

ABSTRACT

The structural safety of historic buildings is an important issue. These constructions frequently have cultural value, they are usually constructed with masonry. In ancient masonry structures mortar generally only represents a small (or moderate) part of the structure volume. Nonetheless, mortar has been acknowledged as the principal cause for deformations or movements. This fact justifies the necessity for a detailed analysis of the role of mortar within the scope of the structural behavior of historic masonry construction. These studies of ancient masonry structures are demanded by the society and frequently supported by governmental funding agencies.

In Portugal, as well as Europe in general, there is a significant quantity of historic constructions comprehending binders based on aerial lime mortars. The current work is focused in this binder. Aerial lime is one of the most ancient binders discovered and used. The aerial lime is produced from relatively pure limestone in kilns with high temperatures. Mortars based in such binder, after placement, harden gradually from the surface to their interior, due to reaction with carbon dioxide present in atmosphere, reaction usually denominated as carbonation. The carbonation is a natural process and occurs in different materials, such as different mortars or cementitious based material. For aerial lime mortar, this process has important structural effects, modifying the material mechanical properties. Nowadays, with the continued interest of the governmental agencies and the society in the conservation and restoration of the built heritage and because of its compatibility with traditional materials, the necessity of a detailed study about the material became even more important.

Considering this growing interest, in this thesis an experimental and numerical approach have been adopted in the studying of aerial lime mortar, in view of multi-physics modeling. For this purpose a hygro-carbo-mechanical model has been developed. For the numerical aspects, a software capable to simulate the coupled hygro-carbo fields over time has been implemented using the Finite Difference Method (FDM). The obtained results are then exported for a recognized software based in the Finite Element Method (TNO-DIANA[®]) that processes the mechanical analyses varying the elastic modulus over time. This framework is considered important, because such kind of structures last for long ages, and the mechanical analysis by itself may not be enough to reproduce the complicated behavior of them.

In terms of experiments, the drying process has been investigated through specific measurements. Mechanical properties have been measured since early ages and coupled with considerations regarding the evolution of carbonation. The evolution of carbonation (reaction field) has been investigated using thermogravimetric analysis and phenolphthalein indicator.

From the set of experiments and simulations, continuing with the study, and using the previous acquired experience, the different experiments are simulated. Numerical simulations are done to obtain the set of parameter to reproduce the experimental data, from the simplest to the most complex modeling. The first simulation is related to the humidity field. The experiments of humidity diffusion process are simulated with the decoupled humidity model. A unified pair of diffusivity and boundary coefficients is obtained. With these parameters, which best reproduce the experimental data in terms of humidity results, the carbonation process is in sequence simulated. Finally, the hygro-carbo model is coupled with TNO-DIANA[®] to simulate the evolution of elastic modulus experiments. A mathematical formulation that correlates the reaction (carbonation) and the humidity with the increase of elastic modulus is proposed.

This work shows that numerical models could reproduce reasonably well the experimental behavior. Experimentally, some innovative procedures regarding the tests in aerial lime mortar are done. The work presented herein can be considered in several aspects introductory and also seminal, due to the scarce of literature information about the study of aerial lime mortar.

RESUMO

A segurança estrutural de edifícios históricos é uma questão importante. Estas construções frequentemente possuem valor cultural, e as mesmas são geralmente construídas com alvenaria. Em estruturas de alvenaria antiga a argamassa geralmente representa apenas uma pequena (ou moderada) parte do volume da estrutura. No entanto, a argamassa é reconhecida como a principal causa para as deformações ou movimentos. Este facto justifica a necessidade de uma análise detalhada do papel da argamassa dentro do âmbito do comportamento estrutural de construções históricas em alvenaria. Estes estudos de estruturas em alvenaria antiga são exigidos pela sociedade e frequentemente apoiados por agências de financiamento governamentais.

Em Portugal, bem como na Europa em geral, há uma quantidade significativa de construções históricas com argamassas a base de cal aérea. O presente trabalho está focado neste ligante. A cal aérea é um dos mais antigos ligantes descobertos e usados. A cal aérea é produzida a partir de calcário relativamente puro em fornos com altas temperaturas. Argamassas baseadas nesse ligante, após a aplicação, endurecem gradualmente a partir da superfície para o interior, devido à reação com o dióxido de carbono presente na atmosfera, reação habitualmente denominada como carbonatação. A carbonatação é um processo natural e ocorre em diferentes materiais, tais como argamassas ou materiais à base de cimento. Para argamassas de cal aérea, esse processo tem importantes efeitos estruturais, modificando as propriedades mecânicas do material. Hoje em dia, com o contínuo interesse dos órgãos governamentais e da sociedade na conservação e restauro do património construído e por causa de sua compatibilidade com materiais tradicionais, a necessidade de um estudo detalhado sobre o material tornou-se ainda mais importante.

Considerando esse interesse crescente, nesta tese, abordagens experimentais e numéricas foram adotadas no estudo das argamassas de cal aérea, em vista da modelagem multi-física. Para este efeito, um modelo de higro-carbo-mecânico foi desenvolvido. Para os aspetos numéricos, um programa capaz de simular os campos higro-carbo acoplados ao longo do tempo foi implementado utilizando o Método das Diferenças Finitas (MDF). Os resultados obtidos são em sequência exportados para um programa reconhecido baseado no Método dos Elementos Finitos (TNO-DIANA[®]) que realiza as análises mecânicas e o estudo da variação do módulo elástico ao longo do tempo. Este quadro é considerado importante,

porque esse tipo de estrutura tende a existir por séculos, e a simples análise estrutural por si só, pode não ser suficiente para reproduzir o comportamento complexo dessas estruturas.

Em termos de ensaios, o processo de difusão da humidade foi estudado através de medições específicas. As propriedades mecânicas foram medidas desde as primeiras idades, juntamente com considerações sobre a evolução da carbonatação. A evolução da carbonatação (campo de reação) foi investigada utilizando análises termogravimétrica e fenolftaleína.

A partir do conjunto de experimentos e simulações, continuando com o estudo, e utilizando a experiência adquirida anteriormente, os diferentes ensaios são simulados. Simulações numéricas são feitas para obter o conjunto de parâmetros para reproduzir os dados experimentais, desde o mais simples ao mais complexo. A primeira simulação está relacionada com o campo de humidade. Os experimentos referentes ao processo de difusão são simulados com o modelo de humidade desacoplado de outros campos. Um par unificado de difusividade e coeficiente de fronteira é obtido. Com esses parâmetros, que melhor reproduziram os dados experimentais em termos dos resultados de humidade, o processo de carbonatação é em sequência simulado. Por fim, o modelo de higró-carbo é acoplado com TNO-DIANA[®] para simular os ensaios sobre a evolução do módulo de elasticidade. Uma formulação matemática que relaciona a reação (carbonatação) e a humidade com o aumento do módulo de elasticidade é proposta.

Este trabalho mostra que os modelos numéricos puderam reproduzir razoavelmente o comportamento experimental. Alguns procedimentos inovadores em relação aos testes em argamassa de cal aérea estão apresentados. O trabalho aqui presente pode ser considerado em diferentes aspetos pioneiros, mas também é introdutório, devido à escassez de informações na literatura sobre o estudo de argamassas à base de cal aérea.