

A GEOLOGIA NA AVALIAÇÃO DA PERIGOSIDADE SÍSMICA

João Cabral

Dep. de Geologia e Lab. de Tectonofísica e Tectónica Experimental, Fac. Ciências de Lisboa, Campo Grande,
Lisboa, jcabral@fc.ul.pt

Introdução

As vibrações das rochas junto à superfície topográfica, resultantes da passagem de ondas sísmicas por um dado local, podem causar grandes danos às estruturas produzidas pelo Homem, representando um importante perigo geológico.

Os sismos maiores ocorridos numa região habitada encontram-se geralmente assinalados nos registos históricos dessa região, constituindo a sismicidade histórica regional. Os eventos mais recentes, registados instrumentalmente, constituem a sismicidade instrumental. Contudo, os catálogos de sismicidade apresentam limitações, nomeadamente no que respeita ao número de eventos, sua localização, dimensão e recorrência: os eventos menores são escassamente referenciados nos documentos históricos, e o intervalo de recorrência dos grandes sismos é geralmente superior ao período abrangido pelos registos, de modo que estes eventos podem não estar referenciados.

A incerteza, ou mesmo lacuna de informação sobre os sismos de maior dimensão pode ser colmatada pelo reconhecimento e estudo das marcas deixadas por esses eventos no registo geológico, junto à superfície topográfica, constituindo um dos principais objectos de estudo da Neotectónica e, em particular, da Paleosismologia.

As evidências dos paleosismos no registo geológico superficial (deformações em rochas ou afectando a topografia) resultam do mecanismo da sismogénese: a generalidade dos sismos tectónicos ocorre por ruptura em falhas activas. Nos sismos superficiais de magnitude moderada a elevada, a dimensão da área de ruptura cosísmica conduz à sua propagação até à superfície topográfica, gerando-se uma "assinatura" do evento sísmico nos elementos geológicos superficiais, que permite identificá-lo e caracterizá-lo, bem como a outros eventos semelhantes que tenham ocorrido previamente na mesma estrutura sismogénica.

Na caracterização dos paleosismos utilizam-se também outras evidências, como o reconhecimento de paleosismitos (figuras de liquefacção), de deslocamentos verticais episódicos (subsidência ou levantamento de áreas mais ou menos extensas), de escorregamentos de vertente, ou de tsunamitos.

A paleosismologia, estabelecendo a ponte entre a escala cronológica humana e a escala cronológica dos fenómenos geológicos – como os sismos, constitui uma ferramenta essencial para completar os registos da actividade sísmica numa região, permitindo avaliar com maior rigor e confiança a perigosidade sísmica regional, e o risco associado.

Os sismos e as fontes sismogénicas

Um sismo consiste na ocorrência de ondas elásticas que se geram numa dada fonte sismogénica e que se propagam a partir do seu local de origem através dos materiais constituintes do Globo Terrestre.

A maioria da sismicidade natural está relacionada com movimentações bruscas em falhas activas. O deslizamento súbito, sismogénico, que ocorre ao dar-se a ruptura numa falha activa é geralmente do tipo elástico-friccional, ou seja, resulta de reactivação de falhas bloqueadas por forças de atrito, basicamente segundo o Modelo do Ressalto Elástico proposto por H.F. Reid, na sequência de estudos que realizou na Zona de Falha de S. André após o terramoto de S. Francisco (1906).

Conclui-se que, para a generalidade da sismicidade natural, particularmente a de origem tectónica, a identificação e caracterização das fontes sismogénicas implica o reconhecimento das falhas activas geradoras da sismicidade e o estudo da sua actividade.

Fenómenos associados à actividade sísmica: os perigos e os riscos impostos

Os sismos correspondem meramente a vibrações das rochas resultantes da passagem de ondas sísmicas de diversos tipos æ ondas P, S, Love (L) e Rayleigh (R). Estas vibrações junto à superfície topográfica podem causar grandes danos nas estruturas produzidas pelo Homem.

Para além do efeito directo das vibrações sísmicas, ocorrem outros fenómenos associados capazes de produzir estragos significativos, nomeadamente, a ruptura superficial cosísmica da falha sismogénica, inundação por subsidência súbita, cedência do solo (liquefacção, fracturação e assentamentos diferenciais), e escorregamentos de terreno.

O efeito potencial das ondas sísmicas, bem como a acção dos outros fenómenos associados aos eventos sísmicos, representam um importante perigo geológico designado perigosidade ou casualidade (*hazard*) sísmica.

Outro perigo importante relacionado com a ocorrência de sismos consiste na génese de *tsunamis* (ou maremotos) associados a eventos com epicentro no mar, com consequências potencialmente devastadores em áreas costeiras.

O risco sísmico corresponde a uma avaliação integrada da severidade das vibrações sísmicas expectáveis (perigo sísmico) e das suas consequências. Refere-se, pois, aos danos, ou perdas, que é esperado ocorrerem num determinado elemento exposto ao perigo durante um dado período de tempo. O elemento em risco pode ser um edifício, um conjunto de edifícios, uma povoação, a população, ou actividades económicas associadas.

O risco pode exprimir-se em termos de custos, de número de vidas ou de danos no edificado (Vulnerabilidade).

Para se estimar a perigosidade sísmica numa região, ou num dado local, podem utilizar-se duas abordagens diferentes:

- a abordagem determinista, em que se avaliam os maiores sismos que podem ocorrer na área em estudo ou nas regiões envolventes, e que vão condicionar a severidade máxima das vibrações sísmicas nessa área, num certo intervalo de tempo;

- a abordagem probabilista, em que se efectuam estimativas da probabilidade de ocorrência de determinados níveis de movimentos sísmicos do solo num dado período de tempo, com base na distribuição espaço-temporal dos sismos e assumindo um dado modelo estatístico para a sua ocorrência.

Na perspectiva probabilista, a severidade dos movimentos do solo é frequentemente expressa pela aceleração das vibrações sísmicas, e o perigo sísmico (H_x) é então definido como a probabilidade de a aceleração máxima do solo nesse local (A_x) exceder um dado valor de referência da aceleração (A_r), num certo intervalo de tempo (t):

$$\text{perigo sísmico no local } x \quad H_x = P (A_x > A_r) t$$

Para se chegar àquela probabilidade seguem-se usualmente as seguintes etapas:

a) Determina-se um modelo de sismicidade baseado na identificação das fontes sísmogénicas æ lineares (falhas activas) ou "em área" (zonas sísmogénicas) æ e na caracterização da respectiva actividade sísmica, representada pelos respectivos modelos de recorrência æ nº de eventos/magnitude (em Δt).

b) Considera-se um modelo estatístico para a ocorrência dos sismos æ frequentemente assume-se que os sismos seguem uma distribuição de Poisson, ou seja, que os eventos são independentes entre si no espaço e no tempo. Segundo este modelo, a probabilidade de ocorrência de x sismos de uma dada magnitude ($P(x)$), durante um intervalo de tempo t é apenas função do número médio de eventos por unidade de tempo (v) (ou seja, do intervalo de recorrência médio), segundo a expressão

$$P(x) = [(vt)^x e^{-(vt)}] / x!$$

c) Aplica-se uma função de atenuação para atender ao efeito de atenuação das vibrações sísmicas com a distância percorrida entre as diversas fontes sísmogénicas e o local considerado.

d) Determina-se a probabilidade de se atingir uma determinada aceleração do solo (A) no local considerado devido a cada uma das fontes sísmogénicas identificadas.

e) Combinam-se os resultados obtidos em d) de modo a obter a probabilidade de atingir A devida à influência integrada de todas as fontes sísmogénicas.

Tanto na abordagem determinista como na probabilista, há que encontrar um modelo de sismicidade que funciona como "base de dados" ou "informação de suporte" para prever os efeitos da actividade sísmica futura.

Esse modelo de sismicidade implica a identificação das fontes sísmogénicas æ falhas activas e zonas sísmogénicas (ou províncias sismotectónicas) regionais, e o conhecimento da actividade sísmica que lhes está associada.

Frequentemente, na caracterização da sismicidade das fontes sísmogénicas usa-se apenas a informação sísmica actual æ a sismicidade instrumental, e a informação referente ao passado próximo æ a sismicidade histórica. Contudo, esta abordagem "histórica" funciona bem apenas em áreas de fronteira de placas caracterizadas pela ocorrência frequente de sismos grandes e, conseqüentemente, onde existem catálogos sísmicos relativamente completos.

O recurso à informação geológica, ou seja, à informação referente a um período de tempo muito mais longo por via dos estudos de paleosismicidade, torna-se muito importante

nas situações em que exista um registo histórico incompleto e em zonas caracterizadas por taxas de deformação tectónica baixas, onde os grandes sismos se repetem em intervalos de milhares ou centenas de milhares de anos.

Caracterização das estruturas sismogénicas: as falhas activas

Concluiu-se que na avaliação da perigosidade sísmica, particularmente em áreas sujeitas a taxas de deformação tectónica baixas, como as regiões intraplaca ou zonas de fronteira de placas que interagem lentamente, é muito importante:

- conhecer as fontes sismogénicas, ou seja, localizar e caracterizar as falhas activas – (*localização*);
- quantificar a dimensão dos sismos que cada falha pode gerar (particularmente o sismo máximo) – (*quantificação*);
- caracterizar a distribuição dos sismos no tempo (intervalos de recorrência) – (*recorrência*).

Chega-se, assim, ao problema da definição operacional de falha activa. Neste contexto, consideram-se activas as falhas com evidências (geológicas, geofísicas e históricas) de deslocamentos suficientemente recentes para que exista uma certa probabilidade de se darem novos deslocamentos num futuro relativamente próximo.

Como se referiu, em áreas sujeitas a velocidades de deformação baixas, os períodos de retorno dos sismos de magnitude elevada ($M > 6$) são frequentemente da ordem de 10³ a 10⁵ anos. Estes valores implicam que, para se detectarem evidências geológicas de deslocamento na falha activa que gera um destes eventos, é necessário considerar-se um período de tempo no registo geológico correspondente a, pelo menos, um ciclo sísmico completo, ou seja, de cerca de 100.000 anos.

Em Portugal continental estimaram-se velocidades médias de deslocamento em falhas activas geralmente inferiores a 0,2 mm/ano, atingindo 0,005 mm/ano (Cabral, 1995). Estas taxas de actividade implicam que o ciclo sísmico médio para eventos com ruptura superficial ($M > 6,5$) tenha uma duração compreendida entre cerca de 5.000 e 200.000 anos, sendo este, assim, o período mínimo em que é expectável encontrarem-se evidências de falhamento activo no registo geológico superficial. Estes valores implicam que se considere uma janela

cronológica desta ordem de grandeza nos estudos da tectónica activa no território continental português.

A identificação das falhas activas é realizada através de estudos de índole diversa, fundamentados em vários critérios, principalmente:

- O critério estratigráfico, ou de corte – a falha afecta rochas recentes;
- O critério geomorfológico – a falha apresenta expressão morfológica (escarpa de falha directa, deslocação de elementos morfológicos);
- O critério sísmológico – a falha apresenta actividade sísmica evidenciada por alinhamento de epicentros instrumentais e históricos, ou alinhamento de curvas isossistas.

Ruptura superficial e paleosismicidade

Ao ocorrerem sismos de $M \geq 6$ em regiões em que a sismicidade é superficial (hipocentro $< 15 - 20$ km de profundidade), como geralmente sucede em zonas intraplaca, a dimensão da área de ruptura cosísmica é tal que esta se propaga no interior da crosta até à superfície topográfica, deslocando-a. Dá-se então ruptura superficial na falha activa sismogénica.

A ocorrência, em falhas activas, de rupturas superficiais sucessivas associadas a sismos passados, conduz a que essas falhas apresentem expressão morfológica e afectem formações geológicas superficiais. Esta situação justifica a aplicabilidade dos critérios geomorfológicos e de corte na identificação de falhas sismogénicas e fundamenta o reconhecimento e caracterização dos sismos "fósseis", ou paleosismos, gerados por essas falhas – objecto de estudo da Paleosismicidade.

Referiu-se que, acima de um limiar de magnitude de cerca de 6, os paleosismos deixam marcas em formações geológicas superficiais e na paisagem, que permitem identificá-los e estudá-los. Estes podem ser caracterizados a partir de:

- evidências primárias – directamente relacionadas com deslocamento cosísmico na falha, nomeadamente, deformações tectónicas afectando a paisagem (escarpas, deflexões horizontais em referências morfológicas) e estruturas tectónicas afectando formações superficiais recentes;
- evidências secundárias – estruturas induzidas pelas vibrações sísmicas (liquefacção – paleosismitos, escorregamentos de terreno; inundações, etc.)

A metodologia mais comum em estudos de paleosismicidade consiste na abertura de sanjas em locais seleccionados com base em diversos critérios, nomeadamente, a presença de acidentes topográficos suspeitos, de rupturas superficiais reconhecidas, e/ou de rochas quaternárias junto a acidentes activos ou que se suspeita serem activos.

Os estudos geológicos detalhados nas sanjas têm como objectivos confirmar a actividade tectónica, reconhecer deslocamentos recorrentes, ou seja, identificar paleosismos, e colher material para datação de modo a determinar períodos de recorrência dos paleosismos.

Os princípios utilizados na interpretação da informação exposta nas paredes das sanjas correspondem aos usualmente utilizados em geologia estrutural, fundamentando-se na geometria e natureza das estruturas, relações de corte, relações de sobreposição, relações com a superfície topográfica, e, particularmente, relações com sedimentos coluviais provenientes da escarpa de falha adjacente.

A avaliação de períodos de recorrência implica a identificação de paleosismos distintos (por relações de corte, identificação de depósitos coluviais ou de paleosismos correlativos, entre outros critérios) e a datação dos diferentes eventos (por datação de horizontes estratigráficos afectados ou de alguma forma relacionados com os paleosismos)

Quanto? Dimensão dos paleosismos e estimativa do potencial sismogénico das falhas activas

A estimativa da magnitude dos paleosismos identificados nos estudos geológicos (por análise de escarpas de falha e/ou estudo de sanjas), e da magnitude do sismo máximo que uma falha activa tem o potencial de gerar, fundamenta-se na relação de escala entre a dimensão da ruptura na falha sismogénica (deslocamento e área de ruptura) e a magnitude do sismo que é gerado.

Esta relação de escala está bem expressa no momento sísmico (M_0), que corresponde ao parâmetro físico mais significativo que mede a dimensão do processo sismogénico:

$$M_0 = \mu u A$$

$$E_s = (\Delta\sigma / 2\mu) M_0$$

onde

μ é o módulo de rigidez do material rochoso ($\mu = \tau/\gamma$, $\mu \simeq 3 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^2$ para as rochas da crosta), u é o deslizamento médio no segmento de uma falha que sofreu ruptura, de área A , E_S é a energia sísmica libertada no evento sísmico, e $\Delta\sigma$ é a queda de tensão.

H. Kanamori introduziu, em 1977, uma escala de magnitudes fundamentada neste parâmetro, designada magnitude de momento, M_W , que descreve, da forma mais adequada, a dimensão dos grandes sismos:

$$M_W = 2/3 \log M_0 - 6,0 \quad M_0 \text{ em Nm}$$

Para estimar a magnitude dos paleosismos identificados nos estudos de neotectónica, ou a magnitude do sismo máximo que uma falha activa tem o potencial de gerar, utilizam-se correlações entre magnitude e parâmetros de falha, fundamentadas em dados empíricos referentes a sismos actuais em que ocorreu ruptura superficial cosísmica.

As correlações mais utilizadas foram desenvolvidas por Wells e Coppersmith (1994), usando-se geralmente as relações entre magnitude e comprimento de ruptura superficial, magnitude e deslocamento superficial cosísmico, e magnitude e área de ruptura.

A utilização destas correlações empíricas nos estudos de paleosismicidade é relativamente imediata, uma vez identificados os deslocamentos cosísmicos em referências estratigráficas ou na morfologia, e/ou as dimensões da ruptura superficial.

Contudo, a sua utilização na estimativa da magnitude e do deslocamento superficial associados a sismos futuros que uma dada falha activa tem o potencial de gerar implica o conhecimento da geometria superficial (e, se possível, profunda) da falha potencialmente sismogénica, de modo a elaborar-se um modelo de segmentação que vai determinar o comprimento (ou área) de ruptura máxima cosísmica e, conseqüentemente, a magnitude do sismo máximo.

Perspectivas em Portugal Continental

Como se referiu, as falhas activas identificadas em Portugal continental apresentam taxas de actividade baixas, de um modo geral compreendidas entre 0,2 mm/ano e 0,005 mm/ano (Cabral, 1995), em resultado do enquadramento geodinâmico regional, caracterizado

por uma convergência lenta ($\simeq 4$ mm/ano) entre a Eurásia e a África no sector oriental da fronteira de placas Açores-Gibraltar (Ribeiro, 2002).

Estes níveis de actividade tectónica implicam taxas de libertação de energia sísmica baixas. O ambiente dominante intraplaca sugere que os sismos máximos localizados no território emerso tenham uma magnitude próxima de 6,5, ou seja, se situem no limiar dos eventos com ruptura superficial, em que o deslocamento e o comprimento de ruptura superficiais são pequenos ($D=0,3-1m$, $L=10-15km$). Como se referiu, nestas condições o ciclo sísmico médio dos eventos com ruptura superficial ($M>6,5$) tem uma duração compreendida entre cerca de 5.000 e 200.000 anos.

Os longos períodos de recorrência e as dimensões relativamente reduzidas dos efeitos superficiais cosísmicos favorecem a acção obliterante dos processos da Geodinâmica Externa (erosão e sedimentação) sobre os testemunhos da actividade tectónica recente no território continental português, dificultando muito a identificação e caracterização de evidências paleosismológicas, cujos dados escasseiam.

Embora o território emerso se situe num ambiente de características intraplaca, a sua proximidade à fronteira Açores-Gibraltar, e o processo de inversão tectónica da margem continental oeste-ibérica de passiva para margem activa, que se terá iniciado no Quaternário (Ribeiro, 2002), justificam a ocorrência de eventos sísmicos de magnitude extremamente elevada com epicentro no Oceano Atlântico, como o terramoto de 1755.

A localização submarina destes eventos não permite a aplicação directa das técnicas usuais da paleosismicidade, implicando o recurso a técnicas próprias da Geologia Marinha, nomeadamente a aquisição e interpretação de perfis de reflexão sísmica, a análise detalhada da morfologia submarina com recurso a sonares de elevada precisão, e o estudo de dragagens e de testemunhos de sondagens de modo a obter informação sobre sedimentos turbidíticos cosísmicos.

A aplicação destas diversas metodologias da Geologia Marinha na margem continental Oeste-Ibérica tem permitido, na última década, avançar muito no conhecimento das estruturas activas submarinas que marginam o território continental português a SW e a S, e que têm o potencial de gerar os sismos máximos regionais (Zitellini, et al., 1999, 2001; Grácia, et al., 2003).

Bibliografia

- Cabral J. (1995) – Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias do Instituto Geológico e Mineiro*, 31: 265p.
- Grácia, E., et al. (2003) – Mapping active faults offshore Portugal (36°N-38°N): Implications for seismic hazard assessment along the southwest Iberian margin. *Geology*, 31, 1: 83-86.
- Ribeiro, A. (2002) – Soft Plate and Impact Tectonics. Springer Verlag, 324p.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994) – New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 4: 974-1002.
- Zitellini, N., et al. (2001) – Source of 1755 Lisbon earthquake and tsunami investigated. *EOS Transactions, AGU*, 82, 26: 290-291.
- Zitellini, N.; Chierici F.; Sartori, R. & Torelli, L. (1999) – The tectonic source of the 1755 Lisbon earthquake and tsunami. *Annali di Geofisica*, 42, 1: 49-55.