

## Segurança sísmica das escolas do primeiro ciclo do ensino básico: Algarve versus Huelva

**João M. C. Estêvão**

*Departamento de Engenharia Civil, ISE, Universidade do Algarve, Portugal, jestevao@ualg.pt*

**Antonio Morales Esteban**

*Departamento de estructuras de edificación e ingeniería del terreno. Universidad de Sevilla. España, ame@us.es*

**Carlos Sousa Oliveira**

*CERis - Instituto Superior Técnico, Portugal, Portugal, csoliv@civil.ist.utl.pt*

### Resumo

Um dos objetivos do projeto PERSISTAH, consistiu na avaliação da segurança sísmica de escolas do primeiro ciclo do ensino básico existentes nas regiões vizinhas do Algarve (Portugal) e Huelva (Espanha). Um dos grandes desafios enfrentados no projeto, foi o facto da legislação em vigor nesses dois países ser bastante diferente, nomeadamente o valor da ação sísmica a adotar na verificação da segurança sísmica. Para melhor dar resposta a este desafio, foi desenvolvido um programa informático que possibilitou a avaliação simultânea da segurança sísmica de um conjunto alargado de escolas existentes em ambas as regiões, tendo por base análises não lineares realizadas para dois tipos possíveis de ação sísmica: a ação regulamentar de cada uma das regiões; cenários de ocorrência de sismos com determinadas características, com recurso a leis de atenuação. O programa informático possibilitou o estudo comparativo dos possíveis efeitos de sismos que possam vir a afetar estas duas regiões do sul da Península Ibérica. Os resultados mostram que uma construção escolar pode não verificar o nível de segurança que é agora estabelecido na NP EN 1998-3:2017 para o Algarve, e, como tal, de necessitar de medidas de reforço sísmico, mas caso essa mesma construção estivesse localizada do outro lado do Rio Guadiana, em Espanha, então já não necessitaria de qualquer tipo de reabilitação sísmica. Para que possam ser clarificados os motivos do problema observado, foram determinadas as respostas estruturais de algumas escolas, para a ação sísmica regulamentar estabelecida para Vila Real de Santo António (Algarve) e para Aiamonte (Huelva), assim como para dois possíveis cenários de ocorrência de sismos (um sismo próximo e um afastado).

**Palavras-chave:** Ação sísmica; Segurança sísmica; Algarve; Huelva; Escolas; PERSISTAH

## 1 INTRODUÇÃO

Os sismos que têm vindo a ocorrer um pouco por todo o mundo, têm evidenciado o seu efeito destruidor nas construções escolares, inclusive com vítimas mortais [1-5]. Assim, é muito importante realizar a avaliação da segurança sísmica das escolas a funcionar em regiões com potencial de ocorrência de sismos destruidores, preferencialmente recorrendo a métodos de análise sísmica rigorosos. Foi neste contexto que surgiu o projeto PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos SISMOS no Território do Algarve e de Huelva), onde foram realizadas muitas análises não lineares de edifícios de escolas do 1º ciclo do ensino básico existentes nas regiões vizinhas do Algarve (Portugal) e de Huelva (Espanha). Para tal, foi desenvolvida um programa informático que possibilita a obtenção de um *School-score* de modo a hierarquizar a segurança sísmica das escolas para dois tipos de ações sísmicas [6]: o valor regulamentar estabelecido para cada região; o valor obtido através dos valores espectrais resultantes da adoção de leis de atenuação. Para facilitar a realização desta tarefa, foi desenvolvido um conjunto de objetos computacionais independentes e interligáveis. Desta forma, foi possível comparar, quer o nível de ação sísmica estabelecido nos regulamentos de cada um dos países vizinhos, quer o desempenho sísmico desses edifícios. Dado que o conjunto de rotinas informáticas desenvolvidas, não só integra uma base de dados das escolas, onde foram introduzidas as curvas de capacidade obtidas das análises sísmicas realizadas (tendo por base os métodos estabelecidos no Eurocódigo 8 [7, 8]), como permite exportar de forma automática os resultados para o Google Earth (através da criação de um ficheiro *kml*), foi possível obter uma visão global do problema do risco sísmico das escolas estudadas nas regiões do Algarve e de Huelva.

Depois de ultrapassado o desafio de juntar no mesmo programa informático diversos tipos de ações sísmicas, a primeira surpresa com que a equipa do projeto PERSISTAH se deparou, foi a grande diferença nos níveis de ação sísmica que estão atualmente estabelecidos nos códigos sísmicos em vigor em ambos os países vizinhos, como fica evidente da observação da Figura 1. Presentemente, no Algarve estão em vigor as ações sísmicas estabelecidas na NP EN 1998-1:2010 (EC8-1) [7], muito embora, para o estudo dos edifícios existentes, a ação a adotar seja somente uma percentagem desse valor, tal como está estipulado na NP EN 1998-3:2017 (EC8-3) [8], enquanto na região de Huelva está presentemente em vigor a NCSR-02 [9].

Muito embora não seja de estranhar o gradiente de valores observado entre as localizações mais a Este e as mais a Oeste, cujo máximo corresponde a Sagres (Algarve), já não é facilmente explicável a grande diferença que se observa na ação sísmica entre ambas as margens do rio Guadiana, que divide as duas regiões em estudo, designadamente entre a margem portuguesa e a margem espanhola.

Por outro lado, também é importante perceber quais as consequências das diferenças existentes na ação sísmica estabelecidas nas duas regiões em estudo, designadamente no valor do *School-score* considerado, e, conseqüentemente, nas eventuais necessidades de reforço sísmico, caso as escolas estudadas no Algarve, e as escolas estudadas na região de Huelva, fossem sujeitas ao nível de ação sísmica estabelecido na regulamentação do país vizinho.

Com vista à clarificação da origem do problema observado, neste trabalho foi realizada a avaliação da resposta sísmica não linear de edifícios de escolas do 1º ciclo do ensino básico, designadamente tendo por base os espectros de resposta elástica que estão definidos nas regulamentações de ambos os países, assim como os obtidos com leis de atenuação [10], para dois cenários de ocorrência de sismos, tentando gerar os níveis de aceleração que estão estabelecidos na NP EN 1998-1:2010 para Vila Real de Santo António (VRSA), no Algarve (Portugal).

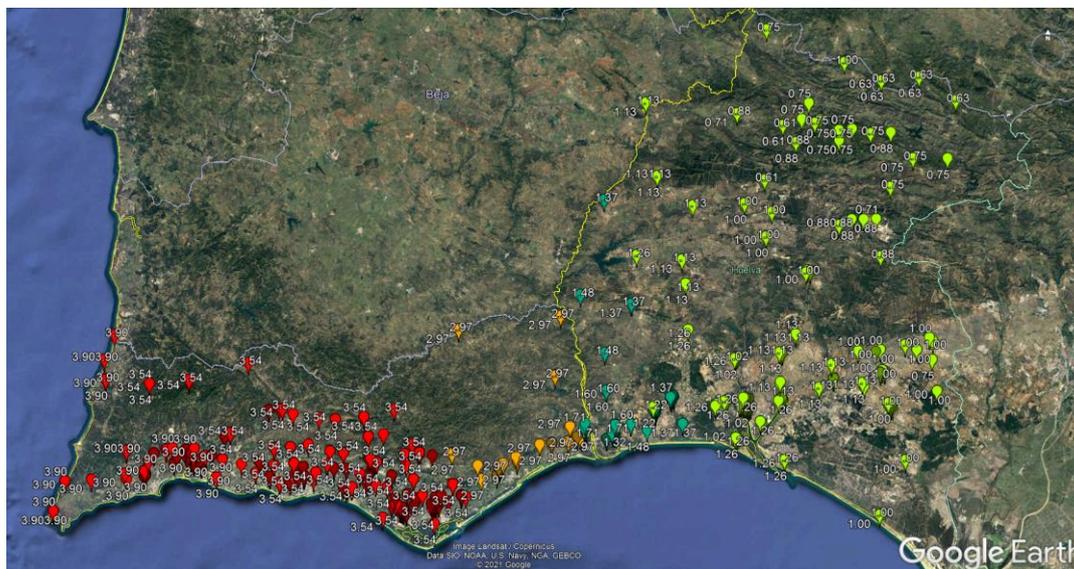


Figura 1. Localização das escolas do 1º ciclo do ensino básico identificadas no Algarve (Portugal) e em Huelva (Espanha), e correspondentes valores de aceleração de pico regulamentares ( $m/s^2$ ).

## 2 MÉTODOS DE ANÁLISE SÍSMICA ADOTADOS

Foram adotados os métodos de análise sísmica estática não linear que estão estipulados na NP EN 1998-3:2017 para a determinação das curvas de capacidade dos edifícios das escolas analisadas. Dada a existência de diversas equipas a determinarem curvas de capacidade, designadamente com recurso a distintos programas de cálculo automático (como o SAP2000 [11], o SeismoStruct [12] e o Tremuri [13], por exemplo), foi desenvolvido um programa informático que permitiu processar todas as curvas de capacidade em simultâneo, exportando depois os resultados para o Google Earth, de uma forma totalmente automática [6].

Este programa determina o ponto de desempenho associado a cada curva de capacidade para um espectro de resposta regulamentar ou para um cenário de ocorrência de um sismo, através do recurso a leis de atenuação. Existem duas opções para a determinação do ponto de desempenho da estrutura: o método N2 apresentado no Anexo B do EC8-1 (tanto a versão não iterativa como a versão iterativa), e o método do espectro de capacidade resistente (tal como também é proposto nas normas Italianas NTC 2018 [14, 15]).

Paralelamente, foi desenvolvido o conceito de curva de desempenho [6], que foi utilizado para obter a hierarquização da segurança sísmica dos edifícios das escolas existentes estudadas, tanto para as que possuem estrutura de betão armado [16], como para as construídas em alvenaria tradicional [17].

## 3 AÇÕES REGULAMENTARES PARA O ALGARVE E HUELVA

Uma das principais dificuldades que foram experienciadas durante o decorrer do projeto PERSISTAH, esteve associada à grande diferença observada na ação sísmica atualmente estipulada nos regulamentos nacionais de cada país, com consequentes diferenças nos níveis de segurança sísmica e nas eventuais necessidades de medidas de reforço.

### 3.1 ESPECTROS DE RESPOSTA ELÁSTICA

Como é possível verificar da comparação dos espectros de resposta elástica (Figura 2) estabelecidos na NP EN 1998-1:2010 para VRSA (Algarve), com a ação sísmica que está definida para Aiamonte na norma NCSR-02, a margem do lado de Portugal do Rio Guadiana, apresenta valores espectrais muito maiores do que os estabelecidos no lado Espanhol, para o mesmo tipo de terreno de fundação (terreno tipo C do EC8-1), quer para os edifícios correntes (classe de importância II, com  $\gamma_I = 1$ ), quer para as escolas (classe de importância III, com  $\gamma_I = 1.45$  para o sismo tipo 1, e  $\gamma_I = 1.25$  para o sismo tipo 2).

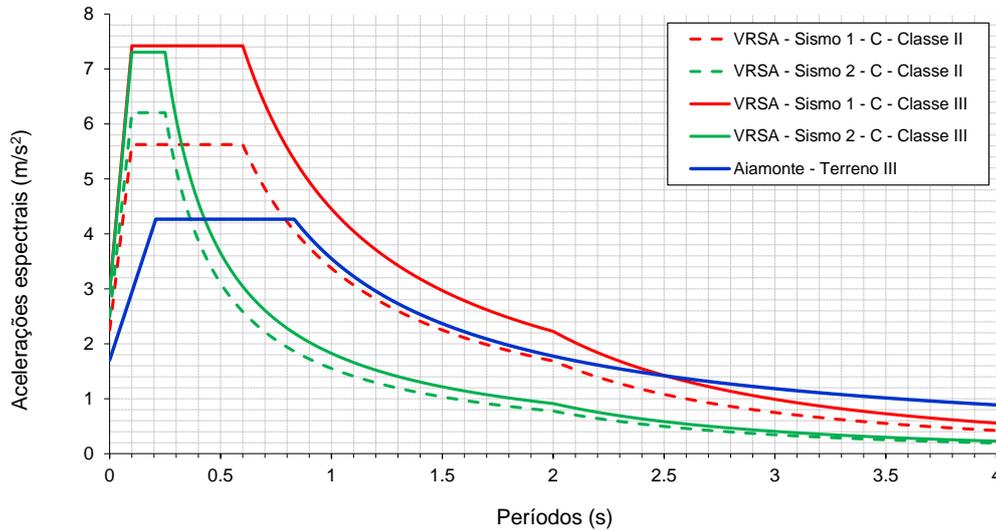


Figura 2. Espectros de resposta elástica estabelecidos na NP EN 1998-1:2010 (terreno tipo C) para Vila Real de Santo António (VRSA), e na NCSR-02 para Aiamonte (terreno tipo III).

### 3.2 SEGURANÇA SÍSMICA DAS ESCOLAS

Neste trabalho, foram escolhidas quatro das escolas em alvenaria que foram analisadas no contexto do projeto PERSISTAH, duas em cada região, designadamente os edifícios que foram alvo de intervenção com introdução de algumas medidas de reforço sísmico (antes do reforço), que correspondem à Escola Básica de Brancanes (Escola FP2 [17]), localizada no município de Olhão (Algarve), e a um dos edifícios do Colegio Los Lanos [18], em Almonte (Huelva), assim como foi selecionado um os edifícios da Escola Básica de Monte Gordo (Escola AS5 [17]), no Algarve, juntamente com o Colegio Juan Ramón Jiménez (JRJ). Desta forma, foi possível comparar o desempenho sísmico de algumas das escolas mais vulneráveis de ambas as regiões. As conclusões sobre a segurança sísmica dessas escolas são diferentes, caso todas estivessem localizadas em VRSA ou em Aiamonte. A escola AS5 não apresenta capacidade sismorresistente para atingir os níveis de segurança estabelecidos, quer na regulamentação de Portugal, quer na de Espanha. Já quanto à escola FP2, esta não cumpre os níveis de segurança estabelecidos em Portugal, contudo cumpre os de Espanha. Por outro lado, o Colegio JRJ consegue resistir à ação sísmica estipulada para Aiamonte, mas não relativamente à estipulada para VRSA, e o Colegio Los Lanos não cumpre os níveis de segurança de ambos os países, como é evidente da observação da Figura 3.

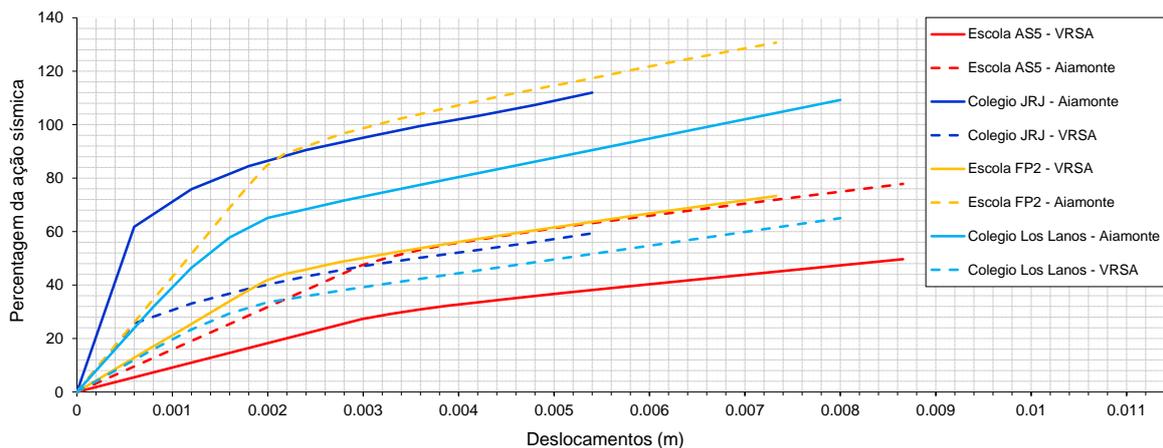


Figura 3. Curvas de desempenho [6] de quatro escolas em Alvenaria, caso todas estivessem em VRSA (Algarve), ou em Aiamonte (Huelva), obtidas através da quantificação dos pontos de desempenho das estruturas para diferentes percentagens da ação estipulada para escolas na NP EN 1998-1:2010 (VRSA) e na NCSR-02 (Aiamonte).

## 4 CENÁRIOS DE OCORRÊNCIA DE SISMOS

As diferenças observadas na ação sísmica podem desvirtuar as conclusões sobre as necessidades de reforço sísmico das escolas localizadas nas regiões vizinhas do Algarve (Portugal) e de Huelva (Espanha).

Assim, com vista a um melhor esclarecimento do nível de segurança sísmica, foram considerados alguns cenários de ocorrência de sismos.

Na NP EN 1998-5:2010 [19], estão definidas as magnitudes dos sismos a considerar em estudos de liquefação. Desta forma, é suposto uma escola localizada em VRSA resistir à ação de um sismo afastado (tipo 1) de magnitude 7.7, e a um sismo próximo (tipo 2) de magnitude 5.2.

De acordo com o catálogo sísmico do IGN [20], o sismo de maior magnitude ocorrido no período instrumental, e que teve epicentro nas regiões do Algarve e de Huelva, ocorreu com magnitude  $M=5.0$  em 1989/12/20, na latitude  $37.225^\circ$  e na longitude  $-7.3917^\circ$ , a uma profundidade de 23 km. Esta localização corresponde a um local de Espanha, próximo de Aiamonte, a cerca de 2 km da fronteira com Portugal. A escola básica do 1º ciclo mais próxima, está localizada em Espanha a uma distância epicentral de cerca de 1.2 km. Assim, esta localização será a ideal para que seja estabelecido o cenário de sismo próximo, com uma magnitude  $M=5.2$ . Usando a distância ao foco e uma lei de atenuação [10], para se atingir o valor de aceleração de pico estipulado para uma escola localizada em VRSA num terreno A, o foco teria de ocorrer somente a 6.8 km de profundidade.

De acordo com o mesmo catálogo sísmico, o sismo de magnitude superior a 4.5 ocorrido no mar que se encontra à menor distância de VRSA, corresponde a um sismo de magnitude  $M=4.9$  ocorrido em 2005/01/03, na latitude  $36.6161^\circ$  e na longitude  $-7.5947^\circ$ , a uma profundidade de 61 km. Assim, foi considerada uma rotura com epicentro nesse local, a uma profundidade de foco de 10 km e correspondente a um plano com um azimute igual a  $244.5^\circ$ , e com uma inclinação de  $64^\circ$ , tendo sido considerada a menor distância à rotura para o cálculo do espectro de resposta. Neste caso, não foi possível obter a aceleração estipulada na NP EN 1998-1:2010 para VRSA ( $2.175 \text{ m/s}^2$ ) para a localização da Escola Básica de Monte Gordo, mas sim um valor um pouco inferior ( $1.705 \text{ m/s}^2$ ).

Adotando a técnica implementada em computador no projeto PERSISTAH [6], é possível obter os espectros tipo EC8-1 ajustados aos resultados de uma lei de atenuação (Figura 4).

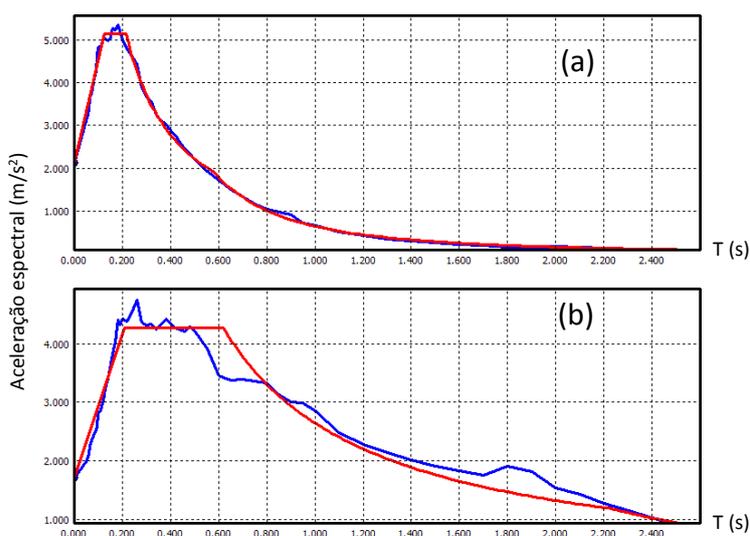


Figura 4. Espectros de resposta elástica obtidos com uma lei de atenuação [10], para os cenários: (a) de sismo próximo (tipo 2); (b) de sismo afastado (tipo 1).

Com base nestes dois cenários de ocorrência de sismos (que não coincidem com as ações estipuladas para ambos os países), foram obtidos os pontos de desempenho das escolas atrás referidas (Figuras 5 e 6), de modo a avaliar a sua segurança sísmica num terreno tipo A.

Visando a verificação da adequação da lei de atenuação escolhida [10] às regiões em estudo, os resultados desta foram previamente comparados com os espectros de resposta dos registos obtidos em Portimão após o sismo ocorrido em 2009/12/17 [21] (o sismo que originou as maiores acelerações registadas até ao momento no Algarve). Isto permitiu constatar que a lei de atenuação selecionada constitui uma opção válida para a região.

Para o cenário estabelecido para o sismo próximo, a escola AS5 não colapsa mas ultrapassa o estado limite de danos severos (SD), enquanto que a escola FP2, o Colegio JRJ, e o Colegio Los Lanos têm um comportamento adequado, não ultrapassando o estado limite SD estipulado no EC8-3.

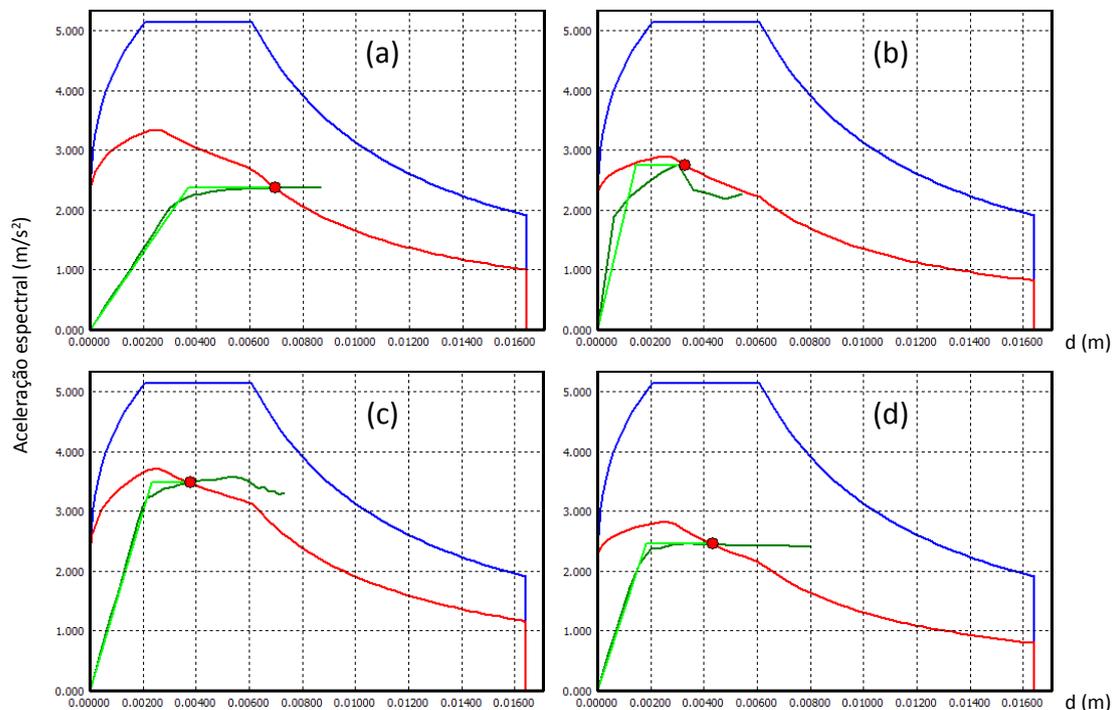


Figura 5. Pontos de desempenho determinados para o cenário de sismo próximo e a pior curva de capacidade: (a) Escola AS5; (b) Colegio JRJ; (c) Escola FP2; (d) Colegio Los Lanos.

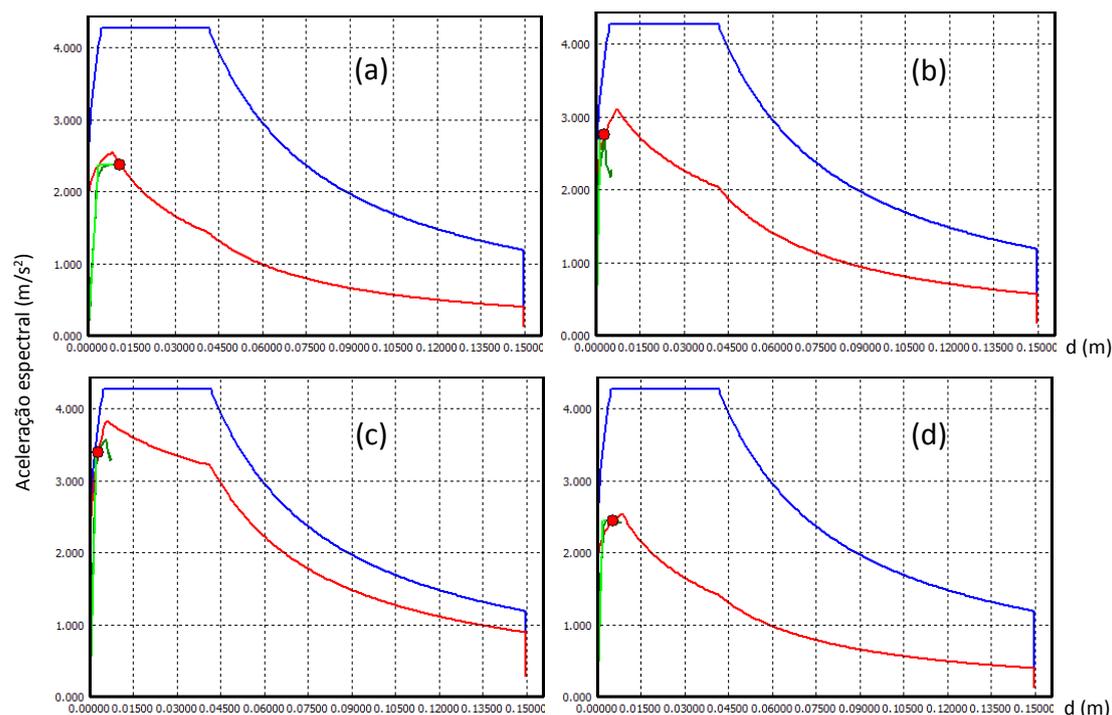


Figura 6. Pontos de desempenho determinados para o cenário de sismo afastado e a pior curva de capacidade: (a) Escola AS5; (b) Colegio JRJ; (c) Escola FP2; (d) Colegio Los Lanos.

Já em relação ao cenário estabelecido para o sismo afastado, a Escola AS5 iria colapsar, enquanto que a escola FP2, o Colegio JRJ, e o Colegio Los Lanos, ainda continuariam a apresentar um comportamento que pode ser considerado como adequado, dado que a resposta sísmica a este sismo não originava um deslocamento superior ao valor associado ao estado limite SD.

É de salientar que o cenário estabelecido para o sismo afastado, não parece ser muito plausível no contexto da localização de VRSA e Aiamonte, designadamente tendo em atenção a sismicidade que é observada na região envolvente, ao contrário do cenário de sismo próximo.

## 5 CONCLUSÕES

As diferenças observadas entre os valores estipulados na regulamentação de Portugal e de Espanha, em locais da fronteira entre as regiões do Algarve e de Huelva, podem levar a conclusões erróneas sobre a capacidade resistente das escolas localizadas em ambas as regiões vizinhas, dado que a ação estipulada para o Algarve é muito superior à estipulada para a região de Huelva, sendo ainda agravada essa diferença através do coeficiente de importância.

Assim, os resultados obtidos neste trabalho sugerem que devem ser realizados mais estudos de perigosidade sísmica relativamente a estas duas regiões vizinhas, designadamente com vista ao esclarecimento de qual será a ação sísmica mais adequada para a avaliação da segurança sísmica dos edifícios que estão lá localizados, principalmente para os cenários de ocorrência de sismos afastados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa INTERREG-POCTEP Espanha-Portugal e ao Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) pelo apoio financeiro através do projeto 0313\_PERSISTAH\_5\_P.

## REFERÊNCIAS

- [1] Alberto, Y., Otsubo, M., Kyokawa, H., Kiyota, T., Towhata, I. (2018). Reconnaissance of the 2017 Puebla, Mexico earthquake. *Soils and Foundations* 58:1073-92. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.06.007>.
- [2] Augenti, N., Cosenza, E., Dolce, M., Manfredi, G., Masi, A., Samela, L. (2004). Performance of School Buildings during the 2002 Molise, Italy, Earthquake. *Earthquake Spectra* 20:S257-S70. <https://doi.org/10.1193/1.1769374>.
- [3] Chen, H., Xie, Q., Lan, R., Li, Z., Xu, C., Yu, S. (2017). Seismic damage to schools subjected to Nepal earthquakes, 2015. *Natural Hazards* 88:247-84. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2865-8>.
- [4] Di Ludovico, M., Digriolo, A., Moroni, C., Graziotti, F., Manfredi, V., Prota, A. *et al.* (2018). Remarks on damage and response of school buildings after the Central Italy earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0332-x>
- [5] Kabeyasawa, T. (2017). Damages to RC school buildings and lessons from the 2011 East Japan earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering* 15:535-53. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9825-z>.
- [6] Estêvão, J.M.C. (2019). An integrated computational approach for seismic risk assessment of individual buildings. *Applied Sciences* 9:5088. <https://doi.org/10.3390/app9235088>.
- [7] IPQ (2010). NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios. Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- [8] IPQ (2017). NP EN 1998-3. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios. Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- [9] NCSR-02 (2002). Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (Real Decreto 997/2002).
- [10] Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K., Smit, P.M. (2005). Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering* 3:1-53. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-0183-0>.
- [11] Computers & Structures, I. (2015). SAP 2000 – Structural Software for Analysis and Design. V18. Berkeley.
- [12] Seismosoft (2016). SeismoStruct 2016 Release-1 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. <http://www.seismosoft.com>.
- [13] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures* 56:1787-99. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>.
- [14] NTC (2018). Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». Roma: Ministero delle infrastrutture e dei trasporti.
- [15] NTC (2019). Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. Roma: Ministero delle infrastrutture e dei trasporti.
- [16] Estêvão, J.M.C., Esteves, C. (2020). Nonlinear Seismic Analysis of Existing RC School Buildings: The “P3” School Typology. *Buildings* 10:210. <https://doi.org/10.3390/buildings10110210>.
- [17] Estêvão, J.M.C., Tomás, B. (2021). Ranking the Seismic Vulnerability of Masonry School Buildings according to the EC8-3 by Using Performance Curves. *International Journal of Architectural Heritage*:1-16. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1904458>.
- [18] Esteban, A.M., Sánchez, E.R., Blanco, B.Z., Cruz, M.V.R.G.d.I., Rodríguez, J.d.M., Estêvão, J. (2020). Rehabilitación sísmica estructural de colegios de educación primaria. Sevilla: Editorial Universidad de Sevilla.
- [19] IPQ (2010). NP EN 1998-5. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 5: Fundações, estruturas de suporte e aspectos geotécnicos. Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- [20] IGN (2020). Instituto Geográfico Nacional. Catálogo de terremotos. <http://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos>.
- [21] Estêvão, J.M.C., Oliveira, C.S. (2010). Utilização de acelerogramas simulados na análise sísmica de estruturas. 8º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. Aveiro: Universidade de Aveiro. p. 1-13.