

ZONAMENTO DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO. TENTATIVA DE APLICAÇÃO A PORTUGAL

Zoning of the liquefaction potential. Attempt to apply to Portugal

CELESTE JORGE*
ANTÓNIO GOMES COELHO**

RESUMO - Este trabalho representa uma tentativa de zonamento do potencial de liquefacção do território português. Basicamente, o estudo consiste na identificação e delimitação das áreas que, além de possuírem as condições geológicas necessárias para o desenvolvimento do fenómeno de liquefacção, estão expostas a níveis de sismicidade suficientemente fortes para o desencadear.

Por se verificar a necessidade de um estudo a diferentes escalas, mediante o pormenor exigido e/ou viável, efectuou-se a abordagem do fenómeno e do zonamento, propriamente dito, a três níveis: o nível de zonamento territorial (nível 1), o nível de zonamento regional (nível 2) e o nível de zonamento local (nível 3). Nos níveis 1 e 2, o zonamento foi obtido a partir da sobreposição de dois mapas de base: o mapa da susceptibilidade à liquefacção e o mapa da oportunidade de liquefacção.

SYNOPSIS - The zoning of the liquefaction potential is applied in this work to the Portuguese territory. Thus, an attempt was made to identify and define the areas having the necessary geologic conditions to develop the liquefaction phenomenon, and at the same time presenting the possibility to be exposed to seismic levels that induce it. The need for different scales of study, depending on the detail required, led the approach to be carried out at three levels: the territorial zoning level (level 1) the regional zoning level (level 2) and the local zoning level (level 3). In levels 1 and 2, the final map was obtained by the superposition of two basic maps: the liquefaction susceptibility map and the liquefaction opportunity map.

1 - INTRODUÇÃO

A liquefacção é, muito frequentemente, umas das consequências mais severas dos sismos, provocando danos elevados nas redes de abastecimento/saneamento, nas vias de comunicação e estruturas a elas associadas, nos parques industriais, nas zonas portuárias e ainda nas áreas urbanas. As manifestações mais frequentes à superfície são traduzidas por “vulcões” e fissuras alinhadas com erupção de jactos de areia e, por vezes, pela inundação de uma dada área, se a espessura da camada que liquefaz e o correspondente adensamento do solo forem suficientes para fazer aflorar o nível freático presente a pequena profundidade. Os problemas que surgem nas diversas estruturas resultam da perda de capacidade de carga da fundação, com assentamentos diferenciais ou mesmo derrubamento ou afundamento; impulsão, flutuação. Refira-se por último a instabilização de taludes.

A liquefacção é um fenómeno complexo que pode ser induzido num determinado local, quer por sismos de elevada magnitude com epicentro a grande distância, quer por sismos próximos de pequena magnitude.

* Assistente de Investigação do LNEC

** Investigador Coordenador do LNEC

Os solos granulares finos (areias finas e siltes grosseiros) incoerentes saturados são particularmente susceptíveis à liquefacção.

Deste modo, a preparação dos dados de base para a elaboração de um mapa de zonamento do risco ou potencial de liquefacção deve obrigatoriamente incorporar a sismicidade e as condições do solo. Esta abordagem foi utilizada na realização dos mapas de zonamento do risco de liquefacção para Portugal Continental e para a cidade de Setúbal e exigiu a preparação de dois mapas de zonamento que serviram de base, para cada um dos casos, seguindo a metodologia proposta por Youd e Perkins (1978): um mapa de susceptibilidade à liquefacção, baseado nos dados geológicos, e um mapa de oportunidade de liquefacção, baseado nos dados da sismicidade. O mapa final de zonamento do potencial de liquefacção resulta da sobreposição dos dois mapas precedentes.

No estudo de local de uma obra portuária a abordagem foi mais pormenorizada, tendo-se utilizado os dados geotécnicos, obtidos nos estudos de projecto, na metodologia proposta por Seed e Idriss (1971, 1982).

2 - MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFACÇÃO

2.1 - Generalidades

O termo “susceptibilidade à liquefacção” diz respeito à capacidade dos depósitos sedimentares sofrerem liquefacção quando submetidos a uma acção sísmica. Esta capacidade é função da composição mineralógica e da textura (tamanho do grão, forma, uniformidade, densidade relativa), da estrutura geológica (estratificação, espessura das camadas arenosas, espessura das camadas superficiais não susceptíveis), das condições hidrogeológicas (aquífero superficial, confinado ou semi-confinado), das condições de deposição (eólicas, fluviais, deltaicas, marinhas, etc.), da idade e da história geológica. Youd e Hoose (1977), com base no estudo de relatórios inéditos relativos a 21 sismos (1811-1976), onde há referência ao fenómeno de liquefacção, estudaram a influência das características geológicas mencionadas atrás e mostraram que a liquefacção está confinada a formações geológicas específicas. De facto, são principalmente os depósitos superficiais incoerentes saturados, de idade holocénica de fácies fluvial, deltaica ou eólica, e os aterros arenosos pouco compactados, que apresentam maior susceptibilidade. Os depósitos como os leques aluviais, as baixas aluvionares, as praias, os terraços fluviais e as praias levantadas de idade holocénica são, em geral, relativamente menos susceptíveis, enquanto que os depósitos arenosos plistocénicos são ainda menos susceptíveis. Por seu turno, os depósitos glaciares e periglaciares são geralmente imunes à liquefacção. Mais recentemente, Kotoda *et al.* (1988) adoptou uma classificação geomorfológica dos terrenos como um índice de susceptibilidade à liquefacção: dique natural, leito de rio, terreno conquistados ao rio com aterros, areia de duna e zonas baixas interdunares, são classificados como os mais susceptíveis à liquefacção; pântanos, vales aluvionares e deltas são classificados como intermédios; leques aluviais e barras de areia são classificados como sendo os menos susceptíveis à liquefacção. Outros investigadores (Youd e Perkins, 1978; Wakamatsu, 1980, 1992; Iwasaki *et al.*, 1982, 1982a; Yasuda, 1985) contribuíram igualmente para o estabelecimento de critérios práticos baseados em critérios geológicos, os quais mostram que os sedimentos desenvolvem resistência à liquefacção com a idade e que os processos sedimentares eólicos e fluviais são os que dão origem aos depósitos mais susceptíveis.

Vários quadros estão disponíveis nas referências mencionadas constituindo guias para a avaliação preliminar da susceptibilidade à liquefacção.

Estas correlações entre a susceptibilidade à liquefacção e as classificações geológicas/geomorfológicas permitem usar os mapas geológicos existentes na derivação de mapas de susceptibilidade à liquefacção.

2.2 - Aplicação ao território português

O critério geomorfológico/geológico atrás mencionado para avaliação da susceptibilidade à liquefacção foi aplicado ao território português. Para o efeito foi utilizada a seguinte informação de base: carta hipsométrica de Portugal, na escala 1:500.000; carta geológica de Portugal, na escala 1:500.000; cartas geológicas de Portugal (folhas 1,7 e 8), na escala 1:200.000; cartas geológicas de Portugal (folhas 13-A, 13-C, 16-A, 16-C, 19-A, 19-C, 22-B, 22-D, 23-A, 23-C, 26-B, 27-A, 34-C, 38-B, 39-A, 39-C, 48-D, 51-D, 52-A, 52-B, 53-A e 53-B), na escala 1:50.000. A fiabilidade desta classificação foi aferida pelos dados históricos que fazem referência ao fenómeno, de forma mais ou menos directa, durante episódios sísmicos passados. A Tabela 1 mostra a classificação da susceptibilidade à liquefacção obtida deste modo para os terrenos plistocénicos e recentes ocorrentes em Portugal. Com base neste procedimento, a carta geológica de Portugal 1:500.000 foi transformada num mapa de susceptibilidade à liquefacção. Esta operação de transformação implicou mudar o carácter e o significado das unidades da carta geológica de forma a tornar mais fácil e viável a aplicação pretendida. A validade deste tipo de operação cartográfica, designada por transformação tipológica (Varnes, 1974), depende inteiramente da coerência e da consistência das correlações estabelecidas entre as unidades geológicas definidas no mapa (carta geológica) e a classificação de susceptibilidade à liquefacção.

Neste zonamento adoptaram-se quatro unidades de susceptibilidade:

- susceptibilidade alta a muito alta
- susceptibilidade moderada
- susceptibilidade baixa a muito baixa
- susceptibilidade nula

3 - MAPA DE OPORTUNIDADE DE LIQUEFACÇÃO

3.1 - Abordagem geral

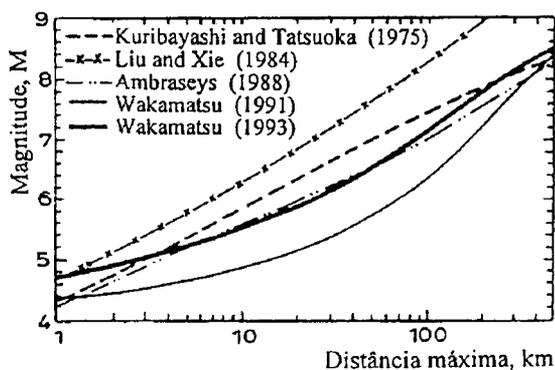
O mapa de oportunidade de liquefacção pretende definir a extensão máxima das áreas expostas à acção de sismos suficientemente fortes para induzir o fenómeno. Para o efeito, o primeiro passo consistiu em definir uma relação empírica apropriada entre a magnitude e a distância máxima de liquefacção válida para a região em estudo. Vários investigadores mostraram que as distâncias (R - distância epicentral, D - distância à fonte sísmica ou distância à falha; Ambraseys, 1988) aos locais mais afastados onde se verificaram manifestações do fenómeno têm um limite superior na projecção da magnitude *versus* logaritmo da distância (Figura 1).

A primeira relação foi definida por Fukuoka (1971). Desde então, as relações foram revistas e melhoradas pela incorporação de grandes quantidades de dados que foram obtidos. Algumas destas relações são regionais, enquanto outras são aplicáveis mundialmente. Estas correlações constituem uma via para estimar a distância epicentral máxima R ou D a que a liquefacção é expectável durante um sismo de uma dada magnitude M.

Tabela 1 - Susceptibilidade à liquefacção dos depósitos sedimentares nas unidades geomorfológicas em Portugal

Localização e classificação das unidades geomorfológicas e geológicas	Susceptibilidade
Algarve Praia Sapal e zona lag. de Faro-Olhão-Tav. e Alvor Aluvião (a) (Rio Guadiana, etc.) Plioquaternário (PQ)	Alta alta a muito alta alta muito baixa
Costa Alentejana Praia Duna (d e ad) laguna (Melides e St ^o André) Aluvião (a) Terraço Quaternário (Q) Plioquaternário (PQ)	moderada a alta moderada alta alta baixa muito baixa
Sado Estuário Laguna Aluvião (a) Duna (d e ad) Terraço fluvial (Q) Plioquaternário (PQ)	alta a muito alta alta a muito alta alta alta a moderada baixa muito baixa
Tejo Estuário Aluvião (a) Planície aluvionar (A) Terraço fluvial (Pleistocénico - Q) Plioquaternário e Pliocénico (PQ e P)	alta a muito alta alta moderada baixa muito baixa
entre o Guincho e Nazaré Praia Duna (d e ad) Terraço de praia Aluvião (a) (ex: Rio Sizandro)	moderada a alta moderada baixa a muito baixa alta
entre a Nazaré e Espinho Praia Lagunas (Óbidos, S. Martinho, etc.) Aluvião (a) (Rio Lis) Duna (d e ad) Plioquaternário (PQ)	moderada a alta alta alta moderada muito baixa
Mondego Estuário Aluvião (a) Terraço fluvial (Q)	alta alta baixa
Aveiro Laguna Lagoa Praia Duna (d e ad)	alta a muito alta alta moderada a alta baixa a alta
entre Espinho e o Rio Minho Praia Duna (d e ad) Terraço de praia	moderada a alta moderada a alta baixa
Rio Minho Aluvião (a) Terraço fluvial (Q)	alta baixa

Nas áreas de sismicidade moderada, sempre que tais relações empíricas possam ser estabelecidas a partir de dados históricos, é possível usar uma abordagem probabilística na elaboração do mapa de oportunidade de liquefacção. Youd e Perkins (1978) propuseram uma abordagem baseada no método clássico desenvolvido por Cornell (1968) para a avaliação do risco sísmico, modificada por Algermissen e Perkins (1975).



Fukuoka (1971)
 $\log R = M - 5,7$

Youd e Perkins (1978)
 $\log D = 0,79M - 3,9$

Midorikawa e Wakamatsu (1988)
 $\log D = 0,6M - 2,4$

Ambraseys (1988)
 $M = 4,64 + 2,65 \times 10^{-3}R + 0,99 \log$

Kuribayashi e Tatsuoka (1975)
 $\log R = 0,87M - 4$; média
 $\log R = 0,77M - 3,6$; $M > 6$

Liu e Xie (1984)
 $R = 0,82 \times 10^{0,862(M-5)}$

Wakamatsu (1992) - Japão
 $\log R = 2,22 \log (4,22M - 19,0)$

Wakamatsu (1993)
 $\log R = 3,5 \log (1,4M - 6,0)$

Figura 1 – Distância epicentral do local mais afastado onde ocorreu liquefação (km) versus magnitude (TC4, 1993)

Esta abordagem exige dois passos básicos:

- a definição de um modelo sismotectónico;
- o processamento de dados sísmicos, em geral, e de liquefação, em particular, pelo método modificado de Cornell.

3.2 - Modelo sismotectónico

Em Portugal, a actividade sísmica está presente no Golfo de Cadiz e no oceano a Sul da costa portuguesa, podendo ser interpretada na estrutura da fronteira de placas África-Euroásia. Contudo os sismos mais violentos não são distribuídos equitativamente por essa área, tendendo a concentrar-se na zona da planície abissal de Horseshoe. No interior do território a origem dos sismos é mais difícil de explicar. Neste caso, também a sismicidade não se distribui aleatoriamente, mas tende a concentrar-se na parte oeste do país. Todavia, para providenciar um modelo sismotectónico para Portugal Continental depara-se com o problema da definição das fontes sísmicas, especialmente na região onde elas não possam ser estritamente relacionadas com zonas de falha cartografadas. Por esse motivo, terá de ser necessário incluir no modelo sismotectónico o conceito de “volume crustal activo” - volumes de crusta que são considerados geradores dos sismos que não podem ser atribuídos às falhas activas conhecidas. Na prática, observações geológicas e sismológicas, numa área com deformação lenta, como Portugal, não fornecem dados suficientes para definir totalmente os parâmetros dos volumes

crustais activos e dos sistemas de falhas activas para a construção de um modelo sismotectónico sintetizado. Nestas condições, os requisitos no domínio da engenharia para a avaliação de risco sísmico podem ser satisfeitos por um “modelo de zonas de geração sísmica” que representa uma simplificação do modelo sismotectónico estipulado para analisar a exposição aos sismos de um dado local e sendo capaz de absorver as incertezas nas interpretações científicas. O modelo de zonas-área de geração sísmica construído para avaliação da oportunidade de liquefacção é constituído por zonas de área de geração representando regiões geográficas que se pensa conterem pelo menos uma única e talvez um sistema de falhas capazes de gerarem sismos. Os parâmetros sísmicos, tais como a relação frequência-magnitude e o sismo de magnitude máxima definido para cada zona, são assumidos como sendo iguais para toda a área.

3.3 - Processamento dos dados sísmicos e de liquefacção pelo método de Cornell modificado

A definição do modelo sismotectónico ou de zonas-área de geração sísmica torna possível aplicar o método probabilístico para o zonamento da oportunidade de liquefacção pelo procedimento estabelecido por Youd e Perkins (1978).

A oportunidade de liquefacção total acumulada, resultante da contribuição de todas as zonas de geração sísmica, é a frequência anual acumulada, f_c . Para qualquer período de tempo, T , o número de ocorrências é dado por $T \cdot f_c$, que pode ser comparado ao parâmetro m da distribuição de Poisson

$$P(n) = \frac{m^n}{n!} \cdot e^{-m} \quad (1)$$

em que $P(n)$ é a probabilidade de se observar n ocorrências, quando o número médio de ocorrências é m . Por ocorrência entende-se aqui cada um dos casos em que a distância entre o sítio considerado e o epicentro de um dado sismo, ou um ponto no interior da zona de geração, é inferior à distância prevista pela relação magnitude-distância máxima de liquefacção.

O cálculo da frequência anual acumulada, f_c , para um grande número de pontos uniformemente distribuídos na área a estudar (tipo malha, sendo os nós dessa os pontos a tratar) constitui uma das vias para a elaboração de um mapa de oportunidade de liquefacção. Se se pretender considerar o período de retorno do fenómeno, a solução passa por usar $1/f_c$ na avaliação.

3.4 - Aplicação ao território português

O passo fundamental para a preparação do mapa da oportunidade de liquefacção passou pelo estudo de registos históricos identificando as referências a manifestações do fenómeno. Os dados recolhidos tornaram possível definir a relação entre a magnitude e a distância máxima de liquefacção para o caso português, assim como identificar os locais que em futuros episódios sísmicos possam sofrer liquefacção, uma vez que se tem verificado que o fenómeno de liquefacção é um processo recorrente nas formações sedimentares.

Este tipo de pesquisa é uma tarefa extremamente morosa, devido ao elevadíssimo número de documentos que têm que ser manuseados por forma a obter os dados pretendidos. No presente é mais fácil pois existem investigadores-historiadores portugueses que se dedicam especificamente à identificação destes assuntos.

Neste estudo, em particular, foram consultados os seguintes autores - Diniz (1910), Choffat e Bensaúde (1912a e 1912b), Pereira de Sousa (1919, 1928, 1929, 1930 a e b, 1932), Mo-

reira (1979), Henriques *et al.* (1988), Runa e Freire (1989 a e b) e The British Historical Society of Portugal (1990). O género e a qualidade da informação utilizada foram tidos em conta durante a análise.

Tabela 2 - Sismos portugueses com liquefacção induzida

Sismos	Latitude	Longitude	Magnitude	Intensidade
26.Jan.1531	38,95	-9,00	7,1	IX
01.Nov.1755	37,00 37,00	-10,00 -10,50	8,5 ---	IX IX
31.Mar.1761	37,00 36,00	-10,00 -10,50	---	IX ---
12.Jan.1856	37,10	-8,00	6,0	VII
11.Nov.1858	38,20	-9,00	7,2	IX
23.Abr.1909	38,95	-8,82	7,6	IX

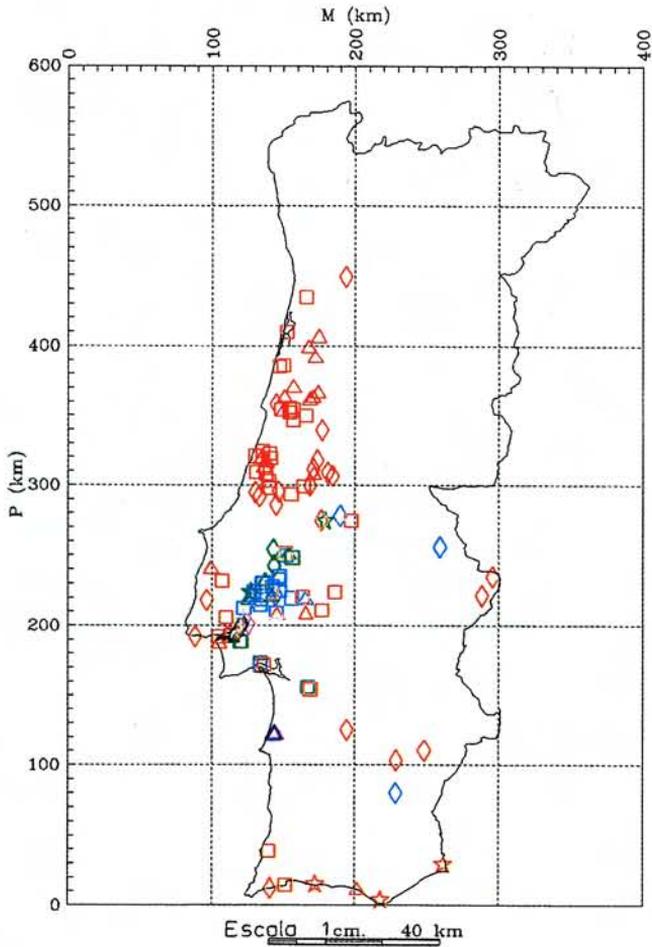
O registo sísmico histórico compreende para a Península Ibérica quase dois mil anos. A descrição do fenómeno de liquefacção foi identificada na literatura em seis sismos fortes sentidos no território português (Tabela 2). Contudo, apenas existe para os sismos de 1531, 1755, 1858 e 1909 informação significativa relativa ao fenómeno de liquefacção. A primeira referência ao fenómeno remonta ao século XVI, respeitante ao sismo de 26 de Janeiro de 1531. Este sismo teve o seu epicentro localizado no Vale Inferior do Tejo e desenvolveu liquefacção nas bacias do Tejo e do Sado.

A Figura 2 mostra a distribuição espacial da liquefacção em Portugal para os maiores sismos históricos, com epicentro em terra ou no mar. Os dados relativos à descrição destes fenómenos foram classificados como certos, duvidosos e muito duvidosos e ainda como credíveis e não credíveis.

Uma outra conclusão, bastante interessante, que se obteve do estudo realizado é que os efeitos de liquefacção do sismo de 1755 foram relatados a mais de 400 km de distância da pressuposta área epicentral. Este facto pode reflectir a baixa atenuação desta região em relação a outras regiões do planeta, como sejam o Japão e a parte oeste dos EUA, mas é necessário ter em conta a influência de determinados factores, tais como a profundidade focal, a direcção e a propagação do movimento sísmico e os efeitos locais de amplificação. O sismo de 1755 é considerado ser o evento mais forte alguma vez sentido. A Figura 3 mostra uma gravura que parece retratar os efeitos do fenómeno de liquefacção na área de Lisboa.

3.4.1 - Definição da relação magnitude-distância máxima de liquefacção

Conhecendo as localizações mais afastadas das manifestações de liquefacção e dos respectivos epicentros dos sismos que lhes deram origem, torna-se possível definir a distância máxima de liquefacção para uma dada magnitude. A tabela 3 mostra as distâncias máximas para os quatro sismos mais importantes que estão relacionados com manifestações de liquefacção.



Classificação dos dados históricos

- Liquefacção certa
- △ Liquefacção duvidosa
- ◇ Liquefacção muito duvidosa
- ☆ Liquefacção possível

Sismos

- 26 de Janeiro de 1531
- 1 de Novembro de 1755
- 31 de Março de 1761
- 12 de Janeiro de 1856
- 11 de Novembro de 1858
- 23 de Abril de 1909

Figura 2 – Localização da liquefacção associada a sismos históricos (Jorge, 1993)

Tabela 3 - Distância máxima de liquefacção

Sismos	Magnitude	Distância máxima (km)
26.01.1531	7,1	80
01.11.1755	8,5	420
11.11.1858	7,2	66
23.04.1909	7,6	120

Com estes valores torna-se viável estabelecer a relação entre o logaritmo da distância máxima de liquefacção e a magnitude, para uma região específica, conforme mostra a Figura 4. Utilizando a análise de regressão para os valores apresentados na Figura 4, define-se a seguinte relação

$$\log R = 0,61M - 2,52 \quad (2)$$

onde R é a distância máxima onde ocorre liquefacção e M é a magnitude de Richter (M_s).

3.4.2 - Zonamento para Portugal

Seguindo os passos já mencionados atrás, foram definidas as zonas de geração sísmica com base nos dados instrumentais e de sismicidade histórica (Sousa *et al.*, 1992) e nas características neotectónicas da região (Cabral e Ribeiro, 1989).

Após a confrontação de todos os dados foram consideradas sete zonas de geração sísmica capazes de gerar sismos de magnitude suficiente para induzir liquefacção no território português. As zonas de geração definidas são apresentadas na Figura 5.

A zona de geração sísmica que maior quantidade de eventos sísmicos possui está relacionada com a fronteira de placas a Sul da Península Ibérica. No Continente, a sismicidade parece estar concentrada entre a linha de costa e a parte central do país.

Para cada zona de geração foram definidas as características da actividade sísmica. A actividade sísmica de uma zona de geração pode ser expressa pela relação frequência-magnitude e pelo sismo máximo associado. A relação frequência-magnitude é expressa pela lei clássica de Gutenberg-Richter

$$\log N(m) = a - b \cdot M \quad (3)$$

onde $N(m)$ é o número de sismos por ano por unidade de área, de magnitude superior a m ; a e b são constantes obtidas a partir da análise de regressão para os dados históricos. Neste caso particular apenas foram considerados os sismos de magnitude superior a 5, por se assumir que magnitudes inferiores a 5 não geram liquefacção.

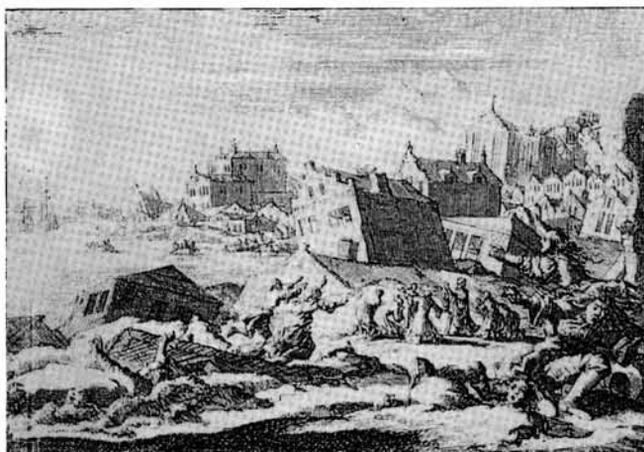


Figura 3 – Gravura retratando manifestações da liquefacção – sismo de 1755

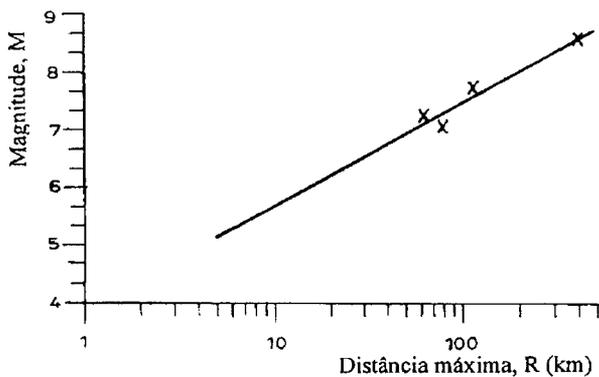


Figura 4 – Para o território português, distância epicentral ao local mais afastado onde ocorreu liquefacção, R, versus magnitude, M

A definição da actividade sísmica tornou possível levar a cabo a avaliação probabilística da oportunidade de liquefacção. Primeiro, foi necessário calcular a frequência anual de sismos de dado intervalo de magnitude para cada zona de geração, por unidade de área (Tabela 4). Cada zona de geração sísmica foi dividida num dado número de unidades de área (correspondendo a um quadrado), considerando que as características de cada quadrado/unidade de área são uniformes para toda a zona de geração sísmica.

Tabela 4 - Actividade sísmica para cada zona de geração

Zona de Geração	Nº unidades de área	Classe de Magnitude			
		[5,6[[6,7[[7,8[≥ 8
1	230	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$
2	14	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0
3	60	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0	0
4	48	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	0
5	30	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
6	32	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	0	0
7	20	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0	0	0

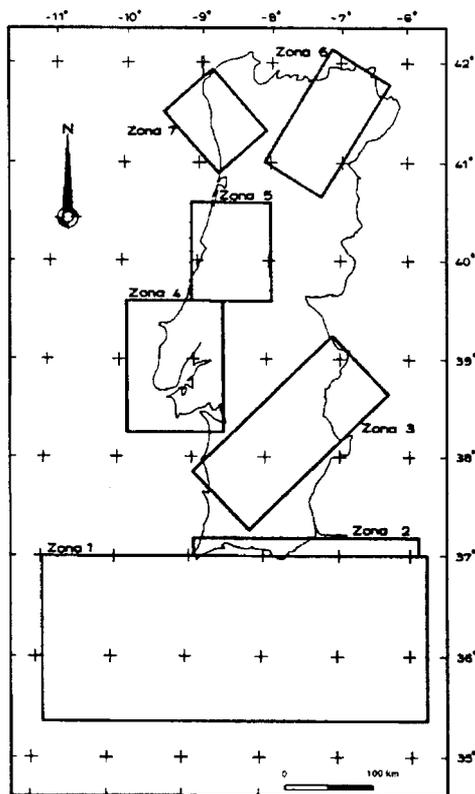


Figura 5 – Zonas de geração sísmicas definidas para este estudo

Tomando o valor central de magnitude de cada classe de magnitude, como valor representativo a ser usado na determinação da distância máxima de liquefacção pela utilização da Equação 2, obtêm-se os valores limite para lá dos quais não se espera que ocorra liquefacção. Estes valores são 7, 28, 114 e 462 km para as respectivas classes de magnitude [5,6], [6,7], [7,8] e ≥ 8 .

Os dados existentes e a relação de atenuação para o fenómeno de liquefacção definida para o território português permitiram desenvolver uma abordagem probabilística da oportunidade de liquefacção para Portugal.

Uma vez obtidas as distâncias máximas de liquefacção para cada classe de magnitude, definiu-se sobre a área total do território uma malha de aproximadamente 270 nós, e determinou-se para cada um desses nós a contribuição conjunta das zonas de geração sísmica. As oportunidades acumuladas para um ponto específico devido à contribuição de todas as zonas de geração sísmica produziram uma frequência cumulativa anual da oportunidade de liquefacção. A partir dos valores obtidos para cada nó da malha foi possível traçar, por interpolação, linhas de igual valor do período de retorno da oportunidade de liquefacção, tendo em conta cada intervalo de magnitude. Deste procedimento resultou o mapa da Figura 6.

4 - MAPA DO POTENCIAL DE LIQUEFACÇÃO PARA PORTUGAL - NÍVEL 1

A sobreposição dos mapas de oportunidade de liquefacção e de susceptibilidade à liquefacção permitiu obter o mapa de potencial de liquefacção para o território português (Figura 7). Este último mapa mostra onde são mais prováveis de ocorrer as formações geológicas susceptíveis à liquefacção e simultaneamente o período de retorno para sismos suficientemente fortes para induzir o fenómeno.

As unidades definidas por diferentes padrões de preenchimento e cor correspondem a diferentes probabilidades de ocorrência de materiais susceptíveis de sofrer liquefacção. Áreas com período de retorno de oportunidade de liquefacção compreendido numa classe de valores definida são separadas por isolinhas.

Conforme é visível na Figura 7, as áreas com potencial de liquefacção mais elevado estão localizadas na costa sul do Algarve e na região de Lisboa, estuário do Sado e Vale Inferior do Tejo. Para Norte o potencial de liquefacção diminui, pelo facto da oportunidade de liquefacção diminuir muito acentuadamente.

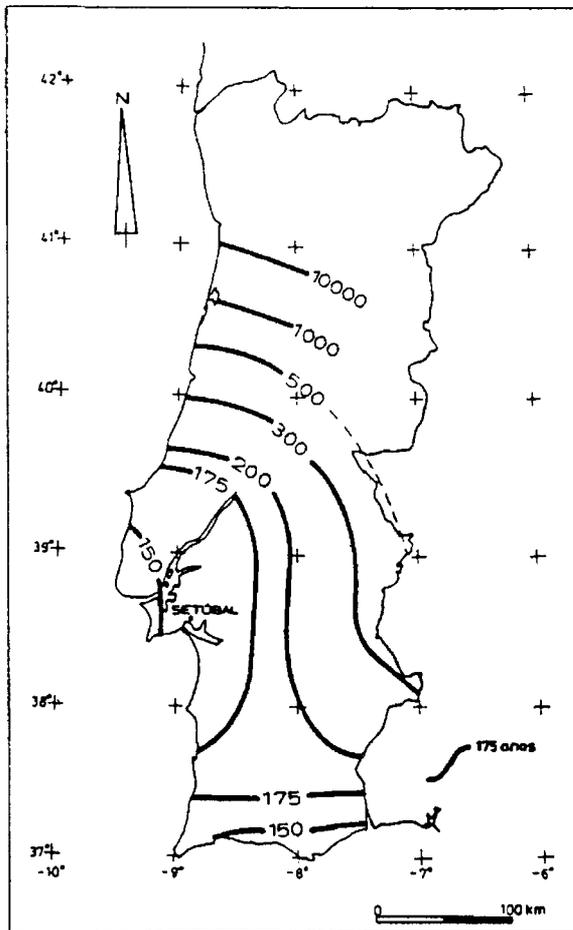


Figura 6 – Mapa de período de retorno da oportunidade de liquefacção para Portugal

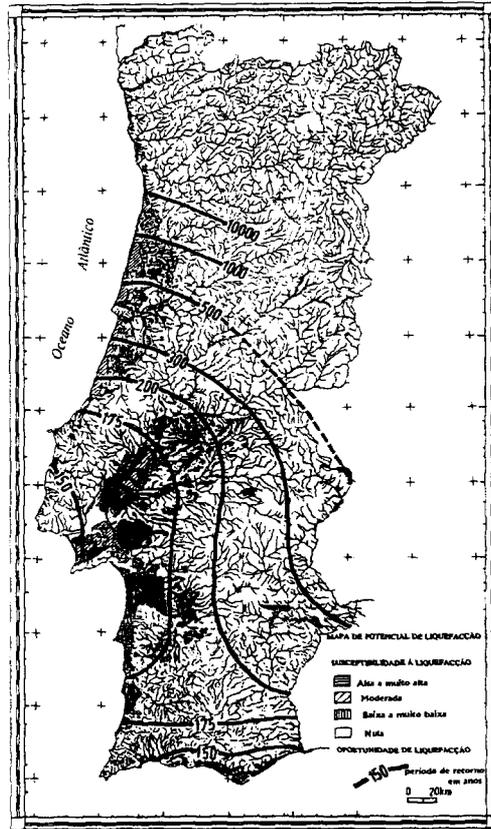


Figura 7 – Mapa de potencial de liquefacção para o território português

5 - ZONAMENTO DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO PARA A CIDADE DE SETÚBAL - NÍVEL 2

5.1 - Generalidades

Para ilustrar o zonamento do potencial de liquefacção à escala de uma cidade escolheu-se Setúbal. Esta escolha justifica-se pelo facto de Setúbal ser uma das cidades portuguesas onde a liquefacção se terá manifestado de forma significativa em sismos passados. Acrescente-se ainda que esta é uma das poucas cidades que para além de possuir uma cartografia geológica, possui também uma carta geotécnica (Gomes Coelho, 1980).

Esta cidade desenvolve-se na baixa aluvionar resultante da confluência de várias ribeiras, enquanto junto ao rio se construíram importantes infra-estruturas portuárias.

Para o zonamento do potencial de liquefacção adoptou-se a base topográfica à escala 1:25.000.

Para este nível de zonamento considerou-se o mapa de oportunidade de liquefacção definido atrás (Figura 6). De acordo com este mapa, a cidade de Setúbal situa-se numa área em que o período mínimo de retorno dos sismos capazes de provocar liquefacção está compreendido entre 150 e 175 anos.

O estudo do potencial de liquefação confinou-se portanto, neste caso, à elaboração de um mapa de susceptibilidade à liquefação (escala 1:25.000) que teve por base os seguintes elementos: cartas geológicas de Portugal, na escala 1:50.000 (folhas 38-B e 39-A); cartas topográficas, na escala 1:25.000 (folhas 454 e 455); cartas geotécnicas da região de Setúbal, nas escalas 1:25.000 e 1:10.000 (Gomes Coelho, 1980); cobertura aero-fotográfica pancromática colorida, na escala 1:20.000 (1977); cobertura aero-fotográfica de infravermelhos a preto e branco, na escala 1:20.000 (1971); inventário de 253 locais de sondagens e ensaios *in situ*.

5.2 - Condições geológicas da área em estudo

Na área abrangida pelo estudo podem distinguir-se as seguintes unidades no conjunto dos depósitos superficiais plistocénicos e holocénicos: **afm** - aluviões fluvio-marinhas, de espessura significativa, constituídas por depósitos argilosos, lodosos e arenosos, irregularmente estratificados em camadas lenticulares oblíquas, formando um conjunto muito heterogéneo, com rápidas variações laterais e verticais de fácies; **af** - aluviões fluviais areno-argilosas cujos materiais provêm da zona montanhosa; **af'** - aluviões fluviais arenosas, de espessura pouco significativa, podendo ainda atingir os 8 m na baixa aluvionar; **Ca** - complexo colúvio-aluvionar que compreende os materiais heterogéneos areno-siltosos com fragmentos rochosos; **S** - complexo de areias superficiais resultante da desagregação do complexo pliocénico, cuja espessura varia entre 0-6m, sendo em média de 2-3 m; **at** - aterro composto por areias grosseiras a médias, com passagens lodosas frequentes, cuja espessura varia entre 12 e 15 m.

Com base na carta geotécnica disponível e na observação das fotografias aéreas, delimitaram-se as zonas baixas aluvionares e colúvionares de fraco declive (<2%).

Nestas zonas baixas de declive suave, o nível freático encontra-se a pequena profundidade (2-3 m), mas variável com a época do ano ou com o nível das marés, na zona entre o rio e a Avenida Luísa Todi.

Para cada unidade definida, a Tabela 5 apresenta a granulometria e a resistência à penetração.

Tabela 5 - Granulometria e resistência à penetração

Unidades	Granulometria (Classificação Unificada)	SPT (N)
afm	em relação ao complexo arenoso SC, SM, SP	aumento da resistência à penetração com a profundidade 0-20 - complex. argiloso <8 - complex. lodoso 10-30 - complex. arenoso (abaixo do Nível Freático)
af	areias argilosas argilas arenosas -bem graduadas-	-----
af'	areias médias a finas SP SP-SM	até aos 2m - 4 a 10 2 aos 5m - 10 a 30
Ca	mistura de areias, seixos e finos	-----
S	areias médias e grosseiras SP	-----
at	aterro	15 a 60

5.3 - Avaliação do potencial de liquefacção

Para a definição da susceptibilidade à liquefacção, analisaram-se os dados relativos à composição dos depósitos, à espessura das camadas arenosas, à sua compacidade e às condições hidrogeológicas, obtidos a partir da informação das sondagens, dos ensaios *in situ* e dos ensaios de identificação realizados e que constam do inventário já mencionado. Da conjugação da informação resultou a interpretação que consta da Tabela 6 e na qual se definem as características favoráveis e/ou desfavoráveis à ocorrência de liquefacção.

Com base na classificação definida na Tabela 6, estabeleceu-se o mapa de susceptibilidade à liquefacção que se apresenta na Figura 8. Este mapa é simultaneamente um mapa de potencial de liquefacção ao considerar-se a informação da Figura 6.

Da análise deste mapa se conclui que as formações de potencial mais elevado localizam-se na Baixa Setubalense, estendendo-se por toda a unidade afm.

6 - ZONAMENTO DO POTENCIAL DE LIQUEFACÇÃO PARA O LOCAL DE UMA OBRA - NÍVEL 3

6.1 - Generalidades

A península da Mitrena é um dos pólos industriais da cidade de Setúbal, tendo-se instalado neste local diversas indústrias directamente ligadas à actividade portuária. Com o intuito de se conquistar algum espaço ao estuário, foram construídos aterros hidráulicos na zona de sapal, que são potenciais zonas de ocupação industrial.

Utilizaram-se neste trabalho alguns dados obtidos nos estudos de projecto para a implantação de estruturas portuárias a efectuar num destes aterros.

Dadas as características do sítio (aterro arenoso, nível freático superficial, etc.) e a actividade sísmica da região em que o sítio se insere, o estudo do potencial de liquefacção constitui um aspecto bastante importante no âmbito dos estudos de projectos de forma a garantir a segurança das estruturas a construir.

6.1 - Condições locais

A zona ribeirinha da Península da Mitrena é caracterizada pela existência de um ambiente lagunar, ao qual correspondem áreas arenosas e lodosas que cobrem a litologia local.

A geologia desta área é constituída por formações do Pliocénico (areia, areia mais ou menos argilosa com intercalações argilosas) sub - horizontais, cuja espessura máxima varia entre 120 e 150 m, assente sobre o Miocénico (calcarenito, arenito calcário, arenito margoso).

Com base em sondagens efectuadas no local pode-se estabelecer a seguinte sequência estratigráfica:

Tabela 6 - Ponderação das características das unidades geológicas no desenvolvimento da liquefação

Unidades Geológicas/Geomorfológicas	Materiais Arenosos	Teor em finos (argila < 20%)	Nível Freático Elevado	Compatibilidade baixa	Declive < 2% má drenagem	Amplificação do sinal sísmico	Estrutura geológica favorável	Susceptibilidade
Aluviões Fluvio-marinhas (afm) complexo arenoso	+	+	+	+/-	+	+	+/-	moderada a elevada
Aluviões fluviais Arenos-argilosas (af)	-	-	-/+	----	+	+	+/-	≈ nula localmente moderada
Aluviões fluviais Arenosas (af')	+	+	-	+/-	-	+	+	baixa
Depósitos Colúvio-aluvionares (ca)	-	+	-	----	-/+	+	+/-	≈ nula
Cobertura Arenosa superficial (S)	+	+	-	----	+/-	+	+	muito baixa
Aterro Compactado (at)	+	+	+	-	+	+	+/-	baixa a moderada

+ condições favoráveis

- condições desfavoráveis

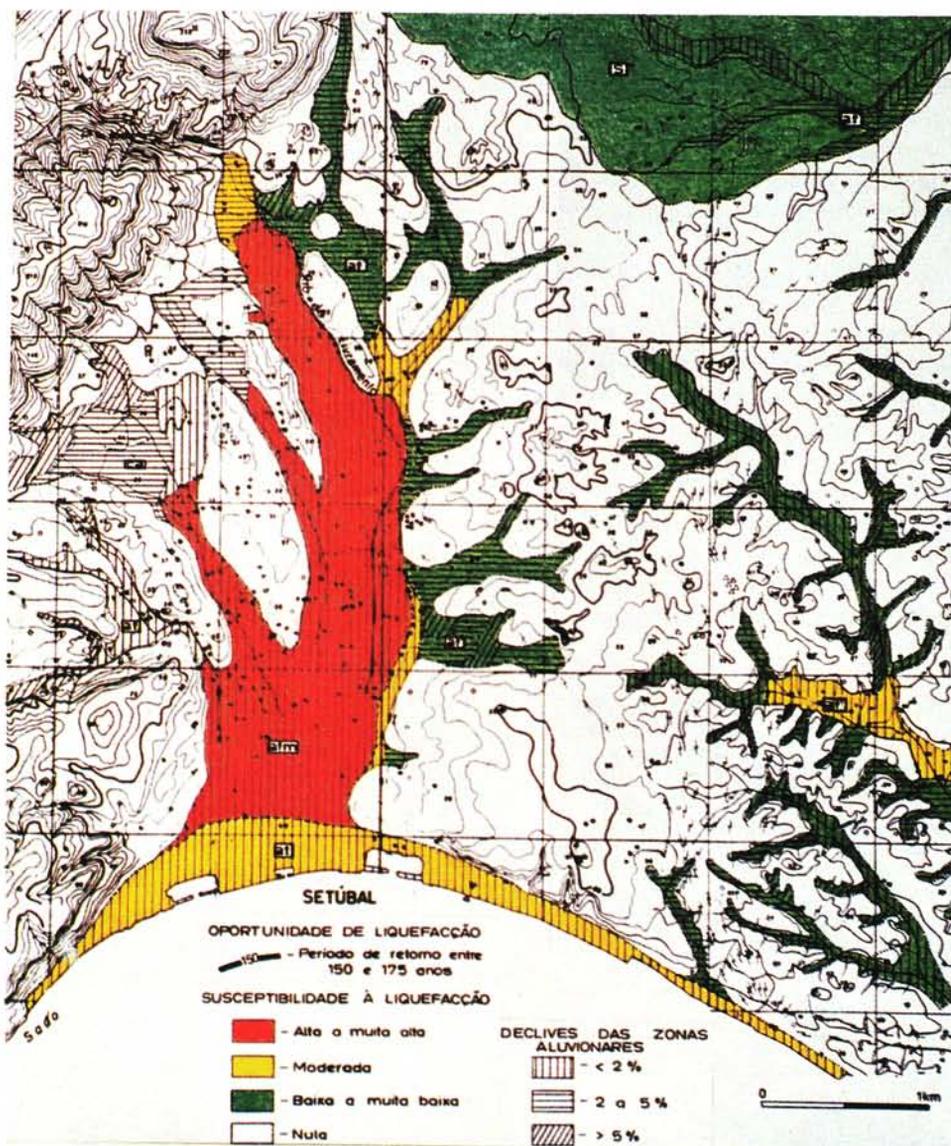


Figura 8 – Zonamento do potencial de liquefação para a cidade de Setúbal

Aterro hidráulico

- areia fina a média, solta a medianamente compacta ($\approx 3,5$ m)

Aluvião

- argila orgânica muito mole ($< 1,5$ m)

- areia fina a grosseira, ocasionalmente com seixo, com fragmentos de conchas, e com variações de fácies, quer verticais, quer horizontais, muito frequentes e rápidas (≈ 30 m)

Pliocénico

- argila arenosa, rija a muito rija, castanha a castanha azeitona (≈ 10 m)

- areia silto-argilosa, média a grosseira, castanha amarelada, muito compacta com intercalações de argila muito rija (≈ 80 m)

As condições hidrogeológicas são governadas pela oscilação das marés, uma vez que os materiais superficiais interessados são bastante permeáveis. No aterro, o nível freático é considerado aproximadamente aos 3 m de profundidade.

6.3 - Avaliação do potencial de liquefacção

A avaliação do potencial de liquefacção para este estudo baseou-se na análise dos dados das sondagens efectuadas na zona do aterro hidráulico da Eurominas, nomeadamente no esquema que consta da Figura 9, dos resultados dos ensaios SPT e CPT e dos ensaios de identificação e caracterização.

Os resultados do ensaio SPT apresentam no aterro valores superiores a 10 pancadas, aumentando progressivamente na aluvião arenosa até cerca das 50 pancadas aos 17 m, conforme se observa no esquema da figura 9. Por sua vez, os valores do ensaio CPT aumentam progressivamente com a profundidade até aos 6-8 m, atingindo valores de resistência de ponta entre 16 e 22 MPa, apresentando, em seguida, uma tendência muito menos significativa para aumentar, atingindo valores entre 25 e 30 MPa aos 15 m.

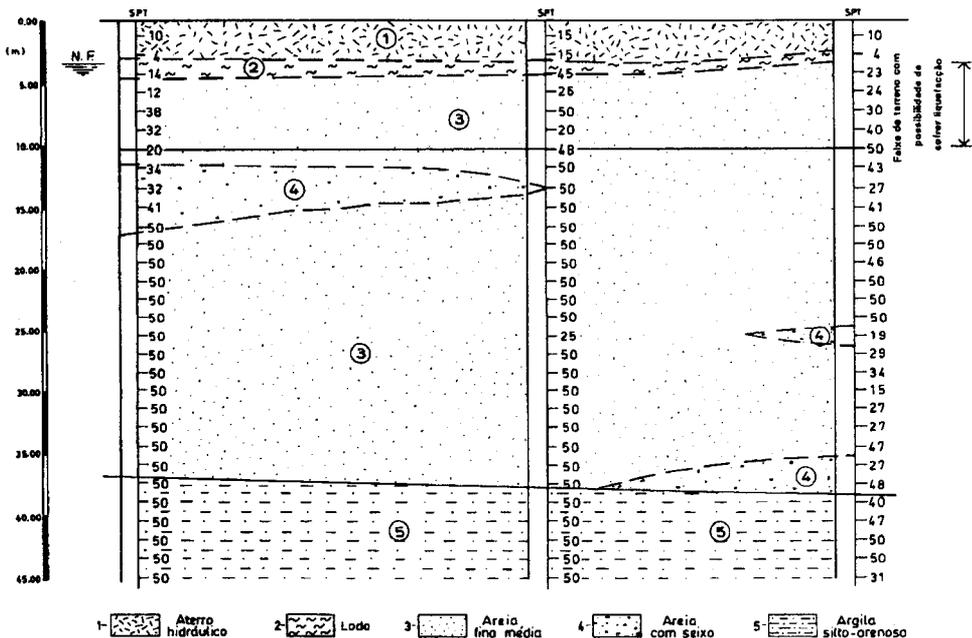


Figura 9 – Perfil geológico e delimitação da faixa susceptível de sofrer liquefacção

Uma vez que os dados coexistentes para todos os furos de sondagem considerados são os valores de SPT, optou-se por uma abordagem baseada num procedimento simplificado para

a avaliação do potencial de liquefacção. O procedimento consiste na comparação da relação de tensão cíclica média induzida pelo sismo, $\tau_{\text{sismo}}/\sigma'_v$, com a relação de tensão cíclica obtida a partir dos valores do ensaio SPT.

A relação de tensão cíclica média imposta pelo sismo proposto para o estudo de projecto para a avaliação do potencial de liquefacção foi calculada pela fórmula de Seed e Idriss (1971)

$$\frac{\tau_{\text{média}}}{\sigma_0} \approx 0,65 \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_0} \cdot \frac{a_{\text{max}}}{g} \cdot r_d \quad (4)$$

onde $\tau_{\text{média}}$ é a tensão de corte média, σ_0 e σ_0' são, respectivamente, tensão efectiva à profundidade considerada e tensão total à mesma profundidade, a_{max} é a aceleração horizontal máxima e r_d é um coeficiente de redução de tensão. Assume-se $\sigma_0' = \sigma_v$ e $\sigma_0 = \sigma_v$.

A aceleração horizontal máxima considerada para este estudo é de 0,3g, valor este que tem em conta de forma conservativa a contribuição das zonas de geração sísmica próximas, a que o local se encontra exposto. Na Tabela 7 apresenta-se os valores de tensão cíclica induzida pelo sismo calculados para diferentes profundidades.

Tabela 7 - Relação de tensão cíclica induzida pelo sismo considerado

Profundidade (m)	σ_0 (kPa)	σ_0' (kPa)	r_d	$\tau_{\text{sismo}}/\sigma'_v$
NF \approx 3 m $a_{\text{max}} = 0,3g$				
6	104	74	0,91	0,249
8	146	96	0,88	0,261
10	187	117	0,85	0,265
13	250	150	0,81	0,263
15	293	173	0,78	0,258
17,5	347	202	0,74	0,248
20	398	228	0,70	0,238

Na determinação da relação de tensão cíclica *in situ* utilizaram-se os valores N do ensaio SPT, os quais foram convertidos em valores de compacidade relativa, D_r , usando a fórmula de Gibbs e Hertz (1957), considerando que para compacidades relativas superiores a 80% não há liquefacção. Com os valores de compacidade relativa obtidos, utilizou-se o gráfico de Seed e Peacock (1971) que se apresenta na Figura 10. Daí obtiveram-se os valores de $\tau_{h \text{ médio}}/\sigma'_v$, que aparecem na Tabela 8.

O potencial de liquefacção foi avaliado comparando os valores das relações cíclicas médias induzidas pelo sismo considerado, $\tau_{\text{sismo}}/\sigma'_v$, com os valores da relação de tensão cíclica média que produzem liquefacção no campo, $\tau_{h \text{ médio}}/\sigma'_v$, para várias profundidades. Por esta via, obteve-se um factor de segurança (Equação 5) que permite avaliar a possibilidade do desenvolvimento do fenómeno de liquefacção, assumindo que para $F < 1$ poderá ocorrer liquefacção:

$$F = \frac{\tau_{h \text{ médio}}}{\sigma'_v} \bigg/ \frac{\tau_{\text{sismo}}}{\sigma'_v} \quad (5)$$

Tabela 8 - Relação de tensão cíclica determinada

Profundidade (m)	σ'_v (kPa)	SPT (N)	D_r (%)	$\tau_{h \text{ médio}}/\sigma'_v$
5	63	13	66	0,165
6	74	12	61	0,147
7,5	90	30	91	nhl
9	106	20	71	0,179
10,5	123	20	68	0,170
12	139	34	85	nhl
13,5	156	32	79	nhl
15	173	40	85	nhl
16,5	190	50	92	nhl
18	207	50	89	nhl
21	239	50	84	nhl

nhl - não há liquefacção

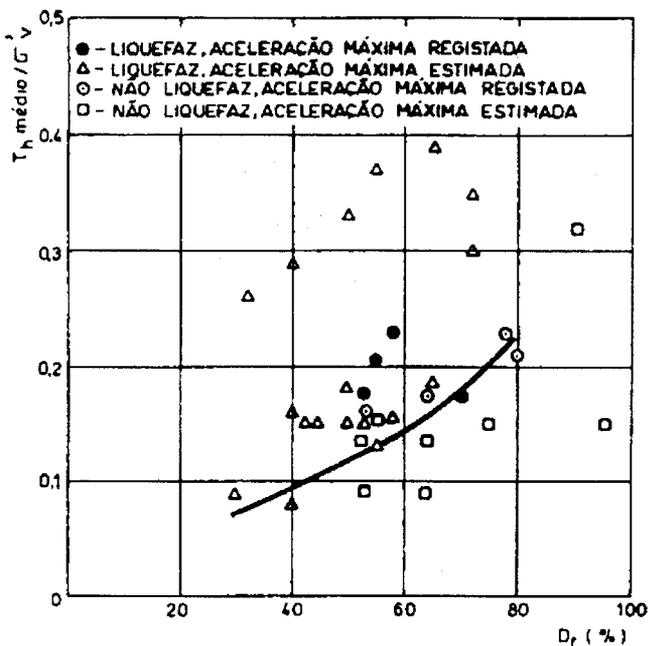


Figura 10 – Relação entre $\tau_{h \text{ médio}}/\sigma'_v$ e a capacidade relativa (Seed e Peacock, 1971)

Utilizando esta expressão verifica-se que os coeficientes de segurança, F , para os 10 m mais superficiais são inferiores à unidade. Por este motivo, pode pôr-se a hipótese do fenómeno de liquefacção se desenvolver até esta profundidade. Uma vez que os dados existentes apenas permitiram esboçar o esquema apresentado na Figura 9, traça-se nele a faixa que pode ser sus-

ceptível de sofrer liquefacção na eventualidade de ocorrer um sismo que produza uma aceleração máxima de 0,3g.

Convém salientar que no presente estudo não se entrou em conta com as condições impostas pelo Eurocódigo 8 (1994), por ele ter sido realizado em 1991/92. Contudo poder-se-ia ter considerado o que Seed *et al.* (1983) sugerem para os estudos que utilizam dados de campo. Se o estudo tivesse levado em conta os valores de N corrigidos para uma tensão efectiva de referência de 100 kPa e para uma energia de impacto de 60% da energia teórica de queda, a abordagem ter-se-ia realizado ainda mais do lado da segurança, apesar de se terem considerado os cenários mais negativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGERMISSEN, S.T. e D.M. Perkins - *A technique for seismic zoning: General considerations and parameters*. Proc. Int. Conf. on Microzonation. Seattle, Wash. 865-874, 1975.
- AMBRASEYS, N.N. - *Engineering seismology*. Earthq. Eng. And Structural Dynamics, Vol. 17, pp.1-105, 1988.
- BRITISH HISTORICAL SOCIETY OF PORTUGAL - *O terramoto de 1755*. Testemunhos Britânicos, 1990.
- CABRAL, J. e A. RIBEIRO - *Carta neotectónica de Portugal. Nota explicativa*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 1989.
- CHOFFAT, P. e A. BENSÁUDE - *Le tremblement de terre du 23 Avril 1909 dans le Ribatejo*. Revista de Obras Públicas e Minas, Tomo XLIII, 1912a.
- CHOFFAT, P. e A. BENSÁUDE - *Estudos sobre o sismo do Ribatejo de 23 de Abril de 1909*. Comissão dos Serviços Geológicos de Portugal, Imprensa Nacional, Lisboa, 1912b.
- CORNELL, C.A. - *Engineering seismic risk analysis*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 58, nº 5 pp. 1583-1606, 1968.
- DINIZ, J.O.F. - *Contribuição para o estudo dos tremores de terra em Portugal - O abalo sísmico de 23 de Abril de 1909*. Revista de Obras Públicas e Minas, Lisboa, Tomo XLI, 1910.
- EC8 - Eurocódigo - *Design provisions for earthquakes resistance of structures*. Junho, 1994.
- FUKUOKA, M. - *Memories of earthquakes and foundations*. Bridges and Foundations, Vol.5, nº 10, 1971.
- GIBBS, H.J. e W.G. HORTZ - *Research on determining the density of sands by spoon penetration testing*. Proc. 4th ICSMFE, Londres, Vol. 1, pp. 35-39, 1957.
- GOMES COELHO, A. - *A cartografia geotécnica no planeamento regional e urbano. Experiência de aplicação na região de Setúbal*. Tese para Obtenção do Grau de Especialista no LNEC, Lisboa, 1980.
- HENRIQUES, M.C.; M.T. MOUZINHO e N.M. FERRÃO - *Sismicidade de Portugal - O sismo de 26 de Janeiro de 1531*. Comissão para o Catálogo Sísmico Nacional, INMG, Lisboa, 1988.
- IWASAKI, T.; K. TOKIDA; F. TATSUOKA; S. WATANABE; S. YASUDA e H. SATO - *Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods*. Proc. 3rd Intern. Conf. on Microzonation, Seattle, Vol.3, pp. 1319-1330, 1982a.
- IWASAKI, T.; K. TOKIDA; S. YASUDA e H. SATO - *Topographical and soil conditions of sites where liquefaction has been observed*. Proc. 17th Annual meeting, JSSMFE, Vol.2, pp. 21-24, 1982.
- JORGE, C. - *Zonamento do potencial de liquefacção. Tentativa de aplicação a Portugal*. Dissertação apresentada na Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Geologia de Engenharia, 1993.

- KOTODA, K.; K. WAKAMATSU e S. MIRORIKAWA - *Seismic microzonation soil liquefaction potential based on geomorphological land classification*. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.28, nº2, pp. 127- 143, 1988.
- KURIBAYASHI, E. e F. TATSUOKA - *Brief review of liquefaction during earthquake in Japan*. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.15, nº4, pp. 81-92, 1975.
- LIU, Y. E J.F. XIE - *Seismic liquefaction of sand*. Earthquake Press. China, 1984.
- MIDORIKAMA, S. E K. WAKAMATSU - *Intensity of earthquake ground motion at liquefied sites*. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.28, nº2 pp. 73-84, 1988.
- MOREIRA, V.J.S. - *Contribuição para o conhecimento da sismicidade histórica de Portugal Continental*. (Reprod.), s.I. s. ed., s.d. INMG, Lisboa, 1979.
- PEREIRA DE SOUSA. F.L. - *O terramoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um estudo demográfico*. Distritos de Faro, Beja e Évora. Vol.I. Serviços Geológicos de Portugal, 1919.
- PEREIRA DE SOUSA. F.L. - *O terramoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um estudo demográfico*. Distritos de Santarém e Portalegre. Vol.II. Serviços Geológicos de Portugal, 1928.
- PEREIRA DE SOUSA. F.L. - *O terramoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um estudo demográfico*. Distrito de Lisboa. Vol.III. Serviços Geológicos de Portugal, 1929.
- PEREIRA DE SOUSA. F.L. - *O terramoto de 26 de Janeiro de 1531*. Academia de Ciências de Lisboa. Boletim da Academia, Vol.II. Nova Série, 1930a.
- PEREIRA DE SOUSA. F.L. - *O terramoto de 11 de Novembro de 1858*. Academia de Ciências de Lisboa. Boletim da Academia, Vol.II. Nova Série, 1930b.
- PEREIRA DE SOUSA. F.L. - *O terramoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um estudo demográfico*. Distritos de Leiria, Castelo Branco, Coimbra, Guarda, Aveiro e Viseu, Vol. IV, Serviços Geológicos de Portugal, 1932.
- RUNA, L.M.L.F. e A.G.M.M. FREIRE - *O sismo de 1755 em Portugal - contribuição para o estudo das suas características e consequências*. Workshop on Historical Earthq. In the Ibero-Maghrebian Region Methodological Approach and Cases Studies, Nov., Lisboa, pp.1/7-I/44, 1989a.
- RUNA, L.M.L.F. e A.G.M.M. FREIRE - *O terramoto de Lisboa de 1 de Novembro de 1755 Inquérito do Marquês de Pombal - transcrições e quadros sinópticos (resumo)*. Workshop on Historical Earthq. In the Ibero-Maghrebian Region Methodological Approach and Cases Studies, Nov., Lisboa, 1989b.
- SEED, H.B. e I.M. IDRIS - *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. JSMFD, ASCE, Vol. 97, nº SM9, pp. 1249-1273, 1971.
- SEED, H.B. e W.H. PEACOCK - *Tests procedures for measuring soil liquefaction characteristics*. JSMFD, ASCE, Vol. 97, nº SM8, pp. 1099-1119, 1971.
- SEED, H.B. e I.M. IDRIS - *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Earthq. Eng. Research Institute Monograph.. University of California, Berkeley, 1982.
- SEED, H.B., I.M. IDRIS e I. ARANGO - *Evaluation of liquefaction potential using field performance data*. JGE, ASCE, Vol. 9, nº3, pp. 458-482, 1983.
- SOUSA, L.M.; A. MARTINS E C. SOUSA OLIVEIRA - *Compilação de catálogos sísmicos da região Ibérica*. Relatório 36/92-NDA, LNEC, Lisboa, 1992.
- TC4 - *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*. The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. ISSMFE, December, 1993.
- VARNES, D.J. - *The logic of geological maps with reference to their interpretation and use for the engineering purposes*. US. Geological Survey Professional Paper 837, 1974.
- WAKAMATSU, K. - *Geomorphological considerations of site conditions of soil liquefaction caused by earthquake*. Asikan Profile, Vol. 8, nº 3, pp. 279-297, 1980.

- WAKAMATSU, K. - *Maps for historic liquefaction sites in Japan*. Tokai University Press, Japan, 1991.
- WAKAMATSU, K. - *Evaluation of liquefaction susceptibility based on detailed geomorphological classification*. Proc., Technical Papers of Annual Meeting Architecture Institute of Japan, Vol.B, pp. 1443-1444, 1992.
- WAKAMATSU, K. - *History of soil liquefaction in Japan and assessment of liquefaction potential based on geomorphology*. A Thesis in the Depart. of Architecture presented in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Engineering. Waseda Univ. Tokyo, Japan, 1993.
- YASUDA, S. - *Applicability of PL-value to mapping liquefaction potential*. Proc. 40th Annual Meeting, JSCE, Vol. 3, pp. 87-88, 1985.
- YOUD, T.L. e S.N. HOOSE - *Liquefaction susceptibility and geologic setting*. Proc. 6th World Conf. on Earthq. Eng., New Delhi, India, Vol. 6, pp. 37-42, 1977.
- YOUD, T.L. e D.M. PERKINS - *Mapping liquefaction-induced ground failure potential*. JCED, ASCE, Vol. 104(GT4), pp. 433-446, 1978.