

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo final o desenvolvimento de modelos computacionais orientados para a análise e o dimensionamento de estruturas laminares de betão de grande vão. Neste contexto, a modelação do comportamento não-linear e reológico dos materiais e a representação da acção do pré-esforço são aspectos que adquirem significativa relevância, sendo por isso devidamente contemplados no presente trabalho.

Tendo em atenção os objectivos enunciados, são desenvolvidos dois modelos computacionais distintos, orientando-se um para a análise de estruturas laminares planas do tipo placa ou viga-parede (elemento quadrático isoparamétrico) e o outro para a análise de estruturas laminares do tipo laje ou casca (elemento isoparamétrico de casca degenerado do elemento tridimensional).

Em ambas as situações é contemplada a possibilidade de discretizar separadamente o betão e as armaduras, caracterizando-se ainda a solução desenvolvida com base no elemento de casca pela adopção de uma formulação Lagrangeana Total, adequada à idealização do comportamento não-linear geométrico de lajes e cascas.

Os modelos do material vêm definidos por relações constitutivas estabelecidas a nível local (relações tensões-extensões) e têm como objectivo fundamental captar os principais factores de não-linearidade que caracterizam o comportamento do material compósito betão armado pré-esforçado. Em síntese, são estabelecidos modelos visando a idealização do comportamento não-linear do betão comprimido (modelo elasto-plástico com endurecimento), a representação da fendilhação (modelo de fendilhação distribuída) - incluindo a modelação dos mecanismos de interacção betão-armaduras - e, ainda, a modelação do comportamento unidimensional do aço (armaduras ordinária e de pré-esforço), através de um modelo elasto-plástico com endurecimento.

No modelo reológico são contemplados os fenómenos relacionados com o envelhecimento, a retracção e a fluência do betão, bem como a relaxação associada à armadura de pré-esforço. No caso particular da fluência do betão, o modelo viscoelástico (cadeia de Kelvin), estabelecido com base no princípio da linearidade entre tensões e deformações de fluência e na aproximação da respectiva função por uma série de funções de expoentes reais (série de Dirichlet), torna dispensável a memorização integral da história de tensão em todos os pontos de amostragem da estrutura, possibilitando assim o traçado da resposta diferida de estruturas de dimensões correntes, através de uma análise incremental (passo a passo) realizada no domínio do tempo.

A representação da acção do pré-esforço é tida em consideração através do desenvolvimento de uma formulação que, apoiando-se directamente no método dos elementos finitos (a armadura de pré-esforço é discretizada por elementos unidimensionais parabólicos), possibilita uma rigorosa modelação dos efeitos mais relevantes associados à técnica do pré-esforço (transferência do pré-esforço, perdas de tensão, distinção entre armaduras aderentes e não-aderentes, etc.).

Tendo presente a importância do papel desempenhado pelos algoritmos de solução não-linear (a nível estrutural e local) na obtenção de soluções simultaneamente económicas e fiáveis, o procedimento incremental e iterativo adoptado no estabelecimento da solução não-linear - formulado com base no método de Newton-Raphson - vem complementado por um conjunto de técnicas e procedimentos numéricos que compreendem, designadamente, a inclusão de métodos que permitem definir automaticamente a história de carga, acelerar a convergência, variar o valor do incremento de carga durante o ciclo iterativo e, ainda, reiniciar a análise em fases intermédias da história de carga.

Finalmente, são apresentados vários exemplos de aplicação, visando, por um lado, a aferição dos modelos numéricos desenvolvidos e, por outro, ilustrar a sua aplicabilidade na análise e dimensionamento de estruturas laminares de betão de grande vão.

Abstract

The main objective of this thesis is the development of a computational model for, the analysis and design of large span concrete structures. In such context, the modelling of the nonlinearity and rheology of material behaviour, as well as a proper representation of prestressing, are crucial aspects which are duly considered in this work.

Two separate computational models are presented, one for plane stress problems (with a quadratic isoparametric element) and the other for plate and shell analysis. In both models, quadratic isoparametric elements are used for concrete and a smeared or embedded representation is assumed for steel reinforcement. Nonlinear geometric effects are accounted for by using a Total Lagrangean approach.

The material model is based on stress-strain constitutive relations which capture the main factors of nonlinearity that characterize the behaviour of prestressed reinforced concrete. To this end, an elastoplastic formulation with hardening is used for both the compressive behaviour of concrete and the reinforcing steel, together with a smeared crack approach which accounts for concrete-steel interaction.

The rheological model contemplates ageing, shrinkage and creep of concrete, as well as relaxation of prestressing steel. In particular, concrete creep is modelled by a Kelvin viscoelastic law based on a linear stress-creep strain relation with a Dirichlet series approach, avoiding the complete storage of stress history at sampling points, which facilitates the study of the creep response of real structures via a step by step time domain analysis.

The prestressing representation involves the discretization of the tendons using 1D parabolic elements, which allows for a rigorous modelling of the most relevant aspects associated with prestress, namely prestressing transfer, prestressing losses, bonded or unbonded prestressing.

In view of the role played by the nonlinear solution algorithms in what concerns economy and reliability of the overall solution, the incremental-iterative procedure adopted complements the basic Newton-

Raphson approach with line search and arc-length techniques, automatic load incrementation schemes and restart facilities.

Finally a number of applications are presented which assess the numerical models developed and illustrate their capacity for the analysis and design of large span concrete structures.