

ANÁLISE DA PERIGOSIDADE SÍSMICA DO ALGARVE: O PASSADO E O FUTURO



João M.C. Estêvão

Professor Adjunto
CEPAC, ISE-UAlg
Faro
jestevao@ualg.pt

SUMÁRIO

Os sismos ocorridos na última década, um pouco por todo o mundo, têm apresentado valores de vibração muito superiores aos espectáveis através dos estudos tradicionais de perigosidade sísmica. Este facto é de especial importância para o Algarve, tendo em conta a proximidade da região em relação às principais fontes sísmicas de que existe conhecimento no continente Português, e tendo em atenção aos relatos históricos de destruição ocorrida no passado. Os estudos realizados no passado para a região têm apresentado uma grande dispersão de resultados, o que agrava a incerteza sobre qual será o nível de vibração sísmica provável. Neste trabalho, são apresentadas algumas possíveis origens da variabilidade dos resultados dos diversos estudos feitos até ao momento para o Algarve, assim como são apresentados alguns desafios para a realização de futuros estudos para a região.

Palavras-chave: Perigosidade sísmica, Algarve, dispersão de resultados.

1. INTRODUÇÃO

Os sismos ocorridos nos últimos anos têm demonstrado que a ação sísmica estabelecida nos códigos sísmicos das regiões afetadas por esses sismos, a partir de análises da perigosidade sísmica com base em abordagens probabilísticas, são muito inferiores aos valores registados após a ocorrência de sismos, e a que as construções são sujeitas. Assim, é importante perceber se existem analogias entre o ocorrido nesses países e o contexto do território português, designadamente do Algarve.

O sismo de Wenchuan (China) é um dos casos a analisar e a extrapolar para o Algarve, por exemplo. Este sismo teve consequências muito importantes sobre as construções, em resultado das elevadas acelerações de pico registadas, cujo valor máximo foi de 0.98 g [1, 2]. Contudo, o sismo ocorreu numa zona de baixa sismicidade, logo a ação sísmica estabelecida no código sísmico Chinês era muito inferior à que foi registada, atendendo à baixa probabilidade de ocorrência de um evento sísmico destruidor na zona, resultante da fraca sismicidade existente, dado que a energia foi sendo acumulada, lentamente, ao longo de um intervalo de tempo entre 1000 a 3000 anos [3].

Outro sismo importante de analisar é o sismo de L'Aquila (Itália) de 2009. Mais uma vez, foram registadas acelerações muito superiores ao estabelecido no código sísmico italiano, com graves consequências para o património edificado [4, 5].

Também os sismos ocorridos em Christchurch (Nova Zelândia) em 2011 (com valores de pico a atingir 1.6 g em Heathcote Valley e 0.7 g no centro de Christchurch), e em Lorca (Espanha) em 2011 (0.37 g), apresentaram registos com acelerações muito superiores aos valores estabelecidos nos respetivos códigos sísmicos desses países [6, 7].

Estes sucessivos insucessos observados um pouco por todo o mundo (já não são meros casos isolados), têm sido o motivo pelo qual começam a surgir algumas opiniões críticas sobre o uso das abordagens probabilísticas tradicionais na realização de mapas de perigosidade sísmica [8].

Será que estes insucessos poderão estar relacionados com a forma como a ação sísmica é estabelecida a partir das tradicionais abordagens probabilísticas? Será que o problema poderá estar relacionado com o método de cálculo da probabilidade de ocorrência dos eventos sísmicos numa determinada região de baixa a média sismicidade? Como é conhecido, os vulgares métodos de análise da perigosidade sísmica, baseados nas abordagens probabilísticas tradicionais, não têm em conta a acumulação prévia de energia (e o estado de tensão instalado à data da realização do estudo de perigosidade sísmica) numa determinada zona, e que pode resultar de um processo lento, realizado ao longo de muitos séculos (ou mesmo milénios).

Atendendo aos resultados contraditórios entre a fraca sismicidade observada nas últimas décadas no Algarve (que ainda assim tem sido a região de Portugal Continental onde têm sido observadas as maiores intensidades sísmicas nesse período de tempo), e os relatos

históricos de destruição resultante de sismos ocorridos no passado, designadamente os sismos que afetaram o Algarve ocorridos nos anos de 309, 382, 1309, 1356, 1504, 1587, 1719, 1722, 1755, 1856, 1969 [9-15], é da maior importância perceber qual deverá ser a ação sísmica a considerar na região.

Este trabalho apresenta uma revisão dos estudos de perigosidade sísmica realizados no passado para o Algarve, e pretende levantar algumas questões sobre que fatores e incertezas deverão ser contemplados nos estudos futuros para a região, à medida que o conhecimento científico for evoluindo.

2. ANÁLISE DA PERIGOSIDADE SÍSMICA

Existe uma multiplicidade de abordagens para a análise da perigosidade sísmica de um determinado local. Neste trabalho, as diferentes abordagens são agrupadas em abordagens determinísticas, abordagens probabilísticas e abordagens semi-probabilísticas.

2.1 Abordagens determinísticas

As abordagens determinísticas são estratégias muito diretas para a quantificação de movimentos sísmicos necessários ao dimensionamento de construções muito importantes, que não podem apresentar falhas de funcionamento ou problemas estruturais, como as centrais nucleares ou as barragens, por exemplo. Nestas abordagens, é estabelecido o cenário mais gravoso para a estrutura em causa [16].

É possível projetar uma estrutura para um cenário determinístico que seja, possivelmente, o pior cenário sísmico a afetar essa estrutura. Contudo, o projeto de estruturas mais correntes poderá ser economicamente inviável, atendendo aos custos que estes cenários extremos poderão originar [17].

2.2 Abordagens probabilísticas

As abordagens probabilísticas ganharam relevo com o trabalho de Cornell de 1968 [18], que propôs um método que permite quantificar os movimentos sísmicos que estão associados a uma determinada probabilidade de excedência (e a um período de retorno). O método de Cornell é baseado no teorema da probabilidade total, em que a probabilidade de excedência de um efeito Y , num determinado local de estudo, resulta da soma das contribuições de todas as zonas, com potencial para gerarem sismos, consideradas na análise. Cornell considerou que o evento sísmico corresponde a um ponto, mas que a zona sismogénica pode corresponder a um ponto, a uma linha ou a uma área. Neste pressuposto de fonte pontual, é admitido que a energia é toda irradiada a partir de um ponto (o foco ou o epicentro). Este método foi implementado no programa EQRISK [19] e largamente usado nos primeiros estudos de perigosidade sísmica [20].

Mais tarde, em 1977, Der Kiureghian e Ang [21] apresentaram uma variante ao método proposto por Cornell, com fonte extensa, que teve em conta o comprimento da rotura, o que

permitiu a consideração do efeito da proximidade a essa rotura. Bender [22] deu seguimento a este tipo de abordagem, que foi implementada nas diversas versões do programa SEISRISK [23].

Em 1995, McGuire [24] propôs a desagregação da perigosidade sísmica como forma de obter um "sismo de projeto", designadamente caracterizado por uma única magnitude e uma distância (epicentral ou focal).

Estas abordagens têm sido aplicadas na realização de estudos de perigosidade sísmica, um pouco por todo o mundo, designadamente também para o Algarve.

2.3 Abordagens semi-probabilísticas

Existe um debate muito participado na comunidade científica sobre quais as abordagens mais adequadas para a realização de estudos de perigosidade sísmica, designadamente para a definição da ação sísmica [25]. Alguns investigadores defendem uma separação menos vincada entre as abordagens determinísticas e as abordagens probabilísticas [26, 27]. McGuire [27] defende que as abordagens determinísticas e as abordagens probabilísticas devem ser complementares entre si, pois a utilização de abordagens probabilísticas podem auxiliar a construção de cenários determinísticos, assim como estes últimos poderão ajudar a refinar os resultados de estudos de perigosidade que adotam abordagens probabilísticas. Bommer [26] afirma que uma divisão abrupta entre estas duas abordagens pode ser limitativa, colocando ainda a hipótese do recurso a múltiplos cenários determinísticos a par da utilização de simuladores sísmicos.

Neste contexto, Estêvão [28] sugeriu uma abordagem híbrida, que tentou conciliar características das abordagens probabilísticas com as abordagens determinísticas. De uma forma resumida, esta abordagem prevê a realização de simulações de sismos em falhas escolhidas de forma determinística (nas falhas conhecidas mais próximas do local de estudo), com magnitudes que estejam associadas a determinadas probabilidades de excedência (logo, a determinados períodos de retorno T_R).

3. ESTUDOS REALIZADOS NO PASSADO PARA O ALGARVE

O primeiro mapa de perigosidade sísmica (antigamente também designada por casualidade sísmica) para definição da ação sísmica a aplicar ao dimensionamento de estruturas, data de 1958 [29]. Nesse mapa, o Algarve estava integrado na zona A, a de maior perigosidade do território Português Continental (de entre as zonas A, B e C). Esse mapa não apresentou alterações na regulamentação seguinte [30].

Nos anos setenta do século XX, Oliveira [31] realizou um estudo pioneiro relativo à perigosidade sísmica de Portugal, de grande inovação científica para a época, muito embora fosse condicionado pela reduzida informação existente à altura, designadamente sobre a atenuação das ondas sísmicas no nosso território, pois o número de registos de movimentos sísmicos intensos, obtidos a nível mundial, ainda era muito reduzido. É de salientar a

proposta do uso das técnicas de transformação de coordenadas usadas nos elementos isoparamétricos, nos modelos de análise de estruturas por elementos finitos, no âmbito da análise da perigosidade sísmica. Nesse estudo, o Algarve aparece como a região de maior perigosidade sísmica, apresentando um valor de aceleração de pico em rocha de 177 cm/s^2 (sismos próximos e sismos mais afastados) para um período de retorno $T_R = 1000$ anos.

Este trabalho esteve na base da ação sísmica estipulada no "Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes", RSAEEP, de 1983 [32]. No RSAEEP são apresentados dois sismos tipo (valor implícito de $T_R = 975$ anos): um cenário de sismo próximo e um cenário de sismo afastado (de maior magnitude). Para o Algarve (zona A) e para rocha (terreno tipo I), o valor de aceleração de pico estipulado foi de 177 cm/s^2 para um cenário de sismo próximo, e 107 cm/s^2 para um cenário de sismo afastado. Estes valores eram afetados de um coeficiente parcial de segurança igual a 1.5, o que origina o agravamento dos valores para 266 cm/s^2 e 161 cm/s^2 , respetivamente.

Após a análise aos efeitos do sismo dos Açores de 1980, Oliveira [33] aponta para a necessidade da revisão do RSAEEP e da importância do estudo da variabilidade da ação sísmica com a presença de diferentes formações geológicas locais.

Mais tarde, Campos-Costa [34] também realizou um estudo de perigosidade sísmica inovador, tendo realizado a desagregação da perigosidade sísmica em termos da magnitude e da distância epicentral para diversos locais de Portugal. Nesse trabalho, o Algarve aparece como sendo a região de maior perigosidade sísmica global. Foram obtidos valores de aceleração de pico para a cidade de Faro ($T_R = 1000$ anos) de 103 cm/s^2 para um cenário de sismo próximo, 321 cm/s^2 para um cenário de sismo afastado, e 322 cm/s^2 para o total dos dois cenários. Estes resultados constituem um significativo agravamento da ação sísmica para o Algarve, por comparação com o RSAEEP.

Após estes estudos, ambos considerando fontes pontuais, foram realizados muitos outros, uns com fontes pontuais, outros considerando o comprimento da rotura, com resultados muito distintos, donde se destacam alguns que se enumeram em seguida.

Em 1996, Luísa Sousa [35] realizou um outro estudo, com base no programa EQRISK, que também apontou o Algarve com sendo a região com maior perigosidade sísmica do continente Português.

Estêvão [36] desenvolveu o programa SRAPOR, onde implementou os métodos de Cornell (fontes pontuais) e Der Kiureghian e Ang (fontes extensas), que usou para realizar um estudo de sensibilidade (com $T_R = 1000$ anos) do efeito da delimitação das zonas sismogénicas e do tipo de método usado (com fontes pontuais ou com fonte extensa) nos resultados da perigosidade sísmica para Faro, tendo obtido valores entre 160 e 311 cm/s^2 , que se enquadravam nos estudos anteriores. Mais tarde, Estêvão e Oliveira [37] apresentaram outro estudo de sensibilidade dos resultados em função da profundidade do foco. Esse estudo foi realizado para Faro com o programa SRAPOR, e com fontes extensas,

e originou valores médios entre 153 e 278 cm/s^2 , para $T_R = 475$ anos, e valores entre 181 e 348 cm/s^2 , para $T_R = 1000$ anos.

Outro estudo realizado para o Algarve com o programa SEISRISK III (fonte extensa), originou acelerações de pico compreendidas entre 0.15g (Alcoutim) e 0.35g (Sagres), para $T_R = 975$ anos [38].

Oliveira et al. [39] apresentaram em 1999 uma proposta de um zonamento da ação sísmica distinto para o cenário de sismo próximo e de sismo afastado. Nesta proposta, o Vale do Tejo corresponde à zona com maior perigosidade sísmica para o cenário de sismo próximo, e o Barlavento Algarvio a zona com maior perigosidade sísmica para o cenário de sismo afastado.

Estêvão e Oliveira [40] realizaram outro estudo de sensibilidade dos resultados da perigosidade sísmica para o Algarve, com base no SRAPOR, em função da inclusão ou não da sismicidade histórica, e com fontes pontuais ou com fontes extensas. Os resultados obtidos para $T_R = 1000$ anos ficaram compreendidos entre 290 e 350 cm/s^2 (Costa Vicentina) e entre 170 e 250 cm/s^2 (Guadiana).

Luísa Sousa [41] em 2006 realizou outro estudo de perigosidade sísmica para Portugal Continental, tendo apontado o Algarve como sendo a região com maior perigosidade.

Vilanova e Fonseca [42] apresentaram em 2007 um estudo para Portugal Continental, com recurso ao SEISRISK III e a diversas leis de atenuação. Depois, recorreram a uma árvore lógica para a determinação das acelerações de pico. Os maiores valores foram obtidos para o Vale do Tejo e para o Algarve, com cerca de 0.20g para $T_R = 475$ anos.

Peláez et al. [43] realizou um estudo para Portugal Continental, tendo sido realizada a desagregação da perigosidade sísmica para diversas cidades. De acordo com esse estudo, a maior aceleração de pico de Portugal Continental é obtida em Sagres, com os valores a reduzirem para o Sotavento Algarvio. O valor obtido para Faro, para $T_R = 475$ anos, foi de 274 cm/s^2 .

Um outro estudo de perigosidade sísmica [44], que também realizou a desagregação dessa perigosidade, apontou o Barlavento Algarvio como a região do continente que maior perigosidade sísmica apresenta, e sendo condicionada pelo cenário de sismo afastado.

Neste contexto, o Anexo Nacional do Eurocódigo 8 [45] elegeu o Algarve como a região de maior perigosidade sísmica ($T_R = 475$ anos), apresentado valores máximos de 250 cm/s^2 para o cenário de sismo afastado, e 170 cm/s^2 para o cenário de sismo próximo (terreno A).

Estêvão [28], recorrendo à abordagem semi-probabilística referida anteriormente neste trabalho, estabeleceu um conjunto de cenários para magnitudes e localizações das roturas muito próximas das obtidas das desagregações da perigosidade realizadas para o Algarve [43, 44]. Nesse trabalho, recorrendo ao simulador estocástico SIMULSIS, cuja capacidade em simular os efeitos dos sismos já foi comprovada por comparação com os registos de diversos sismos ocorridos no passado um pouco por todo o mundo [28, 46, 47], obteve

níveis de aceleração muito variáveis (muito inferiores e também muito superiores) quando comparados com os estabelecidos na NP EN1998-1:2010, dependendo da profundidade da rotura (nos cenários de sismos próximos) e das características dos terrenos de fundação (tanto para os sismos próximos como para os sismos afastados). É importante salientar que as magnitudes foram estabelecidas, unicamente, com base no catálogo instrumental das últimas décadas, pelo que podem ser encarados como limites inferiores.

Estes resultados de perigosidade sísmica estão em consonância com a perceção da necessidade da realização do Estudo de Risco Sísmico e Tsunamis do Algarve, promovido pela Autoridade Nacional de Proteção Civil em 2007.

Um dos estudos mais recentes realizados para o Algarve, foi integrado no projeto SHARE [48], que, na sua génese, pretendeu estabelecer uma harmonização na Europa para as análises da perigosidade sísmica e facilitar a revisão dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8, tendo contado com a participação de um elevado número de investigadores. Neste estudo, que, para além dos resultados dos modelos numéricos, envolve a opinião dos especialistas intervenientes, designadamente na atribuição dos pesos que constam da árvore lógica que origina o resultado final, teve como sequência a elaboração de um mapa de perigosidade sísmica para a Europa. Nesse mapa, o Algarve apresenta valores inferiores aos dos estudos realizados até então para a região, com acelerações muito baixas para $T_R = 475$ anos, colocando a região de Lisboa como aquela que apresenta a maior perigosidade sísmica do território nacional continental.

4. INCERTEZAS A CONSIDERAR

As incertezas associadas aos estudos de perigosidade sísmica podem ser agrupadas em incertezas aleatórias (resultantes do carácter imprevisível do fenómeno) e incertezas epistémicas (associadas às lacunas do conhecimento existente sobre o fenómeno) [20]. Nas incertezas epistémicas podemos salientar as incertezas nos modelos de análise adotados (resultantes, por exemplo, do uso de modelos matemáticos menos adequados para traduzir as características físicas do fenómeno) e as incertezas nos dados usados. Em relação às aleatórias, e no contexto do Algarve, é fácil perceber que existem grandes incertezas associadas às características das roturas, designadamente a sua localização e magnitude, a existência ou não de asperezas e o padrão de deslizamentos no plano da falha, ou a queda de tensão média.

4.1 Características da rotura e da propagação

É muito difícil incluir as incertezas sobre as características da rotura nas análises da perigosidade sísmica com base em abordagens probabilísticas. Essencialmente, as incertezas contempladas nessas abordagens estão resumidas na contabilização das possíveis magnitudes, na delimitação das zonas sismogénicas (normalmente são estabelecidas de forma determinística e não probabilística) e nas dispersões inerentes aos

resultados das leis de atenuação, que também refletem as características da propagação. Estudos realizados para Portugal no passado, demonstraram a importância da delimitação das zonas geradoras de eventos sísmicos e da profundidade da rotura nos resultados da perigosidade sísmica [28, 36, 37, 40, 49]. Na Fig. 1 estão apresentadas as principais falhas conhecidas na proximidade do Algarve [50-52], assim como estão localizados os epicentros dos sismos com magnitudes superiores a dois, ocorridos desde 1996 (fonte: Instituto Português do Mar e da Atmosfera).

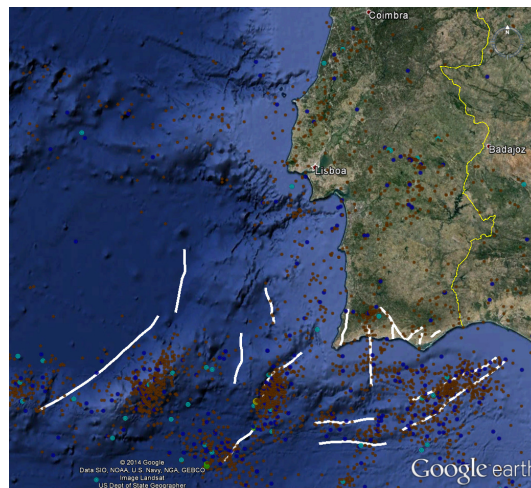


Figura 1. Localização das principais falhas sísmicas conhecidas em torno da região do Algarve e localização dos epicentros dos sismos com magnitude $M \geq 2$, ocorridos nas últimas duas décadas.

Da observação da Fig. 1, é possível atribuir alguma correlação entre a localização dos epicentros e das falhas das zonas do Banco de Guadalquivir, da Falha de S.Vicente e da Falha de Portimão. Estas zonas são relativamente próximas do Algarve, pelo que as ondas sísmicas poderão não sofrer grande atenuação.

As dispersões das leis de atenuação podem traduzir, indiretamente, questões relacionadas com os fenómenos de diretividade, com a proximidade a possíveis asperezas, com a localização relativa do foco em relação ao plano da falha, e com a queda de tensão média, entre outras. Contudo, será em termos médios e não para uma determinada fonte sísmica em particular. Estas incertezas também têm grande influência nos resultados [28, 46, 47].

4.2 Recorrência do fenómeno sísmico

Nas abordagens probabilísticas tradicionais, é usual considerar que a ocorrência dos eventos sísmicos constitui um processo estacionário, sendo a probabilidade de ocorrência de um evento sísmico, com uma magnitude superior a um determinado valor, obtida a partir dos parâmetros da Lei de Gutenberg-Richter. Contudo, só o processo de acumulação de energia é que poderá ser considerado estacionário (isto admitindo que as velocidades relativas entre as placas tectónicas se mantêm constantes), mas não a libertação de energia [28].

Estudos de paleossismicidade indiciam que pontos individualizados das falhas, e segmentos dessas falhas, tendem a apresentar o mesmo nível de deslizamento, para cada sismo que lá ocorra. Este facto tem sido interpretado como sugerindo que as falhas, individual e repetidamente, geram sismos com a mesma ordem de grandeza de magnitude, conhecidos como sismos característicos [16], que podem não seguir a Lei de Gutenberg-Richter [28].

Alguns autores sugerem que as heterogeneidades dos planos das falhas (asperezas/barreiras) são as responsáveis pela existência ou não de um sismo característico [53]. De acordo com estes autores, as falhas são compostas por zonas muito ásperas (com muitas barreiras/grande dimensão fractal, logo com um valor elevado de b da Lei de Gutenberg-Richter), de rotura frágil com elevadas quedas de tensão, e zonas menos ásperas (com poucas barreiras/pequena dimensão fractal, logo pequeno valor de b) com rotura associada a menores quedas de tensão. Caso o foco de um sismo tenha início numa zona menos áspera, a rotura poderá ser propagada até às zonas mais ásperas. A zona mais áspera poderá suportar a concentração de tensões provenientes da frente de rotura com alguma probabilidade, funcionando como barreira. Por outro lado, caso, inicialmente, uma zona áspera rompa, as zonas menos ásperas adjacentes terão grandes probabilidades de romperem, o que pode resultar na ocorrência de um grande evento sísmico. Assim, os sismos pequenos e intermédios irão ocorrer entre as zonas mais ásperas, que funcionam como barreiras. Por princípio, a sismicidade de grandes áreas dessas zonas (mais e menos ásperas) irá seguir a Lei de Gutenberg-Richter, e as pequenas áreas irão favorecer a existência de sismos característicos. Se esta teoria estiver correta, então as regiões com zonas sismogénicas possuidoras de grandes heterogeneidades (asperezas/barreiras), poderão apresentar valores de perigosidade muito inferiores aos reais, pois as incertezas associadas à existência dessas heterogeneidades, e correspondente acumulação prévia de energia, não são contempladas nas tradicionais abordagens probabilísticas. Esta hipótese pode ganhar relevo, se observarmos o que aconteceu no Chile, onde foi identificado (por GPS) um decréscimo da taxa de deslizamento na zona de Concepción [54], provavelmente associada à existência das duas asperezas que mais tarde romperam em 2010 [55], originando um sismo de uma magnitude da mesma ordem de grandeza da magnitude provável do sismo ocorrido em Portugal em 1755. O mesmo problema se colocou no sismo de Tohoku, no Japão [56]. Mais uma vez, a proximidade às asperezas, e os fenómenos de diretividade, influenciaram o nível de vibração e os danos observados nos edifícios [57].

Extrapolando esse conhecimento para o Algarve, o que sabemos é que existe o conhecimento histórico de importantes crises sísmicas no passado, que provocaram elevado grau de destruição no Algarve, designadamente no século dezoito, em que ocorreram vários sismos em poucos anos, como sejam os sismos de 1719, de 1722 e de 1755 [11]. No entanto, somos obrigados a assumir que o catálogo sísmico instrumental, sem eventos sísmicos relevantes nas últimas décadas (Fig. 1), e as baixas taxas de deslizamentos nas falhas, constituem amostras representativas da sismicidade da região (ainda que seja a mais elevada de Portugal Continental). Face ao conhecimento que hoje existe sobre as

falhas próximas do Algarve, tudo indica que elas tem potencial para gerar sismos com elevadas magnitudes e potencial de destruição, atendendo a que, tal como no Chile e no Japão, elas podem possuir grandes asperezas que condicionam a sismicidade atual. Contudo, os períodos de retorno poderão ser muito longos. No entanto, é possível que algumas dessas falhas já estejam a acumular energia há milhares de anos, pelo que a probabilidade de ocorrência de um evento sísmico, condicionada a essa acumulação prévia de energia, poderá ser muito maior do que o obtido quando se admite que a ocorrência dos eventos sísmicos constitui um processo estacionário, cujos parâmetros são baseados na recente sismicidade instrumental, e na muito conhecida Lei de Gutenberg-Richter. Somente quando ocorrerem mais sismos, e de maiores magnitudes, e obtivermos os registos de movimentos sísmicos intensos, poderemos reduzir as atuais incertezas.

4.3 Efeitos geológicos locais

Tem sido evidente a influência dos efeitos geológicos locais no nível de vibração sísmica de um determinado local, designadamente a partir das simulações de sismos ocorridos no passado, em locais onde existem os registos dos sismos e onde são conhecidos os dados da geologia superficial e do substrato rochoso [28].

As vulgares leis de atenuação, usualmente adotadas em estudos de perigosidade sísmica, normalmente consideram o complexo efeito das camadas de solo superficial, através de um único parâmetro, pelo que as dispersões de resultados são muito grandes. Estudos têm demonstrado que as características das camadas de solo, conjuntamente com a profundidade do substrato rochoso e o contraste de impedância são muito influentes no nível de vibração espectável para diversas localidades do Algarve [28].

Na Fig. 2 estão apresentadas curvas com o exemplo de uma possível evolução da aceleração de pico com a distância, obtidas para um conjunto de localidades da costa do Algarve, que foram obtidos com o programa SIMULSIS, para um sismo ocorrido na falha de S. Vicente com $M = 7.7$ ($T_R = 475$ anos), num afloramento rochoso de referência e num terreno brando existente numa zona ribeirinha de Portimão, que foi usado em estudos anteriores [28], típico da costa da região, e relacionam a aceleração de pico (média de 50 simulações) com a menor distância à projeção da rotura à superfície.

4.4 Proximidade à rotura

Gail Atkinson escreveu que, o que pode ser baixo num estudo de perigosidade sísmica com abordagens probabilísticas, é o valor probabilístico do nível de vibração num local, e não a probabilidade do evento sísmico realmente ocorrer [20]. O que os sismos ocorridos um pouco por todo o mundo têm demonstrado é que, ocorrido o evento sísmico, existe sempre um conjunto de edifícios próximos da rotura, quando tratados como um grupo (admitindo que o objeto de estudo é um conjunto de edifícios e não um edifício), que poderão estar sujeitos a níveis de vibração muito superiores aos valores obtidos em termos probabilísticos, quando cada edifício, individualmente, é tratado como sendo o objeto de estudo [28].

Tomemos o exemplo da Fig. 3, em que três edifícios (1 a 3) se localizam à mesma distância de uma falha sísmica (AB). É fácil perceber que, para uma determinada magnitude M, com rotura, por exemplo, de um terço da falha, se esta ocorrer na extremidade B, o edifício 1 será o menos afetado e o edifício 3 o mais afetado. Esse facto tem reflexo no cálculo da probabilidade de excedência individual, e, portanto, no nível da ação de projeto a considerar.

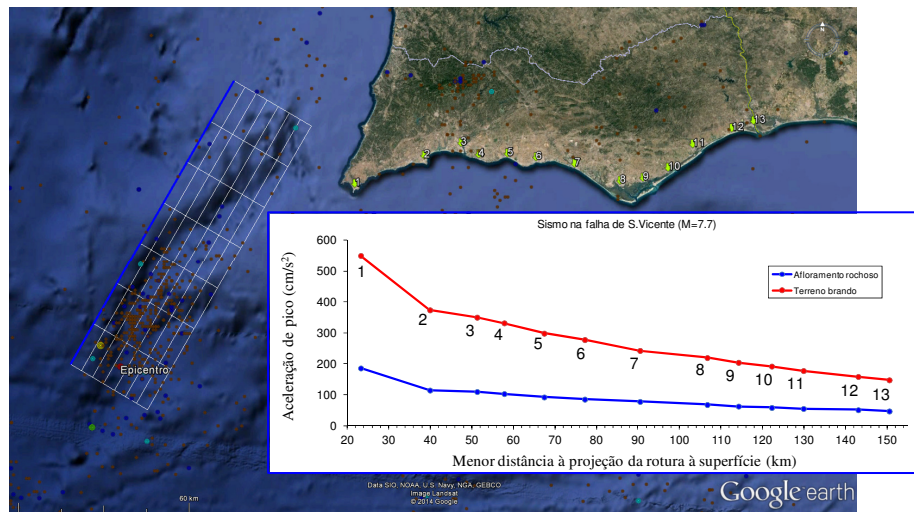


Figura 2. Exemplo da atenuação da aceleração de pico com a distância, obtida para o Algarve num afloramento rochoso e num terreno brando típico da região (M=7.7).

Se analisarmos o conjunto de edifícios como um todo, então a probabilidade de um deles ser sujeito a uma elevada aceleração é muito maior, pois qualquer que seja o troço da falha AB que rompa, estará próximo de um dos três edifícios, ainda que mais afastada dos restantes. Se pretendemos garantir que não existem perdas das vidas humanas nos três edifícios da figura, então temos que garantir que nenhum deles vai ser sujeito a um nível de vibração que ponha em causa essa salvaguarda, para um determinado período de retorno do evento sísmico. Tal só poderá ser garantido se o objeto de estudo corresponder ao conjunto dos edifícios situados a uma determinada distância da fonte sísmica, e não a cada um deles, individualmente. Nos estudos de perigosidade sísmica a realizar no futuro para o Algarve, e no contexto da definição da ação sísmica com fonte próxima, em vez de ser calculada a probabilidade "do" edifício ser sujeito a um determinado nível de ação sísmica (que é a usual prática atual), talvez seja mais adequada a determinação da probabilidade "de um" qualquer edifício pertencente a um aglomerado habitacional poder vir a ser sujeito a essa ação, o que irá aumentar a ação sísmica para uma fonte próxima.



Figura 3. Exemplo da localização de diferentes objetos de estudo em relação a uma falha.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As incertezas atrás referidas, em relação aos fatores que condicionam a perigosidade sísmica, recomendam uma atitude prudente na definição da ação sísmica de projeto para o Algarve. Dos estudos já realizados, e descritos anteriormente, os resultados do projeto SHARE parecem ser aqueles que mais se afastam da média, apresentando valores inferiores. O que parece incoerente nesse estudo é o facto da perigosidade sísmica de Lisboa não ter tido esse decréscimo. Quando observamos a Fig. 1, é fácil concluir que a sismicidade instrumental é muito mais reduzida na zona de Lisboa do que na envolvente ao Algarve, que foi a região mais afetada pelo último sismo (em 1969) a provocar destruição no património edificado em Portugal Continental. Já ocorreram alguns sismos destruidores que afetaram Lisboa e não o Algarve. Contudo, também os sismos ocorridos em 1719 e 1722 só afetaram o Algarve [11]. Em relação ao sismo de 1755, os maiores danos também ocorreram no Algarve. Faro é um bom exemplo, pois não foi muito afetada pelo tsunami, nem por grandes incêndios, pelo que a destruição generalizada ocorrida na cidade terá sido resultante, somente, do nível de vibração sísmica a que as construções foram sujeitas. Por outro lado, Lisboa foi também afetada por um incêndio e pelo tsunami, o que torna mais difícil distinguir a contribuição individual de cada fenómeno no nível de destruição relatada à época. A destruição resultante do nível de vibração não foi homogénea, sendo evidente a importância da geologia local [58], o que também pode ser confirmado a partir dos resultados de simulações realizadas para algumas construções sobreviventes ao sismo [28]. É muito provável que o fator da geologia superficial agrave as intensidades sísmicas observadas nos sismos do passado, o que poderá condicionar a perceção do nível da ação sísmica realmente ocorrido em afloramento rochosos.

Em relação ao futuro, será desejável que os estudos de perigosidade sísmica contemplem a possível existência de asperezas, a variabilidade na queda de tensão na fonte, e incluam os fenómenos de diretividade, que podem condicionar os resultados. Também parece evidente que os efeitos dos terrenos de fundação, designadamente as características das diversas camadas de solo, das profundidades do substrato rochoso e correspondentes contrastes de impedância, deverão ser devidamente considerados nesses estudos. Obviamente que a dispersão inerente às leis de atenuação já resulta deste tipo de problemas, pelo que os estudos de perigosidade sísmica que incluem no modelo essas incertezas, em termos gerais estão a contemplar esses problemas. Contudo, dificilmente conseguem tratar corretamente as situações relacionadas com a existência de roturas próximas das localidades (como é o caso de muitas localidades do Algarve, situadas nas proximidades de falhas ativas reconhecidas em estudos científicos e em documentos oficiais [59]), e atendendo ao apresentado na Fig. 3, e dificilmente contemplan os efeitos dos solos de uma forma eficaz, provavelmente de grande importância para as localidades costeiras do Algarve (ver Fig. 2).

No contexto da engenharia de estruturas, a definição de cenários sísmicos parece ser a forma mais desejável de estabelecer uma ação sísmica de projeto, pois possibilita uma melhor compreensão dessa ação por parte de um projetista, por parte dos utentes que vão

habitar essa construção, e por parte dos governantes que têm um papel importante na definição de medidas de mitigação do risco sísmico. Por outro lado, ao selecionarmos os piores cenários de rotura (determinísticos) para uma determinada magnitude (esta sim estabelecida em termos probabilísticos), estaremos a contornar algumas aparentes falhas na definição do nível da ação sísmica, que têm sido evidentes um pouco por todo o mundo [1-7], e que podem resultar da aplicação das tradicionais abordagens probabilísticas a zonas com fraca sismicidade instrumental, mas onde existe o conhecimento histórico da ocorrência de eventos sísmicos destrutivos recorrentes. Os cenários poderão ser resultantes da desagregação da perigosidade sísmica, ou de uma abordagem semi-probabilística, ou ainda resultantes de combinações de ambas as situações, através do recurso a árvores lógicas.

REFERÊNCIAS

- [1] Li, X.; Zhou, Z.; Yu, H.; Wen, R.; Lu, D.; Huang, M.; Zhou, Y.; Cu, J. – "Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan Earthquake", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 7 (3), 2008, p. 235-246. 10.1007/s11803-008-0892-x
- [2] Zhao, B.; Taucer, F. – "Performance of Infrastructure During the May 12, 2008 Wenchuan Earthquake in China", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 14 (4), 2010, p. 578-600. 10.1080/13632460903274053
- [3] Tsang, H.-H. – "Lessons Learnt from the 512 Wenchuan Earthquake:: Perception of Seismic Risks", *Proceedings da Special Session on 512 Wenchuan Earthquake*, Australian Earthquake Engineering Society Conference AEES, Ballarat, Victoria, 2008, p. 1-16, paper 11.
- [4] Masi, A.; Chiauzzi, L.; Braga, F.; Mucciarelli, M.; Vona, M.; Ditommaso, R. – "Peak and integral seismic parameters of L'Aquila 2009 ground motions: observed versus code provision values", *Bull Earthquake Eng*, Vol. 9 (1), 2011, p. 139-156. 10.1007/s10518-010-9227-1
- [5] Rossetto, T.; Peiris, N.; Alarcon, J.E.; So, E.; Sargeant, S.; Free, M.; Sword-Daniels, V.; Del Re, D.; Libberton, C.; Verrucci, E.; Sammonds, P.; Faure Walker, J. – "Field observations from the Aquila, Italy earthquake of April 6, 2009", *Bull Earthquake Eng*, Vol. 9 (1), 2011, p. 11-37. 10.1007/s10518-010-9221-7
- [6] Kam, W.Y.; Pampanin, S. – "The seismic performance of RC buildings in the 22 February 2011 Christchurch earthquake", *Structural Concrete*, Vol. 12 (4), 2011, p. 223-233. 10.1002/suco.201100044
- [7] Cabañas, L.; Alcalde, J.M.; Carreño, E.; Bravo, J.B. – "Characteristics of observed strong motion accelerograms from the 2011 Lorca (Spain) Earthquake", *Bull Earthquake Eng*, Vol., 2013, p. 1-24. 10.1007/s10518-013-9501-0
- [8] Stein, S.; Geller, R.J.; Liu, M. – "Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it", *Tectonophysics*, Vol. 562-563 (0), 2012, p. 1-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.047>
- [9] Almeida, J.; Teves-Costa, P.; Victor, L.M. – "Sismicidade histórica", em *Risco Sísmico - Centro histórico de Lagos* Ed. por L.M. Victor (Ed.), Centro Europeu de Riscos Urbanos - EUR - OPA, Lisboa, 2006, p. 19-25.
- [10] Costa, M.; Fonseca, J. – "Sismicidade histórica em Portugal no período medieval", *Proceedings da 7º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica*, Faculdade de Engenharia, UP, Porto, 2007, p. 383.

- [11] Chester, D.K.; Chester, O.K. – "The impact of eighteenth century earthquakes on the Algarve region, southern Portugal", *The Geographical Journal*, Vol. 176 (4), 2010, p. 350–370.
- [12] Costa, A.; Seabra, C.; Nunes, S. – "O que nos diz a história", em 1755 - Terramoto no Algarve Ed. por A. Costa, M.C. Abreu (Eds.), Centro Ciência Viva do Algarve, Faro, 2005, p. 13-152.
- [13] Carrilho, F.; Pena, J.A.; Nunes, J.C. – "Sismicidade", em Estudo do risco sísmico e de tsunamis do Algarve Ed. por ANPC (Ed.), Carnaxide, 2010, p. 29-43.
- [14] Davila, J.M.; Pazos, A. – "Sismicidad del Golfo de Cadiz y zonas adyacentes", *Física de la Tierra*, Vol. 15, 2003, p. 189-210.
- [15] Oliveira, C.S. – Dados existentes sobre actividade sísmica em Portugal com importância na avaliação dos riscos sísmicos, Lisboa, Boletim de Informação Técnica 33 (3º trimestre), 1981, p. 18.
- [16] Kramer, S.L. – *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Inc, New Jersey, 1996.
- [17] Sen, T.K. – *Fundamentals of seismic loading on structures*, John Wiley and sons, Lda, 2009.
- [18] Cornell, C.A. – "Engineering seismic risk analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58 (5), 1968, p. 1583-1606.
- [19] McGuire, R.K. – EQRISK: Evaluation of earthquake risk to site. Fortran computer program for seismic risk analysis, U.S.G. Survey, Open File. Report 76-67, 1976, p.
- [20] Atkinson, G.M. – "An overview of developments in seismic hazard analysis", *Proceedings da 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, 2004, p. 1-22, Paper No. 5001.
- [21] Kiureghian, A.D.; Ang, A.H.-S. – "A fault-rupture model for seismic risk analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 67 (4), 1977, p. 1173-1194.
- [22] Bender, B. – "Seismic hazard estimation using a finite-fault rupture model", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 74 (5), 1984, p. 1899-1923.
- [23] Bender, B.; Perkins, D.M. – SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation, U.S.G. Survey, Survey Bulletin 1772, 1987, p.
- [24] McGuire, R.K. – "Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85 (5), 1995, p. 1275-1284.
- [25] Bommer, J.J. – "Uncertainty about the uncertainty in seismic hazard analysis", *Engineering Geology*, Vol. 70 (1-2), 2003, p. 165-168. 10.1016/s0013-7952(02)00278-8
- [26] Bommer, J.J. – "Deterministic vs. probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 6 (sup001), 2002, p. 43-73. 10.1080/13632460209350432
- [27] McGuire, R.K. – "Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21 (5), 2001, p. 377-384. 10.1016/s0267-7261(01)00019-7
- [28] Estêvão, J.M.C. - Efeitos da ação sísmica no comportamento de edifícios de betão armado com alvenarias de enchimento. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, Portugal, 2012.
- [29] RSCCS – Regulamento de segurança das construções contra os sismos. Decreto n. 41 658, de 31 de Maio de 1958., Imprensa Nacional, Lisboa, 1958.
- [30] RSEP – Regulamento de solicitações em edifícios e pontes. Decreto nº 44 041, de 18 de Novembro de 1961., Imprensa Nacional, Lisboa, 1961.
- [31] Oliveira, C.S. – *Sismologia, Sismicidade e Risco Sísmico. Aplicações em Portugal.*, Lisboa, Processo 36/11/4394, 1977, p. 205.

- [32] RSAEEP – Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes. Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de Maio., Imprensa Nacional-Casa da Moeda, E.P., Lisboa, 1983.
- [33] Oliveira, C.S. – "Algumas considerações sobre o comportamento das edificações com elementos em betão armado", em 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980, volume 2 Ed. por C.S. Oliveira, A.R.A. Lucas, J.H.C. Guedes (Eds.), Governo Regional dos Açores and LNEC, Lisboa, 1992, p. 461-480.
- [34] Campos-Costa, A.P.d.N. - A acção dos sismos e o comportamento das estruturas. FEUP, Lisboa, 1993.
- [35] Sousa, M.L.R.M.N.e. - Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal Continental. Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, 1996.
- [36] Estêvão, J.M.C. - Modelo computacional de avaliação do risco sísmico de edifícios. Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, 1998.
- [37] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Contribuição para a avaliação do risco sísmico: Aplicação à cidade de Faro", Proceedings da 4º Encontro nacional sobre sismologia e engenharia sísmica/2ème Rencontre em génie parasismique des pays méditerranéens, Escola superior de Tecnologia, UAlg, Faro, 1999, p. 93-102.
- [38] Afilhado, A.; Teves-costa, P.; Rio, I.; Mendes-Vitor, L. – "Risco sísmico na região do Algarve: contribuição das zonas sismogénicas do Goringe, Margem Alentejana e Algarve", Proceedings da 4º Encontro nacional sobre sismologia e engenharia sísmica/2ème Rencontre em génie parasismique des pays méditerranéens, Escola superior de Tecnologia, UAlg, Faro, 1999, p. 103-112.
- [39] Oliveira, C.S.; Sousa, M.L.; Costa, A.C. – "Contribuição para a revisão da acção sísmica em Portugal Continental no contexto do Eurocódigo 8", Proceedings da 4º Encontro nacional sobre sismologia e engenharia sísmica/2ème Rencontre em génie parasismique des pays méditerranéens, Escola superior de Tecnologia, UAlg, Faro, 1999, p. 153-164.
- [40] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Análise comparativa da casualidade sísmica do Algarve", Proceedings da 2ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Lagos, 2000, p. 241-242.
- [41] Sotto-Mayor, M.L.S. - Risco sísmico em Portugal continental. Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, 2006.
- [42] Vilanova, S.P.; Fonseca, J.F.B.D. – "Probabilistic Seismic-Hazard Assessment for Portugal", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97 (5), 2007, p. 1702-1717. 10.1785/0120050198
- [43] Peláez, J.A.; Casado, C.L.; Henares, J. – "How distant earthquakes contribute to seismic hazard in mainland Portugal", em The 1755 Lisbon earthquake: revisited Ed. por L.A. Mendes-Victor, C.S. Oliveira, J. Azevedo, A. Ribeiro (Eds.), Springer, 2009, p. 245-254.
- [44] Sousa, M.; Campos Costa, A. – "Ground motion scenarios consistent with probabilistic seismic hazard disaggregation analysis. Application to Mainland Portugal", Bull Earthquake Eng, Vol. 7 (1), 2009, p. 127-147. 10.1007/s10518-008-9088-z
- [45] IPQ – NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios., Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 2010.
- [46] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Point and fault rupture stochastic methods for generating simulated accelerograms considering soil effects for structural analysis", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 43, 2012, p. 329-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.019>

- [47] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Ground motion simulation for dynamic structural analysis: pros and cons", Proceedings da 15th World Conference on Earthquake Engineering, SPES, Lisbon, 2012, p. 1-10, paper 1527.
- [48] Giardini, D.; Woessner, J.; Danciu, L.; Cotton, F.; Crowley, H.; Grünthal, G.; Pinho, R.; Valensise, G.; Akkar, S.; Arvidsson, R.; Basili, R.; Cameelbeck, T.; Campos-Costa, A.; Douglas, J.; Demircioglu, M.B.; Erdik, M.; Fonseca, J.; Glavatovic, B.; Lindholm, C.; Makropoulos, K.; Meletti, C.; Musson, R.; Pitilakis, K.; Rovida, A.; Sesetyan, K.; Stromeyer, D.; Stucchi, M. – Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): : Online Data Resource, 2013.
- [49] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Parâmetros que condicionam os valores da casualidade sísmica", Proceedings da 5º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Laboratório Regional de Engenharia Civil, Açores, 2001, p. 29-41.
- [50] Carrilho, F.; Teves-Costa, P.; Morais, I.; Pagarete, J.; Dias, R. – "GEOALGAR Project: First Results on Seismicity and Fault-plane Solutions", Pure appl. geophys., Vol. 161 (3), 2004, p. 589-606. 10.1007/s00024-003-02464-3
- [51] Lopes, F.C.; Cunha, P.P.; Le Gall, B. – "Cenozoic seismic stratigraphy and tectonic evolution of the Algarve margin (offshore Portugal, southwestern Iberian Peninsula)", Marine Geology, Vol. 231 (1-4), 2006, p. 1-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2006.05.007>
- [52] Rosas, F.M.; Duarte, J.C.; Terrinha, P.; Valadares, V.; Matias, L. – "Morphotectonic characterization of major bathymetric lineaments in Gulf of Cadiz (Africa-Iberia plate boundary): Insights from analogue modelling experiments", Marine Geology, Vol. 261 (1-4), 2009, p. 33-47. 10.1016/j.margeo.2008.08.002
- [53] Zöller, G.; Holschneider, M.; Ben-Zion, Y. – "The Role of Heterogeneities as a Tuning Parameter of Earthquake Dynamics", Pure appl. geophys., Vol. 162 (6), 2005, p. 1027-1049. 10.1007/s00024-004-2660-9
- [54] Ruegg, J.C.; Rudloff, A.; Vigny, C.; Madariaga, R.; de Chabaliér, J.B.; Campos, J.; Kausel, E.; Barrientos, S.; Dimitrov, D. – "Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile", Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 175 (1-2), 2009, p. 78-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2008.02.015>
- [55] Saragoni, G.R.; Lew, M.; Naeim, F.; Carpenter, L.D.; Youssef, N.F.; Rojas, F.; Adaros, M.S. – "Accelerographic measurements of the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 19 (8), 2010, p. 866-875. 10.1002/tal.673
- [56] Maercklin, N.; Festa, G.; Colombelli, S.; Zollo, A. – "Twin ruptures grew to build up the giant 2011 Tohoku, Japan, earthquake", Sci. Rep., Vol. 2, 2012, p. <http://www.nature.com/srep/2012/121005/srep00709/abs/srep00709.html#supplementary-information>
- [57] Goda, K.; Pomonis, A.; Chian, S.; Offord, M.; Saito, K.; Sammonds, P.; Fraser, S.; Raby, A.; Macabuag, J. – "Ground motion characteristics and shaking damage of the 11th March 2011 M w9.0 Great East Japan earthquake", Bull Earthquake Eng, Vol. 11 (1), 2013, p. 141-170. 10.1007/s10518-012-9371-x
- [58] San-Payo, M.; Almeida, I.M.d.; Teves-Costa, P.; Oliveira, C.S. – "Contribution to the damage interpretation during the 1755 Lisbon earthquake", em The 1755 Lisbon earthquake: revisited Ed. por L.A. Mendes-Victor, C.S. Oliveira, J. Azevedo, A. Ribeiro (Eds.), Springer, 2009, p. 297-308.
- [59] MAOTDR – ProtAlgarve. Volume III - Elementos complementares, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2007.