

# **CAMPO EXPERIMENTAL LIQUEFACT NA REGIÃO DA GRANDE LISBOA: MICROZONAMENTO PRELIMINAR DE SUSCETIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO**

## **LIQUEFACT PILOT SITE AT THE GREATER LISBON AREA: PRELIMINARY MICROZONATION OF LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY**

Viana da Fonseca, António; *CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, viana@fe.up.pt*

Ramos, Catarina; *CONSTRUCT-GEO, FEUP, Porto, Portugal, catarinacorreiramos@gmail.com*

Ferreira, Cristiana; *CONSTRUCT-GEO, FEUP, Porto, Portugal, cristiana@fe.up.pt*

Saldanha, Ana Sofia; *FEUP, Porto, Portugal, sofiasaldanha.ss@gmail.com*

### **RESUMO**

A liquefação induzida por sismos é um assunto com grande relevância e atualidade, uma vez que pode ser a causa de grandes danos estruturais e de perdas económicas e humanas, decorrentes de um evento sísmico. Enquadrada no projeto europeu H2020 LIQUEFACT, foi escolhida uma área para o primeiro campo experimental piloto que se situa na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira, localizada na região da Grande Lisboa. Uma vasta quantidade de informação, dados históricos e relatórios geológico-geotécnicos foi recolhida com o objetivo de caracterizar a zona de estudo, nomeadamente em termos da suscetibilidade à liquefação. Os dados recolhidos foram complementados com uma extensa campanha de ensaios de campo realizados no âmbito do projeto, incluindo a recolha de amostras indeformadas para posterior estudo e caracterização em laboratório. Os ensaios de campo incluíram ensaios de penetração dinâmica (SPT), ensaios com o piezocone penetrómetro (CPTu), ensaios com o dilatómetro Marchetti com medição da velocidade das ondas sísmicas (SDMT) e ensaios geofísicos, nomeadamente ensaios de refração sísmica e HVSR. A análise cuidada de todos estes ensaios e dos seus resultados, utilizando os métodos mais recentes para avaliação da suscetibilidade à liquefação permitiu a definição de um microzonamento preliminar da zona em relação ao seu potencial de liquefação, baseado no Fator de Segurança ( $FS_{liq}$ ), Índice Potencial de Liquefação (LPI) e Número de Severidade de Liquefação (LSN). O presente trabalho pretende apresentar esse microzonamento preliminar, bem como um sumário dos objetivos e contributos do projeto para a evolução do estudo da liquefação em Portugal.

### **ABSTRACT**

Earthquake-induced liquefaction is a subject of great relevance since it can be the cause of great structural damage, economic and human losses, resulting from a seismic event. As part of the European project H2020 LIQUEFACT, an area was selected for the first experimental pilot field located in the Lezíria Grande of Vila Franca de Xira, located in the region of Greater Lisbon. A vast amount of information, historical data and geological-geotechnical reports were collected in order to characterize the studied area, namely in terms of the susceptibility to liquefaction. The data collected was complemented by an extensive field testing campaign carried out under the project, including the collection of undisturbed samples for further study and characterization in the laboratory. The in situ tests included standard penetration tests (SPT), piezocone penetrometer (CPTu) tests, Marchetti dilatometer tests with seismic velocity measurement (SDMT) and geophysical tests, including seismic refraction and HVSR tests. The careful analysis of all these tests and their results, using the most recent methods to evaluate the susceptibility to liquefaction, allowed the definition of a preliminary microzoning of the area in relation to its liquefaction potential, based on the Factor of Safety against liquefaction ( $FS_{liq}$ ), Liquefaction Potential Index (LPI) and Liquefaction Severity Number (LSN). The present work intends to present this preliminary microzoning, as well as a summary of the objectives and contributions of the project to the evolution of the study of liquefaction in Portugal.

### **1 - ENQUADRAMENTO**

A história regista, ao longo dos séculos, casos de rotura catastrófica de maciços fundamentalmente arenosos, com consideráveis prejuízos económicos, perdas de vida humanas e danos no ambiente, causados por desastres de liquefação dos solos em caso de ocorrência de sismo, geralmente conhecidos como EILDs (*Earthquake Induced Liquefaction Disasters*) (Liquefact.eu, 2016). Com o objetivo de mitigar os danos provocados pela liquefação, a engenharia civil e, mais especificamente, a geotecnia tem procurado estudar este processo físico, principalmente nas proximidades de zonas povoadas e/ou de serviços que garantem a resiliência das comunidades nas zonas afetadas, como hospitais, bombeiros e outros edifícios de serviços públicos.

O projeto LIQUEFACT, financiado pela UE no âmbito da chamada H2020 - DRS 2015 (*Research Innovation Action*), aborda a mitigação de riscos para eventos EILD nas comunidades europeias com uma abordagem holística. O projeto trata não só da resistência das estruturas, mas também da resiliência da comunidade em relação à sua capacidade e velocidade de recuperação em caso de ocorrência de EILDs.

O projeto LIQUEFACT pretende desenvolver uma visão abrangente dos EILDs e das aplicações de técnicas de mitigação (disponíveis ou atualmente em desenvolvimento) que podem ser implementadas dentro de uma região vulnerável de modo a salvaguardar as estruturas e os ativos físicos desses efeitos, nomeadamente: estabelecer uma proposta de avaliação e melhoria de Risco/Resiliência a EILDs; desenvolver um sistema de informação geográfica (GIS) europeu com mapa de risco de liquefação; desenvolver novas metodologias simplificadas para a avaliação da vulnerabilidade de estruturas e infraestruturas face a estes danos, estabelecendo diretrizes para protocolos de caracterização e avaliação de risco de liquefação e da realização de análises de fragilidade à liquefação; identificar os modelos de vulnerabilidade, de resistência, resiliência e capacidade adaptativa mais adequados e aplicáveis transversalmente nas diferentes regiões da Europa; desenvolver e integrar o conhecimento e as metodologias num Guia de Referência LIQUEFACT (GRL) e validar a proposta de GRL através de simulações por retroanálise de eventos de liquefação sísmica recentes (Christchurch, Nova Zelândia em 2011, Japão em 2011 e Emilia Romagna, Itália em 2012).

Com base nos registos de sismos passados, Cabral et al. (2011) descreveram a zona inferior do vale do rio Tejo como uma área que tem sido gravemente afetada, ao longo da história, por diversos sismos que causaram grandes danos e fatalidades. A sismicidade da zona compreende vários eventos, distantes no tempo entre si, como o de 1755, com uma magnitude superior a 8,5, gerado na zona fronteiriça da placa *Eurasia - Nubia*, e os terramotos locais intraplacas com magnitudes compreendidas entre 6 a 7, como sejam os terramotos de 1344, 1531, 1769 e 1909. No Quadro 1 são apresentados alguns exemplos de sismos e respetiva informação.

Quadro 1 - Fontes sismogenéticas da região de Lisboa (Ribeiro, 1998)

Sismicidade	Estrutura ativa	Magnitude Máxima Observada	Magnitude Máxima Expectável	Período de Retorno (anos)	Distância a Lisboa (km)
Interplacas	Goringe	ML=7,5 (1969)	ML > 8,1	> 2x10 <sup>2</sup>	350
	Zona de subducção Oeste-Ibérica	ML=7,2 (1858)	ML > 7,5	> 102	>120
	Rotura no Goringe e zona de subducção Oeste-Ibérica	ML=8,5-9 (1755)	ML > 8,5-9	> 103	>120
Intraplacas	Vale Inferior do Tejo	ML=6,7 (1909)	ML > 7,2	> 3,5x10 <sup>2</sup>	5-40
	Gargalo do Tejo	ML=3 (1531)	ML > 6,5	> 104	1

Jorge (1993) reuniu relatos que indicassem a ocorrência de liquefação no passado, comparando com a localização relativa dos depósitos holocénicos arenosos, tendo depois sobreposto os mapas de oportunidade de liquefação, com o objetivo de construir um zonamento do potencial de liquefação. Com base nesse zonamento e atendendo às zonas nele definidas como mais suscetíveis, foi feita a recolha e compilação de relatórios geológicos e geotécnicos existentes nas zonas críticas.

Com o intuito de complementar a informação recolhida pelos mapas geológicos, foi necessário consultar diversos grupos de interesse das zonas mais suscetíveis, como municípios, outras entidades públicas e empresas privadas para obter maior número de informação para a base de dados. A base de dados para além de sustentar a escolha de um sítio piloto, complementa também informação para o microzonamento de risco de liquefação induzida por sismos.

Conseguiu-se um grande número de relatórios de prospeção geológica e geotécnica, que permitiram construir um mapa resumo de dados existentes com mais de 270 pontos no total, na sua maioria sondagens com ensaios de penetração dinâmica (SPT), mas também ensaios de cone ou piezocone penetrómetro (CPT ou CPTu) e ensaios sísmicos entre furos, do tipo cross-hole (CH). O Quadro 2 contém um resumo do tipo e número de ensaios de campo recolhidos na pesquisa bibliográfica e respetiva percentagem em relação ao total de ensaios existentes nos relatórios consultados.

Quadro 2 - Quadro resumo dos ensaios nos relatórios recolhidos

Tipo de ensaio	Número de ensaios	Porcentagem	Símbolo de georreferenciação
SPT	229	84%	📍
CPT ou CPTu	29	11%	📍
Cross-hole	15	5%	📍

A análise destes dados foi realizada com base nas metodologias mais recentes para avaliação da suscetibilidade à liquefação, de acordo com a abordagem simplificada através do cálculo do Fator de Segurança à liquefação ( $FS_{liq}$ ). Atendendo ao objetivo do microzonamento, toda a informação foi devidamente georreferenciada, usando o software Google Earth®.

É de relevar que, no contexto desta investigação, a avaliação da suscetibilidade à liquefação induzida por sismos de um determinado local inclui não só a avaliação do potencial de liquefação do solo (através dos critérios geológicos, granulométrico, de estado, entre outros), mas também a avaliação do potencial de início de liquefação ou *liquefaction triggering* associado a uma determinada ação sísmica (correspondendo à determinação de um fator de segurança ou de uma probabilidade de liquefação).

## 2 - MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO

### 2.1 - Avaliação baseada em fatores de segurança

#### 2.1.1 - Avaliação baseada em ensaios SPT

Uma das propostas mais recentes é de Boulanger e Idriss (2014), que considera o cálculo do CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) a partir de valores normalizados do número de pancadas do SPT,  $N_{60}$ . Um aspeto importante, introduzido por estes autores na análise da suscetibilidade à liquefação, prende-se com a percentagem de finos que um solo contém e a forma como esta percentagem pode influenciar o seu comportamento quando sujeito a ações sísmicas. Assim, a normalização dos resultados do ensaio SPT inclui, para além da correção exigida devido à perda de energia transmitida em profundidade, uma correção relativa à percentagem de finos ( $FC$ , *finer content*) para a obtenção de  $N_{60}$  corrigido "equivalente",  $(N_1)_{60cs}$ . A respetiva expressão de cálculo do CRR é a seguinte:

$$CRR_{7,5} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14,1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23,6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25,4}\right)^4 - 2,8\right) \quad [1]$$

Onde  $(N_1)_{60cs}$  é a resistência à penetração do ensaio SPT,  $N_{60}$ , normalizada e ajustada a uma areia limpa equivalente (isto é, com uma percentagem de finos igual ou inferior a 5%) e pode ser calculado da seguinte forma:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad [2]$$

Com

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1,63 + \frac{9,7}{FC + 0,01} - \left(\frac{15,7}{FC + 0,01}\right)^2\right) \quad [3]$$

O cálculo de  $(N_1)_{60}$  é feito da forma clássica (Liao e Whitman, 1986; Idriss e Boulanger, 2010), atendendo às correções do estado de tensão de repouso e do comprimento das varas. A introdução da percentagem de finos nesta abordagem pretende refletir a sua importância na suscetibilidade de liquefação, sendo que os valores de  $\Delta(N_1)_{60}$  variam entre 0 para  $FC$  igual a 0%, crescendo rapidamente para o valor máximo de 5, para  $FC$  superiores a 25%. Uma das limitações desta correção prende-se com a estimativa rigorosa da percentagem de finos a partir da descrição litológica do ensaio, na ausência de análises granulométricas desses solos.

Atendendo a que a magnitude de referência do sismo,  $M_w$ , de acordo com o Eurocódigo 8, no Anexo Nacional, é de 7,5, é necessário ajustar o valor de CRR para diferentes magnitudes, multiplicando-se o valor de  $CRR_{7,5}$  pelos fatores de escala de magnitude  $MSF$  (*Magnitude Scaling Factor*) e do estado de tensão  $K_\sigma$ , com as seguintes expressões (Idriss e Boulanger, 2008):

$$CRR_M = CRR_{7,5} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad [4]$$

$$MSF = 6,9 \exp\left(-\frac{M_w}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8 \text{ em areias} \quad [5]$$

$$MSF = 1,12 \exp\left(-\frac{M_w}{4}\right) + 0,828 \leq 1,13 \text{ em argilas} \quad [6]$$

No cálculo do MSF, a distinção entre areias e argilas foi feita com base na percentagem de finos abaixo ou acima de 50% de finos, respetivamente. O fator de escala do estado de tensão  $K_\sigma$  depende não apenas do estado de tensão em profundidade, mas também do valor da resistência à penetração normalizada equivalente,  $(N_1)_{60cs}$ .

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{p_a}\right) \leq 1,1, \text{ com } C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 2,55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0,3 \quad [7]$$

### 2.1.2 - Avaliação baseada em ensaios CPTu

Para a análise dos ensaios CPTu, foi seguido um processo análogo, isto é, o CRR foi calculado a partir dos resultados de resistência do ensaio. Neste caso, atendendo à densidade computacional dos cálculos envolvidos, optou-se pelo uso de um *software* específico, designadamente o CLiq® (versão v.2.0.6.92, GeoLogismiki, 2017). A utilização deste programa, cuidadosamente validada com cálculos paralelos em folhas de cálculo, proporcionou uma maior celeridade na análise e permitiu efetuar análises expeditas e comparativas da suscetibilidade à liquefação com base nos ensaios CPTu segundo abordagens distintas, entre elas as propostas por Robertson (2009) e Boulanger e Idriss (2014). O procedimento associado ao tratamento dos resultados dos ensaios CPTu segundo Robertson (2009) encontra-se detalhado em Saldanha (2017). No âmbito deste trabalho, será apenas abordada a metodologia de Boulanger e Idriss (2014).

A fórmula proposta por Boulanger e Idriss (2014) para o cálculo do CRR envolve a resistência de ponta do cone normalizada correspondente a uma areia limpa equivalente e encontra-se na equação [8].

$$CRR_{7.5} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.8\right) \quad [8]$$

A resistência de ponta do cone normalizada para areia limpa equivalente é calculada de maneira análoga à do SPT, de acordo com a equação [9], e envolve um processo iterativo complexo, em que  $\Delta q_{c1N}$  reflete a influência da percentagem de finos na resistência à liquefação.

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad [9]$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left(1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right) \quad [10]$$

O valor de  $q_{c1N}$  depende de um fator que tem em consideração a tensão de confinamento,  $C_N$ , a pressão atmosférica,  $p_a$ , e a resistência de ponta do cone corrigida,  $q_{t,r}$ , e é obtido pelo processo iterativo que envolve as equações seguintes:

$$q_{c1N} = C_N \frac{q_t}{p_a} \quad [11]$$

$$C_N = \left(\frac{100}{\sigma'_{v0}}\right)^m \leq 1.7 \quad [12]$$

$$m = 1.338 - 0.249(q_{c1Ncs})^{0.264} \quad [13]$$

A percentagem de finos (FC) é determinada com base no índice de comportamento ( $I_c$ ) calculado segundo a proposta clássica de Robertson e Wride (1998), em que  $C_{FC}$  é considerado igual a zero uma vez que informação específica do local não está disponível para estimar o seu valor correto.

$$FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137 \quad [14]$$

O procedimento de tratamento de resultados dos ensaios CPTu para avaliação da suscetibilidade à liquefação encontra-se detalhado em Boulanger e Idriss (2014).

### 2.1.3 - Análise baseada nas velocidades de propagação das ondas de corte, $V_s$

Andrus e Stokoe (2000) e Andrus et al. (2003) desenvolveram uma metodologia para avaliação da resistência à liquefação que se baseia nos valores normalizados da velocidade de propagação das ondas de corte. À semelhança dos outros métodos, este requer a determinação dos dois parâmetros de ação-reação: o primeiro correspondente ao nível de carga cíclica a que o solo é sujeito durante a solitação sísmica,

expressa pela razão de tensões cíclicas (CSR); e um segundo, relativo à resistência do solo à liquefação, expressa pela razão de resistência cíclica (CRR), que neste caso é função da rigidez do solo para muito baixas deformações, sendo que tem uma relação direta com a velocidade de onda de corte normalizada do estado de tensão efetivo presente ( $V_{S1}$ ). A normalização da velocidade de onda de corte em relação às tensões efetivas *in situ*, à semelhança dos valores normalizados inferidos de outros ensaios *in situ* como o SPT, CPT e DMT, pode fazer-se segundo Andrus e Stoke (2000) e Andrus et al. (2003) da seguinte forma:

$$V_{S1} = V_S \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,25} \quad [15]$$

Onde  $V_S$  é a velocidade da onda de corte,  $p_a$  é a pressão atmosférica (=100 kPa) e  $\sigma'_{v0}$  é a tensão vertical efetiva de repouso (nas mesmas unidades de  $p_a$ ).

A razão de resistência cíclica (CRR) pode ser considerada como o valor limite que separa os estados definidos por um determinado valor de  $V_{S1}$  em que há suscetibilidade à liquefação, dos estados onde tal não se verifica. A base de dados relativa aos casos históricos refere-se a solos não cimentados do Holocénico, para profundidades médias inferiores a 10 m, com níveis freáticos a profundidades entre 0,5 m e 6 m, e medições de  $V_S$  realizadas abaixo do nível freático. As curvas CRR- $V_{S1}$  foram definidos com base na seguinte expressão:

$$CRR = \left[ 0,022 \cdot \left( \frac{K_{a1} V_{S1}}{100} \right)^2 + 2,8 \cdot \left( \frac{1}{V_{S1}^* - K_{a1} V_{S1}} - \frac{1}{V_{S1}^*} \right) \right] \cdot K_{a2} \quad [16]$$

Onde  $K_{a1}$  e  $K_{a2}$  são fatores corretivos do efeito da idade em  $V_S$  e CRR, respetivamente, e iguais à unidade no caso de solos não cimentados recentes.  $V_{S1}^*$  é o limite superior de  $V_{S1}$  para que ocorra liquefação. O valor de  $V_S$  igual a 210 m/s conduz a um valor de CRR de aproximadamente 0,6, o que é considerado equivalente a um valor de  $N_{SPT}$  de 30 em areias limpas. Baseados nas correlações de  $N_{SPT}$  com  $V_S$  e nos casos históricos, Andrus e Stokoe (2000) propuseram valores limites de  $V_{S1}$  (que designaram por  $V_{S1}^*$ ), a partir dos quais não se espera a ocorrência de liquefação. Assim, para um teor de finos (FC) inferior a 5%,  $V_{S1}^* = 215$  m/s, para FC maior que 35%,  $V_{S1}^* = 200$  m/s e entre estes valores, determina-se através desta expressão:  $V_{S1}^* = 215 - 0,5 \cdot (FC - 5)$ .

## 2.2 - Índices de Risco

As novas abordagens à avaliação da liquefação centram-se na estimativa das consequências do próprio processo de liquefação, através de índices quantitativos de risco de liquefação, simplificadaamente designados "índices de risco". A primeira análise irá focar-se em dois dos índices, no entender dos autores, mais importantes para a definição da avaliação da liquefação. São estes índices o LPI (*Liquefaction Potential Index*) e o LSN (*Liquefaction Severity Number*). O Índice de Potencial de Liquefação (LPI) foi originalmente desenvolvido no Japão, para estimar o potencial de liquefação capaz de causar danos nas fundações de um determinado local (Iwasaki et al., 1978, 1982). Este índice assume que a severidade do fenómeno é proporcional à espessura da camada liquefeita e à sua proximidade ao terreno, considerando apenas os horizontes com fator de segurança menor que 1 e profundidades inferiores a 20 m (Viana da Fonseca et al., 2016).

$$LPI = \int_0^{20m} F \cdot W(z) dz \quad [17]$$

Sendo  $W(z) = 10 - 0,5z$  e  $F$  uma função do fator de segurança à liquefação,  $FS_{liq}$ , resultado da razão entre CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) e CSR (*Cyclic Stress Ratio*), definida por:  $F = 1 - FS_{liq}$ , se  $FS_{liq} \leq 1$  e  $F=0$ , se  $FS_{liq} > 1$ .

O Número de Severidade de Liquefação (LSN), desenvolvido por Tonkin e Taylor (2013), representa os danos potenciais de liquefação à superfície em terrenos com edifícios e considera a deformação volumétrica densificada, calculada pela ponderação da profundidade como um sinal indicador da gravidade dos danos de liquefação prováveis na superfície do terreno (Viana da Fonseca et al., 2016). O cálculo deste índice é feito de acordo com a equação [18]:

$$LSN = 1000 \cdot \int \frac{\epsilon_v}{z} dz \quad [18]$$

Onde  $\epsilon_v$  é a deformação volumétrica densificada calculada por horizonte;  $z$  é a profundidade do mesmo abaixo da superfície do terreno (em metros). O cálculo da deformação volumétrica densificada foi feita

segundo a metodologia de Zhang et al. (2002), na determinação de assentamentos pós liquefação por reconsolidação. Os limites de classificação deste índice constam Quadro 3. Os autores concluíram que este parâmetro é um bom indicador da suscetibilidade à liquefação em zonas residenciais planas e confinadas, sendo que o mesmo não se verifica quanto à suscetibilidade de deslocamentos laterais.

Quadro 3 - Classificação da suscetibilidade à liquefação segundo o LPI (Sonmez, 2003) e LSN (Tokin e Taylor, 2013)

Índice de Risco	Baixo	Intermédio	Alto
LPI	LPI<5	5<LPI<15	LPI>15
LSN	LSN<20	20<LSN<40	LSN<40

### 3 - CAMPO EXPERIMENTAL LIQUEFACT

#### 3.1 - Descrição e plano de trabalhos

Da análise dos dados existentes, comprovando os estudos bibliográficos prévios, a zona sul do rio do Tejo, incluindo Vila Franca de Xira e Benavente mostraram ser zonas com suscetibilidade à liquefação. O sítio piloto foi definido na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira, que é uma faixa de terreno de forma alongada, limitada a Oeste e a Este pelos rios Tejo e Sorraia, respetivamente. Trata-se de uma extensa planície aluvionar com mais de 13 hectares, dividida a meio pela Estrada Nacional nº10, também conhecida como a Reta do Cabo, gerida pela Associação dos Beneficiários da Lezíria Grande de Vila Franca de Xira (ABLGVFX). O planeamento dos locais de ensaio foi realizado segundo uma análise criteriosa sobre a evolução da geologia do local (Figura 1). A extensa campanha experimental realizada está descrita no Quadro 4.

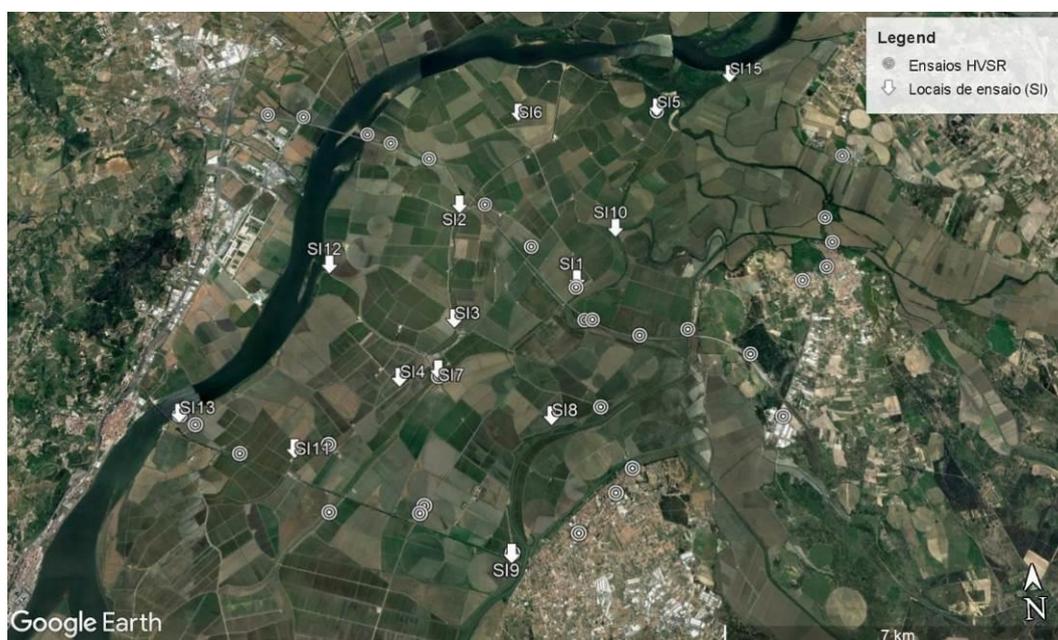


Figura 1 – Localização dos locais de ensaio

Quadro 4 - Planeamento dos ensaios *in situ* no sítio piloto

Ensaios	SI1	SI2	SI3	SI4	SI5	SI6	SI7	SI8	SI9	SI10	SI11	SI12	SI13	Total
SPT	X						X							2
CPTu	X	X	X	X	X	X	X			X		X	X	10
SDMT							X	X	X					3
RS	X				X	X	X		X		X	X	X	8
SASW					X									1

No sítio piloto foram realizados 4 furos de sondagem nos locais de ensaio SI1 e SI7. Em cada um destes locais foi realizado um ensaio SPT, tendo-se recolhido amostras indeformadas com o amostrador *Mazier* num furo adjacente, para caracterização laboratorial. Complementarmente, foram realizados 8 ensaios CPTu.

A campanha experimental contou adicionalmente com 4 ensaios SDMT (*Seismic Flat Dilatometer tests*) realizados de acordo com o prescrito no Eurocódigo 7 – Parte 3 (CEN, 2007) e a norma ISO/TS 22476-11 (ISO, 2005). O dilatómetro sísmico (SDMT) resulta do acoplamento ao DMT de um módulo sísmico, localizado acima da lâmina de DMT, permitindo assim a medição das velocidades das ondas de corte durante o ensaio DMT convencional.

Como suplemento aos ensaios geomecânicos descritos, foram realizados inúmeros ensaios geofísicos, como ensaios de refração sísmica (RS), SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*) e HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Os ensaios por refração sísmica são bastante utilizados quando se pretende prospectar profundidades nas dezenas dos metros, tal como neste projeto, tendo sido realizados por uma equipa do LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia). O ensaio de Análise Espectral de Ondas Superficiais (SASW), realizado apenas no local SI5, permite a avaliação das propriedades dinâmicas do solo, ou seja, a determinação das velocidades das ondas de corte e do amortecimento através da medição do carácter dispersivo das ondas superficiais. Por fim, foram realizados 25 ensaios de medição de ruído ambiente, designados por HVSR. Este ensaio, originalmente proposto por Nakamura (1989), pode ser descrito como um levantamento sísmico não-invasivo, recorrendo um sensor de velocidades tridimensional externo para registar o ruído ambiente. A determinação da razão espectral horizontal para vertical (H/V) dessas medições do ruído ambiente permite a determinação da frequência fundamental do terreno, que pode ser interpretada por regressão para estimar a profundidade do terreno firme (*bedrock*) sísmico.

### 3.2 - Resultados

Os resultados dos ensaios realizados nos locais SI1 e SI7 estão apresentados nas Figura 2 e Figura 3, por serem os exemplos mais completos devido à grande diversidade de ensaios.

Pela análise destes CPTu, pode concluir-se que nestes locais de ensaio do sítio piloto evidenciam uma grande variabilidade das características geológicas e geotécnicas não só em planta, mas principalmente em profundidade, destacando-se, por exemplo, o CPTu do local SI1 com uma litologia altamente intercalada de materiais mais grosseiros e mais finos (Figura 2). No local SI7 (Figura 3) verifica-se claramente um estrato de espessura considerável de areia, entre os 6 e os 14 metros.

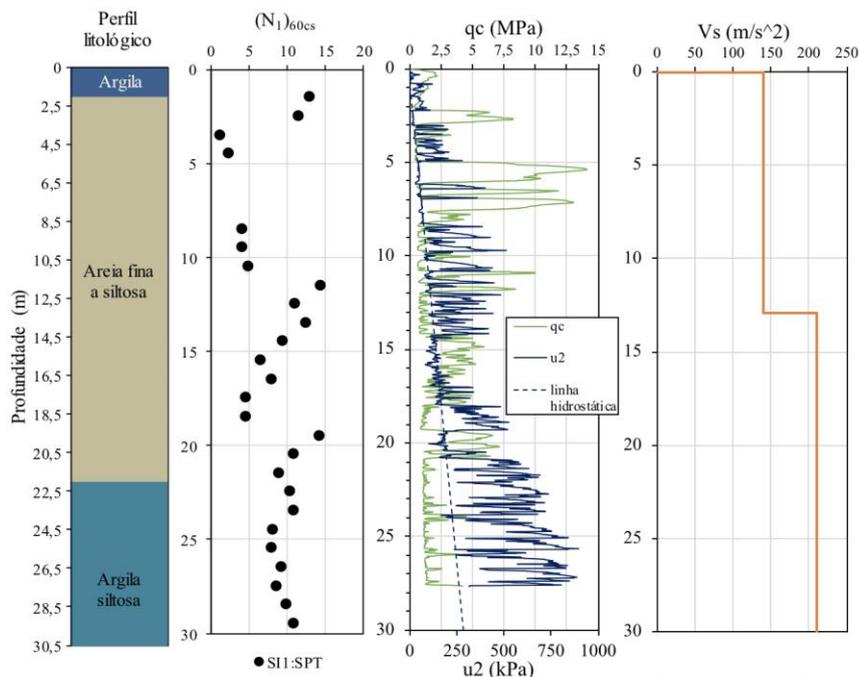


Figura 2 – Resultados dos ensaios geomecânicos e geofísicos realizados no SI1

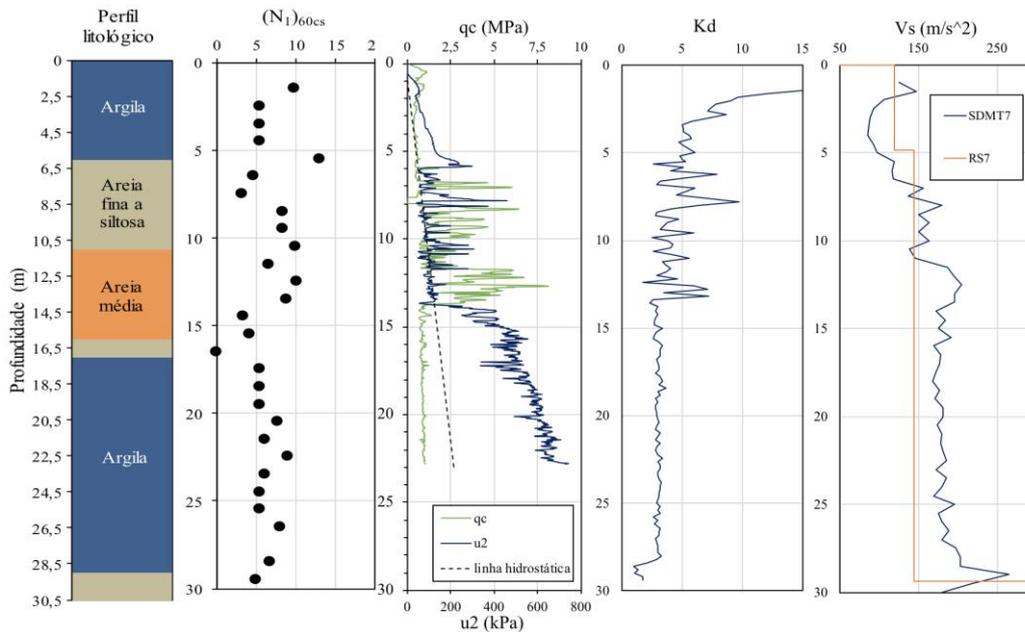


Figura 3 – Resultados dos ensaios geotécnicos e geofísicos realizados no SI7

#### 4 - MICROZONAMENTO PRELIMINAR

##### 4.1 - Avaliação da suscetibilidade à liquefação pelo fator de segurança

A análise comparativa dos resultados dos ensaios SPT e CPTu em SI1 e SI7, apresentada resumidamente na Figura 4, demonstra de forma clara a elevada suscetibilidade de liquefação, tanto para a ação sísmica próxima (Tipo 2), mas mais gravosamente para a mais distante (Tipo 1). No âmbito deste trabalho, considera-se o solo suscetível à liquefação para valores de  $FS_{liq}$  inferiores à unidade.

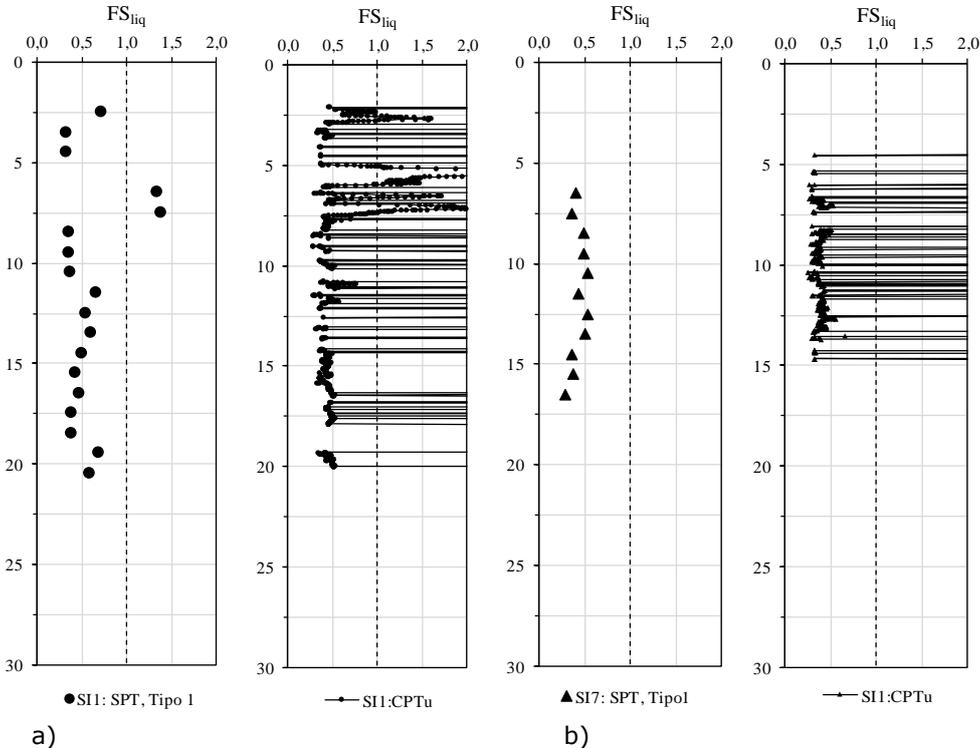


Figura 4 – Comparação dos fatores de segurança determinados pelos ensaios SPT e CPTu no local: a)SI1;b)SI7

É de assinalar, por um lado, a grande espessura dos horizontes identificados como suscetíveis à liquefação e, por outro, a boa correspondência obtida entre estes ensaios. A configuração dos perfis de FS baseados no CPTu surge com uma grande oscilação entre valores inferiores a 1 e superiores a 2, que se explica pela forte intercalação de camadas finas de material silto-argiloso na matriz arenosa. Dada a reduzida espessura dessas camadas, estas intercalações são apenas detetáveis nos ensaios CPT.

Na Figura 5 é apresentado o microzonamento preliminar tendo em conta a determinação do fator de segurança, sendo que foram incluídos os fatores de segurança dos dados existentes, com vista a ter um microzonamento preliminar mais completo.

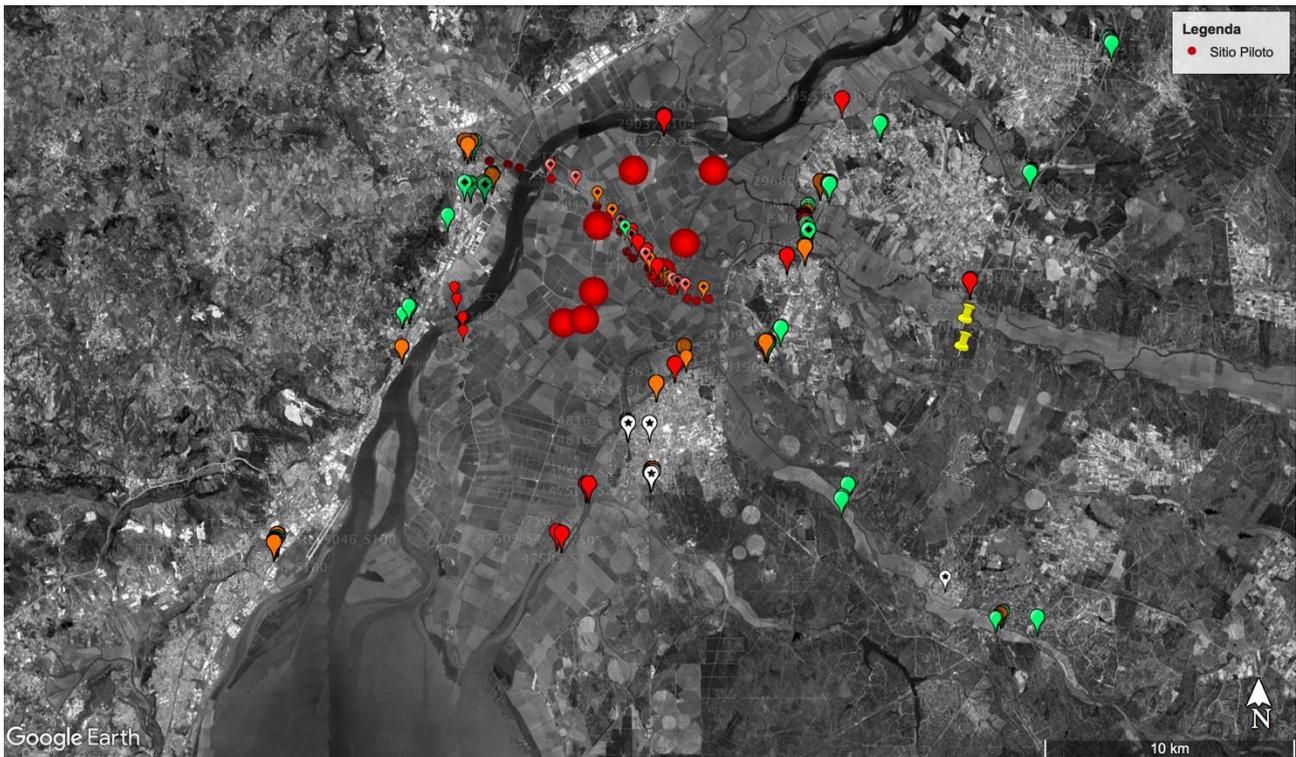


Figura 5 – Microzonamento preliminar tendo em conta o fator de segurança

É importante descrever o método utilizado para atribuição das 3 classes apresentadas no mapa: vermelho, quando há a presença de uma camada com mais de 3 metros de espessura com fator de liquefação menor que 1; verde, quando não existem camadas significativas com fator de segurança menor que 1 e laranja para os casos intermédios.

#### 4.2 - Avaliação da suscetibilidade à liquefação pelos índices de risco

Os ensaios CPTu foram analisados, complementarmente, para determinação dos índices de risco, o LPI e LSN previamente apresentados. Os valores obtidos para esses índices de risco, segundo as metodologias mais recentes, evidenciam uma elevada suscetibilidade à liquefação em todos os locais de ensaio. Os valores dos índices de risco (LPI e LSN) estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Valores de LPI e LSN dos locais de ensaio através da análise de ensaios CPTu

Ensaio	SI1	SI2	SI3	SI4	SI5	SI6	SI7	SI10	SI12	SI13
LPI	15,00	4,09	12,92	24,46	13,92	11,49	12,50	12,761	21,01	3,04
LSN	42,70	7,99	21,82	35,94	36,08	23,15	22,80	20,20	18,40	3,32

Em síntese, de acordo com a classificação segundo o índice LPI, conclui-se que, de modo geral, 12,5% têm baixa probabilidade de liquefação, 62,5% têm alta probabilidade e os restantes 25% têm uma probabilidade muito alta de liquefação. Relativamente ao LSN, verifica-se que 12,5% dos locais têm uma expressão de liquefação muito baixa, 50% de forma moderada e nos restantes 37,5% a liquefação expressa-se de forma moderada a elevada. Segundo o LSN, em nenhum dos locais se prevê a ocorrência de danos severos de liquefação.

Nas Figura 6 e Figura 7 é apresentado o microzonamento preliminar tendo em conta a determinação dos índices de risco LPI e LSN, respetivamente.



Figura 6 – Microzonamento preliminar tendo em conta o LPI



Figura 7 – Microzonamento preliminar tendo em conta o LSN

## 5 - CONCLUSÕES

Na região da Grande Lisboa existem várias zonas com elevada suscetibilidade à liquefação induzida por sismos, como demonstram diversos trabalhos, nomeadamente o de Jorge (1993). Uma vasta quantidade de dados geológico-geotécnicos existentes foi recolhida e devidamente analisada à luz das metodologias mais recente de avaliação da suscetibilidade à liquefação. Com base nessa informação, foi escolhido como sítio piloto e área para o microzonamento preliminar à liquefação, uma zona situada na Lezíria Grande de Vila Franca de Xira. A caracterização da zona, referente aos dados existentes, contou com a identificação e caracterização de 273 pontos de ensaio, dos quais 84% foram ensaios SPT (Standard Penetration Tests), 11% foram ensaios CPT (Cone Penetration Tests). Por outro lado, no sítio piloto, a campanha experimental envolveu um grande número de ensaios, nomeadamente SPT, CPTu, SDMT, diversos métodos geofísicos (refração sísmica, SASW, HVSr) e ainda a recolha de amostras de alta qualidade para caracterização laboratorial. A análise desses resultados foi feita através da avaliação de índices de risco, nomeadamente o Fator de Segurança à liquefação ( $FS_{liq}$ ), Índice Potencial de Liquefação (LPI) e Número de Severidade de

Liquefação (LSN). No âmbito deste trabalho, pretendeu-se mostrar a análise comparativa da avaliação da suscetibilidade à liquefação com base nos ensaios SPT e CPTu. Foi possível confirmar a presença de camadas espessas de solos suscetíveis à liquefação, com elevada heterogeneidade quer em profundidade, quer em planta. A presença de camadas intercaladas de solos granulares e solos finos constituiu um desafio acrescido na correta avaliação da suscetibilidade à liquefação, feita a partir de diferentes métodos. Da análise conjunta destes resultados e da base de dados recolhida, foi possível estabelecer um microzonamento preliminar de suscetibilidade à liquefação induzida por sismos, que se encontra em fase de desenvolvimento e pormenorização no âmbito do projeto LIQUEFACT.

## AGRADECIMENTOS



LIQUEFACT project ("Assessment and mitigation of liquefaction potential across Europe: a holistic approach to protect structures / infrastructures for improved resilience to earthquake-induced liquefaction disasters") has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No GAP-700748.

Os autores agradecem a colaboração na recolha da informação existente à Teixeira Duarte, LNEG, ENMC, CENOR, GEOCONTROLE, COBA e BRISA, bem como nas facilidades concedidas para a realização dos ensaios à ABLGVFX, CMMontijo e CMBenavente. A segunda autora agradece à FCT pela bolsa de doutoramento SFRH/BD/120035/2016 atribuída.

## REFERÊNCIAS

- Andrus, R. D., e Stokoe II, K. H. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(11), 1015-1025.
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H., Chung, R. M., e Juang, C. H. (2003). Guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures. NIST GCR, 03-854.
- Boulanger, R.W. e Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures. *Center for Geotechnical Modeling*, (April), p.134.
- Cabral J, Moniz C, Batlló J, Figueiredo P, Carvalho J, Matias L, Teves-Costa P, Dias R e Simão N. (2011). The 1909 Benavente (Portugal) earthquake: search for the source. *Natural Hazards*. 69: 1211-1227; doi:10.1007/s11069-011-0062-8.
- EN, N. (1998). 1 (2010): Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos.
- Idriss, I.M. e Boulanger, R.W., (2008). Soil Liquefaction during Earthquakes. *Earthquake Engineering Research Institute*. MNO-12.
- Idriss, I.M. e Boulanger, R.W. (2010). SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures. Report No. UCD/CGM-10-02. *Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis*. 259 pp.
- ISO (2005). ISO/TS 22476-11:2005, Geotechnical Investigation and testing – Field Testing – Part 11: Flat Dilatometer Test.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., Yasuda, S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation*. San Francisco, CA, USA, pp. 885–896.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., e Sato, H. (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods, vol. 3, In: *Proceedings of 3th International Conference on Microzonation*, Seattle, 1319–1330.
- Jorge, C. (1993). Zonamento do Potencial de Liquefação - Tentativa de Aplicação a Portugal, Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Geologia de Engenharia, Junho, Lisboa.
- Liao, S.S.C., e Whitman, R.V. (1986). A Catalog of Liquefaction and Non-Liquefaction Occurrences during Earthquakes. Research Report. Cambridge: Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- LIQUEFACT (2016). Disponível em <http://www.liquefact.eu>. Acesso em Outubro de 2016.

- Ribeiro, A. (1998). *As Ciências da Natureza-Geologia no século XVIII*.
- Robertson, P.K., e Wride, C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, 35(3): 442-459.
- Robertson, P.K. (2009). Performance based earthquake design using the CPT. Proc., IS Tokyo Conf. CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, Tokyo.
- Saldanha, A.S. (2017). Microzonamento de suscetibilidade à liquefação. Aplicação a um caso de estudo na região da Grande Lisboa. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Sonmez, H. (2003). Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey), *Environmental Geology*, 44 (2003), pp. 862–871.
- Tonkin e Taylor (2013). Canterbury earthquakes 2010 and 2011. Land Report as at 29 February 2012. Earthquake Commission (108 pp., <http://www.tonkin.co.nz/canterbury-land-information/docs/downloads2592013/T&T-Stage-3-Report.pdf>).
- Viana da Fonseca, A., Lopes, I. F. e Rodrigues, C. (2016). Projeto Geotécnico Assistido por Ensaios In Situ - Curso CPTu. 23 de Junho 2016, Porto, FEUP.
- Zhang, G., Robertson, P.K. e Brachman, R.W. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), pp.1168–1180.