) em 47 perfis. Conforme ilustrado no mapa da Figura 7, a categorização das sondagens do Lote 1 segundo as diferentes classes de LPI exibe uma distribuição espacial de elevada heterogeneidade, dificultando o seu mapeamento em áreas. Vários motivos podem ser responsáveis por essa heterogeneidade como a tipologia dos aterros intersetados pelas sondagens, a espessura das unidades litológicas capazes de liquefazer e a sua posição estratigráfica, e a influência de aluviões insuscetíveis à liquefação (solos silto-argilosos ou areno-argilosos com IP > 7). Assim, a informação relativa ao LPI é apresentada de forma pontual, representando, exclusivamente, o perfil de terreno associado à respetiva sondagem.

## 5. CONCLUSÕES

No âmbito da ação M2C do programa ReSist do Município de Lisboa, foram avaliados a suscetibilidade e o potencial de liquefação sísmica das zonas aluvionares de Lisboa com recurso às metodologias semi-empíricas propostas por Seed e Idriss (1971, 1982), Boulanger e Idriss (2004, 2014), e Iwasaki *et al.* (1984). Neste trabalho é descrito o protocolo aplicado aos depósitos superficiais do Lote 1, a partir do qual foi produzido um mapa de suscetibilidade à liquefação sísmica com base na análise de 433 sondagens. Os resultados obtidos sugerem que os setores adjacentes ao rio Tejo caracterizados por depósitos arenosos, de origem natural e/ou antropogénica, com espessura entre 1 e 25 m, são propensos ao fenómeno de liquefação sísmica, enquanto as áreas sem potencial de liquefação estão situadas a cotas mais elevadas, em locais onde o substrato rochoso subjacente ocorre a uma profundidade inferior a 5 m.

A elevada heterogeneidade da distribuição espacial de valores de LPI impossibilitou a sua interpolação em áreas contínuas. Tal observação implica que o mapa de suscetibilidade produzido no contexto do presente estudo deve apenas ser utilizado como uma ferramenta preliminar de apoio à tomada de decisões sobre planeamento urbano e gestão de risco sísmico. Quaisquer estratégias ou medidas de mitigação a implementar em áreas suscetíveis à liquefação sísmica deverão ser baseadas em estudos específicos, realizados à escala local, que incorporem análises detalhadas nos domínios da geologia de engenharia, estruturas e hidrogeologia. A incorporação sistemática destas medidas no planeamento urbano e em projetos de engenharia é essencial de forma a aprimorar a segurança sísmica da cidade de Lisboa e contribuir para a redução dos impactos socioeconómicos associados a eventos sísmicos futuros.

## REFERÊNCIAS

- Boulanger, R.W., & Idriss, I.M. (2004). *Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays (Report No. UCD/CGM-04/01)*. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis
- Boulanger, R.W., & Idriss, I.M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures (Report No. UCD/CGM-14/01)*. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis
- Coelho, M.J., Ramos, R., Jeremias, F.T., Catarino, B., Oliveira, A., Pereira, C. (2026). *Caracterização dinâmica de solos na zona ribeirinha de Lisboa com base em ensaios sísmicos entre furos*. Livro de resumos do 19.º Congresso Nacional de Geotecnia, Vila Real, Portugal
- Çinar, M., Öztürk, M., Özbek, A., Kop, A., & Çelik, B. (2026). *GIS-based evaluation of liquefaction susceptibility in the Türkoğlu district, Kahramanmaraş: A comparative analysis using LPI and LSI*. Journal of African Earth Sciences, 235, Article 105985. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2025.105985>
- Hutchinson, M. (2006). *ANUDEM Version 5.2*. Digital work, CRES, ANU
- Instituto Português da Qualidade (2010). *NP EN 1998-1:2010 – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. IPQ
- Instituto Português da Qualidade (2010). *NP EN 1998-5:2010 – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*. IPQ

- Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K.I. (1984). *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. International journal of soil dynamics and earthquake engineering, 3(1), 49-58. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90027-5)
- Jorge, C., & Coelho, A. (1998). *Zonamento do potencial de liquefacção. Tentativa de aplicação a Portugal*. Geotecnia, (83), 37-59
- Lai, C., Bozzoni, F., Conca, D., Famà, A., Özcebe, A.G., Zuccolo, E., Meisina, C., Boni, R., Bordini, M., Cosentini, R.M., Martelli, L., Poggi, V., Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Rios, S., Cordeiro, D., Ramos, C., Molina-Gómez, F., Coelho, C., Logar, J., Maček, M., Oblak, A., Ozcep, F., Bozbey, I., Sargin, S., Aysal, N., Oser, C., & Kelesoglu, M.K. (2021). *Technical guidelines for the assessment of earthquake induced liquefaction hazard at urban scale*. Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 4013-4057. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00951-8>
- Moitinho de Almeida, F. (1985). *Folha 3: Carta Geológica de Lisboa à escala 1:10,000*. Serviços Geológicos de Portugal
- Pais, J., Moniz, C., Cabral, J., Cardoso, J.L., Legoinha, P., Machado, S., Morais, M.A., Lourenço, C., Ribeiro, M.L., Henriques, P., & Falé, P. (2006). *Notícia Explicativa da Folha 34-D (Lisboa): Carta Geológica de Portugal à escala 1:50,000*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
- Pais, J., Moniz, C., Clavijo, E., Dias, R.P., Manuppella, G., Machado, S., & Cunha, T.A. (2005). *Folha 34-D (Lisboa): Carta Geológica de Portugal à escala 1:50,000*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
- ReSist (2021). *Programa Municipal de Promoção da Resiliência Sísmica do Parque Edificado, privado e municipal e das infraestruturas urbanas municipais*. Relatório Final do Programa ReSist
- Seed, H.B., & Idriss, I.M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97(9), 1249-1273. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662>
- Seed, H.B., & Idriss, I.M. (1982). *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute
- Tsukamoto, Y., & Ishihara, K. (2022). *Advances in Soil Liquefaction Engineering*. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-5479-7>
- Vallejo, L.G., & Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/B11745>