

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida com o objectivo de proceder a uma avaliação do comportamento sísmico não-linear de barragens de betão. Uma especial atenção é dedicada à tipologia abóbada, representada pelas barragens portuguesas do Alto Lindoso e de Foz Côa. Um perfil gravidade é igualmente objecto de estudo, para o que foi seleccionado o exemplo da barragem Koyna, localizada na Índia.

O conjunto barragem-fundação-albufeira é discretizado mediante a utilização do Método dos Elementos Finitos (formulação em deslocamentos). Tendo em consideração o tipo de análises pretendido, nas quais estão envolvidos comportamentos constitutivos não-lineares, a acção sísmica é caracterizada deterministicamente, com base em séries cronológicas de movimentos registados à superfície do terreno. A solução numérica relativa ao comportamento do conjunto barragem-fundação-albufeira é obtida no domínio do tempo, mediante a utilização de esquemas de integração implícitos, nomeadamente o método de Newmark e o método- α devido a Hilber-Hughes-Taylor, que se articulam com um algoritmo preditor-multicorrector, adequado à estratégia iterativa de resolução de problemas não-lineares pelo método de Newton-Raphson.

Para a condução das análises não-lineares, um modelo constitutivo foi expressamente desenvolvido de raiz para simulação do comportamento do betão em massa. Baseado na Mecânica de Dano Contínuo, o modelo constitutivo utilizado caracteriza-se por uma rigorosa fundamentação termodinâmica, e incorpora duas variáveis escalares de dano cujas evoluções se processam independentemente, simulando as degradações de rigidez e de resistência que ocorrem no betão sob condições de tracção ou de compressão. As deformações irreversíveis são igualmente contempladas no modelo constitutivo, bem como o efeito “strain-rate” que caracteriza a dependência do comportamento do betão relativamente à velocidade de carga. A formulação do modelo de dano foi deliberadamente estabelecida com base no tensor de deformações, opção que se traduziu numa grande elegância formal, cuja simplicidade e clareza asseguraram a obtenção de elevadas velocidades algorítmicas.

Uma especial atenção é devotada à problemática do ruído numérico, para cujo controlo se recorreu à dissipação algorítmica conferida pelo método- α , e a uma matriz de amortecimento (proporcional à matriz de rigidez) que é objecto de contínua actualização, acompanhando a degradação do material.

Nas fronteiras artificiais do maciço de fundação e da albufeira foram previstas condições de transparência, modeladas através de amortecedores viscosos, que simulam a dissipação por radiação.

Um cuidado especial é ainda dedicado à simulação da albufeira, relativamente à qual são referidos com detalhe vários aspectos envolvidos nas modelações através das formulações em pressões ou em deslocamentos, ou ainda com recurso ao artifício das massas adicionais de Westergaard, generalizado por forma a ser aplicável a barragens abóbada.

Diferentes alternativas são propostas para prescrição do movimento sísmico, um aspecto de considerável importância no contexto da análise dinâmica de barragens, porquanto as fronteiras artificiais do maciço de fundação, usualmente de grandes dimensões, são simultaneamente atravessadas pelo movimento sísmico e constituem contornos de radiação.

Diversas aplicações numéricas são apresentadas para as barragens descritas, no decurso das quais é analisado o comportamento não-linear em cenários de colapso, e discutidos os respectivos mecanismos últimos de resistência. Um especial destaque é colocado na análise da alteração do nível de segurança estático das barragens determinado pela prévia ocorrência de sismos de grande intensidade, critério que foi seleccionado para uma caracterização determinística da segurança sísmica do perfil gravidade de Koyna e das abóbadas do Alto Lindoso e de Foz Côa.

Abstract

This thesis has been developed for the assessment of the non-linear seismic behaviour of concrete dams. Special attention is devoted to arch dams, here represented by the portuguese dams of Alto Lindoso and Foz Côa. The Koyna gravity dam, located on India, will also be studied.

Dam-foundation-reservoir will be analysed as a whole, and discretised by the Finite Element Method (displacement formulation). Due to the non-linear constitutive behaviour which will be included in the analyses, seismic action will be looked in a deterministic manner, and prescribed according to the accelerograms recorded at the free field. Dynamic equations will be solved in time domain, according to implicit integration schemes, namely the Newmark method and the Hilber-Hughes-Taylor α - method. For the non-linear problem, a predictor-multicorrector algorithm is adopted, which is consistent with the iterative procedure inherent to the Newton-Raphson method.

In view of the intended large scale computations involved in the analysis of concrete dams, an original constitutive model has been developed for massive concrete. Founded on the Continuum Damage Mechanics, with a rigorous thermodynamic background, the constitutive model incorporates two scalar damage variables with independent evolutions, simulating the degradation of strength and rigidity which occurs on concrete under tension or compression loading conditions. Irreversible deformations are also accounted for, as well the effect which characterises the dependence of concrete behaviour on the strain rate. Due to the strain-driven background of the proposed model, elegant formalism has been obtained, which combines simplicity with high computational performance.

Special attention is devoted to the problem of spurious high frequency oscillations, which has been controlled through the algorithmic dissipation provided by the α -method or by a damping matrix (proportional to the stiffness matrix) which is continuously updated, in accordance to material degradation.

At the far boundaries located on the foundation or the reservoir, transparency conditions were provided, and modelled through viscous dampers, which simulate radiation damping.

Special care is also devoted to the simulation of the water in the reservoir. Numerical modelling the hydrodynamic effect is discussed in detail, either by means of pressure or displacement formulations, or even through the technique of the added masses from Westergaard, extended for applications on arch dams.

Different alternatives are proposed for prescribing the seismic action, a subject with capital importance within the context of dynamic analysis of dams, where artificial boundaries located on the rock foundation, usually a large scale domain, are simultaneously crossed by the seismic input and provide radiation damping.

Several numerical applications are presented for the described dams, whose non-linear behaviour on limit scenarios and ultimate strength mechanisms are analysed and discussed. Special emphasis is devoted to the change on the static safety level of those dams due to previous occurrence of high intensity earthquakes, a criterion which has been selected for the deterministic characterisation of a seismic safety of Koyna gravity dam and of Alto Lindoso and Foz Côa arch dams.