

XVIII LIÇÃO MANUEL ROCHA, 2001

A XVIII Lição Manuel Rocha intitulada “Efeitos locais de Amplificação Sísmica pelos Solos” foi proferida pelo Engenheiro Rui M. Correia em 14 de Novembro de 2001, na Fundação Caloute Gulbenkian.

A apresentação do Engenheiro Rui M. Correia foi efectuada pelo Engenheiro Luís Ribeiro e Sousa, Presidente da Sociedade Portuguesa de Geotecnia:

Vamos ter o prazer e o privilégio de assistir à 18ª Lição Manuel Rocha, que vai ser apresentada pelo Engenheiro Rui Manuel Branco Pereira Correia subordinada ao tema *Efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos*.

Do seu valioso *Curriculum Vitae* permito-me salientar alguns aspectos mais significativos.

O Engenheiro Rui Correia é licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico, em 1974, com a elevada classificação de 17 valores.

É Especialista em Mecânica dos Solos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNC), com apresentação de uma tese sobre *Aplicação de modelos matemáticos ao estudo de aterros construídos sobre solos argilosos* moles, em 1982, tendo sido aprovado com a classificação máxima nas provas efectuadas para concurso.

É Investigador Coordenador do LNEC, na sequência de concurso público, onde defendeu um programa de investigação intitulado *Modelação física com centrifugadora em Geotecnia*.

Salienta-se a carreira exemplar que tem tido no LNEC, onde desempenha, desde 1999, o cargo de Director. Exerceu, ainda, funções de Chefe de Núcleo de Estudos Geotécnicos Especiais do Departamento de Geotecnia, de Chefe de Departamento de Geotecnia e de Subdirector.

Foi-lhe atribuído o Prémio de Investigação Manuel Rocha por se ter distinguido no período da sua formação na carreira de investigação do LNEC e nas provas de concurso para a obtenção do grau de Especialista.

Tem desenvolvido uma actividade profissional extremamente fecunda no LNEC, em variadas áreas, como estruturas de suporte de terrenos e ancoragens, aterro para barragens e estradas, estabilidade de taludes, fundações, obras subterrâneas, modelação numérica e engenharia sísmica geotécnica. Nas áreas mencionadas, tem coordenado e executado um grande número de projectos de investigação.

Salienta-se, ainda, a coordenação e execução de um número considerável de estudos por contrato para várias entidades de apoio ao projecto, construção e exploração de obras. Estes estudos de natureza muito diversificada implicaram, designadamente, assessoria técnica, modelação do comportamento, diagnóstico e correcção de patologias controlo da segurança e da qualidade e observação de obras geotécnicas.

Desempenhou actividade docente em universidades portuguesas, tendo sido assistente do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa e, ainda, docente convidado do curso de Mestrado em Engenharia de Estruturas. Foi docente do Curso de Mestrado em Mecânica dos Solos da Universidade Nova de Lisboa. Participou em vários cursos e outras acções de formação e proferiu um grande número de palestras e conferências no país e no estrangeiro, no âmbito da sua actividade profissional.

Foi orientador de várias teses para Especialista do LNEC, bem como de teses de Doutoramento e de Mestrado em Universidades e foi membro de vários júris de provas de Especialista do LNEC e de Doutoramento e de Mestrado em universidades nacionais e estrangeiras. Foi, também, membro de comissões organizadoras e científicas de várias reuniões científicas e técnicas nacionais e internacionais.

Desempenhou actividades em regime de profissão liberal na fase inicial da sua carreira profissional, no âmbito de projecto de pontes e de obras de estabilização de taludes e de estruturas de suporte de terrenos.

Foi Vice-Presidente da Sociedade Portuguesa de Geotecnia e é membro da Comissão Redactorial da Revista de Geotecnia.

É membro de várias Sociedades (SPG e ISSMGE), da Academia de Engenharia, da Ordem do Engenheiros, com o título de Especialista em Geotencia, onde foi coordenador regional da Região Sul do Colégio de Engenharia Civil. Foi vogal do Conselho Superior de Obras Públicas e Transportes e presidiu à Subcomissão dos Regulamentos de Engenharia Geotécnica deste Conselho.

Tem contribuído de forma muito activa, a nível nacional e internacional, em diversas comissões técnicas de regulamentação geotécnica, designadamente na elaboração dos Eurocódigos 7 e 8.

É autor de cerca de duas centenas de trabalhos científicos e técnicos, sob a forma de artigos em revistas, de comunicações a conferências, congressos e simpósios nacionais e internacionais e de relatórios do LNEC.

Em nome da Comissão Organizadora desta Lição, solicito ao Engenheiro Rui Correia que pronuncie a XVIII Lição Manuel Rocha.



EFEITOS LOCAIS DE AMPLIFICAÇÃO SÍSMICA PELOS SOLOS

Seismic soil amplification effects

Rui Manuel Correia*

RESUMO – É abordado o tema dos efeitos locais de amplificação sísmica devidos à existência de solos, com particular ênfase nos efeitos de amplificação da aceleração horizontal máxima e de modificação do conteúdo de frequências dos movimentos sísmicos. Após uma breve revisão de alguns conceitos elementares de sismologia e de engenharia sísmica são analisados os múltiplos factores de que depende a severidade dos movimentos sísmicos, relacionados com a geração sísmica, com a propagação entre a fonte e o sítio e com os efeitos locais. São apontados exemplos de indícios macrossísmicos e de evidências instrumentais da profunda influência que as condições geotécnicas locais têm na amplitude, no conteúdo de frequências e na duração dos movimentos sísmicos fortes, e consequentemente nos efeitos destruidores dos sismos. Relativamente às evidências instrumentais são apresentados e analisados vários registos da aceleração horizontal em terreno rochoso e em solos brandos profundos obtidos nos grandes sismos de Michoacan, Loma Prieta, Kobe e Kocaeli. São analisados e discutidos, à luz de um modelo interpretativo simplificado, os principais factores e condições que favorecem a existência de efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos. É feita uma apreciação da evolução mais recente das disposições regulamentares e normativas relativas à influências das condições geotécnicas na acção sísmica. A concluir, são feitas considerações sobre a relevância dos efeitos de amplificação sísmica pelos solos em Portugal e são apontados alguns tópicos em relação aos quais se torna necessário um aprofundamento dos conhecimentos.

SYNOPSIS – The subject of seismic soil amplification effects is addressed, with an emphasis on the amplification of peak horizontal ground acceleration and the modification of the frequency content of seismic strong motions. After a brief review of some basic seismological and earthquake engineering concepts, the various factors that influence the severity of seismic movements are analysed, related to seismic source, to source-site propagation and to site effects. Some examples are pointed out of macroseismic indications as well as instrumental evidences of the profound influence that site subsoil conditions have upon the amplitude, the frequency content and the duration of seismic movements. With regard to instrumental evidences, several acceleration records both in rock and in soft deep soils obtained during the great Michoacan, Loma Prieta, Kobe and Kocaeli earthquakes are presented and analysed. The main factors and conditions that favour the existence of soil amplification effects are analysed and discussed with the aid of a simplified interpretative model. An appreciation is made of the more recent evolution of code provisions related to the influence of site subsoil conditions on seismic actions. Finally, some considerations are made concerning the relevance of seismic soil amplification effects in Portugal and some topics that need future research and development are pointed out.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Riscos tecnológicos e catástrofes naturais

Os seres humanos estão expostos a riscos de natureza muito diversificada, resultantes da possibilidade de se produzirem acontecimentos desastrosos causadores de morte, ferimentos graves ou grandes danos económicos. De forma esquemática (uma vez que existe muito frequentemente interdependência), esses riscos podem estar associados ou a acidentes tecnológicos – caso em que se fala de riscos tecnológicos – ou a catástrofes naturais.

* Investigador-coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, rcorreia@lnec.pt

Os riscos tecnológicos decorrem da utilização de técnicas, inovadoras ou não, por indivíduos ou por entidades colectivas, sendo pois indissociáveis do progresso científico e tecnológico. Os acidentes que estão na origem deste tipo de riscos tanto podem ter um carácter difuso, quando ocorrem com frequência elevada mas provocam prejuízos relativamente pequenos em cada ocorrência (como por exemplo os acidentes domésticos, os acidentes rodoviários e os acidentes de trabalho), como podem ter um carácter concentrado, quando são raros mas provocam em cada ocorrência muitas vítimas ou prejuízos económicos muito elevados (como por exemplo os acidentes ligados ao transporte marítimo, ferroviário e aéreo, os acidentes em infra-estruturas da indústria química ou em centrais nucleares, os incêndios urbanos e os acidentes originados pelo colapso estrutural de obras de engenharia civil tais como barragens, edifícios e pontes).

As catástrofes naturais são acontecimentos desastrosos (isto é, causadores, directa ou indirectamente, de um grande número de vítimas humanas ou de prejuízos económicos excepcionais) devidos a fenómenos naturais. As catástrofes naturais mais relevantes estão associadas a fenómenos geológicos (como é o caso dos sismos, das erupções vulcânicas e dos deslizamentos de terrenos), a fenómenos climáticos (como é o caso dos ciclones, das inundações e das secas), a fenómenos biológicos (como é o caso das epidemias, das epizootias e da proliferação de espécies infestantes) e a incêndios florestais.

Não obstante o progresso civilizacional que se verifica em todo o mundo (embora com repartição geográfica muito contrastante), o nível de risco associado aos acidentes tecnológicos e às catástrofes naturais continua a ser muito elevado, impondo-se portanto o reforço do investimento na mitigação desse mesmo risco, quer ao nível da prevenção e da previsão quer no que diz respeito à redução da vulnerabilidade e à melhoria da preparação das comunidades e dos indivíduos expostos ao risco.

1.2 – Natureza e causas dos sismos

Os sismos de origem natural são fenómenos que consistem em movimentos vibratórios rápidos da terra resultantes de variações bruscas do estado de tensão na litosfera. O mecanismo mais comum e importante de geração dos sismos pode, em termos esquemáticos, ser descrito como uma lenta acumulação de energia de deformação em falhas geológicas, devida a aumento das tensões tectónicas, seguida de uma súbita e rápida libertação dessa energia quando ocorrem roturas (acompanhadas de movimentos bruscos) no contacto entre os bordos das falhas.

As falhas são descontinuidades na estrutura geológica, resultantes de fracturação nos materiais rochosos, e nas quais se processaram movimentos relativos entre as partes do maciço que ficam de um e outro lado. As falhas podem corresponder a fronteiras entre placas da litosfera (falhas inter-placas) (Fig. 1) ou existir no interior das placas (falhas intra-placas).

Nas fronteiras entre placas tectónicas podem existir basicamente movimentos relativos (mecanismos) de três tipos:

- afastamento/divergência (caso em que se verifica ascensão de magma e a consequente criação de matéria na litosfera);
- aproximação/convergência (originando ou colisão das placas ou subducção, processo em que ocorre consumo de matéria da litosfera);
- distorção (falha transformante).

Quanto às falhas intra-placas, é usual classificá-las em falhas normais (quando o movimento relativo entre as partes separadas é de extensão), falhas inversas ou de cavalgamento (compressão) e falhas transcorrentes ou de desligamento (deslizamento horizontal). Para além das componentes de movimento associadas a extensão ou a compressão, tanto as falhas normais como as inversas também têm muitas vezes uma componente de deslizamento horizontal.

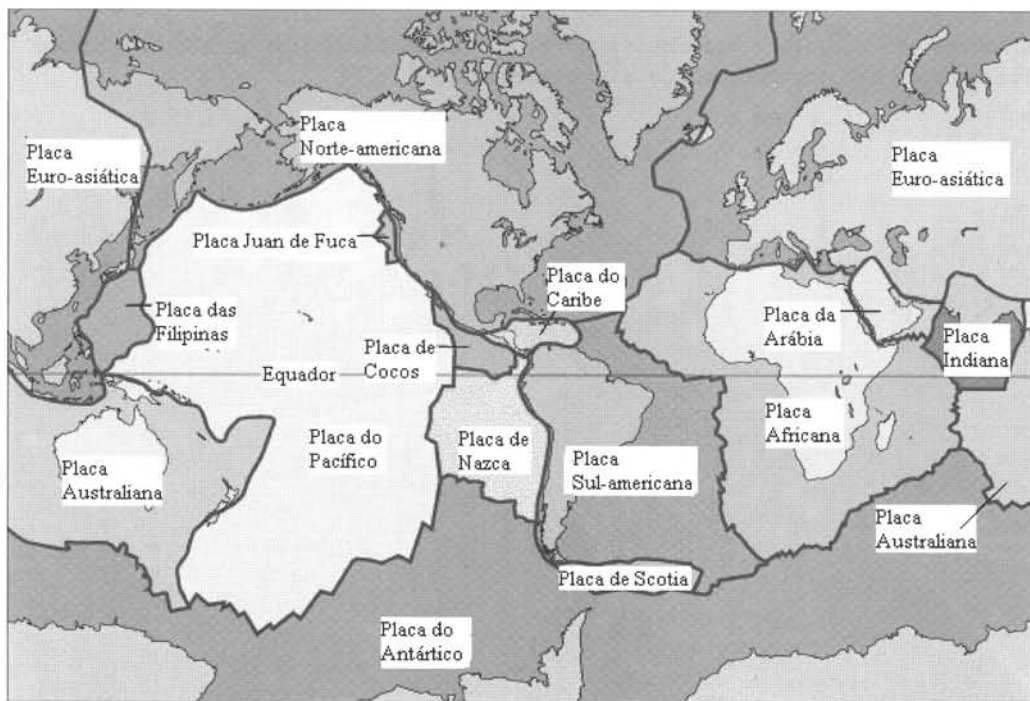


Fig. 1 – Placas tectônicas (Fonte: *United States Geological Survey*, EUA – <http://pubs.usgs.gov>).

É nas fronteiras entre placas que se concentra a maior parte da actividade sísmica mundial. No entanto, a actividade sísmica gerada em falhas intra-placas é também significativa.

Ocorrem por vezes sismos nos quais as roturas em falhas atingem a superfície do terreno, podendo ficar aí bem evidenciadas (Fig.s 2 e 3).

1.3 – Efeitos dos sismos

Os efeitos destruidores dos abalos sísmicos resultam geralmente dos movimentos vibratórios intensos do terreno, os quais podem afectar locais situados a grandes distâncias da zona de libertação de energia. Mas esses efeitos podem também resultar, embora tal suceda com menor frequência, de a rotura nas falhas eventualmente atingir a superfície do terreno, provocando aí deslocamentos irreversíveis significativos.

As vibrações sísmicas fortes do terreno podem produzir efeitos destruidores essencialmente por duas formas.

Em primeiro lugar (efeitos estruturais directos), as vibrações sísmicas do terreno provocam tensões e deformações cíclicas nas obras de engenharia civil (tais como edifícios, pontes, barragens, túneis, condutas, estruturas de suporte e aterros) que nele estão fundadas ou inseridas, podendo causar-lhes importantes danos estruturais e mesmo o colapso (Fig.s 4, 5 e 6). Esta é a forma mais frequente.

Em segundo lugar (efeitos indirectos), as vibrações sísmicas fortes podem provocar roturas ou grandes assentamentos no terreno de fundação das obras, situação que, por sua vez, é susceptível de conduzir à ocorrência de danos e mesmo de colapso dessas mesmas obras. As duas formas mais comuns de instabilização, por acção sísmica, dos terrenos de fundação são a rotura por perda de resistência ao carregamento como resultado da ocorrência de fenómenos de

liquefacção de solos (estes fenómenos serão abordados mais à frente no âmbito dos chamados efeitos locais) e os deslizamentos de taludes em encostas (Fig. 7).



Fig. 2 – Expressão superficial da rotura num segmento da falha do Norte da Anatólia no sismo de Kocaeli, 1999-08-17, Turquia (Fonte: Universidade do Bósforo, Turquia – <http://www.koeri.boun.edu.tr>).



Fig. 3 – Expressão superficial da rotura na falha de Chelengpu no sismo de Ji-Ji, 1999-09-20, Taiwan (Fonte: Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA – <http://nisee.berkeley.edu>).



Fig. 4 – Colapso do *City Hall* da cidade de S. Francisco no sismo de S. Francisco, 1906-04-18, EUA (Fonte: ZPUB – <http://zpub.com>).



Fig. 5 – Colapso de viaduto rodoviário no sismo de Northridge, 1994-01-17, EUA (Fonte: *United States Geological Survey*, EUA – <http://geopubs.wr.usgs.gov>).



Fig. 6 – Grande abatimento de arruamento na cidade de Kobe, causado pelo colapso parcial de uma estação de Metro subjacente, no sismo de Kobe, 1995-01-17, Japão (Fonte: Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA – <http://nisee.berkeley.edu>).

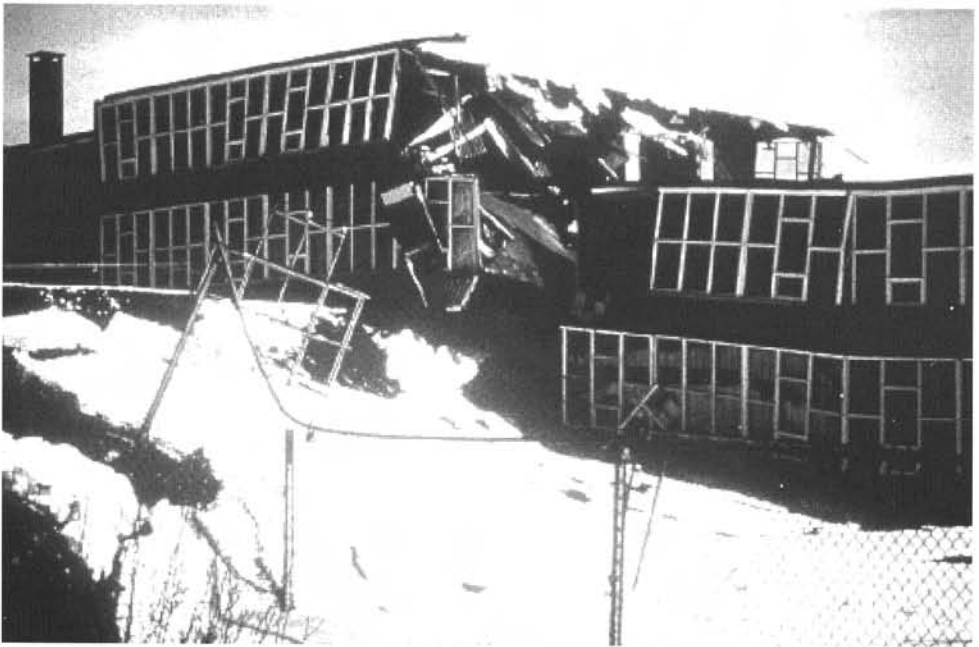


Fig. 7 – Colapso de edifício escolar causado por deslizamento de talude no sismo de Prince William Sound, 1964-03-28, Alasca, EUA (Fonte: *John A. Martin and Associates* – <http://www.johnmartin.com>).

Nos eventos sísmicos em que a rotura nas falhas atinge a superfície do terreno podem também ocorrer danos severos e mesmo o colapso de estruturas situadas sobre a zona de rotura, como consequência directa dos deslocamentos diferenciais impostos (Figs 8 e 9).



Fig. 8 – Colapso de barragem devido a grandes deslocamentos diferenciais impostos à superfície por rotura da falha de Chelungpu no sismo de Ji-Ji, 1999-09-20, Taiwan (Fonte: Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA – <http://nisee.berkeley.edu>).



Fig. 9 – Colapso de ponte devido a grandes deslocamentos diferenciais impostos à superfície por rotura da falha de Chelungpu no sismo de Ji-Ji, 1999-09-20, Taiwan (Fonte: Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA – <http://nisee.berkeley.edu>).

Quer as vibrações sísmicas intensas do terreno (designadamente através de deslizamentos de grandes taludes submarinos ou litorais) quer os movimentos de rotura de falhas nos fundos submarinos podem provocar um fenómeno, designado por maremoto, ou “tsunami”, caracterizado por uma intensa e profunda agitação das águas marítimas, que se propaga a grande velocidade até às zonas costeiras causando aí ondas gigantescas (altura por vezes superior a 30 m) com elevado potencial de devastação em termos de perda de vidas humanas e de prejuízos materiais.

Os danos estruturais infligidos directamente pelos abalos sísmicos nas obras de engenharia civil podem ter consequências desastrosas adicionais, tais como incêndios em aglomerados urbanos (Fig. 10) e inundações associadas à rotura de barragens. O colapso de linhas vitais, tais como vias de comunicação e sistemas de abastecimento de água e energia, têm frequentemente um impacto muito negativo, contribuindo, designadamente pelas dificuldades criadas ao acesso e actuação dos meios de socorro, para o aumento do número de vítimas e dos prejuízos económicos.



Fig. 10 – Incêndio urbano causado pelo sismo de Kobe, 1995-01-17, Japão (Fonte: Universidade de Nevada, EUA – <http://www.seismo.unr.edu>).

Juntamente com os ciclones e fenómenos similares, os sismos são as catástrofes naturais que causam maior perda de vidas humanas. Nos últimos decénios é da ordem de 12 000 a média anual do número de pessoas mortas, a nível mundial, em consequência da ocorrência de sismos. De acordo com o *United States Geological Survey* – USGS dos Estados Unidos da América (<http://neic.usgs.gov>), foram os seguintes os sismos em que pereceram 50 000 pessoas ou mais nos últimos 100 anos:

- 1976-07-27, China, Tangshan, cerca de 255 000 mortos;
- 1927-05-22, China, Xining, 200 000;
- 1920-12-16, China, Gansu, 200 000;
- 1923-09-01, Japão, Tóquio, 143 000;
- 1948-10-05, URSS, Ashgabat, 110 000;
- 1908-12-28, Itália, Messina, 70 000 a 100 000;

- 1932-12-25, China, Gansu, 70 000;
- 1970-05-31, Peru, Yungay, 66 000;
- 1935-05-30, Paquistão, Quetta, 30 000 a 60 000;
- 1990-06-20, Noroeste do Irão, 50 000.

O sismo que ocorreu na China em 1976 terá sido o segundo mais mortífero de que há conhecimento em toda a história da humanidade. O primeiro terá sido outro sismo ocorrido também na China, em 1556, no qual terão perecido mais de 800 000 pessoas. Outras fontes referem que terão perdido a vida mais de um milhão de pessoas num evento sísmico ocorrido no médio oriente no ano de 1201. De qualquer forma, é evidente que, no que diz respeito aos sismos que tiveram lugar há muito tempo, as informações relativas ao número de vítimas devem, de uma forma geral, ser entendidas, quando muito, como ordens de grandeza.

O sismo que devastou Lisboa no dia 1 de Novembro de 1755, e que terá vitimado mortalmente cerca de 70 000 pessoas, foi provavelmente o segundo mais mortífero a atingir a Europa, a seguir ao sismo de Messina (1908).

Para além do já referido sismo no Irão em 1990, alguns eventos sísmicos recentes especialmente mortíferos foram os que ocorreram em 1985-09-19 no México (cerca de 10 000 vítimas mortais), em 1988-12-07 na Arménia (25 000), em 1999-08-17 na Turquia (17 000) e em 2001-01-26 na Índia (20 000).

Os prejuízos económicos causados pelos sismos, incluindo não só o valor dos bens destruídos mas também os custos indirectos decorrentes das profundas perturbações provocadas no sistema produtivo, podem ser excepcionalmente severos. No sismo que ocorreu em 1995-01-17 no Japão estima-se que os prejuízos económicos tenham sido da ordem de 150 000 milhões de euros (ME). Quase metade desta cifra impressionante corresponde ao custo de substituição ou reparação de edifícios.

Outros sismos recentes cuja estimativa de prejuízos económicos causados ultrapassa 10 000 ME foram os que ocorreram em 1980-11-23 em Itália, em 1988-12-07 na Arménia, em 1994-01-17 nos EUA, em 1999-08-17 na Turquia e em 1999-09-20 em Taiwan. A tendência geral que presentemente se verifica, à escala mundial, para a concentração geográfica de populações e de infraestruturas sócio-económicas favorece a ocorrência de danos excepcionalmente elevados num único evento sísmico.

1.4 – Caracterização da fonte sísmica

Sendo os sismos geralmente originados por roturas em falhas da litosfera, a caracterização da fonte sísmica correspondente a um determinado evento incide designadamente sobre: i) o tipo, a orientação e a inclinação da falha; ii) a localização, a forma e a área da zona da falha onde a rotura ocorreu; iii) a localização do início, o modo de progressão e a expressão final da rotura (em termos de deslocamento e de redução do estado de tensão); iv) as características mecânicas do material (rochoso) envolvido no processo de rotura.

Os parâmetros mais frequentemente utilizados para caracterizar geometricamente a fonte sísmica são (Fig. 11):

- as coordenadas geográficas do epicentro, definido como a projecção vertical, à superfície, do “ponto”, designado por foco (ou hipocentro), onde teve início a rotura;
- a profundidade do foco;
- a área da superfície de rotura.

O parâmetro mais utilizado para caracterizar a fonte sísmica no que diz respeito ao processo mecânico de rotura é o chamado momento sísmico (M_0), definido como o produto do módulo de distorção (G) do material rochoso pela área da superfície de rotura e pelo deslocamento associado à rotura.

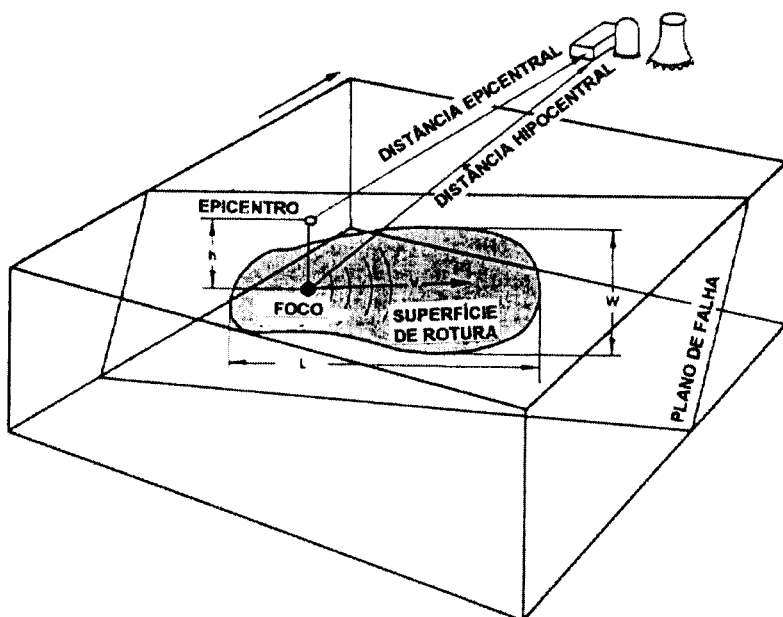


Fig. 11 – Caracterização geométrica da fonte sísmica (Tiedemann, 1992).

1.5 – Propagação das vibrações sísmicas

A libertação de energia de deformação que está na origem dos sismos produz movimentos vibratórios que, a partir da zona de rotura, se propagam, sob a forma de ondas sísmicas, a todo o meio envolvente.

As ondas sísmicas podem basicamente ser de dois tipos: ondas volumétricas, que, por se propagarem em todas as direcções, interessam todo o meio; e ondas superficiais, que se propagam em direcções “paralelas” à superfície da terra e interessam apenas o terreno que se encontra relativamente próximo dessa mesma superfície.

As ondas sísmicas volumétricas podem, por sua vez, ser de dois tipos: ondas longitudinais (também designadas por ondas P), às quais estão associadas variações de volume do meio onde se propagam; e ondas transversais (também designadas por ondas distorcionais, ou ondas S), às quais estão associadas deformações puramente distorcionais. Também as ondas superficiais podem ser de dois tipos: de Rayleigh, em que os deslocamentos se processam em planos verticais que contêm a direcção de propagação; e de Love, em que os deslocamentos se processam segundo a direcção horizontal perpendicular à direcção de propagação.

Num determinado sítio à superfície da terra, os movimentos vibratórios correspondentes a um evento sísmico incorporam os efeitos de ondas de todos os tipos referidos. No entanto, os tempos de chegada das ondas diferem, por três motivos principais. O primeiro é que os movimentos de rotura na fonte que originam a emissão de ondas sísmicas se processam progressivamente quer no espaço (isto é, na zona de rotura) quer no tempo. O segundo é que, para um determinado meio de propagação, as ondas sísmicas têm velocidades diferentes (e portanto tempos de chegada diferentes) consoante o seu tipo (por exemplo, a velocidade de propagação das ondas P pode tipicamente ser da ordem do dobro da das ondas S). O terceiro motivo para os tempos de chegada das ondas a um sítio diferirem prende-se com o facto de, ao longo do

trajecto entre a fonte e o sítio, as ondas sísmicas sofrerem geralmente múltiplas reflexões e refrações nas fronteiras entre zonas com características de comportamento mecânico contrastantes, resultando assim que uma mesma onda dê lugar a ondas distintas (ainda que do mesmo tipo) com tempos de chegada também distintos.

As ondas sísmicas sofrem também, no seu processo de propagação, uma atenuação (amortecimento) da amplitude dos movimentos vibratórios. Para além do chamado amortecimento geométrico, que resulta simplesmente da dispersão multidimensional da energia libertada, existe ainda outro tipo de amortecimento, designada por amortecimento material, que decorre da dissipação de energia que está geralmente associada, em maior ou menor grau, aos processos de deformação cíclica dos materiais geológicos.

1.6 – Intensidade e magnitude dos sismos

A grandeza, ou tamanho, dos abalos sísmicos é correntemente avaliada e medida de duas maneiras: através da intensidade macrossísmica e através da magnitude.

A intensidade macrossísmica constitui uma medida essencialmente qualitativa, baseada na severidade dos efeitos (designadamente nas construções e nos seres humanos) de um sismo num determinado local. Assim, a um abalo sísmico não está geralmente associada uma única intensidade, mas sim intensidades diferentes em locais diferentes. A intensidade mede-se em graus de uma escala. As escalas de intensidade mais correntemente utilizadas são a de Mercalli modificada e a MSK, ambas possuindo 12 graus que vão desde um abalo quase imperceptível até à destruição completa das construções humanas.

A intensidade constitui uma medida indirecta da grandeza dos sismos, já que é influenciada de forma significativa por factores tais como o tipo e a qualidade das construções no local em que é avaliada. No entanto, a sua utilização constitui geralmente a única abordagem possível quando se pretende avaliar as características de sismos históricos, isto é, ocorridos antes do advento do registo instrumental das vibrações sísmicas.

Quanto à magnitude, trata-se de uma medida da grandeza dos sismos que inicialmente se baseava, de forma directa, na amplitude máxima das ondas sísmicas registada à superfície em sismógrafos, tendo em consideração também a distância do instrumento à fonte sísmica. Várias definições de magnitude foram propostas e continuam a ser utilizadas, tais como as que se referem à magnitude local (M_L), ou de Richter, à magnitude para ondas de superfície (M_s) e à magnitude para ondas volumétricas (m_b).

Este tipo de definições de magnitude tem, entre outros, o inconveniente de não permitir uma avaliação satisfatória do tamanho dos sismos muito grandes, uma vez que a partir de certos valores da grandeza do sismo esta aumenta sem que aumente a magnitude (isto é, existe saturação da escala). Este facto motivou a introdução da chamada magnitude de momento (M_w) (Kanamori, 1977), que se pode obter directamente do momento sísmico através de:

$$M_w = 2/3 \log_{10} M_0 - 6,07 \quad (1)$$

em que M_0 é o momento sísmico em Nm.

O maior evento sísmico de que há conhecimento foi o que ocorreu no Chile em 1960-05-22. A área da superfície de rotura e o deslocamento irreversível ocorrido nessa superfície terão sido da ordem de 210 000 km² e de 19 m, respectivamente (Tiedemann, 1992). Considerando um valor de $G = 50$ GPa, o momento sísmico é aproximadamente $M_0 = 2 \times 10^{23}$ Nm, ao qual corresponde a magnitude de momento $M_w = 9,5$ (refira-se que o valor atribuído à magnitude para ondas de superfície é apenas $M_s = 8,3$).

1.7 – Frequência da ocorrência de sismos

De uma forma geral, a frequência da ocorrência de sismos numa dada região é fortemente decrescente com a magnitude. De facto, tem sido observado que a frequência média anual (N) de ocorrência de sismos de magnitude superior ou igual a um certo valor M da magnitude depende de M de um modo tal que pode ser satisfatoriamente aproximado por uma relação funcional, conhecida por lei de Gutenberg e Richter, na qual o logaritmo de N decresce linearmente com o aumento de M .

Por exemplo, de acordo com o USGS (<http://neic.usgs.gov>), desde o ano de 1900 até ao presente ocorreram em todo o mundo, em média, 19 sismos por ano com magnitude $M \geq 7$, 139 com $M \geq 6$ e 939 com $M \geq 5$. Na Fig. 12 estão representados os pontos representativos destes pares de valores, bem como a relação linear que a eles melhor se ajusta.

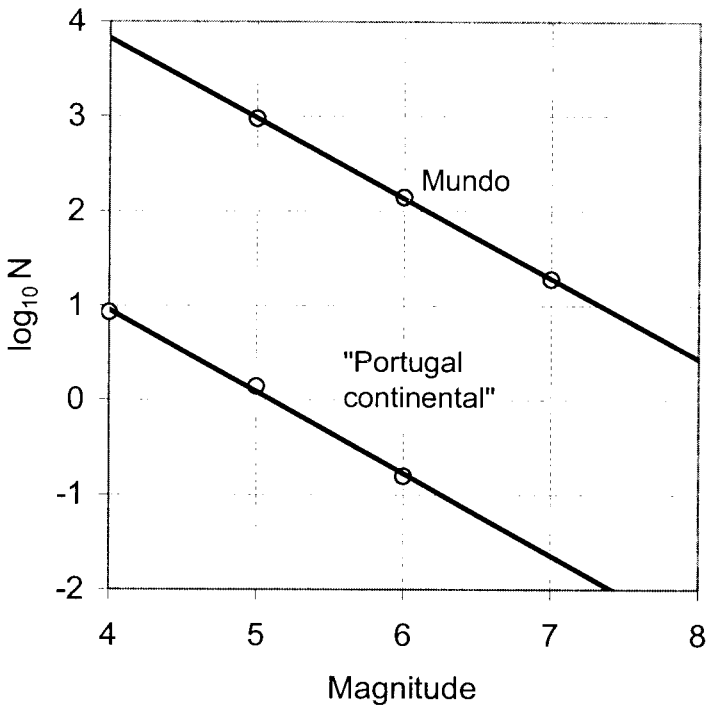


Fig. 12 – Frequência média anual da ocorrência de sismos em todo o mundo e numa zona envolvente de Portugal continental.

Na Fig. 12 está também representada informação, obtida com base no catálogo sísmico da região ibérica compilado por Sousa *et al.* (1992), relativa à frequência média anual, no período de 90 anos compreendido entre 1901 e 1990, da ocorrência de sismos numa região (compreendida entre as latitudes de 35° e 44° Norte e as longitudes de 12° e 4° Oeste) onde são gerados sismos susceptíveis de afectar Portugal continental. É interessante verificar que as relações frequência-magnitude para todo o mundo e para a mencionada região envolvente de Portugal continental têm coeficiente angular semelhante.

Atendendo aos dados da sismicidade mundial acima referidos, e tendo em consideração a área total da superfície do globo terrestre (da ordem de 500 milhões de km^2), conclui-se que,

em termos médios, ocorrem em todo o mundo, por ano e por milhão de km^2 , cerca de 0,3 sismos de magnitude igual ou superior a 6. Mas deve evidentemente ser salientado que a ocorrência espacial de sismos é muito desigualmente distribuída à escala mundial. Conforme foi já referido, a sismicidade mundial está fortemente concentrada nas fronteiras das placas tectónicas, com destaque para as da zona do oceano Pacífico.

Entre países há também, naturalmente, diferenças muito acentuadas no que diz respeito à frequência dos eventos sísmicos. Por exemplo, enquanto que nos Estados Unidos da América – EUA, e ainda de acordo com o USGS, a frequência média de ocorrência de sismos de magnitude igual ou superior a 6 no período compreendido entre 1990 e 2000 é da ordem de 7 por ano, ou seja, cerca de 0,8 por ano e por milhão de km^2 (no próprio país a distribuição é, como se sabe, muito desigual, existindo regiões, com destaque para a da Califórnia, em que a taxa média é certamente muito superior a esse valor), na região envolvente de Portugal continental atrás referida essa taxa é apenas da ordem de 0,2 por ano e por milhão de km^2 .

Não obstante a sua sismicidade ser muito inferior à de outras regiões do mundo, o continente de Portugal, como é bem sabido, já foi atingido por sismos muito devastadores, tais como os de 1356 e 1755, ambos com origem debaixo do mar, e os de 1531 (Lisboa), 1722 (Algarve), 1858 (Setúbal) e 1909 (Benavente), todos com origem em terra ou próximo de terra. Também a região dos Açores tem sido atingida por sismos causadores de danos elevados, tais como os de 1522 (S. Miguel), 1757 (S. Jorge), 1980 (Terceira) e 1998 (Horta).

1.8 – Caracterização e representação dos movimentos sísmicos

Do ponto de vista da engenharia sísmica, as características mais relevantes dos movimentos sísmicos vibratórios são a amplitude, a distribuição do conteúdo relativo de frequências (ou simplesmente conteúdo de frequências) e a duração.

A relevância da amplitude é óbvia, uma vez que, em igualdade de conteúdo de frequências e de duração, as tensões e deformações causadas nas obras (e portanto também os danos estruturais) aumentam com a amplitude dos movimentos sísmicos.

A relevância do conteúdo de frequências resulta do facto de a resposta dinâmica de uma estrutura a um movimento sísmico depender fortemente da maior ou menor proximidade entre as frequências próprias da estrutura (e muito em especial a frequência fundamental) e as gamas de frequências nas quais o movimento sísmico tem maior conteúdo.

Quanto à duração, a sua relevância como parâmetro caracterizador dos movimentos sísmicos decorre desde logo do facto de, a partir de determinados níveis, a repetição sucessiva de ciclos de tensão e de deformação ter efeitos significativos de degradação do comportamento estrutural (fadiga), incluindo redução da resistência. Por outro lado, o aumento da duração dos movimentos sísmicos é susceptível de provocar acumulação de deslocamentos irreversíveis em obras geotécnicas tais como taludes e obras de suporte de terras, bem como também a degradação da resistência de solos saturados por efeito da acumulação de pressões intersticiais (liquefacção).

A forma mais directa de representação (descrição) dos movimentos sísmicos num ponto consiste na definição da evolução, ao longo do tempo, das componentes tridimensionais desses movimentos. Dispõe-se assim, geralmente, de séries cronológicas (histórias) de valores da aceleração, da velocidade ou do deslocamento (estas grandezas relacionam-se entre si por simples operações de diferenciação ou de integração no domínio do tempo) segundo duas direcções horizontais e segundo a direcção vertical (Fig. 13).

Além de evidenciar claramente as características de duração dos movimentos sísmicos, a representação no domínio do tempo permite a obtenção directa dos valores máximos (ou valores de pico) da aceleração, da velocidade e do deslocamento. Estes valores constituem por si só uma descrição muito sucinta, ainda que obviamente simplificada, das características de ampli-

tude dos movimentos sísmicos. Por outro lado, a partir de quocientes entre valores de pico (por exemplo, da aceleração e da velocidade, ou da velocidade e do deslocamento) é possível estimar a ordem de grandeza dos períodos predominantes, isto é, daqueles em que os movimentos sísmicos possuem maior conteúdo.

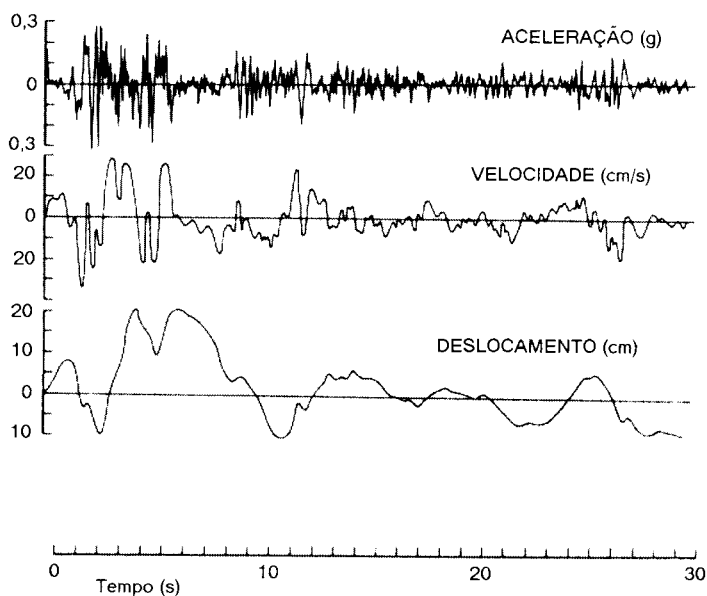


Fig. 13 – Histórias de aceleração, velocidade e deslocamento registadas no sismo de El Centro, 1940-05-18, EUA (Newmark e Rosenblueth, 1971).

Também é possível representar os movimentos sísmicos através de espectros de Fourier, obtidos mediante decomposição harmónica (ou seja, no domínio da frequência) das séries cronológicas correspondentes a cada uma das componentes. Nesta forma de representação (e noutras representações espectrais derivadas, tais como o espectro de densidade de potência) estão patentes de forma explícita os conteúdos de frequência dos movimentos, mas em contrapartida não ficam evidenciadas as características de amplitude (designadamente os valores de pico) e de duração.

Em engenharia sísmica recorre-se de modo cada vez mais generalizado a uma outra forma de representação dos movimentos sísmicos. Trata-se dos chamados espectros de resposta, que fornecem, em função do período próprio, e para um dado valor do amortecimento viscoso relativo, o valor máximo da resposta (em termos de aceleração, de velocidade ou de deslocamento) de um oscilador linear de um grau de liberdade cuja base seja submetida à componente do movimento que se quer representar (Fig. 14).

Têm particular utilidade os espectros de resposta de aceleração absoluta, uma vez que:

- a aceleração absoluta é directamente proporcional aos esforços dinâmicos nos sistemas estruturais mais simples;
- fica evidenciado o valor de pico da aceleração (corresponde à ordenada espectral para período nulo, qualquer que seja o amortecimento);
- fica também evidenciado o período predominante (ou gama de períodos predominantes), que corresponde às maiores ordenadas espectrais (no exemplo da figura 14 o período predominante é aproximadamente 0,5 s).

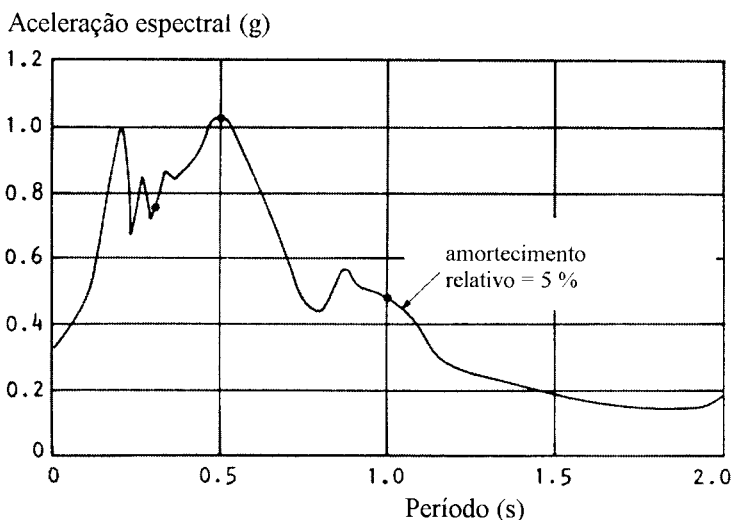


Fig. 14 – Espectro de resposta de aceleração de um movimento sísmico registrado no sismo de El Centro, 1940-05-18, EUA (Seed e Idriss, 1982).

2 – FACTORES DE QUE DEPENDE A SEVERIDADE DOS MOVIMENTOS SÍSMICOS

2.1 – Geração, propagação e efeitos locais

A severidade das vibrações sísmicas fortes, traduzida no número de vítimas e nos prejuízos económicos causados, depende de um grande número de factores. De forma esquemática, esses factores podem ser classificados em dois grandes grupos: por um lado os que determinam a acção sísmica; e por outro lado os que se referem às características intrínsecas (designadamente a resistência estrutural e as frequências próprias) dos edifícios e outras obras de engenharia civil.

Entre os factores que determinam a acção sísmica encontram-se os que estão relacionados com: i) a geração sísmica; ii) a propagação das vibrações entre a fonte sísmica e um determinado local; iii) os chamados efeitos locais, entendidos como aqueles que dependem das particularidades (nomeadamente morfológicas, geotécnicas e hidrogeológicas) dos terrenos existentes num determinado local (Fig. 15).

O principal factor relacionado com a geração sísmica é a magnitude, mas o tipo e as especificidades do mecanismo de rotura podem também ser factores de relevo, principalmente quando se analisam efeitos a pequena distância da fonte sísmica.

No que diz respeito à propagação das vibrações, os dois factores mais importantes a considerar são a distância entre a fonte sísmica e o local e as características geológicas e mecânicas das formações rochosas que constituem o meio de propagação. Não existe uma definição única de distância entre a fonte sísmica e o local. As mais comuns são a distância epicentral, a distância focal e a menor distância à superfície de rotura.

A influência da magnitude e da distância nas características mais importantes das vibrações sísmicas em terreno rochoso pode ser resumida, em termos genéricos, do seguinte modo (Figs 16, 17 e 18):

- a amplitude, o período predominante e a duração aumentam com o aumento da magnitude;

- a amplitude diminui e o período predominante aumenta com o aumento da distância.

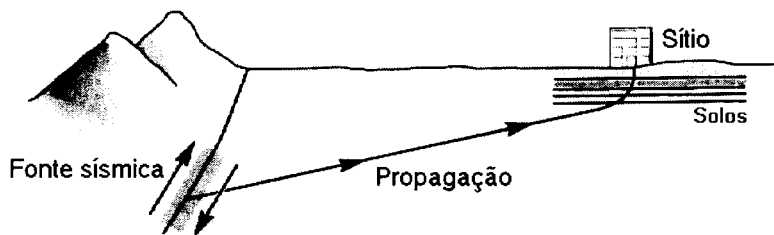


Fig. 15 – Geração, propagação e efeitos locais (Kramer, 1996).

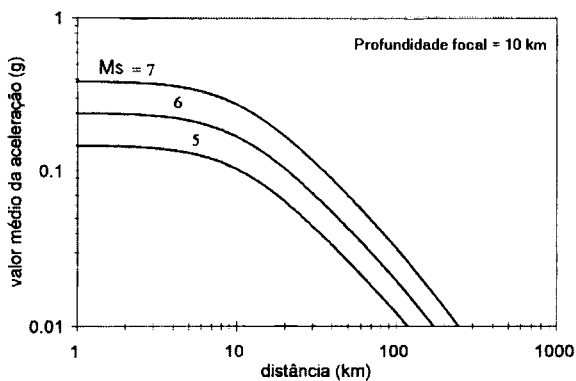


Fig. 16 – Atenuação da aceleração horizontal em terreno rochoso com a distância (Ambraseys e Bommer, 1991).

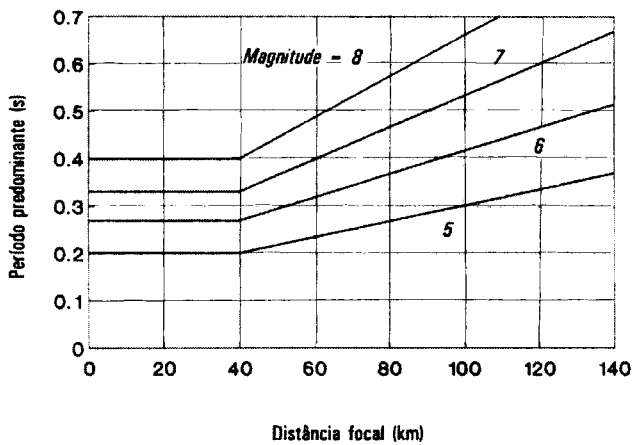


Fig. 17 – Período predominante da aceleração horizontal em terreno rochoso em função da magnitude e da distância focal (Idriss, 1991).

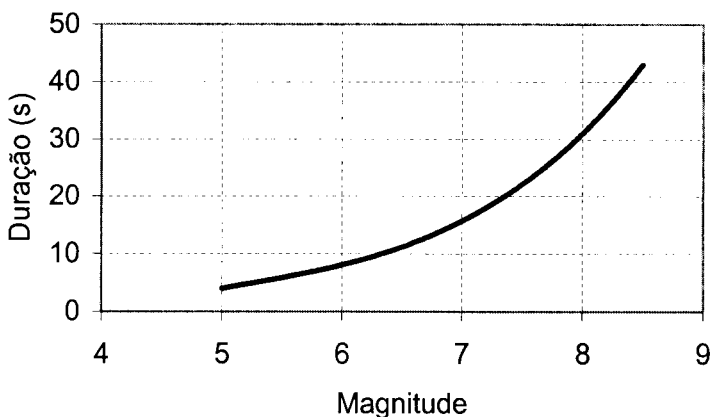


Fig. 18 – Duração típica dos movimentos sísmicos em terreno rochoso em função da magnitude, para distâncias epicentrais inferiores a 10 km (Chang e Krinitzsky, 1977, citado por Kramer, 1996).

Quanto aos efeitos locais, podem ser divididos em efeitos de amplificação e em efeitos indirectos (Correia, 1993).

Por efeitos de amplificação entende-se a modificação de amplitude, conteúdo de frequências e duração das vibrações sísmicas causada pela existência de terrenos superficiais não rochosos (amplificação pelos solos) ou de irregularidades topográficas (efeitos topográficos).

Os efeitos locais indirectos consistem em fenómenos de instabilização (colapso) de terrenos de solo induzidos pelas vibrações sísmicas, sendo os mais importantes a liquefacção, os deslizamentos de taludes e o adensamento por vibração.

2.2 – Efeitos locais de liquefacção

Antes de passar ao desenvolvimento do tema principal desta apresentação (ou seja, os efeitos locais de amplificação pelos solos) fazem-se seguidamente algumas considerações sumárias sobre os efeitos locais de liquefacção.

Os solos incoerentes em estado solto situados abaixo do nível freático são susceptíveis de sofrer liquefacção quando submetidos a movimentos vibratórios intensos ou prolongados. Por liquefacção entende-se um processo gradual de degradação das características mecânicas que pode, em certas circunstâncias, levar o solo a exibir um comportamento reológico próximo daquele que é típico dos líquidos.

A explicação para os efeitos de liquefacção reside no facto de as solicitações distorcionais cíclicas rápidas (como as que ocorrem durante os sismos) provocarem, em solos nas condições referidas, um acréscimo progressivo da pressão intersticial, por forma a que, em condições não drenadas, exista compensação da tendência para a contracção volumétrica. O acréscimo de pressão intersticial tem como consequência a redução da tensão efectiva média, e portanto também da resistência ao corte mobilizável e da rigidez distorcional.

Compreende-se pois facilmente, face a esta explicação, que a liquefacção de solos durante a ocorrência de eventos sísmicos possa provocar (e tenha muitas vezes provocado) graves danificações ou mesmo o colapso de obras de engenharia civil. Desde logo pela possibilidade de existir rotura da fundação de edifícios (Fig. 19) ou de outras obras, quer por insuficiência de resistência ao carregamento quer por deslizamento de taludes. Mas os fenómenos de liquefacção podem também originar importantes assentamentos de fundações (sem rotura), devidos ao

processo de dissipação do excesso de pressão intersticial que se segue ao termo da acção sísmica.



Fig. 19 – Rotura da fundação de um edifício devida a liquefacção de solos no sismo de Kocaeli, 1999-08-17, Turquia (Fonte: *Earthquake Engineering Research Institute*, EUA – <http://www.eeri.org>).

A liquefacção de solos incoerentes relativamente superficiais é frequentemente acompanhada de ejeções de água e solo (Fig. 20). Estes fenómenos encontram explicação precisamente no desenvolvimento de excessos de pressão intersticial e no conseqüente estabelecimento de elevados gradientes hidráulicos.

Existem vários relatos inequívocos e bem elucidativos sobre a ocorrência de fenómenos de ejeção de água e areia durante sismos ocorridos em Portugal. Por exemplo, Choffat e Bensaude (1912), referindo-se ao sismo de Benavente, ocorrido em 1909-04-23, descrevem deste modo o relato de uma testemunha presencial: “(...) viu que saía a água pelas fendas que se tinham aberto no solo, formando borbulhões de mais de meio metro de altura e arrastando areia fina, negra, contendo conchas”.

3 – EFEITOS LOCAIS DE AMPLIFICAÇÃO PELOS SOLOS

3.1 – Indícios macrossísmicos

As condições geotécnicas num determinado local podem alterar de forma muito importante todas as características fundamentais dos movimentos sísmicos, designadamente as três que foram atrás apontadas como sendo as mais relevantes do ponto de vista da engenharia sísmica: amplitude, conteúdo de frequências e duração.

Esse facto, como se verá mais adiante através de vários exemplos, tem sido inequivocamente comprovado através de registos instrumentais, num mesmo evento, de movimentos sísmicos em locais próximos mas com características geotécnicas diferenciadas. Mas antes de se

ter iniciado o registo instrumental de movimentos sísmicos já existia, historicamente, abundante constatação empírica da influência das condições geotécnicas locais. Em especial, foi muitas vezes observado um acréscimo muito relevante dos efeitos destruidores de grandes sismos em locais onde os terrenos superficiais são constituídos por solos brandos. Seguidamente são apresentados, mediante transcrições literais, três exemplos referentes aos grandes sismos de Lisboa (1755-11-01), S. Francisco (1906-04-18) e Tóquio (1923-09-01). Em todos eles está patente uma percepção muito clara da ocorrência de efeitos locais de amplificação pelos solos.



Fig. 20 – Ejeção de areia devido a liquefacção no sismo da Guatemala, 1976-02-04 (Fonte: *National Geophysical Data Center, EUA* – <http://www.ngdc.noaa.gov>).

Relativamente aos efeitos em Setúbal do sismo de Lisboa, Pereira de Sousa (1919) diz:

“O solo de Setubal é em grande parte constituído pelas aluviões, que se encontram, principalmente, no bairro Troino, que é atravessado por uma antiga linha dagua. Por isso, este bairro foi o mais destruído pelos abalos”.

Relativamente aos efeitos do sismo de S. Francisco na própria cidade e em regiões próximas, o relatório preliminar da comissão estadual de inquérito (Lawson, 1906) descreve e conclui o seguinte:

“All of these places [with maximum destruction] are situated on the valley floor and are underlain to a considerable depth by loose (...) formations, and their position strongly suggests that the earth waves as propagated by such formations are much more destructive than the waves which are propagated by the firmer and highly elastic rocks of the adjoining hill lands”.

“The portions of Berkeley and Oakland which are situated on the alluvial slope suffered more than the foothills, where the buildings are founded on rock”.

Relativamente aos efeitos do sismo de Tóquio nas cidades de Tóquio e Yokohama e em regiões próximas, Jagger (1923) constata o seguinte:

“The geology indicates transition from hard andesites at Izu, through indurated Tertiary sediments at Misaki and Boshu, to soft quaternary beds and modern river deltas about Yokohama and Tokyo. The cities were thus on the worst ground, and suffered heavier shaking than the Izu peninsula, although farther away from the seismic centers”.

3.2 – Evidências instrumentais

Embora constituam fortes indícios, as evidências relativas à intensidade macrossísmica não permitem por si só extrair conclusões seguras sobre os efeitos de modificação local das características dos movimentos sísmicos. Com efeito, existe sempre a hipótese de a maior incidência de danos em locais com terrenos superficiais constituídos por solos resultar de outros factores relevantes, tais como as características das edificações (em particular no que concerne às fundações) ou a ocorrência de efeitos induzidos (liquefacção, por exemplo).

Mas o rápido desenvolvimento das redes de registo sismométrico que se tem verificado recentemente a nível mundial (com destaque para a América do Norte, Japão e Sul da Europa) tem permitido obter abundante comprovação instrumental da ocorrência de importantes (e frequentemente dramáticos) efeitos sísmicos locais em terrenos de solo.

É de salientar em especial a inequívoca comprovação instrumental de que, num determinado evento sísmico, e mesmo quando se trata de movimentos sísmicos fortes, a aceleração máxima à superfície de terrenos de solo pode ser consideravelmente superior à que se verifica num afloramento rochoso adjacente ou no substrato rochoso. Na realidade, contrariamente ao que sucedia relativamente aos efeitos de modificação das características de conteúdo de frequências e de duração, a existência de efeitos locais de amplificação da aceleração máxima pelos solos em movimentos sísmicos fortes foi, até há pouco mais de 10 anos, alvo de controvérsia e cepticismo (Correia, 1989, 1993).

Seguidamente são apresentados alguns exemplos de sismos em que foram observados, mediante registos instrumentais, importantes efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos.

a) Sismo de Michoacan, México, 1985

Em 19 de Setembro de 1985 o México foi severamente atingido por um sismo de magnitude 8,1 originado por subducção na fronteira entre as placas Norte-americana e de Cocos (Fig. 1), na zona costeira mexicana do Pacífico.

Apesar de se situar a uma distância da ordem de 300 km da superfície de rotura, foi na populosa cidade do México que ocorreram as maiores devastações: cerca de 10 000 pessoas morreram e 50 000 ficaram feridas; mais de 800 edifícios, incluindo hospitais, escolas e hotéis, sofreram colapso total; e os prejuízos económicos foram superiores a 5000 M€.

Foi precisamente a ocorrência de importantes efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos que provocou tão grandes danos a uma distância tão grande da fonte sísmica. Estes efeitos resultaram do facto de a cidade do México se situar em grande parte sobre uma bacia sedimentar de origem lacustre, constituída por solos brandos de natureza predominantemente argilosa, e cuja espessura chega a atingir mais de 50 m.

Na Fig. 21 estão representados espectros de resposta de aceleração de alguns dos registos instrumentais obtidos na cidade do México durante o sismo em questão, quer em locais onde ocorrem formações sedimentares profundas (SCT e CAO) quer num local em que o substrato rochoso aflora (UNAM). É possível verificar que:

- a aceleração horizontal no afloramento rochoso exhibe um forte conteúdo em baixas frequências (o período predominante é, portanto, excepcionalmente longo), facto que se deve à muito elevada magnitude do sismo e à muita elevada distância epicentral;

- os valores de pico da aceleração horizontal são muito mais elevados (factor de amplificação superior a 2) nos locais com terreno de solo do que no afloramento rochoso, ficando pois patente um acentuado efeito local de amplificação da aceleração horizontal máxima;
- num dos locais com terreno de solo (SCT) o espectro de resposta mostra um acentuado efeito de concentração do conteúdo de frequências, bem como a existência de acelerações espectrais muito elevadas para períodos da ordem de 2 s;
- no outro local com terreno de solo (CAO) o espectro mostra a existência de um importante efeito de alongamento do período predominante.

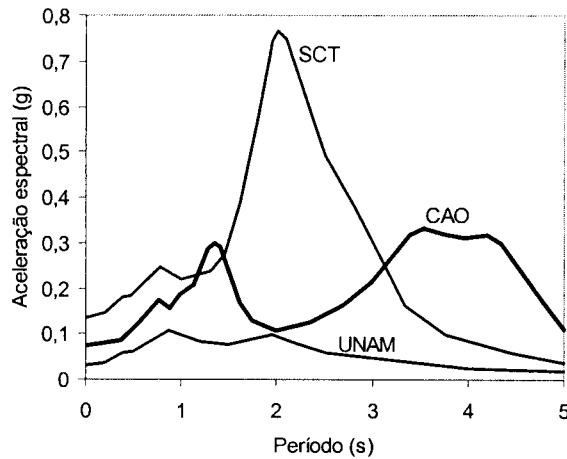


Fig. 21 – Espectros de resposta de aceleração (amortecimento relativo $\xi = 5\%$) dos movimentos sísmicos registados em três locais da cidade do México no sismo de Michoacan, 1985-09-19, México (Seed *et al.*, 1987).

Como resultado dos efeitos locais de amplificação sísmica, e apesar de a aceleração máxima em terreno rochoso ter sido relativamente baixa (inferior a 0,05 g), nos locais com terreno de solo, incluindo todo o centro da cidade, ocorreram inúmeros colapsos de edifícios (Fig. 22), com particular incidência nos que tinham um número de pisos entre 5 e 15.

b) Sismo de Loma Prieta, EUA, 1989

Em 19 de Outubro de 1989 ocorreu na Califórnia, EUA, um sismo de magnitude $M_s = 7,1$ originado por rotura num segmento (situado nas montanhas de Santa Cruz) da famosa falha de S. André, que separa as placas Norte-americana e do Pacífico (Fig. 1). Além de avultados prejuízos materiais (superiores a 7000 M€), este sismo causou 67 mortos e mais de 3700 feridos.

Foram muito elevados os danos causados nas cidades de S. Francisco (Fig. 23) e Oakland, situadas a cerca de 90 km a Norte do epicentro. Este facto ficou a dever-se à ocorrência de importantes efeitos locais de amplificação sísmica e de liquefacção de solos.

Na Fig. 24 estão representados espectros de resposta de aceleração correspondentes a movimentos registados durante o sismo em locais distintos, mas com distâncias epicentrais aproximadamente iguais, na zona da baía de S. Francisco. Num dos locais (Rincon Hill) o substrato rochoso aflora e nos dois restantes (Emeryville e Oakland Harbour) ocorrem forma-

ções constituídas por solos brandos (nos quais se incluem os lodos argilo-siltosos da formação conhecida na região por *bay mud*). Analisando a figura 24 é possível constatar que:

- os valores de pico da aceleração horizontal são muito mais elevados (factor de amplificação superior a 2) nos locais com solos brandos do que no afloramento rochoso, ficando pois patente um acentuado efeito local de amplificação da aceleração horizontal máxima;
- num dos locais com terreno de solo (Oakland Harbour) o espectro de resposta mostra um acentuado efeito de concentração do conteúdo de frequências, bem como a existência de acelerações espectrais muito elevadas (o máximo é superior a 1 g, para um amortecimento relativo de 5 %);



Fig. 22 – Colapso total de um edifício hospitalar na cidade do México no sismo de Michoacan, 1985-09-19, México (Fonte: *John A. Martin and Associates* – <http://www.johnmartin.com>).



Fig. 23 – Colapso de edifício na cidade de S. Francisco no sismo de Loma Prieta, 1989-10-19, EUA (Fonte: *United States Geological Survey* – <http://geopubs.wr.usgs.gov>).

- no outro local com terreno de solo (Emeryville) o espectro mostra a existência de um efeito de alongamento do período predominante.

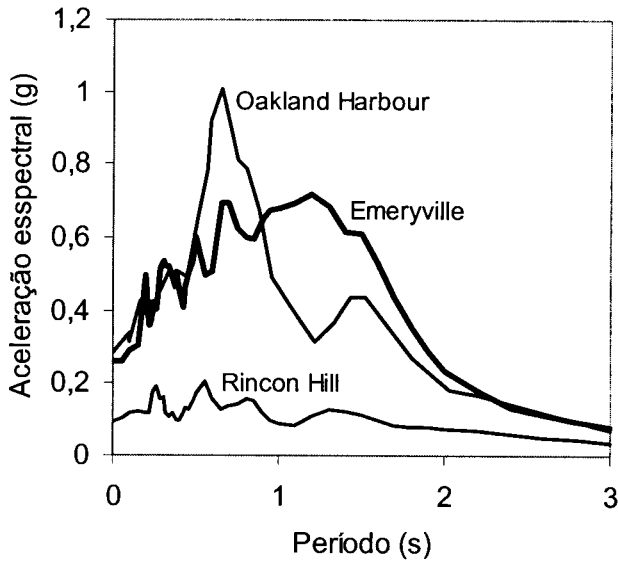


Fig. 24 – Espectros de resposta de aceleração ($\xi = 5\%$) dos movimentos sísmicos registrados em três locais da zona da cidade de S. Francisco durante o sismo de Loma Prieta, 1989-10-19, EUA.

Dados de base provenientes do *United States Geological Survey*, EUA – <http://nsmw.wr.usgs.gov>, do *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, EUA – <http://peer.berkeley.edu> e de Housner *et al.* (1990).

Os efeitos de amplificação da aceleração horizontal máxima contribuíram decisivamente para o desastrosos colapso (numa extensão de cerca de 1,2 km) de um viaduto rodoviário com dois pisos situado perto de Oakland (Fig. 25), que causou só por si a morte de 41 pessoas.

c) Sismo de Kobe (ou de Hyogoken-Nanbu), Japão, 1995

Em 17 de Janeiro de 1995 ocorreu na zona da baía de Osaka, no Sul do Japão, um sismo de magnitude $M_w = 6,9$ que provocou uma enorme devastação (Fig. 26), traduzida em mais de 6000 mortos e em mais de 150 000 M€ de prejuízos materiais. Este sismo, que atingiu principalmente a área urbana da cidade de Kobe, foi o mais destruidor no Japão depois daquele que em 1923 devastou as cidades de Tóquio e Yokohama.

O sismo foi provocado por roturas num segmento, com cerca de 40 km de extensão, de uma falha transcorrente subvertical. Para a grande destruição causada muito contribuiu o facto de a superfície de rotura se situar, em parte, por baixo da cidade de Kobe. Adicionalmente, verificou-se a existência de importantes efeitos locais de amplificação devidos à ocorrência de terrenos brandos (aterros e depósitos aluvionares holocénicos) na parte baixa da cidade, junto à baía de Osaka, bem como, também, a existência de fenómenos de liquefacção de solos em grandes áreas, igualmente na parte baixa da cidade, com destaque para os que se verificaram em aterros construídos recentemente para expansão urbanística e para infraestruturas portuárias.



Fig. 25 – Colapso de viaduto rodoviário perto de Oakland no sismo de Loma Prieta, 1989-10-19, EUA (Fonte: *United States Geological Survey*, EUA – <http://geopubs.wr.usgs.gov>).



Fig. 26 – Colapso de edifício na cidade de Kobe no sismo de Kobe, 1995-01-17, Japão (Fonte: *National Geophysical Data Center*, EUA – <http://www.ngdc.noaa.gov>).

Para além da comparação entre registos sísmométricos obtidos em estações superficiais distintas situadas em afloramentos rochosos e em solos brandos, a existência de efeitos importantes de amplificação da aceleração horizontal máxima durante o sismo de Kobe ficou também comprovada instrumentalmente mediante comparação entre registos obtidos num mesmo furo a diferentes profundidades. Na Fig. 27 é apresentado um exemplo deste segundo tipo de evidências, correspondente aos resultados obtidos (aceleração horizontal máxima segundo duas direcções ortogonais) em dois furos (KNK a 65 km e TKS a 35 km da zona de rotura) com cerca de 100 m de profundidade localizados em sítios onde o terreno é constituído por solos brandos até uma profundidade de várias dezenas de metros (Kokusho e Matsumoto, 1997).

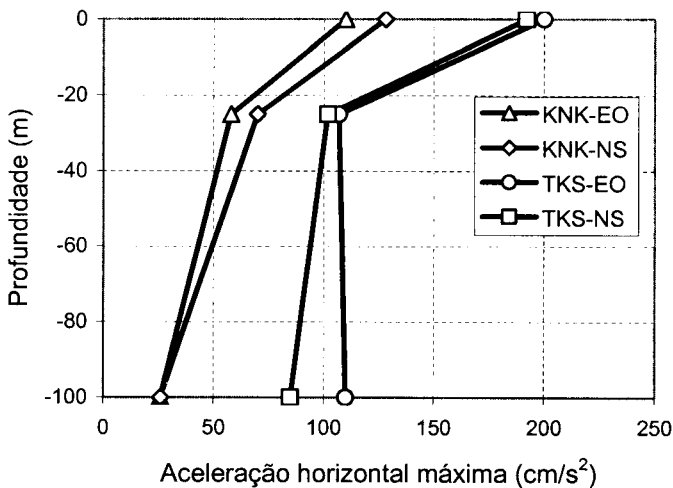


Fig. 27 – Variação com a profundidade da aceleração horizontal máxima registada em dois furos na zona da cidade de Kobe durante o sismo de Kobe, 1995-01-17, Japão (Kokusho e Matsumoto, 1997).

Conforme se pode verificar, em ambos os furos e em ambas as direcções de medida a aceleração máxima é muito mais elevada à superfície do que no acelerómetro mais profundo. O factor de amplificação está compreendido entre 2 e 5, aproximadamente.

d) Sismo de Kocaeli, Turquia, 1999

Em 17 de Agosto de 1999 a região do Noroeste da Turquia situada entre as cidades de Duzce e Istanbul foi severamente atingida por um sismo de magnitude $M_w = 7,4$ originado por roturas em segmentos, com cerca de 126 km de extensão total, da grande falha transcorrente do Norte da Anatólia. Foi um dos sismos mais destruidores de sempre naquele país, tendo perecido mais de 17 000 pessoas e ficado feridas cerca de 44 000. Um número muito grande de edifícios residenciais sofreram colapso total ou ficaram totalmente irrecuperáveis, ascendendo os prejuízos materiais a um montante da ordem de 40 000 ME (Youd *et al.*, 2000).

Também este sismo forneceu amplas evidências instrumentais da existência de efeitos locais de amplificação pelos solos. Na Fig. 28 estão representados espectros de resposta de aceleração horizontal em três estações de registo situadas do lado europeu da área urbana de Istanbul, a uma distância compreendida entre 62 e 79 km da superfície de rotura. Em duas

delas (FAT e ATS) o terreno é constituído por solos brandos, e na terceira (YKP) o terreno é rochoso.

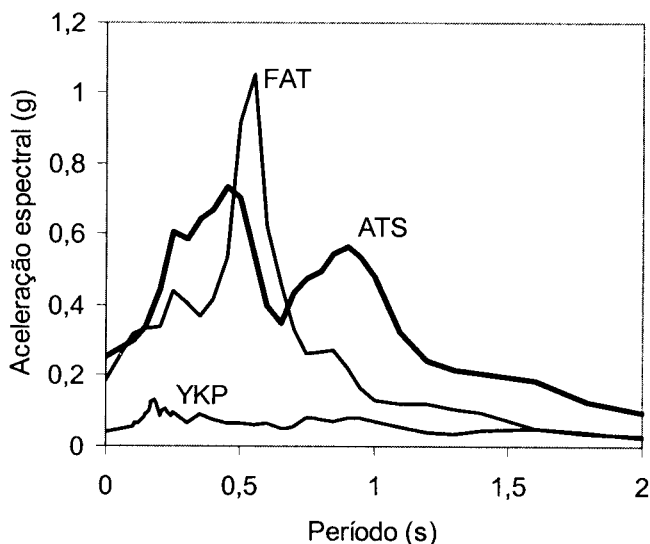


Fig. 28 – Espectros de resposta de aceleração ($\xi = 5\%$) dos movimentos sísmicos registados em três locais na área de Istambul durante o sismo de Kocaeli, 1999-08-17, Turquia. Os espectros foram calculados com base em histórias de aceleração obtidas da Universidade do Bósforo, Turquia – <http://www.koeri.boun.edu.tr>.

Analisando a referida figura é possível constatar, em ambas as estações onde ocorrem solos, um acentuado efeito de amplificação da aceleração máxima (com factores de amplificação, em relação à estação em afloramento rochoso, superiores a 3). Em relação à estação FAT é ainda possível observar um claro efeito de concentração do conteúdo de frequências, responsável por um acentuado pico de aceleração espectral (superior a 1 g, para um amortecimento relativo de 5%).

Os efeitos de amplificação mencionados muito contribuíram certamente para a especial concentração de danos muito severos em edifícios verificada na área urbana de Avcilar (arredores ocidentais de Istambul), onde se situa a estação ATS (Fig. 29).

Como síntese das evidências instrumentais referidas, respeitantes aos grandes sismos de Michoacan, Loma Prieta, Kobe e Kocaeli, é possível concluir que em sítios onde ocorrem solos brandos foram observados importantes efeitos de amplificação da aceleração horizontal máxima, de alongamento do período predominante e de concentração do conteúdo de frequências.

No que diz respeito especificamente à aceleração horizontal máxima, as gamas de variação correspondentes aos registos obtidos em terreno rochoso e em solos brandos para cada um dos quatro sismos referidos estão representadas graficamente na Fig. 30. Esta figura actualiza, com a incorporação de registos relativos aos sismos de Kobe e de Kocaeli, aquela que tinha sido apresentada por Idriss (1990, 1991) apenas com registos dos sismos de Michoacan e de Loma Prieta.

Na Fig. 30 está também representada a relação média proposta por Idriss (1990) para sismos de magnitude 7, com base nos registos obtidos nos sismos de Michoacan e de Loma

Prieta (e também, para acelerações em terreno rochoso elevadas, com base em estudos de modelação matemática), bem como a relação média que resulta do estudo efectuado por Seed *et al.* (1976a) com base em registos relativos a sismos nos EUA com magnitude da ordem de 6,5. Esta última relação, que havia servido de apoio a uma convicção generalizada de que os solos brandos não amplificariam a aceleração máxima se esta grandeza em terreno rochoso fosse superior a um limiar relativamente modesto (cerca de 0,1 g), foi posta em causa precisamente pelos resultados dos referidos sismos de Michoacan e, principalmente, de Loma Prieta.



Fig. 29 – Colapso de edifício em Avclar no sismo de Kocaeli, 1999-08-17, Turquia
(Fonte: Universidade do Bósforo, Turquia – <http://www.koeri.boun.edu.tr>).

Analisando a Fig. 30 é possível verificar que os resultados relativos ao sismo de Kobe ($M_w = 6,9$) são perfeitamente compatíveis com a relação média proposta por Idriss (1990), e que os resultados relativos ao sismo de Kocaeli ($M_w = 7,4$) se situam acima dessa mesma relação (ou seja, a amplificação da aceleração máxima pelos solos é ainda superior).

3.3 – Modelo interpretativo

Como se viu, são perfeitamente inequívocas as evidências macrossísmicas e instrumentais da existência de importantes efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos. Tais efeitos, que estão na origem da frequentemente observada existência de danos e prejuízos particularmente severos em sítios onde ocorrem terrenos de solo (em comparação com o que sucede em terrenos rochosos), não têm contudo sempre a mesma expressão, quer em termos quantitativos quer em termos qualitativos. É pois importante discutir as condições em que os referidos efeitos de amplificação se manifestam e são mais gravesos.

Tendo em vista a discussão genérica dos efeitos de modificação, pelos solos, da amplitude e do conteúdo de frequências dos movimentos sísmicos, é possível e muito útil recorrer, como quadro geral de referência, a um modelo simplificado baseado na propagação vertical de ondas de corte através de estratos horizontais de solos considerados como materiais com comportamento elástico-linear e amortecimento material de tipo viscoso.

É bem sabido que as simplificações associadas a este modelo (com destaque para a não consideração de efeitos multidimensionais decorrentes da geometria do fundo dos vales aluvionares) estão longe de permitir uma discussão completa da matéria em questão. Mas é um facto que o modelo, embora muito simples, permite interpretar adequadamente (até mesmo em termos quantitativos, como se exemplificará mais à frente) os aspectos mais relevantes dos efeitos

de modificação da amplitude e do conteúdo de frequências dos movimentos sísmicos que têm sido observados em sismos.

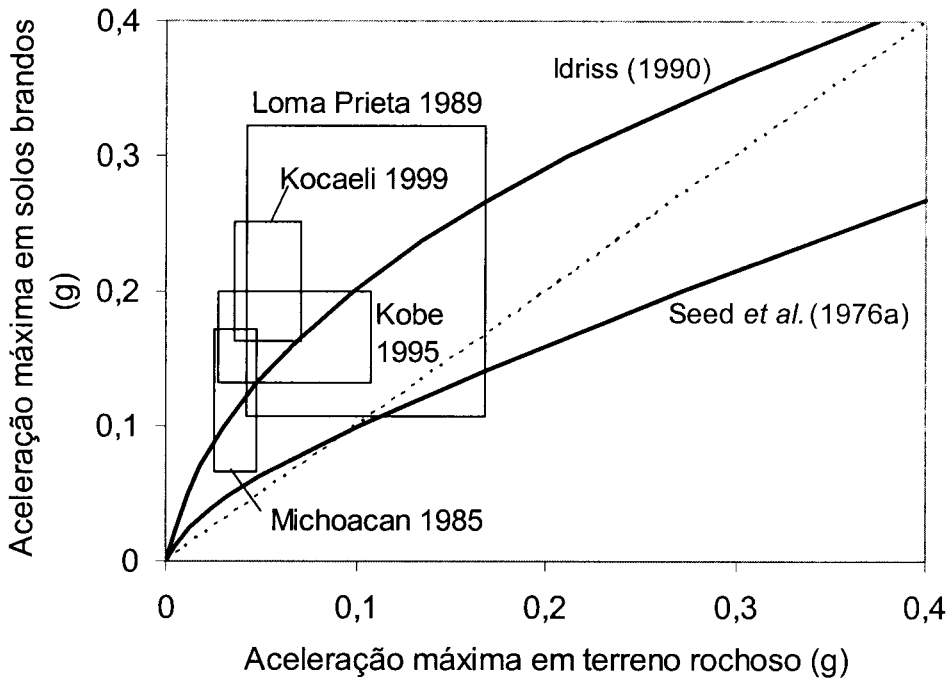


Fig. 30 – Evidências instrumentais do efeito de amplificação da aceleração horizontal máxima nos sismos de Michoacan, Loma Prieta, Kobe e Kocaeli.

A hipótese simplificativa de os deslocamentos sísmicos horizontais resultarem da propagação vertical de ondas de corte encontra justificação no facto de, devido ao forte contraste entre os valores da velocidade de propagação das ondas deste tipo em terreno rochoso (substrato) e em solos brandos, as refrações das ondas incidentes em estratos sub-horizontais de solo conduzirem, numa pequena distância, à “verticalização” da propagação dessas mesmas ondas.

Quanto à hipótese relativa ao comportamento reológico, é bem sabido que o comportamento típico dos solos em deformação cíclica se caracteriza por ciclos histeréticos, não se verificando portanto uma relação linear entre tensão tangencial e deformação distorcional. No entanto, desde que não seja ultrapassado um certo limiar dessa deformação, constitui geralmente aproximação satisfatória o chamado modelo linear-equivalente, no qual se admite que o comportamento é linear mas com parâmetros (módulo de distorção secante e amortecimento relativo equivalente) dependentes da amplitude máxima da deformação (Fig. 31).

Admitindo o modelo atrás referido, baseado na propagação vertical de ondas de corte através de um substrato semi-infinito e de um conjunto de estratos horizontais sobrejacentes de materiais com comportamento linear-equivalente, considere-se uma qualquer situação concreta definida pela massa volúmica, módulo de distorção e amortecimento relativo do substrato e dos estratos, bem como ainda pela espessura dos estratos. Recorrendo à solução analítica geral, em meio homogêneo, da equação que governa o fenómeno, é possível determinar a função de

transferência que corresponde à situação considerada, ou seja, a função (complexa) que, para cada valor da frequência de uma onda elementar incidente, relaciona o movimento (harmônico) à superfície do conjunto de estratos com o movimento (também harmônico) à superfície de um semi-espaco com as características do substrato sujeito à incidência da mesma onda elementar (Roesset, 1975). O módulo da função de transferência é igual ao quociente entre as amplitudes daqueles movimentos.

Na Fig. 32 está representado, para vários valores do amortecimento relativo, o módulo da função de transferência correspondente a uma situação em que existe um único estrato de solo sobre o substrato. As características consideradas são: estrato de solo com 20 m de espessura; solo com velocidade de propagação das ondas de corte (para amortecimento nulo) de 200 m/s e peso volúmico de 19 kN/m³; substrato com velocidade das ondas de corte de 1000 m/s, peso volúmico de 22 kN/m³ e amortecimento nulo.

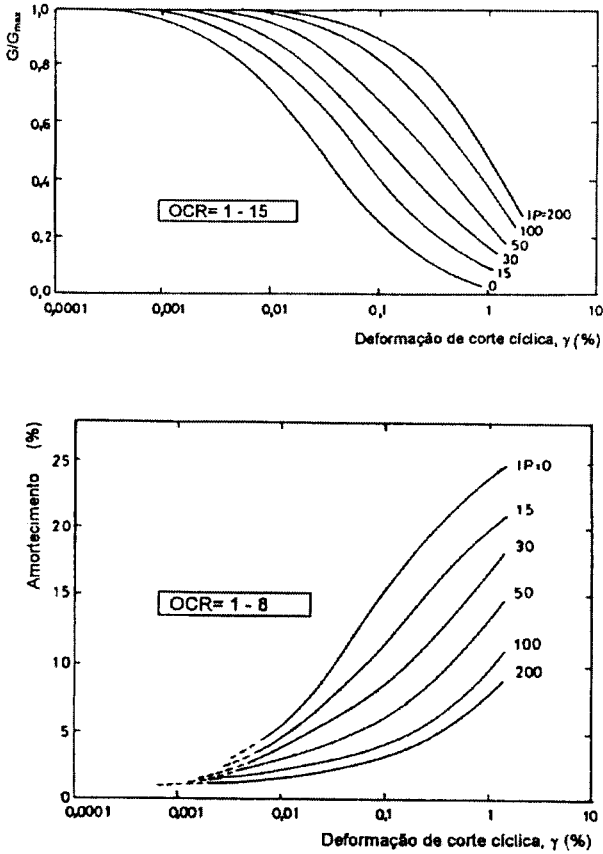


Fig. 31 – Variação do módulo de distorção e do amortecimento relativo de solos com a amplitude da deformação distorcional cíclica (Vucetic e Dobry, 1991).

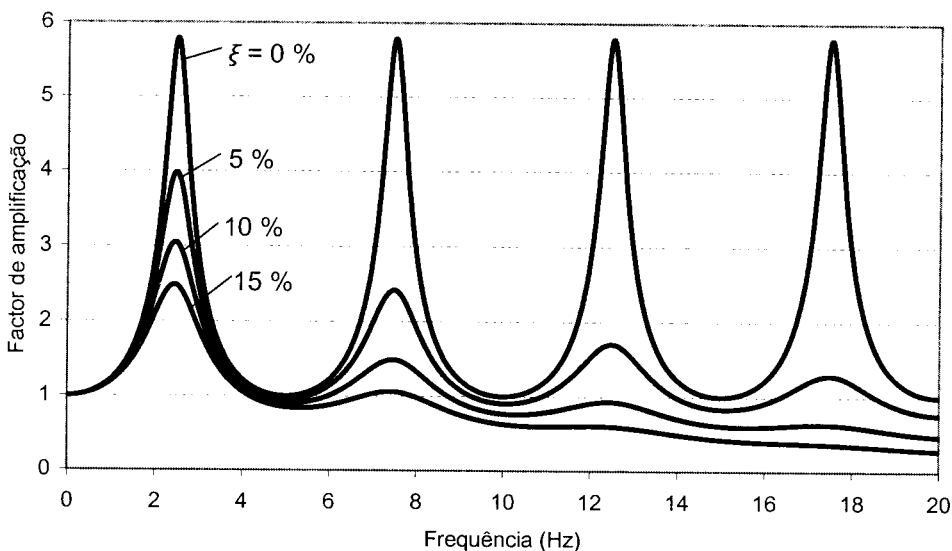


Fig. 32 – Módulo da função de transferência de um estrato de solo homogêneo sobre substrato elástico para diferentes valores do amortecimento relativo.

Embora corresponda a uma situação muito simples, a referida figura exemplifica as características gerais das funções de transferência de colunas de solo que importa agora salientar:

- os estratos de solo provocam amplificação das ondas elementares nalgumas gamas de frequência e atenuação noutras;
- a amplificação das ondas elementares pode ser muito elevada para valores moderados do amortecimento relativo;
- existem máximos locais de amplificação, correspondentes a frequências próprias do sistema;
- para valores não nulos do amortecimento relativo dos solos o maior dos máximos corresponde à frequência mais baixa, ou frequência fundamental;
- mesmo que o amortecimento dos solos seja nulo (o que só é concebível teoricamente) a amplificação máxima é finita desde que o substrato não seja infinitamente rígido, ou seja, existe um amortecimento de tipo geométrico que é tanto maior quanto menor for o contraste de impedância (definida como o produto da velocidade de propagação das ondas de corte pela massa volúmica) entre os solos e o substrato;
- qualquer que seja a frequência, o aumento do amortecimento dos solos provoca uma redução do módulo da função de transferência (resultando portanto, em particular, valores mais baixos dos máximos locais de amplificação e de atenuação).

É evidente que os movimentos sísmicos reais não coincidem com ondas sinusoidais elementares. No entanto, admitindo a validade da hipótese de comportamento linear, que implica a validade do princípio da sobreposição de efeitos, a resposta sísmica à superfície de um sítio onde ocorrem solos pode ser obtida no domínio da frequência, através de um procedimento que pode ser resumido do seguinte modo:

- decomposição harmónica (isto é, determinação da transformada de Fourier, TF) do movimento sísmico, $a_s(t)$, num afloramento rochoso;

- determinação da transformada de Fourier do movimento, $a_s(t)$, à superfície do sítio com solos, efectuando o produto da transformada de Fourier do movimento num afloramento pela função de transferência, FT (que se supõe ter sido já obtida);
- determinação do movimento no sítio com solos, mediante aplicação da transformada inversa de Fourier (TF^{-1}).

Ou seja: $a_s(t) = TF^{-1}\{TF[a_r(t)] \cdot FT(\omega)\}$, onde t designa o tempo e ω a frequência angular.

3.4 – Discussão

O modelo interpretativo genérico apresentado permite concluir imediatamente que a ocorrência de estratos de solos, ao amplificar (ou atenuar) selectivamente as ondas elementares em função da sua frequência, é susceptível de provocar modificações muito importantes do conteúdo de frequências dos movimentos sísmicos em afloramentos rochosos próximos. Essas modificações traduzem-se, designadamente, num enriquecimento nas gamas de frequências centradas nas frequências próprias mais baixas do dispositivo estratigráfico (com destaque para a frequência fundamental).

É igualmente possível concluir que, tanto no que respeita à modificação do conteúdo de frequências como no que respeita à modificação da amplitude, a grandeza (e portanto o potencial de acréscimo de danos) dos efeitos de amplificação pelos solos depende não só da disposição geométrica e das características reológicas e mássicas dos estratos e do substrato mas também da amplitude e do conteúdo de frequências do movimento no afloramento do substrato.

Tendo em vista a discussão subsequente desta questão, assume especial relevância o cotejo entre os dois seguintes parâmetros:

- o período fundamental do dispositivo estratigráfico (T_n , igual ao inverso da frequência fundamental), que depende não só da disposição geométrica e das características reológicas e mássicas dos estratos mas também da amplitude do movimento no afloramento (na medida em que esta influencia o módulo de distorção secante dos solos);
- o período predominante (T_p) dos movimentos sísmicos (aceleração) em terreno rochoso, que, conforme já foi atrás referido, depende essencialmente da magnitude do sismo e da distância do sítio à superfície de rotura.

A maior ou menor proximidade entre T_n e T_p pode esquematicamente ser tipificada com os três casos que seguidamente se indicam. Para cada um deles são apresentadas as características gerais dos efeitos esperados de amplificação pelos solos, admitindo que o conteúdo de frequências da aceleração em terreno rochoso tem uma forma de distribuição que se enquadra nos moldes habitualmente observados em sismos reais.

a) T_n claramente superior a T_p

Este é o caso mais comum. Ocorre por exemplo num sítio com grande espessura de solos brandos (T_n elevado) quando nem a magnitude nem a distância epicentral do sismo são elevadas (T_p moderado ou baixo); ou, também, quando T_n é moderado e T_p baixo.

As vibrações elementares com frequências baixas são amplificadas, pelo que o movimento sísmico à superfície apresenta um conteúdo acrescido dessas frequências. Em consequência, o período predominante é geralmente modificado no sentido do alongamento, efeito que desde há muito tem sido identificado em estudos estatísticos comparativos de espectros de resposta de aceleração em terrenos rochosos e em terrenos de solo (Seed *et al.*, 1976b) (Fig. 33). Em geral há lugar também a uma desconcentração do conteúdo de frequências, traduzido, em termos de espectro de resposta de aceleração, por um aumento da largura do patamar de ordenadas

espectrais máximas, conforme se tem igualmente observado nos mencionados estudos estatísticos.

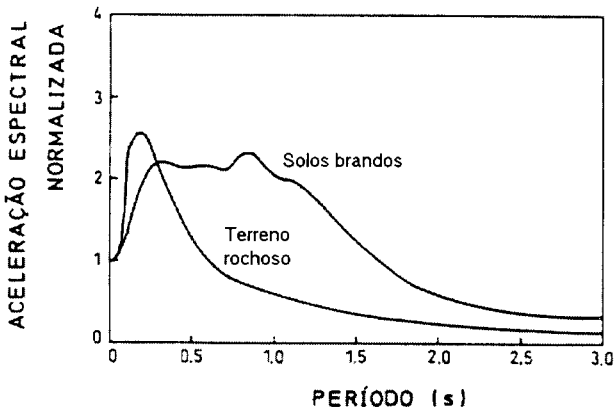


Fig. 33 – Efeitos de alongamento do período predominante e de desconcentração do conteúdo de frequências em locais com solos brandos (Seed *et al.*, 1976b).

A aceleração horizontal máxima tanto pode ser amplificada como atenuada. A amplificação será tanto maior quanto menores forem o afastamento entre T_n e T_p , o amortecimento interno dos solos e a aceleração máxima em terreno rochoso (recorde-se que o amortecimento dos solos aumenta com a amplitude da deformação distorcional) e quanto maior for o contraste de impedância entre os solos e o substrato.

Os espectros de resposta de aceleração registados em CAO no sismo de Michoacan (Fig. 21), em Emeryville no sismo de Loma Prieta (Fig. 24) e em ATS no sismo de Kocaeli (Fig. 28) ilustram este caso.

b) T_n aproximadamente igual a T_p

Neste caso as vibrações elementares com frequências dentro da gama na qual a aceleração em terreno rochoso tem já um conteúdo elevado são ainda amplificadas pelos solos, pelo que os efeitos locais de amplificação se caracterizam por:

- forte concentração do conteúdo de frequências, traduzido, em termos de espectro de resposta de aceleração, por um estreitamento do patamar de ordenadas espectrais máximas e por uma elevada amplificação espectral;
- amplificação da aceleração máxima, dado que a contribuição, para este efeito, da amplificação na gama de frequências correspondente a T_p é, de um modo geral, largamente superior à eventual contribuição, em sentido contrário, de uma atenuação das vibrações elementares em gamas de frequências mais elevadas; também neste caso a amplificação da aceleração máxima será tanto maior quanto menores forem o amortecimento interno dos solos e a aceleração máxima em terreno rochoso e quanto maior for o contraste de impedância entre os solos e o substrato.

Contrariamente ao que sucede no caso anterior, neste caso não há lugar a um alongamento de período predominante.

Os espectros de resposta de aceleração registados em SCT no sismo de Michoacan (Fig. 21) e em Oakland Harbour no sismo de Loma Prieta (figura 24) constituem claramente exemplos deste caso. Pela sua forma, é muito provável que o espectro registado em FAT no sismo

de Kocaeli (Fig. 28) também se insira neste caso, apesar de não parecer existir proximidade entre o período predominante da aceleração em YKP e o período para o qual se verifica grande amplificação espectral em FAT (é de referir que estes dois locais de registo se encontram afastados entre si mais de 30 km).

c) T_n claramente inferior a T_p

Este é o caso menos interessante em termos de efeitos locais de amplificação pelos solos. Ocorre por exemplo num sítio com pequena espessura de solos rijos (T_n baixo) quando T_p é moderado ou alto.

As vibrações elementares são amplificadas em praticamente todo o espectro de frequências com interesse em engenharia sísmica, mas a amplificação é relativamente baixa na gama de frequências em que a aceleração em terreno rochoso tem maior conteúdo.

Em geral há lugar a uma desconcentração do conteúdo de frequências e a uma manutenção ou mesmo redução do período predominante. A aceleração máxima é amplificada, embora geralmente pouco.

3.5 – Modelação matemática

Embora exista também a via alternativa da modelação física (designadamente com recurso a centrifugadora geotécnica), a previsão e a interpretação quantitativas dos efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos são geralmente efectuadas por meio de modelação matemática, que consiste na análise dinâmica dos terrenos mais próximos da superfície perante uma excitação sísmica no substrato assumida (estudos de previsão) ou conhecida (estudos de interpretação).

Inúmeros tipos de modelos têm sido propostos e utilizados, distintos entre si no que diz respeito a diversos aspectos tais como a geometria do meio (modelos unidimensionais ou multidimensionais) e o comportamento reológico dos solos (desde a simples visco-elasticidade até aos mais complexos modelos de comportamento cíclico não-linear). Quanto aos métodos de resolução, é possível recorrer a análises quer no domínio da frequência (quando os modelos são lineares ou linearizados) quer no domínio do tempo (incluindo o método geral de integração passo-a-passo).

Devido ao seu bom desempenho, simplicidade e economia, o modelo unidimensional de propagação que foi atrás apresentado a propósito do modelo interpretativo é o mais utilizado para efectuar a modelação matemática dos efeitos locais de amplificação pelos solos. Quando a deformação cíclica máxima não ultrapassa determinados limiares esse modelo é geralmente conjugado com o modelo reológico (já atrás referido) baseado na hipótese de comportamento linear-equivalente.

O método de resolução no domínio da frequência dos modelos de tipo unidimensional linear-equivalente depende da forma como a acção sísmica é especificada: se for por meio de uma história de aceleração no afloramento rochoso, é necessário utilizar as transformadas directa e inversa de Fourier; se for por meio de um espectro de densidade de potência é necessário recorrer a uma análise estocástica da resposta (Vieira e Correia, 1995). Em qualquer caso, é sempre necessário determinar as funções de transferência relativas quer à deformação distorcional nos estratos de solo (por forma a permitir uma correcção iterativa do módulo de distorção e do amortecimento relativo) quer à aceleração à superfície.

Têm sido efectuados numerosos estudos de modelação matemática com fins de interpretação relativos a eventos sísmicos reais para os quais estão disponíveis registos instrumentais. Os resultados obtidos mostram que mesmo com modelos simplificados de tipo unidimensional

linear-equivalente é de um modo geral possível reproduzir satisfatoriamente os movimentos medidos em solos, tanto em termos qualitativos como quantitativos.

Para exemplificar, refere-se seguidamente uma situação referente ao sismo de Loma Prieta. Na Fig. 34 estão representados espectros de resposta de aceleração dos movimentos registados à superfície em duas ilhas próximas, ambas situadas na baía de S. Francisco: a ilha Treasure, na qual existem solos brandos até uma profundidade elevada, e a ilha Yerba Buena, que constitui um afloramento rochoso. Conforme se pode verificar, ocorreu na primeira das referidas ilhas um significativo efeito de amplificação da aceleração horizontal máxima.

As análises sísmicas efectuadas (Vieira e Correia, 1997), com recurso a um modelo unidimensional linear-equivalente e a um método de análise estocástica, permitiram obter o espectro de resposta de aceleração à superfície da ilha Treasure (Fig. 34) a partir do espectro correspondente aos movimentos registados na ilha Yerba Buena e das características geométricas e mecânicas dos estratos de terreno que ocorrem no primeiro desses locais. Comparando o espectro de resposta calculado com o espectro correspondente aos movimentos registados é possível verificar que existe uma concordância satisfatória. Estão contudo patentes pequenos desfazamentos dos períodos para os quais ocorrem os máximos locais da aceleração espectral, que possivelmente se devem ao facto de terem ocorrido fenómenos de liquefacção (com a consequente alteração, não considerada na modelação, das características de comportamento reológico dos solos) ou à influência da inclinação do substrato (que é significativa no local e que o modelo unidimensional utilizado não pode ter em consideração).

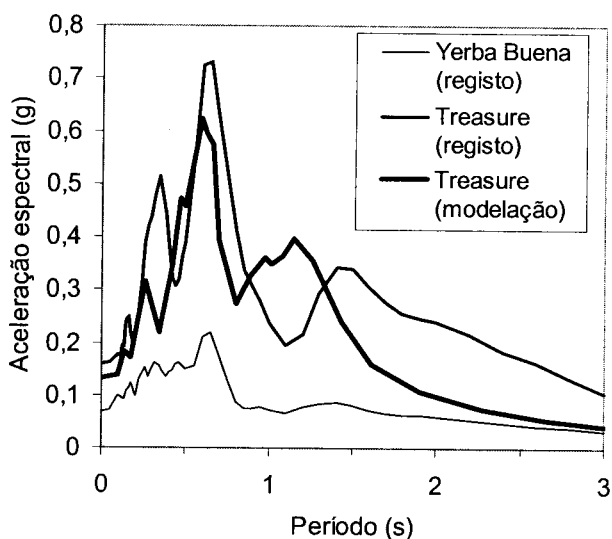


Fig. 34 – Espectros de resposta de aceleração ($\xi = 5\%$) dos movimentos sísmicos registados durante o sismo de Loma Prieta nas ilhas Yerba Buena (afloramento rochoso) e Treasure (solos) e dos movimentos na ilha Treasure obtidos por modelação matemática.

3.6 – Regulamentação

Como não podia deixar de ser, os regulamentos e normas nacionais e internacionais relativos às acções sísmicas têm desde há muito tido em consideração a influência das condições geotécnicas locais. No entanto, a informação obtida instrumentalmente em grandes sismos re-

centes (e de algum modo também a evolução dos modelos e métodos de análise) tem causado uma importante evolução qualitativa e quantitativa da forma como esses efeitos se reflectem nas disposições regulamentares e normativas.

a) Aceleração horizontal máxima

É sem dúvida no que diz respeito ao efeito de amplificação pelos solos da aceleração horizontal máxima que se têm verificado evoluções mais significativas.

Foi já atrás referido que os registos instrumentais recolhidos nos sismos de Michoacan (em 1985) e de Loma Prieta (em 1989) alteraram profundamente o estado dos conhecimentos sobre o efeito em questão. Assim, a relação média entre as acelerações máximas em terreno de solo e em terreno rochoso até então generalizadamente adoptada (e que se resultava designadamente do estudo de Seed *et al.* (1976a), no qual a base de dados não continha sismos com magnitude superior a 6,5) foi objecto de uma proposta de actualização devida a Idriss (1990), aplicável a sismos de magnitude mais elevada.

Também já foi atrás mostrado que os registos obtidos em grandes sismos posteriores (designadamente no de Kobe, em 1995, e no de Kocaeli, em 1999) se revelam compatíveis com a mencionada proposta de actualização.

As duas relações médias referidas, já apresentadas na Fig. 30 sob a forma de aceleração em solo em função da aceleração em rocha, estão representadas novamente na Fig. 35, mas agora na forma de factor de amplificação (quociente entre aceleração em solo e aceleração em rocha) em função da aceleração em rocha. Pode ser observado em qualquer das formas de representação que na relação proposta por Seed *et al.* (1976a) só existe amplificação para aceleração máxima em rocha até cerca de 0,1 g, enquanto que na relação mais recente esse limiar é aumentado até cerca de 0,4 g. Ou, noutra perspectiva, que para um valor da aceleração máxima em rocha de 0,1 g a aceleração máxima em solo praticamente duplica quando se utiliza a relação mais recente em lugar da mais antiga.

Tendo como referência as duas relações médias mencionadas, passar-se-á seguidamente em revista a evolução que tem havido na consideração, em regulamentos e normas, do efeito local de amplificação da aceleração horizontal máxima pelos solos.

Conforme se pode ver na Fig. 35, quer no regulamento português de segurança e acções – RSA (CSOPT, 1983) (valores prescritos) quer na versão de 1988 do Eurocódigo 8 – EC8 (CEC, 1988) (valores recomendados) o factor de amplificação da aceleração horizontal máxima (quociente entre os valor desse parâmetro em solo do tipo mais brando e em rocha), considerado independente do nível de aceleração em rocha, não se afasta substancialmente da relação (Seed *et al.*, 1976a) então vigente.

É de salientar contudo que tanto no RSA como no EC8 de 1988 o factor de amplificação nunca é superior à unidade (constituindo pois, mais propriamente, um factor de atenuação). Ou seja, em circunstância alguma é prescrito ou recomendado um aumento da aceleração máxima em solo brando, em relação à aceleração máxima em terreno rochoso. Em particular, no RSA, para a acção de tipo 1 e para o terreno de tipo III, o factor de amplificação (cerca de 0,71) é significativamente menor do que a unidade, mesmo para valores muito baixos da aceleração máxima em rocha.

Apesar de datar de 1994, o EC8 na versão de pré-norma europeia (CEN, 1994) continuou a recomendar um valor do factor de amplificação (0,9) que é inferior à unidade para qualquer nível de aceleração em rocha, não reflectindo portanto adequadamente a muito relevante evolução do estado dos conhecimentos que já então ocorrera.

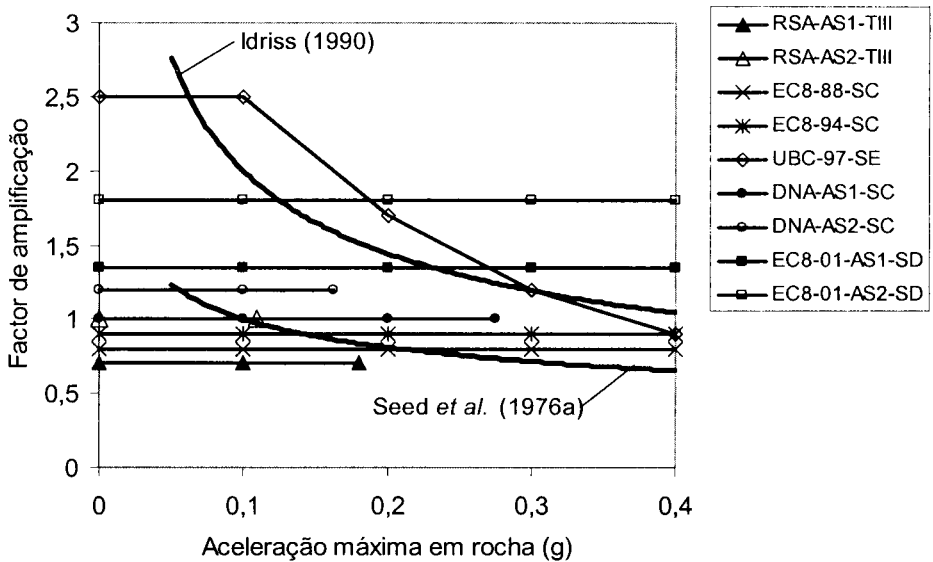


Fig. 35 – Efeito de amplificação da aceleração horizontal máxima em regulamentos e normas.

Pelo contrário, na nova geração de documentos regulamentares e normativos dos EUA relativos à resistência sísmica de estruturas (Dobry *et al.*, 2000), e em particular no *Unified Building Code* – UBC (ICBO, 1997), é já seguida, aproximadamente, a relação proposta por Idriss (1990), incluindo a dependência funcional entre o factor de amplificação da aceleração e o nível de aceleração em terreno rochoso. Como consequência, e conforme se pode verificar na Fig. 35, os valores do factor de amplificação são no UBC muito superiores aos preconizados no EC8 de 1994, principalmente para valores relativamente baixos da aceleração em rocha (por exemplo, para um valor deste parâmetro de 0,1 g o factor de amplificação é de 2,5 no UBC e de apenas 0,9 no EC8 de 1994).

No documento nacional de aplicação – DNA da norma que constitui a versão portuguesa da pré-norma europeia relativa ao EC8 (IPQ, 2000) deixaram de existir valores do factor de amplificação da aceleração máxima inferiores à unidade. No entanto, conforme se pode observar na figura 35, o valor máximo desse factor é apenas 1,2 (para a acção sísmica de tipo 2 e subsolo de classe C).

Finalmente, na terceira versão preliminar da futura norma europeia relativa ao EC8 (CEN, 2001) os valores recomendados para o factor de amplificação da aceleração horizontal máxima consubstanciam já uma evolução quantitativa importante, comparativamente com a pré-norma e com o DNA. De facto, os valores recomendados naquele documento normativo para subsolo de classe D (solos brandos profundos) são 1,8 para a acção sísmica de tipo 2 e 1,35 para a acção de tipo 1, independentemente do nível de aceleração em terreno rochoso. Conforme se pode observar na figura 35, estes valores são significativamente menores do que os do UBC para níveis baixos a moderados da aceleração em terreno rochoso, invertendo-se a relação para níveis elevados deste parâmetro.

b) Conteúdo de frequências

Contrariamente ao que sucede com a amplificação da aceleração máxima, no que diz respeito aos efeitos de modificação do conteúdo de frequências pode-se dizer que não tem existido evolução significativa nos regulamentos e normas respeitantes à definição da acção sísmica.

Na realidade, desde a divulgação dos resultados dos estudos (já atrás mencionados) de processamento estatístico de espectros de resposta referentes a sismos ocorridos nos EUA (Seed *et al.*, 1976b), ficou amplamente evidenciado, através de registos instrumentais, que em locais com depósitos profundos de solos é muito frequente a ocorrência de efeitos de alongamento do período predominante e de desconcentração do conteúdo de frequências. Tais evidências continuam a estar reflectidas, com pequenas variações quantitativas, nas disposições normativas e regulamentares sobre acções sísmicas.

No RSA (CSOPT, 1983) os referidos efeitos locais são já tidos em consideração tanto para a acção sísmica de tipo 1 (sismos próximos) como para a acção sísmica de tipo 2 (sismos longínquos). Também nas sucessivas versões do Eurocódigo 8, desde a de 1988 (CEC, 1988) até à terceira versão preliminar da norma definitiva (CEN, 2001), passando pela pré-norma europeia (CEN, 1994) e pelo documento nacional de aplicação da correspondente norma portuguesa (IPQ, 2000), os efeitos de modificação do conteúdo de frequências são tidos em consideração, embora com expressão quantitativa nem sempre idêntica. Como exemplo, são apresentados na Fig. 36, sob forma normalizada (em relação à aceleração horizontal máxima), os espectros de resposta elásticos de aceleração que definem a acção sísmica no eurocódigo 8 (pré-norma europeia) nos casos de subsolo de classe A (rocha ou solos rijos) e de classe C (solos brandos profundos) (CEN, 1994).

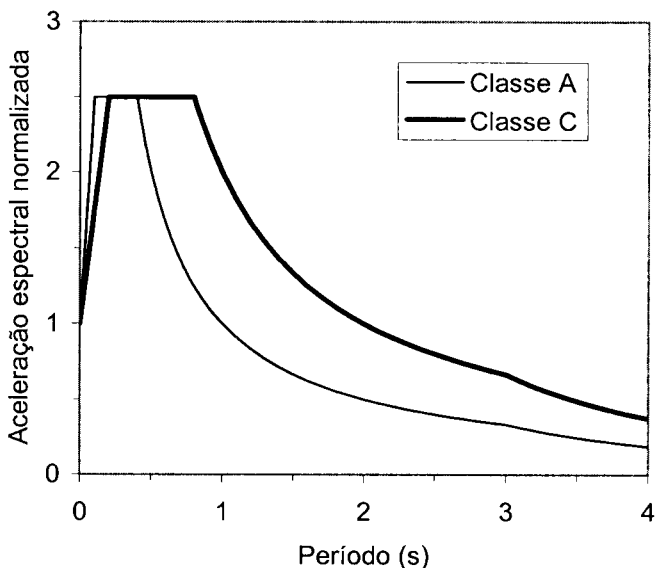


Fig. 36 – Consideração no eurocódigo 8 (pré-norma europeia) dos efeitos de alongamento do período predominante e de desconcentração do conteúdo de frequências em locais com solos profundos

4 – CONCLUSÃO

Conforme ficou patente ao longo do presente trabalho, está hoje amplamente evidenciada e razoavelmente compreendida a profunda influência que as condições geotécnicas locais têm na amplitude, no conteúdo de frequências e na duração dos movimentos sísmicos fortes, e consequentemente nos efeitos destruidores dos sismos.

Essa influência, que depende conjuntamente das características geométricas e mecânicas dos terrenos e das características (designadamente amplitude e conteúdo de frequências) dos movimentos sísmicos no substrato rochoso, traduz-se, na maior parte das situações em que ocorrem depósitos profundos de solos brandos, em efeitos locais de amplificação da aceleração horizontal máxima, de alongamento do período predominante e de desconcentração do conteúdo de frequências. Mas em certas situações, designadamente quando o período predominante da aceleração no substrato é próximo do período fundamental dos depósitos de solo, pode verificar-se uma acentuada concentração do conteúdo de frequências, acompanhada não só de amplificação acrescida da aceleração máxima mas também de elevada amplificação espectral na gama em que se inserem os respectivos períodos.

Em Portugal continental estão reunidas as condições necessárias para a ocorrência de efeitos particularmente relevantes de amplificação pelos solos: por um lado, ameaça de sismos de elevada magnitude a grande distância (geradores, portanto, de movimentos com período predominante muito elevado); e, por outro lado, existência no território de extensas áreas (com grande ocupação humana) onde o terreno é constituído por solos brandos até grande profundidade.

Embora com algum atraso relativamente às evidências apuradas em grandes sismos recentes, a influência dos solos tem vindo a ser reconhecida e começa a ser adequadamente reflectida nos regulamentos e normas que se ocupam da definição das acções sísmicas.

No âmbito do eurocódigo 8, que interessa particularmente ao nosso país, e no que diz respeito especificamente à amplificação da aceleração horizontal máxima em depósitos profundos de solos brandos, a evolução recente tem sido muito grande. Efectivamente, de um factor de amplificação de 0,8 na versão de 1988 passou-se para um factor máximo de 1,8 em 2001 (na terceira versão preliminar da norma definitiva). De qualquer modo, este último valor está ainda substancialmente abaixo do valor máximo (2,5) considerado na mais recente geração de regulamentos sísmicos dos EUA.

Dado o carácter genérico que as disposições regulamentares e normativas necessariamente têm, e atendendo à complexidade e ao elevado número dos factores de que dependem os efeitos de amplificação pelos solos, facilmente se compreende que em muitas situações é necessário determinar a acção sísmica local por intermédio de estudos específicos (designadamente com recurso a modelação matemática) e não mediante simples aplicação dos regulamentos ou normas. São exemplos dessas situações aquelas em que está envolvido o comportamento de solos com características especiais, tais como solos coesivos sensíveis ou com índice de plasticidade e teor em água muito elevados e solos susceptíveis de sofrer liquefacção (CEN, 2001). Mas também o projecto de obras de grande dimensão e importância ou o estudo de áreas territoriais com especial concentração do risco sísmico (tais como áreas com grande densidade de ocupação urbana) requerem geralmente a realização de estudos sísmicos locais específicos.

Embora se venha registando um assinalável progresso dos conhecimentos relacionados com os efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos, há ainda questões em aberto ou ainda insuficientemente esclarecidas. Alguns tópicos que necessitam de aprofundamento são, por exemplo, os que se referem à influência da geometria do substrato rochoso (efeitos multidimensionais), aos efeitos de amplificação no caso de sismos muito próximos, à amplificação da componente vertical da aceleração e ao aumento da duração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambraseys, N.N. e Bommer, J.J. *The attenuation of ground accelerations in Europe*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 1179-1202, 1991.
- CEC – Commission of the European Communities. *Eurocode 8: Structures in seismic regions – Design, Part 1: General and buildings*, 1988.

- CEN – European Committee for Standardization. *Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1-1: General rules – Seismic actions and general requirements for structures*. Pré-norma ENV 1998-1-1:1994, 1994.
- CEN – European Committee for Standardization. *Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Versão preliminar nº 3 da norma prEN 1998-1, 2001.
- Chang, F.K. e Krinitzsky, E.L. *Duration, spectral content and predominant period of strong ground motion earthquake records from western United States*. Miscellaneous Paper 5-73-1, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1977.
- Choffat, P. e Bensaude, A. *Estudos sobre o sismo do Ribatejo de 23 de Abril de 1909*. Comissão do Serviço Geológico de Portugal, 1912.
- Correia, R.M. *Efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos*. Actas do Simpósio sobre Catástrofes Naturais – Estudo, Prevenção e Protecção, Lisboa, pp. I33-I45, 1993.
- Correia, R.M. *Acerca da influência das condições geotécnicas locais no valor máximo da aceleração em movimentos sísmicos*. Relatório 222/89-NEGE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1989.
- CSOPT – Conselho Superior de Obras Públicas e Transportes. *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, Lisboa, 1983.
- Dobry, R. et al. *New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions*. Earthquake Spectra, Vol. 16, nº 1, pp. 41-67, 2000.
- Housner et al. *Competing against time*. Relatório da comissão de inquérito ao sismo de Loma Prieta instituída pelo governador do estado da Califórnia, 1990.
- Idriss, I.M. *Response of soft soil sites during earthquakes*. Proc. Memorial Symposium to Honour Prof. H.B. Seed, Berkeley, Vol. II, pp. 273-289, 1990.
- Idriss, I.M. *Earthquake ground motions at soft soil sites*. Proc. 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Vol. III, pp. 2265-2272, 1991.
- ICBO – International Council of Building Officials. *Uniform building code*, 1997.
- IPQ – Instituto Português da Qualidade. *Eurocódigo 8: Disposições para projecto de estruturas sísmo-resistentes, Parte 1-1: Regras gerais – Acções sísmicas e requisitos gerais para as estruturas*. Norma Portuguesa ENV 1998-1-1:2000, 2000.
- Jagger, T. A. *The Yokohama-Tokyo Earthquake of September 1, 1923*. Bulletin of the Seismological Society of America, Dezembro, pp. 124-146, 1923.
- Kanamori, H. *The energy release in great earthquakes*. Journal of Geophysical Research, Vol. 82, pp. 2981-2987, 1977.
- Kokusho, T. e Matsumoto, M. *Nonlinear site response during the Hyogoken-Nanbu earthquake recorded by vertical arrays in view of seismic zonation methodology*. Proceedings of Discussion Special Technical Session on Earthquake Geotechnical Engineering, Hamburgo, pp. 61-69, P. Sêco e Pinto (ed.), A.A. Balkema, 1997.
- Kramer, S.L. *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- Lawson, A.C. et al. *Preliminary report of the state earthquake investigation commission*, Berkeley, 1906.
- Pereira de Sousa, F.L. *O terremoto do 1º de Novembro de 1755 em Portugal e um estudo demográfico*. Serviços Geológicos, 1919.
- Roesset, J.M. *Soil amplification of earthquakes*. Em “Numerical methods in geotechnical engineering”, Cap. 19, pp. 639-682, C.S. Desai e J.T. Christian (ed.), McGraw-Hill, 1977.
- Seed, H.B. et al. *Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of Set. 19, 1985*. Earthquake Engineering Research Center, Report nº UCB/EERC 87-15, Universidade da Califórnia, Berkeley, 1987.

- Seed, H.B. *et al.* *Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local soil conditions for moderately strong earthquakes.* Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66, nº 1, pp. 221-243, 1976a.
- Seed, H.B., Ugas, C. e Lysmer, J. *Site-dependent spectra for earthquake-resistant design.* Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66, nº 4, pp. 1323-1342, 1976b.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes.* Monografia, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, 1982.
- Sousa, M.L., Martins, A. e Oliveira, C.S. *Compilação de catálogos sísmicos da região ibérica.* Relatório 36/92-NDA, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1992.
- Tiedemann, H. *Earthquakes and Volcanic Eruptions – A handbook on risk assessment.* Swiss Reinsurance Company, Zurique, 1992.
- Vieira, A. e Correia, R.M. *Análise estocástica de efeitos locais de amplificação sob ações sísmicas.* Actas do 5º Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra, Vol. 2, pp. 171-180, 1995.
- Vieira, A. e Correia, R.M. *Aplicação de um método de análise sísmica local a dois casos reais.* Relatório 125/97-NEGE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.
- Vucetic, M. e Dobry, R. *Effects of soil plasticity on cyclic response.* Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, nº GT1, pp. 89-107, 1991.
- Youd, T.L., Bardet, J.P. e Bray, J.D. (ed.) *Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999 reconnaissance report.* Earthquake Spectra, Vol. 16, Suplemento A, 2000.

XVIII LIÇÃO MANUEL ROCHA

VOTO DE AGRADECIMENTO

Foi com grande prazer que aceitei o convite da Direcção da Sociedade Portuguesa de Geotecnia para agradecer ao Engenheiro Rui Correia a XVIII Lição Manuel Rocha que acaba de proferir.

O tema escolhido pelo Eng^o Rui Correia é muito interessante, actual e importante e foi-nos apresentado com muito brilho e elegância, como é timbre do nosso ilustre conferencista.

Desde à vários anos que o Eng^o Rui Correia se vem interessando e publicando sobre os efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos, procurando mostrar que não é correcta a ideia tão difundida - e mesmo vertida na nossa regulamentação sísmica - de que as formações de solos actuadas por ondas resultantes de sismos distantes e de elevada magnitude, não dão origem a amplificação das amplitudes verificadas nos respectivos substratos rochosos.

Nos seus estudos e nesta lição o Eng^o Rui Correia apoiou-se, para contrariar a ideia anterior, não só na verificação experimental - resultante de medições efectuadas em sismos recentes - como também nos conceitos teóricos ligados à propagação das vibrações de origem sísmica nos terrenos.

Mas se este era o objectivo principal da lição, foi-nos também proporcionado todo um enquadramento na área da engenharia sísmica geotécnica, o qual valorizou extraordinariamente a apresentação.

Durante cerca de 25 anos tive ocasião de privar de perto, no Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, com o Investigador Rui Correia, agora Director daquela prestigiada instituição. A ideia que retenho é a de um engenheiro e investigador que, a par de notáveis qualidades pessoais, é dotado de uma grande competência científica e técnica, sempre evidenciada com extrema clareza, possuidor de uma enorme capacidade de trabalho e de uma total dedicação à função pública.

A lição que acaba de pronunciar, pelo seu brilho e nível científico, constitui também uma bela homenagem a Manuel Rocha.

Por tudo o que acabo de dizer, é com a maior satisfação que proponho, em nome da organização da XVIII Lição Manuel Rocha e no meu próprio, um voto de agradecimento ao Eng^o Rui Correia pela sua magnífica lição, pedindo também que me acompanhem numa grande salva de palmas.

Emanuel Maranhã das Neves