

CONSTRUÇÃO E PROTEÇÃO SÍSMICA

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DO PARQUE HABITACIONAL EUROPEU NO CONTEXTO DO PROJETO EUROPEU SERA

Pereira, N.¹, Romão, X.¹, Castro, J.M.¹, Varum, H.¹, Crowley, H.², Silva, V.³

¹ CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

² EUCENTRE, Pavia, Itália.

³ GEM Foundation, Pavia, Itália

Os sismos são um dos fenómenos naturais cuja ocorrência se pode transformar numa catástrofe com impactos socioeconómicos significativos. A sismicidade histórica mostra que o risco associado à ocorrência de um sismo de magnitude relevante, capaz de provocar uma catástrofe de dimensões expressivas, é particularmente elevado em várias regiões do sul da Europa e do Mediterrâneo. Os sismos de Lisboa em 1755, do Algarve em 1969, do Montenegro em 1979, de Vancra na Roménia em 1990, de Atenas na Grécia em 1999, de Izmit na Turquia em 1999, de L'Aquila em 2009 e de Emilia Romagna em 2012 na Itália, bem como os que afetaram várias regiões do centro de Itália entre 2016 e 2017, são alguns dos eventos que tiveram impactos socioeconómicos bastante significativos nestas regiões.

A relevância dos níveis de risco sísmico referidos é amplamente reconhecida e tem impulsionado, ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento de vários projetos de investigação europeus de grande escala nesta temática. Alguns desses projetos abordaram a definição de novos modelos para a perigosidade sísmica [projeto SHARE, <http://www.share-eu.org/>, Woessner et al. 2015], para a fragilidade e a vulnerabilidade de vários tipos de infraestruturas [projeto Syner-G, <http://www.vce.at/SYNER-G/files/project/project-overview.html>, Pitilakis et al., 2014] e para a exposição do edificado [projeto NERA, Crowley et al., 2012]. Mais recentemente, foi lançado o projeto SERA [Seismology and Earthquake

Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe, <http://www.sera-eu.org/en/home/>] que tem como um dos objetivos o desenvolvimento de um modelo probabilístico de risco sísmico para a totalidade do território europeu.

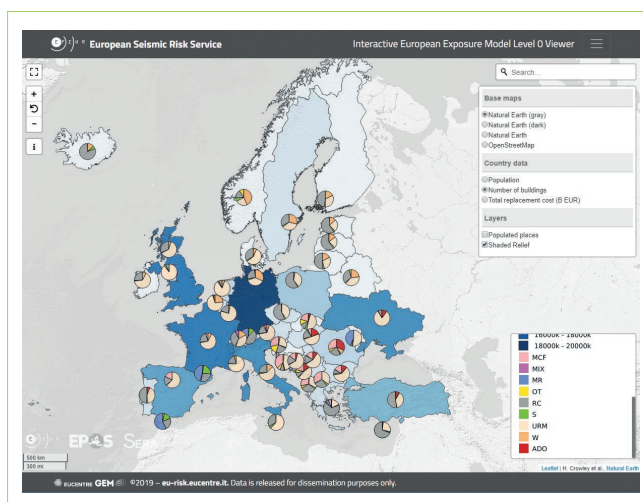
A avaliação probabilística de risco sísmico tem como objetivo estimar danos e perdas expectáveis resultantes de potenciais sismos futuros. Estes impactos podem ocorrer nos edifícios e infraestruturas, nas pessoas ou no meio ambiente. Em termos simplificados, uma avaliação probabilística de risco sísmico combina a perigosidade sísmica, funções de fragilidade/vulnerabilidade associadas a cada tipologia de elemento em risco, e modelos de exposição que descrevem a localização, as tipologias, as características e o valor dos elementos em risco:

$$\text{Risco sísmico} = \text{Perigosidade sísmica} \otimes \text{Vulnerabilidade} \otimes \text{Exposição}$$

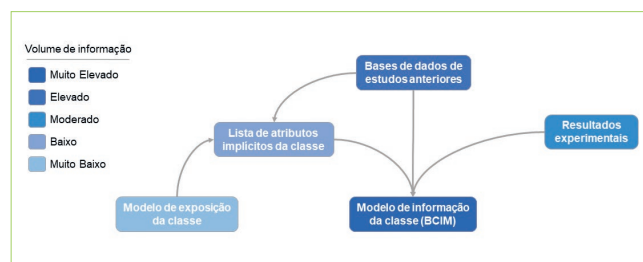
No contexto da avaliação de risco, salienta-se que a relação entre as funções de fragilidade/vulnerabilidade e os modelos de exposição é particularmente importante de modo a garantir a consistência e o realismo dos resultados obtidos. Relativamente a este aspeto em particular, o projeto SERA tem vindo a desenvolver novas abordagens mais robustas que visam aumentar a fidelidade dos resultados obtidos, algumas das quais são apresentadas sumariamente ao longo do presente artigo.

MODELOS DE EXPOSIÇÃO DO EDIFICADO: POSSIBILIDADES E LIMITAÇÕES

Um modelo de exposição do edificado estabelece a distribuição espacial dos edifícios expostos ao risco sísmico e inclui vários tipos de informação sobre os mesmos. Essa informação deve incluir a função e o tipo de ocupação dos edifícios, o seu valor económico e o das atividades que nele se encontram alojadas, mas também características relevantes que, do ponto de vista estrutural, permitam classificar o seu desempenho face à ação sísmica. A consideração dessas características (normalmente designadas por atributos) tem como objetivos organizar os múltiplos tipos de edifícios do parque edificado em classes e possibilitar a definição duma representação tipificada do seu comportamento estrutural (e, portanto, da sua fragilidade/vulnerabilidade) face à ação sísmica. A lista de atributos (normalmente designada por taxonomia) deve envolver propriedades mais gerais, como por exemplo o tipo de material de construção, o número de pisos ou o ano de construção, e propriedades mais específicas, como por exemplo o tipo de estrutura resistente às ações laterais ou o nível de ductilidade passível de ser explorada durante a ocorrência de um sismo. De modo a ilustrar estes conceitos, a Figura 1 apresenta a distribuição espacial do número de edifícios residenciais, comerciais e industriais por tipo de material de construção, que consta da



> 1



> 2

versão v0.1 do modelo de exposição europeu atualmente em desenvolvimento no âmbito do projeto SERA, sob a coordenação do EUCentre. Para a definição duma taxonomia aplicável a nível europeu, é importante reconhecer que a versatilidade das várias tecnologias construtivas faz com que os edifícios existentes tenham características distintas de região para região. Entre outros aspetos, essa variabilidade depende da evolução da regulamentação de cada país para o dimensionamento de estruturas, em particular a regulamentação para estruturas sísmo-resistentes, assim como da utilização preferencial de diferentes técnicas e processos construtivos. Relativamente a este último fator, destacam-se aspetos relacionados com as tipologias construtivas da estrutura resistente vertical e da estrutura resistente horizontal, bem como com as possíveis configurações em planta. A multiplicidade de sistemas e tipos de estruturas que daí resultam são um aspeto crítico que dificulta a definição de um modelo de exposição detalhado dos edifícios existentes. Estabelecer um modelo de exposição que inclui todas as classes de edifícios apresenta dificuldades que são proporcionais à dimensão do parque edificado em análise, dado não existir informação detalhada sobre todos os edifícios que permita uma caracterização detalhada e completa de todos os atributos relevantes. Estas dificuldades levam a que, tipicamente, o modelo de exposição adote um conjunto limitado de classes de edifícios, e que estas classes, por sua vez, apenas incluam de forma explícita, na sua taxonomia, atributos que podem ser mais objetivamente catalogados ao

longo de todo o espaço geográfico considerado na análise. Com base nestas limitações, observa-se que a forma como os modelos de exposição são usualmente definidos apenas permite obter uma representação explícita de parte das características necessárias para definir a fragilidade/vulnerabilidade sísmica duma determinada classe de edifícios. As restantes características deverão ser tidas em conta de forma implícita, sendo incluídas nas fontes de incerteza que permitem estabelecer a variabilidade da fragilidade/vulnerabilidade sísmica dessa classe. Assim, essa variabilidade deverá não só incluir diferenças gerais que ocorrem de edifício para edifício devido a fatores aleatórios, e.g. opções construtivas ou dos projetistas, mas também deverá refletir a incerteza que resulta do facto de vários atributos que alteram significativamente o comportamento sísmico não serem objetivamente conhecidos. Neste contexto, a *framework* atualmente em desenvolvimento no âmbito do projeto SERA, sob a coordenação da Universidade do Porto, contempla estes dois tipos de incerteza e estabelece uma ligação consistente entre os modelos de exposição atuais e uma representação robusta da fragilidade/vulnerabilidade sísmica duma determinada classe de edifícios, a múltiplas escalas [cidade, região, país, continente]. Sumariamente, a estratégia genérica seguida na *framework* consiste na definição do modelo de informação para uma dada classe de edifícios (BCIM), onde se incluem não apenas as características da classe, mas também todos os atributos implícitos e informação relativa às suas propriedades. Estes últimos

parâmetros são introduzidos a partir de bases de dados que foram agregadas e que incluem resultados de projetos de investigação anteriores, estudos disponíveis na literatura técnica, assim como dados de campanhas experimentais realizadas no passado. Os fluxos e os volumes de informação entre o modelo de exposição e o BCIM de cada classe são ilustrados na Figura 2.

MODELAÇÃO DA FRAGILIDADE/VULNERABILIDADE SÍSMICA PARA ESTUDOS DE RISCO A MÚLTIPLAS ESCALAS

Uma curva de fragilidade é um modelo estatístico onde cada valor da curva representa a probabilidade de atingir ou exceder um determinado estado de dano, condicionada à ocorrência do nível de intensidade da ação sísmica correspondente. Por sua vez, uma função de vulnerabilidade representa uma métrica que estabelece um determinado nível de perda médio (e.g. uma razão entre o custo de reparação duma construção e o seu valor económico, ou uma razão entre o número de mortes e o número de ocupantes dum edifício), condicionada à ocorrência do nível de intensidade da ação sísmica correspondente. A definição duma função de vulnerabilidade é feita através da conversão da informação representada por uma ou mais curvas de fragilidade usando um modelo de consequência que converte a ocorrência dum determinado estado de dano numa estimativa média da variável representada pela função de vulnerabilidade.

No âmbito da metodologia em desenvolvimento

> **Figura 1:** Distribuição do número de edifícios residenciais, comerciais e industriais na Europa por tipo de material de construção, de acordo com a versão v0.1 do modelo de exposição (<https://maps.eu-risk.eucentre.it/map/european-exposure-level-0/#4/54.95/23.91>).

> **Figura 2:** Esquematisação do fluxo de informação entre o modelo de exposição e o BCIM no âmbito do projeto SERA.

to no projeto SERA, as curvas de fragilidade para diferentes estados de dano e para as várias classes de edifícios são estabelecidas de modo a:

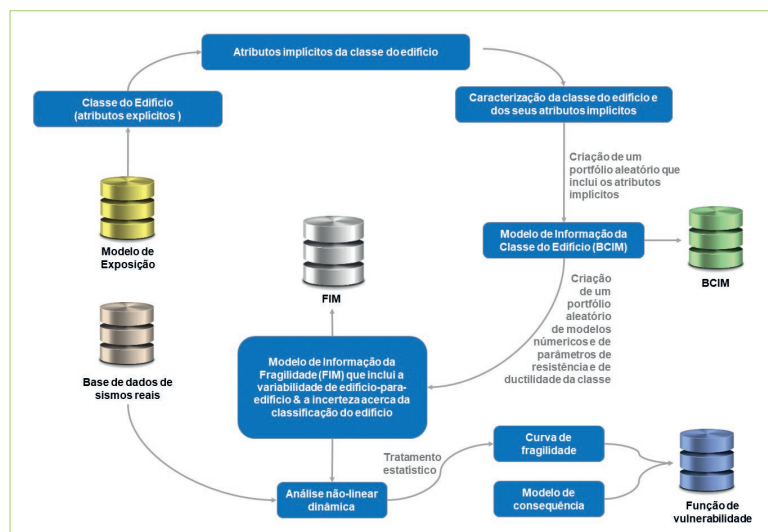
- atender às fontes de incerteza mais importantes de forma consistente, permitindo a sua aplicação a múltiplas escalas;
- considerar uma medida robusta da intensidade da ação sísmica que permita controlar e minimizar os efeitos da incerteza associada à ação sísmica.

Do ponto de vista das fontes de incerteza, além dos aspetos que irão ser discutidos em seguida associados à variabilidade edifício-a-edifício pertencentes a uma determinada classe, as curvas de fragilidade são desenvolvidas de modo a considerar ainda o efeito da variabilidade dos movimentos sísmicos (a chamada variabilidade do comportamento estrutural de sismo para sismo), conhecida por ser responsável por uma parcela significativa da incerteza total (e.g. [Kwon e Elnashai, 2006]). Relativamente à medida da intensidade da ação sísmica, as curvas de fragilidade estão a ser desenvolvidas utilizando a aceleração espectral média (i.e. a média geométrica dos valores de aceleração espectral numa gama de períodos), reconhecida por ser uma medida de intensidade mais robusta e reduzir os efeitos da variabilidade da ação sísmica (e.g. [Eads et al., 2015, Kohrangi et al., 2017]). Em termos da variabilidade edifício-a-edifício e à forma como essa variabilidade é modelada, o princípio base da metodologia desenvolvida reside na representação probabilística de todos os atributos que contribuem para a alteração da fragilidade/vulnerabilidade sísmica de uma determinada classe de edifícios e que não sejam explicitamente considerados na taxonomia definida para essa classe no modelo de exposição. Esta abordagem metodológica, que se apresenta resumidamente na Figura 3, parte, portanto, da identificação do conjunto de atributos explicitamente considerados no modelo de exposição e dos restantes atributos que terão de ser considerados de forma implícita. Duma forma geral, estes atributos

implícitos representam características relevantes para a definição da resistência lateral e da ductilidade dos edifícios em diferentes épocas, que são conjugadas com um conjunto de regras de dimensionamento e propriedades estruturais modeladas de forma probabilística. Esta combinação permite então estabelecer um modelo de informação da classe do edifício (o BCIM) que é, em seguida, usado para gerar múltiplas realizações da classe (i.e. múltiplas estruturas dessa classe). Essas múltiplas realizações da classe são posteriormente associadas a procedimentos para sua modelação numérica, definidas com base na classe de edifícios em análise, de modo a formar o modelo de informação da fragilidade (FIM). Os modelos estruturais representados pelo FIM são de seguida analisados de modo a quantificar a sua resposta estrutural face à ação sísmica e integrar a variabilidade de sismo para sismo. Estas análises (não-lineares dinâmicas, considerando um conjunto de registos sísmicos reais) podem ser feitas utilizando um modelo tridimensional completo de cada realização estrutural, ou modelos simplificados equivalentes com um grau de liberdade para cada uma das duas direções de análise, tendo sido esta última abordagem de modelação utilizada em estudos de risco sísmico anteriores (e.g. Mouroux et al., 2004; Villar-Vega et al., 2017; Martins e Silva, 2018). As realizações da resposta estrutural obtidas das análises não-lineares dinâmicas dos modelos para um conjunto de registos

sísmicos reais (os quais envolvem múltiplos níveis de intensidade) são posteriormente comparadas com valores máximos associados a estados de dano predefinidos. O tratamento estatístico desses resultados permite então estabelecer as curvas de fragilidade de cada um desses estados de dano, as quais são posteriormente transformadas em funções de vulnerabilidade recorrendo aos referidos modelos de consequência. No contexto do modelo europeu de risco sísmico que se encontra em desenvolvimento no âmbito do projeto SERA, a vulnerabilidade será descrita em termos de perdas económicas diretas devidas a danos estruturais e não estruturais nos edifícios (i.e. a razão entre o custo de reparação e o custo de substituição do edifício) e em termos de perda de vidas humanas.

Após a obtenção de um conjunto de funções de vulnerabilidade para várias classes de edifícios, a metodologia do projeto SERA contempla vários processos de validação da robustez das mesmas. Por exemplo, atendendo ao tipo de medida de intensidade da ação sísmica considerada, será possível efetuar uma comparação direta de todas as funções de vulnerabilidade desenvolvidas de modo a verificar se essas funções são capazes de representar o desempenho sísmico esperado para os vários materiais e sistemas estruturais. Além desta comparação, serão ainda implementadas verificações adicionais que permitem avaliar a capacidade das funções de vulnerabilidade de reproduzir perdas e danos observados em eventos sísmicos ocorridos no passado.



> 3

> Figura 3: Esquematização do desenvolvimento duma função de vulnerabilidade sísmica no âmbito do projeto SERA.

NOTAS FINAIS

Está atualmente a ser desenvolvido um modelo de risco sísmico europeu através de um esforço colaborativo entre o projeto SERA, o Global Earthquake Model e vários investigadores de toda a Europa. Este modelo de risco sísmico é fundamental para o desenvolvimento de estratégias e políticas de redução de risco sísmico, sendo esperado que o seu lançamento ocorra em 2020. Este modelo será partilhado com a comunidade técnica e científica através da plataforma European Facilities for Earthquake Hazard and Risk (<http://www.efehr.org>), esperando-se que venha a ser atualizado e melhorado ao longo dos anos através de esforços adicionais de colaboração e investigação na Europa. Neste contexto, o presente artigo descreve de forma sucinta alguns dos desenvolvimentos atualmente em curso para a criação de uma *framework* avançada com o objetivo de caracterizar a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional europeu. ■■

REFERÊNCIAS

- Crowley, H., Özcebe, S., Spence, R., Foulser-Piggott, R., Erdik, M., Alten, K. (2012) Development of a European building inventory database. In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Eads, L., Miranda, E., Lignos, D. G. (2015) Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(12), 2057-2073.
- Kohrangi, M., Bazzurro, P., Vamvatsikos, D., Spillatura, A. (2017) Conditional spectrum-based ground motion record selection using average spectral acceleration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(10), 1667-1685.
- Kwon, O., Elnashai, A. (2006) The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure. *Engineering structures*, 28(2), 289-303.
- Martins, L., Silva, V. (2018) A Global Database of Vulnerability Models for Seismic Risk Assessment. Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece
- Mouroux, P., Le Brun, B.T. (2006) Presentation of RISK-UE Project. *Bulletin of Earthquake Engineering* 4, 323-339.
- Pitilakis, K., Crowley, H., Kaynia, A. (Eds) (2014) SYNER-G: typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk. Springer Science & Business Media.
- Romão, X., Castro, J.M., Pereira, N., Crowley, H., Silva, V., Martins, L., Rodrigues, D. (2019) European physical vulnerability models. SERA Deliverable, under review.
- Villar-Vega, M., Silva, V. (2017) Assessment of earthquake damage considering the characteristics of past events in South America. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 99, 86-96.
- Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R., Rovida, A., Sesetyan, K., Stucchi, M., The SHARE Consortium (2015). The 2013 European seismic hazard model: key components and results. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(12), 3553-3596.

Expert A⁺

PROMOÇÃO DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA E HÍDRICA
EM INFRAESTRUTURAS
COMPLEXAS

3º SEMINÁRIO EXPERT A⁺

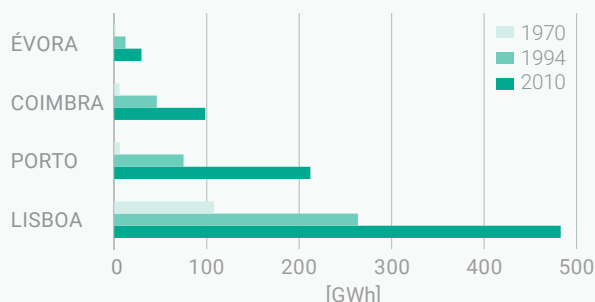
OS DESAFIOS DOS EDIFÍCIOS
PÚBLICOS COM GRANDES
CONSUMOS DE ENERGIA E ÁGUA

Mais informação em www.expert.uc.pt

POCI-01-0246-FEDER-026751

CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA
EDIFÍCIOS DO ESTADO

FONTE: PORDATA

CONSUMO DE ÁGUA POR UTENTE
NOS CENTROS HOSPITALARES

FONTE: ANQIP

250 LITROS/(cama.dia)

COMPETE
2020

PORTUGAL
2020



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional