

# Conservação das estruturas do património cultural: Sismos, aplicações e outros desafios

Conservation of cultural heritage structures:  
Earthquakes, applications and other challenges

Paulo B. Lourenço

## Resumo

O património cultural construído está em perigo devido a riscos naturais e causados pelo homem. A vulnerabilidade sísmica de edifícios antigos é difícil de avaliar e requer conhecimentos técnicos especializadas. Aspectos relevantes são os materiais e os efeitos não lineares, a morfologia dos elementos estruturais e as ligações entre estes elementos, a rigidez dos diafragmas horizontais e o estado da construção. Este artigo apresenta a abordagem holística recomendada para a avaliação estrutural destes edifícios e desenvolvimentos nas áreas de inspeção, diagnóstico, monitorização e ensaios não destrutivos, com aplicações em monumentos emblemáticos. A metodologia considera uma abordagem faseada baseada na investigação histórica, um estudo indutivo em estruturas semelhantes e um conjunto de ferramentas de levantamento, experimentais, analíticas e numéricas, destinadas a avaliar a resposta estrutural e definir níveis de segurança.

## Abstract

The built cultural heritage is in danger due to natural and man-made hazards. The seismic vulnerability of existing buildings is difficult to assess and requires specialized technical knowledge. Relevant aspects are the materials and non-linear effects, the morphology of the structural elements and the connections between these elements, the stiffness of the horizontal diaphragms and the state of the construction. This article presents the holistic approach recommended for the structural assessment of these buildings and developments in the areas of inspection, diagnosis, monitoring and non-destructive testing, with applications in emblematic monuments. The methodology considers a phased approach based on historical research, an inductive study on similar structures and a set of survey, experimental, analytical and numerical tools aimed at assessing the structural response and defining safety levels.

Palavras-chave: Património cultural / Conservação / Alvenaria / Análise estrutural

Keywords: Cultural heritage / Conservation / Masonry / Structural analysis

## Paulo B. Lourenço

Universidade do Minho  
ISISE  
Guimarães, Portugal  
pbl@civil.uminho.pt

### Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

### Legal notice

*The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.*

Lourenço, P. B. – Conservação das estruturas do património cultural: Sismos, aplicações e outros desafios. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 18. ISSN 2183-8488. (março 2022) 25-32.

## 1 Introdução

A Europa sempre foi influente na conservação de edifícios do património cultural, desde o Renascimento até à revolução científica e às primeiras teorias de conservação e restauro. O século XX viu a internacionalização da conservação do património cultural com a formação de organizações como o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS), o desenvolvimento de cartas para orientar a prática profissional e o crescente reconhecimento de que a conservação de edifícios históricos é um aspeto económico muito relevante - por exemplo, na Europa o turismo é responsável por 10% do PIB e 12% do emprego. Conservar este património requer profissionais treinados e dedicados, incluindo não apenas arquitetos ou conservadores, mas também engenheiros estruturais.

Os desastres naturais são eventos catastróficos com efeitos adversos nas pessoas e no meio ambiente. A sua gravidade é medida em perdas humanas e económicas. Durante o período de 1992 a 2012, estima-se que desastres naturais, tais como cheias, tempestades, secas, deslizamentos de terra, atividades vulcânicas e sismos afetaram 4,4 mil milhões de pessoas, causando 1,3 milhões de mortes e levando a 2 triliões de dólares em perdas económicas [1]. Os sismos foram responsáveis por 26% das perdas económicas desde 1900 [2], mas são os desastres naturais mais significativos em termos de número de mortos. Desde 1960, 40% das mortes por desastres naturais ocorreram como resultado de eventos sísmicos e 60% destas são devido a edifícios de alvenaria [2]. Conforme indicado pelo Inventário de Construção Global de 22 países com sismicidade moderada a alta (países desenvolvidos e em desenvolvimento), mais de metade do património construído existente é de alvenaria [3].

A alvenaria é um material heterogéneo que consiste em unidades de alvenaria e juntas de argamassa. O comportamento mecânico dos diferentes tipos de alvenaria tem características comuns, como elevado peso específico, baixa resistência à tração e corte, e baixa ductilidade quando submetida a ações fora do plano (comportamento quase frágil). O comportamento é conhecido por ser anisotrópico pelo que a incorporação de leis de comportamento do material em simulações de computador e o uso de grandes modelos computacionais para a estrutura permanece um desafio.

A alvenaria histórica apresenta uma grande dispersão de tipos, no que se refere às unidades e juntas, à presença de argamassas e a diferentes aparelhos. As características geométricas dos elementos estruturais de alvenaria (por exemplo, espessura, vão ou altura), muitas vezes com descontinuidades e alterações, conduzem a incertezas adicionais. Em áreas sísmicas, a resposta geral, danos correspondentes e, muitas vezes, o colapso dependem da distribuição das forças sísmicas, entre paredes longitudinais e transversais, do nível de ligação nos cunhais das paredes e da presença de elementos de travamento. Estes últimos são, na sua maioria, pisos de madeira com comportamento de um diafragma flexível [4]. De facto, a maioria dos edifícios históricos não apresenta pisos rígidos capazes de proporcionar o designado comportamento integral ou “tipo caixa” [5]. As estruturas existentes de alvenaria exibiram um desempenho inadequado em muitos sismos anteriores. Em geral, estes edifícios foram projetados para ações gravíticas (comportamento à compressão) não levando em consideração as elevadas ações laterais causadas por sismos. A investigação

realizada em edifícios com diafragmas flexíveis mostraram que: (a) os apoios dos pisos são flexíveis; (b) existe uma grande capacidade de deformação e elevada resistência do piso; (c) os mecanismos de rotura dos diafragmas flexíveis estão relacionados com a falta de ligações (ou ligações fracas) entre as paredes de alvenaria e os diafragmas; (d) o comportamento hysterético é altamente não linear para ações sísmica elevadas; (e) o melhoramento da capacidade dos diafragmas horizontais é uma solução natural, mesmo que um aumento da rigidez no plano por si, não seja geralmente suficiente para melhorar a resposta global do edifício. Adicionalmente, as estruturas monumentais apresentam frequentemente uma relação elevada entre vão e altura, com elementos “horizontais” limitados (possivelmente alguns arcos, abóbadas ou cúpulas).

Neste artigo, discute-se brevemente a relevância da engenharia estrutural na conservação, bem como os aspetos da segurança e os métodos de análise estrutural, com exemplos de monumentos emblemáticos e aplicações da metodologia apropriada para a tomada de decisão. Conclui-se com algumas recomendações e uma referência ao impacto esperado da transformação digital em curso.

## 2 Sobre a engenharia de estruturas

A definição do jornal oficial da *Institution of Structural Engineers*, no Reino Unido foi de que a Engenharia de Estruturas é “a ciência e a arte de projetar e realizar, com economia e elegância, edifícios, pontes e outras estruturas semelhantes para que possam resistir com segurança às forças às quais estão sujeitas”. Esta definição completa-se com a ideia de segurança, um objetivo em última análise o mais importante. Erros de engenharia que significam a perda de uma única vida não são aceitáveis atualmente, mesmo que, no passado, fossem fundamentais para o desenvolvimento do conhecimento empírico. A ideia de que as estruturas estarão seguras se puderem resistir às forças às quais podem estar sujeitas é simples, mas a resistência dos materiais não é conhecida com precisão. Adicionalmente, prever as ações a que uma estrutura pode ser submetida em qualquer momento da sua vida não é trivial, especialmente para riscos naturais como os sismos.

Habitualmente, os engenheiros abordam a avaliação de risco no ambiente construído, associando-o ao nível de perigosidade, à vulnerabilidade e ao nível de exposição. Um perigo é um evento natural ou causado pelo homem que pode impactar pessoas, edifícios, infraestrutura, agricultura, ativos ambientais e comunidades, como um sismo ou uma cheia. A vulnerabilidade mede o impacto que uma ameaça tem sobre o ambiente construído, dada a magnitude de um determinado cenário de perigosidade, como o sismo com período de retorno de 475 anos ou a cheia de 100 anos. Finalmente, a exposição refere-se aos bens em risco como o número de pessoas afetadas ou o valor económico do edifício. De acordo com esta abordagem, a vulnerabilidade é o fator mais importante, não apenas por causa das consequências físicas de um desastre, mas porque é onde a engenharia pode intervir: reduzindo a vulnerabilidade, limita-se a extensão dos danos físicos, perdas de vidas humanas e perdas económicas.

Na antiguidade - antes que houvesse distinções entre as profissões de arquitetura e engenharia - o conhecimento empírico da arte da

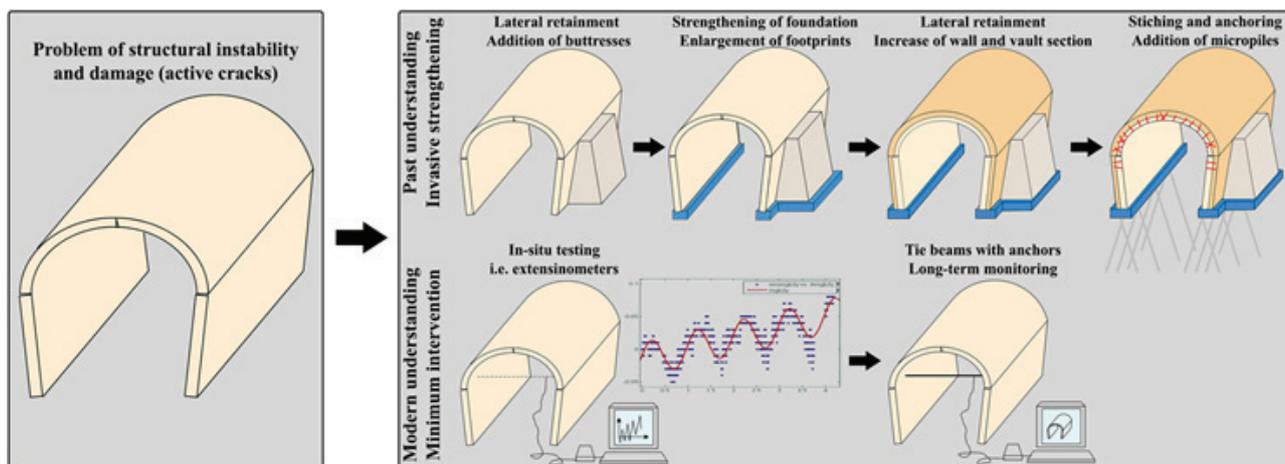
construção, ensinado por mestres a aprendizes, era a base da tradição e a teoria para o projeto estrutural. Os construtores medievais conheciam as técnicas geométricas necessárias para traçar plantas e preparar o aparelho da cantaria. A transformação da pedra maciça no delicado rendilhado característico da arquitetura gótica é uma clara evidência da poderosa lógica dos métodos de tentativa e erro utilizados pelos construtores medievais - uma vitória da experiência sobre a probabilidade de colapso. Parece evidente que esses construtores não empregaram nenhuma forma de análise estrutural moderna. Desta forma, os construtores medievais parecem ter descoberto as margens de segurança por meio da observação.

Na transição dos construtores medievais para os tempos modernos, é interessante lembrar Andrea Palladio, que começou como aprendiz de escultor e depois trabalhou como pedreiro, antes de se tornar uma das pessoas mais influentes na história da construção europeia. Na Renascença, procuraram-se as explicações teóricas e, hoje, a engenharia de conservação tem de conciliar a realidade da construção existente com o método da engenharia estrutural. A primeira é amplamente empírica, baseado na experiência adquirida e na observação. O segundo, geralmente expresso em termos matemáticos, baseia-se no conhecimento teórico, na experiência e na responsabilidade da profissão perante a segurança pública. Os regulamentos e normas da construção de hoje são baseados no método científico. Demonstrar como os edifícios históricos podem funcionar de acordo com as exigências modernas é importante para garantir sua viabilidade e uso moderno, seja como um monumento vivo ou um monumento morto, e isto é o que a engenharia de estruturas permite obter.

## 3 Segurança estrutural e o património construído em alvenaria

A avaliação sísmica de estruturas patrimoniais em alvenaria é um processo multidisciplinar integrado, baseado numa metodologia para a análise, conservação e restauro estrutural definido nas recomendações ICOMOS / ISCARSAH de 2005 [6]. Em geral, a metodologia de avaliação de um edifício histórico respeita os valores de autenticidade, de integridade estrutural e arquitetónica, e das tecnologias de construção intangíveis. A metodologia envolve uma combinação de ferramentas de investigação e diagnóstico; isto é, recolha de informação histórica, inspeção, monitorização e análise estrutural. O objetivo principal é obter uma compreensão e conhecimento profundos do material, do comportamento estrutural, do nível de ligação entre as partes estruturais e das alterações e deteriorações subsequentes que ocorreram durante a vida útil da estrutura.

O processo de diagnóstico, numa abordagem de primeiro nível, é qualitativo, envolvendo principalmente investigação histórica e observações no local, para obter informações sobre o comportamento estrutural e os danos existentes. A fim de conhecer as causas dos danos, o nível de segurança e a necessidade de eventual reparação e reforço, são também necessárias abordagens quantitativas; principalmente caracterização de materiais, ensaios / monitorização no local e em laboratório, e análise estrutural [6]. Dada a incerteza relacionada com os dados, os resultados quantitativos devem ser

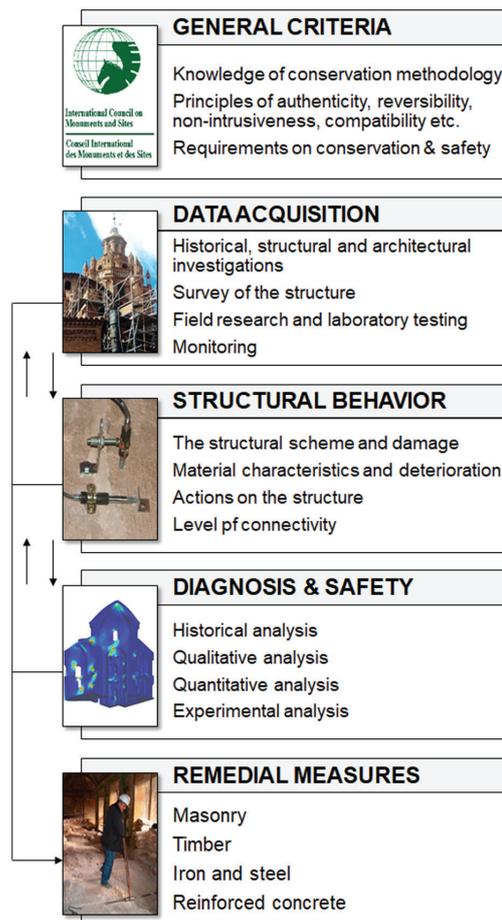


**Figura 1** Conservação e intervenção nas estruturas do património cultural construído. Passado (confiança cega em técnicas modernas e invasivas, com perda de autenticidade e desconfiança na capacidade original da estrutura antiga) versus presente (combinando intervenções mínimas e monitorização de longo prazo)

combinados com evidências empíricas; por exemplo, a investigação histórica, a inspeção e a comparação com edifícios semelhantes, que reforçam a importância da experiência e da avaliação pessoal para obter o melhor veredicto possível.

Uma vez determinadas as causas dos danos estruturais e da deterioração, pode ser necessário aplicar medidas corretivas, de acordo com um processo estabelecido (Figura 1). Através de modelos e cálculos adequados, a resposta estrutural tem de ser quantificada, face a diferentes ações, e comparada com critérios de desempenho adequados. As medidas de conservação e reforço, além de critérios como compatibilidade, custo ou durabilidade, devem adotar o princípio da intervenção mínima e eficiência, considerando os benefícios e prejuízos associados. Só devem ser implementadas as medidas realmente necessárias. As opções entre sistemas de reparação e reforço tradicionais e os sistemas modernos, com o uso correspondente de materiais inovadores, devem ser analisadas em função das necessidades de segurança, durabilidade e proteção dos valores patrimoniais. Nomeadamente, podem ser necessárias medidas de estabilização de emergência para fornecer segurança contra colapso do edifício. Mesmo nesses casos, as ações devem ser realizadas de forma reversível e sem alterações permanentes dos materiais históricos.

Deve-se também ter presente que o processo de avaliação da segurança e projeto de reforço em estruturas de alvenaria históricas não deve ser necessariamente baseado na abordagem adotada para as estruturas novas. De uma forma geral, o processo de decisão sobre medidas de segurança e sobre a intervenção, apresentado esquematicamente na Figura 2, deve respeitar os seguintes passos: (a) conhecimento dos critérios gerais a serem adotados para o estudo dos edifícios do património cultural; (b) aquisição de dados; (c) definição do sistema estrutural e do seu comportamento; (d) diagnóstico e avaliação de segurança; (e) decisões sobre medidas corretivas.



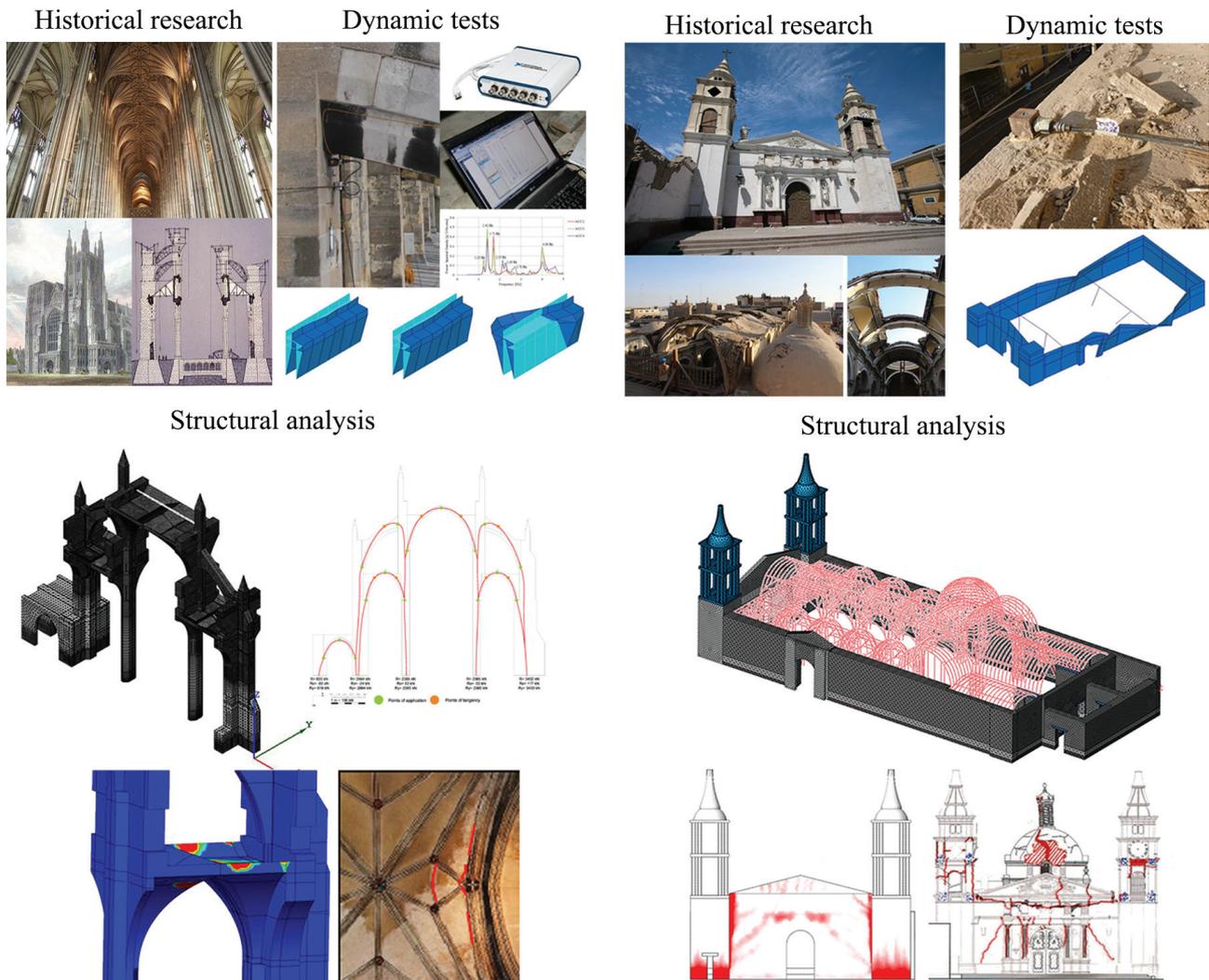
**Figura 2** A metodologia ISCARSAH do ICOMOS [6]

## 4 Análise estrutural

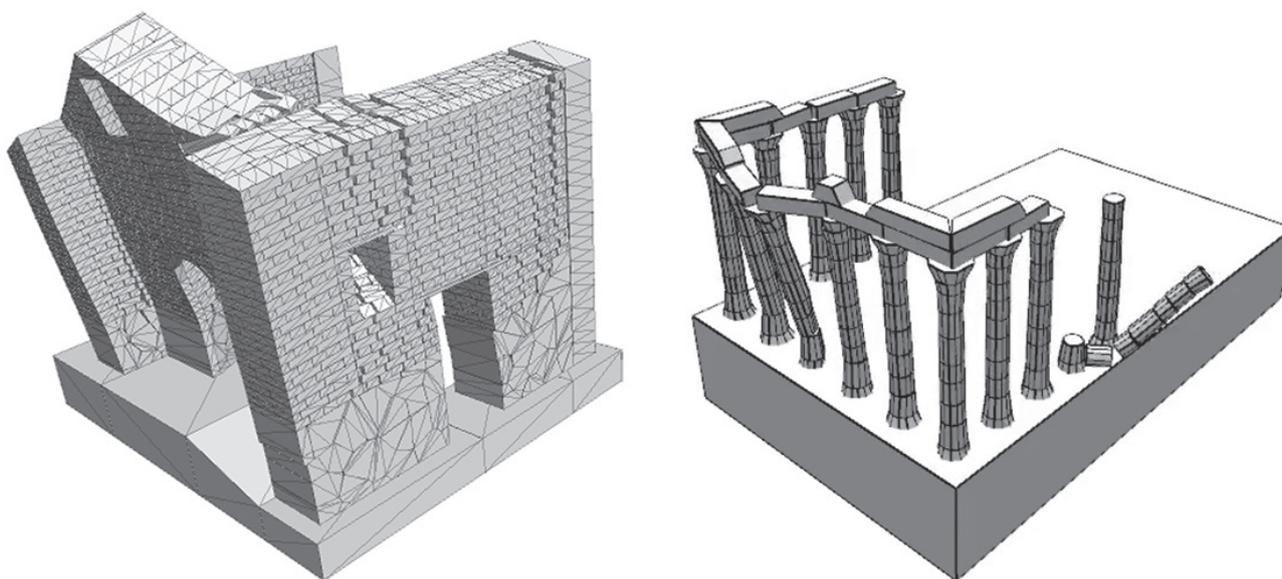
Um modelo estrutural é uma representação simplificada da realidade, tendo em consideração aspetos de eficiência e as limitações computacionais. O modelo deve possuir consistência geométrica e morfológica com a estrutura real; aspetos como o tipo de ligações, a interação com o solo e edifícios adjacentes, e a composição interna dos elementos estruturas precisam de ser considerados cuidadosamente. O uso de elementos estruturais secundários, a separação das estruturas de corpos distintos de edifícios complexos ou modelos locais de comportamento devem ser usados com cuidado e, desde que o modelo adotado represente o comportamento estrutural global ou local de forma adequada [7, 8].

O principal objetivo da análise estrutural de estruturas existentes é avaliar a segurança em estado limite último (ULS). O recurso a ferramentas analíticas e numéricas complementares, com modelos globais e locais, permite aumentar a confiança nos resultados. Ferramentas populares de análise estrutural são: (a) o método dos elementos finitos através de macro ou micro modelação, e o método dos elementos discretos; (b) a análise limite ou com macro-blocos, recorrendo a uma abordagem cinemática ou estática. O conceito de não linearidade, geométrica e/ou física, incluindo a capacidade da estrutura em dissipar energia e acumular danos, pode ser incorporado nos métodos, o que aumenta a precisão da resposta adquirida [8, 9].

A análise elástica linear permite obter resultados preliminares, fornecendo informações sobre a distribuição de tensões e



**Figura 3** Exemplos de metodologia e aplicação a casos de estudos com macro-modelação: Catedral da Cantuária no Reino Unido (esq.) [10]; Catedral de Ica no Peru (dir.) [11]



**Figura 4** Aplicações a casos de estudo com micro-modelação: Igreja de Kuñotambo no Peru (esq.) [12]; Templo de Évora (dir.) [13]

extensões, bem como deslocamento esperados sem fendilhação ou esmagamento localizado. Esta análise fornece respostas irrealistas para estruturas de alvenaria não armadas, com valores incorretos de capacidade e da segurança estrutural. Devido à capacidade de tração muito baixa em estruturas de alvenaria, a resposta é altamente não linear, mesmo sob estados de tensão moderada. Usando a análise elástica linear, os caminhos de carga que se formam na estrutura são considerados constantes e o comportamento estrutural geral e os danos existentes ou no colapso não podem ser representados.

Existem dois tipos básicos de representações computacionais avançadas da alvenaria. A macro-modelação é a abordagem mais popular para grandes modelos e é baseada na mecânica do contínuo (a alvenaria é representada como um material isotrópico ou anisotrópico homogeneizado). São atribuídas leis constitutivas de plasticidade, fendilhação e/ou dano para comportamento em tração e compressão. As descontinuidades e fendas podem ser representadas por elementos de interface. Estes modelos foram utilizados em monumentos emblemáticos, como a Catedral de Cantuária, no Reino Unido, ou a Catedral de Ica, no Peru (Figura 3).

Na micro-modelação, as unidades e a argamassa, bem como a descontinuidade entre elas, é explicitamente modelada. As aplicações podem ser realizadas com elementos finitos, elementos discretos (DEM) ou análise limite. Normalmente, apenas as unidades e as juntas são modeladas. Esta é uma prática comum em modelos de pequena escala, mas devido ao avanço nas capacidades computacionais, pode também ser utilizada também em modelos de grande escala. O DEM, além dos aspetos de não linearidade material e geométrica, permite a separação completa de blocos e a evolução de grandes deslocamentos, que são também excelentes para fins educacionais (Figura 4).

## 5 Conclusões - Recomendações

As últimas décadas testemunharam grandes avanços de engenharia nos métodos experimentais e numéricos. No contexto da engenharia estrutural, as Recomendações para a Análise, Conservação e Restauração Estrutural do Património Arquitetónico fornecem o contexto técnico e científico moderno, afirmando claramente que não apenas a aparência e os materiais das estruturas históricas devem ser preservados, mas também os seus mecanismos de resistência devem ser investigados, compreendidos e preservados. Esta tarefa é difícil e requer uma abordagem e conhecimento diferentes dos utilizados no projeto de novas construções – uma tarefa para a qual engenheiros e arquitetos possuem habitualmente pouca formação. A incerteza e a aplicabilidade limitada dos regulamentos atuais para a avaliação de edifícios históricos salientam o papel vital da formação avançada e da disseminação das práticas de engenharia aplicada.

A avaliação sísmica de estruturas patrimoniais em alvenaria permite replicar os danos existentes e obter os níveis de segurança nas condições atuais. Ainda assim, o processo é exigente, em termos de conhecimento de engenharia de conservação e depende da estratégia de modelação adotada e do nível de conhecimento sobre a estrutura. As combinações de ferramentas de análises estrutural adequadas, validadas por meio de inspeções e monitorização no local, fornecerão a melhor estimativa possível da segurança e a definição de medidas corretivas eficientes (se necessário). Os desafios da transformação digital em curso incluem aspetos como as ferramentas de inspeção e diagnóstico automatizadas e com recurso à inteligência artificial, os problemas inversos na tomografia, a ciência da grande quantidade dos dados de monitorização, a

avaliação expedita da vulnerabilidade e análise de risco ao nível do território, ou os megamodelos estruturais na computação.

## Referências

- [1] UNISDR (2012) – Counts the cost of 20 years of inaction on climate change and risk reduction. United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction, USA.
- [2] Daniell, J.; Wenzel, F.; Schaefer, A. (2016) – The economic costs of natural disasters globally from 1900-2015. EGU General Assembly Conf. (Vol. 18, p. 1899). Também em: Natural disasters since 1900 - over 8 million deaths and 7 trillion US dollars damage. [www.phys.org](http://www.phys.org).
- [3] Jaiswal, K.S.; Wald, D.J. (2008) – Creating a global building inventory for earthquake loss assessment and risk management. U.S. Geological Survey, Report 2008-1160.
- [4] Lourenço, P.B. (2008) – Structural masonry analysis: recent developments and prospects, Palestra plenária, Atas do 14th International Brick & Block Masonry Conference, University of Newcastle, Australia. <http://hdl.handle.net/1822/17176>.
- [5] Lourenço, P.B.; Mendes, N.; Ramos, L.F.; Oliveira, D.V., (2011) – On the Analysis of Masonry Structures without box behavior, Taylor & Francis. <http://hdl.handle.net/1822/14786>.
- [6] ICOMOS/ISCARSAH Committee (2005) – Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. [www.icomos.org](http://www.icomos.org).
- [7] Lourenço, P.B. (2002) – Computations on historic masonry structures, Progress in Structural Engineering and Materials, 4(3), 301-319. doi:10.1002/pse.120.
- [8] Roca, P.; Cervera, M.; Gariup, G.; Pela, L. (2010) – Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches, Archives of Computational Methods in Engineering, 17(3), 299-325. doi:10.1007/s11831-010-9046-1.
- [9] Lourenço P.B. (1998) – Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behavior of masonry, em Structural Analysis of Historical Constructions II: Possibilities of Numerical and Experimental Techniques. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering.
- [10] Karanikoloudis, G.; Lourenço, P.B.; Alejo, L.E.; Mendes, N. (n.d.) – Lessons from structural analysis of a great Gothic cathedral: Canterbury Cathedral as a case study, International Journal of Architectural Heritage. doi: 10.1080/15583058.2020.1723736.
- [11] Ciocci, M.P.; Sharma, S.; Lourenço, P.B. (2018) – Engineering simulations of a super-complex cultural heritage building: Ica Cathedral in Peru, Meccanica, 53(7), p. 1931–1958. doi: 10.1007/s11012-017-0720-3.
- [12] Zanotti, S. (2015) – Seismic Analysis of the Church of Kuño Tambo (Peru). SAHC Master Thesis, University of Minho, Portugal.
- [13] Nayeri, S.A. (2012) – Seismic Assessment of the Roman Temple in Évora, Portugal. SAHC Master Thesis, University of Minho, Portugal.

