

# UTILIZAÇÃO DO SUPERCOMPUTADOR CRAY Y-MP2E/232 PARA A SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Jaime Daura Claire  
Américo Campos Filho

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre - RS - Brasil

## ABSTRACT

*In this work fundamental features of a computational model are presented, based on the finite element method, for the analysis of concrete structures. The study comprehends short and long-term loading situations, where creep and shrinkage in concrete are considered. The reinforcement is inserted in the finite element model using a incorporated model. A smeared crack model is used for the cracking of concrete, which considers the contribution of concrete between cracks and allows the closing of the cracks. The computational code MPGS (Multi-Purpose Graphic System) is used, to make easy the analysis and interpretation of the numeric results.*

## RESUMO

*Neste trabalho são apresentados os aspectos fundamentais de um modelo computacional, baseado no método dos elementos finitos, para a análise de estruturas de concreto armado. O estudo abrange situações de carga de curta e longa duração, considerando-se fluência e retração do concreto. A armadura é integrada ao modelo de elementos finitos através de um modelo incorporado. Para a fissuração do concreto, utilizou-se um modelo de fissuras distribuídas, que leva em conta a contribuição do concreto entre fissuras e que permite o fechamento das mesmas. Para facilitar a análise e interpretação dos resultados numéricos, utilizou-se o código computacional MPGS (Multi-Purpose Graphic System).*

## 1. INTRODUÇÃO

O projeto e a execução de novas estruturas de concreto armado requerem um avanço contínuo na investigação do seu comportamento.

O método dos elementos finitos é seguramente o processo numérico que mais tem sido usado para a análise deste tipo de estrutura. Através dele pode-se simular numericamente o funcionamento das estruturas de concreto armado. Deste modo, é possível averiguar se os resultados que o modelo fornece são compatíveis ou não com os resultados experimentais, e então refinar o modelo de análise até que ocorra a convergência entre os resultados.

Modelos matemáticos que viabilizem uma simulação computacional do comportamento real de peças de concreto armado, possibilitam estudos para um aproveitamento otimizado dos materiais. Além disso, com o advento dos supercomputadores, permitem uma análise precisa de estruturas inteiras de concreto armado. Este fato, por si só, justifica este estudo mais acurado. Neste trabalho, apresenta-se um modelo computacional com estas características, desenvolvido por Claire (1994).

## 2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA A ANÁLISE DE UM MATERIAL COM COMPORTAMENTO ELASTO-VISCOPLÁSTICO

O modelo computacional desenvolvido neste trabalho permite analisar peças de concreto armado com comportamento elasto-viscoplástico. O comportamento do material é representado por um modelo reológico composto por uma mola em série com um conjunto formado por um amortecedor e um elemento

de atrito em paralelo. Como não há dados disponíveis para calibrar um modelo elasto-viscoplástico como um todo, dividiu-se o programa em duas etapas distintas.

Numa primeira etapa, faz-se a determinação da resposta da estrutura ao longo do tempo. Calcula-se o estado de deformação da estrutura, decorrido um período de tempo da aplicação da carga. Para representar de forma mais realística o comportamento do concreto, implementou-se um modelo de camadas superpostas. Desta forma, o concreto é representado como um material composto de diversas camadas, que sofrem a mesma deformação. Cada camada possui diferentes propriedades e a tensão total é obtida pela soma das parcelas correspondentes a cada camada. Esta etapa representa um comportamento viscoelástico dos materiais.

Na segunda fase, busca-se determinar a resposta da estrutura para um carregamento instantâneo. Neste caso, procura-se o estado de deformações da estrutura quando o tempo (fictício) tende ao infinito. Este estado estável, corresponde a resposta de uma estrutura de comportamento elastoplástico, submetida a uma carga instantânea.

### **3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EMPREGADOS PARA O CONCRETO E ARMADURA**

#### **3.1 Elementos finitos para o concreto**

Para modelar o concreto foram utilizados dois tipos de elementos finitos isoparamétricos tridimensionais: um linear e um quadrático, da família Serendipity. Estes possuem 8 e 20 nós, respectivamente, com três graus de liberdade em cada nó, correspondentes às translações na direção dos eixos xyz do sistema global de coordenadas.

#### **3.2 Elementos finitos para a armadura**

Existem basicamente três formas para a inclusão das barras de armadura em um modelo de elementos finitos para a análise de peças de concreto armado: a distribuída, a discreta e a incorporada. Neste trabalho, optou-se pelo modelo incorporado de armadura, onde considera-se que as barras de armadura, são linhas de um material mais rígido no interior dos elementos de concreto. Utiliza-se um campo de deslocamentos único no domínio do elemento. Deste modo, pode-se colocar a barra de armadura em qualquer posição dentro do elemento de concreto, sem introduzirem-se incógnitas adicionais ao problema.

Adotou-se a metodologia apresentada por Elwi e Hrudey (1989), para obtenção da matriz de rigidez da armadura e para determinação automática dos segmentos das barras de armadura contidos em cada elemento finito de concreto.

### **4. MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS**

#### **4.1 Modelo para o concreto comprimido**

Para representar o comportamento do concreto não fissurado, adotou-se um modelo elastoplástico com endurecimento. Este modelo elastoplástico é composto por um critério de ruptura, por um critério de plastificação e por uma regra de endurecimento.

O critério de ruptura escolhido, foi o de Ottosen (1977). O concreto comprimido foi modelado como um material com endurecimento isotrópico e admitiu-se que as superfícies de plastificação apresentam a mesma forma da superfície de ruptura. A regra de endurecimento adotada é determinada pela relação entre a tensão efetiva e a deformação plástica acumulada ou deformação plástica efetiva.

#### **4.2 Modelo para o concreto fissurado**

Um modelo de fissuras distribuídas foi adotado neste trabalho. Para estabelecer tal modelo, são necessários os seguintes itens: um critério de fissuração; uma regra para consideração da colaboração do concreto entre fissuras; e um modelo para transferência de tensões tangenciais.

Para modelar o efeito da aderência entre concreto e aço, considera-se um gráfico tensão-deformação consistindo de um ramo ascendente, correspondendo a resposta elástica linear, e outro ramo descendente, pós fissura, que leva em conta a colaboração do concreto entre fissuras, conforme apresentado em Hinton (1988).

#### 4.3 Modelo constitutivo para o aço

Nas peças de concreto armado, as barras de aço resistem, fundamentalmente, a esforços na sua direção. Desta forma, é suficiente conhecer o seu comportamento uniaxial.

Para os aços laminados a quente, utiliza-se um diagrama tensão-deformação elastoplástico perfeito e, para os aços encruados a frio, emprega-se um diagrama bilinear com endurecimento.

### 5. PROPRIEDADES DO CONCRETO DEPENDENTES DO TEMPO

#### 5.1 Inclusão da fluência no modelo

O modelo reológico, adotado para representar o comportamento dependente do tempo do concreto, foi uma cadeia de elementos Maxwell. Esta cadeia é constituída por uma associação de elementos compostos por uma mola em série com um amortecedor viscoso.

Bazant (1974) desenvolveu um modelo deste tipo para representar o comportamento viscoelástico com envelhecimento do concreto, sob baixos níveis de tensão.

#### 5.2 Inclusão da retração no modelo

As deformações por retração do concreto são tratadas como deformações impostas à estrutura. A exemplo da fluência, a retração não produz diretamente tensões no concreto. Por isso, para a avaliação da tensão no concreto, desconta-se do valor da deformação total, obtida a partir do vetor de deslocamentos, a parcela de deformação que foi originada diretamente pela retração.

### 6. UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE MPGS

No presente trabalho, utiliza-se o software MPGS ( Multi-Purpose Graphic System ), que tem por objetivo a representação tridimensional de malhas e de resultados provenientes de simulações numéricas.

Primeiramente, implementou-se um programa tradutor de dados para o formato requerido pelo MPGS.

Concluída a elaboração do programa tradutor, delineou-se os objetivos a serem alcançados com a utilização do MPGS: visualização da mudança de geometria e da distribuição de tensões no concreto e no aço com o decorrer do tempo ou com o aumento progressivo da carga.

Para tanto, é necessário gravar os deslocamentos e as tensões da estrutura em um número de arquivos idêntico à quantidade de passos de tempo ou de incrementos de carga utilizada na simulação. Apenas procedendo desta forma, é que se tornará possível lê-los e associá-los com a geometria ou configuração de tensões original, gerando assim novas deformadas e configurações, à medida que o tempo ou o nível de carga for incrementado.

A seguir apresentam-se figuras que ilustram a deformada e a distribuição de tensões no concreto de uma viga, simulada com o programa implementado, e visualizada nas estações gráficas através do código computacional MPGS.

A Fig. 1 apresenta a deformada de uma viga para um carregamento instantâneo de 225 kN. Os valores das flechas foram multiplicados por 40 vezes objetivando uma melhor visualização.

A Fig. 2 ilustra a distribuição de tensões no concreto. As tensões de tração aparecem em tonalidade cinza escuro, enquanto que as de compressão, em cinza claro. O nível de carga é de 75 kN.

### 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Claire, J.D. (1994) - "Análise Tridimensional Elasto-Viscoplástica de Estruturas de Concreto Armado através do Método dos Elementos Finitos". Porto Alegre: CPGEC/UFRGS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).
- Elwi, A.E. , Hrudey, T.M. (1989) - "Finite Element Model for Curved Embedded Reinforcement", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, vol.115, n.4, pp.740-745.
- Ottosen, N.S. (1977) - "A Failure Criterion for Concrete", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, vol.103, n.4, pp.527-535.
- Hinton, E. (1988) - "Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells", Swansea, Pineridge Press. 550p.
- Bazant, Z.P. , Wu, S.T. (1974) - "Rate-Type Creep Law of Aging Concrete Based on Maxwell Chain", Matériaux et Constructions, vol.7, n.37, pp.45-60.

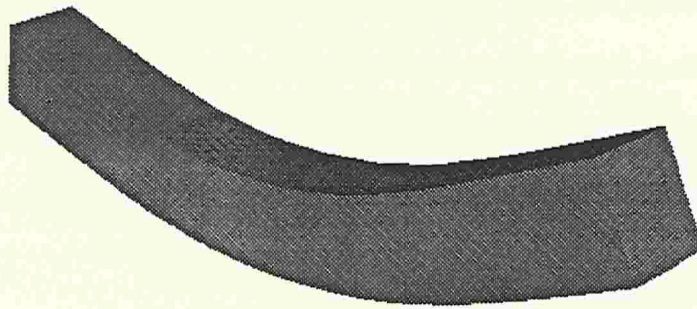


Fig. 1 - Deformada da viga de concreto armado

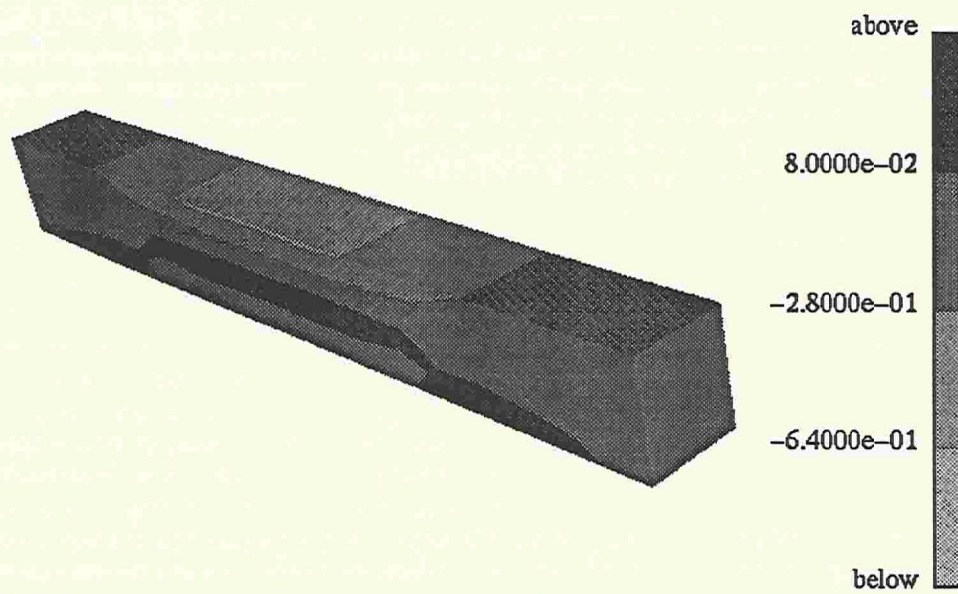


Fig. 2 - Distribuição de tensões no concreto ao longo da viga