



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Carlos Almendra Roque

**Metodologia Integrada para Avaliação e
Mitigação da Vulnerabilidade Sísmica das
Construções Históricas em Alvenaria: A
Igreja dos Jerónimos como Caso de Estudo**

Tese de Doutoramento
Engenharia Civil / Estruturas

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Paulo José Brandão Barbosa Lourenço
Professor Daniel Vitorino de Castro Oliveira

Dezembro de 2009

DECLARAÇÃO

Nome: João Carlos Almendra Roque

Endereço electrónico: jroque@ipb.pt Telefone: 273 30 31 47

Número do Bilhete de Identidade: 9642151 - 7

Título:

Metodologia Integrada para Avaliação e Mitigação da Vulnerabilidade Sísmica das Construções Históricas em Alvenaria: A Igreja dos Jerónimos como Caso de Estudo

Orientador(es):

Professor Doutor Paulo José Brandão Barbosa Lourenço (Orientador)

Professor Doutor Daniel Vitorino de Castro Oliveira (co-Orientador)

Ano de conclusão: 2009

Designação do Doutoramento:

Doutoramento em Engenharia Civil / Estruturas

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ___/___/___

Assinatura: _____

Aos meus pais

À minha filha

Joana

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho queria manifestar o meu agradecimento a todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para a sua realização. Não posso, contudo, deixar de dirigir explicitamente este agradecimento:

- Aos meus orientadores Professor Paulo Lourenço e Professor Daniel Oliveira pela disponibilidade, pelos conselhos, pelo acompanhamento do trabalho e pela sua cuidada revisão;
- À Doutora Alexandra Carvalho, do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pela simpatia e pela disponibilidade e apoio manifestados na caracterização da acção sísmica, nomeadamente através geração dos acelerogramas artificiais usados nas análises dinâmicas não lineares realizadas;
- À Dra. Isabel Cruz de Almeida, Directora do Mosteiro dos Jerónimos, pelas facilidades concedidas no acesso à realização dos trabalhos experimentais efectuados na Igreja dos Jerónimos;
- Ao colega Luís Ramos pela ajuda nos trabalhos experimentais realizados na Igreja dos Jerónimos e no tratamento dos respectivos resultados;
- À Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança e ao Instituto Politécnico de Bragança pelas condições concedidas.

Finalmente, uma palavra especial de agradecimento aos meus amigos e à minha família, nomeadamente:

- Aos meus pais e aos meus irmãos que sempre me apoiaram e encorajaram;
- À Eduarda pelo seu amor e compreensão demonstrada ao longo destes últimos anos;
- À minha filha Joana pelo tempo precioso que subtraí à sua companhia.

“A mente que se abre a uma ideia nova jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

“Uma teoria é tanto mais marcante quanto maior for a simplicidade das suas premissas, quanto mais tipos de coisas diferentes ela relatar, e quanto mais extensa for a sua área de aplicabilidade”

Albert Einstein

RESUMO

A preservação das construções históricas de elevado valor patrimonial é hoje um tema muito actual nas sociedades modernas tanto mais quanto estas construções desempenham um papel cada vez mais importante na indústrias do turismo e, conseqüentemente, na economia e na imagem e auto-estima dos países e seus povos.

A perigosidade sísmica de Portugal e de muitas outras regiões do globo de que se destacam, pela sua proximidade, os países da bacia Mediterrânica, coloca um elevado número de construções históricas, nomeadamente as construções em alvenaria, particularmente vulneráveis a acções sísmicas, sob potencial risco de colapso.

Pese embora a complexidade e a peculiaridade destas construções, em geral caracterizadas por uma falta generalizada de informação de que se destaca a ausência de elementos de projecto e o desconhecimento da constituição interna dos seus elementos estruturais e do seu estado actual, são as lacunas metodológicas ainda existentes no estudo destas construções, geralmente orientado por regras e procedimentos adequados para novas construções, que conduzem frequentemente a intervenções desajustadas ou desproporcionadas à dimensão dos problemas e ao valor patrimonial das construções. Além disso, as soluções destinadas a incrementar a resistência sísmica colidem frequentemente com a necessidade de preservar o valor histórico, cultural e arquitectónico. Se, adicionalmente, se atender às incertezas existentes na caracterização da acção sísmica, a avaliação da segurança das construções históricas, em particular da segurança sísmica, permanece ainda um imenso desafio para técnicos, investigadores e para a indústria.

Neste contexto, este trabalho pretende dar um contributo para promover a conservação, reabilitação e reforço das construções históricas em alvenaria através de uma metodologia própria que sustente diagnósticos mais verosímeis e intervenções mais adequadas e proporcionadas, em respeito pelos princípios hoje aceites que procuram minimizar a extensão e a intrusividade das intervenções, mas que garantam as indispensáveis condições de segurança. Propõe-se assim uma

metodologia multidisciplinar e integrada cujo lema é “maximizar a investigação para minimizar a intervenção” e onde se dá primazia à observação da construção, baseada na auscultação e na monitorização estrutural, e à prática de intervenções faseadas e interactivas com os resultados. A engenharia de estruturas desempenha um papel fulcral funcionando como o elemento integrador da metodologia.

Como passos principais da metodologia proposta destacam-se: (i) pesquisa, compilação e análise de dados históricos relevantes para a caracterização genérica da construção; (ii) instalação de sistemas de monitorização estática e dinâmica; (iii) caracterização mecânica dos materiais e/ou de elementos estruturais; (iv) identificação dinâmica da estrutura; (v) caracterização da acção sísmica, desde a identificação de potenciais áreas sismogénicas, que condicionam a perigosidade geográfica, até à geração artificial de acelerogramas incluindo a consideração dos efeitos de sítio; (vi) desenvolvimento de modelos de simulação numérica do comportamento estrutural, calibrados a partir de danos identificados e de resultados experimentais; (vii) análises estáticas não-lineares do tipo “pushover” e de análises dinâmicas não-lineares, no domínio do tempo, para diferentes níveis de perigosidade sísmica, consistentes com o enquadramento tectónico regional; (viii) identificação da capacidade e das vulnerabilidades estruturais, dos modos de colapso e avaliação da segurança; (ix) recomendações para minimizar risco sísmico das construções, incluindo propostas de eventuais soluções de intervenção para a conservação/reabilitação ou reforço.

A metodologia proposta é aplicada a um emblemático caso de estudo, constituído pela Igreja de Santa Maria de Belém, como parte integrante do complexo do Mosteiro dos Jerónimos, em Lisboa. Apresentam-se e discutem-se os resultados mais relevantes do estudo efectuado, na sequência da aplicação da metodologia, através dos quais se sustenta o diagnóstico da construção. Para as simulações numéricas do comportamento dinâmico da Igreja recorreu-se a sinais sísmicos artificiais correspondentes a três cenários sísmicos de perigosidade crescente traduzida por períodos de retorno com 475, 975 e 5000 anos. Finalmente, tendo presente o elevado valor patrimonial da construção, propõem-se, analisam-se e discutem-se possíveis estratégias de intervenção/reforço com vista à redução das vulnerabilidades identificadas e à mitigação do risco sísmico da Igreja.

ABSTRACT

The preservation of historical constructions with high cultural heritage value is a current theme in modern societies as these constructions play an important role in the industry of tourism and culture, and consequently in the economy and in the image of countries and self-esteem of people. The seismic hazard of Portugal and, due to its vicinity, of the Mediterranean basin puts under potential risk of damage and collapse a high number of historical constructions, namely most of the old masonry constructions, particularly vulnerable to seismic actions.

In spite of the complexity and the peculiarity that historical constructions present, in general characterized by a widespread lack of information, the gaps in methodological approaches followed for the study of these constructions, usually guided by rules and procedures appropriate for new constructions, are frequently responsible for inadequate interventions or even disproportional to the size of problems and to the heritage value of the constructions. Besides, the solutions to increase the seismic resistance are usually incompatible with the need of preserving the historical, cultural and architectural values. Considering further the uncertainties in the seismic action characterization, the assessment of the constructions' safety, in particular its seismic safety, becomes a huge challenge for technicians, researchers and industry.

Within this context, this work intends to contribute to promote the conservation, maintenance and rehabilitation of historical masonry constructions. For that purpose, it's developed and proposed a suitable methodology that supports the diagnoses and consequently more appropriate and proportionate interventions, with respect to the principles of the "minimum intervention" approach, but that guarantees the indispensable safety conditions. It is proposed a multidisciplinary and integrated methodology whose philosophy is "maximize the investigation to minimize the intervention" and that promotes the observation of constructions, based on structural monitoring,

and phased interventions with interaction with the results. In this methodology the structural engineering carries out a key role working as an integrator element.

The proposed methodology stands in the following main steps: (i) research, compilation and analysis of relevant historical data for generic characterization of the construction; (ii) installation of static and dynamic monitoring systems; (iii) experimental tests for mechanical characterization of materials and/or structural elements; (iv) dynamic identification of the structure; (v) characterization of the seismic action, from the identification of potential source areas to the artificial generation of acceleration time histories, including local site effects; (vi) numerical modelling and model calibration against existing experimental results, as a tool to simulate the structural behaviour; (vii) non-linear static analyses (pushover analysis) and non-linear dynamic analyses, in the time domain, for different seismic hazard levels; (viii) identification of structural vulnerabilities, collapse modes and safety evaluation; (ix) recommendations to minimize the seismic vulnerability of the construction, including possible intervention solutions for its conservation/rehabilitation or reinforcement.

The proposed methodology is then applied to an emblematic case study, constituted by the Church of Santa Maria of Belém, an integrated part of the Jerónimos Monastery compound, in Lisbon. Based on this methodology, the most relevant results of the study are presented and discussed in detail, and further used to support the diagnosis of the construction. The seismic behaviour of the Church was numerically simulated using artificial seismic acceleration time histories in agreement with three seismic hazard scenarios for 475, 975 and 5000 years return periods, respectively.

Finally, considering the high heritage value of the construction, some possible intervention strategies intent to reduce the identified vulnerabilities and the seismic risk of the Church are proposed, analyzed and discussed.

INDICE

1. Introdução	1
2. Metodologia integrada de avaliação sísmica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Caracterização da construção	8
2.2.1. Métodos de inspecção e diagnóstico	11
2.2.2. Ensaios de identificação dinâmica	13
2.2.3. Monitorização estrutural	16
2.3 Caracterização geológico-geotécnica dos solos de fundação	17
2.4 Caracterização da acção sísmica local	18
2.5 Métodos simplificados de análise	19
2.6 Modelação e análises numéricas	20
2.6.1. Estratégias de modelação e análise	21
2.6.2. Modelação Numérica	29
2.6.3. Amortecimento	31
2.6.4. Calibração de modelos numéricos	39
2.7 Avaliação da segurança	44
2.8 Recomendações	48
3. A acção sísmica e as construções	49
3.1 Introdução	49
3.2 Sismicidade histórica de Portugal Continental	52
3.3 Enquadramento tectónico de Portugal	56
3.3.1 Zona Atlântica adjacente	59
3.3.2 Zona Continental	60
3.4 Caracterização da acção sísmica	66
3.4.1 Cenários sísmicos	66
3.4.2 Sinais de movimentos sísmicos	71
3.4.3 Efeitos de sítio	89

4. A Igreja do Mosteiro dos Jerónimos. Descrição e caracterização experimental.	97
4.1 Introdução	97
4.2 Análise histórica da construção	98
4.3 Caracterização preliminar da construção	101
4.3.1. Paredes	101
4.3.2. Pilares	102
4.3.3. Abóbadas	104
4.3.4. Fundações	106
4.4 Métodos simplificados de análise estrutural	109
4.5 Investigação experimental complementar	109
4.5.1. Caracterização mecânica dos materiais	111
4.5.2. Ensaio de identificação dinâmica	118
4.5.2.1. Identificação dinâmica da abóbada da nave	118
4.5.2.2. Identificação dinâmica dos pilares	122
4.5.3. Monitorização estrutural	125
4.5.3.1. Monitorização estática	126
4.5.3.2. Monitorização dinâmica	130
4.6 Caracterização da acção sísmica regional	133
5. Avaliação da segurança da Igreja dos Jerónimos	135
5.1 Introdução	135
5.2 Modelação numérica	136
5.2.1. Modelo geométrico	136
5.2.1.1. Abóbada da nave	137
5.2.1.2. Pilares da nave	139
5.2.1.3. Paredes da nave	140
5.2.2. Modelo constitutivo	141
5.2.3. Calibração do modelo numérico.....	141
5.3 Análises numéricas lineares	145
5.3.1. Análise modal	145
5.3.2. Análise estática linear para acções verticais	149
5.3.3. Análises estáticas equivalentes à acção sísmica	150
5.3.4. Conclusões das análises estáticas lineares	154

5.4 Análises não-lineares estáticas	154
5.4.1. Análise estática não-linear vertical	155
5.4.2. Análise não-linear estática horizontal (Y+)	161
5.4.3. Análise não-linear estática horizontal (Y-)	167
5.4.4. Conclusões das análises estáticas não-lineares	174
5.5 Análises não-lineares dinâmicas	175
5.5.1. Cenários de 475 anos de período de retorno	176
5.5.2. Cenários de 975 anos de período de retorno	177
5.5.3. Cenários de 5000 anos de período de retorno	177
5.5.4. Análise do corte basal	185
5.5.5. Análise modal após acção sísmica	190
5.6 Conclusões das análises dinâmicas	191
6. Estudo de possibilidades de intervenção estrutural	195
6.1 Introdução	195
6.2 Soluções de intervenção nos pilares	196
6.2.1. Solução 1: Aplicação de pré-esforço axial centrado nos pilares	198
6.2.2. Solução 2: Aumento da resistência disponível na secção dos pilares	200
6.2.3. Solução 3: Transferência de carga vertical dos pilares para as paredes laterais...	210
6.2.4. Solução 4: Aumento da rigidez das zonas de ligação pilar-abóbada	213
6.3 Conclusões sobre as soluções de intervenção estrutural ensaiadas	215
7. Considerações finais.....	217
Referências.....	223
Anexo I. Modelo geométrico	
Anexo II. Análise modal	
Anexo III. Análises estáticas não-lineares	
Anexo IV. Acelerogramas artificiais	
Anexo V. Análises dinâmicas não-lineares	
Anexo VI. Análises dinâmicas não-lineares após o reforço dos pilares	