

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DA IGREJA DE SANTA MARIA DE BELÉM

J.A. ROQUE
Aluno de Doutoramento
Inst. Politécnico Bragança
Bragança
jroque@ipb.pt

D.V. OLIVEIRA
Professor Auxiliar
Universidade do Minho
Guimarães
danvco@civil.uminho.pt

P.B. LOURENÇO
Professor Catedrático
Universidade do Minho
Guimarães
pbl@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

Este trabalho apresenta uma metodologia integrada para a caracterização do comportamento sísmico de estruturas antigas de elevado valor patrimonial (histórico e cultural), incluindo a avaliação da segurança sísmica e eventuais recomendações para minimizar o seu risco sísmico.

A metodologia proposta é aplicada a um caso de estudo, constituído pela Igreja de Santa Maria de Belém, Lisboa. Construída durante o século XVI, a Igreja é parte integrante de um dos mais emblemáticos monumentos Portugueses, do ponto de vista histórico-cultural e arquitectónico: Mosteiro dos Jerónimos.

A peculiaridade e a importância deste tipo de construções requer uma abordagem similar à praticada em medicina incluindo etapas como: (a) anamnese, (b) diagnóstico; (c) recomendações para conservação e/ou reforço; (d) intervenção e (e) avaliação da eficácia das intervenções.

Como principais passos da metodologia proposta destaca-se: caracterização da acção sísmica, desde a identificação de potenciais áreas sismogénicas, que condicionam a perigosidade sísmica do local, até à geração artificial de acelerogramas incluindo os efeitos de sítio; desenvolvimento de modelos numéricos simplificados para a avaliação preliminar do comportamento estrutural e apoio à instalação de sistemas de monitorização auxiliares na identificação do comportamento estático e dinâmico; identificação dinâmica da estrutura; ensaios de caracterização mecânica dos materiais e elementos estruturais; desenvolvimento de modelos numéricos avançados, calibrados com base em resultados experimentais; análises não lineares, no domínio do tempo, para diferentes níveis de perigosidade sísmica e consistentes com o enquadramento sismo-tectónico.

De acordo com as análises não lineares, disponíveis até à data, os resultados obtidos para cenários de 475 anos de período de retorno (sismos de magnitude $M_W = 7.4$) indiciam que a estrutura poderá estar sob elevados níveis de tensão capazes de provocar danos não sendo contudo expectável a ocorrência de colapso local ou global.

1. INTRODUÇÃO

As construções antigas em alvenaria são particularmente vulneráveis a acções de carácter dinâmico, especialmente a acções sísmicas intensas. Os países da bacia do Mediterrâneo, entre os quais Portugal, estão sob potencial risco sísmico se se atender ao seu património de construções antigas, monumentos e habitações, e à perigosidade sísmica destas zonas.

Devido às características dos materiais e aos processos de degradação natural, inúmeras estruturas concebidas e construídas no passado, por vezes “memórias vivas” do património histórico-cultural de um país ou região, tornam-se particularmente vulneráveis a acções sísmicas que de forma imprevisível podem, num ápice, conduzir ao seu colapso.

Hoje em dia, a conservação do património arquitectónico é um tema bastante actual nas sociedades modernas devido não só a aspectos histórico-culturais mas também económicos. Além disso, perspectiva-se que o turismo e lazer sejam motores da indústria do 3º milénio, constituindo a oferta de monumentos ou complexos monumentais aspectos chave de atracção turística. Desta forma, a sua protecção e conservação é hoje um tema actual que preocupa as autoridades responsáveis e, conseqüentemente, um desafio para a investigação e a indústria.

A vulnerabilidade das construções antigas em alvenaria pode ser mitigada através de intervenções de conservação e reforço. Contudo, a adopção de medidas anti-sísmicas requer o conhecimento das acções sísmicas bem como a caracterização das construções e da sua resposta sísmica. Neste contexto, este trabalho propõe uma metodologia multidisciplinar integrada, interactiva e evolutiva para a avaliação do comportamento sísmico das construções de elevado valor patrimonial e a prescrição de recomendações de conservação ou reforço com o objectivo de mitigar o seu risco sísmico. À peculiaridade deste tipo de construções parece ajustar-se uma abordagem similar à praticada em medicina que inclui etapas como [6]: (a) anamnese, (b) diagnóstico; (c) recomendações para conservação e/ou reforço; (d) intervenção e (e) monitorização da estrutura e avaliação da eficácia das intervenções. Neste sentido, a metodologia proposta prescreve um conjunto de procedimentos experimentais e numéricos especialmente ajustados para construções antigas existentes e a sua relação com os sismos. A metodologia deve ser entendida como um processo interactivo. Atendendo ao moderno conceito de intervenção mínima e do recurso a métodos de observação, com abordagens passo a passo, as técnicas de inspecção e diagnóstico não destrutivas, incluindo os sistemas de monitorização, desempenham um papel particularmente atractivo no contexto desta metodologia.

Se uma construção histórica for entendida como única (nos materiais e na qualidade da sua assemblagem, nas suas características geométrico-estruturais, nas suas condições de fundação, na sua história e consequentemente no seu comportamento estrutural), então é realmente importante que cada caso seja analisado individualmente. Neste sentido, a metodologia proposta é aplicada a um caso de estudo, constituído pela Igreja de Santa Maria de Belém, em Lisboa, construída durante o século XVI e parte integrante de um dos mais emblemáticos monumentos Portugueses, do ponto de vista histórico-cultural e arquitectónico: o Mosteiro dos Jerónimos.

2. METODOLOGIA INTEGRADA PARA AVALIAÇÃO SÍSMICA DE MONUMENTOS

A avaliação da segurança sísmica de construções históricas é um problema de grande complexidade. Com efeito, pouco se conhece dos seus materiais e da variabilidade das suas propriedades mecânicas, da distribuição de danos, da constituição do núcleo dos elementos estruturais, como paredes, colunas e abóbadas, entre outras dificuldades de caracterização. Normalmente, a caracterização destas construções é impossível sem a combinação cruzada de informação histórica com resultados de uma criteriosa investigação experimental e numérica.

Assim, uma adequada abordagem do problema deve iniciar-se com uma investigação preliminar de interpretação da documentação histórica, para perceber o contexto histórico e identificar as características gerais da estrutura e da construção (anamnese). Complementarmente, e ainda numa fase preliminar de auscultação da construção, pode fazer-se uma estimativa da sua vulnerabilidade a acções sísmicas recorrendo a métodos simplificados de análise, de aplicação expedita, baseados apenas na manipulação de características geométricas dos elementos estruturais em alvenaria (nomeadamente paredes e pilares) para obter indicadores escalares indicativos da segurança da construção para acções no, ou fora, do seu plano. Estes métodos são especialmente adequados para estabelecer prioridades de estudo/análise/intervenção, identificando de uma forma simples, expedita e pouco dispendiosa, as construções mais vulneráveis entre grupos de construções em risco. Para mais detalhes sobre estes métodos consultar [10] e [14].

Esta abordagem preliminar não dispensa, contudo, uma avaliação mais detalhada e fundamentada das actuais condições de segurança da construção. Hoje em dia, as mais avançadas avaliações de segurança são, em geral, sustentadas em simulações numéricas (através de estratégias de macro ou micro-modelação). Contudo, não é possível elaborar modelações fiáveis sem o prévio levantamento das características da construção e de alguns aspectos chave do seu comportamento estrutural. Com este objectivo, e face à complexidade desta tarefa, especialmente no que concerne a construções antigas, exige-se um planeamento integrado de acções de inspecção e ensaio envolvendo tarefas como:

- Inspeção visual detalhada (localização de zonas críticas com danos ou irregularidades entre outros aspectos);
- Reconhecimento das condições de fundação (para a caracterização geológico-geotécnica);
- Definição de um conjunto de ensaios experimentais, in-situ e em laboratório, destinados a: (a) caracterizar as principais propriedades dos materiais (módulos de Young, de Poisson e resistência à compressão); (b) identificar a tipologia, a morfologia e a geometria dos elementos estruturais; (c) detectar possíveis danos ocultos; (d) detectar possíveis indícios de potencial perigo (fendilhação difusa, deformações

activas, fluências, etc.); (e) identificar aspectos chave relacionados com o comportamento estático e dinâmico da construção; (f) calibrar e validar os modelos numéricos de simulação.

As tarefas enunciadas são fundamentais para a definição de posteriores acções e para o desenvolvimento e a implementação de adequados sistemas de monitorização. No que concerne a técnicas de inspecção e avaliação in-situ, a tecnologia disponibiliza hoje uma vasta gama de equipamentos e métodos, transversais a outras áreas do conhecimento, de carácter não destrutivo ou ligeiramente destrutivo, que possibilitam a recolha de dados essenciais para o desenvolvimentos de modelos numéricos e sua validação [1], [8]. Paralelamente, a caracterização da resistência mecânica dos materiais (bem como física e química, se necessário) deve ser executada em laboratório através de ensaios sobre amostras.

No contexto desta metodologia, as técnicas não destrutivas, onde se integram os métodos de identificação dinâmica e os sistemas de monitorização que privilegiam a “auscultação” e a “observação”, através de inspecções e análises periódicas, constituem estratégias de avaliação e caracterização preferenciais. Só assim se pode respeitar integralmente o valor histórico e arquitectónico das construções e programar atempadamente eventuais trabalhos de intervenção para evitar o seu colapso com as indesejáveis perdas económicas, culturais e de vidas humanas daí decorrentes.

As técnicas de identificação dinâmica baseiam-se no pressuposto de que a excitação natural das construções, através do ruído ambiente ou operacional, é razoavelmente aleatória no conteúdo de frequências, no tempo e no espaço para medir os parâmetros modais do seu comportamento, como as frequências e os modos de vibração e os respectivos coeficientes de amortecimento.

Os sistemas de monitorização, estáticos ou dinâmicos, sendo dispositivos instalados para registos contínuos a longo prazo, facilitam análises sazonais da informação recolhida, representando um importante complemento para as investigações experimentais e numéricas uma vez que promovem: (a) uma melhor caracterização do complexo comportamento da construção; (b) identificação de possíveis fenómenos evolutivos; (c) detecção atempada de danos; (d) calibração das condições de fronteira e da rigidez global dos modelos numéricos de simulação (e) avaliação das influências ambientais no comportamento da construção; (f) validação de diagnósticos preliminares; (g) avaliação da eficiência de eventuais intervenções efectuadas. Enquanto os sistemas de monitorização estática controlam a variação de alguns parâmetros estruturais, como os deslocamentos ou a abertura de fendas e a sua relação com as condições ambientais, nomeadamente a temperatura, os sistemas de monitorização dinâmica destinam-se a acompanhar o comportamento dinâmico da construção (registando alterações dos modos e frequências de vibração).

Outro aspecto muito importante na avaliação avançada da segurança de monumentos, sendo actualmente um enorme desafio na área da sismologia, é a caracterização da acção sísmica que os poderá afectar. O enquadramento sismo-tectónico e a sismicidade histórica regional são determinantes para identificar potenciais fontes sismogénicas e para traçar a perigosidade sísmica do local. Além disso, os efeitos de amplificação dos sinais sísmicos recebidos pelos solos de fundação da construção exigem uma cuidada avaliação das suas condições geotécnicas, que muito importa quantificar. Com efeito, existem muitos exemplos que demonstram a importância do comportamento das camadas de solo na transmissão da energia sísmica e na alteração dos sinais recebidos ao nível do maciço rochoso (ex.: Cidade do México 1985, Kobe 1995, etc.) [7]. Assim, a caracterização da acção sísmica deve seguir os passos seguintes: (a) análise da sismicidade (histórica e instrumental) interpretada no contexto do enquadramento sismo-tectónico e identificação das potenciais zonas sismogénicas; (b) análise de estudos de perigosidade sísmica para a região (se disponíveis) para identificar as características dos potenciais cenários sísmicos; (c) selecção em bases de dados de registos de características semelhantes (se disponíveis) aos cenários identificados. No caso de tal não ser possível, deverá proceder-se à geração de sinais sísmicos artificiais consistentes com os cenários de perigosidade traçados (recorrendo a métodos empíricos ou teóricos) e a “software” de simulação específico; (e) quantificação e afectação dos sinais pelos efeitos de sítio.

O próximo passo está relacionado com o desenvolvimento de modelos numéricos de simulação e análise. As dificuldades na definição de modelos numéricos são, no caso das estruturas antigas, em geral agravadas pela sua complexidade geométrica e pela ausência de limites claros entre arquitectura e estrutura. Por outro lado, a ausência de documentos históricos do projecto e o desconhecimento das condições da construção fazem depender a sua caracterização essencialmente da campanha de ensaios experimentais, que nem sempre são conclusivos, especialmente no caso dos métodos de inspecção e diagnóstico não destrutivos. Desta forma, a fiabilidade das simulações numéricas e dos respectivos resultados é sempre condicionada, pelo que o modelo numérico a adoptar não deve ser demasiado complexo. Este requisito é tanto mais importante, quando se

pretende realizar análises não-lineares dinâmicas no domínio do tempo, com integração passo a passo, face à sua exigência em termos computacionais.

Contudo, um processo de calibração/validação deve assegurar que a modelação numérica reproduz, tão fielmente quanto possível, o actual estado da construção. A calibração é, assim, uma tarefa tão necessária quanto complexa, que exige um procedimento interactivo e faseado, onde, em função dos resultados disponíveis da caracterização, se vão progressiva e criteriosamente ajustando alguns dos parâmetros dominantes do comportamento da construção. Análises lineares (estáticas e modais) preliminares são essenciais não só no processo de calibração mas também para identificar as principais vulnerabilidades estruturais como para definir estratégias para as subseqüentes análises não lineares, estáticas e dinâmicas.

Salienta-se, assim, que a avaliação da segurança sísmica das construções históricas é uma tarefa bastante complexa, que envolve aspectos subjectivos relacionados com incertezas e dificuldades na avaliação rigorosa de diversos fenómenos relacionados com o comportamento da construção. Em geral, para validar os resultados de análises preliminares (qualitativos e quantitativos, numéricos e experimentais) é recomendável a observação da construção a longo prazo recorrendo a sistemas de monitorização. A necessidade de intervenção estrutural, a justificar-se, deve fazer-se em respeito pelo valor cultural e histórico da construção, com o mínimo de alterações estruturais (princípio da intervenção mínima), com materiais (compatíveis e duráveis) e técnicas adequadas não descurando o controlo da qualidade dos trabalhos efectuados e salvaguardando-se a possibilidade de futuras intervenções (reversibilidade das soluções).

Por último, também a dificuldade em avaliar os efeitos/eficácia das intervenções sugere o recurso a uma metodologia incremental baseada na observação. Desta forma, a intervenção deve fazer-se de forma gradual e intercalada com períodos de observação que determinarão a adopção das medidas correctivas suplementares [6]. Também neste contexto, os sistemas de monitorização desempenham um papel muito importante.

3. A IGREJA DE SANTA MARIA DE BELÉM – CASO DE ESTUDO

O Mosteiro dos Jerónimos, construído durante o século XVI, é provavelmente a jóia da coroa do património arquitectónico Português. Este conjunto monumental estende-se numa área aproximada de $300 \times 50 \text{ m}^2$ com uma altura média de cerca de 20 m (50 m nas torres). A sua construção iniciou-se nos primórdios do século XVI tendo-se prolongado durante aproximadamente um século. Não se conhecem os documentos originais do seu projecto. Foi construído em calcário de Lióz com materiais provenientes, segundo documentos históricos, dos arredores de Lisboa e da pedra de Belém adjacente ao monumento. O Mosteiro está localizado na margem direita do rio Tejo e é composto por dois grandes espaços: (a) a Igreja e os Claustros; (b) os dormitórios (actualmente Museu da Marinha e Museu Etnográfico de Arqueologia). A Igreja, presente caso de estudo, é constituída por uma nave principal, um transepto com duas capelas laterais, uma capela-mor e uma torre sineira, no canto da fachada Sul com a fachada poente (ver Figura 1). A volumetria da Igreja apresenta dimensões consideráveis, com 70 m de comprimento, 23 m de largura na nave (40 m no transepto) e uma altura média de 24 m.

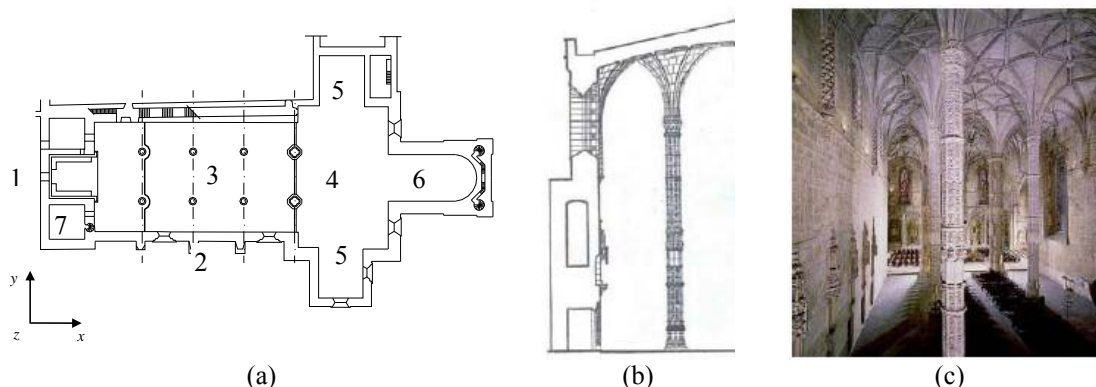


Figura 1: Igreja do Mosteiro dos Jerónimos: (a) planta (1-portal axial a Poente, 2-portal lateral, 3-nave, 4-transepto, 5-capelas laterais, 6- ábside; 7-torre sineira a Sul); (b) secção transversal da nave (metade Norte); (c) interior da nave vista do coro alto.

A nave principal é dividida por dois alinhamentos de pilares muito esbeltos, com uma altura livre de cerca de 16 m. Além do embasamento, os proeminentes capitéis no topo dos pilares reduzem significativamente os vãos efectivos da abóbada de cobertura que sustentam (ver Figura 1b). A secção transversal dos pilares é octogonal com um raio médio de 1.04 m na nave e 1.88 m na transição da nave para o transepto. A parede Sul, com uma espessura média de 1.9 m, é rasgada por pronunciadas aberturas sendo a sua estabilidade assegurada por três contrafortes trapezoidais. A parede Norte, com uma espessura média de 3.5 m, incorpora no seu interior uma escada de acesso ao coro alto. A cobertura da nave é uma abóbada de berço rebaixada, provida de uma malha de nervuras aparentes onde assenta uma forra em lajetas de pedra. Na capela-mor salientam-se ainda as paredes com elevada espessura (cerca de 2.5-2.7 m). Mais detalhes dos aspectos arquitectónicos da Igreja podem ser obtidos nas referências [4] e [5].

A Igreja resistiu ao violento sismo de 1 de Novembro de 1755. Contudo, em Dezembro de 1756 um novo abalo sísmico causou o colapso de um pilar da nave, junto ao coro, resultando na ruína parcial da abóbada da nave e do coro alto, ver mais detalhes em [11]. Em 1887-1888 a torre Sul foi elevada e alterada. Em 1947-1949 a cobertura da nave foi intervencionada tendo-se instalado no extradorso da abóbada paredes longitudinais em alvenaria para assentar as telhas da cobertura, ver Figura 2d. Em 1930 e 1963, tiveram lugar pequenos trabalhos de conservação com o refechamento das juntas das abóbadas da nave e do transepto. Em 1999-2001 foi efectuado um estudo sobre as patologias da pedra dos Jerónimos. Desde 1949 que diversos documentos se referem à queda de pequenos fragmentos de pedra provenientes das abóbadas a Igreja. A sucessão destes acontecimentos alertou para a necessidade de efectuar estudos mais aprofundados de avaliação das actuais condições de segurança da construção.

A análise dos estudos existentes sobre a Igreja permite concluir que a nave apresenta pronunciadas deformações com desaparecimento das paredes exteriores e pilares da nave (Figura 2a) [4]. Por seu lado, os resultados da inspecção com radar e ultra-sons indiciam que os segmentos de pedra dos pilares não serão monolíticos, ver [3], [4] e [13], e que uma argamassa de enchimento de espessura variável cobre o extradorso da abóbada da nave (Figura 2c). Por outro lado, identificou-se uma argamassa pobre de cal aérea com pedras calcárias que preenche o interior dos capitéis dos pilares [17]. Finalmente, um relatório de reconhecimento geológico-geotécnico identifica o maciço rochoso a poucos metros abaixo da superfície do solo e a prática de fundações directas na construção do mosteiro.

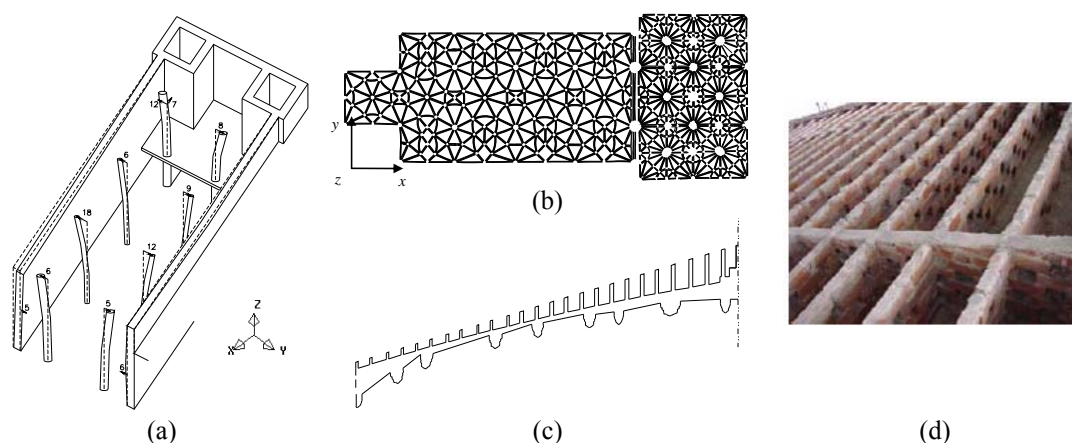


Figura 2: Levantamento de aspectos geométricos da nave: (a) deformações nos pilares e paredes exteriores; (b) planta da abóbada; (c) meia secção transversal da abóbada; (d) paredes de alvenaria no extradorso da abóbada para assentar as telhas da cobertura.

Com base em informação geométrica dos elementos estruturais da construção, foi obtido um conjunto de indicadores simplificados. Os resultados resumem-se na Tabela 1. Salienta-se a elevada esbelteza dos pilares (indicador γ_4) bem como a aparente vulnerabilidade da Igreja para acções sísmicas na direcção transversal (indicador $\gamma_{3,y}$). Para informação mais detalhada sobre estes indicadores consultar as referências [10] e [14].

Tabela 1- Indicadores simples da segurança sísmica da construção.

Relação área da secção das paredes vs. área de implantação (γ_1)		Relação peso global vs. área da secção das paredes (γ_2)		Coeficiente de corte basal (γ_3)		Esbeltez dos pilares (γ_4)	Relação espessura vs. altura dos pilares (γ_5)	Relação espessura vs. altura das paredes exteriores (γ_6)
X	Y	X	Y	X	Y			
0.17	0.12	1.2	0.8	1.4	0.95	70	0.06	0.08

Considerando insuficiente a informação existente relativa à caracterização da construção, nomeadamente do ponto de vista estrutural, foi decidido promover uma campanha complementar de ensaios experimentais destinada a: (a) caracterização mecânica dos materiais; (b) identificação dinâmica dos parâmetros modais; (c) planeamento e instalação de sistemas de monitorização estática e dinâmica.

Na impossibilidade de se efectuar ensaios com macacos planos (semi-destrutivos) e de se proceder à extracção de amostras, foi feita a caracterização mecânica da alvenaria em laboratório sobre provetes de calcário de Lióz com propriedades naturais similares à pedra utilizada na construção do Mosteiro. Foram executados ensaios de compressão uniaxial em provetes de alvenaria, com diferentes condições de junta, sob condições monotónicas e cíclicas. Para o valor médio da resistência à compressão obteve-se 10 MPa, enquanto que o valor médio do módulo de elasticidade variou entre 20 e 50 GPa. Como é expectável para materiais naturais, a gama de valores encontrados apresenta uma grande dispersão caracterizada por coeficientes de variação da ordem dos 30%.

Para a caracterização do comportamento da construção foram instalados sistemas de monitorização estática e dinâmica. Os indícios de que a nave controla o comportamento da Igreja, centraram as atenções da caracterização nesta zona tendo-se concentrado aí a instalação dos sistemas de monitorização.

O sistema de monitorização estático (Figura 3) é composto por: (a) seis sensores de temperatura (TS1 a TS6); (b) dois clinómetros uniaxiais (C1 e C2); (c) um “data logger” para aquisição e registo de dados (para mais detalhes consultar [12]). Em função dos resultados preliminares e da influência das condições ambientais poder-se-á justificar futuramente a instalação de higrómetros e anemómetros. De igual forma, poderão, se necessário, vir a instalar-se dispositivos de controlo da abertura de fenda.

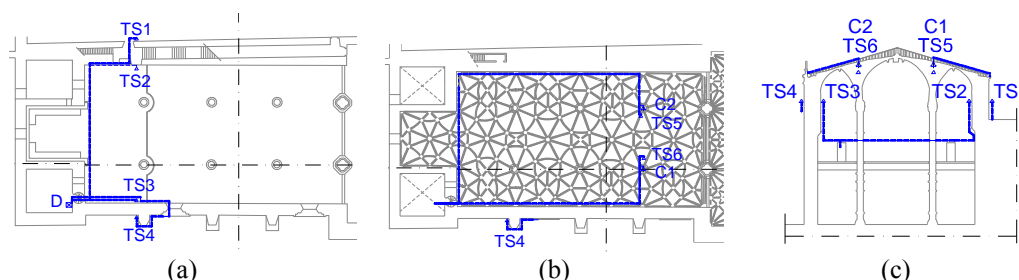


Figura 3. Sistema de monitorização estático: (a) planta da nave; (b) planta da abóbada da nave; (c) secção transversal da nave.

Por seu lado, o sistema de monitorização dinâmica é composto por dois registadores de movimento, cada um dos quais ligado a um acelerómetro triaxial. Os registadores estão ligados em rede o que permite a sua activação e operação sincronizada, quer para eventos esporádicos quer para registos periódicos pré-programados. A Figura 4 ilustra os dois pontos escolhidos para a instalação dos acelerómetros.

Também a identificação dinâmica se concentrou na nave da Igreja. Desta feita, foram identificados os pilares e a abóbada, recorrendo a duas técnicas experimentais (EFDD e SSI). No caso da abóbada, foram seleccionados para o efeito trinta pontos nos quais se efectuaram medições da resposta em termos de aceleração, ver Figura 5a. Os primeiros dois modos de vibração identificados, modos locais da nave, apresentam-se na Figura 5b, c [12].

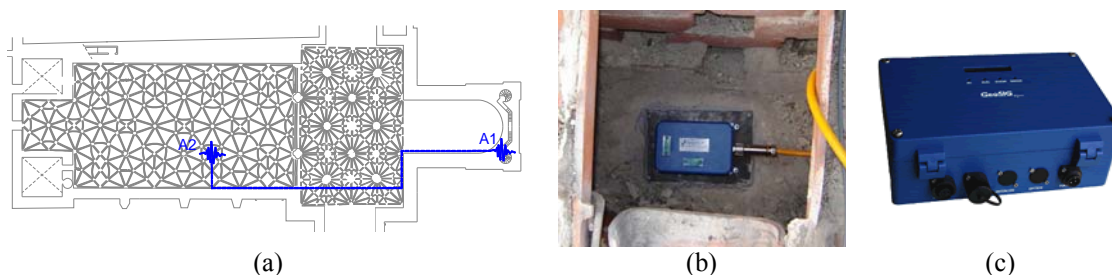


Figura 4. Sistema de monitorização dinâmica: (a) localização dos acelerómetros (A1 na base e A2 no extradorso da abóbada da nave); (b) sensor A2 directamente sobre a abóbada; (c) registorador e analisador de sinal.

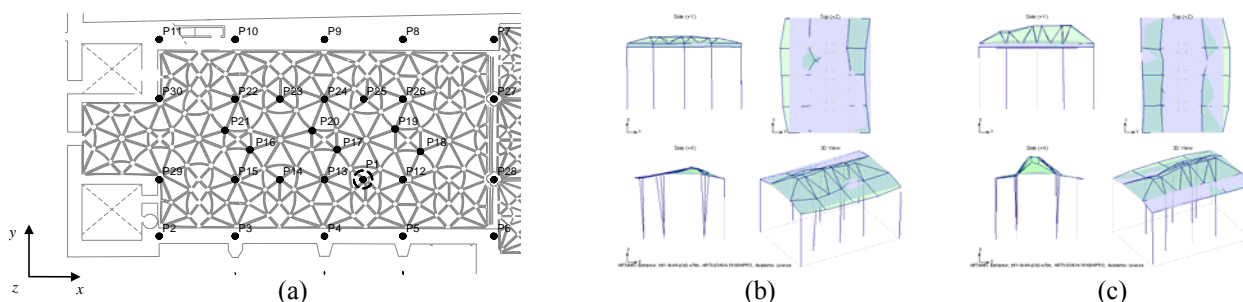


Figura 5. Identificação experimental dos parâmetros modais da abóbada da Igreja: (a) localização dos pontos de medição; (b) primeiro modo de vibração identificado com 3.7 Hz; (c) segundo modo identificado com 5.1 Hz.

A Tabela 2 resume as quatro primeiras frequências de vibração medidas, os coeficientes de amortecimento e o indicador de correlação (MAC- “Modal Assurance Criteria”) para ambas as técnicas. A caracterização dinâmica dos pilares identificou uma configuração de vibração típica de primeiro modo com uma frequência fundamental de 7.0 Hz.

Tabela 2 – Frequências de ressonância e coeficientes de amortecimento medidos na abóbada da nave.

Modo	Frequência [Hz]		Amortecimento [%]		MAC
	EFDD	SSI	EFDD	SSI	
1	3.69	3.68	2.34	1.26	0.99
2	5.12	5.04	1.11	2.68	0.92
3	6.29	6.30	1.00	0.82	0.67
4	7.23	7.29	0.77	1.44	0.67

Estudos sísmicos recentes, baseados no cruzamento da sismicidade com os acidentes tectónicos relativos ao período entre 1900 e 1990 na zona Oeste da Península Ibérica revelaram que a perigosidade sísmica de Lisboa é condicionada por duas fontes sismogénicas, uma na zona Atlântica adjacente e outra na zona Continental. Com base em estudos estocásticos da perigosidade sísmica para Portugal Continental, ver [18], foram utilizados três cenários de perigosidade nas simulações numéricas subsequentes, com períodos de retorno de 475, 975 e 5000 anos. Face à ausência de registos sísmicos consistentes com estes cenários, recorreu-se à geração artificial usando modelos numéricos específicos, ver [2], tendo-se produzido três histórias temporais de aceleração por cenário, cujos principais parâmetros se resumem na Tabela 3.

Com base no relatório geológico-geotécnico e nas escavações efectuadas para a construção do Centro Cultural de Belém, adjacente ao Mosteiro, bem como na ausência de sinais visíveis de assentamentos diferenciais é expectável que o Mosteiro dos Jerónimos esteja fundado no maciço rochoso. Desta forma, não se consideraram efeitos de sítio na acção sísmica.

Tabela 3 – Características dos cenários sísmicos e principais características dos sinais gerados.

Período de retorno (anos)	Magnitude (M_w)	Distância à fonte (km)	PGA /g	Duração (seg.)	Designação do sinal
475	7.4	204.7	0.10	10.2	475_M74_1
		204.7	0.09	10.6	475_M74_2
		204.7	0.12	7.70	475_M74_3
975	7.8	204.7	0.17	14.9	975_M78_1
		204.7	0.17	13.9	975_M78_2
		204.7	0.14	15.0	975_M78_3
5000	8.2	204.7	0.21	20.29	5000_M82_1
		204.7	0.23	20.71	5000_M82_2
		204.7	0.21	20.75	5000_M82_3

Para as simulações e análises numéricas, foi desenvolvido um modelo global da Igreja e das estruturas adjacentes cuja malha de elementos finitos se ilustra na Figura 6. Face à complexidade da estrutura, recorreu-se a um modelo tridimensional de elementos finitos de viga de Timoshenko de 3 nós, formulação isoparamétrica com integração longitudinal e transversal). Com efeito, as dificuldades inerentes às análises não lineares dinâmicas, com integração passo a passo, desaconselham a utilização de malhas muito refinadas e de elementos finitos mais complexos. Foi adoptado um modelo combinado de fendilhação e plasticidade baseado na deformação total (“total strain crack model”) com resistência à compressão $f_c = 10 \text{ N/mm}^2$ e resistência à tracção $f_t = 0.01 \text{ N/mm}^2$. Todas as análises numéricas foram executadas com o software de cálculo DIANA 9.1 [19].

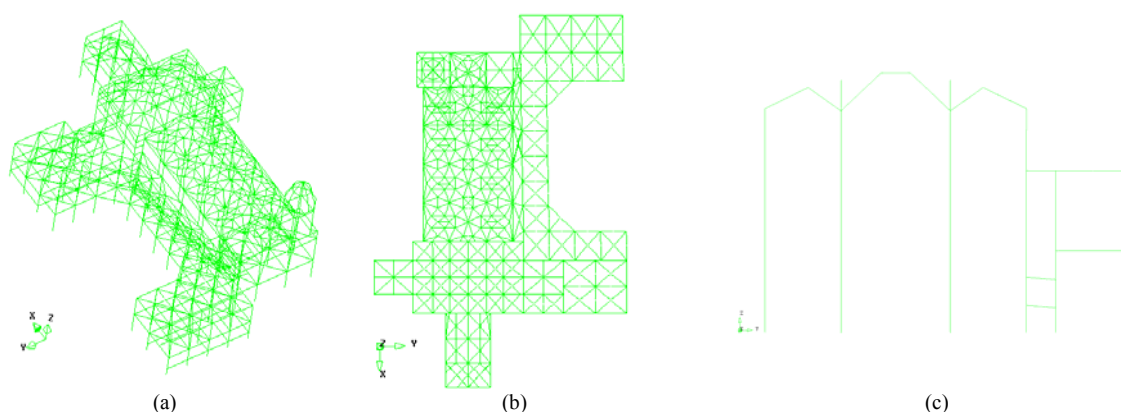


Figura 6. Malha do modelo de elementos finitos: (a) perspectiva; (b) planta; (c) secção transversal da nave.

A calibração do modelo compreendeu duas fases principais. Primeiramente procedeu-se à comparação com um modelo numérico existente para a nave, parcial mas detalhado, sob a acção do seu peso próprio [9]. Nesta fase, a calibração centrou-se na distribuição da carga e em aspectos da rigidez da abóbada. Numa segunda fase, foi calibrada a distribuição da elasticidade equivalente com base em resultados de identificação dinâmica e resultados de caracterização mecânica dos materiais. Desta forma atribuiu-se um módulo de elasticidade de 30 GPa aos pilares e 12 GPa aos restantes elementos estruturais. Estes valores estão qualitativamente em sintonia com os resultados da inspeção com GPR (Ground Penetrating Radar) que parecem confirmar a melhor qualidade da alvenaria dos pilares [3] e [15]. Os primeiros resultados representativos do comportamento estático foram também analisados no sentido de validar esta distribuição da elasticidade. As condições de apoio foram mantidas encastradas. Na Figura 7 ilustra-se o primeiro e o quarto modos de vibração avaliados numericamente.

As análises lineares estáticas preliminares, sob a acção do peso próprio e do sismo estático equivalente [16], indiciam a direcção transversal como a mais vulnerável e condicionante do comportamento da Igreja, com particular ênfase para a nave. Estas análises revelam também que o comportamento da nave é controlado por fenómenos não-lineares uma vez que aparecem elevados estados de tensão em vários elementos da abóbada.

Assim, decidiu proceder-se a análises não lineares estáticas (tipo “pushover”), horizontais e verticais, com incrementos de carga proporcionais ao peso próprio para caracterizar as respectivas curvas de capacidade da construção. Os factores de carga de colapso bem como os respectivos mecanismos apresentam-se na Figura 8. Estes resultados evidenciam a necessidade de proceder a cuidadosas análises não lineares dinâmicas sob acções sísmicas no domínio do tempo.

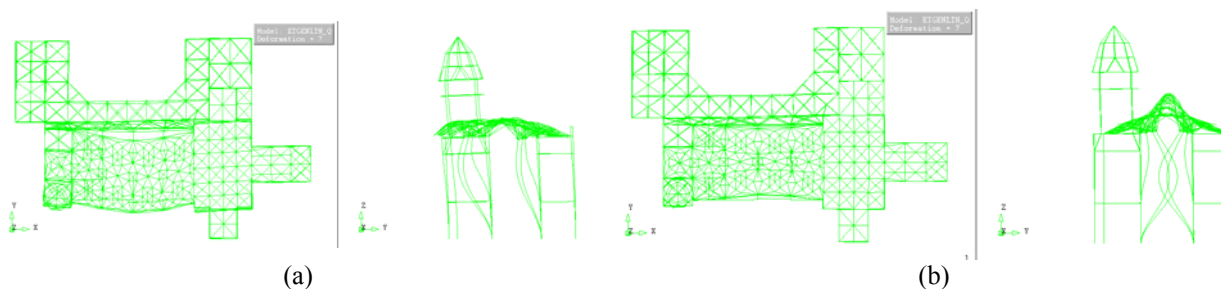


Figura 7. Modos de vibração numéricos: (a) 1º modo com 3.79 Hz; (b) 4º modo com 5.34 Hz.

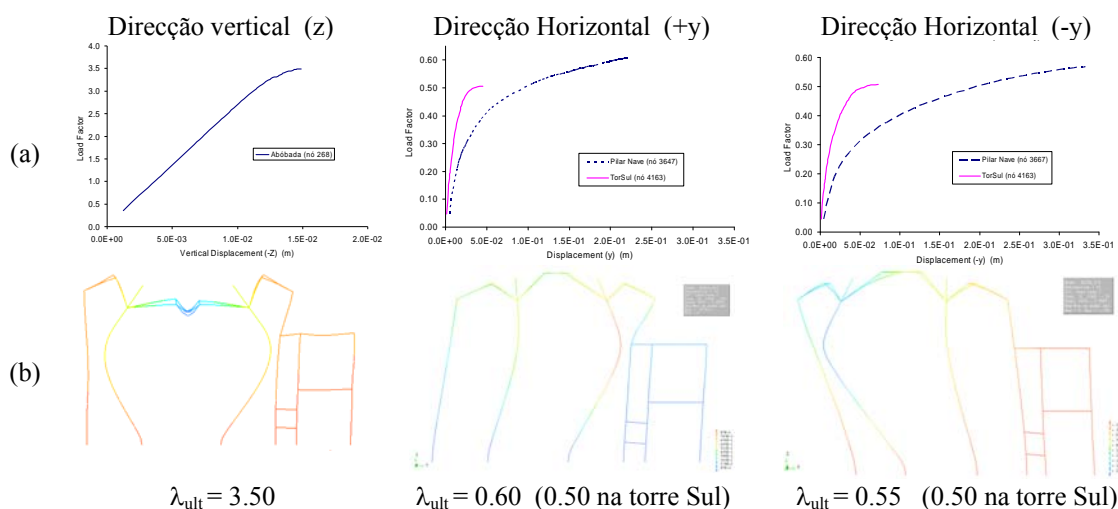


Figura 8. Análises não lineares estáticas: (a) curvas de capacidade; (b) secção transversal da nave, mecanismos e respectivo factor de colapso ($\lambda =$ força aplicada / peso próprio).

Com base nesta metodologia, foram efectuadas análises não lineares dinâmicas na direcção transversal (y) usando o método de integração de Hilbert-Huges-Taylor com um passo de 0.01 s. Foi considerado um coeficiente de amortecimento de 2% para a matriz de amortecimento de Rayleigh. Até à data, apenas se dispõe dos resultados preliminares para o cenário de 475 anos de período de retorno, cujas principais conclusões são:

- O máximo “drift” ocorre no fuste dos pilares e é inferior a 0.3%;
- O coeficiente de corte basal médio na direcção transversal (y) é de 0.10 (com um mínimo de 0.08 e máximo de 0.13);
- Há um acentuado efeito de pórtico entre as paredes e os pilares da nave, que contribuem para variações, relativamente à acção do peso próprio, da ordem dos 60% nas reacções verticais dos pilares (ver Figura 9b) e de 1000% nas máximas tensões de compressão nas paredes Norte e Sul;
- Apesar das elevadas tensões de compressão (7-8 MPa) os pilares e as paredes da nave permanecem no domínio elástico;
- A abóbada da nave fica sob elevados estados de compressão;
- É eminente o colapso por derrubamento do campanário da torre Sul;
- A rigidez remanescente, após o sismo, é cerca de 60% da original.

De acordo com estes resultados preliminares, para o cenário sísmico correspondente a 475 anos de período de retorno ($M_w = 7.4$) a Igreja ficará sob importantes estados de tensão e de fendilhação não sendo expectável a sua ruína parcial ou global. Os cenários de perigosidade sísmica mais severos estão em análise sendo expectável que os seus resultados sejam determinantes para a avaliação da segurança sísmica da construção.

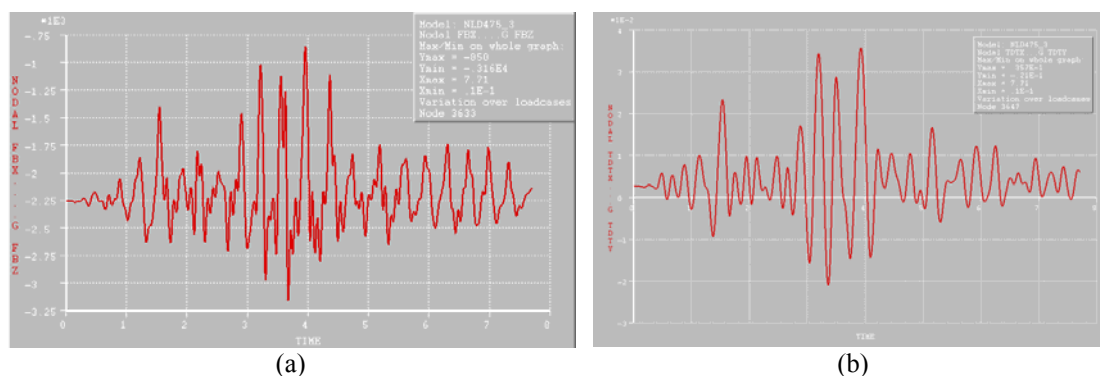


Figura 9. Aspectos da resposta à acção sísmica (475_M74_3) do pilar central Norte da nave: (a) reacção vertical; (b) deslocamentos transversais (y) no fuste.

4. CONCLUSÕES

A metodologia apresentada neste artigo destina-se a avaliar a segurança sísmica de construções antigas de elevado valor patrimonial e a mitigar o risco sísmico associado, constituindo como tal uma ferramenta auxiliar de políticas de gestão do património edificado.

A metodologia apresenta um carácter multidisciplinar e interactivo envolvendo diversas áreas do conhecimento como a arqueologia, a arquitectura, a sismologia, a geologia, a engenharia de estruturas, a geotecnia, entre outras, exigindo simultaneamente bons meios computacionais e laboratórios bem equipados.

Os resultados, experimentais e numéricos, adquiridos com a aplicação desta metodologia à Igreja de Santa Maria de Belém são aqui apresentados e discutidos. Para o modelo numérico foi utilizada uma malha tridimensional de elementos finitos de viga, admitindo o comportamento não linear material e geométrico, cuja calibração se baseou em resultados experimentais e numéricos de referência. De acordo com os resultados das análises efectuadas, para o cenário sísmico de 475 anos de período de retorno ($M_w = 7.4$), a Igreja ficará sob importantes estados de tensão e de fendilhação não sendo expectável a sua ruína parcial ou global. Contudo, o colapso por derrubamento do campanário da torre Sul estará eminente. A análise da resposta da Igreja à acção sísmica correspondente aos cenários mais severos está neste momento em curso.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Dr.^a Alexandra Carvalho (LNEC) a disponibilização dos acelerogramas artificiais usados na análise dinâmica não linear. Os autores agradecem igualmente o apoio da Comissão Europeia através do Projecto de Investigação “ALA/95/23/2003/077-122: Improving the Seismic Resistance of Cultural Heritage Buildings”.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., (2000), Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries, *Construction and Building Materials*, 14, pp 199-233.
- [2] Carvalho, A.; Costa, A. C., (2004), Modelos estocásticos com ruptura progressiva da falha para a caracterização da acção sísmica em Portugal, Relatório 240/04-NESDE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

- [3] Fernandes, F., (2006), Evaluation of two novel NDT techniques: microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry. *PhD Thesis*, University of Minho, Portugal, (disponível em www.civil.uminho.pt/masonry).
- [4] Genin, S., (1995), Descriptive study of the vault in the Church of the Monastery of Santa Maria de Belém in Lisbon (in French), MSc. Thesis, Katholiek Universiteit Leuven, Belgium.
- [5] Genin, S., (2001), The nave vault of the Jerónimos Monastery Church in Lisbon, Actas do III Seminário Internacional - Construções Históricas 2001, Eds. P. Lourenço e P. Roca, Universidade do Minho, Portugal, pp 293-302.
- [6] ICOMOS, (2001), Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage, International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage.
- [7] Kramer, S. L., (1996), Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall, Inc.
- [8] Lourenço, P.B., Córias e Silva, V., (1998), Survey and assessment of Portuguese heritage using non-destructive methods, in view of its seismic rehabilitation, Monument-98, Workshop on seismic performance of monuments, pp 157-166, Lisbon, Portugal.
- [9] Lourenço, P.B., Krakowiak, K.J., (2003), Avaliação da estabilidade da abóbada da Igreja do Mosteiro dos Jerónimos, Relatório 03-DEC/E-02, Universidade do Minho, Portugal.
- [10] Lourenço, P.B., Roque, J.A., (2006), Simplified indexes for seismic vulnerability of ancient masonry buildings, *Construction and Building Materials*, 20(4), pp 200-208.
- [11] Mourão, S., (2001), “Estudo do comportamento sísmico do Mosteiro dos Jerónimos, *Tese de Mestrado*, Universidade do Minho, Portugal.
- [12] Oliveira, D.V.; Ramos, L.F.; Lourenço, P.B.; Roque, J.A., (2005), Structural monitoring of the Monastery of Jerónimos, International Conference – 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, November, Lisbon, Portugal.
- [13] Oliveira, M.M.P., (2002), Prospecção por radar na Igreja do Mosteiro dos Jerónimos, Relatório 177/2002-NP, LNEC, Portugal.
- [14] Roque, J.A., (2002), Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria, *Tese de Mestrado*, Universidade do Minho, Portugal (disponível em www.civil.uminho.pt/masonry).
- [15] Roque, J.A., (2007), Metodologia integrada para avaliação da segurança sísmica das construções históricas e mitigação do risco sísmico. O caso de estudo da Igreja de Santa Maria de Belém., *Tese de Doutoramento* (em preparação), Universidade do Minho, Portugal.
- [16] RSA (M.H.O.P.T), (1983), Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto Legal nº. 235/83, INCM, Lisboa, Portugal.
- [17] Silva, A.S., (2002), Caracterização de Materiais Provenientes das Abóbadas da Igreja dos Jerónimos em Lisboa, Parte integrante do Relatório 176/2002-NCE, LNEC, Portugal.
- [18] Sousa, M.L., (2006), Risco sísmico em Portugal Continental, *Tese de Doutoramento* em Engenharia do Território, Instituto superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- [19] TNO, (2005), Building and Construction Research, DIANA finite element analysis, User's Manual, Release 9.1