

# **Estudos sismológicos para definição das ações sísmicas para o local de implantação do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua**

## **Seismological studies for definition of design earthquakes for hydroelectric scheme of Foz Tua site**

Filipe Telmo Jeremias, LNEC, Lisboa, Portugal, *ftelmo@lnec.pt*

Alexandra Carvalho, LNEC, Lisboa, Portugal, *xana.carvalho@lnec.pt*

António Gomes Coelho, LNEC, Lisboa, Portugal

Alfredo Campos Costa, LNEC, Portugal, *alf@lnec.pt*

### **RESUMO**

O aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua situa-se no rio Tua e compreende uma barragem de betão do tipo abóbada. Os estudos sismológicos realizados visaram definir as ações sísmicas a considerar no projeto e nas verificações de segurança estrutural da barragem. Com este objetivo foram analisadas as diferentes abordagens para a caracterização da ação sísmica, bem como, em função dos métodos de avaliação adotados, os critérios utilizados para a definição dos cenários sísmicos correspondentes ao SBP (Sismo Base de Projeto) e ao SMP (Sismo Máximo de Projeto). A aplicação da metodologia proposta ao local do aproveitamento requereu a análise da informação geológica e sismológica disponível, com especial enfoque para as principais falhas regionais consideradas ativas e para os dados do catálogo sísmico relativos à região. Os movimentos sísmicos para os cenários SBP e SMP foram determinados com base em leis de atenuação segundo abordagens determinística e probabilística, e na metodologia estocástica que considera a geometria da falha, heterogeneidades de rotura e características do meio de propagação.

### **ABSTRACT**

The hydroelectric scheme of Foz Tua is located on Tua river and includes a concrete arc dam. Seismological studies carried out aimed to define the design earthquakes. For this purpose different approaches for definition of design earthquakes were analysed as well as according with the evaluated methods adopted the criteria used to define the OBE (operating basis earthquake) and the MDE (maximum design earthquake). The application of the methodology adopted required a previous review of geological and seismological data of the area, mainly focused on regional active faults and on earthquake data recorded at vicinity of dam site. Seismic motions and OBE and MDE were evaluated considering attenuation laws on deterministic and probabilistic approaches and the stochastic methodology which take into account fault geometry, rupture heterogeneities and characteristics of seismic wave propagation media.

### **1-INTRODUÇÃO**

O local previsto para a implantação do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua situa-se no rio Tua, afluente da margem esquerda do Douro, a 1,1 km da confluência com este rio (Figura 1). O aproveitamento inclui uma barragem de betão do tipo abóbada, de 108 m de altura máxima acima do leito do rio e 275 m de desenvolvimento do coroamento, sendo o volume da albufeira de 310 hm<sup>3</sup>.

Neste trabalho são descritos e justificados os métodos adotados para a definição dos cenários sísmicos considerados no sítio da barragem de Foz Tua e para o cálculo dos movimentos sísmicos de projeto.

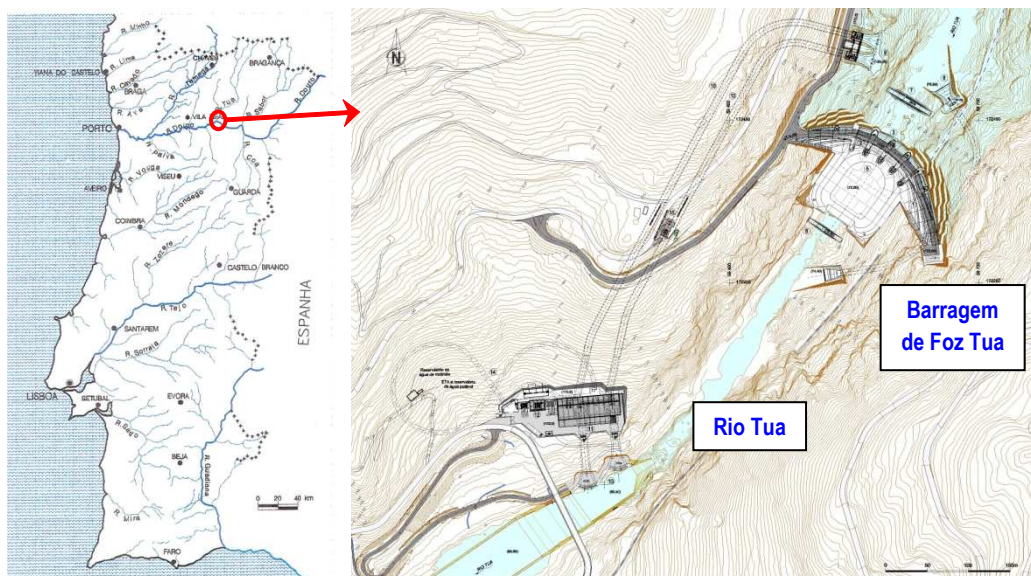


Figura 1 – Localização da barragem de Foz Tua no rio Tua

## 2-TERMINOLOGIA RELATIVA AOS SISMOS DE PROJETO

Os estudos sismológicos devem conduzir à definição das ações sísmicas, em particular, da grandeza, forma e duração das vibrações sísmicas no local da obra, havendo a considerar (NPB, 1993):

- i. o sismo máximo expectável (SME), que deve ser estimado por via determinística ou probabilística, sendo, neste último caso, o SME considerado um sismo com um longo período de retorno;
- ii. o sismo máximo de projeto (SMP), que em obras de risco potencial elevado se deverá tomar como sendo o SME, mas que noutros casos poderá ser inferior;
- iii. o sismo base de projeto (SBP), menos intenso do que o SMP, com um período de retorno fixado de acordo com o risco potencial envolvido.

O sismo máximo de projeto (SMP) é considerado igual ao SME em obras com risco potencial elevado como é caso da barragem de Foz Tua. Para a atuação desta ação sísmica a barragem deve comportar-se de forma a que os danos sofridos, embora possam ser significativos, não provoquem vítimas nem prejuízos económicos e ambientais avultados, isto é, não originem fugas não controladas de água da albufeira.

O sismo base de projeto (SBP) corresponde ao movimento sísmico suscetível de ocorrer uma ou mais vezes durante o período de vida da obra devido à sismicidade de fundo da região. O SBP é em regra definido em termos probabilísticos como o nível de movimento sísmico no local da obra com uma probabilidade de 50% de não ser excedido em 100 anos (período de vida útil da obra), a que corresponde um período de retorno de 145 anos. Para esta ação apenas serão toleráveis danos menores que não ponham em causa a funcionalidade da obra.

## 3-METODOLOGIA

No caso de uma área de baixa atividade sísmica, como a do sítio da barragem de Foz Tua, situada numa região continental de deformação lenta, haverá que ter presente as limitações do catálogo sísmico e as suas implicações em formulações probabilísticas do perigo sísmico. De facto, numa região onde até as magnitudes moderadas têm intervalos de recorrência muito elevados, o registo da sismicidade histórica limita-se a um número muito reduzido de sismos num intervalo muito estreito de magnitudes. Nestas condições, uma lei de recorrência baseada nestes dados presta-se a imprecisões que se refletem inevitavelmente nas estimações probabilísticas do movimento sísmico.

Este constrangimento que se afigura particularmente relevante no que respeita à avaliação do sismo máximo de projeto (SMP), determinou que os cenários sísmicos – grandeza dos sismos (M) e respetiva distância (R) ao sítio – correspondentes ao SBP e ao SMP, fossem definidos com base num método determinístico, que procura fazer pleno uso da informação geológica e sismológica disponível, comparável no seu espírito a alguns regulamentos americanos (AIEA-Guide de Sûreté nº50-SG-S1) correntemente aplicados na Europa aos empreendimentos de elevado risco potencial, caso das instalações nucleares e das grandes barragens, situadas em regiões de sismicidade moderada a baixa (Fauré *et al.*, 1982).

O método consiste em postular para o sítio de interesse um ou mais sismos de referência em ligação com os dados da sismotectónica regional. O primeiro passo reside na definição ou delimitação de fontes sísmicas, ou seja, de zonas de geração “homogéneas” do ponto de vistas da sismicidade. Esta definição deve ter em conta os dados da geologia (tectónica, neotectónica, geomorfologia, geofísica) e os dados da sismicidade histórica e instrumental disponíveis à escala regional. O objetivo é identificar os acidentes sismogénicos (falhas ativas) ou, na sua falta, os domínios sismotectónicos de comportamento homogéneo do ponto de vista da sua deformação recente a atual (volumes crustais ativos).

Um segundo passo, consiste na definição do Sismo Máximo Histórico Verosímil (SMHV) definido da seguinte forma:

- por um lado, na zona de geração sísmica em que o sítio da barragem se insere, admite-se que o sismo máximo conhecido possa ocorrer em qualquer ponto da região (cf. “sismo flutuante”) podendo produzir-se sob o sítio ou na vizinhança da barragem, salvo se estiver associado a uma falha sismogénica conhecida; o SMHV assim definido é expresso em termos da sua magnitude M e de uma profundidade focal;
- por outro lado, em qualquer outra zona de geração vizinha do local da barragem, ou sobre um acidente sismogénico preciso (falha conhecida), assume-se que o sismo máximo conhecido possa ocorrer no ponto da zona de geração ou da falha mais próximo do sítio da barragem; o correspondente movimento sísmico no sítio da barragem será então calculado tendo em conta a distância fictícia assim definida.

Os valores da magnitude e da profundidade focal do SMHV são postulados com base no conhecimento da sismotectónica e da sismicidade histórica e instrumental. Os sismos de projeto visando a definição do SMP, são definidos a partir do SMHV, majorando a magnitude em 0,5 unidades, o que se pode considerar equivalente à majoração de um grau da intensidade epicentral correspondente.

Em conclusão, o método adotado permite assumir cenários sísmicos correspondentes ao SMP e ao SBP, com base na análise e julgamento dos dados empíricos da sismicidade e coerentes com o contexto sismotectónico, sendo cada cenário sísmico representado por um par magnitude-distância ao sítio da barragem.

## **4-GEOLOGIA REGIONAL E SISMOTECTÓNICA**

### **4.1-Enquadramento geológico regional**

O aproveitamento de Foz Tua localiza-se no Maciço Hespérico mais precisamente na Zona Centro-Ibérica – a zona paleogeográfica e tectónica mais interna da cadeia hercínica ou varisca – em geral caracterizada pela existência de rochas paleozóicas muito deformadas, fraturadas e falhadas, afetadas por elevado grau de metamorfismo, e atravessadas por intrusões graníticas (Julivert *et al.*, 1974; Ribeiro *et al.*, 1979).

No que se refere ao sítio do empreendimento, o local da barragem como a área da albufeira imediatamente a montante estão situadas numa mancha de granitos de grão fino a médio, porfiróides, designado por “Granito de Sabrosa” (Figura 2). Estes granitos, sin-orogénicos a tardi-orogénicos, instalaram-se nas formações mais antigas do “Complexo xisto-grauváquico”. Este complexo de idade ante-ordovícica, é constituído pelos filitos e grauvaques das formações alóctones do Grupo do Douro (Formação da Desejosa, Formação do Pinhão e Formação do rio Pinhão). Além da intrusão granítica, observam-se nestas formações numerosos filões de pegmatito e aplito, de direção NW-SE (Sousa e Sequeira, 1989).



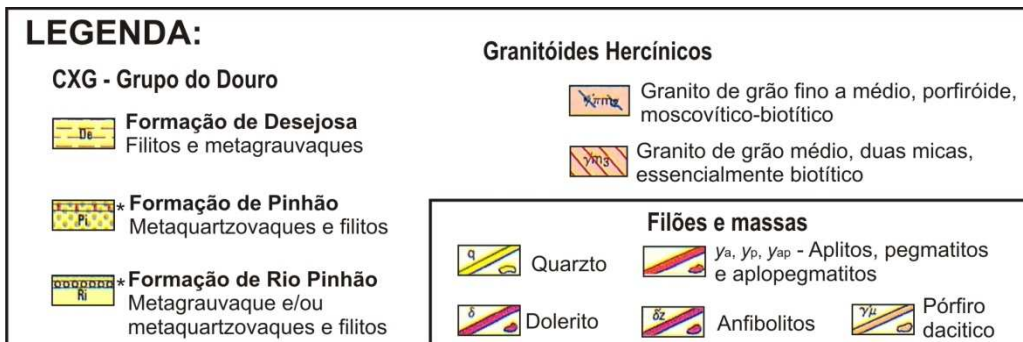
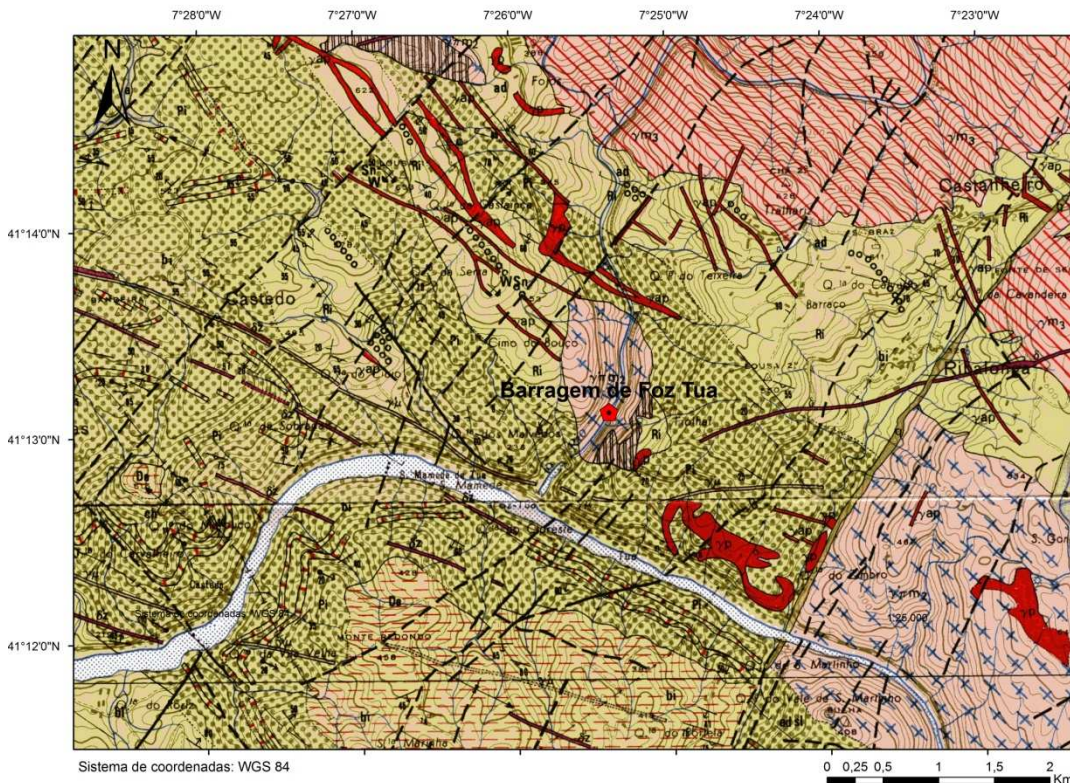


Figura 2 – Enquadramento geológico do sítio do empreendimento de Foz Tua, baseado na Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000 (Folha 10 C - Aljô)

No que diz respeito à fraturação, verifica-se que, à escala regional, toda a região centrada no local do empreendimento de Foz Tua, entre os grandes desligamentos de Vila Real e da Vilariaça, é profusamente cortada por falhas (Sousa e Sequeira, 1989; Ferreira *et al.*, 1989) (Figura 3).

De Leste para Oeste, desde a região da Vilariaça até à região de Vila Real, ocorrem numerosas falhas de grande comprimento:

- Sistema de falhas NNE-SSW:** Falhas da Portela, da Açoreira, da Vilariaça, de Murça, de Vilarinho da Castanheira, de Seixo de Ansiães, de Vale de Forno e da Ferradosa, de Ribalonga-Nagozelo, de S. Leonardo, de Asseixas e de Donelo.
- Sistemas de falhas NW-SE:** Cavalgamento de Eira Velha, falhas de Quinta do Seixo e de Adorigo, bem como as falhas que acomodaram os filões e diques de dacitos e de anfibolitos.
- Sistema N60 a 70E, mais recente, por vezes com filões doleríticos.



Neste contexto, a sismicidade de Portugal continental não difere significativamente da que se observa em toda a Europa ocidental no domínio continental intraplaca, a Norte da fronteira África-Eurásia, caracterizada por uma sismicidade difusa até  $M \sim 5,5$  e por raros sismos de magnitude intermédia  $M \approx 6,0$  com longos intervalos de recorrência.

Assumindo para as falhas sismogénicas da região onde se localiza o empreendimento taxas de deslizamento da ordem de 0,1 a 0,01 mm/ano, como as que têm sido determinadas para alguns dos desligamentos ativos do Centro e Norte de Portugal, um sismo de magnitude  $M=6,0$  teria intervalos de recorrência da ordem das dezenas de milhares de anos. Este regime tectónico explica a dificuldade de identificar as falhas sismogénicas e a sua atividade, uma vez que, em regra, só nos grandes sismos ( $M > 6,5$ ), a rotura sísmica das falhas se propaga até à superfície do terreno.

Na Figura 4 estão representados os lineamentos e falhas ativos da região do Norte de Portugal de acordo com a Carta Neotectónica de Portugal na escala 1:1 000.000 (Cabral e Ribeiro, 1988).

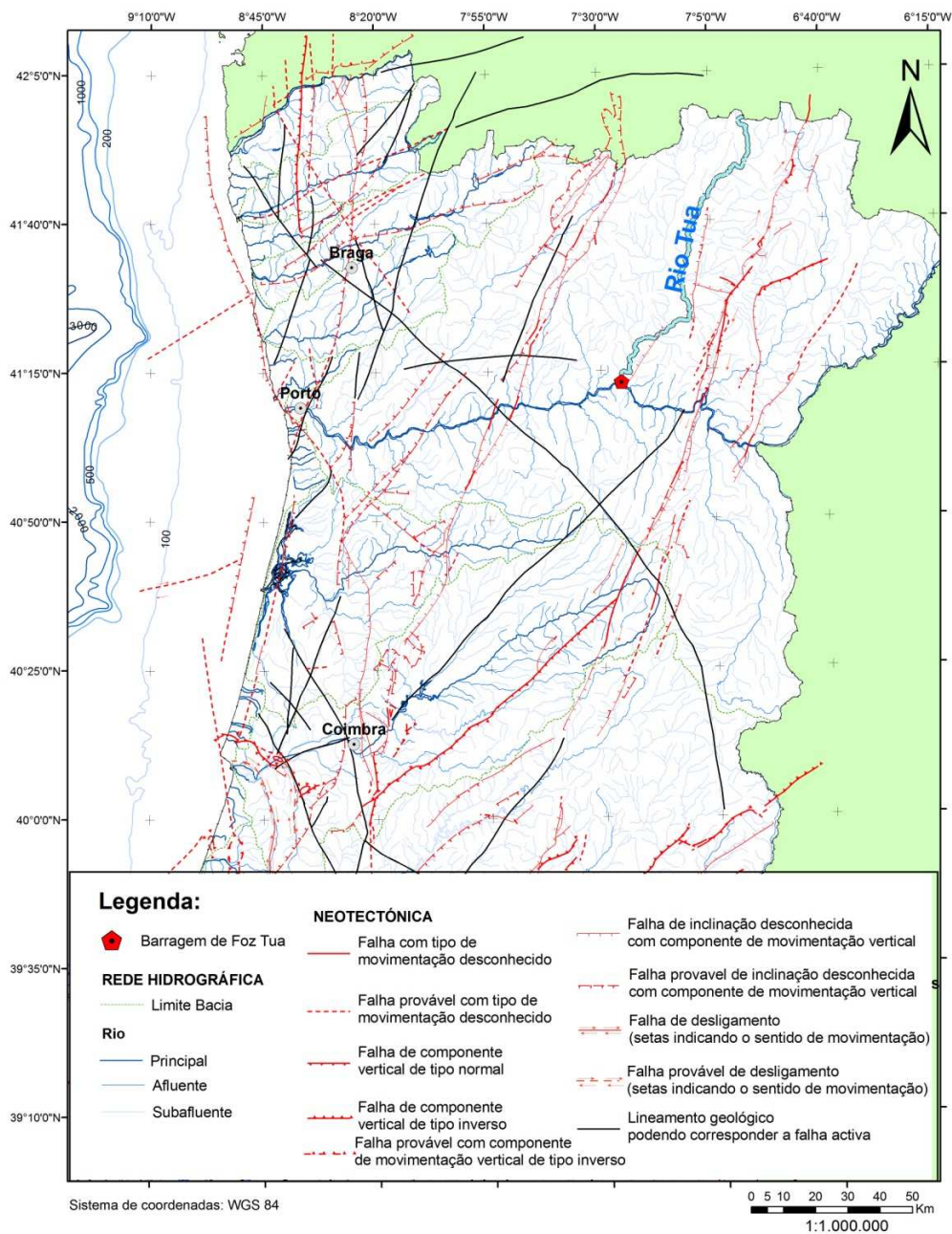


Figura 4 – Falhas e lineamentos ativos, com base na Carta Neotectónica de Portugal na escala 1/1 000.000, dos Serviços Geológicos de Portugal



Além dos lineamentos observados nas imagens de satélite, mas não validados posteriormente no terreno, cujo significado sismotectónico não se afigura relevante, a Carta Neotectónica põe em relevo a ocorrência de duas grandes “falhas ativas”: a falha de Penacova-Régua-Verin e a falha de Manteigas-Vilariga-Bragança. De acordo com a Neotectónica de Portugal na escala 1:1 000.000, o termo “falha ativa” não significa necessariamente “falha sismogénica”, baseando-se exclusivamente em indícios de movimentação quaternária, sem ter em conta qualquer relação com a sismicidade histórica e instrumental.

O sítio do empreendimento de Foz Tua situa-se assim entre aqueles dois acidentes, a cerca de 25 km de distância da falha da Régua e da falha da Vilariga.

Devido ao alegado carácter ativo e ao seu grande comprimento, estas falhas têm exercido grande influência na caracterização do perigo sísmico no Norte de Portugal, uma vez que têm sido adotadas como fontes sísmicas ou como elemento modelador das zonas de geração sísmica usadas nas análises do perigo sísmico.

A observação da fraturação regional, plasmada na cartografia geológica (Sousa e Sequeira, 1989; Ferreira, *et al.*, 1989) convida contudo a relativizar a importância destes dois acidentes principais. As imagens de satélite põem em evidência a densa rede de fraturas da região (Figura 5). A verticalidade ou a forte inclinação da maior parte dos acidentes tornam-nos bem visíveis. Como se pode verificar, as falhas da Régua e da Vilariga não são acidentes isolados. As réplicas paralelas são numerosas. A sua continuidade é aparente, os segmentos contínuos, frequentemente com 20 a 30 km, não ultrapassam os 50 km de comprimento. Este aspeto é importante em sismotectónica, em que se tende frequentemente a sobrevalorizar o papel das grandes falhas regionais.

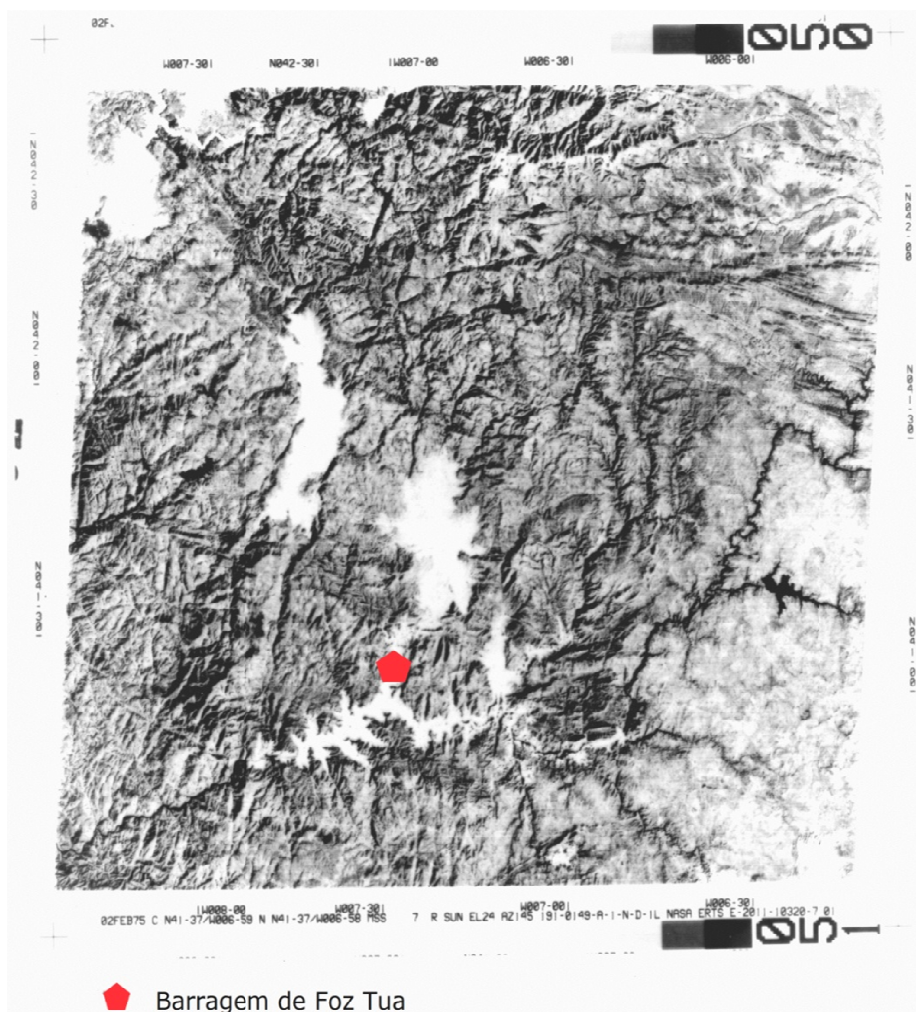


Figura 5 – Imagem do Nordeste de Portugal obtida pelo satélite Landsat

## 5-SISMICIDADE

No estudo realizado foram usados os dados da sismicidade histórica e instrumental do catálogo sísmico do Instituto Meteorológico (IM, 2009), que compila os sismos ocorridos em Portugal Continental de 63 AC até 2007.

Na Figura 6 apresenta-se a distribuição dos sismos de magnitude  $M \geq 4$  ocorridos desde 1666 num total de 32, num raio de 100 km com centro no local da barragem de Foz Tua. Na Figura 7 estão representados, em conjunto com os elementos da Carta Neotectónica de Portugal, os sismos de magnitude  $M \geq 4$  ocorridos num raio de 50 km e numa coroa entre 50 e 100 km em torno do local da barragem.

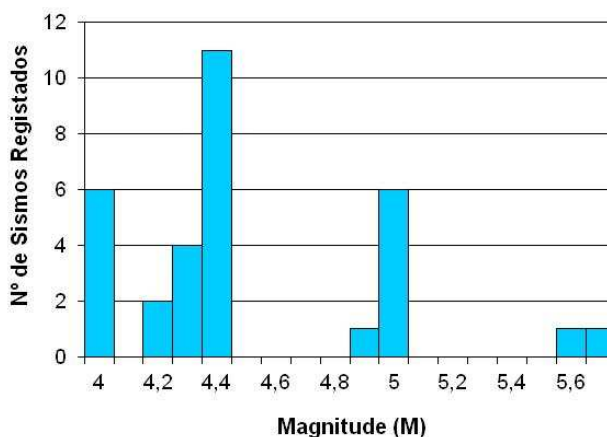


Figura 6 – Distribuição dos sismos de magnitude  $M \geq 4$  ocorridos num raio de 100 km com centro no local da barragem de Foz Tua

Esta distribuição dos sismos no espaço e em grandeza, põe em evidência uma sismicidade difusa, caracterizada por sismos de magnitude  $M \leq 5,0$ . O catálogo apenas regista a ocorrência de 2 eventos de magnitude  $M > 5,0$  neste período de 350 anos, sendo a magnitude máxima  $M = 5,7$ .

Dada a impossibilidade de relacionar os sismos com falhas específicas, nomeadamente a ausência de evidências de deslocamento à superfície das grandes falhas potencialmente sismogénicas, relacionados com a geração de sismos de magnitude  $M \geq 6,5$ , podem assumir-se, com base nas correlações correntes entre a área da rotura sísmica das falhas e a magnitude do sismo correspondente, profundidades focais da ordem de 10 km.

## 6-CÁLCULO DOS MOVIMENTOS SÍSMICOS DO PROJETO

### 6.1-Definição dos cenários sísmicos

Dadas as características da região em que se insere a barragem e tendo em conta a sua baixa sismicidade, considerou-se suficiente assumir como zona de geração a área delimitada por um raio de 100 km em torno do sítio da barragem. Esta zona caracteriza-se por uma sismicidade difusa, podendo assumir-se um sismo máximo equiprovável em qualquer ponto da zona, de magnitude  $M = 5,0$ .

Assumindo que o sismo base de projeto (SBP) diz respeito a um sismo máximo com uma elevada probabilidade de ocorrer durante o período de vida útil da obra, considerou-se que o sismo máximo  $M = 5,0$  constitui um cenário sísmico adequado para o cálculo do SBP, sendo este, por conseguinte, caracterizado por (magnitude, distância, profundidade):

**SBP:  $M = 5,0$ ;  $R = 10$  km;  $h = 10$  km**

A magnitude máxima histórica observada  $MSMHV = 5,7$  não sugere a sua associação com nenhuma falha particular. Assim, adotou-se para o cenário do SMP uma magnitude majorada  $MSMP = MSMHV + 0,5 = 6,2$ , pelo que o SMP será caracterizado por:

**SMP:  $M = 6,2$  ;  $R = 10$  km;  $h = 10$  km**



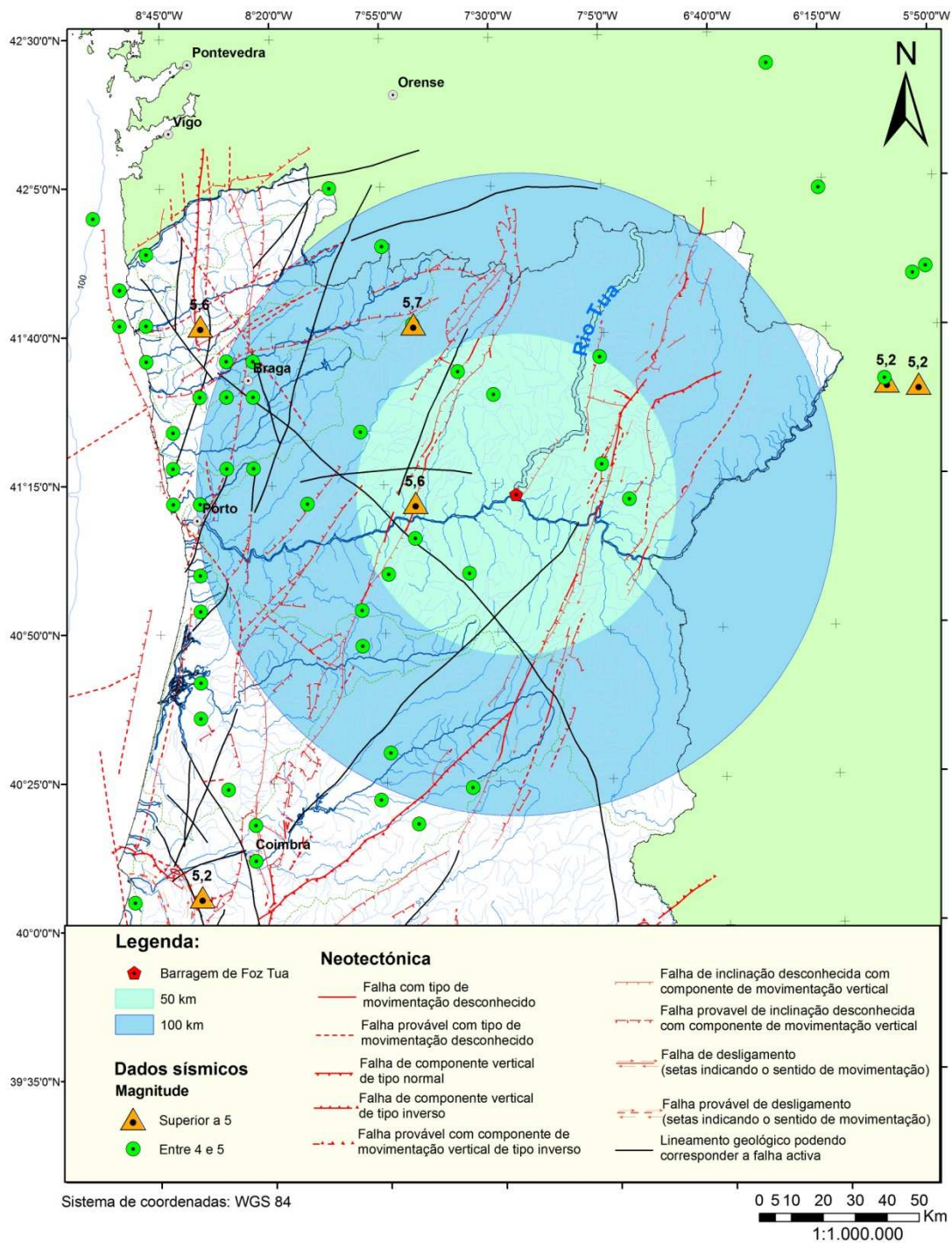


Figura 7 – Sísmos ocorridos em torno do sítio do aproveitamento de Foz Tua, considerando raios de 50 e 100 km, com base nos elementos do Catálogo do IM

É de sublinhar que, neste caso, a estimativa do sismo máximo com base no conceito do sismo máximo expectável (SME) não constituiria uma forma mais vantajosa de lidar com a incerteza inerente à estimativa da grandeza do sismo máximo. De facto, a consideração do SME implica a formulação de hipóteses sobre a segmentação da falha da Vilariça e o comprimento de uma eventual rotura co-sísmica à superfície, parâmetros estes cuja estimativa seria puramente especulativa.

Não obstante, dada a importância atribuída à falha da Vilariça como fonte sísmica, considerou-se conveniente assumir um segundo cenário sísmico para o SMP, correspondente à hipótese da reativação da falha da Vilariça de acordo com as conclusões do estudo da

paleosismicidade recentemente efetuado (Rockwell, *et al.*, 2009), apesar das reservas suscitadas pelas suas conclusões, nomeadamente no que se refere à grandeza do sismo máximo esperado. Assim, o outro cenário terá de acordo com o estudo anteriormente referido as seguintes características:

**SMP: M= 7,25 ; R = 25 km; h =10 km**

## 6.2-Previsão dos movimentos sísmicos

### 6.2.1-Movimentos sísmicos para o SBP

#### a) Abordagem determinística

No contexto de uma abordagem determinística convencional, a estimação dos movimentos sísmicos do solo no local da barragem de Foz Tua a partir dos cenários sísmicos referidos em 6.1, implica a atenuação do movimento sísmico com a distância com base em leis de atenuação empíricas ou semi-empíricas, julgadas adequadas ao ambiente sismotectónico em questão e aos cenários considerados.

Uma das leis de atenuação frequentemente utilizada na abordagem determinística, ou em estudos de perigosidade sísmica para Portugal, é a lei de Ambraseys (Ambraseys *et al.*, 1996), deduzida para a Europa e Médio Oriente. Mais recentemente, Carvalho (2007) aplicou o modelo estocástico de falha finita, determinou os seus parâmetros para o caso concreto do território português com base nos registos da rede acelerográfica nacional, e criou uma base de dados sintéticos, suprimindo as lacunas regionais (falta de registos em magnitudes e distâncias de interesse para a engenharia) e permitindo a elaboração de leis de atenuação para o território de Portugal. A metodologia utilizada representa uma abordagem com reconhecida vantagem na situação de campo próximo ou em caso de sismos de magnitude elevada, em que a consideração de uma fonte extensa (falha-finita) em vez de uma fonte pontual, pode ser fundamental para uma caracterização mais realista dos movimentos intensos do solo.

Assim, serão estas duas as leis consideradas como adequadas para caracterizar os valores médios da amplitude do movimento do solo numa abordagem determinística, para o local da barragem de Foz Tua. De referir que as leis utilizadas têm como variáveis independentes a magnitude e a distância mais curta à projeção da falha à superfície. Considerando o cenário em causa (M5,0 a 10 km) e tendo em conta as conclusões de Carvalho (a lei de Ambraseys é ajustada para o campo próximo, embora sobrestimando os valores da aceleração para distâncias inferiores a 30 km para magnitudes baixas) são de esperar algumas diferenças entre as duas leis, com sobrestimação de amplitude na lei de Ambraseys, visto ser um cenário de magnitude baixa a moderada a muito curta distância. Os resultados apresentam-se na Figura 8.

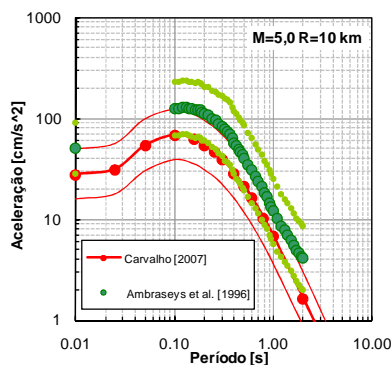


Figura 8 – Espetros de resposta em aceleração (5% amortecimento), para o local da barragem de Foz Tua, para o SBP, tendo em conta as leis de atenuação espectral e respetiva dispersão (círculos a verde claro para a lei de Ambraseys e linha a vermelho para a lei de Carvalho)

## b) Abordagem probabilística

Como se referiu na seção 2, a abordagem probabilística justifica-se no caso do sismo base de projeto (SBP) em que se trata de estimar um movimento sísmico com elevada probabilidade de ocorrer durante o período de vida útil da obra (50% de probabilidade de ser excedido em 100 anos, a que corresponde um período de retorno de 145 anos), podendo admitir-se que, neste caso, se dispõe de um catálogo sísmico relativamente completo para a grandeza (ou magnitude) do sismo em questão.

O primeiro passo da metodologia para a avaliação probabilística da ação sísmica consiste em dividir a região sísmica em zonas de geração sísmica (zonas sismogénicas) as quais delimitam regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas. No âmbito do projeto "Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (ERSTA)", financiado pela Autoridade Nacional de Proteção Civil, foi realizado um trabalho concertado de várias entidades nacionais que, depois de uma revisão da informação sísmica, tectónica e geológica da região algarvia, permitiu redesenhar as zonas sismogénicas (15 zonas) que potencialmente afetam a região do Algarve (Carrilho *et al.*, 2010). Para a consideração da perigosidade sísmica em todo o território nacional, e para o caso particular do sítio da barragem de Foz Tua, consideraram-se mais 3 zonas sismogénicas, que foram modeladas por áreas de grandes dimensões devido à dificuldade em relacionar os epicentros com as falhas cartografadas na carta neotectónica. Determinaram-se, também, os parâmetros que caracterizam estas zonas, nomeadamente a relação de frequência-magnitude (da lei de Gutenberg-Richter) e a magnitude máxima. A Figura 9 apresenta a delimitação das zonas consideradas.

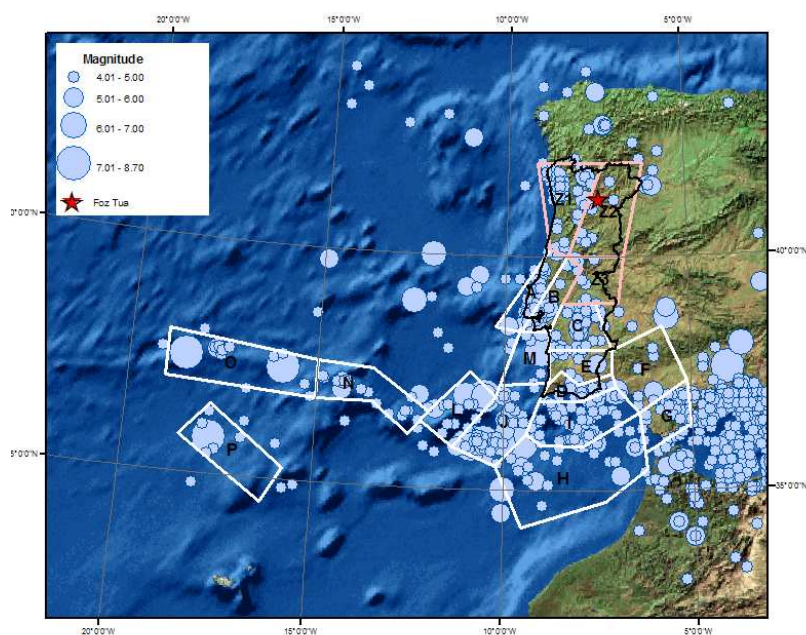


Figura 9 – Mapa de epicentros, modelo de zonas de sismogénese (a branco as zonas de acordo com Carrilho *et al.*, 2010, a rosa as novas zonas consideradas), e localização do sítio da barragem de Foz Tua

Para a propagação do movimento sísmico em cada zona, entre a fonte e o local em análise, utilizaram-se as leis semi-empíricas em aceleração espectral de Carvalho (2007) que consideram a distância hipocentral como variável explicativa. Estas leis são as adequadas para os estudos de perigosidade sísmica pois (i) foram deduzidas para os dois casos particulares que caracterizam a ação sísmica em Portugal Continental (uma lei respeitante a sismos com epicentro em Portugal Continental, e uma lei respeitante a sismos com epicentro na região Atlântica) tendo-se constatado a validade da lei de Ambraseys para o campo próximo mas não para o campo afastado; (ii) utilizam a distância hipocentral como variável independente, o que torna a sua forma funcional mais adequada quando se utilizam zonas-área de geração sísmica, como é o caso.

O resultado do cálculo probabilístico do movimento sísmico do solo obtido para um período de retorno de 145 anos é apresentado na Figura 10.

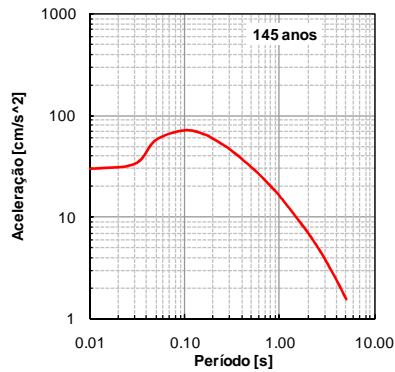


Figura 10 – Espectros de resposta em aceleração (5% amortecimento), para o local da barragem de Foz Tua para um período de retorno de 145 anos

### 6.2.2 – Movimentos sísmicos para o SMP

A problemática fundamental na modelação do espectro na fonte relaciona-se com a descrição da fonte sísmica: se esta poderá ser considerada como uma fonte pontual ou se deverá ser descrita como uma fonte extensa. O efeito de uma fonte-finita, que inclui geometria da falha, heterogeneidades na rotura ao longo do plano de falha e diretividade, pode influenciar profundamente a amplitude, o conteúdo em frequência e a duração do movimento. Naturalmente, a proximidade do local e a grandeza do sismo são fatores condicionantes do grau de sofisticação do modelo de fonte a ser considerado. No campo próximo (distâncias menores que duas vezes o comprimento da falha), a consideração de metodologias que descrevem a fonte como uma falha e não como um ponto podem ser fundamentais para uma caracterização verosímil dos movimentos sísmicos intensos no local.

A abordagem determinística, em que a caracterização da ação sísmica é feita através do uso de leis de atenuação, não é a mais indicada quando se pretende (i) caracterizar o movimento sísmico de sismos moderados ou elevados ( $M > 6$ ); (ii) descrever a ação sísmica em termos da sua intensidade, conteúdo em frequência, duração e variabilidade espacial; (iii) o estudo da resposta de qualquer estrutura crítica para a engenharia situada a escassos quilómetros de uma falha ativa. Efetivamente, as leis de atenuação não descrevem de forma adequada aspetos particulares relativos aos conteúdos em frequência e duração dos movimentos sísmicos na rocha, no campo próximo, devendo ser realizadas simulações estocásticas de rotura de falha, as quais permitem obter séries temporais que captam os efeitos da fonte e superam quer a falta de registos a distâncias tão curtas da fonte, quer a falta de representação destas distâncias nas leis empíricas.

Para os cenários ( $M=6,2$ ;  $R=10\text{km}$ ) e ( $M=7,2$ ,  $R=25\text{ km}$ ), a consideração da fonte como uma falha é a abordagem correta para a caracterização da ação sísmica, uma vez que se tratam de sismos de elevada magnitude a curtas distâncias.

Os principais parâmetros que caracterizam o modelo estocástico de falha e que descrevem os fenómenos envolvidos (geração de energia na fonte sísmica, propagação da energia desde a fonte até ao substrato rochoso e alteração do seu conteúdo energético devido a efeitos locais) são: (i) quanto à geometria da fonte: comprimento, largura, orientação e inclinação; (ii) quanto às características de rotura na fonte sísmica: momento sísmico, distribuição de deslizamento, queda de tensão, velocidade de rotura e ponto de início de rotura e (iii) quanto às características do meio de propagação: velocidade das ondas sísmicas, espessura da crosta, coeficientes de atenuação geométrica e fator de qualidade do meio. A maior parte destes parâmetros foram estimados utilizando os dados da rede acelerométrica nacional e encontram-se em Carvalho (2007).

Um dos requisitos essenciais na simulação numérica de movimentos sísmicos, através de um modelo matemático, é a consideração das incertezas associadas aos parâmetros desse modelo. Neste trabalho, considerou-se a variabilidade dos parâmetros que descrevem os fenómenos de rotura na fonte e no meio de propagação, tratando cada parâmetro chave (aqueles com variabilidade ou incerteza significativa e que têm um impacto importante nas



amplitudes do movimento do solo) como uma distribuição de probabilidades log-normal ou normal truncada, com um valor médio e um desvio padrão.

As heterogeneidades de rotura no plano de falha, nomeadamente a distribuição de deslizamentos e o ponto de início de rotura, têm influência significativa na caracterização dos movimentos intensos do solo. Para capturar os efeitos de diretividade, foram simuladas 15 roturas aleatórias no plano de falha (significando 15 pontos de nucleação aleatoriamente escolhidos), a cada uma atribuída, também, uma distribuição de deslizamento aleatório.

Assim, e resumindo, para o cenário SMP simularam-se os movimentos do solo variando os pontos de nucleação, a distribuição de deslizamento e todos os parâmetros considerados importantes e que descrevem as características da fonte e do meio. Pretendeu-se, deste modo, refletir as heterogeneidades de rotura, os efeitos de diretividade e a variabilidade aleatória dos parâmetros do modelo estocástico de falha-finita para a previsão dos movimentos sísmicos intensos no local da barragem de Foz Tua. Para a orientação da fonte sísmica foi escolhido o valor médio da orientação principal da falha da Vilaríça.

O Quadro 1 apresenta alguns parâmetros considerados e sua variação, para os dois cenários SMP.

Quadro 1 – Parâmetros (e sua variação) da fonte sísmica para a modelação do SMP

Magnitude, $M$	6,2	7,25
Comprimento x largura da falha	12-5 km x 5-8 km	65-76 km x 13-16 km
Orientação da falha ( <i>valor médio</i> )	0 – 90° (N24°E)	N20°E-N30°E (N24°E)
Inclinação da falha	0° - 90°	90°
Velocidade de rotura, $V_r$	2,50 km s <sup>-1</sup>	
Deslizamento	distribuição aleatória	

Os espetros de resposta destas várias simulações, tendo em conta o cenário sísmico M6,2, estão representados na Figura 11. A Figura 12 compara os dois cenários SMP. As médias dos valores espectrais, relativas aos dois cenários considerados para o SMP, não diferem entre si de forma significativa no que respeita aos valores de aceleração máxima e para períodos inferiores a 0,3s, verificando-se as maiores diferenças para os períodos superiores a 0,5s.

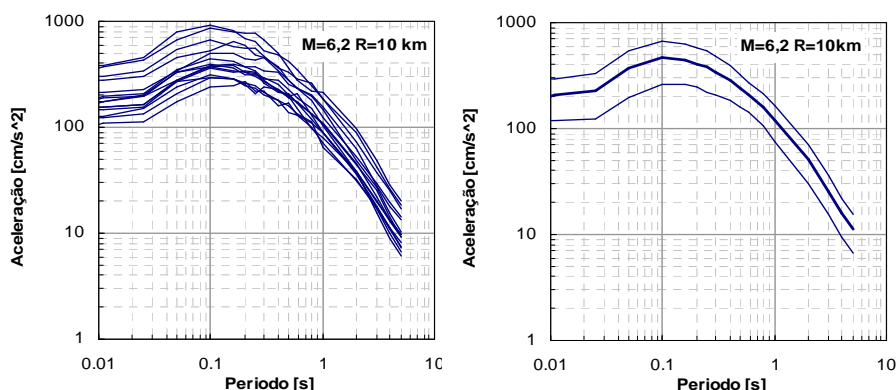


Figura 11 – Espetros de resposta (5% amortecimento), para o sismo SMP. Esquerda: Espetros para as simulações realizadas; Direita: Espetro médio, e dispersão associada ( $\pm\sigma$ )

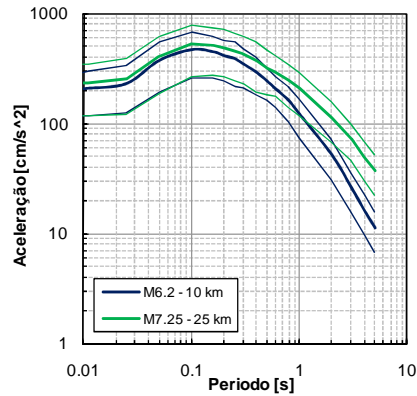


Figura 12 – Espectros de resposta (5% amortecimento), para o sismo SMP, cenários (M7,25, 25 km) (falha da Vilariga) e (M6,2, 10 km). Média e dispersão associada ( $\pm\sigma$ )

Os cenários apresentados e mencionados anteriormente são sismos intraplaca. A caracterização da ação sísmica para um determinado local deve, também, ter em conta os cenários dos sismos interplacas, uma vez que estes caracterizam um ambiente tectónico que preconiza sinais sísmicos com diferente duração e conteúdo em frequência, relativamente aos sismos intraplaca. Naturalmente, o cenário do sismo interplacas a ter em conta será um cenário representativo do sismo de 1 de Novembro de 1755. De acordo com o estado atual dos conhecimentos relativamente às possíveis fontes sísmicas deste sismo, os modelos que se apresentam como melhores candidatos para justificar os danos causados em Portugal Continental, são aqueles que consideram uma rotura múltipla em que intervém a falha de Marquês de Pombal, parecendo o sistema de rotura falha Marquês de Pombal – falha da Ferradura, um bom candidato para a fonte geradora do sismo (Ribeiro, 2005). Assim, este foi o sistema de rotura escolhido para simular, através do modelo estocástico, os movimentos do terreno no local da barragem de Foz Tua, tendo em conta o cenário do sismo interplacas. Foi modelada a situação mais gravosa, isto é, um cenário de rotura unilateral da falha, na direção do local da barragem. Os resultados apresentam-se na Figura 13.

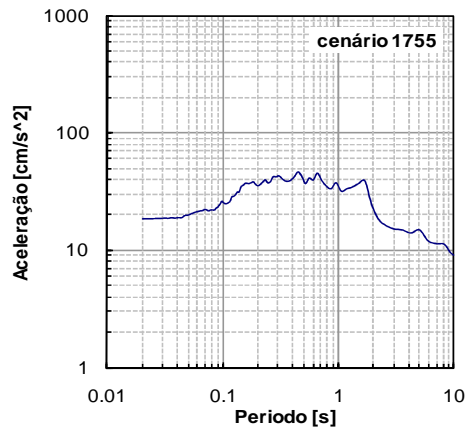


Figura 13 – Espectro de resposta (5% amortecimento), no local da barragem de Foz Tua, decorrente do modelo considerado para a fonte do sismo de 1755

## 7-SÍNTESE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

No Quadro 2 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos pelos diferentes métodos e para os cenários sísmicos considerados.

Na Figura 14, do lado esquerdo, apresentam-se os resultados obtidos para o cenário SBP, figurando o espectro médio das 2 leis de atenuação e o resultado do estudo probabilístico para os 145 anos de período de retorno. Do lado direito apresentam-se os resultados obtidos para o cenário SMP, figurando o espectro médio e a respetiva dispersão ( $\pm\sigma$ ) obtido com a modelação de falha e o espectro de resposta médio obtido para o sismo interplacas (cenário 1755).

Quadro 2 – Síntese dos resultados em acelerações máximas (PGA), ao nível do substrato rochoso.

Cenários		Aceleração máxima (cm.s <sup>-2</sup> )			
		Abordagem determinística		Modelação estocástica Carvalho (2007)	Abordagem probabilística T = 145 anos
		Lei de Ambraseys <i>et al.</i> (1996)	Lei de Carvalho (2007)		
SBP	M=5,0 R=10 km	51 (90)*	29 (49)*	–	29
SMP	M=6,2 R=10 km			200 (267)*	
	M=7,25 R=25 km			231 (340)*	
<b>Sismo afastado</b>				19	

\*Os valores entre parênteses referem-se à média + 1σ.

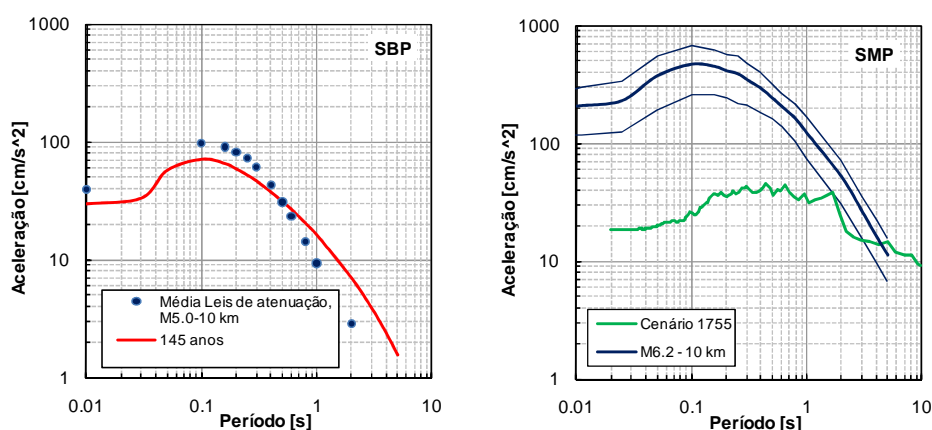


Figura 14 – Espectros de resposta em aceleração (5% amortecimento). Esquerda: SBP, considerando a média das leis de atenuação e a abordagem probabilística. Direita: SMP, considerando o espectro médio da modelação estocástica e dispersão associada, e o cenário interplacas (sismo de 1755)

A consideração destes resultados permite tomar decisões no que respeita aos valores dos movimentos sísmicos no sítio da barragem de Foz Tua, a adotar para os SBP e SMP. Uma das soluções que se afigura poder representar de forma conservativa os valores a assumir para os sismos de projeto, seria considerar, para o SBP, o valor resultante do estudo probabilístico, considerando 1 % de amortecimento (para cenários conformes de comportamento estrutural), e para o SMP, o valor correspondente à média + 1σ resultante da abordagem estocástica do cenário M=6,2 – R=10 km.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDP autorização para publicação desta comunicação.

## 8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambraseys, N.N.; Simpson, K.A.; Bommer, J.J. (1996) - Prediction of horizontal response spectra in Europe. EESD 1996; 25, pp. 371-400.

Cabral, J. e Ribeiro, A. (1988) - Carta Neotectónica de Portugal Continental, escala 1:1 000.000, Nota Explicativa. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Carrilho, F.; Pena, J. A.; Nunes, J. C. (2010) - Sismicidade. Capítulo 3 do livro "Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve". Editor: Autoridade Nacional da Proteção Civil.

Carvalho, A. (2007) - Modelação estocástica da ação sísmica em Portugal Continental. *Dissertação de doutoramento, IST, Lisboa.*

Fauré, J.; Ferrieux, H.; Leviret, A.; Mohamadioun, B. (1982) - L' evaluation du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires. Séminaire sur les aspects de sûreté dans le choix des sites des centrales nucléaires, AIEA, Vienne.

Ferreira da Silva, A., Rebelo, J. A. e Ribeiro, L. M. (1989) - Notícia Explicativa da Folha 11C - Torre de Moncorvo da Carta Geológica de Portugal 1:50.000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

IM (2009) - Catálogo Sísmico. Instituto de Meteorologia (comunicação pessoal).

Julivert, M., Fontebot, J., Ribeiro, A. e Conde, L. (1974) - Memória Explicativa del Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares. Inst. Geol. Min. Espanha, Madrid.

NPB (1993) - Normas de Projeto de Barragens (Anexo à Portaria nº846/93).

Ribeiro, A., (2005) O Sismo de 1755 e a Geodinâmica da Ibéria e Atlântico. 1755 – O Grande Terramoto de Lisboa Volume 1 Descrições; Flad e Público

Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyzewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D. e Monteiro, H. (1979) - Introduction a la Géologie Générale du Portugal. Serv. Geol. Portugal, Lisboa.

Rockwell, T., Fonseca, J., Madden, C., Dawson, T., Owen, L. A., Vilanova, S. e Figueiredo, P. (2009) - Palaeoseismology of the Vilarica Segment of the Manteigas-Bragança Fault in northeastern Portugal, in Reicherter, K., Michetti, A.M. & Silva, P. G. (eds) Palaeoseismology: Historical and prehistorical Records of Earthquake Ground Effects for Seismic Hazard Assessment. The Geological Society of London, Special Publications, 316, 237-258.

Sousa, M. B. e Sequeira, A. J. D. (1989) - Notícia Explicativa da Folha 10D, Alijó, da Carta Geológica de Portugal 1:50.000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.