

## Abstract

The work presented in this thesis was carried out at the Civil Engineering Department of University of Minho, Portugal, at the Timber Structures Division of National Laboratory for Civil Engineering, Portugal, and at the D.I.S.T.A.F of University of Florence, Italy.

In order to assess the safety of old structures and preserve their original essence as much as possible, *in situ* inspection and evaluation of actual mechanical properties represent a first step towards diagnosis, structural analysis and the definition of possible remedial measures. The objective of this research is to contribute to the present state of knowledge in these fields, providing novel correlations between destructive and non-destructive testing (ultrasounds, Resistograph and Pilodyn) for chestnut wood (*Castanea sativa* Mill.) and for a typical traditional wood-wood connection. For this purpose, it was decided to consider specimens from recently sawn timber, which is now available on the market for structural purposes, and specimens from old wood, obtained from structural elements belonging to ancient buildings.

In a first phase, an experimental investigation has been conducted on a total of 342 specimens of clear wood, with no visible chemical, biological or physical damage, which included standard compression tests, parallel and perpendicular to the grain, and standard tension tests, parallel to the grain. These specimens have been tested in a destructive and non-destructive way. The possibility of predicting wood properties by application of non-destructive techniques is discussed based on simple linear regressions models. Application of the regression models obtained from recent cut wood to the results obtained from old timber beams is also analyzed.

In a second phase, the strength capacity of wood-wood mortise and tenon connection (typology often found in historical Portuguese timber structures) is characterized, investigating the static behaviour of real scale old timber connections and characterizing the ultimate strength capacity, the global deformation of the joint and the failure patterns. Taking into account the need for practical assessment of existing wood-wood mortise and tenon joints, the results of the destructive tests are combined with non-destructive tests of the connections, in order to produce novel linear regressions for the connection.

Finally, a finite element non-linear analysis of the mortise and tenon joint tested is presented. The multi-surface plasticity model adopted comprehends a Rankine type yield surface for tension and a Hill type yield surface for compression. Sophisticated non-linear anisotropic models are becoming standard in several finite element based programs, but the issue of their validation remains under discussion. In the present study, the validation of the non-linear model is performed by means of a comparison between the calculated numerical results and experimental results, showing an excellent agreement and stressing the relevance of the interface properties in the global response.

## Resumo

O trabalho apresentado nesta tese foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Portugal, no Núcleo de Madeiras do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, e no Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental e Florestal da Universidade de Florença, Itália.

Tendo por objectivo a determinação da segurança estrutural dos edifícios históricos, e a preservação, tanto quanto possível, da sua traça original, a inspecção e a avaliação *in situ* das suas actuais propriedades mecânicas, representam um primeiro passo na abordagem ao diagnóstico, análise estrutural e definição de possíveis medidas preventivas e/ou de reforço.

O objectivo deste trabalho é contribuir para o actual estado de conhecimento neste domínio, determinando, através de ensaios destrutivos e não destrutivos (Ultrasons, Resistógrafo e Pilodyn), as propriedades de um lote de madeira recentemente serrada (que estaria disponível no mercado para fins estruturais) e aquilo que foi designado por “madeira antiga”, madeira de castanho (*Castanea sativa* Mill.), obtida de elementos estruturais pertencentes a edifícios antigos.

Numa primeira fase, foram realizados uma série de ensaios num conjunto de 342 provetes de madeira livres de defeitos, sem aparentes danos químicos, biológicos ou físicos, que incluíram ensaios de compressão *standard*, paralelamente e perpendicularmente às fibras, e ensaios de tracção *standard*, paralelos às fibras. Estes provetes foram ensaiados de forma destrutiva e não destrutiva. A possibilidade de prever as propriedades da madeira através da aplicação de técnicas e métodos não destrutivos é discutida com base em modelos simples de regressão linear. A extrapolação dos modelos de regressão linear obtidos entre os dois grupos de madeiras considerados, “madeira nova” – NCW – e “madeira antiga” – OCW, é analisado.

Numa segunda fase, a capacidade resistente de uma ligação tradicional madeira-madeira, traduzida numa ligação de respiga e mecha (tipologia frequentemente encontrada nas estruturas históricas de madeira portuguesas), é caracterizada investigando-se o comportamento de ligações à escala real e caracterizando-se a capacidade resistente última, a deformação global da ligação e os diferentes modos de rotura. Os resultados são apresentados e discutidos tendo em atenção a aplicação prática dos mesmos na avaliação de estruturas existentes: os resultados dos ensaios destrutivos são combinados com os dos não destrutivos, e novas regressões lineares são propostas.

Finalmente, uma análise não-linear, com recurso a elementos finitos, da ligação ensaiada é apresentada. O modelo de plasticidade em superfícies múltiplas adoptado apresenta uma superfície de cedência de Rankine para tracção e uma superfície de cedência de Hill para compressão. De facto, sofisticados modelos anisotrópicos têm vindo a ser incorporados com frequência em diversos programas de cálculo baseados em elementos finitos, sendo que a sua validação ainda está em discussão. No presente trabalho, a

validação do modelo não-linear é feito através da comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais, realçando a excelente correlação entre ambos e demonstrando o papel preponderante das propriedades dos elementos de interface na resposta global.