



## PERIGOSIDADE SÍSMICA EM PORTUGAL E ESCOLHA DE REGISTOS ACELEROMÉTRICOS PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS

Carlos Sousa Oliveira<sup>a</sup> e João M.C. Estêvão<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *CEris/IST, Universidade de Lisboa*

<sup>b</sup> *DEC/ISE, Universidade do Algarve*

**Resumo.** A análise sísmica de algumas estruturas especiais ou de certa importância podem necessitar estudos não lineares onde é necessário dispor de registos acelerométricos. As estruturas metálicas e mistas existentes em instalações industriais especiais são exemplos dessa necessidade. A presente comunicação começa por rever os últimos desenvolvimentos sobre estudos de perigosidade sísmica em Portugal Continental, para depois prosseguir na análise das técnicas mais frequentes para geração de registos acelerométricos que se adaptem aos espectros definidos pela perigosidade sísmica. Será dada especial ênfase às incertezas existentes nas várias etapas de desenvolvimento dos estudos de perigosidade sísmica e à rede acelerométrica em Portugal e dados que se podem utilizar. Finalmente, serão apresentados alguns exemplos ilustrativos.

### 1. Introdução

Os sismos são fenómenos naturais de grande impacto sobre as comunidades, tendo nos últimos cem anos provocado para cima de milhão e meio de vítimas. Cinquenta por cento destas vítimas provieram de dois enormes sismos, um no Japão em 1923 e outro na China em 1976; as restantes ocorreram em sismos à média de três por ano, alguns com mais de 20 000 vítimas. Somente entre Agosto e Dezembro de 1999 ocorreram 5 grandes eventos, dos quais resultaram mais de 30 000 vítimas, mais de meio milhão de desalojados e prejuízos superiores ao PIB de Portugal.

Já no início do Século XXI a atividade sísmica no Mundo continuou a manifestar-se de forma extremamente grave, causando grande impacto nas comunidades da proximidade do epicentro quer em termos humanos como em termos económicos. Sismos como o de 2004 em Sumatra (Indonésia) que foi seguido por um enorme tsunami, o de 2008 em Sichuan (China), o do Haiti de 2010, o do Chile 2010, e o sismo de 2011 no Japão, estes dois últimos seguidos por enorme tsunami, para nomear apenas

os de maior impacto, mostram bem que a atividade sísmica não tem abrandado, antes pelo contrário, tem vindo a crescer.

O risco sísmico pretende dar conta exatamente do impacto da atividade sísmica sobre as comunidades, utilizando-se a designação de perigosidade sísmica para exprimir apenas a atividade sísmica que se pode vir a sentir num dado território num dado intervalo de tempo. De forma simples, pode afirmar-se que a perigosidade sísmica (“hazard” em inglês) mede a tendência para se sentirem sismos (ação sísmica) exprimindo essa tendência pela probabilidade de se exceder determinado valor dessa ação em determinado intervalo de tempo. A perigosidade depende da Natureza e é por ela regida, sendo impossível até aos dias de hoje poder fazer previsões da sua ocorrência para períodos de curta ou média duração (dias, anos, décadas). A previsão a longo prazo (dezenas, centenas de anos) pode ser feita e é nela que se baseiam os regulamentos de construção para a definição da ação sísmica.

O Risco Sísmico exprime o efeito da ação sísmica sobre os objetos construídos sejam eles os parques habitacional, industrial, ou o património monumental, sejam as redes de abastecimento de produtos (gás, eletricidade, água, etc.), e de transportes.

## **2. A sismicidade em Portugal Continental e as redes sísmicas**

Portugal Continental encontra-se localizado na Margem Continental Ibérica, uma transição geológica entre a chamada Crosta Oceânica a Oeste e a Crosta Continental para o centro e Leste da Península Ibérica. De forma muito genérica pode dizer-se que a atividade sísmica que se faz sentir no Continente é proveniente do jogo das placas Euro-Asiática e Africana que se encontram em colisão uma contra a outra à velocidade de cerca de 5 mm por ano. Devido a esta colisão, provocam sismos quer na zona de encontro (fronteira de placas) quer em estruturas geológicas que se prolongam da fronteira através da Margem Continental. Os sismos produzidos no movimento das placas junto à fronteira são de grande magnitude sendo sentidos a grandes distâncias. Os sismos que se produzem nas falhas que entram pelo continente através da Margem Continental são de magnitude moderada mas podem causar impactos graves nas zonas próximas das falhas que rompem. A sismicidade histórica e a instrumental, compiladas em Catálogos Sísmicos, são o melhor testemunho do efeito dos sismos sobre o território dando também conta dos tempos de ocorrência de eventos de dada magnitude.

De entre os sismos com epicentro no mar (Oceano Atlântico) aqueles que estejam associados a roturas com movimento vertical no plano de falha, para além de gerarem vibrações, podem gerar também um tsunami desde que as magnitudes sejam superiores  $M > 7,5$ . Quer os movimentos vibratórios quer as ondas provocadas pelo tsunami propagam-se de acordo com determinadas leis de velocidade, atenuando com a distância à falha e sofrendo alterações quer devido aos solos atravessados (vibrações) quer devido à morfologia da costa (onda do tsunami).

O Instituto de Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) é a instituição portuguesa que desde 2012 (anteriormente Instituto de Meteorologia, IM) gere a rede sismográfica do país (Continente e Açores; nos Açores existe ainda o Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos que gere a sua rede sismográfica), produzindo informação mensal e anual sobre todos os fenómenos sísmicos ocorridos no Continente e região vizinha e Açores e região vizinha. Para consulta da carta dos sismos registados na semana anterior ao dia da consulta, no Continente (ver [www.ipma.pt](http://www.ipma.pt)); para alguma informação mais detalhada consultar também o Instituto Geográfico Nacional de Espanha ([www.geo.ign.es](http://www.geo.ign.es)) ou uma organização em Estrasburgo que junta toda a

informação sísmica europeia ([www.emsc-csem.org/](http://www.emsc-csem.org/)). O Boletim Sísmico Mensal ou o Anuário Sismológico de Portugal, publicações do IM/IPMA contem muita informação dos sismos ocorridos, não só reportando os parâmetros mais importantes como também os tempos de chegada das várias ondas às diferentes estações sísmicas da rede.

Existem outras publicações que fornecem por períodos mais alargados as ocorrências sísmicas, constituindo Catálogos Sísmicos com toda a informação existente sobre os principais parâmetros. O Catálogo de Sousa et al. [1] contém todos os eventos de que há memória histórica desde o princípio da Era Cristã até 1991, com  $M > 3$ , um conjunto de cerca de 14000 sismos.

Para os Açores o Catálogo de Sousa e Martins [2] contém todos os eventos de que há memória histórica desde 1500 até 1998, com  $M > 3$ , um conjunto de cerca de 15000 sismos.

A informação sobre os sismos desde 1998 até aos dias de hoje pode ser encontrada nos endereços eletrónicos atrás referidos que comunicam os seguintes elementos relacionados com a atividade sísmica registada na rede sísmica, por ocorrência: data, hora, minuto e segundo na origem; localização do epicentro; profundidade do foco; magnitude do sismo.

No caso de sismo sentido, as agencias encarregadas da vigilância sísmica produzem mais informação, designadamente o “shakemap”, um instrumento onde se mostra como o sismo se faz sentir e as intensidades observadas nas povoações próximas do epicentro [3].

Portugal Continental encontra-se localizado na Margem Continental Ibérica, uma transição geológica entre a chamada Crosta Oceânica a Oeste e a Crosta Continental para o centro e Leste da Península Ibérica. A atividade sísmica que se faz sentir no Continente é proveniente do jogo das placas Euro-Asiática e Africana que se encontram em colisão uma contra a outra à velocidade de cerca de 5 mm por ano. Devido a esta colisão, provocam sismos quer na zona de encontro (fronteira de placas) quer em estruturas geológicas que se prolongam da fronteira através da Margem Continental. Os sismos produzidos no movimento das placas junto à fronteira são de grande magnitude sendo sentidos a grandes distâncias. Os sismos que se produzem nas falhas que entram pelo continente através da Margem Continental são de magnitude moderada mas podem causar impactos graves nas zonas próximas das falhas que rompem. A sismicidade histórica e a instrumental são o melhor testemunho do efeito dos sismos sobre o território dando também conta dos tempos de ocorrência de eventos de dada magnitude.

As principais zonas de geração dos sismos e tsunamis têm sofrido uma evolução desde que se começaram a produzir as cartas de perigosidade tanto em número como na forma, refletindo o conhecimento que a Neotectónica vai tendo ao longo dos tempos. Normalmente estas zonas correspondem a áreas onde a atividade sísmica é uniforme ou linhas coincidentes com falhas ativas. Podem também coincidir com pontos onde a atividade sísmica é mais relevante. Se soubermos a profundidade dos focos, então estamos em presença de volumes ou planos de geometria variável em profundidade como seja o caso de uma falha bem conhecida em torno da qual os sismos se aglomeram. Nas zonas de geração admite-se que a atividade é bem conhecida, geralmente uniforme, e para a qual existe informação sobre a distribuição de epicentros [4]. Com o melhorar das redes sísmicas num território tem sido possível aperceber-nos melhor sobre a forma como a libertação de energia se vai processando, tanto no espaço como no tempo. Esta libertação súbita no tempo está relacionada com as tensões acumuladas em torno das falhas e é praticamente impossível identificar-se onde irá ocorrer a próxima libertação, impedindo dessa forma que a Ciência consiga fazer previsões a curto prazo. Esta libertação, caracterizada pela magnitude, vai depender do

intervalo de tempo desde a última ocorrência, e o fenómeno físico associado é extraordinariamente complexo, dependendo de inúmeros parâmetros de difícil acesso. São eles a compressão entre os bordos da falha, e o respetivo angulo de incidência, as forças de atrito que se desenvolvem, as asperezas existentes no plano de falha, o traçado da falha, etc.

O fenómeno de rotura inicia-se numa zona da falha onde as forças atuantes tenham ultrapassado a resistência dos materiais e depois a rotura é propagada a outras zonas onde o material ficou mais debilitado, como acontece num edifício onde haja um colapso de um pilar que depois é transmitido a outros pilares que entretanto ficaram sujeitos a maiores cargas devido à rotura do primeiro. Este fenómeno de propagação da rotura ao longo da falha é extremamente importante para se saber qual a magnitude do sismo que vai acontecer e de como as ondas sísmicas produzidas pela rotura progressiva vão afetar as zonas envolventes.

Hoje em dia com as estações que existem em redor de uma falha é possível reconstituir a forma como se deu a rotura de uma falha, com tal pormenor como acontece nas análises de tomografia que fazemos ao corpo humano. O problema é que temos de trabalhar antecipando o que possa vir a acontecer e isso é que para já se torna impossível dado o infindável número de combinações que poderão vir a ocorrer. Só para dar um pequeno exemplo ilustrativo do que estamos a falar, basta pensarmos que a falha pode iniciar rotura no meio e propagar rotura para os dois lados, ou iniciar numa ponta e a rotura propagar até à outra extremidade. Qualquer destas soluções irá produzir movimentos do solo bem diferenciados. Esta a razão pela qual a engenharia dos movimentos fortes prefere basear-se em modelos muito simples, com um ou dois parâmetros e procurando soluções que lhe pareçam razoáveis. As incertezas são imensas, a começar pela localização das falhas, sua descrição geométrica, comprimento do que pode romper e possível mecanismo de rotura. Deste mecanismo, que define a direção da rotura no plano da falha depende também estarmos em presença de uma falha que gera apenas vibrações ou, caso se localize no fundo do oceano, possa gerar um tsunami (se a rotura tiver movimento na direção vertical). No entanto para que um tsunami possa ocorrer é possível recorrer a um conjunto de algumas regras empíricas. Por exemplo, um tsunami só tem lugar se o movimento na falha possuir componente vertical de algum valor (maior que 1 m) o que por outras palavras se reduz a sismos com magnitudes superiores a  $M > 7.5$ .

A atividade sísmica em Portugal Continental é conhecida desde o Século X, mas só a partir de 1755 os registos são mais bem documentados. A informação sobre os grandes terremotos tem passado ao longo dos séculos através da literatura ou de outros testemunhos. O terremoto de 1755 marcou uma viragem importante na evolução da sismicidade histórica não só porque foi pela primeira vez que foi inquirido aos párocos para informar sobre eventos anteriores e porque esse sismo, pelas suas consequências é considerado o início da ciência da sismologia. Dessa altura até ao início do lançamento das redes sísmicas, na mudança do século XIX para o século XX, todos os sismos sentidos passaram a ser reportados na imprensa diária, informando sobre terras onde se fizeram sentir as vibrações ou reportando danos ocorridos. Claro que as incertezas podem ser importantes sobretudo quando o epicentro se encontra no mar como é o caso mais frequente no Continente. Para dar conta de como sismos do final do século XIX ainda estão sujeito a escrutínio, basta referir o sismo de 21 de outubro de 1880, cuja relocalização do epicentro foi sujeita a correção recentemente [5]. Também os sismos de 26 de janeiro de 1531 e 23 de abril de 1909 continuam a ser sistematicamente sujeitos a correção na localização do seu epicentro e magnitude, embora o segundo já tenha sido registado pelas primeiras redes sismográficas mundiais. Embora existam

grandes avanços no reconhecimento de falhas e roturas associadas à ocorrência dos sismos, qualquer destes dois sismos continuam a registar grandes incertezas sobre quais as falhas que efetivamente estão na sua origem. Mais difícil se tornam os eventos ocorridos no mar, longe das redes sismológicas, em locais onde se torna muito difícil discriminar as estruturas Neotectónicas responsáveis por sismos históricos. O terramoto de 1755, embora sujeito a um enorme escrutínio pela parte da comunidade científica, continua um enigma do ponto de vista científico.

Relembrando então os maiores sismos que ocorreram no Continente ou nas zonas vizinhas, apresentam-se na Tabela 1 os anos de ocorrência e os locais mais prováveis dos seus epicentros e respetivas intensidades máximas.

Há essencialmente duas formas de medir os sismos, que muitas vezes são objeto de confusão junto do público, meios de comunicação social e até autoridades. Uma forma tem a ver com os registos instrumentais efetuados em estações sísmicas e que após tratamento e interpretação produzem um valor (escala de “magnitude”) que mede a energia libertada na origem (falha, etc.). Outra forma reporta-se à medição dos efeitos do sismo sobre as populações, o parque construído, etc. (escala de “intensidade”). Haverá tantos valores da intensidade quantos os locais onde foi possível estimá-la.

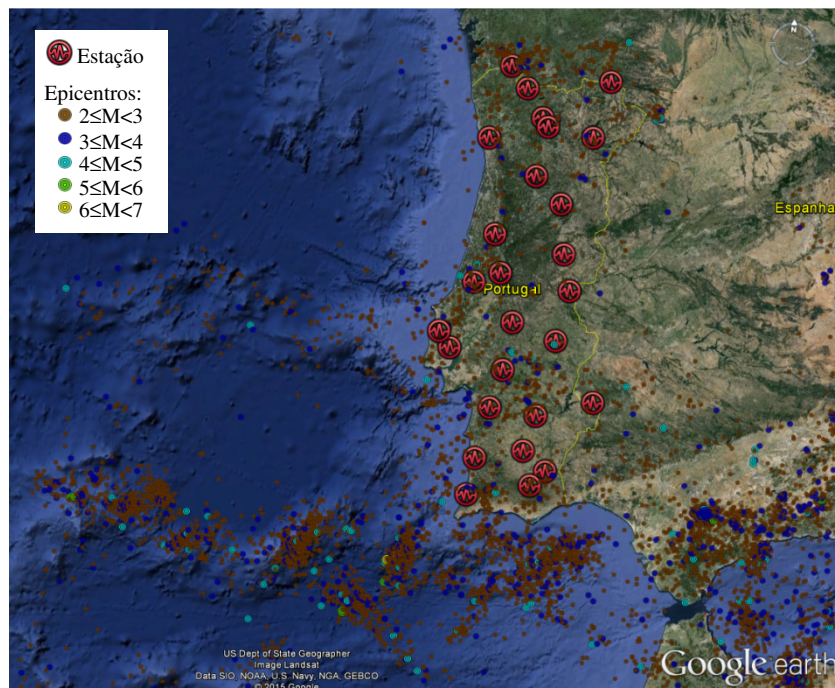
**Tabela 1:** Alguns dos principais sismos que afetaram a região de Portugal Continental.

Data	Intensidade máxima	Zona mais afetada	Zona provável do epicentro	Observações
1969/02/28	VIII	Sagres	Falha da Ferradura	O último sismo a provocar colapsos em Portugal Continental
1909/04/23	IX	Benavente	Benavente	-
1858/11/11	IX	Setúbal	Sudoeste de Setúbal	-
1755/11/01	X	Algarve/Lisboa	Sudoeste/Oeste de Sagres	Tsunami
1722/12/27	X	Tavira	Tavira (imersa ou emersa)	Tsunami em Tavira
1531/01/26	IX	Vale do Tejo	Vale do Tejo	-
1356/08/24	IX	Algarve	Sudoeste de Sagres	-
382 DC	?	Costa de Portugal	Sudoeste/Oeste de Sagres	Tsunami e desaparecimento de ilhotas junto ao Cabo de S. Vicente
60 AC	?	Costa de Portugal	Sudoeste/Oeste de Sagres	Tsunami

Desde o princípio do século XX começaram a aparecer os primeiros sismómetros, tendo a Rede sísmica sido constituída no Continente por três estações analógicas (Lisboa, Porto e Coimbra) até aos anos 1970. Os sensores destas estações medem as velocidades associadas ao movimento do local onde se encontram. De então para cá a Rede sofreu grandes alterações sendo agora equipada com um largo conjunto de estações modernas digitais de grande dinâmica. O objetivo destas redes sismográficas, como parte das Redes Mundiais, é registar a maior parte dos sismos que ocorrem por todo o Mundo, sejam de baixa ou de grande magnitude. Contudo, nestes grandes

sismos, as estações sismográficas saturavam para valores elevados da vibração. A partir dos anos 1950 começaram então a aparecer estações acelerométricas (que medem as acelerações, como o nome indica) que registavam apenas os movimentos sentidos pelos humanos, e que não saturavam para as maiores vibrações que se produziam em zonas mais próximas do epicentro. Contudo, estas estações não possuíam temporização não sendo portanto utilizadas para o cálculo epicentral. Com o evoluir da tecnologia instrumental quer as estações sismológicas quer as acelerométricas passaram a transmitir, praticamente “on-line”, para uma estação central, sendo os registos produzidos por ambas as redes usadas para o cálculo dos parâmetros sísmicos cima referidos, com muito maior precisão. Nas redes mais avançadas foram introduzidos recentemente os registos produzidos por GPS, que permitem determinar o campo de deslocamentos em torno das falhas tal como o deslocamento associado ao movimento do local em observação, funcionando como um novo transdutor de medição da vibração. Com os três tipos de sensores, de aceleração, de velocidade e de deslocamento, consegue-se quase o pleno na caracterização do campo ondulatório num ponto. Claro que estas variáveis não são independentes umas das outras, pois se relacionam por integração e derivação algébrica, mas com difíceis algoritmos numéricos. Resta ainda verificar o campo espacial que é caracterizado com estações densamente distribuídas geograficamente, e as componentes de rotação do movimento que são medidas com sensores próprios, tipo gravitacionais. Os recentes progressos na área dos “nano-materiais” irá de futuro permitir estender o tipo de sensores de baixo custo a muitas das tarefas de monitorização dos movimentos fortes, tanto do solo quanto da resposta de construções, como é o caso dos MEMS [6].

O atual desenho das Redes existentes no Continente, em funcionamento coordenado, está apresentado na Fig. 1. Existem outras estações dedicadas à monitorização temporária de pequenas zonas e até de obras de engenharia de maior importância como sejam algumas barragens, pontes ou edifícios. A barragem do Alqueva e a Ponte Vasco da Gama fazem parte deste último grupo.



**Fig. 1:** Rede de estações sismológicas do IPMA, com a localização dos epicentros dos sismos registados por essa rede no sul de Portugal Continental desde 1996 (com  $M \geq 2$ ).

### **3. A perigosidade sísmica em Portugal Continental**

Existem várias possíveis definições para perigosidade sísmica. Em termos numéricos, esta pode ser definida como sendo uma medida do potencial de perigo relacionado com fenómenos sísmicos, designadamente as vibrações sísmicas, as roturas do terreno, e os fenómenos de liquefação, ou também pode ser definida como sendo a propriedade de um sismo que se relaciona com a capacidade de causar danos e perdas [7].

Podemos dividir as abordagens adotadas na análise da perigosidade sísmica em três grupos principais: as abordagens determinísticas, as abordagens probabilísticas e as abordagens híbridas [8].

Normalmente, os métodos que envolvem abordagens determinísticas têm por base estabelecer um conjunto de cenários sísmicos que poderão vir a afetar o local em estudo [9].

No contexto das abordagens probabilísticas, podemos recorrer ao teorema da probabilidade total para avaliar a perigosidade sísmica [10]. Desta forma, e admitindo que os efeitos de um sismo podem ser descritos a partir de um conjunto de  $n$  variáveis aleatórias  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ), sendo mais vulgar a escolha recair sobre a magnitude do evento e a distância do local em estudo até ao evento (que pode ser a distância epicentral, a distância focal ou a menor distância à rotura), a probabilidade condicional  $P(Y > y | E_j)$  será igual a

$$P(Y > y | E_j) = \iint \dots \int P_j(Y > y | x_1 \dots x_n) \cdot f_j(x_1) \dots f_j(x_n | x_1 \dots x_{n-1}) \cdot dx_1 \dots dx_n \quad (1)$$

sendo  $f_j(x)$  a função de densidade de probabilidade de  $x$ .

As zonas geradoras de eventos sísmicos poderão ser pontos, áreas, linhas ou volumes. Inicialmente, por simplicidade, foi assumido que toda a energia é irradiada num só ponto (fontes pontuais). Este tipo de filosofia foi implementado em diversos programas informáticos, alguns deles utilizados em Portugal, como o programa EQRISK [11].

A formulação matemática evoluiu nos modelos que foram propostos posteriormente, ainda que baseados na abordagem probabilística de Cornell [12], pois já foram contempladas as incertezas referentes à direção e ao comprimento da rotura (tentando reproduzir os efeitos das fontes sísmicas extensas, dado que a energia não irradia toda de um só ponto) na formulação matemática desses métodos [13, 14]. Este novo tipo de métodos foi implementado em programas informáticos como o SEISRISK, que teve diversas versões [15].

Mais recentemente, também surgiu um outro tipo de plataformas informáticas, privilegiando o formato "open-source", como a OpenQuake, por exemplo, que possibilitam a consideração de zonas geradoras de eventos sísmicos e de modelos de rotura com formas geométricas complexas, mas com a formulação matemática clássica de Cornell [16].

Portugal esteve na vanguarda dos estudos probabilísticos de análise da perigosidade sísmica (inicialmente também designada por casualidade sísmica), inclusive recorrendo a formas inovadoras para a resolução numérica da Eq. (1), propondo procedimentos análogos ao da transformação de coordenadas vulgarmente usada nos elementos isoparamétricos dos modelos de análise por elementos finitos [17]. Este inovador

procedimento foi implementado com sucesso no programa SRAPOR, designadamente com aplicações a Portugal [18].

Tendo por base as abordagens probabilísticas, é possível definir um espectro de resposta cujos pontos apresentem a mesma probabilidade de excedência (Espectro de Resposta Uniforme), não correspondendo, portanto, a um único evento sísmico. Do ponto de vista da engenharia de estruturas, essa evidência pode constituir uma desvantagem, pois desaparece o conceito de "sismo de projeto", ao contrário do que acontece com as abordagens determinísticas [19].

A realização da desagregação da perigosidade sísmica surgiu como uma forma de obter um "sismo de projeto", ou simplesmente para determinar o evento sísmico que mais contribui para a perigosidade de um determinado local [8, 20].

Com a discussão entre as duas abordagens anteriores muito disputada, surgiu a possibilidade de um terceiro grupo de abordagens que podemos classificar como híbrida, pois combina características das abordagens determinísticas e das abordagens puramente probabilísticas. Existem autores que defendem que os resultados das abordagens probabilísticas são meras "criações" numéricas sem bases físicas, que podem tanto conduzir a resultados inseguros, como a resultados muito conservativos [7]. Neste contexto, Wang [21] propôs uma abordagem que, de alguma forma, combina características das abordagens puramente probabilísticas com características das abordagens determinísticas, designadamente para a realização de estudos de perigosidade sísmica em locais onde existe o conhecimento histórico de importantes crises sísmicas no passado, mas onde não existem suficientes registos sísmicos instrumentais no presente.

Mais recentemente, Estêvão [22] também propôs uma abordagem híbrida, que aplicou ao Algarve, consistindo na determinação da magnitude de um evento sísmico associado a um determinado período de retorno, que é usada na realização de simulações estocásticas de sismos, o que possibilita a obtenção de espectros de resposta para um "sismo de projeto" associado a um determinado período de retorno.

Face à própria natureza do fenómeno, existem muitas incertezas em torno da análise da perigosidade sísmica de um local. Tem sido usual a divisão da classificação dessas incertezas em incertezas epistémicas e aleatórias. As incertezas epistémicas são devidas ao deficiente conhecimento existente sobre o fenómeno, enquanto as incertezas aleatórias são inerentes ao próprio fenómeno e não podem ser reduzidas [23].

Apesar das abordagens probabilísticas procurarem lidar com as incertezas, ainda existem muitas incertezas de natureza epistémica, designadamente em relação à forma como as várias abordagens lidam com as características das fontes sísmicas (como sejam a delimitação das zonas geradoras de eventos, o tratamento da possível existência de asperezas, e a determinação da recorrência do fenómeno, entre outras), a propagação das ondas sísmicas até ao local, e por fim a forma como são avaliados os efeitos das características específicas do local em estudo.

Na sua globalidade, todas estas incertezas têm especial relevo no contexto da perigosidade sísmica de Portugal, nomeadamente atendendo ao conhecimento existente sobre a sismicidade histórica do território, donde se destaca o sismo de 1755, e o que hoje se sabe sobre a sismo-tectónica da região envolvente. É neste contexto que é necessário continuar a procurar novas formas de reduzir as incertezas e os seus efeitos na fiabilidade dos resultados dos estudos de perigosidade sísmica, designadamente tentando reduzir as incertezas em relação à influência dos efeitos geológicos locais nos resultados, assim como outros efeitos de sítio [24].

## **Estudos em Portugal**

Desde meados dos anos 70 do século XX que têm vindo a ser realizados diversos estudos de perigosidade para Portugal, designadamente no contexto da mitigação do risco sísmico do território nacional [25]. O nível de incerteza que ainda está presente no valor da perigosidade sísmica de Portugal, é patente na diversidade dos resultados obtidos até ao presente momento são, em alguns casos, bastante distintos entre si.

O primeiro estudo probabilístico de perigosidade sísmica realizado para Portugal Continental [17] serviu de base à definição da ação sísmica preconizada no "Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes" [26]. O valor máximo associado a um período de retorno de 1000 anos foi obtido para o Algarve, e correspondeu a uma aceleração de pico de cerca de 177 cm/s<sup>2</sup>. É importante salientar que este estudo foi realizado numa época em que ainda não existiam os meios informáticos da atualidade, e que a aceleração de pico foi determinada a partir de intensidades sísmicas, usando leis de conversão, que possuem alguma incerteza própria dos processos de propagação. Também é de referir que a ação sísmica estabelecida no RSAEEP era majorada com um coeficiente parcial de segurança de 1.5 (o que tinha em atenção essas incertezas). No seguimento do sismo dos Açores de 1980, e tendo em atenção a observação do comportamento sísmico das construções, foi sugerida a revisão da ação sísmica estabelecida no RSAEEP, designadamente com um alerta para os efeitos da geologia local no nível das vibrações sísmicas [27].

Em face do enquadramento sismo-tectónico de Portugal Continental, tem sido usual a consideração de dois sismos tipo de projeto [26, 28]: um sismo próximo com pequena magnitude, e um sismo mais afastado e de maior magnitude. No entanto, no RSAEEP só foi considerado um único mapa de zonas sísmicas para ambos os sismos (Fig. 2a).

Em Portugal, o primeiro estudo de desagregação da perigosidade sísmica foi realizado por Campos-Costa [29]. Nesse estudo, Faro foi apresentada como sendo a cidade estudada com maior aceleração de pico para um período de retorno de 1000 anos (322 cm/s<sup>2</sup> total, 321 cm/s<sup>2</sup> afastado e 103 cm/s<sup>2</sup> próximo), sendo a perigosidade condicionada pelo cenário de sismo afastado. Por outro lado, Lisboa foi a cidade que apresentou o maior valor para um cenário de sismo próximo (309 cm/s<sup>2</sup> total, 196 cm/s<sup>2</sup> afastado e 274 cm/s<sup>2</sup> próximo).

Sousa [30] usou o programa EQRISK (com fontes pontuais) para realizar um estudo em termos de intensidades sísmicas, para vários períodos de retorno, que indicava o cabo de Sagres como sendo a zona de Portugal Continental com maior perigosidade sísmica. Nesta altura, também foi feito um estudo de perigosidade que demonstrou a influência dos solos no agravamento das intensidades sísmicas [31].

Afilhado et al. [32](1999) realizaram um estudo para o Algarve com resultados situados entre 0.15g (Alcoutim) e 0.35g (Sagres), que foi elaborado com o programa SEISRISK III (usando falhas finitas como fontes) para um período de retorno de 975 anos.

Oliveira et al. [33] apresentaram uma proposta de alteração ao RSAEEP para Portugal Continental, com dois zonamentos distintos para a ação sísmica, correspondendo a cenários de sismos próximos e distantes. Neste estudo, as zonas com maior perigosidade sísmica são o Vale do Tejo e o Barlavento Algarvio, respetivamente para os cenários de sismos próximos e distantes.

O programa SRAPOR foi usado em 2000 para o estudo da perigosidade sísmica do Algarve, designadamente contemplando modelos com fontes pontuais (tipo EQRISK) e com falhas finitas (tipo SEISRISK III). Os resultados que foram obtidos para um

período de retorno de 1000 anos ficaram compreendidos entre 290 e 350 cm/s<sup>2</sup> (zona da Costa Vicentina) e entre 170 e 250 cm/s<sup>2</sup> (zona do Guadiana) [34].

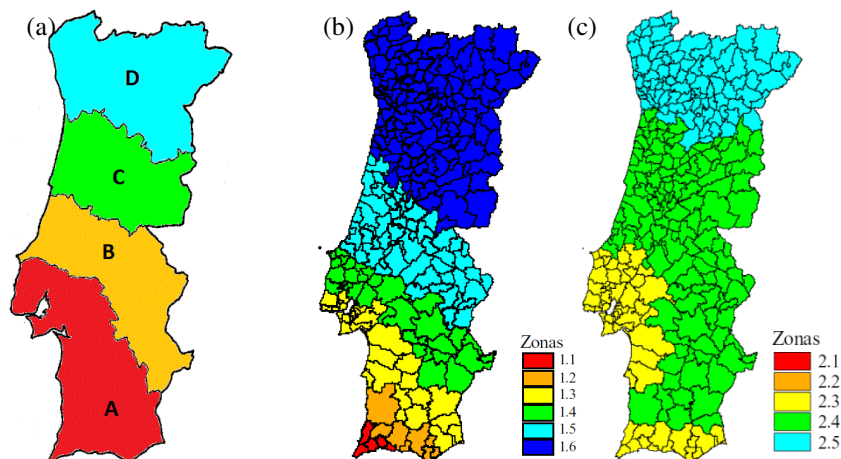
Peláez Montilla e López Casado [35] realizaram um estudo para toda a Península Ibérica, e concluíram que a zona de Sagres é aquela que apresenta a maior perigosidade sísmica, e ficando a zona de Lisboa em segundo lugar.

Luísa Sousa [36] realizou uma reavaliação da perigosidade sísmica de Portugal Continental. Neste estudo, as máximas intensidades sísmicas foram obtidas para a zona de Sagres, para diversos períodos de retorno.

Vilanova e Fonseca [37] propuseram a utilização de árvores lógicas como forma de reduzir as incertezas epistémicas, designadamente combinando os resultados obtidos com diferentes leis de atenuação (com pesos atribuídos de forma determinística), zonas de geração, catálogo sísmico, recorrência do fenómeno e máxima magnitude. Neste estudo, que teve por base o programa SEISRISK III, os valores máximos (obtidos da árvore lógica) ficaram compreendidos entre 0.07g e 0.20g (período de retorno de 475 anos) para a zona de Sotavento do Algarve (a partir de Faro) e para a zona do Vale do Tejo. Estes resultados contrariam muitos dos anteriores estudos, que apontavam a zona mais a Barlavento do Algarve (zona de Sagres) como a de maior perigosidade sísmica de Portugal Continental.

Peláez et al. [38] realizaram a desagregação da perigosidade sísmica, tendo obtido azimutes, magnitudes e distâncias para diversas cidades portuguesas associados a diversos períodos de retorno. Outro estudo que realizou a desagregação da perigosidade apontou a zona de Sagres como sendo aquela que apresenta a maior perigosidade sísmica do território, sendo controlada pelos cenários de sismos afastados [39].

A NP EN 1998-1:2010 [28] apresentou dois zonamentos para a definição da ação sísmica (Fig. 2b e 2c). Neste documento, é a zona do concelho de Vila do Bispo aquela que apresenta a maior perigosidade sísmica do território continental para um período de retorno de 475 anos, com valores de aceleração de pico para o cenário de sismo afastado compreendidos entre 250 e 375 cm/s<sup>2</sup>, respetivamente para terrenos tipo A e D. Importa referir que a ação sísmica deixou de ser majorada na NP EN 1998-1:2010.



**Figura 2:** Mapa das zonas sísmicas de Portugal Continental que constam no (a) RSAEEP (b) EC8, sismos afastados, e (c) EC8, sismos próximos.

Estêvão [22] usou uma abordagem híbrida para gerar espectros de resposta médios para diversos tipos de solos existentes no Algarve, envolvendo a determinação de uma magnitude associada a um período de retorno de 475 anos, que foram comparados com os existentes no RSAEEP e na NP EN 1998-1:2010 (EC8). As magnitudes obtidas

foram consistentes com os valores obtidos da desagregação da perigosidade sísmica realizada por outros autores [38, 39]. Os resultados das simulações evidenciaram a influência das incertezas nos valores da perigosidade sísmica, pois foram obtidos espectros muito acima e muito abaixo dos valores do EC8, consoante as características adotadas para as simulações, e dependendo dos tipos de terrenos de fundação.

#### **4. Seleção de acelerogramas para análise de estruturas**

O desenvolvimento dos sistemas informáticos e o incremento do número de programas de cálculo automático destinados à análise (dinâmica) temporal não linear tem vindo a possibilitar o recurso a este tipo de análise no contexto do projeto sísmico de estruturas novas, ou na avaliação e reforço de estruturas existentes. Mesmo em análises lineares, a utilização de acelerogramas pode ser bastante interessante, designadamente tendo em vista a análise do comportamento tridimensional de estruturas sujeitas a múltiplas componentes de um sismo.

Presentemente, a generalidade dos códigos sísmicos internacionais já estabelece regras para a seleção de acelerogramas para a realização de análises temporais espaciais [40]. Assim, ao contrário do que acontecia no passado, atualmente as análises dinâmicas temporais (lineares ou não lineares) tem um enquadramento normativo muito bem definido, designadamente no contexto da NP EN 1998-1:2010 (EC8) [28]. Para se realizar este tipo de análise estrutural, é necessário ter a representação temporal da ação sísmica, que, em termos gerais, pode ser de um de dois tipos: acelerogramas registados (a realidade) ou acelerogramas sintéticos, gerados artificialmente com recurso a um qualquer algoritmo computacional destinado ao efeito.

No contexto do EC8, os acelerogramas sintéticos são divididos em:

- acelerogramas artificiais - estabelecidos de modo a corresponderem aos espectros de resposta elástica, obtidos com um coeficiente de amortecimento viscoso igual a  $\xi = 5\%$ ;
- acelerogramas simulados - que devem ser gerados através de uma simulação numérica (por exemplo com um método estocástico) dos mecanismos na fonte ou da trajetória de propagação.

Para um projetista que não possua conhecimentos mais aprofundados de sismologia, a escolha mais natural tende a ser a utilização de acelerogramas artificiais.

De uma forma geral, para que seja possível a utilização de acelerogramas numa análise dinâmica temporal, o EC8 estipula as seguintes regras:

- deverão ser utilizados, no mínimo, 3 acelerogramas (contudo, é necessário garantir um mínimo de 7 acelerogramas para que seja possível a utilização da média dos resultados das análises, caso contrário deverá ser utilizado o resultado mais desfavorável);
- a média dos valores da resposta espectral de aceleração com período nulo (calculada a partir dos registos no tempo) não deverá ser inferior ao valor de  $a_g \cdot S$  para o local em questão, em que  $a_g$  é o valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A (aceleração de pico - PGA), e  $S$  é um coeficiente que tem em conta a amplificação resultante das características geológicas locais.
- no domínio dos períodos compreendidos entre  $0.2T_1$  e  $2T_1$ , sendo  $T_1$  o período fundamental da estrutura na direção segundo a qual será aplicado o acelerograma, nenhum valor do espectro de resposta elástica médio com 5 % de amortecimento, calculado a partir de todos os registos no tempo, poderá ser inferior a 90 % do valor correspondente do espectro de resposta elástica com 5 % de amortecimento.

Uma vez mais, as regras do EC8 levam a que um projetista escolha, normalmente, a utilização de acelerogramas artificiais. A grande vantagem da utilização deste tipo de acelerograma sintético é a sua melhor compatibilidade com o espectros de resposta de referência [41], designadamente tendo em conta as regras do EC8, anteriormente apresentadas, sendo que a única preocupação, para além do cumprimento das regras anteriores, é garantir uma duração da parte estacionária ( $T_s$ ) não inferior a 30 s para os sismos afastados (tipo 1), e de 10 s para os sismos próximos (tipo 2), valores idênticos aos estipulados no "Regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes" [26]. A grande desvantagem da utilização de acelerogramas artificiais está relacionada com o facto de eles serem totalmente irrealistas, quando comparados com os registos de sismos. Esse facto tem originado muitas críticas por parte de sismologistas, sobre a sua utilização prática, designadamente porque existem autores que defendem que os acelerogramas artificiais não são apropriados para a realização de análises temporais não lineares [42]. Os acelerogramas artificiais possuem grande energia em toda a gama de frequências do espectro de resposta de referência, que é algo que não acontece na realidade, pois os registos existentes demonstram que os sismos tendem a apresentar concentrações de energia em estreitos intervalos de frequências, que dependem das características da rotura da falha que originou o sismo, da respetiva magnitude, da distância à rotura, e das características geológicas de cada local de estudo.

A utilização de acelerogramas registados ou de acelerogramas simulados corresponde a um maior desafio para os projetistas. Começa pelo facto do EC8 obrigar a que, para além das anteriores regras, estes acelerogramas constituam amostras devidamente qualificadas relativamente às características sismogénicas da fonte e às condições do terreno do local, e que os seus valores sejam graduados em função do valor de  $a_g S$  da zona considerada. Como é que um projetista dá uma resposta a este tipo de princípios? Primeiramente existe a questão de, em princípio, um espectro de resposta de cálculo ser um espectro de probabilidade uniforme, normalmente obtido de estudos de perigosidade sísmica realizados com abordagens probabilísticas. Isto significa que existe uma multiplicidade de sismos de diversas magnitudes, com diferentes mecanismos de rotura, e localizados em diferentes fontes sísmicas, a contribuir para o espectro de resposta uniforme.

A desagregação da perigosidade sísmica pode permitir perceber qual o cenário que mais condiciona a ação sísmica de um determinado local, designadamente em termos de magnitude e distância epicentral. Contudo, essa informação não está normalmente apresentada nos códigos sísmicos, de modo a orientar a escolha dos registos de sismos, ou da definição dos parâmetros das simulações. A título de exemplo, não existe essa informação disponível no Anexo Nacional ao Eurocódigo 8 [28]. A única informação sobre magnitudes representativas da ação sísmica associada ao período de retorno de 475 anos está apresentada na Parte 5 do EC8 [43], para cada um dos municípios de Portugal, e é direcionada aos fenómenos de liquefação. Normalmente, um projetista terá que procurar essa informação em artigos científicos, caso ela tenha sido publicada, o que não se torna prático na atividade de projeto, para além das dúvidas que daí podem advir face à multiplicidade de estudos de perigosidade existentes. Assim, a utilização deste tipo de acelerogramas tem sido restrita aos especialistas em Engenharia Sísmica, designadamente aos especializados em perigosidade sísmica de Portugal, algo que será desejável de mudar no futuro.

A simulação estocástica tem sido muito usada em Portugal para a geração de acelerogramas associados a sismos de magnitudes mais elevadas, atendendo ao facto de não terem ocorrido recentemente sismos dessas magnitudes, pelo que não existem

registos de movimentos sísmicos intensos obtidos em Portugal para o nível da ação sísmica estabelecida nos códigos sísmicos portugueses.

Os programas de simulação estocástica poderão ser de fonte pontual ou de fonte extensa (falhas finitas). Para um projetista, a simulação de sismos com fonte pontual é muito mais atrativa, pois é necessário definir muito menos parâmetros para a rotura. Basicamente só é necessário definir uma magnitude e uma distância (focal ou epicentral). Contudo, este tipo de acelerograma ainda possui muitas das características de estacionaridade dos acelerogramas artificiais, e não permitem reproduzir o desfasamento temporal da chegada das ondas sísmicas (com diferentes conteúdos espectrais), que podem interferir com a resposta não linear das estruturas ao longo do tempo [44].

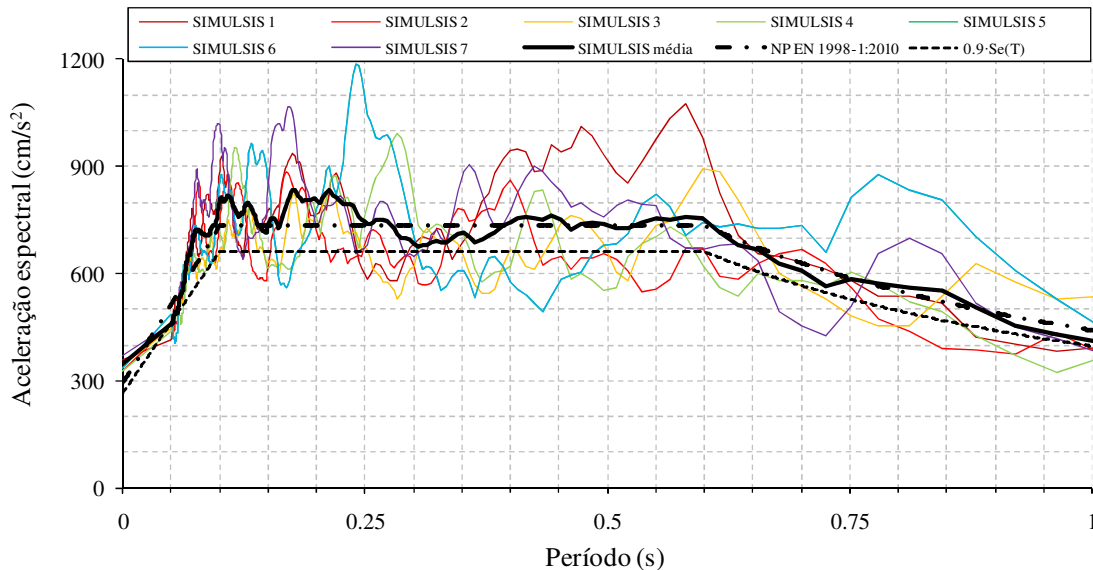
Foram desenvolvidos em Portugal alguns programas de simulação estocástica com fonte extensa, designadamente apresentado relativo sucesso na simulação de acelerogramas equivalentes aos registados, como é o exemplo do programa RSSIM [45] e do programa SIMULSIS [44, 46, 47]. Contudo, a sua utilização na análise de estruturas requer alguns cuidados [47]. A definição das características da fonte e da geologia do local de estudo são muito importantes nos resultados das simulações, e com consequências diretas no desempenho sísmico das estruturas analisadas [48].

A seleção de acelerogramas simulados que cumpram as regras estipuladas pelo EC8 requer alguma experiência. Primeiramente será necessário escolher a magnitude do sismo e fonte sísmica representativos da perigosidade sísmica do local de estudo, para a ação em causa (afastada ou próxima). Em seguida, usando essas magnitudes e localização da rotura serão gerados acelerogramas com diferentes parâmetros para a fonte (designadamente diferentes tipos de falha, orientação e inclinação da falha, localização do foco, padrão de deslizamentos, com a eventual consideração de asperezas, queda de tensão média, velocidade da rotura, entre outros) e características geológicas locais, enquadradas no tipo de terreno selecionado (número de camadas de solo, velocidades das ondas S das camadas, tipo de solos, profundidade do substrato rochoso e contraste de impedância). Com recurso a um procedimento baseado na tentativa e erro, é possível gerar acelerogramas simulados cuja média se ajuste com elevado grau de aproximação ao espectro de referência, e cumprindo todas as regras do EC8. Na Fig. 3 está apresentado um exemplo de geração de 7 acelerogramas simulados para Portimão (sismo afastado e terreno tipo B) com o programa SIMULSIS [46], que cumprem as regras do EC8.

A utilização de acelerogramas registados é mais complexa, atendendo à especificidade das regras do EC8, pois ao contrário da simulação de sismos, não é possível "criar" um registo que seja mesmo à medida das nossas necessidades, de modo a ajustar a média dos registos ao espectro de resposta de referência.

Procurar nas bases de dados mundiais de sismos registados pode ser uma tarefa muito morosa e infrutífera, atendendo às regras do EC8. Primeiro temos o problema de cada base de dados apresentar ficheiros com distintos formatos, que, por sua vez, normalmente não se adaptam ao tipo de ficheiros exigido pelos programas de análise dinâmica não linear. Depois de ultrapassado este primeiro problema prático, temos as dificuldades inerentes aos critérios de seleção dos acelerogramas. A obtenção de sismos de uma determinada magnitude e distância epicentral é a tarefa mais fácil, pois a generalidade das bases de dados possuem esse tipo de filtro de pesquisa. A seleção de registos de um determinado tipo de terreno de fundação, poderá ser uma tarefa mais difícil, pois esse tipo de filtro muitas vezes não existe disponível. Em grande parte dos casos, depois de obtido o registo do sismo, é necessário procurar informações sobre as características geológicas das estações acelerométricas, e muitas vezes só está

disponível um perfil estratigráfico com velocidades  $V_S$  das várias camadas de solo, e pelo que ainda é necessário determinar o valor de  $V_{S,30}$  para o comparar com os limites existentes no EC8, de modo a garantir que o terreno do registo se enquadra no terreno tipo do local de estudo. Depois destes cálculos realizados, podemos chegar à conclusão que o registo não é adequado ao nosso caso. A duração do registo poderá ser outro problema, por não se ajustar aos nossos objetivos.



**Fig. 3:** Exemplo da geração de acelerogramas simulados cumprindo as regras do EC8 [46]

Existem múltiplas abordagens ao problema, e critérios de seleção de acelerogramas registados [49]. De uma forma geral, é possível seguir dois caminhos distintos de modo a atingir o objetivo desejado, usando:

- acelerogramas registados escalados - neste caso os registos escolhidos poderão ser escalados, quer em amplitude, quer em conteúdo espectral, de modo a melhor cumprir as regras do EC8;
- acelerogramas registados não manipulados - situação desejável, em que os acelerogramas são usados exatamente como foram registados.

A utilização de acelerogramas registados escalados é a forma mais simples de fazer cumprir as regras do EC8. Contudo, a adoção deste procedimento não é consensual. No entanto, existem estudos que apontam para que não seja necessário dar grande importância ao fator de escala de amplitudes [50]. Também é possível usar técnicas de otimização para escolha dos fatores de escala, de modo a que as regras do EC8 sejam cumpridas com os menores desvios à média que são possíveis, tendo por base um determinado conjunto de registos de sismos [51]. Em Itália, este tipo de programa informático já foi disponibilizado para uso dos projetistas, para facilitar o recurso a análises temporais não lineares em termos práticos, através da sua integração com a rede acelerométrica italiana [52].

A escolha de um conjunto de acelerogramas registados de modo a que cumpram os requisitos do EC8, sem qualquer tipo de manipulação, é uma tarefa quase impossível. Imaginemos que pretendíamos realizar uma análise dinâmica não linear de uma estrutura corrente localizada em Ponta Delgada num terreno tipo C, com recurso a acelerogramas registados não manipulados. De acordo com a NP EN 1998-1:2010, o valor de  $a_g S$  é igual a  $3.25 \text{ m/s}^2$  (logo nenhum registo pode apresentar uma aceleração de pico inferior a  $2.925 \text{ m/s}^2$ ). Se usarmos a magnitude constante no Anexo NA.I da NP

EN 1998-5:2010, então teremos  $M = 5.2$  para um período de retorno de 475 anos. Por exemplo, se procuramos atualmente na base de dados americana CESMD (<http://www.strongmotioncenter.org/>), só foi possível encontrar 5 sismos desta magnitude. Se forem usados os restantes critérios de seleção, somente é possível encontrar registos (três componentes de vibração) num único local, correspondente à estação de Napa College (sismo de Yountville de 2000/09/03 e estação CGS-CSMIP 68150), que apresenta um  $V_{S,30}$  de 332 m/s, e que está localizada à distância epicentral de 16.8 km. O maior valor de PGA é de 0.343 g (cerca de 3.365 m/s<sup>2</sup>). Este exemplo demonstra as dificuldades práticas ainda existentes na utilização de acelerogramas registados sem qualquer tipo de manipulação. Se restringirmos somente aos registos obtidos nas bases de dados nacionais, então é totalmente impossível cumprir os requisitos do EC8.

## Referências

- [1] Sousa, M.L.; Martins, A.; Oliveira, C.S. – Compilação de Catálogos Sísmicos da Região Ibérica, Relatório 36/92 – NDA, 1992, p. 250.
- [2] Sousa, M.L.; Martins, A. – Compilação de um Catálogo Sísmico para a Região dos Açores, Relatório 260/18/13343 – C3ES, 2000, p. 46.
- [3] Marreiros, C.; Carrilho, F. – The ShakeMap at the Instituto de Meteorologia, in: 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012, p. 1-8, Paper 3069.
- [4] Vilanova, S.P.; Fonseca, J.F.B.D.; Oliveira, C.S. – "Ground-Motion Models for Seismic-Hazard Assessment in Western Iberia: Constraints from Instrumental Data and Intensity Observations", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102 (1), 2012, p. 169-184.
- [5] Ribeiro, J.R.; Ribeiro, A.I.; Correia, A.P. – "Solving the Mystery: The 21 October 1880 Portuguese Earthquake", Seismological Research Letters, Vol., 2015, p.
- [6] PRIME – An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems), Prime Faraday Technology Watch, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, 2002.
- [7] Wang, Z. – "Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives", Pure Appl. Geophys., Vol. 168 (1-2), 2011, p. 11-25.
- [8] Oliveira, C.S.; Campos-Costa, A. – "Overview on Earthquake Hazard Assessment - Methods and New Trends", em Assessing and Managing Earthquake Risk Ed. por C. Oliveira, A. Roca, X. Goula (Eds.), Springer Netherlands, 2006, p. 15-46.
- [9] 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] McGuire, R.K. – "Probabilistic seismic hazard analysis: Early history", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 37 (3), 2008, p. 329-338.
- [11] 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.
- [12] Cornell, C.A. – "Engineering seismic risk analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58 (5), 1968, p. 1583-1606.
- [13] Bender, B.; Perkins, D.M. – SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation, U.S.G. Survey, Survey Bulletin 1772, 1987, p.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Silva, V.; Crowley, H.; Pagani, M.; Monelli, D.; Pinho, R. – "Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment", *Nat Hazards*, Vol. 72 (3), 2014, p. 1409-1427.
- [17] Oliveira, C.S. – *Sismologia, Sismicidade e Risco Sísmico. Aplicações em Portugal.*, Lisboa, Processo 36/11/4394, 1977, p. 205.
- [18] Estêvão, J.M.C. - *Modelo computacional de avaliação do risco sísmico de edifícios.* Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, 1998.
- [19] Sen, T.K. – *Fundamentals of seismic loading on structures*, John Wiley and sons, Lda, 2009.
- [20] 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.
- [21] Wang, Z. – *Understanding seismic hazard and risk assessments: An example in the New Madrid Seismic Zone of the central United States*, in: *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, 2006, p. 1-10, Paper 416.
- [22] 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.
- [23] Sigbjörnsson, R.; Ambraseys, N.N. – "Uncertainty Analysis of Strong-Motion and Seismic Hazard", *Bull Earthquake Eng*, Vol. 1 (3), 2003, p. 321-347.
- [24] Oliveira, C.S. – "Lisbon earthquake scenarios: A review on uncertainties, from earthquake source to vulnerability modelling", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28 (10–11), 2008, p. 890-913.
- [25] Oliveira, C.S. – "Studies made since early nineteen ninety in Portugal reducing the seismic risk", *Proceedings da Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vienna, 2013, p. 1-10, Paper No. 315.
- [26] RSAEEP – *Regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes.* Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de Maio., Imprensa Nacional-Casa da Moeda, E.P., Lisboa, 1983.
- [27] 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.
- [28] IPQ – NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: *Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios.*, Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 2010.
- [29] Campos-Costa, A.P.d.N. - *A ação dos sismos e o comportamento das estruturas.* FEUP, Lisboa, 1993.
- [30] Sousa, M.L.R.M.N.e. - *Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal Continental.* Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, 1996.
- [31] Sousa, M.L.; Oliveira, C.S. – "Hazard mapping based on macroseismic data considering the influence of geological conditions", *Nat Hazards*, Vol. 14 (2-3), 1996, p. 207-225.

- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Peláez Montilla, J.A.; López Casado, C. – "Seismic Hazard Estimate at the Iberian Peninsula", Pure Appl. Geophys., Vol. 159 (11-12), 2002, p. 2699-2713.
- [36] Sotto-Mayor, M.L.S. - Risco sísmico em Portugal continental. Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, 2006.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Beyer, K.; Bommer, J.J. – "Selection and Scaling of Real Accelerograms for Bi-Directional Loading: A Review of Current Practice and Code Provisions", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 11 (sup1), 2007, p. 13-45.
- [41] Gomes, R.C.; Santos, J.; Oliveira, C.S. – "Design spectrum-compatible time histories for numerical analysis: generation, correction and selection", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 10 (6), 2006, p. 843-865.
- [42] Bommer, J.J.; Acevedo, A.B. – "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8 (Special Issue 1), 2004, p. 43-92.
- [43] IPQ – NP EN 1998-5. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 5: Fundações, estruturas de suporte e aspectos geotécnicos., Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 2010.
- [44] 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 (0), 2012, p. 329-341.
- [45] Carvalho, A.; Zonno, G.; Franceschina, G.; Serra, J.B.; Costa, A.C. – "Earthquake shaking scenarios for the metropolitan area of Lisbon", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28 (5), 2008, p. 347-364.
- [46] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Utilização de acelerogramas simulados na análise sísmica de estruturas", Proceedings da 8º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010, p. 1-13.

- [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] Estêvão, J.M.C.; Carvalho, A. – "The role of source and site effects on structural failures due to Azores earthquakes", Engineering Failure Analysis, Vol. 56, 2015, p. 429-440.
- [49] Katsanos, E.I.; Sextos, A.G.; Manolis, G.D. – "Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30 (4), 2010, p. 157–169.
- [50] Iervolino, I.; Cornell, C.A. – "Record Selection for Nonlinear Seismic Analysis of Structures", Earthquake Spectra, Vol. 21 (3), 2005, p. 685-713.
- [51] Estêvão, J.M.C.; Jesus, M. – "Aplicação de técnicas de optimização na utilização de acelerogramas registados", Proceedings da 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, Faculdade de Engenharia, UP, Porto, 2007, p. 363-364.
- [52] Iervolino, I.; Galasso, C.; Paolucci, R.; Pacor, F. – "Engineering ground motion record selection in the Italian ACcelerometric Archive", Bull Earthquake Eng, Vol. 9 (6), 2011, p. 1761-1778.