

Resumo

A alvenaria de pedra compõe uma grande parte das estruturas existentes actualmente em Portugal, principalmente as catalogadas como património histórico. Como tal, a compreensão do seu comportamento revela-se de grande importância, sendo, no entanto, uma tarefa bastante complexa devido à grande variabilidade e incerteza das propriedades e da geometria deste material estrutural.

Em particular, quando estruturas deste tipo são submetidas a acções dinâmicas, nomeadamente do tipo sísmico é importante compreender o seu comportamento, nomeadamente os mecanismos de colapso e de progressão de dano.

Neste trabalho é efectuada a análise sísmica de uma antiga igreja portuguesa do século XII, a igreja de Gondar, situada na zona Norte de Portugal. Trata-se de uma análise tridimensional dinâmica com elementos finitos usando o programa de cálculo Cast3M (CEA, 1990) e considerando diferentes estratégias de modelação com diferentes níveis de complexidade geométrica. Foram adoptados dois tipos de modelos de comportamento material diferentes para a alvenaria: (a) linear e (b) não linear. O modelo não linear adoptado para a simulação do comportamento da alvenaria de pedra foi o modelo de dano contínuo (Faria, 1994), inicialmente desenvolvido para a análise de estruturas compostas por grandes massas de betão (ex: barragens). A utilização deste modelo exigiu uma análise de sensibilidade paramétrica por forma a avaliar a sua aplicabilidade a este tipo de material que é caracterizado por uma grande heterogeneidade e por um comportamento bastante anisotrópico. A calibração do modelo para a sua utilização em estruturas de alvenaria foi feita a partir dos resultados de ensaios experimentais realizados nas paredes de alvenaria e com base em resultados retirados da bibliografia disponível.

Na sequência deste trabalho foram então construídas e ensaiadas duas paredes de alvenaria de pedra no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade (FEUP). As paredes foram ensaiadas sob a acção de uma carga vertical constante e de uma história de deslocamentos cíclicos de amplitude crescente aplicada no plano da parede. Os resultados deste ensaio e a sua análise crítica permitiram não só adquirir um melhor conhecimento do comportamento

deste tipo de estrutura, como representam também um contributo no sentido da definição de dados para a utilização em modelos numéricos avançados, no caso deste trabalho o modelo de dano contínuo.

A igreja foi então analisada considerando uma fundação rígida e submetida à acção do peso próprio e de acelerogramas artificiais gerados com base nos espectros de resposta da norma EN 1998-1:2005 (CEN, 2005) e no zonamento proposto no Documento Nacional de Aplicação (DNA).

Os resultados das várias análises efectuadas foram discutidos e comparadas em termos de análise do estado de tensão e de deformação dos diferentes elementos da estrutura da igreja, avaliando a sua capacidade resistente a este tipo de acções e identificando as zonas mais críticas. Tendo sido também efectuada a comparação dos resultados obtidos com as diferentes estratégias de modelação, avaliando e comentando as suas diferenças.

Finalmente foram analisadas algumas soluções de reforço à acção sísmica ao nível da cobertura da igreja, tendo-se comparado e avaliado o seu desempenho e eficiência.

Abstract

Stone masonry is one of the oldest constructive solutions still in use; it was used on a huge diversity of constructions (houses, temples, bridges...) that can be found all throughout Portugal, mainly on structures labelled as historical heritage. The analysis of stone masonry structures creates important challenges, due to the fact that this material is very heterogeneous, with unknown internal geometry and characterized by a big mechanical variability and uncertainty. Therefore, understanding how these structures behave is very important, especially under dynamic loads, in order to evaluate possible collapse mechanisms and damage progression along the structure.

In this work, it's analysed the seismic behaviour of an ancient 17th century church, located in Gondar, in the north of Portugal. Consists on a tri dimensional finite element dynamic analysis using the program Cast3M (CEA, 1990) and considering two different modelling strategies in terms of geometrical complexity. It adopted two types of masonry

material behaviour: (a) linear and (b) non linear. The non linear model adopted to simulate the stone masonry behaviour was a continuum damage model (Faria, 1994), initially developed for the analyse of large volumes concrete structures, like dams. The first step to assess the model applicability to such a heterogeneous and anisotropic material like stone masonry was a parametric sensitivity analysis. The model numerical adjustment was preformed based on the experimental tests results made on masonry walls at LESE and on experimental results available on the bibliography.

With this in mind an experimental study was preformed concerning the structural behaviour of stone masonry walls built at the Laboratory of Seismic and Structural Engineering (LESE) of the Faculty of Engineering of Porto University. The walls were tested under constant vertical load and cyclic horizontal loads applied on the top of the wall, in order to simulate the effects of a horizontal seismic type action. The experimental tests results and its analysis, besides allowing a better understanding of the walls structural cyclic behaviour, in particular the estimation of the energy dissipation, ductility capacity, strength and stiffness, it also represented an important contribution towards the definition of data for using in advanced numerical models, such as the continuum damage model adopted in this work.

The church was then analysed considering a rigid foundation and submitted to its self-weight and to artificial generated accelerograms based on a normalized response spectra EN 1998-1:2005 (CEN, 2005) and on the zoning proposed in the Document of National Application (DNA).

The results of the different seismic modelling strategies, namely the stress and the deformation state of the structural elements, the assessment of the structures seismic response and the identification the most vulnerable spots, were compared, allowing us to assess the differences and to give answers to questions such as: Is it really necessary to perform highly complex and time consuming non linear analysis, when studying this type of structures? Do they bring any advantages or additional important information to the study? What are the main differences?

Finally some seismic strengthening solutions applied at the top of the church walls and on the roof were analysed and its performance and efficiency were evaluated and compared.