

Microzonagem sísmica de Lisboa baseada na análise de sondagens geotécnicas

Lisbon seismic microzonation based on geotechnical borehole data analysis

Liliana Oliveira
Paula Teves Costa
Cláudia Pinto
Rui Carrilho Gomes
Isabel M. Almeida
Carlos Ferreira
Teresa Pereira
Marta Sotto-Mayor

Resumo

As condições locais do terreno podem alterar muito significativamente as características do movimento sísmico à superfície. É fundamental caracterizar adequadamente o perfil de terreno para se poder estimar alterações que o terreno poderá produzir no movimento sísmico à superfície. Consciente desta situação, a Câmara Municipal de Lisboa (CML) apoiou o desenvolvimento de uma carta de zonamento sísmico dos terrenos de Lisboa, de acordo com a classificação do Eurocódigo 8. A base de dados geotécnicas da CML foi utilizada para estimar o parâmetro NSPT30 que foi utilizado como *proxy* de VS30, para efetuar a classificação dos perfis de terreno. Os resultados obtidos foram confrontados com os resultados de ensaios sísmicos não invasivos, com dados geofísicos recolhidos em relatórios independentes e com a geologia superficial na escala 1:10 000, fundamentando a carta de zonamento sísmico de Lisboa para aplicação em estudos de vulnerabilidade sísmica.

Abstract

It is well known that the influence of the local site conditions can strongly affect the earthquake motion, modifying its amplitude, duration and frequency content. Aware of this situation, the Municipality of Lisbon supported the development of a project to elaborate the soil classification according to EC8. Taking profit of the geotechnical database of the Municipality of Lisbon, an expedited methodology was developed to perform the site classification. The methodology was based on the estimation of the NSPT30 parameter, a proxy of VS30 in the EC8's soil classification. The results were compared and validated with non-invasive field experiments, as well as with the local geology and data collected from independent geophysical reports, supporting the application of seismic zonation map in seismic vulnerability studies.

Palavras-chave: Microzonagem / Classificação de perfis de terreno / Sondagens geotécnicas / SPT / Lisboa

Keywords: Microzonation / Soil classification / Geotechnical boreholes / SPT / Lisbon

Liliana Oliveira

Mestre/Bolseira de Investigação
Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;
Centro Europeu de Riscos Urbanos (CERU)
Lisboa, Portugal
liliana.oliveira.1917@gmail.com

Paula Teves Costa

Doutora/Professora Auxiliar
Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;
Centro Europeu de Riscos Urbanos (CERU)
Lisboa, Portugal
ptcosta@fc.ul.pt

Cláudia Pinto

Doutora/Técnica Superior
Direção Municipal de Gestão Patrimonial/Divisão do Cadastro (DMGP/DC)
Câmara Municipal de Lisboa (CML)
Lisboa, Portugal
claudia.pinto@cm-lisboa.pt

Rui Carrilho Gomes

Doutor/Professor Auxiliar
CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
rui.carrilho.gomes@tecnico.ulisboa.pt

Isabel M. Almeida

Doutora/Professora Auxiliar Aposentada
Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
isabel.moitinho.almeida@gmail.com

Carlos Ferreira

Engenheiro/Técnico Superior
Departamento de Sistemas de Informação/Divisão de Gestão de Informação
Georreferenciada (DSI/DGIG) – Câmara Municipal de Lisboa (CML)
Lisboa, Portugal
carlos.s.ferreira@cm-lisboa.pt

Teresa Pereira

Doutora/Técnica Superior
Direção Municipal de Habitação e Desenvolvimento Local (DMHDL)
Câmara Municipal de Lisboa (CML)
Lisboa, Portugal
teresa.pereira@cm-lisboa.pt

Marta Sotto-Mayor

Engenheira/Diretora Municipal
Direção Municipal de Habitação e Desenvolvimento Local (DMHDL)
Câmara Municipal de Lisboa (CML)
Lisboa, Portugal
marta.mayor@cm-lisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

OLIVEIRA, L. [et al.] – Microzonagem sísmica de Lisboa baseada na análise de sondagens geotécnicas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 11. ISSN 2183-8488. (novembro 2019) 7-16.

1 Introdução

Lisboa foi afetada por sismos moderados a fortes ao longo da sua história, como os sismos de 26 de janeiro de 1531 e de 1 de novembro de 1755, que provocaram danos avultados e um elevado número de vítimas mortais. Atendendo a esta sismicidade e à sua importância socioeconómica, Lisboa é considerada uma cidade com risco sísmico moderado a elevado. Por este motivo, a caracterização da resposta sísmica do terreno e das edificações é premente para fundamentar o desenvolvimento e aplicação de medidas mitigadoras.

Sabe-se que as condições locais podem alterar de um modo muito significativo as características do movimento sísmico à superfície, pelo que é fundamental caracterizar adequadamente os diferentes tipos de terreno de modo a estimar as propriedades do movimento sísmico à superfície para um dado cenário sísmico. Com este objetivo, a Câmara Municipal de Lisboa (CML) promoveu um estudo para a elaboração de uma carta de classificação dos terrenos de Lisboa sob solicitação sísmica, de acordo com as classes definidas no Eurocódigo 8 (EC8) [1]. Este trabalho insere-se num projeto mais alargado da CML sobre a avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional e do património edificado. A classificação dos terrenos de Lisboa segundo o EC8 é fundamental para identificar o parâmetro de solo a introduzir no cálculo do Índice de Resiliência Sísmica do Edificado, trabalho que tem vindo a ser desenvolvido pela Direção Municipal de Habitação e Desenvolvimento Local da Câmara Municipal de Lisboa (DMHDL-CML) em colaboração com o Instituto Superior Técnico.

De um modo geral, a classificação de terrenos segundo o EC8 é realizada com base no valor do parâmetro primário VS30 (velocidade média de propagação da onda de corte nos 30 m superficiais). Contudo, tendo em conta a escassez de informação relativa às velocidades de propagação das ondas sísmicas transversais nas diversas formações geológicas de Lisboa, decidiu-se classificar os terrenos com base no valor de NSPT30, recorrendo à base de dados geotécnicos da CML que contém um grande volume de resultados de ensaios de penetração SPT (*Standard Penetration Test*). Realizou-se o zonamento dos terrenos através da análise da informação contida na base de dados geotécnicos da CML, complementada pela informação presente na carta geológica do concelho de Lisboa 1:10 000 [2], em ensaios sísmicos não invasivos realizados em vários locais (perfis sísmicos de refração e registos de vibrações ambientais) e por dados geofísicos recolhidos em relatórios independentes.

2 Elementos de base

2.1 Base de Dados Geotécnicos (BDG)

A Base de Dados Geotécnicos (BDG) existente na CML resultou do projeto GeoSIG – Cartografia geotécnica de áreas urbanas de Lisboa – que foi desenvolvido pela CML em parceria com a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e outras instituições [3]. Nesta base de dados georreferenciada, que se encontra em permanente atualização, encontram-se compilados os dados geotécnicos disponíveis nos arquivos do município de Lisboa. O conjunto de dados geotécnicos disponibilizados na BDG inclui um total de

8792 sondagens, com a realização de pelo menos 3 ensaios SPT, que fazem parte de 1624 relatórios geotécnicos (Figura 1). Estas sondagens foram realizadas entre 1935 e 2016, por diferentes empresas, pelo que o conjunto de dados/informação disponibilizada não é homogêneo.

Existem zonas da cidade que apresentam uma elevada concentração de sondagens e outras onde não existe informação geotécnica. Estas últimas zonas, denominadas “zonas sombra”, situam-se sobretudo nas partes norte e oeste da cidade e na zona ribeirinha na parte sudeste e esta falta de informação pode ser devida a ainda não estar introduzida na base de dados, ou à inexistência de sondagens com ensaios SPT nessas áreas por se tratar de zonas onde não houve intervenção urbana ou por os ensaios não serem adequados às condições geotécnicas locais. Como consequência, a classificação dos terrenos localizados nessas “zonas sombra” terá de ser feita por extrapolação, pelo que deverá ser interpretada com cautela, tomando em consideração esta lacuna.

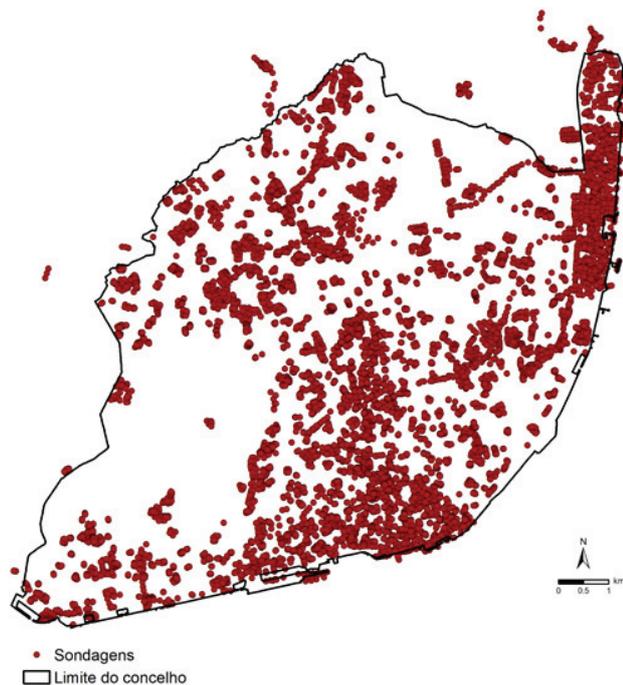


Figura 1 Distribuição espacial das sondagens geotécnicas disponibilizadas

2.2 Carta geológica do concelho de Lisboa

A análise da carta geológica do concelho de Lisboa 1:10 000, adaptada de Moitinho de Almeida (1986) [2], mostra que nas áreas norte e leste de Lisboa afloram formações do Miocénico, enquanto as formações do Cretácico (Complexo Vulcânico de Lisboa, Formação da Bica e Formação de Caneças) afloram no quadrante sudoeste (Figura 2).

A Formação de Benfca, de idade paleogénica, correspondendo à transição entre as formações Miocénicas e o Complexo Vulcânico de Lisboa, aflora na parte noroeste da cidade estendendo-se

para o centro. As aluviões (e/ou aterros) também se encontram representadas nesta carta, incluindo as antigas ribeiras de Lisboa (aluviões interiores) e a margem do Rio Tejo (aluviões ribeirinhas). À escala desta carta não é possível fazer a distinção entre as formações de cobertura (aluviões ou aterros), pontualmente identificáveis nas sondagens geotécnicas.

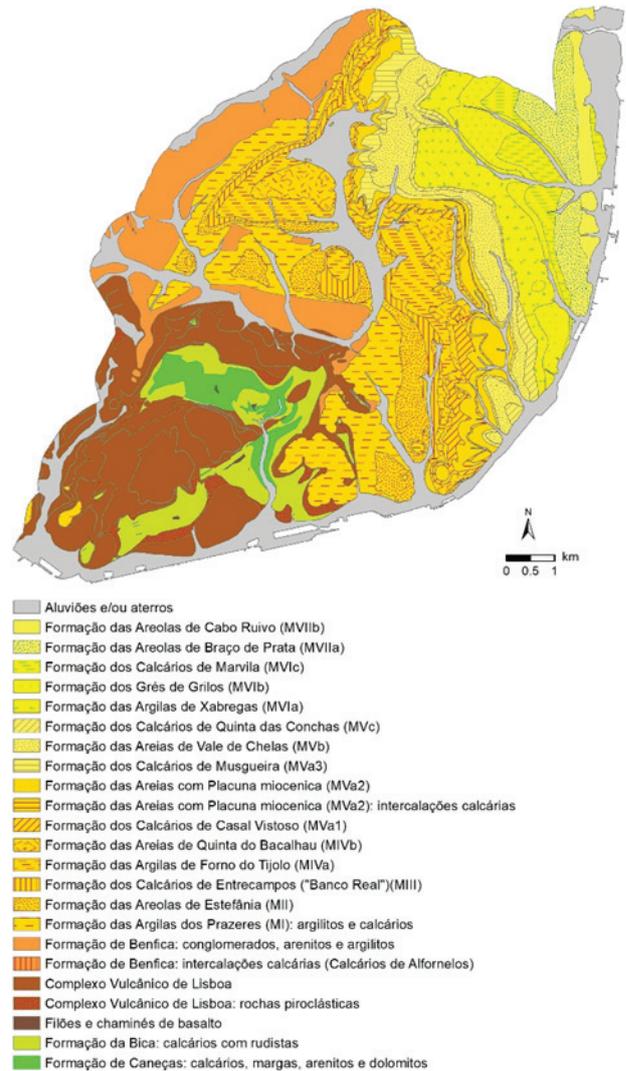


Figura 2 Carta geológica do concelho de Lisboa (adaptado da carta geológica 1:10 000 [2])

3 Caracterização das formações geológicas da cidade de Lisboa

3.1 Distribuição das formações de cobertura

De um modo geral, em zonas urbanas o substrato geológico encontra-se muito modificado por intervenção humana, incluindo aterros de natureza e origem diversas, resultantes da necessidade de

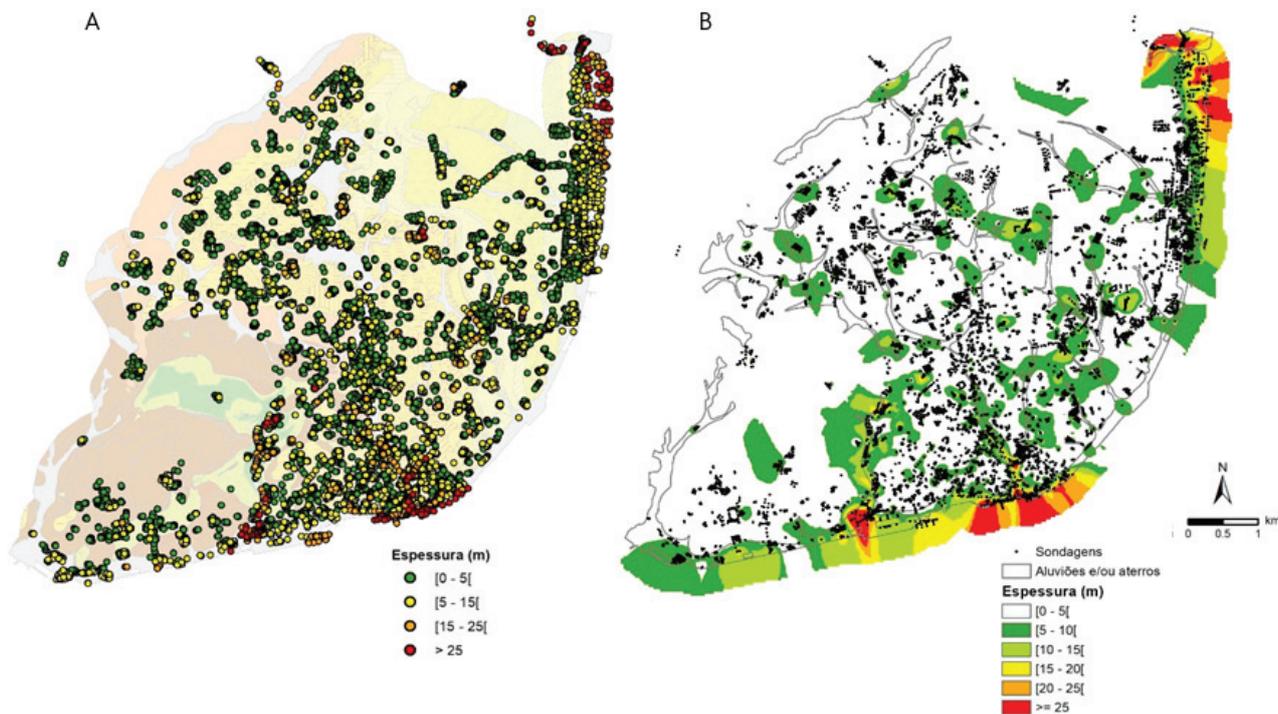


Figura 3 Distribuição das formações de cobertura. A – Espessuras (sobre a carta geológica do concelho de Lisboa 1:10 000 [2]); B – Interpolação das espessuras superiores a 5 m

adaptar a topografia aos usos do solo e de colmatar depressões de origem natural ou artificial [4]. Estas ocorrências, que não figuram na cartografia geológica de base, alteram de forma significativa a natureza e propriedades geotécnicas das camadas superficiais do terreno e, por consequência, a sua resposta a solicitações externas [5]. Sendo a cidade de Lisboa fortemente urbanizada e em constante evolução, é de esperar a existência de formações de cobertura não cartografadas na carta geológica. As aluviões ocupam uma área apreciável e incluem as formações diretamente associadas ao leito principal do rio Tejo e a todas as ribeiras e linhas de água que a este afluem na sua margem direita. Estas formações têm composições em muitos casos dependentes das litologias erodidas contendo, frequentemente, matéria orgânica. Já os aterros têm origem antropogénica [6].

Das 8792 sondagens geotécnicas analisadas, 7938 identificaram a existência de formações de cobertura constituídas por aluviões e/ou aterros. A Figura 3 mostra a distribuição das formações de cobertura no concelho de Lisboa.

A maior espessura das formações de cobertura é encontrada nas zonas ribeirinhas, nomeadamente nas zonas do Parque das Nações, da Baixa e de Alcântara (Figura 3). A partir da interpolação dos valores pontuais de espessuras significativas destas formações (superiores a 5 m), é possível observar formações de cobertura que não estão cartografadas, nomeadamente os aterros antropogénicos que são independentes das aluviões. As formações mais espessas correspondem às aluviões ribeirinhas, mas no interior da cidade

há pequenas áreas com espessuras consideráveis que não estavam identificadas, correspondendo na maior parte dos casos a antigas explorações de matérias-primas. Considerando os relatórios analisados, o mais antigo data de 1935 e o mais recente de 2016, o que indica que as formações de cobertura identificadas podem já não existir, assim como poderão existir outras formações que não são identificadas nesta análise. Por exemplo, num estudo realizado sobre a variação da espessura de formações superficiais obtida através da análise de fotografia aérea e de dados LiDAR, entre 1944 e 2006, em parte do concelho de Lisboa [7], constata-se que houve a construção de aterros e a realização de escavações durante esse período de tempo que podem ter introduzido variações até ~30 m (ou mais) na espessura das formações superficiais. Por este motivo é necessário interpretar estes resultados com a devida cautela.

3.2 Classificação preliminar dos terrenos de Lisboa

O EC8 define cinco terrenos tipo principais – A, B, C, D e E – e dois terrenos tipo especiais – S1 e S2 – que estão relacionados com situações de fenómenos de liquefação e mobilidade cíclica. Estes terrenos especiais, devido à sua especificidade e escala da carta produzida, não foram incluídos neste estudo.

A classificação preliminar foi desenvolvida com base nas propriedades médias mais representativas da geologia superficial (Figura 4). As formações foram agrupadas e classificadas de acordo com 4 tipos

de terreno principais: Complexo Vulcânico de Lisboa e Formações da Bica e de Caneças, compostas por rochas basálticas e carbonatadas, respetivamente – terreno tipo A; formações miocénicas compostas por rochas brandas calcareníticas e solos rijos argilosos – terreno tipo B; solos arenosos e arenoargilosos – terreno tipo C; aluviões (lodosas e arenosas) e aterros – terreno tipo D. O terreno tipo E verifica-se quando o substrato sísmico se encontra entre 5 m e 20 m de profundidade, pelo que só pode ser identificado a partir da análise de dados de sondagem e/ou de ensaios geofísicos.

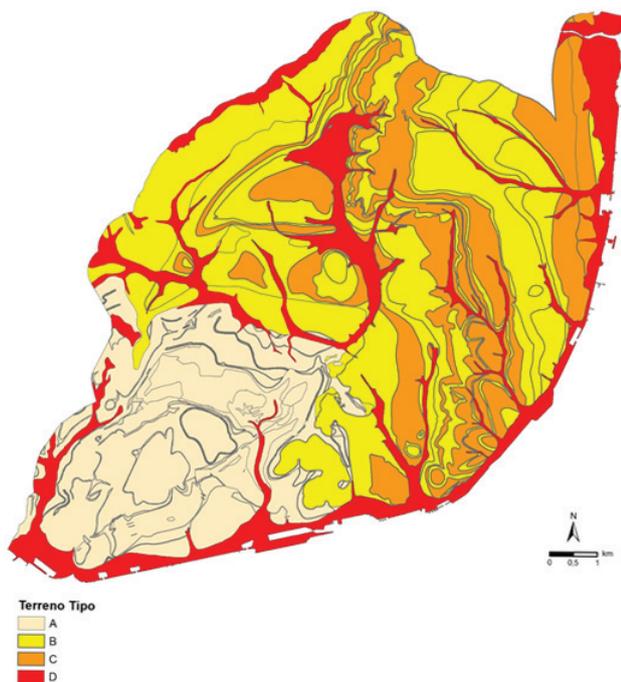


Figura 4 Classificação preliminar dos perfis de terreno do concelho de Lisboa de acordo com a classificação dos terrenos tipo do EC8

4 Classificação dos perfis de terreno

4.1 Metodologia

Para realizar a classificação dos perfis de terreno foi desenvolvido um algoritmo de cálculo para a identificação do substrato sísmico (se atingido pela sondagem), e classificação dos perfis de terreno de acordo com o EC8 a partir da análise dos valores de NSPT existentes na BDG. Foram consideradas 8181 sondagens das quais apenas 3623 excedem os 15 m de profundidade e 428 atingem os 30 m de profundidade, tendo a sondagem mais profunda atingido 71,55 m. A prática habitual é fazer-se a sondagem até alguns metros abaixo da cota de fundação e/ou até se obterem 3 “negas” consecutivas no ensaio SPT (isto é, ensaios com NSPT = 60) o que, em geral, não é suficiente para realizar uma caracterização sísmica adequada. Para uma boa caracterização do terreno as sondagens deveriam ser realizadas até 30 m de profundidade, exceto se for encontrada rocha

sã que possa ser considerada como substrato sísmico. A metodologia envolveu o cálculo do parâmetro NSPT30 que, à semelhança do parâmetro VS30, representa o NSPT médio nos primeiros 30 m de terreno. Consequentemente, foi necessário extrapolar os valores de NSPT desde a cota do ensaio mais profundo até aos 30 m de profundidade, tomando em consideração os últimos valores de NSPT registados na sondagem. Isto significa que o valor estimado de NSPT30 vem afetado de uma incerteza, desconhecida, mas que será tanto maior quanto menor for a profundidade atingida pela sondagem.

O algoritmo fornece a classificação dos terrenos nos cinco tipos definidos no EC8; quando esta não é possível, o terreno é classificado como “Desconhecido”. Os resultados deram origem à nova classificação dos terrenos que será comparada com a classificação preliminar apresentada na secção 3.2.

4.2 Aplicação aos terrenos de Lisboa

4.2.1 Análise da classificação obtida após a 1ª iteração

A Figura 5 apresenta a classificação obtida após a primeira aplicação do algoritmo.

De uma forma geral, existe uma grande heterogeneidade nos resultados, mais evidente na distribuição dos terrenos tipos B e C (Figuras 5A e 5B), não sendo possível identificar zonas tipo B ou zonas tipo C. Por outro lado, devido à distribuição irregular das sondagens, existem zonas difíceis de classificar por inexistente ou escassa informação. A dificuldade no zonamento dos terrenos é comprovada pela Figura 5C, que apresenta a Baixa de Lisboa com maior detalhe. É evidente a elevada variabilidade lateral do perfil de terreno, que resulta não só da variabilidade lateral da geologia superficial mas também do facto de esta poder apresentar-se alterada, mais ou menos descomprimida, com diferenças na sua composição litológica, bem como existirem, ou não, formações de cobertura.

Para se avaliar a dispersão dos terrenos tipo identificados em cada formação geológica foi feita uma análise estatística dos mesmos. Para cada formação foi contabilizado o número de sondagens por terreno tipo. Nesta análise também se considerou o número total de sondagens em cada formação, uma vez que zonas com maior concentração de trabalhos poderão conter um maior número de sondagens.

A maior parte das formações apresenta uma percentagem muito semelhante de resultados com classificação terreno tipo B e terreno tipo C, com exceção de um pequeno número de formações que apresenta uma classificação predominante. No caso das aluviões e/ou aterros esperar-se-ia uma predominância de terreno tipo D. No entanto, como têm diferentes espessuras e cobrem diferentes substratos, esta classificação nem sempre predomina. Os terrenos tipo D encontram-se sobretudo nas zonas ribeirinhas onde foram identificadas as formações de cobertura de maior espessura (Figura 3). Quanto às formações Cretácicas, inicialmente classificadas como terreno tipo A (Figura 4), o algoritmo mostrou que, no caso do Complexo Vulcânico de Lisboa, a maior parte das sondagens foi

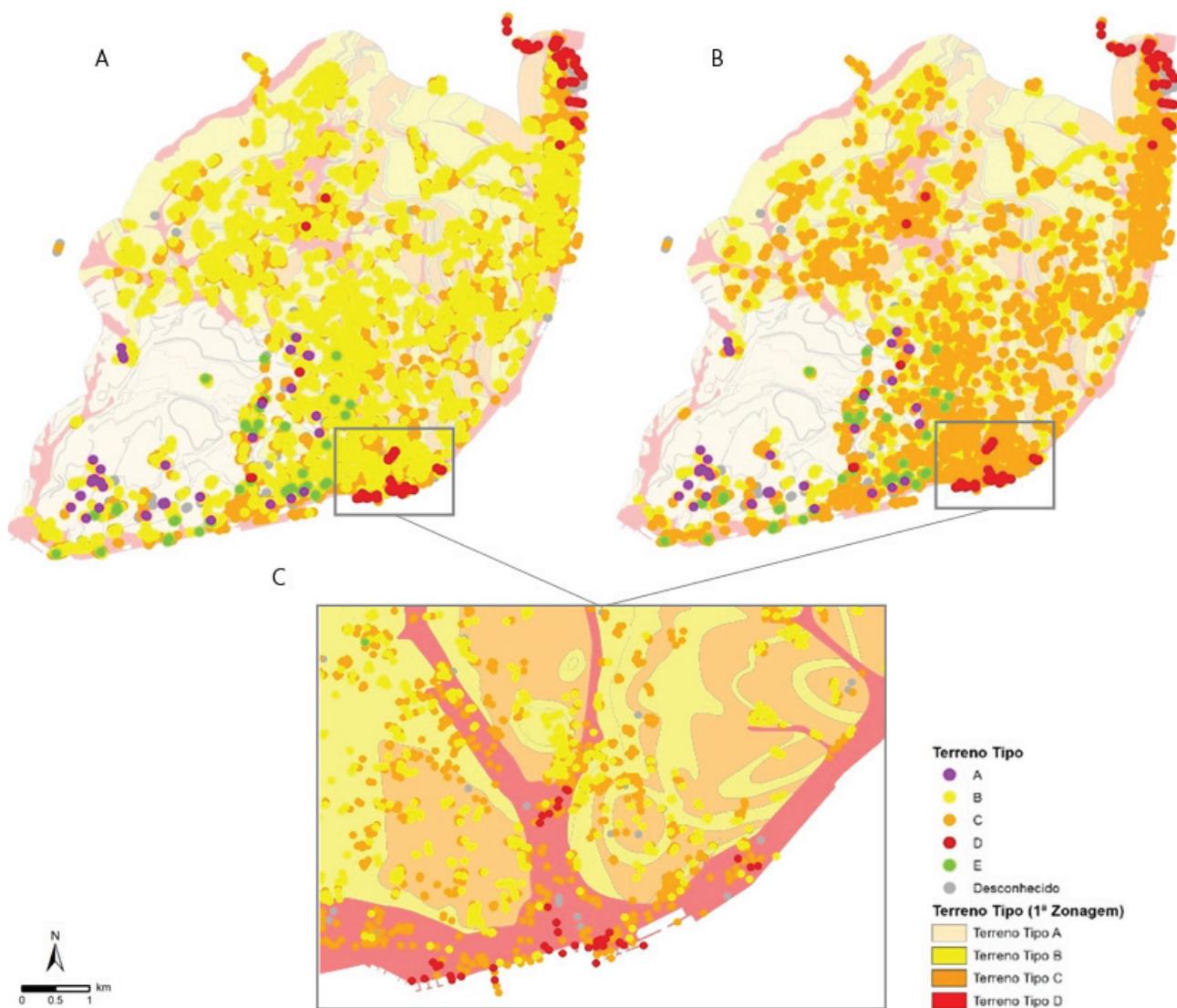


Figura 5 Classificação dos terrenos obtida a partir da aplicação do algoritmo. A – Sondagens classificadas como terreno tipo B sobrepostas às restantes; B – Sondagens classificadas como terreno tipo C sobrepostas às restantes; C – zoom da região da Baixa de Lisboa

classificada como terreno tipo B, existindo também um número considerável de sondagens classificadas como terreno tipo C, e apenas um reduzido número foi classificado como terreno tipo A. Nas unidades cretácicas, mais antigas e possivelmente mais resistentes, existem poucas sondagens pois não é comum realizarem-se ensaios SPT em rocha e as sondagens existentes correspondem, muito provavelmente, a zonas onde existem formações de cobertura. Consequentemente, para classificar as diferentes unidades geológicas, em particular as mais antigas, vai ser necessário entrar em conta com informação complementar.

4.2.2 Introdução de classes intermédias

Atendendo ao número considerável de formações geológicas que apresentam um número semelhante de sondagens classificadas

como terrenos tipo B e C, não foi possível realizar uma zonagem destes tipos de terreno. Para ultrapassar esta dificuldade, assumiu-se a existência de um terreno intermédio, tipo BC, que poderá representar a transição de um terreno tipo B para um terreno tipo C. Para introduzir este novo terreno tipo foi considerado o valor de NSPT30 calculado através da aplicação do algoritmo. Para um terreno tipo C, $15 \geq \text{NSPT30} \geq 50$, enquanto para um terreno tipo B, $\text{NSPT30} > 50$. Assim, é classificado como terreno tipo BC um terreno tipo B ou terreno tipo C para o qual $40 \leq \text{NSPT30} \leq 70$.

A Figura 6 apresenta a distribuição dos terrenos tipo, incluindo esta nova classe BC. Na Figura 7 apresentam-se, a título exemplificativo, os resultados da classificação dos terrenos para a formação Areolas de Cabo Ruivo, antes e depois da introdução da nova classe BC: considerando apenas as duas classes B e C, não é possível observar uma classe predominante e, consequentemente, atribuir uma

classificação única aos terrenos desta formação (Figura 7B). Ao introduzir a classe BC, pode observar-se uma predominância desta classe, sendo assim possível atribuir uma única classe a esta formação, o que vai permitir realizar a zonagem dos terrenos (Figura 7C).

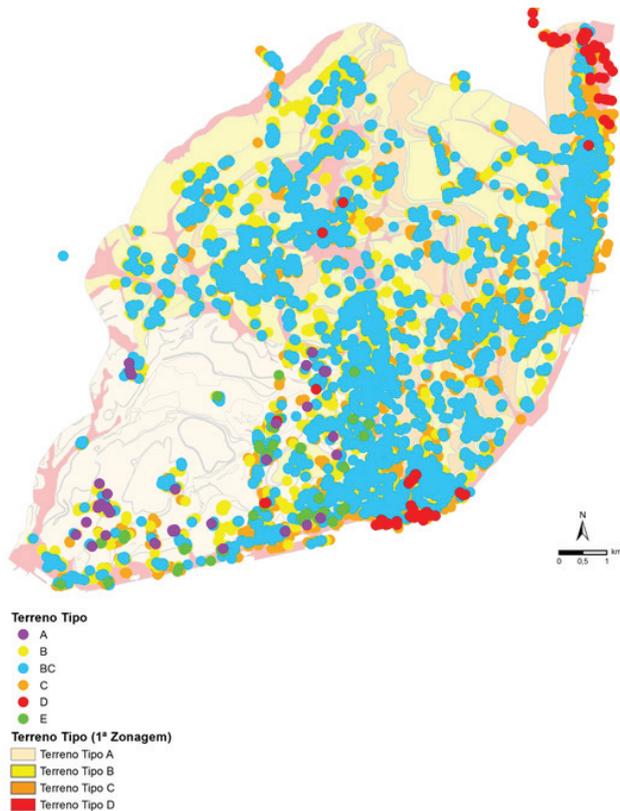


Figura 6 Distribuição dos terrenos tipo do concelho de Lisboa, incluindo o terreno tipo BC

A interpretação do novo tipo de terreno BC contempla, contudo, duas situações diferentes:

- i) Terreno onde existe praticamente igual número de sondagens dos tipos B e C, evidenciando uma grande heterogeneidade na sua distribuição espacial;
- ii) Terreno apresentando um comportamento intermédio entre as duas classes B e C, caracterizado por um valor de NSPT30 muito próximo do valor que separa os dois tipos de terreno definidos no EC8.

Tanto no primeiro como no segundo caso, a causa pode estar nas formações de cobertura que se encontram “aleatoriamente” distribuídas por toda a cidade. Estas formações, que não estão cartografadas na sua totalidade na carta geológica de Lisboa, podem alterar localmente e significativamente as propriedades geotécnicas das colunas de terreno e, conseqüentemente, a sua resposta a solicitações externas.

Constatou-se também a necessidade de definir uma segunda classe intermédia, AB. Inicialmente, admitiu-se que as formações geológicas do Cretácico pudessem ser classificadas como terreno

tipo A (rocha). Contudo, o baixo número de sondagens realizadas nestas formações e a não realização de ensaios SPT em rocha sugerem que a metodologia aplicada possa não ser adequada para classificar os tipos de terreno nestas formações. Por outro lado, a presença de formações de cobertura também pode influenciar a resposta dos terrenos que estão sobre estas formações rochosas, tendendo a modificar as suas características de terreno tipo A para terreno tipo B. Este facto, juntamente com a impossibilidade de identificar independentemente estes dois tipos de terreno nestas formações mais antigas, justifica a introdução do tipo de terreno AB que corresponderá, de novo, a duas situações distintas:

- i) Terreno tipo A que poderá modificar as suas características localmente devido à existência de formações de cobertura que não estão cartografadas;
- ii) Formações geológicas do Cretácico que podem apresentar-se mais ou menos alteradas não sendo, contudo, possível cartografar as áreas de rocha sã e de rocha alterada.

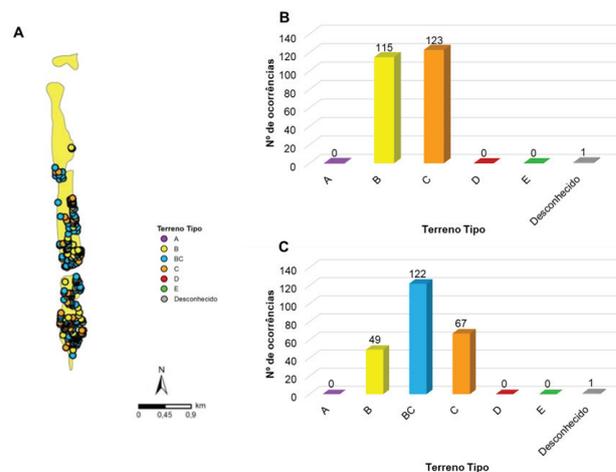


Figura 7 Formação Areolas de Cabo Ruivo. A – Distribuição dos terrenos tipo sobre a formação geológica (todas as classes consideradas); B – Histograma com a contabilização dos terrenos tipo por sondagem (antes da introdução da classe BC); C – Histograma com a contabilização dos terrenos tipo por sondagem, considerando a nova classe BC

4.3 Ensaios de campo complementares

Adicionalmente à análise da BDG, foram realizados ensaios sísmicos não invasivos em vários locais da cidade – perfis sísmicos de refração e registos de vibrações ambientais – que, em conjunto com dados geofísicos recolhidos em relatórios independentes e com a análise da geologia superficial, foram utilizados como informações complementares para a interpretação dos resultados do algoritmo e das opções tomadas para a classificação dos terrenos da cidade de Lisboa.

Os perfis sísmicos de refração foram realizados em locais com formações de cobertura mais, ou menos, espessas, assentes em diferentes formações geológicas. A seleção dos sítios foi

condicionada pelo espaço e condições necessárias para realizar um perfil sísmico, assim como pela existência de sondagens geotécnicas próximas. Para se estimar as velocidades de propagação das ondas S nas diferentes formações geológicas foram analisados relatórios de sondagens com informação geofísica e bibliografia especializada.

Os registos de vibrações ambientais realizaram-se em vários locais da cidade, com o objetivo de obter informação complementar sobre as características dos terrenos (frequência natural de vibração das colunas de terreno). Selecionaram-se alguns locais com base na espessura das formações de cobertura (por exemplo, no Parque das Nações), e outros considerando a formação geológica sobre a qual se encontram (por exemplo, sobre o Complexo Vulcânico de Lisboa). Também foram considerados os resultados obtidos por Teves-Costa *et al.* [8], assim como a reanálise de dados de medidas de vibrações ambientais recolhidas previamente em diversos locais da cidade [9]. Na análise e interpretação dos resultados obtidos considerou-se a litoestratigrafia do perfil de terreno identificada nas sondagens próximas dos locais de registo. A curva H/V permite a estimativa da frequência fundamental do terreno, f_0 [10]. Este parâmetro fornece informação complementar para a caracterização dinâmica do terreno. Apesar de o EC8 ser omissivo em relação a este parâmetro, tem havido propostas para incluir a sua contribuição na classificação dos terrenos [e.g. 11].

No Parque das Nações foi selecionado um local com formações de cobertura muito espessas (20 - 25 m), compostas por aterros e aluviões (Figura 8A), onde na curva H/V se identifica um pico nítido numa frequência próxima de 1,66 Hz. Este valor pode ser interpretado como a frequência natural do terreno. Uma primeira estimativa da velocidade média da onda de corte nos aterros/aluviões pode ser obtida a partir de:

$$f = \frac{V_s}{4h} \tag{1}$$

onde f é a frequência natural do terreno, V_s é a velocidade de propagação das ondas S e h é a espessura da formação superficial, representativa de terrenos homogêneos com comportamento viscoelástico com substrato rígido. Através de (1) estima-se que nas formações pouco consolidadas a velocidade da onda S é de cerca de 150 m/s, o que fundamenta a classificação das formações de cobertura ribeirinhas como terreno tipo D.

No Complexo Vulcânico de Lisboa foram analisados dois locais: o primeiro (Ajuda) apresenta um aterro superficial com cerca de 11 m de espessura (Figura 8B), e no segundo (Restelo) existe apenas um pequeno aterro (0,5 m) não significativo (Figura 8C). A primeira curva apresenta um pico na frequência de 6,06 Hz, associado ao aterro superficial, estimando-se para o valor da velocidade da onda S 259 m/s (1). Considerando a segunda curva, esta não apresenta nenhum pico evidente, o que é característico de um terreno tipo A [12]. Verificou-se com estes ensaios que a existência de uma formação superficial sobre um terreno tipo A pode convertê-lo em terreno tipo B, o que justifica a atribuição do terreno tipo AB ao Complexo Vulcânico de Lisboa e Formação da Bica.

4.4 Carta de zonamento sísmico dos terrenos da cidade de Lisboa

Consideraram-se as classes de terreno tipo definidas no EC8 – A, B, C, D e E – acrescidas de duas classes de terreno intermédias – AB e BC – conforme fundamentação apresentada nas secções anteriores. Contudo, não foi atribuída a nenhuma zona/formação a classe

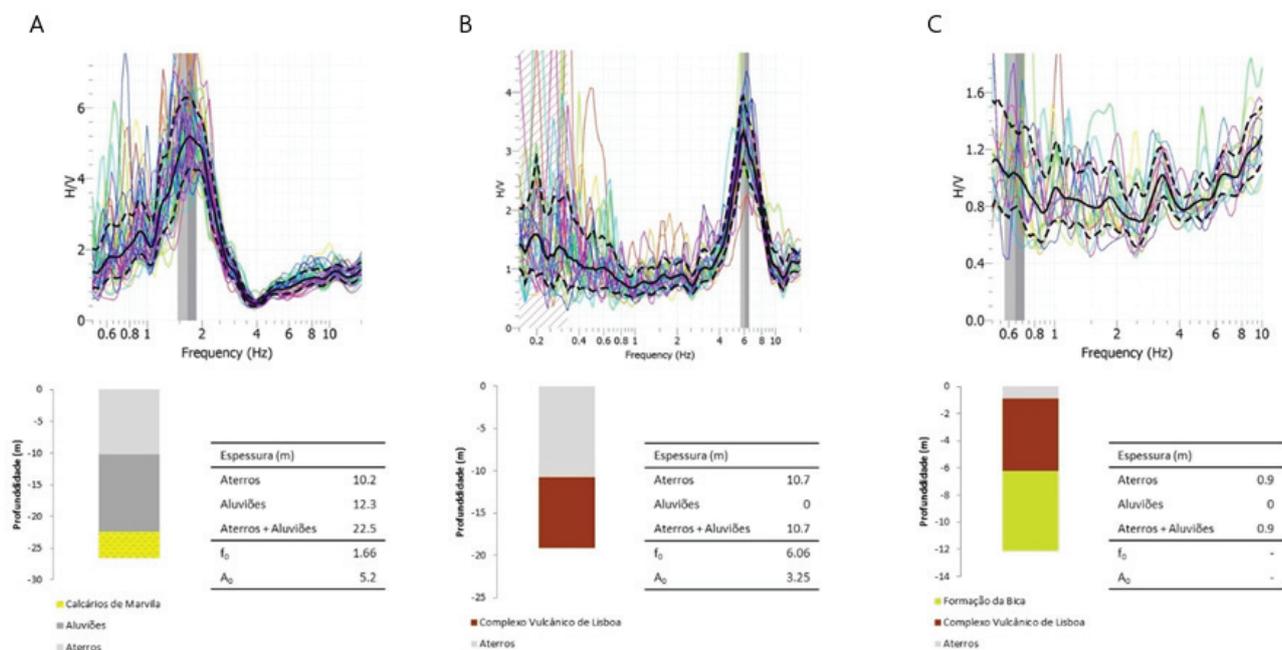


Figura 8 Curvas H/V obtidas a partir da análise de medidas de vibrações ambientais: A – Parque das Nações; B – Ajuda; C – Restelo

de terreno tipo A pois, como já foi anteriormente referido, não é adequado realizar sondagens e ensaios SPT neste tipo de terreno e, com a metodologia utilizada, não foi possível identificar zonas com terreno tipo A, tendo-se optado pela classe AB.

As sondagens que apresentam terreno tipo E são escassas – 65 num universo de 8181 sondagens. Não é possível definir uma mancha correspondente a este terreno tipo, pelo que esta é assinalada pontualmente de modo a alertar para a possível existência de um tipo de terreno diferente. Para classificar as aluviões e/ou aterros tomou-se em consideração a sua espessura: as formações de cobertura ribeirinhas de maior espessura (Parque das Nações, Baixa e Alcântara) foram classificadas como terreno tipo D; as restantes, com menor espessura, e as formações de cobertura interiores foram classificadas como terreno tipo C.

Assim, foi possível elaborar o zonamento sísmico da cidade de Lisboa recorrendo à delimitação geoespacial das formações geológicas, apresentada na Figura 9, bem como as formações de cobertura que não estão cartografadas na carta geológica 1:10 000 e que possuem espessuras superiores a 10 m. É importante salientar que esta carta representa o zonamento sísmico dos terrenos à escala do concelho de Lisboa, pelo que poderão existir situações onde os terrenos tipo são diferentes dos cartografados. Sempre que se pretenda uma caracterização local, deverá realizar-se prospeção geotécnica e consultar outra informação geotécnica relevante.

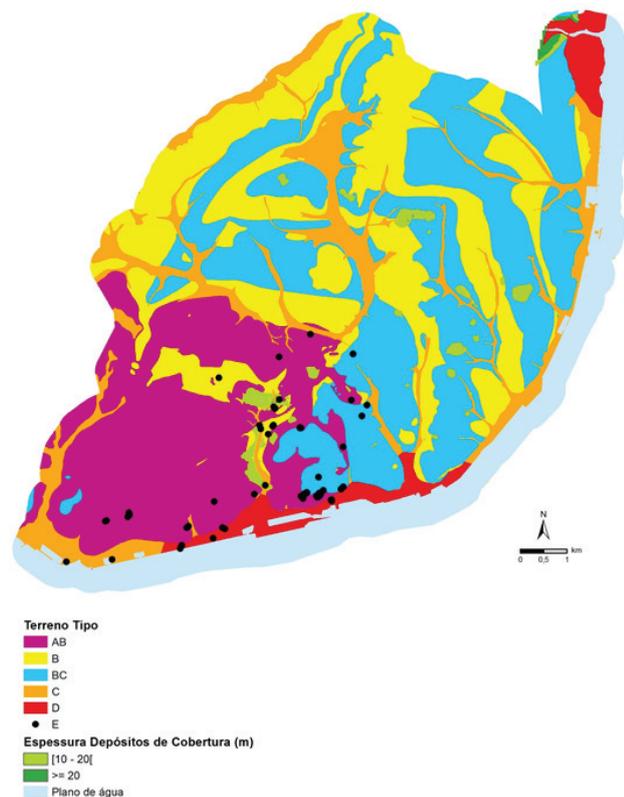


Figura 9 Carta de zonamento sísmico dos terrenos do concelho de Lisboa

5 Conclusões e considerações finais

Neste trabalho elaborou-se o zonamento sísmico dos terrenos da cidade de Lisboa nas classes definidas no EC8 acrescidas de duas classes de terreno intermédias – AB e BC. Este zonamento foi realizado tomando por base o parâmetro NSPT30 obtido a partir da análise da base de dados geotécnicos da CML. A escolha deste parâmetro permitiu implementar um método expedito de cálculo que leva à definição do terreno tipo, tendo em conta os constrangimentos a que o desenvolvimento deste trabalho estava sujeito.

Este trabalho consistiu na primeira exploração alargada da BDG na área de todo o município e a sua consulta permitiu identificar alguns erros e lacunas que estão a ser corrigidos de forma a melhorar a sua qualidade e aplicação em trabalhos futuros. A utilização da informação contida na BDG apresenta algumas fragilidades, devido a esta ser composta por dados não reproduzíveis, adquiridos ao longo de vários anos por diferentes empresas, mas, em contrapartida, o grande volume de dados disponível constitui o seu ponto forte. Os resultados obtidos basearam-se, sobretudo, nos resultados de ensaios SPT contidos na BDG e na informação geológica disponível que, recorde-se, apresentam diversas limitações:

- A distribuição espacial das sondagens geotécnicas utilizadas é muito heterogénea, havendo zonas com uma elevada concentração de sondagens e zonas onde não existem sondagens.
- A profundidade máxima atingida nas sondagens é, em geral, inferior aos 30 m preconizados na classificação dos terrenos tipo do Eurocódigo 8.
- O conjunto das 8792 sondagens geotécnicas utilizadas foi realizado entre 1935 e 2016 por diversas empresas, tendo os seus resultados sido tratados de igual modo. Além disso, parte da informação contida nestas sondagens pode já estar desatualizada, sobretudo no que respeita às formações superficiais [7].
- A carta geológica do concelho de Lisboa utilizada data de 1986 [2] e foi baseada em levantamentos de campo realizados na maior parte dos casos no final do século XIX e em sondagens anteriores aos anos 80. Tendo em conta as modificações de urbanização efetuadas no concelho é provável que parte da informação da carta geológica já esteja desatualizada, sobretudo relativamente às formações superficiais.
- Os valores estimados de NSPT30 vêm afetados de uma incerteza impossível de quantificar, devida a todas as opções tomadas de modo a contornar as diferentes dificuldades que surgiram.

Devido a estas limitações salienta-se que o zonamento sísmico apresentado (Figura 9) identifica apenas a classe de terreno predominante numa determinada zona. A análise e/ou qualquer utilização da carta de zonamento deve ter em conta estes constrangimentos. É fundamental dar continuidade a este trabalho, prosseguindo com a compilação de dados de sondagens e a realização de ensaios geofísicos.

Agradecimentos

Esta comunicação foi apoiada pelo projeto FCT – UID/GEO/50019/2019 – Instituto Dom Luiz e pelo Centro Europeu de Riscos Urbanos (CERU).

Referências

- [1] IPQ – Eurocódigo 8: Projectos de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, NP EN 1998-1. Instituto Português da Qualidade, 230 p., 2010.
- [2] Moitinho de Almeida, F. – *Carta Geológica do Concelho de Lisboa 1:10 000*. Serviços geológicos de Portugal, 9 p., 1986.
- [3] Almeida *et al.* – "GeoSIS_Lx a Geoscientific Information System for Lisbon Geotechnical Data Management", *IAEG Congress, Geologically Active*, New Zealand. Ed. por Williams *et al.*, Taylor & Francis Group, London, p. 1611–1618, 2010.
- [4] Vasconcelos, M.; Marques, F. – "Cartografia tridimensional de aterros e escavações no concelho de Lisboa", *VIII Congresso Nacional de Geologia, Braga*. e-Terra, Vol. 22, no. 15, 4 p., 2010.
- [5] Vasconcelos, M. – *Cartografia de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente em contexto urbano: o concelho de Lisboa*. Dissertação de Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 232 p., 2011.
- [6] Almeida, I. M. – *Características Geotécnicas dos Solos de Lisboa*. Tese de Doutoramento em Geologia, na especialidade de Geotecnia. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 391 p., 1991.
- [7] Dias, P. – *Elaboração de uma Carta de Aterros da Cidade de Lisboa por LiDAR e Fotogrametria Aérea*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geográfica. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 134 p., 2013.
- [8] Teves-Costa *et al.* – "Geotechnical characterization and seismic response of shallow geological formations in downtown Lisbon", *Annals of Geophysics*, Vol. 57, no. 4, 24 p, 2014, DOI: 10.4401/ag-6390.
- [9] Teves-Costa *et al.* – "Identificação e caracterização dos solos tipo. Mapa de microzonamento das formações superficiais". Relatório IE14/IE15, Projecto LISBOA-02-3207-FEDER-000044: *Avaliação de Riscos Naturais e Tecnológicos na Cidade de Lisboa*, FFCUL, Lisboa, 2011.
- [10] Nakamura, Y. – "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface", *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, Tokyo, 30, p. 25–33, 1989.
- [11] Ptilakis *et al.* – "New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database", *Bull Earthquake Eng.*, Vol. 11, p. 925–966, 2013, DOI: 10.1007/s10518-013-9429-4.
- [12] SESAME WP12 – *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations - Measurements, Processing, and Interpretation*. SESAME European Research Project, Deliverable D23.12., Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, 62 p., 2004.