



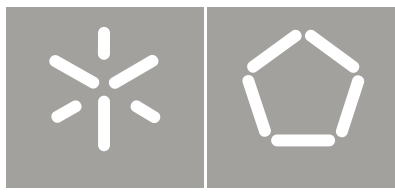
**UNIVERSIDADE DO MINHO**  
Escola de Engenharia

Francisco Manuel Carvalho Pinto Fernandes

**Evaluation of two novel NDT techniques:  
Microdrilling of clay bricks and Ground  
Penetrating Radar in masonry**

**Avaliação de duas novas técnicas não  
destrutivas: microfuração de tijolos de  
argila e radar de prospecção geotécnica  
em alvenaria**





**UNIVERSIDADE DO MINHO**  
Escola de Engenharia

Francisco Manuel Carvalho Pinto Fernandes

**Evaluation of two novel NDT techniques:  
Microdrilling of clay bricks and Ground  
Penetrating Radar in masonry**

**Avaliação de duas novas técnicas não  
destrutivas: microfuração de tijolos de argila e  
radar de prospecção geotécnica em alvenaria**

Tese de Doutoramento  
Engenharia Civil / Estruturas

Trabalho efectuado sob a orientação de  
**Professor Doutor Paulo José Brandão Barbosa Lourenço**  
Universidade do Minho

Co-orientação de  
**Professor Doutor Luigi Zanzi**  
Politécnico de Milão

## Committee members

Prof. António Augusto Magalhães Cunha (President of the jury)  
President of the School of Engineering of the University of Minho

Prof. Paulo José Brandão Barbosa Lourenço (Supervisor)  
Department of Civil Engineering, University of Minho

Prof. Luigi Zanzi (Co-Supervisor)  
Department of Structural Engineering, Polytechnic of Milan

Dr. José Delgado Rodrigues  
Geotechnical Department, National Laboratory of Civil Engineering (LNEC)

Prof. Raimundo Mendes da Silva  
Department of Civil Engineering, University of Coimbra

Prof. Fernando Castro  
Department of Mechanical Engineering, University of Minho

Prof. Graça de Fátima Moreira de Vasconcelos  
Department of Civil Engineering, University of Minho

Friday, 19 May 2006

University of Minho – School of Engineering  
Sala de Actos – Campus de Azurém

## Acknowledgements

The research reported in this thesis was carried out at the Department of Civil Engineering of University of Minho, Portugal, and at the Department of Structural Engineering of Polytechnic of Milan, Italy. This research has been supported by the Portuguese Foundation of Science and Technology (FCT) under grant SFRH/BD/6409/2001, since February 2002.

All my gratitude goes to my supervisors Paulo Lourenço and Luigi Zanzi for sharing with me their valuable experience, for all the fruitful discussions, and for their guidance and encouragements for reaching the end of this work satisfactorily. I am especially indebted to Luigi Zanzi for allowing me to work at his side and for answering positively to the invitation to come to Portugal for additional GPR tests.

I wish to show my deepest appreciation to Luigia Binda, for her advice, help and encouragement, and to Maurizio Lualdi, Lorenzo Cantini and Giuliana Cardani for their reception, help and friendship during my stay in Milan. I also want to show my gratitude towards Fernando Castro for the interesting discussions and the help with the statistical analysis and Eng.<sup>a</sup> Rosa for performing the tests on bricks. I wish also to acknowledge the profitable discussions and valuable assistance from the technical staff of the Civil Engineering Department laboratories at University of Minho: António Matos, Marco Jorge, José Gonçalves, Rui Oliveira and Carlos Palha. I am also grateful to Graça Vasconcelos for carrying out a final reading of my thesis.

Special thanks go to all my friends that accompany me since the graduation in civil engineering Alberto Ribeiro, Artur Feio, Eduardo Pereira and Vítor Cunha. I also wish to thank José Pina-Henriques for his friendship and companionship during the stay in Milan and Lukasz Topczewski for his friendship and for generously taking the time to read my thesis.

Finally, my gratitude goes to my family, for their patience and encouragement along these four long years. I want also to show my appreciation to my brother for helping me with my writing and to my sweetheart, for her dedication, encouragement and patience.



## Resumo

O trabalho apresentado nesta tese foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e no Departamento de Engenharia Estrutural do Politécnico de Milão, Itália.

A prática moderna na conservação de edifícios históricos é uma tarefa complexa que requer um diagnóstico profundo e cuidadoso. A investigação preliminar é essencial afim de intervir correctamente e com sucesso. Os objectivos dessa investigação são recolher de informação apropriada sobre o edifício ou a estrutura, e avaliar as propriedades mecânicas dos materiais, sendo esta última uma tarefa difícil devido à complexidade de materiais e alvenarias antigos. É imprescindível conhecer o estado de conservação da estrutura, a extensão dos danos, a ocorrência de humidades, a geometria e características escondidas tais como vazios, fendas e destacamentos. Com o intuito de aumentar o conhecimento sobre materiais de construção antigos, foi efectuada a caracterização de tijolos cerâmicos provenientes de seis mosteiros Portugueses do século XII a XIX. Os resultados mostraram uma grande dispersão, evidenciando as seguintes características: porosidade e sucção elevadas e resistência à compressão baixa. A composição química indica que estes tijolos não foram fabricados com o mesmo tipo de matéria-prima que os artefactos antigos de cerâmica.

As restrições à remoção de material para efeitos de amostragem ou para a realização de testes destrutivos são muito elevadas. Assim, nas últimas décadas, o uso de técnicas não destrutivas para investigação e diagnóstico de edifícios históricos aumentou de maneira significativa. No entanto, a avaliação da resistência à compressão e doutras propriedades mecânicas dos materiais antigos utilizando técnicas não destrutivas permanece um desafio. Uma metodologia semi-destrutiva recente baseada na microperfuração é apresentada neste trabalho para a caracterização de tijolos cerâmicos dos séculos XII a XIX. Os resultados mostram que é possível estimar de maneira fiável a resistência à compressão dos tijolos através de curvas de regressão usando a técnica de microperfuração adoptada neste trabalho.

A substituição de materiais de construção antigos é um tema relevante para o património arquitectónico. Os materiais modernos são geralmente incompatíveis, exibindo uma resistência e um módulo de elasticidade muito mais elevados. Assim, este trabalho também inclui o estudo de tijolos fabrico tradicional, e que se destinam à substituição de tijolos antigos. Este estudo mostra que os tijolos modernos são mais duráveis mas evidenciam uma resistência à compressão semelhante. Além disso, as correlações propostas anteriormente para a resistência à compressão permanecem válidas para os tijolos modernos de fabrico tradicional.

Estava prevista a construção de réplicas de paredes de alvenaria antigas com recurso aos tijolos modernos de fabrico tradicional e argamassa de cal de baixa resistência, com vazios e outras inclusões colocados no seu interior. Essas paredes seriam testadas utilizando outra técnica não destrutiva, que não se encontra facilmente disponível em Portugal. O Radar de Prospecção Geotécnica é uma técnica de investigação não destrutiva que permite detectar alterações de materiais através das suas propriedades dieléctricas. O Radar de Prospecção Geotécnica foi empregue na determinação da geometria e na detecção de características escondidas em elementos de alvenaria tais como vazios, fendas e destacamentos. A determinação dessas características é essencial devido ao elevado grau de heterogeneidade das estruturas antigas e às implicações destas no desempenho estrutural dos edifícios. Assim, através duma série de exemplos em provetes laboratoriais e *in situ*, o Radar de Prospecção

Geotécnica foi usado para ajudar na detecção de características geométricas e para encontrar elementos metálicos e vazios em alvenaria histórica.

Os ensaios em provetes laboratoriais incluem duas paredes de três panos em alvenaria de pedra para avaliação geométrica dos panos exteriores, detecção de vazios e elementos de madeira, e uma terceira parede de alvenaria mais complexa, construída com um número significativo de deficiências, diferentes materiais (tijolo e pedra) e elementos com diferente geometria, simulando situações comuns em edifícios históricos. Os ensaios *in situ*, foram efectuados em diversos monumentos antigos localizados em vários países Europeus para avaliar o desempenho da técnica numa série de aplicações distintas.

A medição no modo de reflexão (2D) com o Radar de Prospecção Geotécnica foi efectuada em todos os casos e produziu resultados satisfatórios relativamente à avaliação das características geométricas dos painéis de alvenaria assim como na localização de outras características (vazios, fendas, destacamentos) e objectos (elementos em madeira e metálicos) que se encontram frequentemente em elementos estruturais alvenaria.

Técnicas de aquisição mais precisas e rotinas de processamento de sinais mais avançadas foram utilizadas quando é necessário um posicionamento mais preciso e para a avaliação das dimensões de prováveis objectos. Aquisições para a obtenção de volumes 3D foram efectuadas, permitindo obter o posicionamento tridimensional de vazios cilíndricos, de barras de aço e dum balaústre de betão. No entanto, esta técnica não reproduziu com suficiente precisão as dimensões dos objectos devido, essencialmente, à resolução da antena quando comparado com as dimensões do respectivo objecto. Para detectar camadas de pequena espessura na alvenaria, de difícil detecção através de perfis 2D em reflexão, foram efectuadas medições em modo de transmissão. A partir dos resultados dos tomogramas foi possível distinguir o material deteriorado do material são. Devido à grande quantidade de dados necessária, ao tempo dispendido durante a aquisição no local e aos recursos informáticos elevados para aplicar os algoritmos de reconstrução 3D e tomografia, essas técnicas apenas podem ser aplicadas localmente, caso as aquisições normais em modo de reflexão não permitam obter a informação necessária.



## Abstract

The work presented in this thesis has been developed at the Department of Civil Engineering of University of Minho, Portugal, and at the Department of Structural Engineering of Polytechnic of Milan, Italy.

Modern practice in conservation of historical buildings is a complex task that requires a deep and careful diagnosis. Preliminary investigation is essential in order to intervene correctly and successfully. The objectives of such investigation are to gather adequate information about the building or structure, and to evaluate the mechanical properties of materials, being the latter a difficult task due to the complexity of old materials and historic fabrics. Necessary information is the state of conservation, the extent of damages, the presence of moisture, the geometry and hidden features such as voids, cracks and detachments. In order to increase the knowledge about ancient building materials, characterization of clay brick from historic monuments in Portugal was performed in bricks from the 12<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup> century, collected from six monasteries. The results showed a large scatter, and the main characteristics are high porosity, high suction and low compressive strength. Chemical composition indicates that bricks are not prepared with the same raw materials as old clay artefacts.

The restrictions to remove material for mechanical sampling or to carry out destructive tests are very large. Therefore, in the last decades, the use of non-destructive testing techniques for investigation and diagnosis of historical buildings has increased significantly. However, the evaluation of the compressive strength and other mechanical properties of historic materials using such techniques remains a challenge. A recent minor-destructive methodology based on microdrilling is used in this research work for the characterization of clay bricks from the 12<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup> century. The results show that it is possible to reliably estimate the compressive strength of bricks by means of regression curves using the adopted microdrilling technique.

The replacement of old material is a matter of concern in every intervention in architectural heritage. Modern materials are usually incompatible, as they present much higher strength and elastic modulus. Thus, this work addresses also the study of traditional handmade clay bricks as replacing bricks. The study shows that new bricks are more durable but exhibit comparable compressive strength. Moreover, the proposed correlations for compressive strength of ancient bricks remain valid for new traditional handmade clay bricks.

Originally, it was planned to use new handmade bricks and weak lime mortars to build replicas of ancient masonry walls, with voids and other inclusions. These would be tested using another technique, which is fully non-destructive and not easily available in Portugal. Ground Penetrating Radar is a non-destructive technique that allows the detection of material changes through changes in dielectric properties. Ground Penetrating Radar was used to determine the geometry and to map hidden features of masonry such as voids, cracks and detachments. The detection of these properties is of high relevance due to the high heterogeneity of old structures, which has implications in the structural performance of buildings. Thus, through a series of examples in laboratory specimens and *in situ*, the Ground Penetrating Radar was used to help in the detection of geometrical characteristics and to find metallic elements and voids in masonry.

The tests in laboratory specimens included two three-leaf stone masonry walls for the geometrical assessment of the exterior panels, the detection of voids and embedded wood beams, and a third complex stone/masonry wall built with a significant amount of deficiencies, construction materials and elements with different geometry, simulating typical situations on historical buildings. The experiments *in situ* were performed in several masonry

monuments from different European countries to assess the performance of the technique for a number of applications.

Radar measurements in reflection mode (2D) were carried out in every case and produced satisfactory results regarding geometry assessment of masonry leaves and in the location of features (air voids, cracks, detachments) and objects (wood beams, steel objects) that are often found in masonry structural elements.

More precise acquisition techniques and advanced signal processing routines were used when more accurate positioning was needed and for the assessment of the dimensions of possible objects. Acquisitions for the construction of advanced 3D volumes were performed and allowed to obtain the three-dimensional position of cylindrical voids, steel bars and concrete baluster. However, the technique failed to reproduce adequately the dimensions of the objects due, essentially, to the resolution of the antenna when compared to the dimensions of the targets. Transmission measurements were performed to detect thin layers of masonry. The resultant tomograms identify damaged and undamaged material. Due to the significant amount of data that is necessary, the time for accurate field acquisition and the large computer resources to run 3D reconstruction and inversion algorithms, these techniques can only be applied locally, if typical 2D radargrams do fail to provide the necessary information.