


# Avaliação expedita do risco sísmico de bens culturais imóveis

Xavier Romão<sup>1,\*</sup>   
Esmeralda Paupério<sup>2</sup>  
Nuno Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>2</sup> Instituto da Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

\*xnr@fe.up.pt

## Resumo

O artigo apresenta uma metodologia simplificada para a avaliação do risco que foi desenvolvida especificamente para o património cultural imóvel. Envolve as várias componentes necessárias para uma avaliação do risco e pode ser utilizada como um procedimento de triagem para a análise preliminar de um grande número de bens culturais utilizando recursos limitados. Pode igualmente ser usada no caso de bens culturais que exigem uma avaliação de risco mais detalhada. A metodologia proposta é um método qualitativo que se baseia num conjunto de questionários estruturados que integram as principais componentes duma avaliação de risco: a probabilidade do perigo, as consequências do perigo, a vulnerabilidade do bem aos efeitos do perigo, a perda de valor do bem e a capacidade de recuperação após o evento. De modo a ilustrar a sua aplicação, apresenta-se um caso de estudo onde se analisa o risco sísmico duma igreja em Itália que foi danificada pelo sismo de L'Aquila, em 2009.

## Palavras-chave

Avaliação de risco  
Vulnerabilidade  
Perigo  
Património Cultural Imóvel  
Valor do Património Cultural

## Simplified risk assessment of immovable cultural heritage assets

## Abstract

A simplified risk assessment framework specifically developed for built immovable cultural heritage assets is proposed. The framework addresses the several components involved in a risk analysis and can be used as a screening procedure for the preliminary assessment of a large number of assets with limited resources. It can also be used to identify cultural heritage assets that require a more refined and resource demanding risk evaluation. The proposed risk analysis framework falls into the category of qualitative methods and is based on a series of structured questionnaires that address the main components of a risk analysis: the likelihood of the hazard, the consequences of the hazard, the vulnerability of the asset to the hazard, the loss of value of the asset and the capacity to recover from the event. In order to illustrate its application, a case study is presented in which the risk analysis is performed for a church in Italy that was damaged, in 2009, by the L'Aquila earthquake.

## Keywords

Risk assessment  
Vulnerability  
Hazard  
Immovable Cultural Heritage  
Cultural Heritage value

ISSN 2182-9942



## Introdução

O Património Cultural é um valor social constituído pela herança das gerações anteriores que se pretende que seja transmitido às gerações vindouras no espírito dos conceitos de autenticidade e integridade. Atualmente, o Património Cultural é amplamente reconhecido como sendo uma parte essencial do capital socioeconómico de um país, constituindo ainda um repositório insubstituível de conhecimento e um recurso valioso para o crescimento económico e para a coesão social.

Tal como outros recursos, o Património Cultural é vulnerável à ação de vários perigos de origem natural e antrópica, dos quais podem resultar diversos tipos de danos ou mesmo a sua perda total. No caso do presente artigo, será unicamente abordado o efeito da ação sísmica sobre bens culturais imóveis dado que se tem verificado que o impacto de sismos de intensidade média/elevada tem provocado perdas irreversíveis nas regiões atingidas. Ao longo dos últimos quinze anos, estes efeitos destrutivos foram sendo observados em várias ocasiões, como se pode verificar pelos danos e perdas em Património Cultural resultantes dos sismos que ocorreram no Irão (2003), na Indonésia (2004), no Paquistão (2005 e 2013), em Itália (2009, 2012 e 2016), na China (2008), no Chile (2010), no Haiti (2010), no Japão (2011), no Nepal (2015) ou na Birmânia (2016).

Dado que o risco sísmico é relevante em várias zonas do território nacional, as instituições ligadas à gestão e utilização do Património Cultural devem estar preparadas para o proteger e preservar. De modo a poder atingir esses objetivos, essas instituições devem estabelecer políticas de preservação e proteção assentes numa avaliação do risco e num planeamento das intervenções necessárias (ao nível da prevenção e da implementação de medidas de proteção desse Património), de forma a controlar e a minimizar as perdas e os danos caso ocorra um sismo. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia para avaliação expedita do risco sísmico em Património Cultural cuja aplicação é dirigida unicamente para os bens culturais imóveis cujo principal material construtivo é a alvenaria. Esta metodologia foi desenvolvida no âmbito do projeto QREN POVT-12-0435-FCOES-000225, “Estudo para Caracterização do Risco Sísmico de Tsunami”, coordenado pela Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC). De acordo com o âmbito da referida metodologia, salienta-se que alguns dos elementos que a constituem poderão incorporar informação acerca de bens culturais integrados (e.g. azulejaria, pintura decorativa, elementos decorativos e escultóricos em pedra natural ou artificial, vitrais) que se encontrem associados ao bem cultural imóvel.

## Objetivos da metodologia proposta

O âmbito e a abrangência duma análise de risco sísmico são geralmente condicionados pelos recursos humanos e financeiros disponíveis e pela quantidade de

bens que se pretende que sejam objeto de análise, devendo esta análise de risco ser realizada no mais curto espaço de tempo. Por outro lado, dado que o risco é uma grandeza dinâmica que pode variar ao longo do tempo mediante alterações no estado dos bens, a implementação de determinada metodologia de análise de risco deverá ter igualmente em conta a necessidade de fazer atualizações regulares dos resultados da avaliação do risco. Essas atualizações são fundamentais para se monitorizar a evolução do risco ao longo do tempo, pretendendo-se que estas sejam feitas com reduzido acréscimo de custos.

Fazer uma avaliação probabilística detalhada do risco sísmico a que está sujeito um determinado bem cultural imóvel requer, geralmente, uma equipa de profissionais com conhecimentos técnicos elevados nas diversas áreas relevantes para o problema em análise e uma quantidade significativa de informação detalhada sobre o bem cultural imóvel em estudo. Assim, de modo a poder contemplar os diferentes aspetos da análise com o máximo rigor possível, é expectável que essa avaliação mobilize recursos humanos e financeiros importantes e que não possa ser realizada num curto espaço de tempo. Apesar dos resultados que podem ser obtidos duma análise de risco deste tipo serem importantes para a definição e a avaliação da eficácia de medidas de proteção que possam ser necessárias para um determinado bem cultural (e.g. medidas de reabilitação e/ou reforço estrutural), considera-se igualmente importante definir metodologias de abordagem mais simples que permitam realizar uma avaliação preliminar do risco num espaço temporal razoável e com recursos limitados. Uma vantagem destas metodologias consiste na possibilidade de serem aplicadas a um conjunto alargado de bens culturais imóveis utilizando um conjunto de recursos significativamente reduzido. Desta forma, os resultados obtidos com este tipo de metodologias mais simples permitirão uma maior abrangência de bens avaliados, facilitando a definição de prioridades para a implementação de ações de mitigação do risco e a identificação dos bens que possam, porventura, vir a exigir análises mais detalhadas.

Com base nos argumentos discutidos, observa-se que uma metodologia de avaliação qualitativa do risco sísmico (*i. e.*, da qual resulta uma estimativa não numérica) poderá apresentar os requisitos necessários para obter uma avaliação expedita desse risco em bens culturais imóveis. Como resultado, obtém-se uma classificação simplificada do risco com base na qual as partes interessadas e os intervenientes na gestão e proteção do Património Cultural poderão tomar decisões e priorizar ações. Neste contexto, a metodologia de avaliação expedita do risco sísmico em bens culturais imóveis aqui apresentada estabelece uma avaliação qualitativa do risco que tem os seguintes objetivos:

- permitir a avaliação expedita do risco sísmico dum conjunto alargado de bens culturais imóveis, cujo material construtivo é maioritariamente a alvenaria, com recursos humanos e financeiros baixos, num curto espaço de tempo;

- permitir a atualização regular da avaliação do risco sísmico sem a necessidade de envolver recursos humanos, técnicos e financeiros significativos, de modo a poder monitorizar a sua evolução ao longo do tempo;
- classificar de forma simplificada as componentes fundamentais que devem ser incluídas numa avaliação de risco, nomeadamente o perigo, a vulnerabilidade, as perdas e a resiliência, podendo incorporar na classificação de algumas dessas componentes informação relevante acerca de bens culturais integrados que se encontrem associados ao bem imóvel;
- estabelecer uma classificação simplificada do risco sísmico que possa ser utilizada pelas partes interessadas e pelos intervenientes na gestão e proteção do Património Cultural para definir prioridades para a implementação de ações de mitigação de risco e para identificar bens culturais imóveis que exijam análises de risco mais detalhadas.

## Conceitos envolvidos na metodologia proposta

### O risco e outras grandezas fundamentais

De forma a uniformizar conceitos, apresentam-se aqui as definições consideradas para risco e outras grandezas fundamentais. O *risco* pode ser entendido como sendo *uma medida que combina a probabilidade de ocorrência de um evento ameaçador e as suas potenciais consequências*. O *perigo* representa *um evento físico, de origem natural ou antrópica, potencialmente prejudicial, na medida em que poderá causar danos*. As potenciais consequências do perigo, aqui globalmente denominadas de perdas, podem ser vistas como sendo o resultado da *vulnerabilidade* existente, a qual se define como sendo *a suscetibilidade de um determinado bem imóvel aos efeitos negativos do perigo, representando assim o seu grau de exposição a esse perigo*.

Além da informação referente ao aparecimento potencial de danos, a *vulnerabilidade* inclui ainda informação acerca da *resiliência*, a qual, no contexto dos bens culturais imóveis em análise, é definida como sendo *a capacidade para lidar com as consequências do perigo, que poderá ser medida em termos da facilidade com que será reposta a funcionalidade do bem imóvel em análise, a qual irá depender do grau de preparação para a ocorrência do perigo e da capacidade de resposta e de recuperação após a sua ocorrência*. Torna-se importante salientar que a *resiliência* não é uma característica de um bem imóvel, devendo ser entendida como uma propriedade dos processos de gestão e de utilização desse bem e das pessoas associadas a esses processos. No contexto duma avaliação de risco de bens culturais imóveis, refere-se ainda que a *vulnerabilidade* deverá também incluir uma

medida da perda de *valor* que poderá vir a ocorrer em função dos danos que o bem em análise irá potencialmente sofrer. Atendendo ao caráter multidimensional do *valor* de um bem cultural, a presente metodologia considera que este pode estar associado a diferentes valores tais como o valor probatório, o valor histórico, o valor artístico ou estético, o valor para a comunidade e o valor económico.

### A avaliação do risco sísmico no quadro geral de um processo de gestão de riscos

A aplicação eficaz da metodologia proposta para a avaliação expedita do risco sísmico em bens culturais imóveis pressupõe que esta seja enquadrada num processo de gestão de riscos (Figura 1) que contempla várias componentes e que envolve diferentes intervenientes e partes interessadas. Embora a avaliação do risco possa ser considerada o elemento fundamental do processo de gestão de riscos, o impacto dos seus resultados apenas poderá ser efetivamente concretizado se as restantes componentes do processo de gestão de riscos forem igualmente implementadas. Neste contexto, salienta-se que a componente relativa ao *tratamento e mitigação do risco* (Figura 1) poderá não ser implementada caso o nível de risco encontrado seja aceitável ou tolerável. O risco tolerável envolve as situações em que a redução do risco não é possível ou em que a sua redução envolve custos desproporcionados relativamente aos benefícios dessa redução. Nestas situações, as partes interessadas e os intervenientes no processo de gestão de riscos poderão optar por soluções alternativas tais como a partilha do risco (e.g. através de seguros) ou a alteração das condições de utilização do bem. Em qualquer dos casos, torna-se importante que a componente relativa à *monitorização e controlo* (Figura 1) seja efetivamente implementada.

Torna-se ainda importante salientar que, apesar da metodologia apresentada apenas abordar o cenário da ação sísmica, o processo de gestão de riscos desse bem

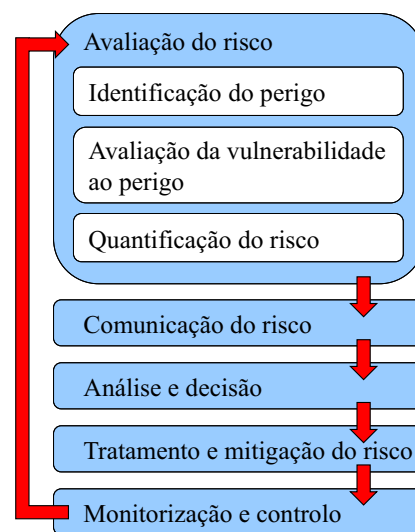


Figura 1. Esquema ilustrativo do processo de gestão de riscos.

deverá contemplar todos os perigos relevantes. Esta análise multiperigos deverá envolver metodologias adequadas para a avaliação do risco resultante de cada perigo e a componente *análise e decisão* (Figura 1) deverá contemplar uma discussão ponderada dos vários riscos com impacto relevante enquadrando vários fatores (*e. g.* a sua frequência, a perceção por parte das pessoas, análises custo-benefício).

## Metodologia proposta

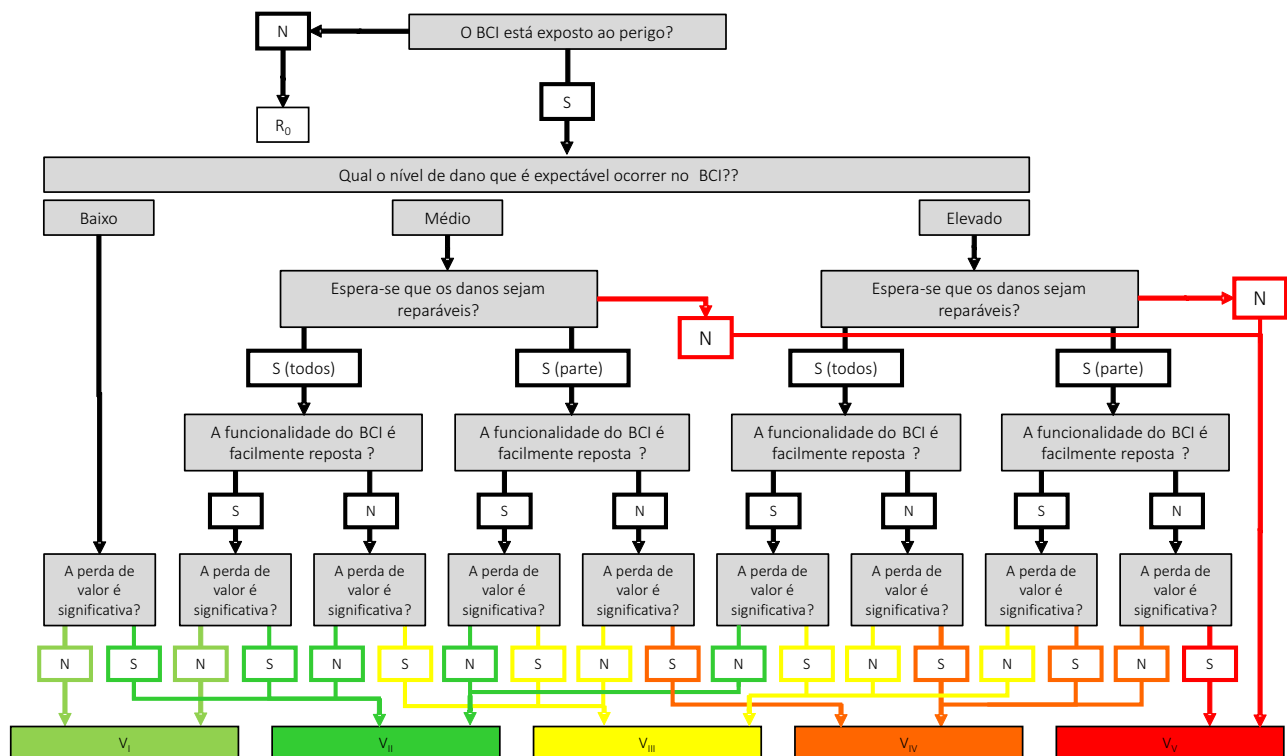
### Elementos gerais da metodologia

A metodologia proposta é composta pelas três componentes seguintes: definição do perigo em termos das características do cenário de ocorrência da ação sísmica a considerar para a avaliação do risco do bem cultural imóvel; classificação da vulnerabilidade sísmica do bem cultural imóvel; classificação do risco sísmico do bem cultural imóvel.

O cenário de ocorrência da ação sísmica que deverá ser considerado na avaliação do risco de um determinado bem cultural imóvel deve ser definido de modo a ser compatível com o mapeamento da sismicidade estabelecido regulamentarmente para o território onde os bens se inserem. Em particular, o cenário a considerar na análise de risco deverá refletir a ocorrência de um sismo com características realistas para o local em análise, nomeadamente em termos de localização expectável do

epicentro, da possível magnitude e da sua correspondente frequência (*i. e.*, probabilidade de ocorrência). Na definição deste cenário, deverá ainda ser considerada informação disponível relativa à sismicidade histórica do local em análise, nomeadamente no que respeita a danos relevantes que tenham ocorrido na zona onde se localiza o bem cultural. Salienta-se igualmente que os referidos cenários-tipo deverão ser compatíveis com os procedimentos atualmente previstos na regulamentação, *i. e.* o Eurocódigo 8 [1] no caso do território nacional. Do ponto de vista da frequência de ocorrência da ação sísmica a considerar no cenário, apesar de poderem ser estabelecidos diferentes casos, a metodologia proposta identifica três situações possíveis que envolvem diferentes intensidades dos movimentos sísmicos impostos e que serão definidas mais à frente nesta secção.

No âmbito da metodologia apresentada, a classificação da vulnerabilidade sísmica do bem cultural imóvel que resulta da conjugação da informação relativa a estes elementos é obtida com base no organigrama apresentado na Figura 2, o qual estabelece as diferentes interligações entre a informação associada aos vários elementos do processo. Como se pode observar pela Figura 2, o processo de classificação da vulnerabilidade estabelece cinco classes de vulnerabilidade sísmica crescente ( $V_I$  a  $V_V$ ) obtidas com base na sequência de respostas. Salienta-se que o organigrama da Figura 2 estabelece, logo no início, a possibilidade do bem cultural imóvel estar sujeito a um nível de risco sísmico não relevante,  $R_0$ , situação essa que pode ocorrer se um determinado bem em análise



**Figura 2.** Organigrama que estabelece o processo de classificação expedita da vulnerabilidade sísmica do bem cultural imóvel para o cenário considerado onde S corresponde a *sim* e N corresponde a *não*.

se encontrar exposto a níveis de perigosidade sísmica irrelevantes ou até mesmo nulos.

Finalmente, o processo que estabelece a classificação do risco sísmico do bem cultural imóvel é definido com base no organigrama apresentado na Figura 3. Este processo de classificação do risco estabelece cinco classes de risco sísmico crescente ( $R_I$  a  $R_V$ ) que são definidas a partir das classes de vulnerabilidade sísmica definidas no processo da Figura 2,  $V_I$  a  $V_V$ , e da expectativa (*i. e.* a frequência) de ocorrência da ação sísmica definida no cenário de perigo previamente estabelecido. Como referido anteriormente, a presente metodologia propõe três possíveis classes de expectativa de ocorrência da ação sísmica, denominadas de *baixa*, *média* e *alta*, que são associadas aos seguintes níveis de perigosidade sísmica:

- *expectativa baixa*: quando a ação sísmica ocorre, em média, uma vez em 475 anos;
- *expectativa média*: quando a ação sísmica ocorre, em média, uma vez em 100 anos;
- *expectativa alta*: quando a ação sísmica ocorre, em média, uma vez em 30 anos.

Relativamente a estes níveis de perigosidade sísmica, salienta-se que uma ação sísmica cuja expectativa de ocorrência é mais baixa (*i. e.* que corresponde a um evento mais raro) terá uma magnitude mais elevada e, portanto, um maior impacto sobre os elementos expostos ao perigo.

Analisando o organigrama da Figura 3, é possível observar que os casos em que a expectativa de ocorrência da ação sísmica é baixa ou média resultam na mesma classificação de risco sísmico, independentemente da classificação de vulnerabilidade sísmica obtida para o bem cultural. De modo a obter um número limitado de possíveis classificações de risco, o processo assume, de forma conservativa, que a ocorrência duma ação sísmica cuja expectativa é baixa ou média é suficientemente condicionante para classificar o risco sísmico com o

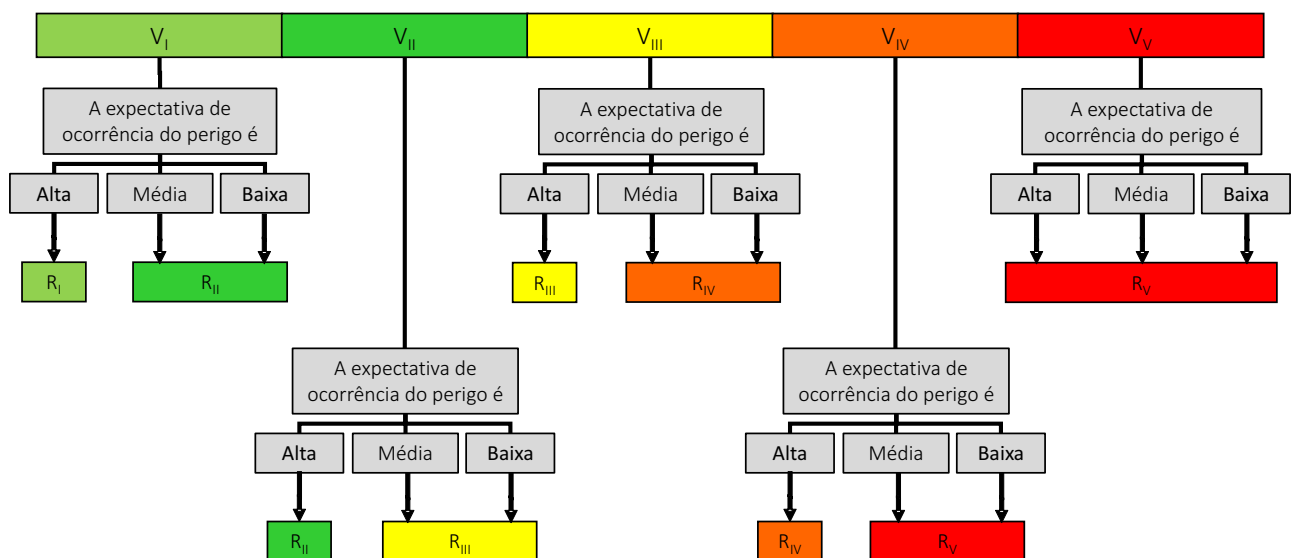
mesmo valor. Além disso, observa-se ainda que, se a classificação de vulnerabilidade sísmica obtida for  $V_V$  (a mais gravosa), o nível de risco sísmico obtido será sempre  $R_V$  (o mais elevado), independentemente da expectativa de ocorrência da ação sísmica. Neste caso, considera-se que a classificação de vulnerabilidade sísmica é suficientemente condicionante para classificar o risco sísmico com o seu valor mais elevado.

### Detalhes adicionais relativos à avaliação da vulnerabilidade sísmica

Analisam-se em seguida, de forma mais detalhada, os elementos individuais que permitem estabelecer a classificação da vulnerabilidade sísmica de um bem cultural imóvel de acordo com o organigrama da Figura 2. A análise apresentada estabelece o tipo de raciocínio que deve ser considerado na avaliação de cada componente e discute a possibilidade de introduzir parâmetros complementares que permitam fundamentar de forma mais objetiva a avaliação dessas componentes.

#### Análise do nível de dano esperado

Na metodologia apresentada, o nível de dano esperado num determinado bem cultural imóvel em função do cenário de ocorrência da ação sísmica considerado é definido com base na caracterização de dois fatores: a fragilidade sísmica do bem cultural imóvel e a intensidade dos movimentos sísmicos impostos no local onde ele se encontra. Dado que a fragilidade sísmica é definida a partir das características construtivas do bem cultural imóvel em análise, a presente metodologia estabelece um conjunto de classes arquitetónicas (CA1 a CA4) a que correspondem diferentes tipos de construções em alvenaria para as quais a fragilidade sísmica é avaliada de



**Figura 3.** Organigrama que estabelece o processo de classificação expedita do risco sísmico para o bem cultural imóvel após obter a classificação da vulnerabilidade sísmica.





CA1



CA2



CA3



CA4

**Figura 4.** Exemplos de construções de cada classe arquitetónica.

forma distinta. As classes arquitetónicas de construções em alvenaria consideradas na metodologia proposta são as apresentadas na Tabela 1. A título ilustrativo, a Figura 4 apresenta alguns exemplos de construções associadas a cada uma dessas classes.

A fragilidade sísmica é estabelecida com base na classificação de diversos fatores que refletem, por exemplo, a geometria e a forma do bem cultural imóvel, a sua integração com as construções envolventes, a qualidade do seu sistema resistente e dos materiais ou o seu estado de conservação. A descrição e a definição detalhada do processo de avaliação da fragilidade sísmica e a consequente avaliação do nível de dano esperado para as várias classes arquitetónicas consideradas é apresentada de forma individual em [2]. Salienta-se, no entanto, que os procedimentos estabelecidos são baseados em [3-8], no caso de construções da classe arquitetónica CA1, em [9-12], no caso de construções da classe arquitetónica CA2, em [13-19], no caso de construções da classe arquitetónica CA3, e em [20-23], no caso de construções da classe arquitetónica CA4.

O procedimento considerado para construções da classe arquitetónica CA1 baseia-se na classificação de 14 parâmetros relacionados com o tipo de sistema

estrutural, as características da alvenaria, a resistência lateral da estrutura, fatores geométricos tais como a distância máxima entre as paredes e a altura do edifício, o tipo de fundações e as condições do terreno, a potencial interação do edifício com construções vizinhas, a existência de irregularidades em planta e em altura, o tipo e a localização de aberturas, o tipo de estrutura dos pisos, o tipo de estrutura da cobertura, o estado de conservação do sistema estrutural e a existência de perigos relacionados com a queda de elementos não-estruturais. A média ponderada da classificação destes parâmetros leva à quantificação de um índice de fragilidade que é correlacionado com a intensidade dos movimentos sísmicos para definir o nível de danos esperado. O procedimento considerado para construções da classe arquitetónica CA2 é semelhante ao da classe CA1 e baseia-se na classificação de 12 parâmetros. Estes parâmetros estão relacionados com o tipo de sistema estrutural, as características da alvenaria, a resistência lateral da estrutura, a esbelteza da estrutura, o tipo de fundações e as condições do terreno, a potencial interação do edifício com construções vizinhas, a existência de irregularidades em planta e em altura, o tipo e a localização de aberturas, o tipo de estrutura dos pisos e da cobertura, o estado de conservação do sistema estrutural e a existência de perigos relacionados com a queda de elementos não-estruturais.

Os procedimentos considerados para construções das classes arquitetónicas CA3 e CA4 são diferentes das classes CA1 e CA2 dado que utilizam abordagens simples baseadas em princípios de estabilidade mecânica. Para as construções da classe CA3, o nível de danos esperado é determinado a partir da análise da estabilidade da estrutura ao derrube e da sua sensibilidade para desenvolver um mecanismo de rotação de corpo rígido (*i. e. rocking*) que permite quantificar um coeficiente de fragilidade que é correlacionado com a intensidade dos movimentos sísmicos para definir o nível de danos esperado. Neste caso, o procedimento depende das propriedades geométricas e materiais da construção, do tipo de fundações e das condições do terreno, das

**Tabela 1**

Classes arquitetónicas de construções em alvenaria consideradas na metodologia proposta

Classe arquitetónica	Definição
CA1	Edifício de alvenaria com um piso ou com múltiplos pisos
CA2	Estrutura de alvenaria não maciça com desenvolvimento em altura superior ao desenvolvimento em planta
CA3	Estrutura de alvenaria maciça com desenvolvimento em altura superior ao desenvolvimento em planta
CA4	Estrutura de alvenaria em que o arco é o principal elemento resistente

propriedades dinâmicas e da esbelteza da construção. Para as construções da classe CA4 o nível de danos esperado é determinado pela análise da estabilidade de sistemas em arco para mecanismos de rotura na direção transversal ao seu plano, permitindo quantificar um coeficiente de fragilidade que é correlacionado com a intensidade dos movimentos sísmicos para definir o nível de danos esperado. O procedimento depende das características geométricas da estrutura (*i. e.* se tem um ou mais arcos, o tipo de pilar, o tipo de encontro, as dimensões), da resistência transversal da parede tímica, da resistência transversal global da estrutura e das condições do terreno.

A caracterização da intensidade dos movimentos sísmicos impostos no local onde se encontra o bem cultural imóvel é definida pelo zonamento sísmico estabelecido na regulamentação nacional (*i. e.* o Eurocódigo 8 [1]). A combinação da fragilidade sísmica com as intensidades dos movimentos sísmicos impostos que são esperadas em cada zona do território nacional para um determinado tipo de ação sísmica permite, finalmente, definir o nível de dano esperado. Na metodologia proposta, a referida combinação destes dois fatores é definida de forma distinta para as várias classes arquitetónicas consideradas e encontra-se apresentada de forma individual em [2]. Esta combinação resulta num dos três níveis de dano esperado, *baixo*, *médio* ou *elevado* (Figura 2) identificado pelo correspondente código cromático (Figura 5). De acordo com esta classificação consideram-se então:

- *danos baixos*, os que correspondem à situação em que o bem cultural imóvel apenas sofre danos não estruturais (*i. e.* danos que não afetam o sistema resistente da construção);
- *danos médios*, os que correspondem à situação em que o bem cultural imóvel além de sofrer danos não estruturais de maior severidade, sofre igualmente danos estruturais moderados (*i. e.* danos que afetam o sistema resistente da construção);
- *danos elevados*, os que correspondem à situação em que o bem cultural imóvel sofre danos estruturais que o colocam numa situação de equilíbrio instável (*i. e.* que comprometem a estabilidade global da construção) ou que provocam já o colapso de partes do bem.

Refira-se que no âmbito da presente metodologia, os eventuais danos sofridos pelo património integrado do bem (pinturas murais, azulejos, ou outros) devem igualmente ser considerados. Apesar de existir uma correlação forte entre os danos do imóvel e os do património integrado, estes apenas são considerados nos passos seguintes da análise de vulnerabilidade. Caso o nível de dano esperado no imóvel seja baixo, a metodologia proposta assume que os danos no património integrado serão desprezáveis ou totalmente reparáveis. Assim, apenas uma análise da perda de valor deverá ser feita neste caso (Figura 2). Caso o nível de dano esperado no imóvel seja médio ou

Nível de dano esperado		
Baixo	Médio	Elevado

**Figura 5.** Nível de dano esperado no bem cultural imóvel e respetiva identificação cromática.

elevado, os passos seguintes da análise de vulnerabilidade deverão ter em conta os danos e a perda de valor quer no imóvel, quer no património integrado.

#### *Análise da possibilidade de reparação dos danos esperados*

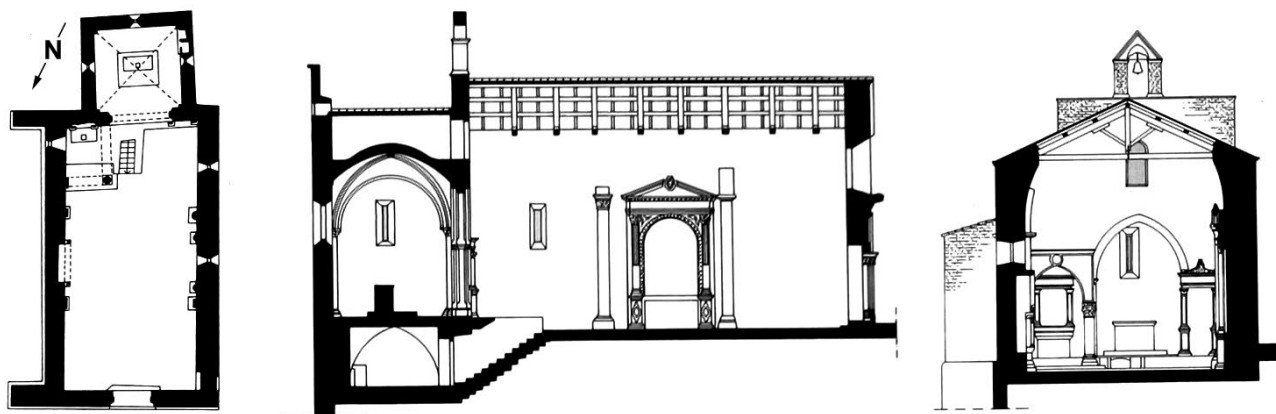
Após estabelecer o nível global de dano esperado, esta componente deve analisar se é ou não possível reparar (total ou parcialmente) os danos sofridos pelo bem imóvel de modo a que possa voltar a ser utilizado para as atividades a que estava associado antes da ocorrência do sismo. Assim, os danos são considerados como reparáveis se for fisicamente e tecnicamente possível intervir no bem cultural imóvel para repor a sua integridade física e material. Neste contexto, devem ser analisadas as seguintes possibilidades de reparação:

- a reposição das condições materiais iniciais sem comprometer a autenticidade do bem cultural imóvel (a qual pode estar ligada ao seu valor);
- a estabilização dos elementos danificados em que se assume visualmente o resultado do processo de reparação, reforço, reconstrução ou consolidação do bem cultural imóvel ou de parte dele.

Dado que o nível global de dano esperado definido na secção anterior está associado a danos estruturais (*i. e.* danos que poderão por em causa a estabilidade total ou parcial do bem cultural imóvel) e a danos não estruturais (*i. e.* danos em elementos que não põem em causa a estabilidade do bem cultural imóvel), a possibilidade de reparação dos danos deve analisar separadamente os dois tipos de danos. Além disso, no caso de existir património integrado, a possibilidade de reparar estes elementos deverá igualmente ser tida em conta.

#### *Análise da reposição da funcionalidade*

Após classificar a possibilidade de reparação dos danos esperados, interessa determinar a facilidade com que as atividades associadas ao funcionamento do bem cultural imóvel podem ser repostas, ainda que apenas parcialmente. Como referido anteriormente, esta classificação reflete a resiliência do bem cultural imóvel. Para estabelecer esta classificação deverá ser feita uma análise do tempo bem como dos recursos humanos e financeiros que se espera serem necessários para reparar e/ou estabilizar os danos sofridos pelo bem cultural imóvel e para repor e/ou criar os meios técnicos e humanos necessários às atividades que



**Figura 6.** Vista em planta e cortes da Igreja de Santa Maria ad Cryptas.

lhe estão associadas. Caso a disponibilização de recursos humanos e financeiros não esteja condicionada, pode considerar-se, a título indicativo, que a funcionalidade do bem é facilmente reposta caso ocorra num prazo de seis meses após o fim da fase de emergência das operações pós-sismo.

Chama-se a atenção para os casos em que a atividade do bem cultural imóvel depende da existência de património integrado (azulejos, pinturas murais, talhas, ou outros) e de bens culturais móveis que se encontrem no seu interior. Nestas situações, a funcionalidade do bem imóvel poderá estar seriamente comprometida, particularmente no caso em que a sua gestão não contemple um plano de emergência para evacuação e salvaguarda dos bens móveis e caso não sejam implementadas medidas preventivas que limitem os danos e as perdas desses bens.

#### *Análise da perda de valor*

A análise da perda de valor esperada deverá refletir a perda de valor nas cinco classes de valor anteriormente definidas (valor probatório, valor histórico, valor artístico ou estético, valor para a comunidade e valor económico), podendo a perda de valor ocorrer apenas em parte dessas classes, dependendo do bem cultural em análise. Assim, a análise da perda de valor esperada deverá ponderar a importância relativa das cinco classes de valor, importância essa que deverá ser definida caso a caso.

Salienta-se ainda que o carácter único e raro de um determinado bem cultural imóvel deve vir refletido na análise da perda de valor, sendo um fator que poderá estar associado a qualquer um dos tipos de valor considerado. Finalmente, tal como na componente anterior, refere-se a título complementar a necessidade de ter em conta o caso em que o bem cultural imóvel possui património integrado (azulejos, pinturas murais, talhas, ou outros) e/ou bens culturais móveis no seu interior. Apesar deste aspeto não ser do âmbito da metodologia proposta, chama-se a atenção para o facto de ser necessário fazer uma análise separada da perda de valor esperada no

património integrado e nos bens culturais móveis através duma metodologia adequada.

### **Exemplo de aplicação: análise de risco sísmico da Igreja de Santa Maria ad Cryptas**

Para ilustrar a aplicabilidade do procedimento proposto, apresenta-se um caso de estudo no qual é feita a avaliação do risco sísmico da Igreja de Santa Maria ad Cryptas, em Itália, para um cenário sísmico compatível com o sismo de L'Aquila em 2009. Na determinação do nível de danos esperados, considerou-se que a Igreja de Santa Maria ad Cryptas é uma construção da classe CA1. O procedimento que conduz ao nível de danos esperado é brevemente descrito e os resultados são comparados com os danos sofridos pela igreja durante o sismo de L'Aquila em 2009.

#### **Descrição da Igreja de Santa Maria ad Cryptas**

A Igreja de Santa Maria ad Cryptas está localizada a cerca de 1 km do centro de Fossa, uma antiga aldeia a 12 km para Leste de L'Aquila, na zona de Abruzzo. De acordo com historiadores, a igreja deverá ter sido construída entre os séculos XII e XIII, provavelmente sobre o que restava dum templo anterior do século IX, e é considerada um dos melhores exemplos de arte gótica da região de Abruzzo. A configuração em planta da igreja é muito simples (Figura 6), tendo dois contrafortes no lado esquerdo para reforçar o edifício que está localizado numa encosta inclinada desse lado. O interior segue o modelo cisterciense com uma nave única e uma capela-mor quadrada. Frente ao presbitério existe uma escada que leva à pequena cripta que, originalmente, seria uma zona dedicada ao culto da deusa Vesta. O telhado da nave e da capela-mor é executado em asna de madeira. O teto da capela-mor é em abóboda de nervuras de pedra e painéis de enchimento em tijolo que apoia em colunas cilíndricas. Contrastando com a simplicidade exterior da igreja e da





**Figura 7.** Vistas do exterior (a e b) e dos frescos no interior (c e e) da Igreja de Santa Maria ad Cryptas.

sua configuração arquitetónica, o interior é exuberante dada a riqueza das pinturas a fresco que decoram as paredes, os arcos e as abóbadas (Figura 7) [24].

Como se pode ver pela Figura 6, a configuração em planta da igreja é aproximadamente retangular, com dimensões de 12×22 m<sup>2</sup>. As paredes possuem uma altura que varia entre 7 e 9 m e, de acordo com [25], são executadas em blocos de calcário e argamassa de cal e areia. A partir do exterior, podem ser identificados dois tipos de paredes: a fachada principal executada com blocos de calcário quadrados dispostos em fiadas regulares e as restantes paredes executadas com blocos irregulares de pedra com dimensões semelhantes aos da fachada principal, mas dispostos em fiadas irregulares. De acordo com uma inspeção realizada em 2007 [26], a igreja possuía alguns danos que consistiam em fissuras

**Tabela 2**Índice de fragilidade *IFS* e parâmetros envolvidos na sua quantificação.

Parâmetros		Classe de fragilidade $C_i$				Peso $P_i$	Índice de fragilidade $IFS$
		A	B	C	D		
P1	Tipo e organização do sistema resistente	0	5	20	50	0,75	$IFS = \frac{\sum_{i=1}^{14} C_i \cdot p_i}{650}$ $(0 \leq IFS \leq 1,0)$
P2	Tipo de alvenaria do sistema resistente	0	5	20	50	1,00	
P3	Classe da resistência lateral	0	5	20	50	1,50	
P4	Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0,50	
P5	Altura do edifício	0	5	20	50	1,50	
P6	Perfil do terreno e fundações	0	5	20	50	0,75	
P7	Localização do edifício e interação	0	5	20	50	1,50	
P8	Irregularidade em planta do edifício	0	5	20	50	0,75	
P9	Irregularidade em altura do edifício	0	5	20	50	0,75	
P10	Desalinhamento e área de aberturas nas fachadas	0	5	20	50	0,50	
P11	Tipo de sistema estrutural dos pavimentos	0	5	20	50	1,00	
P12	Tipo de cobertura do edifício	0	5	20	50	1,00	
P13	Estado de conservação da estrutura do edifício	0	5	20	50	1,00	
P14	Tipo e organização do sistema resistente	0	5	20	50	0,50	

na fachada principal e nas paredes laterais, falta de argamassa nas juntas e ataques biológicos na parte inferior de algumas das paredes devido a zonas de humidade proveniente do solo por capilaridade.

### Definição do nível de dano esperado para construções da classe arquitetónica CA1

De acordo com o procedimento apresentado em [2], o nível de dano esperado para construções da classe arquitetónica CA1 é determinado pela quantificação de um índice de fragilidade *IFS* cuja formulação é baseada no índice de vulnerabilidade proposto em [5]. O índice de fragilidade *IFS* é definido pela soma ponderada de 14 parâmetros relacionados com diferentes características da construção que influenciam o seu desempenho durante um sismo. Dependendo das características da construção, cada parâmetro é classificado com uma de quatro classes de fragilidade crescente (A, B, C ou D) (Tabela 2). Cada parâmetro possui um peso  $p_i$ , predefinido, que varia entre 0,50 a 1,50, conforme a sua importância (Tabela 2). O índice de fragilidade *IFS* varia entre 0 e 1 e é obtido a partir da expressão também apresentada na Tabela 2.

Os parâmetros *P1* e *P2* caracterizam o sistema resistente da construção que controla o seu comportamento sob a ação sísmica. Estes parâmetros são definidos com base no tipo e na qualidade da alvenaria, envolvendo dados sobre o material (tamanho, forma e tipo de pedra), sobre o tipo de aparelho da alvenaria e sobre o

tipo de ligação entre paredes. O parâmetro *P3* é definido a partir duma estimativa simplificada da resistência ao corte da construção. O parâmetro *P4* avalia o nível de contraventamento das paredes e, implicitamente, a sua suscetibilidade para colapso fora do plano. O parâmetro *P5* avalia a altura da construção e o parâmetro *P6* as condições do terreno e das fundações da construção. O parâmetro *P7* tem em conta a potencial interação do edifício com construções adjacentes e os parâmetros *P8* e *P9* avaliam a irregularidade da construção em planta e em altura, respetivamente. O parâmetro *P10* analisa a irregularidade da disposição das aberturas nas paredes, fator importante para garantir a transferência de cargas de forma adequada. Os parâmetros *P11* e *P12* analisam os tipos de sistema estrutural dos pisos e da cobertura, tendo em conta o nível de ligação entre os pisos e as paredes e entre a cobertura e as paredes. Estes parâmetros também têm em conta o possível carregamento horizontal adicional que os pisos e/ou as coberturas podem aplicar nas paredes. O parâmetro *P13* tem em conta o atual estado de conservação do sistema estrutural e o parâmetro *P14* a existência do perigo de queda de elementos não estruturais inadequadamente ligados à construção principal.

Após quantificar o *IFS*, é atribuída à construção uma classe de fragilidade *CFS* com base no valor de *IFS*. Conforme *IFS* é inferior a 0,25, entre 0,25 e 0,40, ou superior a 0,40, é atribuída à construção uma classe de fragilidade baixa, moderada ou elevada, respetivamente. O último passo para definir o nível de dano esperado



**Tabela 3**Índice de fragilidade *IFS* para a Igreja de Santa Maria ad Cryptas

Parâmetros		Classe de fragilidade $C_i$				Peso $P_i$	Índice de fragilidade <i>IFS</i>
		A	B	C	D		
P1	Tipo e organização do sistema resistente				50	0,75	<i>IFS</i> = 0,27
P2	Tipo de alvenaria do sistema resistente		5			1,00	
P3	Classe da resistência lateral		5			1,50	
P4	Distância máxima entre paredes		5			0,50	
P5	Altura do edifício	0				1,50	
P6	Perfil do terreno e fundações		5			0,75	
P7	Localização do edifício e interação	0				1,50	
P8	Irregularidade em planta do edifício			20		0,75	
P9	Irregularidade em altura do edifício			20		0,75	
P10	Desalinhamento e área de aberturas nas fachadas	0				0,50	
P11	Tipo de sistema estrutural dos pavimentos				50	1,00	
P12	Tipo de cobertura do edifício	0				1,00	
P13	Estado de conservação da estrutura do edifício			20		1,00	
P14	Tipo e organização do sistema resistente			20		0,50	

envolve uma conversão entre a classificação da fragilidade *CFS* e o nível de dano que tem em conta o cenário de ação sísmica selecionado. Para estabelecer as condições correspondentes aos três níveis de dano considerados na metodologia, foram definidos níveis de dano médios [5], que podem ser ligados à perigosidade sísmica definida pelas intensidades macrossísmicas (escala EMS-98) e aos valores de *IFS*, em função de valores da aceleração de pico do terreno (PGA). As três gamas de níveis de dano foram então associadas a intervalos de valores de *IFS* que representam condições de dano semelhantes (as classes de *CFS*) e que estão correlacionados com valores de PGA específicos que representam cenários sísmicos relevantes (e. g. o mapa de zonamento sísmico nacional). Cada gama de níveis de dano foi definida em termos dum nível de dano esperado identificado pelo correspondente código cromático (Figura 5) e a correlação dos níveis de dano com as classes *CFS* e os cenários de ação sísmica é representada por matrizes de dano (Figura 8). Essas matrizes são a ferramenta que o analista utiliza para definir o nível de dano esperado em função duma determinada classe de *CSF* obtida para o cenário sísmico em análise.

### Análise simplificada do risco sísmico da Igreja de Santa Maria ad Cryptas

Apresentam-se em seguida os resultados obtidos da análise simplificada do risco sísmico efetuada para a Igreja de Santa Maria ad Cryptas de acordo com a metodologia

proposta. O nível de dano esperado foi determinado com base no procedimento definido na secção anterior e parte dos resultados são comparados com os danos e as perdas sofridos pela igreja devido ao sismo de L'Aquila em 2009. Para se poder efetuar esta comparação, foi necessário considerar na análise um cenário sísmico compatível com o sismo de L'Aquila de 2009: um evento de baixa probabilidade com um valor de PGA próximo de 0,15g no local da igreja [27]. A matriz de danos compatível com esse cenário sísmico é a apresentada na Figura 8. Com base na informação sobre a igreja obtida a partir de [25, 26], os parâmetros necessários para estabelecer o índice de fragilidade *IFS* foram definidos de acordo com a Tabela 3, conduzindo a um valor de *IFS* de 0,27. Este valor de *IFS* conduz a uma classe *CFS* de fragilidade moderada e a um nível de dano esperado elevado (Figura 8). Ao comparar este nível de danos com o dano real que foi observado após o sismo de 2009, verifica-se que existe uma boa correlação entre os dois, dado que o dano real foi descrito como grave [25, 28]. Os danos observados envolvem a presença de fissuras que atravessam a espessura das

CFS	Zona sísmica				
	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
Baixa					
Moderada					
Elevada					

**Figura 8.** Exemplo duma matriz de danos (adaptado de [2]).



**Figura 9.** Danos sofridos pela Igreja de Santa Maria ad Cryptas no sismo de L'Aquila: destacamento da parede posterior da capela-mor [28].

paredes nordeste e sudoeste, havendo uma separação da fachada principal das paredes laterais da nave devido a um mecanismo de derrube (Figura 9). Adicionalmente, o sismo induziu uma rotação para fora do plano da parede posterior da capela-mor, evidenciada pela sua separação do resto da estrutura. Além disso, o frontão da capela-mor e o campanário destacaram-se e sofreram um mecanismo de *rocking* em torno da sua base, tendo sido removidos durante as operações de escoramento pós-sismo (Figura 10). Podem ser consultados detalhes adicionais e uma análise mais abrangente destes danos em [25, 28].

Com base no nível de dano obtido, o próximo passo da metodologia analisa a possibilidade de reparação desses danos. Embora seja esperado que para um nível de dano elevado a construção exiba danos estruturais severos que a possam tornar instável, admite-se que estes danos possam ser considerados como totalmente reparáveis dada a simplicidade da configuração estrutural e o tipo de mecanismos que são normalmente desenvolvidos neste tipo de construção. No entanto, a metodologia deve igualmente ter em conta a possibilidade de reparar os danos sofridos pelas pinturas a fresco que fazem parte do património integrado. Atendendo à severidade dos danos estruturais, admite-se que os danos nas pinturas a fresco

apenas possam ser parcialmente reparáveis (Figura 11). Assim, tendo em conta estes danos, a funcionalidade da igreja não deverá ser facilmente resposta (salienta-se que no final de 2015, as obras de restauro ainda estavam em curso) e prevê-se que haja uma perda de valor significativa. Com base nestas considerações, verifica-se que o nível de vulnerabilidade da construção é  $V_v$  (Figura 2), o que conduz automaticamente a um nível de risco  $R_v$ , independentemente da probabilidade de ocorrência do cenário de ação sísmica selecionado (Figura 3).

## Notas finais

O desenvolvimento e a aplicação da metodologia apresentada para a avaliação expedita do risco sísmico em bens culturais imóveis representa um primeiro passo necessário para uma gestão eficaz do risco sísmico deste tipo de construções que poderá ser aplicado com custos e recursos humanos limitados num âmbito territorial alargado. Com base na aplicação desta metodologia a múltiplos bens culturais imóveis, deverá ser possível obter uma hierarquização que identificará que bens necessitam de estudos mais detalhados tendo em vista



**Figura 10.** Danos sofridos pela Igreja de Santa Maria ad Cryptas no sismo de L'Aquila: a) danos no frontão da capela-mor; b) campanário removido durante as intervenções pós-sismo.



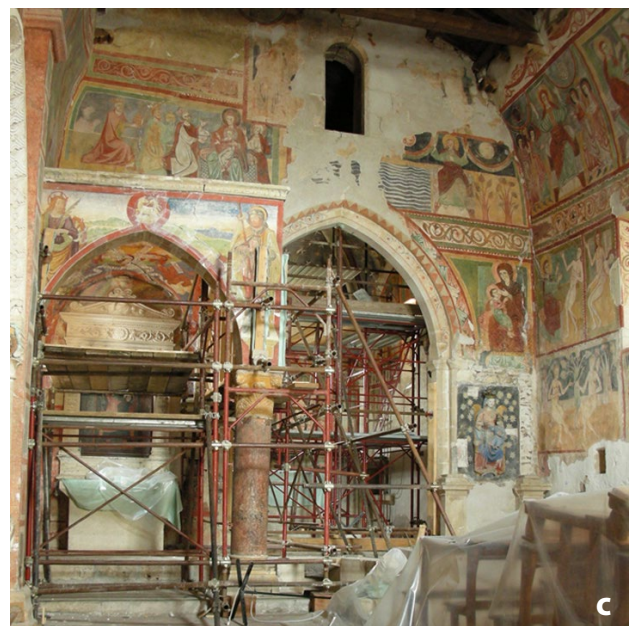
uma intervenção prioritária para reduzir os seus níveis de risco sísmico.

O carácter expedito e simplificado da metodologia proposta baseia-se em pressupostos conservativos que permitem a sua rápida aplicação à escala territorial do modo mais uniforme possível. No entanto, torna-se importante referir que a metodologia apresentada não tem como objetivo conduzir a resultados que permitam diretamente estabelecer recomendações sobre o tipo de intervenção necessária para a mitigação do risco sísmico de um determinado bem cultural imóvel. Se um determinado nível de risco sísmico obtido para um determinado bem não for aceitável, deverão ser desenvolvidos estudos mais detalhados dos quais possam resultar medidas objetivas para a mitigação desse risco. Embora possam vir a ser estabelecidos outros critérios, recomenda-se que o desenvolvimento dos referidos estudos seja efetuado nas situações em que o nível de risco sísmico obtido seja da classe  $R_{IV}$  ou  $R_V$ .

De modo a ilustrar a aplicação prática da metodologia proposta, foi desenvolvido um caso de estudo que consistiu na análise do risco sísmico da Igreja de Santa Maria ad Cryptas em Itália para um cenário sísmico compatível com o sismo de L'Aquila de 2009. Parte dos resultados obtidos nesta aplicação foram comparados com informação real obtida após o sismo, de modo a validar a metodologia proposta. Verificou-se que os resultados comparáveis obtidos neste exemplo de aplicação corroboram os danos observados nesta igreja após o sismo de 2009.

## Referências

- 1 Norma NP EN1998-1: 2010 - Eurocódigo 8 – Projecto de Estruturas para Resistência aos Sismos - Parte 1: Regras Gerais, Acções Sísmicas e Regras para Edifícios, Instituto Português da Qualidade (2010).
- 2 Romão, X., Paupério, E., Pereira, N., 'Metodologia para avaliação expedita do risco sísmico em bens culturais imóveis', relatório, Instituto da Construção e Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, Porto (2015).
- 3 Giovinazzi, S., 'The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis', tese de doutoramento, Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig – Faculty of Engineering of the University of Florence, Braunschweig – Florence (2005).
- 4 Lagomarsino, S., 'On the vulnerability assessment of monumental buildings', *Bulletin of Earthquake Engineering* 4(4) (2006) 445-463, <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9025-y>.
- 5 Vicente, R., 'Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana: avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edifício da Baixa de Coimbra', tese de doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro (2008).
- 6 Lourenço, P.; Oliveira, D.; Leite, J.; Ingham, J.; Modena, C.; da Porto, F., 'Simplified indexes for the seismic assessment of masonry buildings: international database and validation', *Engineering Failure Analysis* 34 (2013) 585-605, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.014>.
- 7 Pereira, S., 'Análise de critérios simplificados para a avaliação de vulnerabilidade sísmica de igrejas', tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto (2013).



**Figura 11.** Danos sofridos pelas pinturas a fresco da Igreja de Santa Maria ad Cryptas no sismo de L'Aquila.



- 8 Simões, A.; Milošević, J.; Meireles, H.; Bento, R.; Cattari, S.; Lagomarsino, S., 'Fragility curves for old masonry building types in Lisbon', *Bulletin of Earthquake Engineering* **13**(10) (2015) 3083-3105, <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9750-1>.
- 9 Curti, E., 'Vulnerabilità sismica delle torri Campanarie: modelli meccanici e macrosismici', tese de doutoramento, Università degli Studi di Genova, Genova (2007).
- 10 Sepe, V.; Speranza, E.; Viskovic, A., 'A method for large-scale vulnerability assessment of historic towers', *Structural Control and Health Monitoring* **15**(3) (2008) 389-415, <https://doi.org/10.1002/stc.243>.
- 11 Casciati, S.; Faravelli, L., 'Vulnerability assessment for medieval civic towers', *Structure and Infrastructure Engineering* **6**(1-2) (2010) 193-203, <https://doi.org/10.1080/15732470802664290>.
- 12 Shakya, M.; Varum, H.; Vicente, R.; Costa, A., 'A new methodology for vulnerability assessment of slender masonry structures', in *Second European Conference on Earthquake Engineering & Seismology*, Curran Associates, Red Hook, NY (2015) 451-462.
- 13 Ishiyama, Y., 'Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **10**(5) (1982) 635-650, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100502>.
- 14 Bayraktar, A.; Keypour, H.; Naderzadeh, A., 'Application of Ancient Earthquake Resistant Method in Modern Construction Technology', comunicação, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, (2012), [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_5773.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5773.pdf) (acesso em 2017-05-04).
- 15 Dimitrakopoulos, E.; DeJong, M., 'Revisiting the rocking block: closed-form solutions and similarity laws', *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **468**(2144) (2012) 2294-2318, <https://doi.org/10.1098/rspa.2012.0026>.
- 16 DeJong, M.; Dimitrakopoulos, E., 'Dynamically equivalent rocking structures', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **43**(10) (2014) 1543-1563, <https://doi.org/10.1002/eqe.2410>.
- 17 Dimitrakopoulos, E.; Paraskeva, T., 'Dimensionless fragility curves for rocking response to near-fault excitations', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **44**(12) (2015) 2015-2033, <https://doi.org/10.1002/eqe.2571>.
- 18 Lagomarsino, S., 'Seismic assessment of rocking masonry structures. Bulletin of earthquake engineering' **13**(1) (2015) 97-128, <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9609-x>.
- 19 Pappas, A., 'Structural analysis and modelling approaches for the seismic vulnerability assessment of archaeological ruins', tese de doutoramento, Università degli Studi di Padova, Padova (2015).
- 20 Oliveira, D.; Lourenço, P.; Lemos, C., 'Geometric issues and ultimate load capacity of masonry arch bridges from the northwest Iberian Peninsula', *Engineering Structures* **32** (2010) 3955-3965, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.006>.
- 21 Tecchio, G.; Zampieri, P.; da Porto, F.; Modena, C.; Prota, A.; Manfredi, G., 'Simplified assessment of railway masonry bridges seismic capacity', comunicação, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa (2012), <https://www.researchgate.net/publication/280976805> (acesso em 2017-05-04).
- 22 Zampieri, P.; Tecchio, G.; da Porto, F.; Modena, C., 'Limit analysis for transverse seismic capacity of multi-span masonry arch bridges', *Bulletin of Earthquake Engineering* **13**(5) (2015) 1557-1579, <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9664-3>.
- 23 da Porto, F.; Tecchio, G.; Zampieri, P.; Modena, C.; Prota, A., 'Simplified seismic assessment of railway masonry arch bridges by limit analysis', *Structure and Infrastructure Engineering* **12**(5) (2016) 567-591, <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1031141>.
- 24 Walker, A., 'The thirteenth-century fresco decoration of Santa Maria Ad Cryptas in Fossa, Italy', tese de mestrado, Georgia State University, Atlanta (2009), [http://scholarworks.gsu.edu/art\\_design\\_theses/52/](http://scholarworks.gsu.edu/art_design_theses/52/) (acesso em 2017-05-04).
- 25 Cesaris, F.; Fiorani, D.; Donatelli, A.; Placidi, A.; Felice, G.; Mauro, A., 'Il comportamento sismico della chiesa di Santa Maria ad Cryptas a Fossa', in *L'Università e la Ricerca per l'Abruzzo: Il Patrimonio Culturale Dopo il Terremoto del 6 Aprile 2009*, ed. L. Milano, C. Morisi, C. Calderini & A. Donatelli, Textus Edizioni, L'Aquila (2012).
- 26 Paoletti, D.; Ambrosini, D.; Sfarra, S.; Bisegna, F., 'Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation', *Journal of Cultural Heritage* **14**(2) (2013) 116-121, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.05.005>.
- 27 Crowley, H.; Stucchi, M.; Meletti, C.; Calvi, G.; Pacor, F., 'Revisiting Italian design code spectra following the L'Aquila earthquake', *Progettazione Sismica* **1** (2010) 73-81, <http://www.academia.edu/23635021/> (acesso em 2017-05-04).
- 28 Mauro, A.; de Felice, G.; DeJong, M., 'The relative dynamic resilience of masonry collapse mechanisms', *Engineering Structures* **85** (2015) 182-194, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.021>.

**Recebido:** 2016-11-20

**Aceite:** 2017-05-04

**Online:** 2017-05-07



Licenciado sob uma Licença Creative Commons

Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

Para ver uma cópia desta licença, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt>.