

## Resumo

Nos últimos anos tem-se tornado comum, no betão estrutural, a preocupação com o aparecimento nas primeiras idades de fendilhação com indesejáveis consequências para a aparência e a durabilidade das estruturas. Esta fendilhação precoce surge devido à instalação de tensões de tracção elevadas, que num dado instante atingem a resistência à tracção do betão. O surgimento destas tensões pode ficar a dever-se a forças aplicadas, à retracção restringida e a expansões/contracções resultantes do calor devido ao carácter fortemente exotérmico da reacção de hidratação do cimento. Este último aspecto tem ganho uma importância acrescida nos últimos anos em virtude da crescente utilização de betões de elevado desempenho (com elevado conteúdo de cimento) que provocam uma grande libertação calor durante a reacção de hidratação. Assim, tem aumentado a necessidade de prever este tipo de problemas recorrendo a simulações numéricas, nomeadamente recorrendo aos chamados modelos termo-mecânicos. Estes modelos permitem a consideração do calor gerado durante a reacção de hidratação (modelo térmico) e as suas respectivas implicações mecânicas para a estrutura (modelo mecânico).

Presentemente existem já programas comerciais de elementos finitos que permitem efectuar modelações termo-mecânicas, com os quais é possível calcular o campo de temperaturas gerado pela reacção exotérmica de hidratação do cimento, e os respectivos campos de tensões que surgem como consequência de restrições às dilatações ou contracções do betão. No entanto, a implementação deste tipo de modelos não tem sido fácil, uma vez que para a sua aplicação a estruturas reais é necessário conhecer o comportamento térmico do betão que está a ser utilizado, assim como a evolução das suas propriedades mecânicas ao longo de toda a reacção de hidratação. Assim, na presente dissertação apresentam-se os resultados experimentais de uma extensa campanha experimental levada a cabo com o intuito de caracterizar as propriedades térmicas e mecânicas dos betões nas primeiras idades, com vista à aplicação estrutural.

No que diz respeito à caracterização térmica, e recorrendo a ensaios calorimétricos de tipo isotérmico, foi realizada uma campanha para medição do potencial de geração de

calor da reacção de hidratação de vários cimentos comercializados em Portugal, que permitiram a aferição dos vários parâmetros da lei de Arrhenius, nomeadamente, a energia aparente de activação e a função de calor gerado normalizado.

Na campanha de caracterização mecânica determinaram-se as propriedades mais relevantes no comportamento do betão nas primeiras idades, nomeadamente as evoluções das resistências à compressão e à tracção e do módulo de elasticidade. Procedeu-se ainda à caracterização da fluência básica e da retracção, assim como da respectiva interacção através do estudo da retracção impedida com recurso à técnica de Ensaio do Anel Restringido. A campanha de caracterização mecânica envolveu o ensaio de seis betões fornecidos por uma central de betão pronto, representativos das classes de resistência mais utilizadas em Portugal.

Por fim, e recorrendo ao programa DIANA para a realização de modelações numéricas termo-mecânicas, procedeu-se a um estudo paramétrico analisando a sapata de um aerogerador, que foi simulada admitindo a utilização de diferentes betões, com as propriedades ou leis de comportamento aferidas nas campanhas de caracterização térmica e mecânica efectuadas.

## **Abstract**

In the last few years there has been an increased concern with the cracking of structural concrete at early ages which has detrimental consequences in terms of both durability and appearance of the elements. This early cracking occurs because of high tensile stresses, which may reach the concrete tensile strength. These tensile stresses appear due applied forces, restrained shrinkage and finally due to the highly exothermic processes of the cement hydration, which causes contractions and expansions. The last factor has comparatively gained weight, mainly because of the growing use of high performance concrete (high cement dosage) which produces higher amounts of heat of hydration. With the demand for better predictions of these effects there has been an increase in the use of numerical simulations, using thermo-mechanical models. These

models allow controlling both the heat generated by the hydration reactions (thermal effects) as well as the respective implications to the structure (mechanical effects).

Presently there are commercial programs, with recourse to the finite element method, which allow thermo-mechanical analyses that can compute the temperature fields generated by the heat generation in the hydration of the cement, and the respective stress fields that appear because restrained volumetric changes of the structural elements. However the practical use of these models has not been easy, since their application requires the knowledge of the thermal behavior of the concrete being used and the evolving mechanical properties during the hydration reaction. Thus, the present dissertation presents the experimental results of an extensive experimental campaign, with the intent of characterizing the thermal and mechanical properties of concrete at early ages, for structural use.

In respect to the thermal characterization, calorimetric techniques of the isothermal type were used. Several of these experiments were carried out in order to measure the heat generation potential of the hydration reaction for several cements marketed in Portugal. These tests allowed for the estimation of the parameters for the Arrhenius law, mainly the activation energy and the normalized heat production rate.

In the mechanical characterization tests only the properties directly tied to young age concrete were determined: the compressive and the tensile strength evolution and the Young's modulus. Tests were done to characterize the creep and shrinkage, and their interaction was studied through the use of the Restrained concrete ring test. The tests were done with six common concrete classes from a Portuguese concrete plant.

The last stage consisted of using the software DIANA for the thermo-mechanical analysis of a wind tower foundation, with a parametric study by varying the used kinds of concrete (with the properties or laws of behavior resulting from the previously conducted thermal and mechanical experimental campaigns).