

MEMÓRIAS DA ACADEMIA DAS CIÊNCIAS DE LISBOA

CLASSE DE CIÊNCIAS

**Vulnerabilidade sísmica do património cultural construído
de alvenaria**

RITA BENTO



**ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE LISBOA**

LISBOA • 2025

Título: Vulnerabilidade sísmica do património cultural construído
de alvenaria

Edição: Academia das Ciências de Lisboa

Data de edição: 2025

DOI: <https://doi.org/10.58164/j5e5-np17>

Vulnerabilidade sísmica do património cultural construído de alvenaria

RITA BENTO¹

RESUMO

Os eventos sísmicos constituem um desafio significativo para a preservação do Património Cultural Construído (PCC). A avaliação da sua vulnerabilidade sísmica requer uma abordagem interdisciplinar, integrando o conhecimento histórico e material, a caracterização geométrica, a análise estrutural e a conceção de intervenções de reforço adequadas. Este estudo aplica essa abordagem a edifícios residenciais antigos de alvenaria e betão armado misto em Lisboa e ao Palácio Nacional de Sintra, escolhido como caso de estudo representativo pela diversidade de competências envolvidas e pelo seu valor patrimonial. O trabalho destaca o “percurso do conhecimento”, que inclui a recolha e análise de informação histórica, material e geométrica, fundamental para identificar vulnerabilidades e compreender o comportamento estrutural. Para Lisboa, foram derivadas funções de fragilidade com base numa Análise Baseada no Desempenho e numa Abordagem Baseada no Deslocamento, permitindo avaliar a suscetibilidade sísmica dos edifícios e a necessidade de medidas de reforço. No caso do Palácio Nacional de Sintra, foi implementada uma metodologia interdisciplinar que envolveu levantamentos históricos e levantamentos críticos, ensaios in situ, modelação numérica e análise estrutural, cujos resultados contribuem para estratégias de mitigação e conservação sísmica mais eficazes.

1. ENQUADRAMENTO

O Património Cultural Construído (PCC) é o conjunto do legado de construções reconhecidas pela sua importância histórica e cultural. Permite adquirir um valor único de civilização ou de cultura e assume relevância para a compreensão, permanência e construção da identidade nacional. Identifica-se através de formas de expressão tangíveis tais como os tipos de materiais, as técnicas de construção, as soluções estruturais, arquitetónicas, etc.

O PCC na Europa é composto não só por edifícios distintos (monumentos), mas também por centros urbanos históricos compostos por edifícios residenciais que, em alguns casos, mantêm as suas propriedades originais. Constitui uma componente importante da identidade individual e coletiva, e também promove

¹ Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, CERIS – Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade

o turismo, um setor económico significativo, extremamente valioso para muitas cidades e países. Em parte, devido a isso, o ambiente construído não foi totalmente renovado na maioria dos países europeus.

Apesar desse potencial cultural e económico, os locais e estruturas de PCC têm-se mostrado vulneráveis e pouco resilientes a desastres naturais, não apenas devido à sua fragilidade intrínseca, mas também devido à sua longa exposição a todos os tipos de efeitos do envelhecimento.

No que se refere à avaliação do seu comportamento face aos sismos, o PCC requer uma abordagem interdisciplinar para lidar eficientemente com todas as etapas envolvidas: o conhecimento e a caracterização da estrutura, a análise estrutural subsequente e o potencial projeto de intervenção.

Em Lisboa, uma cidade caracterizada por risco sísmico de moderado a elevado, uma parte importante do parque imobiliário — cerca de 35% (Instituto Nacional de Estatística, 2021) — é composta por construções de alvenaria não reforçada erguidas antes da introdução de disposições adequadas de conceção sísmica, destacando o seu potencial de alta vulnerabilidade sísmica. Todos estes edifícios têm um valor cultural significativo e estabelecem uma herança que certamente merece ser preservada; o valor do património arquitetónico não decorre apenas da sua aparência, “mas também na integridade de todos os seus componentes como um produto único da tecnologia de construção específica de seu tempo e do seu local” (ICOMOS, 2004).

2. ABORDAGEM INTERDISCIPLINAR

A análise de vulnerabilidade e a avaliação sísmica do PCC (monumentos e edifícios residenciais) requer uma abordagem interdisciplinar, fomentada através de atividades conjuntas de diferentes áreas de especialidade, desde a história até a arquitetura e engenharia. Só assim é possível entender efetivamente a história, os materiais empregues e a caracterização geométrica das estruturas (o “caminho do conhecimento”, que representa a primeira etapa fundamental do procedimento), e depois passar para a análise estrutural subsequente e potencial dimensionamento de intervenções de mitigação de vulnerabilidade. Esta metodologia multidisciplinar contempla os passos principais indicados de seguida (Bento, 2019) — Figura 1a:

- Levantamento em campo da estrutura;
- Pesquisa, compilação e análise de dados históricos relevantes para a caracterização geral da construção;
- Definição da campanha experimental que deverá contemplar testes experimentais (*in-situ* e eventualmente em laboratório) e a identificação dinâmica da estrutura;
- Caracterização da ação sísmica;
- Modelação numérica e calibração do modelo;
- Avaliação sísmica, recorrendo a análises estáticas não lineares e/ou análises dinâmicas não lineares, para diferentes níveis de perigosidade sísmica.

A avaliação sísmica baseada numa abordagem interdisciplinar é mais evidente e crucial em edifícios monumentais do que em edifícios residenciais antigos. De facto, enquanto para monumentos cada caso é um caso e todas as etapas definidas (Figura 1a) são necessárias, para edifícios residenciais com valor patrimonial, e no caso de pertencerem a uma certa tipologia, o número de etapas pode ser reduzido (Figura 1b). Para tanto, importa que tenham sido coligidos todos os dados históricos relevantes, caracterizada a ação sísmica e realizados alguns testes experimentais em edifícios da mesma tipologia.

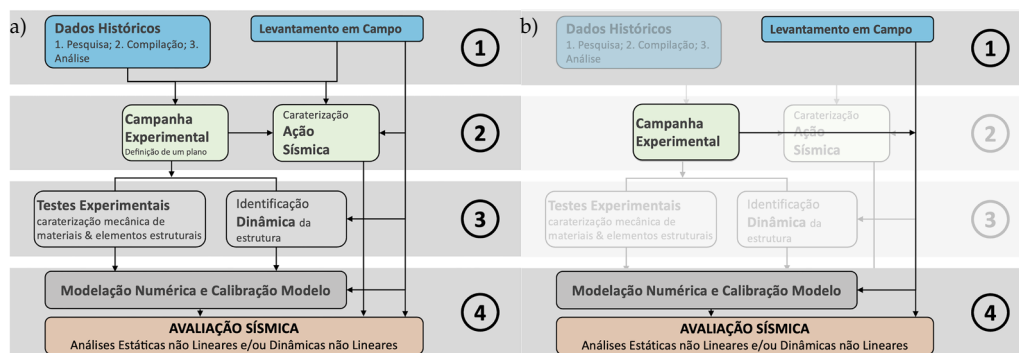


Figura 1. Abordagem interdisciplinar - Etapas para a avaliação sísmica do PCC: a) Monumentos; b) Edifícios Residenciais.

A avaliação sísmica adequada do PCC deverá recorrer, preferencialmente, a modelos e análises não lineares e a eventual intervenção estrutural deverá envolver, sempre que possível, a utilização de materiais e técnicas tradicionais, por forma a garantir a preservação da identidade do edifício e o respeito pelos

princípios ditados pelas Cartas e Recomendações Internacionais (ICOMOS, 2004), através da promoção de soluções tendencialmente reversíveis, compatíveis e pouco intrusivas.

3. PCC – EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

No que se refere ao PCC residencial, listam-se de seguida as tipologias principais existentes em Lisboa (Figura 2, direita), uma cidade grandiosa e cosmopolita que contém em si mesma a história da construção dos edifícios em Portugal: (a) os edifícios “Pombalinos”, de alvenaria e caracterizados pela presença de uma estrutura tridimensional em madeira, denominada gaiola pombalina (1755–1870); (b) os edifícios “Gaioleiros”, de alvenaria e associados a um período de especulação imobiliária e degradação da qualidade construtiva (1870–1930); e os edifícios mistos alvenaria-betão armado, vulgarmente designados por “Placa” (1930–1960).

Uma das maiores dificuldades para a avaliação sísmica de estruturas existentes está relacionada com o conhecimento limitado que normalmente se tem, quer das estruturas, quer das propriedades mecânicas dos materiais que as constituem. Para o PCC residencial, que inclui edifícios com paredes resistentes em alvenaria, a maior dificuldade para se atingir um conhecimento adequado das propriedades mecânicas da alvenaria consiste na necessidade de realização de testes *in situ*. Em diversos casos práticos é muito difícil, se não mesmo impossível, realizar mais do que um teste destrutivo ou semi-destrutivo *in situ*.

A reduzida quantidade de testes já realizados em PCC residencial, não tem proporcionado a criação uma amostra estatística significativa das propriedades dos materiais existentes. No entanto, nos últimos anos tem havido um esforço significativo por parte da comunidade técnica e científica na realização de testes, tanto *in situ* (Figura 3) como em laboratório, no sentido de permitir a caracterização do património edificado existente (e.g. Bento, 2019 e Projeto Nacional FCT SEVERES, 2010–2014). Neste momento, um grupo de trabalho nacional no âmbito da CT115/SC8² foi criado para a caracterização das propriedades mecânicas das tipologias de alvenaria existentes no território português, com vista à compilação, sistematização e disponibilização em base de dados de acesso livre dos inúmeros

² CT115 é Comissão Técnica de Normalização do IPQ responsável, nomeadamente, pela elaboração das Normas Portuguesas (NP EN) e respetivos Anexos Nacionais, que transpõem, para o nosso País, as Normas Europeias (EN) relativas aos Eurocódigos Estruturais e SC8 corresponde à subcomissão relativa ao projeto de estruturas para resistência aos sismos.

resultados que têm vindo a ser produzidos ao longo das últimas décadas pelos vários grupos de investigação e empresas nacionais.



Figura 2. PCC residencial em Lisboa (direita) e identificação das zonas principais onde estão concentradas estas tipologias (esquerda).

• Testes Macacos Planos – Simples e Duplos

• Testes Macacos Planos – Corte



Figura 3. Exemplos de testes em PCC residencial, Lisboa: (a) Testes de macacos planos; (b) Testes de vibração ambiental para a identificação dinâmica de estruturas (Projeto Nacional FCT SEVERES, 2010-2014).

Um dos exemplos mais relevantes desse esforço consiste no uso de uma técnica de ensaio envolvendo macacos planos, considerada semidestrutiva (Figura 3a), que é usada para a avaliação do estado de tensão e das características mecânicas de estruturas de alvenaria. Esta técnica, apresenta-se normalmente sob duas formas — ensaio simples e ensaio duplo — podendo também ser usada em ensaios de corte. O ensaio simples permite determinar o estado de tensão instalado, enquanto o ensaio duplo permite estimar o módulo de elasticidade e a capacidade resistente à compressão da alvenaria. A realização dos ensaios de macacos planos exige a remoção do reboco existente numa área até aproximadamente 1m^2 , resultando as zonas expostas em verdadeiras janelas de inspeção, permitindo identificar e caracterizar fisicamente, à superfície, o tipo de alvenaria.

Um outro exemplo, porventura das técnicas mais utilizadas, é a identificação dinâmica de estruturas com o recurso à vibração ambiental (Figura 3b) permitindo a determinar as propriedades dinâmicas das estruturas, caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais e, conseqüentemente, a calibração dos modelos numéricos.

Uma grande variedade de métodos, com diferentes níveis de complexidade e escala de análise, está disponível na literatura para a modelação numérica de estruturas em alvenaria. A estratégia de modelação sísmica de construções históricas depende do tipo de estrutura (complexidade e tipo de alvenaria) e do tipo de problema (Lagomarsino & Cattari, 2015). A variedade de modelos para estruturas em alvenaria está representada esquematicamente na Figura 4. Os modelos podem ser desenvolvidos ao nível do material e ao nível estrutural, e o tipo de discretização pode ser contínuo ou discreto. A escala de elementos estruturais é preferível devido ao menor esforço computacional, na prática atual. Esta abordagem de modelação geralmente trata o comportamento no plano e fora do plano de forma separada. Na abordagem contínua (SEM - *Structural Element Models*), é necessária a identificação de elementos estruturais macroscópicos (tipicamente “nembos” e “lintéis”), sendo esta abordagem conhecida como Método de Pórtico Equivalente (EFM - *Equivalent Frame Method*) (Figura 5). Na abordagem discreta (Modelos de Macro-blocos – MBM), o comportamento de um conjunto discreto de corpos de alvenaria, tipicamente rígidos e conectados através de interfaces, é estudado através de análises cinemáticas, lineares ou não lineares (Figura 6).

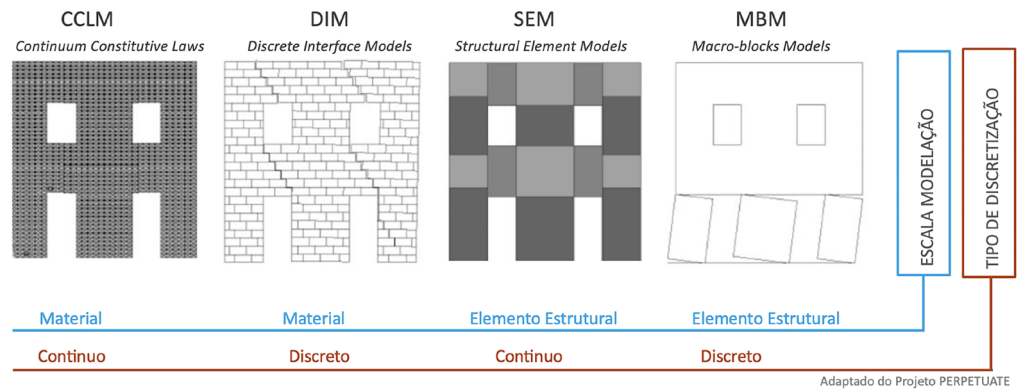


Figura 4. Abordagens para a Modelação Numérica de Estruturas de Alvenaria (adaptado de Lagomarsino & Cattari, 2015).

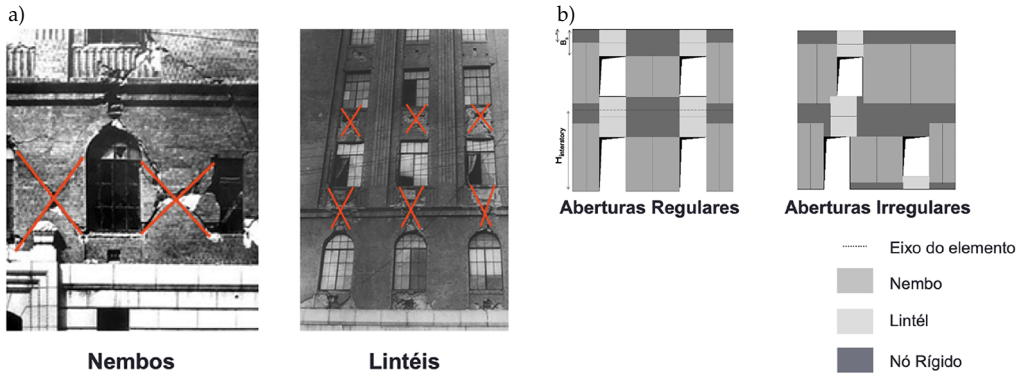


Figura 5. a) Danos nos Nembo e Lintéis b) Paredes idealizadas como pórticos equivalentes (Bento, 2015).

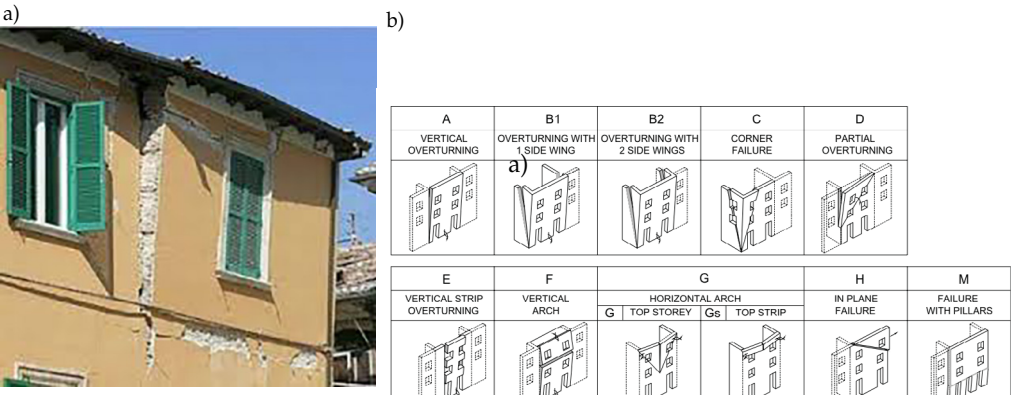


Figura 6. a) Perda de equilíbrio de um bloco rígido (sismo de Áquila, 2009); b) Ábaco com identificação de mecanismos de colapso (Bento, 2015).

Para a avaliação da vulnerabilidade sísmica de construções de património edificado em Lisboa (a probabilidade de uma determinada construção sofrer danos devido aos efeitos de

um sismo), foram derivadas funções de fragilidade, utilizando a Análise Baseada no Desempenho e considerando uma Abordagem Baseada no Deslocamento (Bento, 2019). As funções de fragilidade são definidas como a probabilidade de a estrutura exceder diferentes estados-limite de dano, dada uma certa medida de intensidade sísmica (por exemplo a aceleração pico do solo, PGA – *Peak Ground Acceleration*), e pode ser derivada recorrendo a uma abordagem analítica, baseada em análises estáticas não lineares através de modelos simplificados e detalhados, ou em abordagens dinâmicas não lineares. O uso de modelos analíticos tem a vantagem de considerar explicitamente os vários parâmetros que determinam a resposta estrutural, e ao mesmo tempo a fiabilidade da avaliação de vulnerabilidade é afetada pela capacidade real do modelo de simular o comportamento sísmico. A Figura 7 representa as curvas de fragilidade em função da aceleração do solo (PGA) para os edifícios “Pombalino”, “Gaioleiro” e de alvenaria mista com betão armado (Bento, 2019), para diferentes estados-limite (de PL1 sem danos até PL4 correspondente ao colapso).

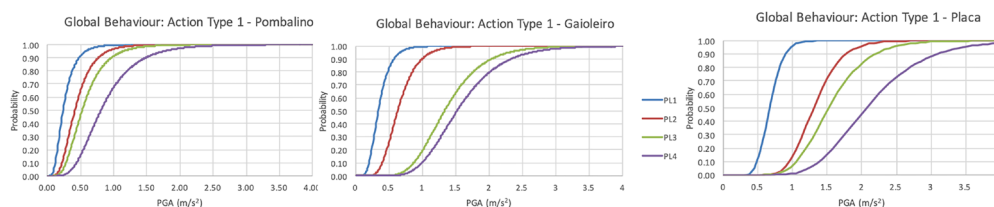


Figura 7. Curvas de fragilidade para edifícios “Pombalinos” (esquerda), “Gaioleiros” (meio) e “Placa” (direita) (Bento, 2019).

4. PCC – MONUMENTOS

A avaliação sísmica de monumentos impõe o recurso a uma análise interdisciplinar integrada e exigente em que todas as etapas principais, identificadas na Figura 1a, sejam realizadas. De facto, a caracterização das construções históricas é uma tarefa rigorosa e complexa que requer, em geral, a pesquisa e a análise de informação existente (qualitativa e quantitativa) complementada com informação de carácter experimental. A definição criteriosa de um plano para a campanha experimental impõe (i) a pesquisa, compilação e análise prévios de todos os dados históricos e (ii) a consideração também prévia dos primeiros resultados obtidos do levantamento em campo.

Na realidade, o levantamento em campo é uma fase crucial para a caracterização construtiva e estrutural e acompanha todas as outras etapas do

procedimento interdisciplinar para a avaliação sísmica (Figura 1). Está sempre associada a inúmeras visitas ao local incluindo, tradicionalmente, inspeção visual e, sempre que necessário, levantamento topográfico (Figura 8).

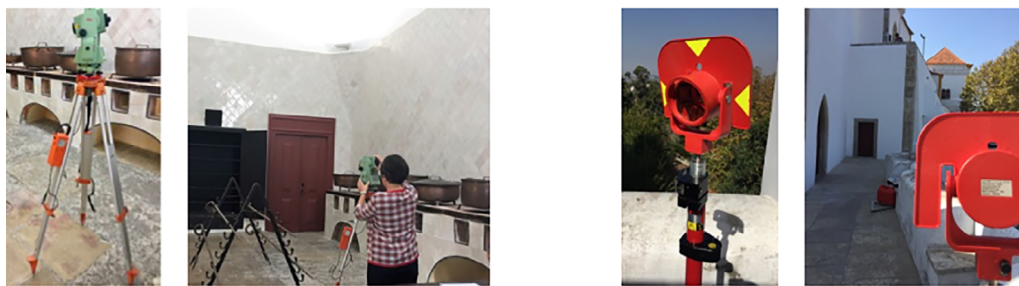


Figura 8. Levantamento topográfico.

Mais recentemente, começou a recorrer-se ao levantamento por *Laser Scanner*, uma técnica que possui inúmeras aplicações nas diversas áreas envolvidas em levantamentos 3D. O produto gerado pelo levantamento por *Laser Scanner* é uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais referenciadas ao centro de fase do sensor, que, após processamento, gera uma nuvem de pontos georreferenciada (Figura 9a). Dependendo das características do equipamento, a nuvem de pontos pode ser enriquecida com cores a partir de fotografias que são obtidas durante os levantamentos.

É importante realçar que o levantamento por *Laser Scanner*, pelo interior e pelo exterior das estruturas, permite a obtenção de um grande conjunto de dados, num curto período de tempo com precisão elevada, bem como a reconstrução 3D de uma forma completa e densa dos elementos levantados, o que possibilita a rápida criação de modelos arquitetónicos e mesmo estruturais.

De facto, o levantamento por *Laser Scanner* permitirá não só obter o melhor levantamento possível em termos de precisão, integridade e confiabilidade (e.g., Figura 9a e 9c) como facilita a aplicação de metodologias BIM (Figura 9b) e sucessivamente desenvolver um modelo 3D de elementos finitos (Degli Abbatì *et al.*, 2017) capaz de reproduzir, tanto quanto possível, as irregularidades geométricas e a complexidade normalmente presentes neste tipo de estruturas. É importante realçar que num contexto de reabilitação, a utilização de metodologias BIM apresenta um amplo leque de oportunidades onde se destaca o desenvolvimento de um arquivo digital para gestão de informação e apoio a projetos e obras de manutenção de

património construído. O arquivo digital corresponde a uma base de dados agregadora da informação proveniente de várias fontes (e.g., histórica, construtiva, estrutural) e gerada ao longo do tempo (e.g., processos de intervenção/reabilitação).

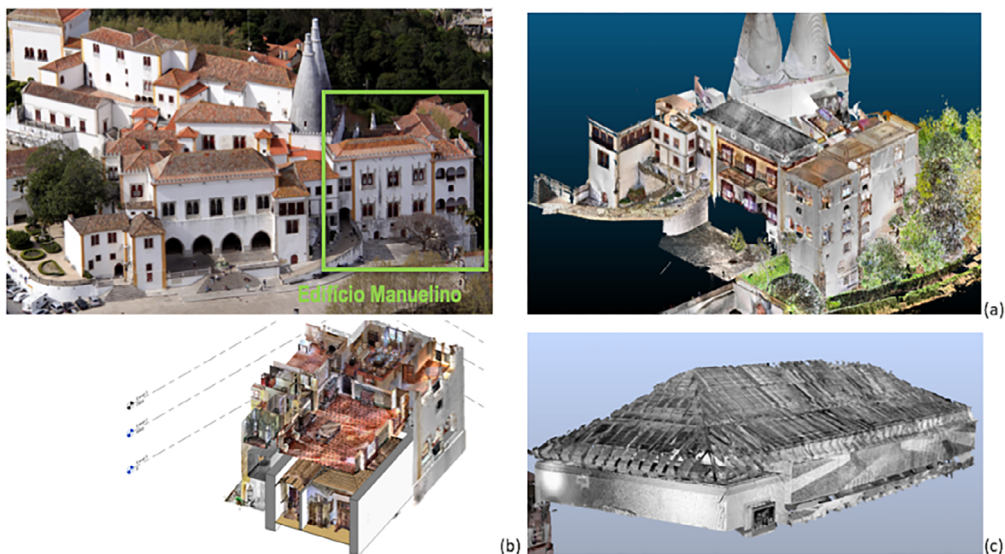


Figura 9. Exemplo de levantamento com Laser Scanner do corpo Manuelino do Palácio Nacional de Sintra (projeto promovido pela PSML e a ser desenvolvido pelo IST, sob a coordenação da autora): (a) levantamento por laser scanner (versão preliminar); (b) Processo criação do modelo BIM – importação de nuvens pontos para REVIT; (c) levantamento do forro da sala Manuelina.

Na definição da campanha experimental recomenda-se sempre a inclusão de testes de identificação dinâmica associadas ao uso da vibração ambiental. Estes métodos assumem-se como uma técnica não destrutiva para a caracterização material/mecânica das construções e são absolutamente cruciais para a calibração e validação dos modelos numéricos de construções complexas, como são normalmente os monumentos. Na realidade, os modelos de simulação numérica do comportamento estrutural devem ser calibrados a partir de danos identificados e dos resultados experimentais obtidos.

A avaliação sísmica de construções complexas de alvenaria histórica, que resultam frequentemente de um conjunto de corpos distintos que partilham paredes e que interagem entre si (e.g., Figura 10), é uma tarefa muito difícil, em que não é possível definir *a priori* procedimentos finais de análise e de verificação de segurança. Há claramente falta de ferramentas e procedimentos normalizados para realizar a avaliação sísmica de estruturas históricas complexas de alvenaria.

De facto, enquanto os regulamentos são mais orientados para edifícios correntes (NP EM 1998-3:2017, 2017), as recomendações dirigidas a monumentos (ICOMOS, 2004), em geral, indicam uma série de princípios gerais e possíveis metodologias de análise, sem, no entanto, prescrever ferramentas operacionais ou indicar modelos específicos e procedimentos padronizados.

É, no entanto, importante ter presente que este tipo de PCC é normalmente caracterizado por um comportamento sísmico que é governado pela resposta estrutural dos diferentes corpos que formam todo o edifício e que interagem entre eles. Essa interação pode ser relevante, especialmente se as unidades forem caracterizadas por diferentes propriedades dinâmicas, rigidez e resistência das unidades. Diferentes abordagens podem ser seguidas no que diz respeito à definição do modelo estrutural: (i) a modelação global de toda a construção; (ii) a modelação dos diferentes corpos tendo em conta o efeito dos corpos adjacentes (Figura 10). A primeira dessas abordagens (i) pode ser computacionalmente muito exigente e extremamente difícil de calibrar em construções muito complexas. A alternativa (ii) surge como o procedimento a seguir em estruturas muito complicadas e desde que, para cada corpo, seja considerado o efeito dos edifícios adjacentes e calibrado tendo em conta os testes de identificação dinâmica.



Figura 10. Modelos Numéricos Separados para os diferentes corpos do Palácio Nacional de Sintra, que representam as interações entre edifícios adjacentes.

A Figura 10 apresenta os modelos numéricos desenvolvidos para o Palácio Nacional de Sintra (Ponte *et al.*, 2019).

A avaliação da vulnerabilidade sísmica das diferentes unidades de edifícios foi realizada seguindo o chamado Método de Pórtico Equivalente (EFM),

desenvolvido no *software* 3Muri (2005) Com este programa, desenvolveram-se análises estáticas não lineares para estudar o comportamento global dos edifícios. Para todos os modelos numéricos, foram definidas e introduzidas condições de fronteira “equivalentes” para considerar, de forma aproximada e convencional, os possíveis efeitos de interação entre as diferentes partes da estrutura. O 3Muri também foi utilizado para a avaliação dos modos de colapso locais (Ponte *et al.*, 2019).

Para dois dos edifícios, foram seguidas e comparadas diferentes abordagens: o Método de Pórtico Equivalente (EFM) e o Modelo de Leis Constitutivas de Contínuo (CCLM), Figura 4, nos programas 3Muri e ABAQUS (ABAQUS CAE, 2014), respetivamente. A escolha de abordagens distintas para os dois casos deveu-se aos seguintes motivos: a configuração geométrica complexa das chaminés cónicas presentes no edifício da cozinha (edifício 10, Figura 10) e a existência de padrões de fissuração no último piso do edifício Bonet (edifício 12, Figura 10), uma área do Palácio que não está acessível aos visitantes.

A calibração dos modelos analíticos é um passo importante e fundamental para obter resultados fiáveis nas análises numéricas subsequentes. Em geral, é necessário um processo iterativo, como aconteceu neste estudo. É importante mencionar que os valores obtidos durante a campanha experimental devem ser considerados como referência e, em cada iteração, deve-se dar especial atenção:

- À definição de algumas condições de fronteira para considerar adequadamente a influência dos edifícios adjacentes no comportamento estrutural;
- À definição de outras condições de fronteira para modelar paredes estruturais que devem estar conectadas ao substrato rochoso;
- Aos valores adotados para as cargas/massas gravitacionais;
- Aos valores adotados para as propriedades mecânicas dos materiais.

Todas as hipóteses do modelo e os resultados obtidos são explicados detalhadamente em (Malcata *et al.*, 2020) para o edifício 12 (Figura 10), e alguns dos resultados estão ilustrados na Figura 11. Os dois modelos calibrados produziram resultados semelhantes, demonstrando uma boa concordância no padrão de danos obtido.

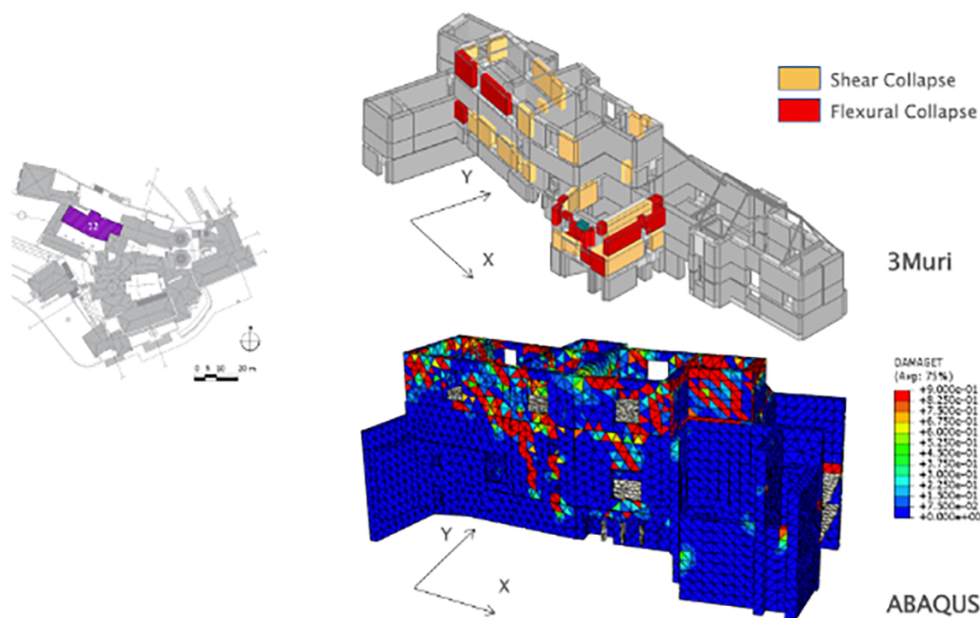


Figura 11. Resultados para EFM e CCLM: Identificação das paredes de alvenaria mais vulneráveis, 3Muri (topo) e padrões de dano no ABAQUS (baixo).

5. NOTAS FINAIS

A conservação do património cultural construído (PCC) representa um dos principais desafios para o futuro da construção na Europa. Devido à sua complexidade, a avaliação de segurança de edifícios de património cultural apresenta uma forte exigência em competências de engenharia estrutural e no conhecimento das técnicas de análise estrutural disponíveis. Pressupostos errados na caracterização da estrutura existente e na modelação numérica podem levar a uma avaliação inadequada, pondo em risco a segurança da estrutura ou, em alternativa, exigindo custos excessivos para a sua reabilitação.

Sem dúvida que atualmente a conservação estrutural, em geral, e em particular a conservação estrutural do PCC, é um tópico desafiante, obrigando os engenheiros a incursões que ultrapassam as práticas comuns e os pressupostos regulamentares. Por outro lado, é inquestionável a necessidade de recurso a uma abordagem interdisciplinar para lidar eficientemente com todas as etapas envolvidas no processo de avaliação. Na avaliação sísmica do PCC é preciso estar preparado para diversas dificuldades, principalmente as que estão associadas à

calibração dos modelos numéricos com base em resultados experimentais, bem como às diversas incertezas sempre existentes, por mais completa que seja a campanha de ensaios experimentais que se possa realizar.

A avaliação da vulnerabilidade sísmica adequada do PCC representa o primeiro passo para a adoção de estratégias adequadas para reduzir o seu risco sísmico com o duplo objetivo de garantir um nível de segurança adequado para os seus ocupantes e preservar o património cultural construído para as gerações futuras.

COMUNICAÇÃO APRESENTADA ÀS CLASSES DE CIÊNCIAS E DE LETRAS
NA SESSÃO DE 11 DE ABRIL DE 2023

COMUNICAÇÃO RECEBIDA A 30 DE OUTUBRO DE 2024

REFERÊNCIAS

- ABAQUS CAE. (2014). *Complete solutions for realistic simulation* (Version 6.14-1).
- Bento, R. (2015). Reabilitação sísmica de edifícios antigos de alvenaria. In P. B. Lourenço et al. (Eds.), *Seminário Paredes de Alvenaria: Reabilitação e Inovação* (Reitoria da Universidade Nova, Lisboa, Portugal).
- Bento, R. (2019). An interdisciplinary approach to the seismic assessment of built cultural heritage: Case studies in Lisbon and outskirts. In R. Aguilar, D. Torrealva, S. Moreira, M. A. Pando, & L. F. Ramos (Eds.), *Structural analysis of historical constructions* (pp. 3-18). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3>
- Degli Abbatì, S., D'Altri, A. M., Ottonelli, D., Castellazzi, G., Cattari, S., De Miranda, S., & Lagomarsino, S. (2017). Seismic assessment of complex assets through nonlinear static analyses: The fortress in San Felice Sul Panaro hit by the 2012 earthquake in Italy. In M. Papadrakakis & M. Fragiadakis (Eds.), *COMPdyn 2017 – 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Instituto Nacional de Estatística (INE). (2021). *Census Nacional 2021*. <http://www.ine.pt>
- ICOMOS (Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios). (2004). *Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitetónico*. ICOMOS.
- Lagomarsino, S., & Cattari, S. (2015). PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), pp. 13-47. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9674-1>
- Malcata, M., Ponte, M., Tiberti, S., Bento, R., & Milani, G. (2020). Failure analysis of a Portuguese cultural heritage masterpiece: Bonet building in Sintra. *Engineering Failure Analysis*, 115, 104636. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104636>

- NP EN 1998-3:2017. (2017). *Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios*. Instituto Português da Qualidade.
- Ponte, M., Bento, R., & Silva, D. V. (2019). A multi-disciplinary approach to the seismic assessment of the National Palace of Sintra. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(5), pp. 757–778. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1648587>
- Projeto Nacional FCT SEVERES. (2010–2014). FCT PTDC/ECM/100872/–. <http://www.severes.org/>
- 3Muri. (2005). *Seismic analyzer of 3D masonry buildings* (Version 5.5.110). S.T.A. Data.