

VOLUME II Caracterização e Diagnóstico

ABRIL 2004

- Apreciação do Risco Sísmico no Algarve

ANEXO J



ÍNDICE

PRE	EÂMBULO	5
1.	PARTE 1 – O Algarve	7
	1.1. Sismicidade	7
	1.2. Enquadramento Neotectónico	17
	1.3. Tectónica da Região do Algarve	21
	1.4. Perigosidade Sísmica	23
	1.5. Características dos materiais que constituem as principais formações geológicas superficiais do Algarve. Tentativa de classificação dos solos	26
	1.6. Considerações Finais	30
	1.7. Referências	34
2.	PARTE 2 – A Cidade de Faro	39
	2.1. Enquadramento geodinâmico da região de Faro	39
3.	PARTE 3. Plano de Risco Sísmico	43
	3.1. Introdução	43
	3.2. Causas de Vulnerabilidade Sísmica Urbana	44
	3.3. Redução do Risco Sísmico	45
	3.4. Factores que Condicionam os Danos	48
	3.5. Estratégias de Mitigação do Risco	51
	3.6. Conclusão	52
	3.7. Trabalhos Futuros	54



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	-	Carta de isossistas do sismo de 1356 (Justo et al,1992)	8
Figura 2	-	Carta de isossistas do sismo de 1722 (Moreira et al,1993)	9
Figura 3a	-	Carta de isossistas do sismo de 1755: Dados de Espanha (Mezcua, pers.com), Portugal (Pereira de Sousa, 1919) e Marrocos (Gentil e Pereira de Sousa, 1913, e (Levret, 1991)	10
Figura 3b	-	Carta de isossistas do sismo de 1755 no Algarve (Pereira de Sousa, 1919)	11
Figura 4a	-	Carta de isossistas do sismo de 1909 (Machado, 1919 e Choffat, 1919)	12
Figura 4b -	Ca	rta de isossistas do sismo de 1909 no Algarve (Choffat, 1919)	12
Figura 5	-	Carta de isossistas do sismo de 1964 no Algarve (Anuário Sismológico, 1964)	13
Figura 7	-	Carta de isossistas do sismo de 1969 (Anuário Sismológico, 1969)	14
Figura 8	-	Danos em Vila do Bispo durante o sismo de 1969	14
Figura 9	-	Carta de intensidades máximas históricas (IM, 2000)	15
Figura 10	-	Conversão de intensidades máximas IMM em acelerações máximas: a) valor médio; b) valores experimentais colhidos de sismos na Califórnia de 1933 a 1973	16
Figura 11	-	Sismicidade em Portugal Continental e região limítrofe (63 AC – 1990 DC)	16
Figura 12	-	Os melhores epicentros do período 1998-2003 (Carrilho et al, 2004)	17
Figura 13	-	Enquadramento Geodinâmico da Península Ibérica e região SW (Cabral, 1993)	18
Figura 14a	-	Possível mecanismo para o Terramoto de 1755: localização epicentral proposta por vários autores	19
Figura 14b	-	A partir de prospecção sísmica (Zitellini et al., 1998)	19
Figura 15	-	Modelo sismotectónico esquemático da Região Ibero-africana segundo Buforn et al, 2004	20
Figura 16a	-	Localização das principais falhas activas que atravessam o Algarve (Dias et al., 1999)	21



Figura 16b-	Esquema das prinipais falhas e mecanismos de sismos associados: FA – Falha da Aljezur; FP – Falha de Portimão; FSMQ – Falha de São Marcos-Quarteira; ZFG – Falha do Guadiana (hipotética)	21
Figura 17a-	Pormenorização das principais falhas activas que atravessam o Barlavento Algarvio (Oliveira et al., 1999)	22
Figura 17b-	Pormenorização das principais falhas activas que atravessam o Sotavento Algarvio (Oliveira et al., 1999)	22
Figura 18a -	Carta de perigosidade (PGA 1000 anos de período de Retorno), Oliveira,1997; b) Zonamento sísmico de acordo com o Regulamento de Segurança e Acções em Edifícios e Pontes (1983)	24
Figura 19 -	Curvas de perigosidade (casualidade) sísmica para o Continente: Intensidades (Sousa et al., 1997)	25
Figura 20 -	Mapa de perigosidade (casualidade) sísmica para o Continente (Oliveira et al., 1997) e respectivas probabilidades de excedência	25
Figura 21a-	Carta Geológica do Barlavento Algarvio obtida da escala 1: 100.000 (de Carvalho et al., 2003)	28
Figura 21b-	Carta Geológica do Sotavento Algarvio obtida da escala 1: 200.000, onde se estabeleceu a classificação dos solos	29
Figura 22 -	Classificação de Solos de acordo com a classificação de Penelis (1997) feita a partir da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:200.000	29
Figura 23 -	Probabilidades de ocorrência de diversas magnitudes para 4 zonas sísmicas: a) Vale Inferior do Tejo; b) Gorringe; c) Algarve; e d) Margem Alentejana	31
Figura 24 -	Frequências Predominantes dos solos de Faro de acordo com a geologia superficial	40
Figura 25 -	Intensidades na escala EMS-98 para o caso de se considerar diferenciação do solo, cenário afastado	42



ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 -	Sismos que mais afectaram o Algarve (Catálogo LNEC, 1996; Magnitude (*) – Vilanova, 2003)	7
Quadro 2 -	Coeficiente de Poisson e VP/VS para estratos superficiais no Oeste Algarvio calculados por estudos de refracção (Carvalho et al. (2003)	26
Quadro 3 -	PGA´s e Intensidades EMS 98 para diferentes magnitudes e distâncias epicentrais, com as correspondentes probabilidades associada	42
Quadro 4 -	Sequência dos Planos necessários para mitigar os efeitos dos danos provocados por um sismo	53



PREÂMBULO

O Instituto Superior Técnico, através do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura tem realizado desde 1998 um conjunto de estudos de risco sísmico da cidade de Faro. Já anteriormente, entre 1994 e 1997, este Instituto havia colaborado num projecto da Fundação da Ciência e Tecnologia designado ECARISCOPO sobre o estudo genérico dos solos e tipos estruturais da zona histórica de Faro.

O trabalho realizado desde 1998 consistiu essencialmente no levantamento do parque edificado, edifício a edifício, segundo uma ficha em que se salientaram as principais características para a avaliação do seu comportamento sob a acção dos sismos. A zona levantada começou por ser um complemento ao existente já no Centro Histórico, prolongou-se numa segunda fase até à 1ª circular (Aboim Ascenção) e numa terceira fase, mais recentemente, até à 2ª circular (Av. Calouste Gulbenkian). Este levantamento foi objecto de cartografia em base informática dando origem a um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Os levantamentos realizados no âmbito do Centro Histórico de Faro e a cartografia digital da cidade foram disponibilizados por vários serviços da Câmara Municipal de Faro, tendo sido adaptados para a realização do SIG geral de toda a cidade incluída na 2ª circular. Os outros levantamentos foram efectuados por equipas de Engenheiros de Território do IST, aquando do seu Estágio Final de Curso, no 5º ano, e em trabalhos subsequentes já após o término da licenciatura.

Conseguiu-se desta forma conhecer com algum detalhe os edifícios que compõem a quase totalidade do parque habitacional da cidade (meados dos anos 1990), e o seu arranjo geográfico dentro dos quarteirões onde se inserem. As características levantadas para cada edifício, nomeadamente a época da construção, número de andares, tipologia construtiva, vazamento do rés do chão, inserção no quarteirão e estado de conservação permitiram estabelecer uma primeira classificação de vulnerabilidade destes edifícios aos sismos.

Paralelamente ao parque habitacional procedeu-se ao estudo da população residente e respectiva mobilidade para diferentes horas do dia, tendo como base diversas unidades geográficas e a atracção exercida por cada uma delas sobre as outras.

A aplicação destes conceitos a dois sismos típicos que podem assolar a região, um com epicentro afastado e magnitude elevada (M=8,5) e outro próximo com magnitude moderada (M=7) causam danos importantes no parque existente podendo originar mortos, feridos e um grande número de desalojados, para além de provocar a desorganização do tecido social existente.

Os resultados até agora conseguidos estão expressos através de dois Relatórios; o primeiro constitui o Projecto Final de Curso dos então finalistas de Engenharia do Território, Mónica Ferreira, Mónica Oliveira, Cristina Sá Dias e Paula Pestana datado de 1999 e cujo exemplar foi entregue em tempo oportuno nessa Direcção; o segundo Relatório, abrangendo toda a cidade de Faro até à 2ª circular ficou terminado recentemente. Os elementos que servem de apoio a todo o estudo encontram-se na base de dados constituída e montado num SIG em ArcView 3.2.

É indispensável continuar os estudos para poder clarificar alguns aspectos que encerram alguma incerteza, analisar outros cenários sísmicos possíveis, diferentes dos dois já observados, introduzir outros aspectos como os das estruturas vitais (escolas, centros de concentração de população, edifícios patrimoniais, edifícios da administração, etc.) ter em conta aspectos de maior





detalhe designadamente sobre os solos constituintes, sobre o comportamento em quarteirão, recorrendo às ferramentas mais recentemente desenvolvidas em investigação nestas matérias.

Uma outra iniciativa foi tomada com vista à elaboração de planos de emergência para o Algarve. Insere-se num conjunto de estudos promovidos pelo Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil, o primeiro dos quais diz respeito à "Área Metropolitana de Lisboa e Concelhos Limítrofes", tendo dado origem a um simulador de cenários sísmicos, cada qual para uma dada magnitude e uma determinada localização epicentral. Este simulador avalia a distribuição do movimento sísmico sentido em cada ponto do território, função da magnitude e da posição do epicentro, tendo em conta a geologia superficial da zona de cada ponto. Posteriormente estima os danos infligidos no parque habitacional e nos chamados pontos vitais, bem como nas redes e infraestruturas existentes. Estima ainda os efeitos sobre a população, função da hora, mês, etc. a que tem lugar a ocorrência sísmica. Todo o trabalho está desenvolvido num Sistema de Informação Geográfica (SIG).

O estudo para o Algarve iniciou-se em Janeiro de 2001, com a recolha de elementos de base para a elaboração de um SIG, encontrando-se suspenso desde Janeiro de 2002.



1. PARTE 1 – O ALGARVE

1.1. SISMICIDADE

A sismicidade que afecta a região do Algarve manifesta-se por uma actividade importante, associada à Fractura que separa as Placas Euro-Asiática e Africana, e que relativamente ao Continente, constitui uma faixa que se estende, aproximadamente, desde o Banco submarino do Gorringe (SW do continente Português) até ao estreito de Gibraltar.

Nesta área ocorreram vários sismos históricos de elevada magnitude (e.g. o sismo de 1755 de Lisboa), Quadro I.

Embora a sismicidade no mar seja bastante mais significativa do que em terra (Dias et al., 1997), regista-se também uma importante actividade sísmica instrumental no interior e perto do litoral.

O Catálogo Sísmico Nacional, reportando eventos desde o início da Era de Cristo até aos nossos dias, mostra uma sismicidade histórica (sismos anteriores ao início do séc XX) recheada de eventos de grande magnitude que causaram danos muito importantes no Algarve e uma sismicidade instrumental (após 1900 com a instalação dos primeiros sismógrafos) com um enorme número de eventos, dos quais três ou quatro causaram danos significativos. Para além dos Terramotos de 1356 e de 1755 com epicentro a oeste do Cabo de São Vicente, a sismicidade histórica refere a ocorrência de importantes eventos com epicentro em terra, dos quais importa salientar pela sua importância os de Portimão (1719, Intensidade Mercalli Modificada máxima IMM = IX), Tavira (1722, IMM = IX) e Loulé (1856, IMM = VIII). O Quadro I apresenta os sismos que mais afectaram o Algarve desde o princípio da Era de Cristo, com as datas de ocorrência, localização epicentral e magnitude. De notar que os erros nos valores indicados é tanto maior quanto mais antigo é o evento. Com o aparecimento da instrumentação sismológica no princípio do séc. XX e sua evolução nos últimos 100 anos, os erros na localização do epicentro e na avaliação da magnitude tem vindo a decrescer significativamente.

Ano	Mês	Dia	Latitude	Longitude	Magnitude,M _L
309	2	22	37.00	-11.00	7.0
382	1	1	36.88	-10.00	7.5
1356	8	24	36.00	-10.70	7.5 (7.5)
1504	4	5	38.70	-5.00	7.0 (6.9)
1719	3	6	37.10	-7.00	7.0 (7.0)
1722	12	27	37.17	-7.58	7.8 (6.9)
1755	11	1	36.88	-10.00	8.5 (8.7)
1856	1	12	37.10	-8.00	6.0 (5.5)
1858	11	11	38.20	-9.00	7.2 (7.1)
1896	10	30	37.50	-8.20	5.0 (4.7)
1903	8	9	38.40	-9.00	5.5 (6.5)
1909	4	23	37.10	-8.90	7.0 (6.3)
1964	3	15	36.13	-7.75	6.2 (6.2)
1969	2	28	36.20	-10.60	7.5 (7.8)

Quadro 1 - Sismos que mais afectaram o Algarve (Catálogo LNEC, 1996; Magnitude (*) - Vilanova, 2003)



Apresentam-se seguidamente (Figs. 1 a 7) as cartas de isossistas dos principais sismos do Quadro 1, dando especial ênfase à distribuição das intensidades no Algarve.





Este sismo de 24 de Agosto de 1356, é segundo Justo et al (1992), talvez o mais antigo dos terramotos peninsulares razoavelmente documentados. A base fundamental para o estudo deste terramoto é a "Crónica del Rey D. Pedro" da autoria de Pedro López d'Ayala, contemporâneo do acontecimento.

Com possível epicentro a SSW do cabo de São Vicente e magnitude muito elevada, apresenta intensidades máximas no Barlavento algarvio junto à costa, com valores que atingem o grau IX, evidenciando uma clara preferência de propagação das ondas sísmicas segundo um eixo coincidente com o vale do rio Guadalquivir. Nos outros locais do Algarve a intensidade foi de VIII.





Figura 2 - Carta de isossistas do sismo de 1722 (Moreira et al,1993)

O sismo de 27 de Dezembro de 1722 poderá estar associado a alguma estrutura geológica do litoral algarvio. A intensidade máxima observada foi de IX num raio aproximado de 25 km, incluindo Loulé do lado oeste e Tavira a leste. De acordo com Moreira et al. (1993), o restante território do Algarve esteve sujeito a intensidades de VIII. A magnitude deste sismo deverá situarse no intervalo (6.9-7.2).





Figura 3a - Carta de isossistas do sismo de 1755: Dados de Espanha (Mezcua, pers.com), Portugal (Pereira de Sousa, 1919) e Marrocos (Gentil e Pereira de Sousa, 1913, e (Levret, 1991)



Figura 3b - Carta de isossistas do sismo de 1755 no Algarve (Pereira de Sousa, 1919)





Este é o sismo de maior magnitude que afectou Portugal desde que há notícias históricas. Atingiu todo o território algarvio com intensidades variando entre VIII e X, sendo a de X em toda a zona litoral do Barlavento até Faro. A atenuação das ondas sísmicas deu-se para norte de forma aproximadamente paralela à costa. Os efeitos do sismo em todas as povoações do Algarve está descrito de forma muito completa por Pereira de Sousa (1923), tanto sobre as populações como sobre as construções.



Figura 4a - Carta de isossistas do sismo de 1909 (Machado, 1919 e Choffat, 1919)

Figura 4b - Carta de isossistas do sismo de 1909 no Algarve (Choffat, 1919)





O sismo de 23 de Abril de 1909 teve epicentro no Vale Inferior do Tejo onde causou grandes intensidades e foi sentido no Algarve em quase todas as povoações, com intensidade III-IV. Curiosamente, de entre as cidades algarvias, em Faro o sismo praticamente não foi sentido.



Figura 5 - Carta de isossistas do sismo de 1964 no Algarve (Anuário Sismológico, 1964)

O sismo de 15 de Março de1964 tem epicentro no Atlântico (Golfo de Cádiz), associado às estruturas geológicas de colisão que se prolongam pelo Vale do Guadalquivir, e onde tem havido alguma actividade sísmica detectada na rede actual sísmica (epicentros a cerca de 70-80 km a SE de Faro). A intensidade máxima observada para este sismo de magnitude 6.2 foi de VII na região mais a leste, diminuindo progressivamente para oeste chegando a IV na zona de Sagres.





Figura 7 - Carta de isossistas do sismo de 1969 (Anuário Sismológico, 1969)

Figura 8 - Danos em Vila do Bispo durante o sismo de 1969



O sismo de 28 de Fevereiro de 1969 foi o último evento com danos estruturais importantes. Teve epicentro a SW do cabo de São Vicente e foi sentido na zona de Sagres com intensidade VIII. No Barlavento até junto a Faro a intensidade foi de VII sendo de VI para leste de Faro. Observaramse estragos importantes em casas de alvenaria antiga de pior qualidade em várias localidades, nomeadamente na Vila do Bispo (Figura 8), Bensafrim, e em Portimão. A magnitude deste sismo (ML=7.5) é cerca de uma ordem de grandeza inferior à do terramoto de 1755, tendo tido também o seu epicentro mais afastado do que este sismo.

A colecção dos sismos históricos e instrumentais ocorridos no território do Continente permite fazer o traçado da Figura 9 onde se exprimem os valores máximos das intensidades Mercalli



Modificada (IMM) observados em todos os locais do País. Para o Algarve a Figura mostra uma faixa de intensidade X ao longo de todo o distrito, com maior incidência na região litoral.

Idêntica conclusão se pode retirar através de uma análise mais fina dos mapas de isossistas (intensidades) apresentados nas Figuras 1 a 7. Verifica-se que ao longo de mais de um milénio, por diversas vezes, se observaram intensidades superiores a VII e, em alguns casos, VIII.



Figura 9 - Carta de intensidades máximas históricas (IM, 2000)





Figura 10 - Conversão de intensidades máximas IMM em acelerações máximas: a) valor médio; b) valores experimentais colhidos de sismos na Califórnia de 1933 a 1973

Na Figura 10 mostra-se uma conversão de intensidades EMS-98 (nova escala com base na IMM mas com um suporte mais quantitativo) em acelerações máximas (PGA -"peak ground acceleration"), que nos mostra que uma intensidade de IX corresponde aproximadamente a acelerações máximas de 50% de g (g=9.8 m/s2). Embora a conversão apresentada contenha em si uma grande dispersão, como é notório na Figura 10 b), estamos em presença de movimentos do solo de grande expressão, o que naturalmente conduz a grandes exigências no que respeita às acções a considerar na definição da acção sísmica para avaliação da segurança estrutural das construções.









Figura 12 - Os melhores epicentros do período 1998-2003 (Carrilho et al, 2004)

Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se, respectivamente, as cartas de epicentros de todos os sismos do Catálogo até 1990 (LNEC, 1996) e os sismos dos últimos 5 anos em que as determinações quer da localização dos epicentros quer a avaliação das magnitudes é a que contém maior rigor. De notar que os epicentros se começam a agrupar em manchas mais limitadas, possivelmente mostrando uma tendência para alinharem em torno de estruturas geológicas mais activas, como se mostrará na secção seguinte.

1.2. ENQUADRAMENTO NEOTECTÓNICO

Como se referiu atrás, a região do Algarve localiza-se na placa Euro-Asiática, perto do sector oriental da fronteira de placas Euro-Asiática - África, compreendido entre o Arquipélago dos Açores e o Estreito de Gibraltar, e que se estende ao longo da zona de fractura Açores – Gibraltar até à margem continental Oeste – Ibérica, Figura 13. O movimento das Placas no troço da Fractura à esquerda do Banco de Gorringe é de tipo "desligamento esquerdo" com a orientação E-W exibindo uma taxa de deformação de cerca de 15 a 20 mm/ano. À medida que se caminha para Leste a direcção do movimento vai-se modificando, tornando-se de convergência entre as duas Placas junto à Península Ibérica, com a direcção predominante de compressão segundo NNE-SSE. Presentemente o movimento processa-se à taxa de 5 a 6 mm/ano, Buforn et al, 2003 e Borges 2003. Mais para Leste o sistema de Fractura deverá dar origem a uma mini-Placa da Alboran com duas fronteiras, uma a norte coincidindo com a falha de Guadalquivir, no prolongamento do rio do mesmo nome e outra a dirigir-se para SE para África. O regime geodinâmico entre a zona do Banco de Gorringe e o Algarve é muito complexo. Foi aí que teve lugar o Terramoto de 1755, cujo mecanismo de geração continua a originar grande controvérsia. Esta controvérsia prende-se com a localização de falha extensa que tem de romper para originar as intensidades referidas na sismicidade histórica e com a forma como se poderá ter dado a rotura dessa mesma falha ou falhas. A Figura 14 dá conta de um dos modelos recentemente propostos.



Na zona a sul do Algarve os sismos são essencialmente de tipo "inverso" e de tipo "desligamento esquerdo" nas falhas que atravessam o território Algarvio na direcção NS (Aljezur, Portimão, São Marcos-Quarteira e Guadiana).









Figura 14a - Possível mecanismo para o Terramoto de 1755: localização epicentral proposta por vários autores

Figura 14b - a partir de prospecção sísmica (Zitellini et al., 1998)



Nas Figura 15a) e b) mostra-se uma recente interpretação da geodinâmica do contacto das Placas desde o Banco de Gorringe até ao Mediterrâneo Ocidental, com diferenças importantes na forma como se desenvolve a actividade sísmica (parâmetro b), e do tipo de magnitudes que se podem gerar (parâmetro Mo). É notória a presença da mini-Placa de Alborão, "encravada" entre as outras duas. A principal influência para o Algarve resume-se à região a Oeste, que, por sua vez, se desdobra em várias sub-zonas, como atrás se explanou.





Figura 15 - Modelo sismotectónico esquemático da Região Ibero-africana segundo Buforn et al, 2004

Os valores b (Figura 15) representam a relação entre o número de sismos de maior magnitude e os de menor magnitude; v – mede a velocidade de aproximação das placas; e Mo o momento sísmico máximo que pode ser originado na zona (proporcional à magnitude). O sector A do contacto das Placas Euro-Asiática e Africana onde se situa o Algarve, é o que se caracteriza por maior sismicidade (maior número de ocorrências) e magnitudes mais elevadas.



1.3. TECTÓNICA DA REGIÃO DO ALGARVE

Nas proximidades do Continente a Neotectónica assume a presença de várias falhas, como se descreve na Figura 16. Estas falhas, que se prolongam para sul no Oceano, estão cartografadas de forma clara, assumindo maior expressão as da Aljezur, Portimão, Quarteira-São Marcos, e num pequeno troço a de Loulé. Aparecem outras falhas mais pequenas, Figura 17, aparentemente de menor importância. Às primeiras quatro falhas é possível fazer corresponder alguns pequenos sismos recentemente registados na Rede Sísmica Nacional. O sismo de 1722 porventura poderá estar associado a falha de Loulé.

Figura 16a - Localização das principais falhas activas que atravessam o Algarve (Dias et al., 1999)



Figura 16b - Esquema das prinipais falhas e mecanismos de sismos associados: FA – Falha da Aljezur; FP – Falha de Portimão; FSMQ – Falha de São Marcos-Quarteira; ZFG – Falha do Guadiana (hipotética)







Figura 17a - Pormenorização das principais falhas activas que atravessam o Barlavento Algarvio (Oliveira et al., 1999)

Figura 17b - Pormenorização das principais falhas activas que atravessam o Sotavento Algarvio (Oliveira et al., 1999)





1.4. PERIGOSIDADE SÍSMICA

A perigosidade sísmica ("Hazard") do Algarve tem sido objecto de diversos estudos conduzidos em Portugal por diversas entidades em diferentes alturas. Os primeiros estudos tiveram lugar nos finais da década de 1970 – princípios de 1980, tendo dado origem ao mapa da Figura 18 a) que refere a acelerações máximas (PGA) com probabilidade de serem excedidas de 5% em 50 anos, Oliveira (1977) (corresponde a um período de retorno de 1000 anos). Estes estudos deram posteriormente origem à carta contida no RSA(1983), que dividiu o Continente em quatro grandes zonas, Figura 18 b).

Estes estudos de perigosidade sísmica são desenvolvidos de acordo com as seguintes fases (Oliveira e Cabañero, 2001):

⇒Caracterização das fontes sísmicas que influenciam o local em estudo;

- \Rightarrow Caracterização da sismicidade associada a essas fontes;
- \Rightarrow Atenuação das ondas geradas na fonte sísmica e propagadas até ao local.
- ⇒Em alguns casos considera-se ainda fazendo parte da acção sísmica a influência das camadas superficiais do solo do local em estudo. O mais usual é, no entanto, considerar a influência do solo separadamente, através da forma do espectro da acção.

A caracterização das fontes faz-se a partir do conhecimento geodinâmico e sismológico da região em estudo, a sismicidade a partir dos Catálogos Sísmicos e outras observações históricas e arqueológicas, e finalmente, a atenuação obtém-se através da análise de sismos históricos, da interpretação de registos sobre sismicidade instrumental e através de modelação matemática da propagação das ondas sísmicas.

Existem diversos modelos matemáticos que, trabalhando os dados e características anteriormente definidas, permitem determinar a probabilidade de ocorrência de dada variável do movimento associada ao local em estudo.

Nos estudos que originaram o RSA (1983) utilizou-se toda a informação disponível à data e que consistia essencialmente num conjunto de dados sismológicos apresentados na forma de catálogo (Oliveira, 1977). Devido às muitas incertezas existentes em todo o processo de cálculo, foram desenvolvidos esforços no sentido de analisar alguns dos parâmetros que maior contribuição traziam aos resultados finais. Assim, aplicaram-se dois modelos matemáticos para o cálculo das funções de distribuição de probabilidades, estabeleceram-se várias geometrias para as fontes e trabalhou-se com curvas de atenuação baseadas em intensidade MM referentes aos sismos históricos mais importantes.

Após os trabalhos de Oliveira (1977) e com base nos desenvolvimentos referidos nas secções anteriores, foram realizados diversos estudos de perigosidade ("hazard") para o Continente, produzindo diferentes resultados. Enumeram-se seguidamente os principais estudos, apresentando-se resumidamente os resultados obtidos.

Sousa et al. (1996) obteveram as curvas de perigosidade sísmica para diversos pontos do País, como se mostra na Figura 19, onde Lagos surge com maior perigosidade (grau IX-X para 1000 anos de período de retorno). Oliveira et al. (1997), seguindo uma metodologia semelhante à



exposta no trabalho anterior, chegam a um zonamento do território do Continente apresentado na Figura 20, em que o Algarve surge na zona de maior perigosidade, e para a qual a intensidade IMM para um período de retorno de 1000 anos é ligeiramente abaixo do grau IX. Estes valores correspondem a PGA's de 300 a 400 cm/s2 (Figura 10) cerca de 2 vezes os valores obtidos nos estudos de 1977.

Outros estudos recentes tem mostrado que a perigosidade no Algarve é semelhante ao referido anteriormente, com grandes incertezas provenientes da dificuldade em delimitar as zonas de geração sísmica, a actividade nelas existente e nas curvas de atenuação. Variações de 1:2 encontram-se a nível de PGA's quando se trabalha de valores médios para valores médios mais um desvio padrão (Estêvão et al., 1999). Em termos de IMM estas variações são aproximadamente de 1 grau.

Em todos os estudos sobressai a conclusão de que a perigosidade no Algarve é praticamente constante ao longo de toda a costa, numa faixa litoral onde toma valores máximos e que começa a decrescer à medida que se caminha para norte. Uma selectividade de mecanismos, que é bem clara através das fontes de geração, não se encontra reflectida em nenhum trabalho sobre perigosidade sísmica, mesmo nos estudos mais recentes.

Tal não é a leitura que se pode fazer das intensidades observadas nos sismos históricos, onde esta selectividade está presente. Na secção seguinte procede-se a uma análise do efeito dos solos que naturalmente introduzem aqui uma componente importante de selectividade.

Figura 18a - Carta de perigosidade (PGA 1000 anos de período de Retorno), Oliveira,1997; b) Zonamento sísmico de acordo com o Regulamento de Segurança e Acções em Edifícios e Pontes (1983)









Figura 19 - Curvas de perigosidade (casualidade) sísmica para o Continente: Intensidades (Sousa et al., 1997)

Figura 20 - Mapa de perigosidade (casualidade) sísmica para o Continente (Oliveira et al., 1997) e respectivas probabilidades de excedência



1.5. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS QUE CONSTITUEM AS PRINCIPAIS FORMAÇÕES GEOLÓGICAS SUPERFICIAIS DO ALGARVE. TENTATIVA DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Segundo um estudo de Carvalho et al. (2003) foi possível estabelecer uma primeira classificação dos solos superficiais das principais formações do Algarve, para efeitos de verificação de amplificação das ondas sísmicas. Esse estudo, realizado para a zona de Barlavento, seguiu uma classificação de solos utilizada em versões do EURO-CÓDIGO 8.

Os materiais presentes estão descritos no Quadro II, onde se apresentam as velocidades das ondas P e S (SH) para várias formações superficiais sobrejacentes a segundas camadas de terrenos mais firmes. Estudos realizados em Faro (Almeida et al, 1999) mostram que as velocidades das ondas S para solos arenosos rondam os 190 m/s, os aluviões 130 m/s e os solos mais consolidados os 360 m/s.

Geologia	Velocidade (m/s) da		VP1/VS1	Coeficiente de Poisson	Velocidade (m/s) da 2ª camada		VP2/VS2	Coeficiente de Poisson
	Onda P	Onda SH			Onda P	Onda SH		
Areia	265	108	2.45	0.40	1902	301	6.32	0.49
Areia de Duna	541	166	3.26	0.45	2038	291	7.00	0.49
Cascalheiras do	325	188	1.73	0.25	1396	885	1.58	0.16
Quaternarium	499	331	1.51	0.11	905	520	1.74	0.25
Faro	285	189	1.51	0.11	736	457	1.61	0.19
Quarteira	365	250	1.46	0.06	816	495	1.65	0.21
Cascalheira	529	307	1.72	0.25	826	472	1.75	0.26
Siltes Glauco-	255	111	2.30	0.38	724	340	2.13	0.36
níticos de Faro								
Lagos	249	113	2.20	0.37	736	376	1.96	0.32
Portimão	311	193	1.61	0.19	582	334	1.74	0.25
Calcário	365	179	2.04	0.34	1152	665	1.73	0.25
	308	121	2.55	0.41	1795	1222	1.47	0.07

Quadro 2 - Coeficiente de Poisson e VP/VS para estratos superficiais no Oeste Algarvio calculados por estudos de refracção (Carvalho et al. (2003)

A classificação local do subsolo foi estabelecida na base na proposta de Penelis (1997), realizada para a classificação de solos do Euro-Código. Esta foi uma das primeiras propostas de classificação dos solos para efeitos de caracterização dos espectros de resposta que podem ser registados à superfície destes solos. Posteriormente houve pequenas correcções que foram introduzidas na versão final do Euro-Código 8 (2004).

A classificação dos solos usa os valores das velocidades das ondas S (de corte) ou os valores dados por ensaios dos testes SPT (Standard Penetration Tests). Deve anotar-se que, frequentemente, os valores tomados referem a valores médios de um conjunto de sondagens dentro de uma área mais ou menos extensa, permitindo ganhar maior controlo sobre a representatividade das sondagens.

As condições do solo estão representadas pela velocidade das ondas S e pela espessura de cada camada (Penelis, 1997). Devido à dificuldade em determinar a base da segunda camada com métodos de refracção sísmica, usaram-se também os valores do SPT, quando disponíveis para determinar a presença da camada seguinte ou do bedrock. Estes valores do SPT que foram incluídos nesta classificação do solo, não constam da classificação original proposta por Penelis (1997), embora constem já das novas propostas dos Euro-Código 8. Os critérios adaptados da classificação foram:



Classe A de subsolo

formato geológico caracterizado por VS > 800 m/s

Classe B de subsolo

depósitos de areias muito densas, de cascalho ou de argilas duras com espessura de dezenas a centenas de metros (VS = 360 m/s à profundidade de 10 m até VS = 800 m/s à profundidade de 50 m (SPT: N~60))

Classe C de subsolo

depósitos profundos da areia densa ou médio-densa, de cascalho ou

de argilas duras com espessura de dezenas a centenas de metros (Vs = 180 m/s até 360 m/s)

Classe D de subsolo

depósitos com solos de coesão fraca com ou sem camadas de solos coesivos moles (Vs < 180 m/s (SPT: N <=10))

A cartografia geológica baseou-se em diversas cartas com escalas entre 1:50.000 a 1:500.000. Particularmente útil foi o mapa geológico de 1:100.000 (Manupella 1992). No entanto, como à época do estudo somente o mapa de 1:500.000 (Oliveira 1992) estava disponível em versão digital, os resultados apresentados referem-se a essa escala, Figura 21.







Figura 21a - Carta Geológica do Barlavento Algarvio obtida da escala 1: 100.000 (de Carvalho et al., 2003)

Esta classificação do solo, com base nas cartas geológicas 1:200.000 para o Algarve, está apresentada na Figura 22. As formações Mesozóicas e Paleozóicas não foram directamente incluídas porque, dada a sua rigidez, se aceita que representam um risco muito baixo de amplificação ou do liquefacção (Jorge 1994).

É de acentuar que, como a amostragem espacial foi limitada e a profundidade do trabalho reduzida, a aplicação ao Algarve deve ser vista de forma global. O zonamento produzido constitui uma primeira tentativa que pode ser mais ser refinado no futuro combinando os dados agora tratados com outros tipos dos dados, tais como a determinação das frequências predominantes da resposta do solo (Nakamura, 1987).

Como a classificação indica os solos com maior amplificação encontram-se ordenados de B para D, sendo D o que maior amplicação sofre, função do tipo de espectro que é aplicado na sua base.





Figura 21b - Carta Geológica do Sotavento Algarvio obtida da escala 1: 200.000, onde se estabeleceu a classificação dos solos

Figura 22 - Classificação de Solos de acordo com a classificação de Penelis (1997) feita a partir da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:200.000





Carvalho et al. (2003), a partir de perfis sísmicos da reflexão realizados num segmento da Falha São Marcos-Quarteira melhoraram a localização desta e sugerem que esta falha principal tenha sido reactivada na forma de falha "reverse". Indicam também que existe uma deformação extensiva nos depósitos Quaternários, provavelmente relacionados com este acidente principal.

Embora um mapa do potencial de liquefacção já exista para a região baseada em critérios de ordem geológica (Jorge 1994), estabeleceu-se uma primeira classificação dos solos baseada em dados de natureza geotécnica e geológica, com vista a definir as zonas de maior potencial para amplificação dos movimentos sísmicos. É de notar que as intensidades sísmicas (IMM) mais elevadas que se observam nas cartas de sismos ocorridos coincidem de forma genérica com a localização dos solos mais brandos. Para se obter maior rigor no traçado é indispensável trabalhar a escala mais fina e recorrendo a outros elementos, designadamente à informação que se pode colher das inúmeras sondagens que foram realizadas quer para as obras de construção civil quer para a pesquisa de aquíferos. O refinamento deste mapa permitirá um melhor uso do solo quer para a construção de edifícios quer para outras infra-estruturas públicas numa escala local.

1.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Algarve encontra-se numa região de moderada a elevada perigosidade sísmica dada a proximidade da fronteira das placas Ibérica (Euro-Asiática) e Africana. A actividade sísmica aponta para movimentos de forte intensidade em toda a região algarvia embora com diferenças de conteúdo espectral de Barlavento para Sotavento. Podem-se apontar quatro tipos principais de fontes sísmicas que afectam o Algarve, três delas ligadas à fronteira de Placas e a quarta com origem nas falhas ou estruturas geológicas recentes que atravessam o território:

(i) Zona a Oeste do Cabo de São Vicente, localizada a sul do Banco de Gorringe, onde teve epicentro o sismo de 1969, e onde a actividade sísmica é muito elevada;

(ii) Zona paralela à costa Ocidental do Algarve onde poderá ter tido origem o Terramoto de 1755, localizada entre 100 e 150 km da costa;

(iii) Uma grande faixa a sul do Algarve, paralela à costa a mais de 100 km desta, por onde passará a fronteira das Placas e com sismicidade bastante acentuada, e por onde poderá ter passado a rotura de 1755;

(iv) As Falhas em terra, que atravessam o território do Algarve e se prolongam para sul no Oceano, responsáveis por actividade sísmica mais moderada. Dentre estas é de salientar, pela sua expressão as de Portimão, Quarteira- São Marcos da Serra e Loulé.

Os sismos pertencentes aos três primeiros tipos são de maior magnitude, essencialmente os dois primeiros que poderão atingir magnitudes muito elevadas embora com menor probabilidade de ocorrência.

Na Figura 23 mostram-se as probabilidades de ocorrências de diferentes magnitudes nas 4 zonas mais importantes de Portugal Continental. Aí se mostra que os maiores sismos ocorrem na zona geral de Gorringe e que a ocorrência dos sismos mais pequenos é também maior que nas outras zonas.



Contudo, devido à distância epicentral, as zonas mais afectadas, independentemente dos solos, serão de Barlavento. Os espectros produzidos por estes sismos são de maior conteúdo energético nas baixas frequências, afectando selectivamente as construções de maior porte e criando um maior potencial para a ocorrência de liquefacção dos solos. São também sismos aos quais poderão associar-se fenómenos tsunamigénicos.

Os sismos do grupo (iv), ligados às falhas em terra produzem sismos de menor magnitude mas mais alta aceleração, principalmente nas vizinhanças do traço das falhas, afectando quer as estruturas nas suas proximidades devido à presença das falhas quer sobre as construções de menor porte, mais vulneráveis às altas frequências que estes sismos provocam.

As vibrações originadas na fonte são propagadas através das camadas da Crosta Terrestre e transmitidas aos solos superficiais. Quanto mais brandos estes forem maiores amplificações do movimento se podem dar, podendo em determinados casos duplicar as amplitudes e a duração da parte intensa do movimento. Daí que se tenham observado maiores intensidades sísmicas no Terramoto de 1755, precisamente nas zonas de solos mais brandos. Também o potencial de liquefacção se encontra ligado aos solos arenosos com elevado nível freático.





O potencial para deslizamento será no Algarve mais no sentido de desabamento de arribas. Marques (2004) estudou este fenómeno na costa Oeste do Algarve, relacionando-o com a precipitação anual, mas não conclui nada sobre possíveis efeitos do sismo de 1969 que se sentiu fortemente na zona.

Finalmente, será de referir o possível efeito dos tsunamis sobre a linha de costa: (i) alagamento de zonas costeiras por galgamento de "restingas" ou "ilhas barreira" formando rias, dando origem a marés rápidas que invadem zonas de pequena protecção; (ii) impacto ou quebra de ondas de grande altura transportando enormes volumes de massa líquida. Este último fenómeno poderá ocorrer em zonas de falésia, designadamente como terá ocorrido no terramoto de 1755, na zona do Cabo de São Vicente em que a altura das ondas terá atingido os 60 m.



Intervenções

As intervenções que podem ter lugar por consideração da acção dos sismos caracterizam-se da seguinte forma:

- 1. <u>A nível do território</u> Definição de uma carta de perigosidade actualizada que considere as zonas de geração sísmica referidas no texto acima e uma classificação de solos de acordo com as especificações do Eurocódigo 8 e já globalmente descritas na Figura 22; o aprofundamento do conhecimento dos solos, como se refere atrás, deverá constituir uma das prioridades na definição mais detalhada da acção sísmica a considerar no projecto e estabelecimento da segurança estrutural dos parques construídos e a construir; as construções deverão obedecer a critérios de dimensionamento actualizados a partir do RSA (1983); junto do traço das principais falhas activas deverá estabelecer-se uma zona de 200 a 400 m interditando a implantação de estruturas vitais; em zonas de potencial de liquefacção deverão ser restringidos os tipos construtivos a permitir; em zonas de potencial deslizamento, quer nas zonas inferiores quer superiores, deverá ser estabelecido um espaço de proibição; em zonas susceptíveis de efeitos de tsunami também deverão ser proibidas as construções.
- 2. <u>A nível da Protecção Civil</u> As acções de Protecção Civil a ter em atenção no Algarve prendem-se com a definição das zonas de maior risco quer a nível do parque habitacional mais vulnerável, do parque industrial, das diversas infra-estruturas existentes (viárias, rodoviárias, abastecimento de águas, electricidade, saneamento básico, redes de telecomunicações, etc.). Passa também pelo conhecimento das vulnerabilidades dos chamados pontos vitais que são todas as instalações de primeira necessidade em caso de sismo, nomeadamente a rede hospitalar, quartéis de bombeiros, centros de decisão, etc. Um outro conjunto importante é constituído pelas instalações escolares, os locais de grande concentração da população (centros comerciais, estádios, etc.).

Para analisar o risco de todos estes parques e instalações, para além de um conhecimento detalhado da acção sísmica que pode ocorrer na fundação de cada estrutura em função da perigosidade sísmica e do tipo de solo de implantação, torna-se necessário conhecer a vulnerabilidade de cada tipo estrutural, vulnerabilidade esta que depende de inúmeros parâmetros designadamente a data de construção, a tipologia estrutural, o "tamanho", a relação estrutural com estruturas adjacentes e o estado de conservação.

A Protecção Civil deverá ainda conhecer a dinâmica das populações ao longo do dia para diversos dias, com vista a poder estimar o número de vítimas mortais e de feridos graves na eventualidade de um sismo.

Preconiza-se ainda a realização de exercícios onde seja possível pôr em prática aspectos organizativos do socorro nas suas diversas vertentes, desde sistemas de comunicação, logística das acções, tempos de intervenção, dimensionamento dos sistemas de socorro, etc. Os percursos das ambulâncias, os locais de concentração das pessoas, a localização de hospitais de campanha, etc., têm de ser conhecidos em função dos riscos.

Como forma de conhecimento das acções sísmicas intensas que poderão ocorrer no litoral algarvio e proceder a uma mais rápida avaliação das zonas mais atingidas, recomenda-se a instalação de uma rede de acelerómetros com transmissão directa dos registos obtidos a uma estação central. A Rede Acelerométrica Nacional, que já possui 3 instrumentos (nos Faróis de São Vicente e de Ponta do Altar – Ferragudo, e na Universidade do Algarve - Penha) desacoplados entre si, deveria ser completada com pelo menos mais 5-6 unidades a cobrir todo o território



algarvio, igualmente espaçadas e adequadamente ligadas entre si. Esta nova rede do Algarve traria a curto prazo grandes melhoramentos no conhecimento da propagação das ondas sísmicas e serviria também como identificador de zonas de maior movimento sísmico.



1.7. REFERÊNCIAS

Afilhado, A.; Teves-Costa, P.; Rios, I.; Mendes-Victor, L. A., (1999), *Risco Sísmico na Região do Algarve: Contribuição das Zonas Sismogénicas do Goringe, Margem Alentejana e Algarve*, Proceedings, Sísmica 99 – 4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Faro, pp. 103-112.

Ambraseys, N.N.; Bommer, J.J.; 1991. The Attenuation of Ground Accelerations in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 20, no. 12, pp. 1179-1202.

Ambraseys, N.N.; Simpson, K.A.; Bommer, J.J.; 1996. Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 45, pp. 371-400.

Baptista, M. A.; Miranda, J. M.; 2001. Atenuação da Intensidade Sísmica na Península Ibérica, Proceedings, 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Ponta Delgada, pp. 49-56.

Baptista, M. A.; Miranda, P. M. A.; Miranda, J. M.; Mendes-Victor, L. A.; 1998. Constraints on the Source of the 1755 Lisbon Tsunami Inferred from Numerical Modelling of Historical data on the Source of 1755 Lisbon Tsunami, Journal of Geodynamics, vol. 25, no.2, pp. 59-74.

Bender, B.; Perkins, D. M.; 1987. Seisrisk III: a Computer Program for Seismic Hazard Estimation, U. S. Geological Survey Bulletin, no. 1772.

Boore, D. M.; Joyner, W, B.; Fumal, T. E., (1994), *Ground Motion Estimates for Strike and Reverse-Slip Faults*, in Hazus99. (www.fema.org)

Borges, J. F., (2003), *Fonte Sísmica em Portugal – Algumas Implicações na Geodinâmica da Região Açores-Gibraltar*, Tese de Doutoramento, Universidade de Évora, Évora.

Buforn, E; Bezzeghoud, M.; Udias, A.; Pro, C. 2004. Seismic Sources on the Iberia-African Plate Boundary and their Tectonic Implications. Pure and Applied Geophysics, 161, 623-646.

Cabral, J.; Ribeiro, A., (1988), *Carta Neotectónica de Portugal Continental 1:1000 000*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Cabral, J; 1993. Neotectónica de Portugal Continental. PhD Thesis, University of Lisbon.

Campos-Costa, A.; Oliveira, C.S.; Sousa, M.L.; 1992. Seismic Hazard-Consistent Studies for Portugal. Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 477-482, Madrid. Ed. Balkema, Rotterdam.

Campos-Costa, A.; Sousa, M.L.; Oliveira, C.S.; 1998. Seismic Risk: Methods and Applications to Portugal. Proc. 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paris. Ed. Balkema, Rotterdam.

Campos-Costa, A; 1993. A Acção dos Sismos e o Comportamento das Estruturas. PhD Thesis, University of Oporto.



Carvalho, E. C.; Campos-Costa, A.; Sousa, M.L.; 1999. Assessment of Uniform Displacement Spectra by Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA): Application to Lisbon. Report 148/99-C3ES, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Carvalho, J. P. G, (2003), *Sísmica de Alta Resolução Aplicada À Prospecção*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Cornell, C. A.; 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 58, no. 5, pp. 1503-1606.

Der Kiureghian, A.; Ang, A.H.-S.; 1977. Fault Rupture Model for Seismic Risk Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 67, no. 4, pp. 1173-1194.

Dias, C.; Ferreira, M.; Oliveira, M.; Pestana, P., (2000), *Planeamento em Zonas de Risco Sísmico na Cidade de Faro*, Projecto Final de Curso, IST, Lisboa.

Dias, R; Cabral, J.; Terrinha, P., (1999), *Sismotectónica da Região de Faro*, Proceedings, Sísmica 99 – 4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Faro, pp 11-18.

EERI Committe on Seismic Risk, Editor; 1989. The Basics of Seismic Risk Analysis. Earthquake Spectra, vol. 5, no. 4, pp. 675-702.

ENV, EC-08; 1994. European Pre-Standard. Part 1.1.

Estevão, J. M. C.; Oliveira, C. S., (1999), *Contribuição para Avaliação do Risco Sísmico. Aplicação à Cidade de Faro*, Proceedings, Sísmica 99 – 4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Faro, pp. 93-102.

Fonseca, J.; 2002. Comunicação pessoal.

Fonseca, J.; Oliveira, C. S.; Vilanova, S.; Guerreiro, L.; 1999. Estudo Sismológico de Segurança das Barragens de Ranhados, Marateca, Meimoa e Apartadura. Report ICIST, no. 31/99, Lisboa.

Giardini, D. and P. Basham; 1993. The Global Seismic Hazard Program, Annali di Geofisica, Vol. XXXVI. N.3-4, June-July 1993.

Iria, A., (??), Relação Anónima do Terramoto de 1 de Novembro de 1755, Lisboa.

Johnston, A.; 1996a). Seismic Moment Assessment of Earthquakes in Stable Continental Regions, I, Instrumental Seismicity. Geophysical Journal International, no. 124, pp. 381-414.

Johnston, A.; 1996b). Seismic Moment Assessment of Earthquakes in Stable Continental Regions, I, Historical Seismicity. Geophysical Journal International, no. 125, pp. 639-678.

Jorge, C. R., (1994), *Zonamento do Potencial de Liquefacção*, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Kramer, S. L., (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.



López Casado, C.; Molina, S.; Delgado, J.; Peláez, J. A.; 2001. Attenuation of Intensity with Epicentral Distance in the Iberian Peninsula. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 90, pp 34-47.

Machado, F.; 1970. Curso de Sismologia. Junta de Investigação do Ultramar, Lisboa.

Manuppella, G. (Coordenador Geral), (2002), *Carta Geológica da Região do Algarve, Folhas Oriental e Ocidental à Escala 1:100 000*, Notícia Explicativa, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Manuppella, G.; Ramalho, M.; Telles Antunes, M.; Pais, J., (1987), *Carta Geológica de Portugal 1:50000: Notícia explicativa da Folha 53-A – Faro*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Marques, F. M. S. F., 2004. Landslide Activity in Upper Paleozoic shale sea cliffs : a case study along the Western Coast of the Algarve (Portugal). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, (4), 299-313.

Martín Martín, A. J.; 1984. Riesgo Sísmico en la Península Ibérica. Tese de Doutoramento, Univ. Politécnica, Madrid.

Martín Martín, A. J.; 1989. Problemas Relacionados con la Evaluación de la Peligrosidad en España. Movimientos Fuertes del Suelo y Riesgo de Terremotos, Física de la Tierra nº 1, pp. 267-286, Coordenado por A. Udias e D. Muñoz, Ed. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

McGuire, R. K.; 1976. EQRISK, Evaluation of Earthquake Risk to Site. Open File Report 76 67. United States Department of the Interior Geological Survey, USA.

Mezcua, J.; 1999. Comunicação pessoal.

Morais, I.; Carrilho, F.; Teves-Costa, P.; Senos, M. L., (2002), *Sismicidade no Algarve entre 1999 e 2000: Revisão de Alguns Parâmetros Sísmicos*, Proceedings, 3ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Valência, pp. 434-436.

Moreira, J. S; Marques, J. S.; Cruz, J. F.; Nunes, J. C., 1993. Review of Historical Seismicity in the Gulf of Cadiz Area before the November 1, 1755 earthquake. An intermediate Report. In Historical Investigation of European Earthquakes, (Ed M. Stucchi), 225-236,

Moreira, V. S.; 1984. Sismicidade Histórica de Portugal Continental. Revista do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.

Oliveira, C. S.; Ferreira, M. A.; Oliveira, M.; Sá, F. M., (2004), *Planning in Seismic Risk Areas – The Case of Faro – Algarve. A First Approach*, Proceedings, XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova.

Oliveira, C.S.; 1977. Sismologia, Sismicidade e Risco Sísmico. Aplicações em Portugal. Processo 36/11/4394, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Oliveira, C.S.; 1987. Acção Sísmica e Minimização do Risco. Reflexões sobre Metas a Atingir. Programa de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.



Oliveira, C.S.; 1987. Probabilistic Models for Assessment of Strong Ground Motion. In Strong Ground Motion Seismology, ed. Erdik and Toksöz, NATO ASI Series, pp. 405-460, Reidel Publishing Co., Dordrecht.

Oliveira, C.S.; 1999. Impacto Sísmico sobre a Área Metropolitana de Lisboa. Elementos para a sua Discussão. Revista Protecção Civil, Lisboa.

Oliveira, C.S.; 2003. A Rede Acelerométrica Nacional. Proc. SÍSMICA 2004, 6º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, UMinho/SPES, Guimarães.

Oliveira, C.S.; Campos-Costa, A; Sousa, M.L.; 1997. Estimativa dos Danos Causados por Sismos no Parque Habitacional do Continente Português Contribuição para a Definição de Uma Política de Seguros. Report for the Portuguese Association for Insurance Entrepeneurs, Lisboa.

Oliveira, C.S.; Fonseca, J.; 2000. Comunicação Pessoal.

Oliveira, C.S.; Sousa, M.L.; Campos-Costa, A.; 1999. Definition of Seismic Actions for Portugal in the Framework of the EC 8. Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.

Oliveira, J. T. (Coordenador Geral), (1984, 1992), *Carta Geológica de Portugal, Folhas 7 e 8 à Escala 1:200 000*, Notícia Explicativa, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Paula, A.O.; Oliveira, C.S.; 1996. Evaluation of 1947-1993 Macroseismic Information in Portugal Using the EMS-92 Scale. Annali di Geofisica,vol. XXXIX, no.5, pp. 989-1003.

Paula, R. M; Paula, F. (1993), *Faro. Evolução Urbana e Património*, Edição da Câmara Municipal de Faro,.

Peláez, J. A.; López Casado, C.; 2002. Seismic Hazard Estimate at the Iberian Peninsula. PAGEOPH, vol. 159, pp 2699-2713.

Penelis, G. G., (1997), *Eurocode 8: Characterization of Seismic Action, Design Spectra and Future Trends*, Proceedings, SERINA – Seismic Risk an Integrated Seismological, Geotechnical and Structural Approach. Thessaloniki, Greece, pp. 479-492.

Pereira de Sousa, F. L., (1914), *Megasismo de 1 de Novembro de 1755 – Algarve*, Revista de Obras Públicas e Minas, Lisboa.

Pereira de Sousa, F. L.; 1915-1928. O Megasismo do 1º de Novembro de 1755 em Portugal. Serviços Geológicos.

PRM, (1996), *Plano Rodoviário Municipal*, Câmara Municipal de Faro.

Ribeiro, A.; 2002. Soft Plate and Impact Tectonics. Springer-Verlag, Berlin.

RSA; 1983. Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes. Decree 235/83, 31 May 1983, Imprensa Nacional, Lisboa.

Seismic Hazards in Southern California: Probable Earthquakes, 1994-2024. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 85, no.2, pp. 379-439.



Sousa, M.L.; 1996. Modelos Probabilistas para a Avaliação da Casualidade Sísmica em Portugal Continental. MSc. Thesis, Lisbon Technical University, Lisbon.

Sousa, M.L.; Oliveira, C.S.; 1997. Hazard Mapping Based on Macroseismic Data Considering the Influence of Geological Conditions. Natural Hazards, vol. 14, pp 207-225.

Sousa, M.L.; Oliveira, C.S.; Martins, A. M.; 1992. Compilação de Catálogos Sísmicos da Região Ibérica. Report 36/92- NDA, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon.

Terrinha, P. et al.; 2002. Tsunamigenic-seismogenic Structures, Neotectonics, Sedimentary Processes and Slope Instability on the Southwest Portuguese Margin. Marine Geology, 3266, pp 1-19.

Teves-Costa, P.; Baptista, M. A.; Miranda, J. M.; 2002. Attenuation Models for SW Iberia – Implications on Seismic Hazard Assessment. Proceedings 12 World Conference on Earthquake Engineering, CD Rom, London.

Teves-Costa, P.; Vales, D.; Vicêncio, H.; 2001. Estudo do Ruído Ambiental na Cidade de Faro. Proceedings 5º Encontro de Sismologia e Engenharia Sísmica, LREC, Ponta Delgada, 251-260.

Trifunac, M. D.; Lee, V. W.; 1989. Empirical Models for Scalling Pseudo-relative Velocity Spectra of Strong Earthquake Accelerations in Terms of Magnitude, Distance an Site Intensity and Recording Site Conditions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 8, pp. 126-144.

Vilanova, S. P. 2003. Lisbon 1755: Sismicidade e Perigosidade do Vale Inferior do Tejo. Tese de Doutoramento, IST.

Vilanova, S. P.; Nunes, C. F.; Fonseca, J. F. B. D. 2003. Lisbon 1755: A Case of Triggered Onshore Rupture, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 93, no.5, pp 2056-2068.

Working Group on California Earthquake Probabilities; 1995.

Youd, T. L.; Perkins, D. M., (1987), *Mapping of Liquefaction Severity Index,* Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 118, no.11, pp. 1374-1392.

Zitellini, N.; Chierici, F. Sartiri, R.; Torelli, L.; 1999. The Tectonic Source of the 1755 Lisbon Earthquake and Tsunami. Annali di Geofisica, vol. 42, no.1, pp. 49-55.



2. PARTE 2 – A CIDADE DE FARO

2.1. ENQUADRAMENTO GEODINÂMICO DA REGIÃO DE FARO

<u>Geologia</u>

Do ponto de vista geomorfológico a região do concelho de Faro pode ser dividida em unidades morfológicas distintas; o Barrocal e as baixas aluvionares.

No início da era cristã a cidade de Faro e sua região envolvente estavam cobertas por água existindo apenas três ilhas correspondentes às terras mais altas: Alto de Rodes e Colinas da Sé e de Santo António. Hoje em dia, grande parte desta região já se encontra "seca", se bem que existam muitos terrenos aluvionais e uma extensa área "inundada", coberta por sapais. Assim se justifica que na área do concelho de Faro ocorrem formações cuja datação varia do período Jurássico ao Halocénico (actual). A formação dominante é a designada "Areias de Faro - Quarteira", constituída por areias de grão médio, feldspáticas, com quantidades variáveis de argilas. Os afloramentos de rochas ígneas dentro da área do concelho, também são muito comuns, estando quase sempre relacionados com a ocorrência de fenómenos de natureza tectónica.

<u>Tectónica</u>

Na região de Faro ocorre sismicidade significativa e identificam-se deformações neotectónicas importantes. Estas manifestam-se pela ocorrência de numerosas falhas, diaclases, paleosismitos e dobras à escala mesoscópica, afectando unidades sedimentares regionais com idade provável plio-quaternária.

A área de Faro corresponde a uma zona de morfologia aplanada, com uma vasta cobertura de sedimentos aluvionares recentes e depósitos plio-quaternários que ocultam a geologia subjacente, dificultando a sua interpretação. A Figura 24 apresenta uma interpretação destes solos em termos de frequências predominantes de vibração, que foi possível obter a partir da descrição litológica dos estratos superficiais, da velocidade das ondas de corte medidas em ensaios de prospecção sísmica (Almeida et al, 1999) e de medições de ruído sísmico ambiental (Teves-Costa et al, 2003).

A estrutura geológica desta área corresponde, na cobertura cenozóica, a uma bacia tectónica delimitada por falhas com direcção N-S a NNE-SSW. Devido à sua localização, subjacente a aluviões da Campina de Faro, e à escassez de cortes, esta estrutura permanece ainda mal conhecida, embora se tenham observado areias plio-quaternárias.





Figura 24 - Frequências Predominantes dos solos de Faro de acordo com a geologia superficial

Segundo alguns autores, a ocorrência de deformações neotectónicas superficiais relacionadas com acidentes tectónicos principais caracteriza-os como potenciais fontes sismogenéticas, com capacidade para gerarem ruptura superficial associada a sismos de magnitude elevada (M≥6).

Por outro lado, a identificação de perturbações estruturais associadas à ocorrência de sismos antigos (paleosismitos) em sedimentos plio-quaternários localizados a ocidente de Faro, na zona de influência das falhas de Quarteira e Carcavai, indica um nível de intensidade regional elevado.

A Falha de Quarteira, com direcção geral NW – SE, estende-se desde S. Marcos da Serra a Norte, até Quarteira a Sul, numa distância superior a 40 km, prolongando-se para a área imersa, na plataforma continental. O seu prolongamento para SE de Quarteira, na plataforma continental, poderá ser responsável pela sismicidade localizada ao largo de Faro.

A Falha de Loulé tem direcção geral E – W, estendendo-se ao longo de 12 km entre a falha do Carcavai a Este, e provavelmente a falha de Quarteira a Oeste.

A Falha do Carcavai, com direcção geral NE – SW, estende-se de S. Brás de Alportel a Norte, a Quarteira a Sul, ao longo de cerca de 20 km.

A Falha de Faro com desenvolvimento para Norte e para Sul, já em plena plataforma continental comporta-se como um desligamento direito.

O conjunto das falhas de orientação E-W no alinhamento de Santa Bárbara de Nexe – Monte Figo, comportam-se como flexuras e quase sempre em distensão.

As falhas Submeridianas são francamente mais abundantes a Este da Falha de Carcavai.

A região deste concelho é, como toda a região Algarvia, particularmente sensível aos efeitos dos sismos, por estar próxima da região sísmica Mediterrâneo – Himalaiana. Tal sensibilidade é ainda acrescida se se atender à natureza dos terrenos em que todo o Algarve se encontra implantado, constituindo a Orla Meso-Cenozóica do Sul de Portugal.



Incidências Geotécnicas

O estudo e o comportamento de edifícios e de outras estruturas de engenharia quando sujeitas à acção de solicitações sísmicas, deverá merecer sempre uma atenção especial, quando se trata de apreciação de projectos de construção na área do concelho.

As características anti-sísmicas básicas a que deverá obedecer a construção de edifícios e outras estruturas, terão de ser, pelo menos nos empreendimentos de maior envergadura, determinados com o maior rigor, de maneira a minimizar possíveis efeitos catastróficos.

Assim, as áreas próximas das zonas das falhas merecem um cuidado especial porque efectivamente, estas fracturas podem conduzir à formação de escarpas de falhas, que normalmente constituem acidentes topográficos instabilizadores nos taludes naturais existentes.

Por outro lado, surge também nas proximidades de algumas falhas, o aparecimento de importantes famílias de diaclasamento. Tais diaclases apresentam regra geral continuidades de vários metros e espaçamentos entre os 10 e os 30 cm.

Pode-se concluir então que, as zonas de fractura são locais a evitar pela construção, pois caso contrário há que tomar precauções especiais já que o diaclasamento e fracturações mais desenvolvidas nas suas vizinhanças criam condições preferenciais a infiltrações de águas superficiais e de precipitação.

Cenários Sísmicos

Para analisar os danos provocados pelos sismos foram construídos três tipos de cenários representativos da situação que pode vir a ocorrer em Faro. Eles são bem diferentes em magnitude e distância focal, tendo-se utilizado as seguintes leis de atenuação das ondas sísmicas para o cálculo das acelerações máximas no solo:

$\ln a = 3.687 + 0.612M - 0.92\ln\sqrt{(d^2 + 3.5^2)} + 0.58$	(d<30 km)
$\ln a = 3.687 + 0.612M - 0.92\ln\sqrt{(d^2 + 3.5^2)} + 0.98$	(30 <d<100 km)<="" td=""></d<100>
$\ln a = 3.687 + 0.612M - 0.92 \ln \sqrt{(d^2 + 3.5^2)} + 1.38$	8 (d>100 km)

onde a = pico de aceleração horizontal (PGA - cm/s2); M = magnitude; e d = distância epicentral (km).

Cenário 1 – Sismo próximo - epicentro localizado na Falha de Loulé, a 15 km a norte de Faro, com magnitude Richter de 5.5; este evento causa intensidades na escala EMS-98 grau VI/VII para o caso de se não considerar diferenciação do solo, ou de V a IX para o caso de introduzir a diferenciação do solo (predominancia do grau VI). Para o cenário de um sismo próximo são os edifícios mais baixos que terão pior comportamento estrutural, logo terão maior vulnerabilidade sísmica, devido à sua frequência de vibração se aproximar da frequência predominante do sismo próximo.

Cenário 2 – Sismo a distância intermédia - epicentro localizado a uma distância de 30 a 100 km de Faro, na Falha de São Marcos da Serra a NW de Faro, ou no Oceano Atlântico a cerca de 70 km a SE de Faro, magnitude Richter de 6.5; este evento causa uma intensidade EMS-98 média de VII.





Cenário 3 – Sismo afastado - epicentro localizado a uma distância de cerca de 150 km a SW de Faro (Falha no Atlântico), com magnitude Richter de 7.5; este evento causa intensidades na escala EMS-98 grau VI/VII para o caso de se não considerar diferenciação do solo, ou de VI a VIII para o caso de introduzir a diferenciação do solo (predominância do grau VIII). Neste cenário, são os edifícios mais altos que terão pior comportamento estrutural na eventualidade da ocorrência de uma crise sísmica, pois as frequências predominantes do sismo afastado são mais baixas e aproximam-se mais das dos edifícios mais altos.

O Quadro 3 resume os valores das acelerações máximas (PGA) e intensidades EMS-98 para os três casos atrás referidos.

Quadro 3 - PGA's e Intensidades EMS 98 para diferentes magnitudes e distâncias epicentrais, com as
correspondentes probabilidades associada

Distância	Magnitude	PGA (cm/s ²)	Intensidade	T (anos)
	5	122	VI	200
15	5.5	166	VI/VII	500
	6	225	VII	1000
	6.5	84	VI	50
150	7	113	VI/VII	150
	7.5	154	VII	400

Figura 25 - Intensidades na escala EMS-98 para o caso de se considerar diferenciação do solo, cenário afastado



Foram anda considerados quatro cenários: Inverno – Dia, Inverno – Noite, Verão – Dia e Verão – Noite, para assim compreender-se qual a população mais atingida, quais as áreas em que poderão ocorrer os maiores danos, quais as vias que poderão ficar facilmente obstruídas, etc.

Os objectivos de estudos desta índole são o de proteger a população ou os meios de subsistência económicos e financeiros de uma determinada cidade, corrigir as condições ditas de risco, e evitar a ocorrência de mais situações de risco na comunidade.

3. PARTE 3. PLANO DE RISCO SÍSMICO

3.1. INTRODUÇÃO

Um terramoto produz severas consequências sociais e económicas, para além das baixas humanas.

Um "cenário" de risco sísmico ou Plano de Risco Sísmico para as áreas urbanas deve ser dirigido ao funcionamento das instituições-chave (por exemplo, hospitais, bancos, serviços públicos), e deve garantir tanto quanto possível a segurança de vidas humanas. Um projecto deste tipo tornase imperativo para as cidades que possam ser cenário de um abalo a curto-médio, ou mesmo longo prazo.

A elaboração de Planos de Risco Sísmico que considerem variados efeitos na sociedade (tais como mortes, feridos, desalojados, casas sem água e electricidade) e na economia (resultantes dos danos nas construções, nas redes de abastecimento de águas, águas residuais, gás e electricidade, bem como, estradas, pontes e linhas férreas), são muito importantes para a Protecção Civil fazer um Plano de Socorro eficaz.

O objectivo do Plano de Risco Sísmico é reduzir o impacte de possíveis sismos e promover a prevenção da comunidade no seu dia-a-dia. Um Plano com este objectivo seria muito útil para as cidades algarvias, em primeiro lugar, porque apresentam os problemas normais de cidades que assistem a um rápido e desordenado crescimento urbano e, consequentemente a um aumento da densidade populacional. Crescimento urbano esse, que se dá em áreas geologicamente classificadas como de risco. Em segundo lugar, são cidades da região do Algarve que apresentam um risco sísmico significativo. Por último, há pouco ou nenhum conhecimento do risco sísmico pela população em geral.

Estes objectivos podem ser concretizados através de promoção de programas de educação pública sobre medidas a tomar para diminuir o risco das famílias em suas casas e através da identificação das áreas que necessitam de mais estudos de engenharia e científicos, para se entender o fenómeno sísmico e as medidas a tomar para diminuir a vulnerabilidade. Por exemplo, uma cidade sujeita ao fenómeno de liquefacção deve ter essas áreas definidas num mapa.

O sucesso e a utilidade dos estudos de um Plano de Risco depende da receptividade da população e das autoridades competentes. Caso não haja receptividade, há problemas que surgem e o plano pode não ser posto em prática. Surgem igualmente problemas se não existir uma estrutura ou organização para pôr em prática o plano e/ou se não houver uma perfeita cooperação entre as pessoas que o estão a preparar e os potenciais utilizadores.

Felizmente a ocorrência de um grande terramoto já não está na memória das pessoas. No entanto, a ausência de grandes sismos em Portugal, nos últimos anos, tende a induzir ao relaxar da preocupação e da prevenção, não só da população em geral como inclusive em certos meios técnicos e da esfera das decisões. Infelizmente não se pode prever quando irá ocorrer um grande abalo. Pode-se dar daqui a 100 anos, como daqui a 10-20 anos ou amanhã. Podemos ser palco de um terramoto que pode ser devastador, por falta de resposta dos serviços de emergência, por falta de conhecimento/educação da população e por falta de fiscalização apropriada tanto na fase construtiva como na manutenção das construções ao longo dos tempos.





3.2. CAUSAS DE VULNERABILIDADE SÍSMICA URBANA

São vários os factores que afectam a segurança sísmica de uma cidade:

- demografia
- sismicidade
- capacidade de resposta das entidades de socorro
- práticas construtivas
- consciência pública
- nível de actividade sísmica e a distância às falhas que podem originar sismos destrutivos.

O aumento populacional é uma das grandes causas de vulnerabilidade sísmica. Pode ser o resultado do aumento da taxa de natalidade e/ou da migração de áreas mais desfavorecidas para as áreas urbanas. Faro não se depara com um aumento da taxa de natalidade, antes pelo contrário; mas observa-se um crescimento populacional, devido à centralização administrativa e, consequentemente por se ter tornado um pólo atractivo da população dos concelhos limítrofes.

Esse crescimento populacional conduz a que a expansão da área urbana, se dê para zonas de elevado risco geológico, por exemplo, vertentes inclinadas e solos saturados. Muitas vezes, a inadequação ou a inexistência de planos para o uso do solo agravam esse problema.

A inadequação das práticas construtivas é outra causa da elevada vulnerabilidade. Portugal possui um regulamento relativo a estruturas de edifícios e pontes; o "RSA - Regulamento de Segurança e Acções para Edifícios e Pontes" (DL 235/83, de 31 de Maio). O capítulo VII deste Decreto-Lei refere-se à acção dos sismos. De acordo com o RSA, e para efeitos de quantificação da acção dos sismos, considera-se o País dividido em quatro zonas, que, por ordem decrescente de sismicidade, são designadas por A, B, C e D. Faro inclui-se na zona A, a de maior sismicidade, a mesma que toda a região Algarvia, litoral Alentejano e a área de Lisboa.

No entanto, se não houver um sistema de verificação dos projectos e dos cálculos bem como uma fiscalização aquando da construção de um edifício, por parte das Câmaras Municipais, o nível do cumprimento legal do regulamento é provável que seja baixo. E isto pode ocorrer ou porque os engenheiros enganam-se, julgando que estão a aplicar bem os padrões regulamentares, ou porque os projectistas deliberadamente ignoram os requisitos estabelecidos no regulamento, julgando-os de pouca importância, ou simplesmente porque os edifícios não são construídos conforme o projecto.

Mas talvez mais importante que a existência e a aplicação de um regulamento, é a persistência das construções "informais", sem fiscalização, com materiais de pouca qualidade e fraca resistência aos movimentos do solo. Este tipo de construções é muito comum.

Outra causa de vulnerabilidade é a infraestruturação inadequada e a capacidade de resposta em caso de emergência. As redes de infra-estruturas são velhas, têm pouca manutenção, algumas estão desactivadas e outras estão sobrecarregadas. Muitas das entidades de socorro, de emergência não se encontram bem equipadas, organizadas e treinadas para a exigência dos terramotos. Uma das preocupações destas cidades deveria ser em criar simulações, treinos que envolvessem a Polícia, a Protecção Civil e o Corpo de Bombeiros.



3.3. REDUÇÃO DO RISCO SÍSMICO

Os riscos sísmicos são classificados em quatro categorias:

- movimento do solo;
- ruptura das falhas;
- tsunamis ou maremoto e seiches;
- riscos secundários (isto é, avalanches, deslizamentos de terra e lama, liquefacção do solo, cheias derivadas das barragens, inundações e incêndios).

Qualquer cidade pode estar ameaçada por estes acontecimentos naturais, dependendo das condições sismogénicas em que cada região se insere. Nesta parte será discutida a maneira como os estudos geotécnicos e sismológicos formam uma base crucial para as decisões a serem tomadas em caso de ameaça sísmica.

Uma das medidas eficazes para reduzir os danos causados por possíveis terramotos, nas áreas urbanas, depende fortemente da compreensão das suas características

O facto de se "modelarem" as futuras fontes de terramotos é altamente relevante para a redução da vulnerabilidade nas áreas urbanas pois a resposta das estruturas de engenharia, infraestruturas e das obras de arte, requerem a definição das fontes de um terramoto, estabelecidas de uma forma digna de segurança, através de uma análise geológica e sismológica.

Zonamento para Liquefacção

A liquefacção é um dos temas mais importantes, interessantes, complexos e controversos da engenharia sísmica.

Consiste na passagem de um solo em estado granular para um estado liquefeito, geralmente causado por um grande abalo sísmico. Durante o abalo, a areia tende a ser compactada. A água entre os poros não consegue sair instantaneamente, pelo menos nos grãos mais finos, para acomodar a compactação.

A liquefacção resulta em danos severos caracterizados por defeitos nas fundações, nas áreas mais declivosas e danos nas infraestruturas, tais como, auto-estradas, caminhos de ferro, sistemas de distribuição de água e gás.

Os seus efeitos devastadores chamaram a atenção de engenheiros geotécnicos em 1964 quando o terramoto no Alaska (Mw=9.2) foi seguido pelo terramoto de Niigata (Ms=7.5) no Japão.

Susceptibilidade de Liquefacção

Nem todos os solos são susceptíveis de se liquefazerem, o 1º passo na avaliação do risco de liquefacção é a avaliação da susceptibilidade de liquefacção. Se o solo de um determinado local não é susceptível, o risco de liquefacção não existe e a avaliação dos riscos de liquefacção podem ser terminados.

Se o solo é susceptível, o assunto do início e os efeitos de liquefacção devem ser assinalados.



Existem vários critérios que servem para analisar a susceptibilidade de liquefacção:

- 1- Critérios Históricos
- 2- Critérios Geológicos
- 3- Critérios de Composição
- 4- Estado do Solo

Critérios Históricos

Uma grande quantidade de informação no comportamento da liquefacção chega das pesquisas pós-sismo, as quais mostram que a liquefacção muitas vezes repete-se no esmo sítio quando as condições do solo e subsolo mantém-se inalteradas.

Estes casos históricos de liquefacção podem ser utilizados para identificar locais específicos, ou as condições de determinado lugar, que podem estar susceptíveis à liquefacção em futuros sismos. São informações úteis para o zonamento.

As investigações neste campo têm também mostrado que os efeitos de liquefacção têm sido confinados a zonas que se localizam dentro de uma determinada fonte sísmica. Ambraseys (1998) através de várias observações tentou estimar, para diferentes magnitudes, a distância epicentral a partir da qual a liquefacção não ocorre.

A distância a partir da qual a liquefacção pode ser esperada aumenta drasticamente com o aumento da magnitude.

Critérios Geológicos

Os sedimentos que estão susceptíveis a liquefazerem-se encontram-se dentro de uma classe limitada de ambientes geológicos (Youd, 1991).

Os ambientes hidrológicos e dos sedimentos bem como a sua idade são factores que contribuem para a susceptibilidade dos solos à liquefacção.

Os processos geológicos que põem o solo com iguais granulometrias, os depósitos fluviais, aluvionares e aéreos quando saturados apresentam probabilidade de serem susceptíveis à liquefacção.

A liquefacção também tem sido observada em deltas fluviais, planícies aluvionares, praias, terraços e depósitos estuarinos.

A susceptibilidade dos sedimentos antigos é geralmente mais baixa que a dos sedimentos mais novos.

Solos do período Holocénico são mais susceptíveis do que os do Plistocénico.

A liquefacção só ocorre em solos saturados, logo a profundidade do nível freático influencia a susceptibilidade de liquefacção.



Os solos já modificados pelo Homem também merecem atenção. O estabelecimento de barragens e de protecções com estacas em que as partículas do solo se perdem devido à presença de água, criam um novo modo de risco sísmico.

Critérios de Composição

As características composicionais (tamanho das partículas, formato e granulometria) associadas às alterações elevadas de volume tendem a estar associadas com a elevada susceptibilidade de liquefacção.

O formato das partículas, por exemplo, influencia a susceptibilidade a liquefacção. Solos com partículas redondas são mais facilmente densificados que os solos com grãos angulares. Logo, mais susceptíveis que os solos de granulometria angular.

Os formatos redondos encontram-se com mais frequência em áreas aluvionares e fluviais.

Estado do Solo

A susceptibilidade à liquefacção também depende do estado do solo, isto é, "stress" e características de densidade na altura do abalo sísmico.

Estes quatro critérios requerem estudos in situ, laboratoriais e dados históricos.

A liquefacção e a instabilidade que lhe está induzida estão classificadas como os piores estragos dentro dos danos provocados por um sismo. Os seus efeitos têm sido observados na forma de deslizamentos, expansões laterais, defeitos nas fundações, entre outros.

Aqui foi feita uma breve abordagem a um fenómeno que merece especial atenção não só pelos seus efeitos mas porque Faro e algumas cidades do litoral algarvio reúnem muitas características e propriedades que a tornam susceptível à liquefacção.

São necessários importantes e cuidados estudos dos solos quando se pensa na nova localização de um edifício, equipamentos ou infraestruturas a fim de se minorar o risco.

Tem sido prática corrente desenvolver mapas de potencial de liquefacção, para indicar as áreas de potencial danificação durante um terramoto. O potencial de liquefacção depende da susceptibilidade que os solos apresentam para a liquefacção e da duração e intensidade esperada para os movimentos do solo. A susceptibilidade depende principalmente do tipo de sedimento, granulometria, densidade e na profundidade do nível freático.

Mapas de Microzonagem

Os mapas de microzonagem sísmica podem ser definidos como mapas que possuem valores dos parâmetros necessários à localização de estruturas e construções resistentes aos sismos. A microzonagem para o risco sísmico serve como um guia de segurança aos usos do solo e das construções. Os procedimentos de microzonagem devem combinar múltiplas informações por forma a se obter uma solução óptima na mitigação do risco sísmico. Estas informações são:

- Falhas e movimentos do solo que induzam um terramoto;
- · Rupturas das superfícies tectónicas;



• • Modificação dos movimentos do solo, segundo a localização.

A microzonagem é, portanto, baseada na morfologia, geologia, relatos históricos da distribuição de danos provocados por sismos, e em outros dados geológicos e geotécnicos. Assim, obtêm-se mapas que indicam as zonas de maior risco sísmico, bem como as áreas de possíveis deslizamentos de terra ou rochas e de liquefacção. Os mapas de microzonagem podem ser utilizados como uma fonte adicional de informação para a execução dos planos urbanísticos, pois introduz decisões de protecção quanto ao risco sísmico.

Análise de Vulnerabilidade

A análise de vulnerabilidade envolve os elementos em risco (físico, social e económico) e o tipo de risco associado (tal como danos em estruturas, construções e baixas humanas).

A vulnerabilidade física está associada às infraestruturas urbanas e construções. A sua vulnerabilidade depende do tipo de desenho, tipo de construção e da sua manutenção. A análise de vulnerabilidade aos monumentos culturais e históricos, bem como aos equipamentos urbanos que servem de acolhimento/socorro, após um sismo, merecem especial atenção.

A vulnerabilidade sócio-económica é medida em termos de qualidade sócio-económica, bem como em termos de danos nas infraestruturas sociais, impactes na produção e no emprego, inflação entre outras.

Nas áreas urbanas tem de haver uma distinção entre as estruturas que exigem um projecto de segurança estrutural (edifícios habitacionais, governamentais e comerciais, obras de arte, barragens, diques, infraestruturas portuárias, infraestruturas rodo-ferroviárias e de saneamento) e as estruturas que são de baixa tecnicidade.

A vulnerabilidade das obras de engenharia depende da localização, projecto e resistência da construção, enquanto que as obras de baixa tecnicidade podem ser generalizadas, consoante os diferentes tipos de estruturas.

3.4. FACTORES QUE CONDICIONAM OS DANOS

Os danos podem ser bastante severos nas infraestruturas se o terramoto ocorrer perto ou mesmo nas áreas urbanas.

Os danos nas construções e nas estruturas em geral dependem de vários factores:

- características estruturais;
- movimentos do solo intensos; e
- riscos colaterais.

Estes factores podem contribuir para aumentar ou diminuir os danos. Uma compreensão destes factores individualmente bem como o seu impacto combinado poderá ser útil para melhorar a aplicação dos métodos de previsão de danos.



Características Estruturais

As características estruturais mais importantes para a avaliação dos danos provocados por terramotos incluem:

- i) tipo de material de construção os materiais devem suportar os movimentos de longa duração vertical e horizontal, sem perdas excessivas de rigidez ou resistência.
- ii) material do solo de fundação as estruturas e construções devem estar assentes sobre firme material de fundação; as estruturas não se devem fixar em fundações deficientes.
- iii) fundações as formas devem ser regulares e simétricas.
- iv) idade devem ser recentes e adoptar os regulamentos anti-sísmicos.
- v) proximidade a outras estruturas não devem estar muito próximas umas das outras, pois o projecto é feito para cada edifício, individualmente, não contando que as estruturas possam bater uma contra a outra. Este problema põe-se essencialmente para as construções recentes, que prevêem no regulamento, um espaçamento pequeno, entre as edificações, enquanto que as construções mais antigas são encostadas uma à outra.
- vi) localização em áreas de anteriores ocorrências sísmicas.

Para as estruturas que cumpram os regulamentos de construção espera-se que os danos sejam menores. A existência e implementação de regulamentação anti-sísmica, não quer dizer, por si só que garanta uma boa eficiência sísmica. Há exemplos de construções que cumpriram os códigos regulamentares, mas tiveram pouca eficiência, como ocorreu em Loma Prieta, Califórnia (1989). Não basta o tipo de construção, mas todo o meio envolvente.

Movimentos do Solo Intensos

Em geral, para um determinado local e distância à fonte do terramoto, a intensidade dos movimentos do solo é proporcional à magnitude do terramoto. Ou seja, quanto maior for a magnitude, mais intenso é o movimento do solo.

A vibração de um sismo é normalmente medida em termos de aceleração e, em alguns casos, em velocidade. As vibrações são cíclicas e as características mais importantes destes movimentos (do ponto de vista da engenharia) são: amplitude, frequência e duração.

A frequência de um edifício depende da sua altura e rigidez (em direcção horizontal). A frequência para edifícios de 1 a 5 pisos está entre 3 e 10 Hz (ciclos por segundo), enquanto para edifícios de 5 a 10 pisos a frequência varia entre 1 a 3 Hz. Quando a frequência do edifício coincide, ou quase, com a frequência induzida pelo movimento do solo, os movimentos no edifício podem ser ampliados 2 ou 3 vezes (ou até mais), relativamente ao movimento do solo. E este fenómeno pode ser o responsável pelos grandes danos que se verificam após um sismo.

Caso um sismo se dê afastado de determinada área, por exemplo a 100 ou 200 km, são os edifícios mais altos que são mais danificados. E isto porque um sismo afastado quando chega, tem uma frequência mais baixa, logo atinge os edifícios com uma frequência mais baixa, que é o caso dos edifícios altos.



Para um cenário de sismo próximo, este possui uma frequência mais alta, afectando os edifícios mais baixos, consequente os de maior frequência.

Riscos Colaterais

Para adicionar aos fortes movimentos do solo, outros fenómenos, são vistos normalmente como riscos colaterais, são eles:

- solos pobres,
- deslizamentos de terra,
- ruptura de falhas,
- inundações,
- incêndios.

Os solos pobres incluem as areias soltas e as argilas. No entanto, uma das causas mais comuns de danos é a liquefacção. A liquefacção é geralmente manifestada, durante os terramotos, sobre a forma de jactos de água, submersão ou rotação do edifício.

Os deslizamentos de terra podem provocar sérios danos nas estruturas que estão localizadas nas encostas. Para além disso, a estação do ano é um factor secundário importante, no potencial dos deslizamentos de terra, ou seja, um forte terramoto durante o Inverno, devido às chuvas, causa mais danos do que se ocorresse na época seca, do Verão. Para avaliar o risco de deslizamento é necessário haver caracterização da susceptibilidade de deslizamentos e das condições geológicas de uma dada região. A susceptibilidade é caracterizada pelo grupo geológico a que pertence, pelo ângulo de declive e pela aceleração.

As rupturas nas falhas podem causar danos significativos nas estruturas situadas imediatamente em zonas de falhas de complexos depósitos aluvionares. No caso mais simples, a estrutura é literalmente cortada ou seccionada, visto uma parte da estrutura se mover numa direcção e a outra parte mover-se na direcção contrária. Num caso mais complexo, os materiais do solo deformam-se e alteram-se em determinada área e as estruturas que se encontram nessas zonas estão sujeitas a serem destruídos.

As inundações durante os terramotos podem resultar dos tsunamis, seiches, rompimento de barragens ou da proximidade a áreas inundáveis. Os tsunamis são sequências transitórias de ondas do mar de longo período, geradas impulsivamente por fenómenos de terramotos, vulcões ou deslizamentos de terra marinhos ou costeiros. As seiches são oscilações periódicas que se dão em espaços com água fechados ou semi-fechados, nomeadamente lagos, rios e estuários, devido a terramotos ou deslizamentos de terra que destroem as margens de lagos e baías.

Os incêndios são um dos maiores perigos imediatamente após um terramoto e se não for controlado, pode levar a uma maior conflagração sob determinadas circunstâncias. Os parâmetros para avaliar possíveis conflagrações são: fontes de ignição (número de fogos iniciados, causados pela interrupção do normal funcionamento dos sistemas de gás e electricidade); comunicação do incêndio e tempo de resposta (são influenciados, respectivamente pelo tempo em que os cidadãos demoram a dar o alerta e pela densidade e extensão dos danos nos edifícios); expansão do fogo (influenciada pela densidade e materiais de construção e pelas condições climáticas); e supressão do fogo (influenciada pelo número e disponibilidade de equipamento e de pessoal para combater o incêndio).



Tipos de danos

Adicionando aos edifícios, muitas outras estruturas urbanas, infraestruturas e serviços são vulneráveis aos efeitos de um sismo. Deslizamentos de terra, queda de blocos e ruptura das falhas podem bloquear auto-estradas e vias férreas, bem como danificar as condutas de saneamento e gás. Abalos severos podem levar à queda de pontes e a liquefacção pode causar danos severos nas estruturas portuárias e áreas costeiras.

As estruturas urbanas vulneráveis aos sismos são:

- Pontes por instabilidade das encostas, liquefacção e assentamento nos encontros, causando danos severos. As vigas podem cair dos seus suportes.
- Condutas os maiores danos para as condutas ocorrem em zonas de falha, solos pobres, liquefacção e deslizamentos de terra. Rupturas nas condutas de gás conduzem a fugas de gás e correspondente risco de incêndio.
- Electricidade as redes devem funcionar durante o sismo ou serem recuperadas a curto prazo. As componentes das redes, designadamente os postos de transformação e as subestações devem comportar-se bem durante o sismo.
- Telecomunicações os cabos subterrâneos, passando entre as condutas de betão, proporcionam menores danos, mas as ligações de linhas entre pólos e edifícios são logo destruídas devido aos danos provocados nos edifícios. As comunicações móveis também são das primeiras a serem danificadas, sendo importante que sejam recuperadas a curto prazo, após um sismo.

3.5. ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DO RISCO

O risco de catástrofes urbanas pode ser atenuado se houver redução do risco, uma redução de vulnerabilidade das estruturas (inclui edificações e infraestruturas) e um melhoramento do planeamento.

A redução do risco pode minorar a propensão dos centros urbanos, ao risco, por intermédio de medidas preventivas, tais como as construções terem estruturas próprias, segundo o tipo de solo e/ou através de melhoramento dos locais, bem como melhoramento da drenagem e das vertentes que tenham uma inclinação considerável, por forma a reduzir o risco de inundações.

A redução da vulnerabilidade das estruturas pode trazer um melhoramento estrutural nos edifícios existentes, em outras estruturas e nas infraestruturas para melhorar o seu comportamento face ao risco. A vulnerabilidade é reduzida se os projectos e os métodos construtivos forem melhorados e se forem efectuados reforços nos edifícios mais fragilizados, bem como aos sistemas de infraestruturas. O reforço nas infraestruturas é feito para assegurar um adequado funcionamento no dia-a-dia, bem como durante e após um desastre natural. É o caso, por exemplo, do reforço de pontes contra o deslocamento lateral aquando um terramoto.

Como os sistemas de infraestruturas requerem um elevado investimento público, é importante que a vulnerabilidade destes elementos seja o mais reduzida possível.



O planeamento dos usos do solo é um instrumento muito importante na mitigação dos danos. Neste campo, o risco é reduzido não por se reduzir a tendência de determinado local para o risco, mas por se mudar as características funcionais da área em risco. Sendo assim, deve existir uma multi-disciplinariedade na equipa responsável pelos planos, por forma a identificar e estabelecer os limites do desenvolvimento urbanístico, podendo desenvolver cartas de risco, fazer uma análise de risco, bem como avaliar e formular um plano para as zonas propensas a desastres naturais. Assim, surge a regulamentação que indica quais as áreas de desafogo/espaços abertos que devem ser criados, quais as cérceas máximas dos edifícios ou a sua proibição de construção em determinada área.

A criação de espaços abertos, especialmente se não tiverem edifícios muito altos a envolvê-los, é importante também para reduzir a densidade populacional. Estes espaços formam também importantes áreas de socorro para a população, uma vez que esta fica protegida da queda de elementos salientes dos edifícios e, em áreas de risco de incêndio, os espaços abertos provêm um abrigo seguro, contra a multiplicidade de fogos.

3.6. CONCLUSÃO

Conclui-se então que uma redução da vulnerabilidade estrutural, regulamentação dos usos do solo, regulamentos de projecto e construção, conhecimento e educação da população são medidas viáveis para a mitigação do risco sísmico. Medidas específicas podem ser tomadas para os riscos colaterais como, incêndios, deslizamentos de terra e cheias.

Para a atenuação dos danos provocados por sismos, os planos, programas ou actividades podem ser listados como uma sucessão de fases: antes, durante e após, como se mostra no Quadro 4.



Quadro 4 - Sequência dos Planos necessários para mitigar os efeitos dos danos provocados por um sismo

Outra medida a tomar será a de realizar Planos de Recuperação do Edificado num contexto de prevenção sísmica, os quais poderão permitir que haja uma menor contribuição do Governo se pensarmos na probabilidade de reconstrução pós-sismica.

Para o sistema de "vias de fuga" e de "espaços abertos/seguros", o Plano urbanístico deverá ter em conta aumentar o número de alternativas de percurso, aumentar a acessibilidade aos espaços "seguros" e reduzir a vulnerabilidade directa ou induzida dos percursos. Estes melhoramentos deverão ser conduzidos no que diz respeito ao Desenho Urbano e nas características do edificado existente.

O desenvolvimento de estudos sobre as causas e os efeitos de um sismo, a execução de reforços estruturais necessários para melhorar o comportamento sísmico dos edifícios, o ordenamento correcto do território, que passa pela elaboração de planos de risco sísmico e de emergência eficazes e, a promoção de acções de informação e formação junto das populações, são muito importantes para o desenvolvimento de uma cultura de segurança.



3.7. TRABALHOS FUTUROS

Para uma melhor caracterização do risco sísmico da Cidade de Faro passa pela realização de vários trabalhos que incluem, entre outras, as seguintes tarefas:

- Alargar a região estudada no período 1999-2002 a toda a área urbana do Concelho de Faro e posteriormente ao resto do Concelho.
- Melhorar as curvas de vulnerabilidade dos vários tipos estruturais presentes, pormenorizando aspectos estruturais do arranjo do quarteirão.
- Introduzir no presente SIG a possibilidade de uma definição de cenário à custa de dada localização epicentral e da magnitude, tornando o simulador dinâmico.
- Considerar a variável tsunami na definição das acções que podem afectar a zona.
- Articular estes estudos de pormenor com estudos a uma escala mais abrangente, nomeadamente com os trabalhos em desenvolvimento pelo Serviço Nacional de Protecção Civil, para todo o Algarve.
- Alargar o âmbito do estudo a outras áreas temáticas tais como, impacto sobre o património histórico construído, infra-estruturas de transportes, água, telecomunicações, gás e energia.
- Análise sistémica do conjunto urbano face a uma situação de risco.