

Simulação computacional de estruturas de concreto por meio da mecânica do dano

Guello, Gustavo de Assis. (1); Bittencourt, Túlio Nogueira (2)

(1) *Mestrando, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
email: gustavo.guello@poli.usp.br*

(2) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
email: tulio.bittencourt@poli.usp.br*

Resumo

Neste trabalho são apresentados aspectos relativos à modelagem de estruturas de concreto por meio da Mecânica do Dano.

Algumas evidências experimentais revelam uma degradação das propriedades do concreto quando submetido a carregamentos monotônicos crescentes. O modelo de dano de Mazars é apresentado como uma forma de representar este fenômeno de perda de resistência. Este modelo foi escolhido por ser simples, uma vez que utiliza uma grandeza escalar para representar a danificação do material.

O modelo foi implementado no sistema **QUEBRA2D-FEMOOP**. O **QUEBRA2D** é um programa gráfico responsável pelo pré e pós-processamento, enquanto o **FEMOOP** é um pacote de elementos finitos incumbido da análise tensão-deformação.

Alguns exemplos e dificuldades na implementação do modelo de dano de Mazars são apresentados neste trabalho.

Palavras-chave: mecânica do dano, elementos finitos, computação gráfica.

1. Introdução

A mecânica do dano contínuo é uma ferramenta para análise da deterioração do material em sólidos submetidos a ação de natureza mecânica ou térmica. Enquanto a mecânica da fratura lida com as condições de propagação de fissuras macroscópicas, a mecânica do dano contínuo estuda o efeito de microfissuras distribuídas na resposta do material. A teoria do dano descreve localmente a evolução dos fenômenos que se desenvolvem entre um estado inicial, relativo a uma situação de material íntegro, e um estado final, representado pela perda total da resistência. No caso do concreto, um material no qual a fissuração é o fenômeno dominante no comportamento não-linear, a mecânica do dano é sem dúvida capaz de formular modelos realistas.

O dano não é uma grandeza física mensurável diretamente, mas no âmbito de uma modelagem matemática é possível quantificá-la através de uma redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como por exemplo, a rigidez do material.

O modelo de dano escolhido para estudo foi o modelo de Mazars. A grande vantagem do modelo é sua simplicidade, pois sua calibração exige apenas ensaios simples de tração e compressão. Ele também permite o estudo de fadiga com a inserção de pequenas modificações.

Este modelo foi implementado no sistema computacional **QUEBRA2D-FEMOOP** desenvolvido pelo LMC em conjunto com o Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica (TecGraf) do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Neste mesmo ambiente também estão implementados modelos baseados na mecânica da fratura para a simulação de propagação de fissuras coesivas ou não-coesivas, além da análise de fadiga.

O **QUEBRA2D** é um sistema que explora recursos de computação gráfica para modelagem e visualização bidimensionais de sólidos contendo fissuras arbitrárias. O programa **QUEBRA2D** foi utilizado como interface para o programa **FEMOOP** (*Finite Element Method - Object Oriented Programming*), também desenvolvido no LMC e TecGraf, que é o responsável pela análise estrutural com a simulação da evolução do dano.

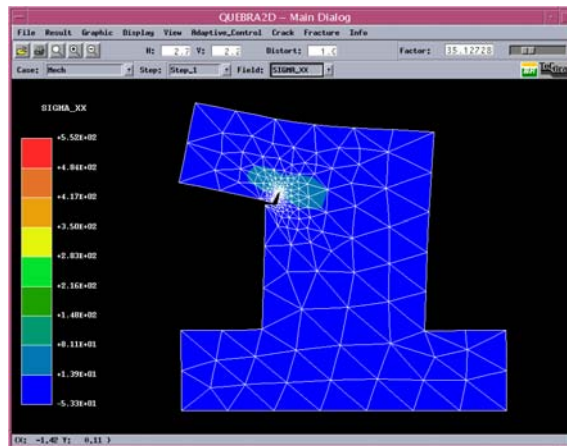


Figura 1 – Tela de pós-processamento do QUEBRA2D

O programa **FEMOOP** é baseado no paradigma da programação orientada para objetos, sendo desenvolvido utilizando-se a linguagem de programação C++. Um dos benefícios mais importantes da programação orientada para objetos é a extensibilidade do código, permitindo que novas implementações sejam feitas com pequeno impacto sobre o código já existente.

Este trabalho está inserido nas atividades do grupo de Mecânica da Fratura e Mecânica do Dano que desenvolve uma série de modelos para previsão do comportamento do concreto dentro do Laboratório de Mecânica Computacional (LMC) da Universidade de São Paulo.

2. Exemplos

2.1. Exemplo de viga parede

2.1.1. Descrição do problema

O problema consiste em uma viga parede de 2,7 m de comprimento por 0,5 m de altura e 0,2 m de espessura (Figura 2). A viga não possuía nenhum tipo de armadura. A viga foi submetida a um carregamento concentrado simétrico aplicado a 0,225 m do eixo de simetria. Este exemplo foi apresentado por PROENÇA (1991).

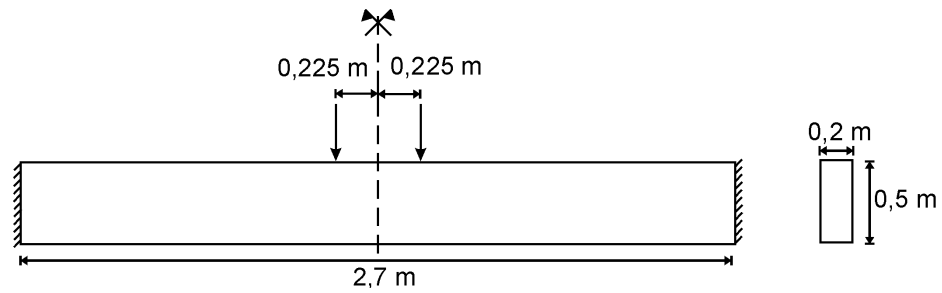


Figura 2 - Geometria da Viga Parede

2.1.2 Análise

A análise da viga parede através do modelo de Dano de Mazars foi feita com o uso do método dos elementos finitos. Para a discretização foram utilizados elementos quadráticos de 8 nós com 4 pontos de Gauss. Foi utilizada uma malha de 24 por 5 elementos para modelar a viga (Figura 3).

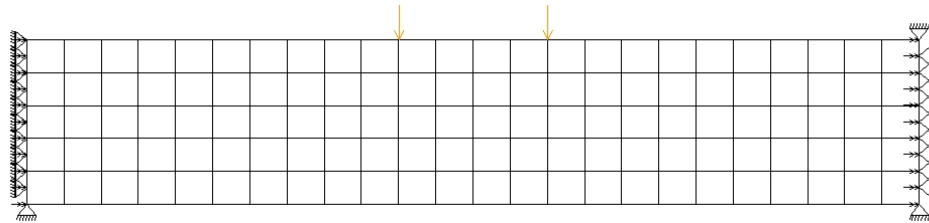


Figura 3 - Malha de Elementos Finitos

Os parâmetros de material utilizado na análise foram:

Concreto	
$E = 24700000 \text{ kN/m}^2$	$A_C = 1,13$
$\nu = 0,2$	$B_C = 1250$
$A_T = 0,7$	
$B_T = 8000$	

2.1.3 Resultados

A análise foi feita com controle de carga utilizando-se os seguintes parâmetros:

Controle de CargaErro = 1×10^{-2}

Número de passos = 33

Passo = 2 kN

Máximo número de interações = 200

O mapa de dano resultante da análise do problema no **QUEBRA2D** para uma carga de 52 kN é mostrado na Figura 4.

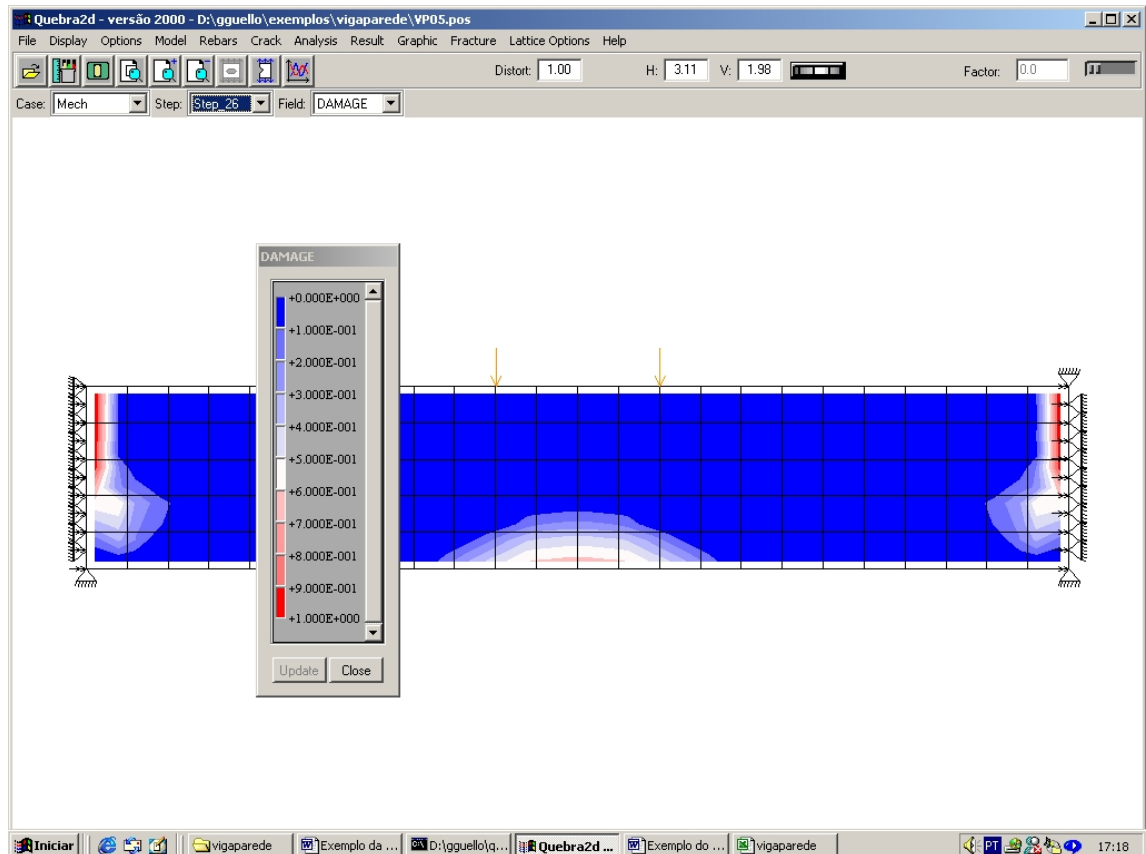


Figura 4 - Mapa de Dano (QUEBRA2D)

O mapa de dano para uma carga de 51,75 kN apresentado em PROENÇA[1991] é mostrado na figura abaixo.

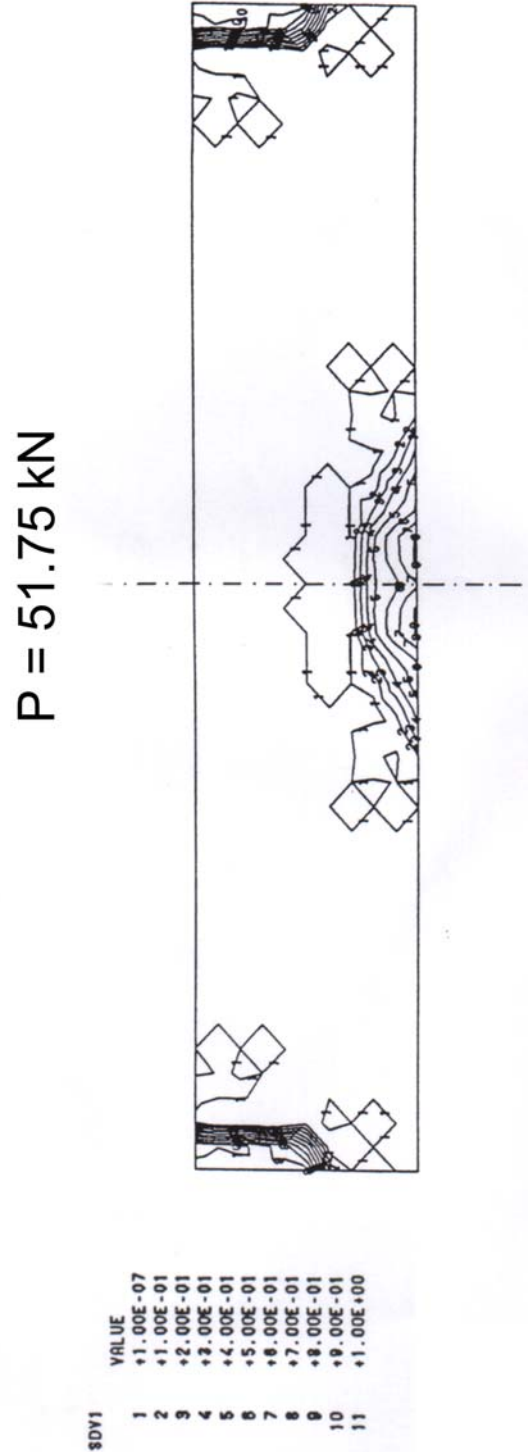


Figura 5 - Mapa de Dano (PROENÇA[1991])

Como se pode observar nas figuras acima, a distribuição de dano obtida no QUEBRA2D e por PROENÇA são semelhantes. Este exemplo foi importante na validação da implementação numérica do modelo de Mazars.

A seguir é apresentado o gráfico carga por deslocamento. O Resultado obtido no QUEBRA2D foi comparado ao obtido por Felício Bruzzi Barros junto com o Professor Sérgio Proença da USP de São Carlos.

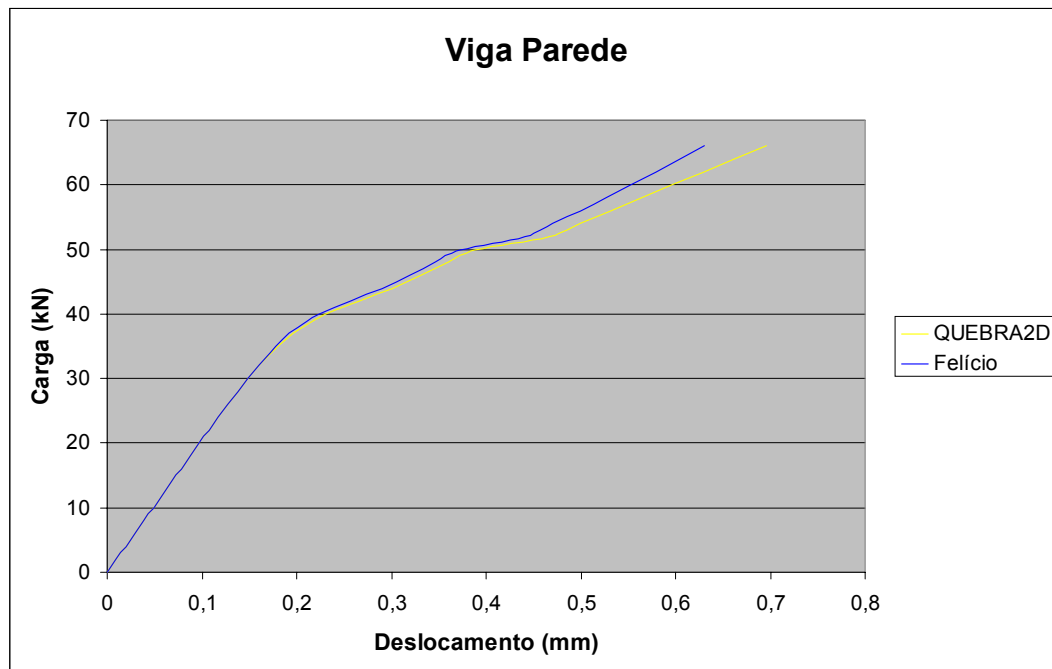


Figura 6 - Curva Carga x Deslocamento

2.2. Exemplo de viga de concreto armado

2.2.1. Descrição do problema

O problema consiste em três vigas de concreto armado com diferentes taxas de armadura. As vigas têm dimensões idênticas com 2,4 m de comprimento por 0,3 m de altura e 0,12 m de espessura (Figura 7). As vigas foram submetidas a um carregamento concentrado simétrico aplicado a 0,4 m do eixo de simetria. As armaduras utilizadas foram $3\phi 10$, $5\phi 10$ e $7\phi 10$ de armadura negativa e $2\phi 5$ de armadura positiva (para todas as vigas). Este exemplo foi apresentado em ÁLVARES (1993).

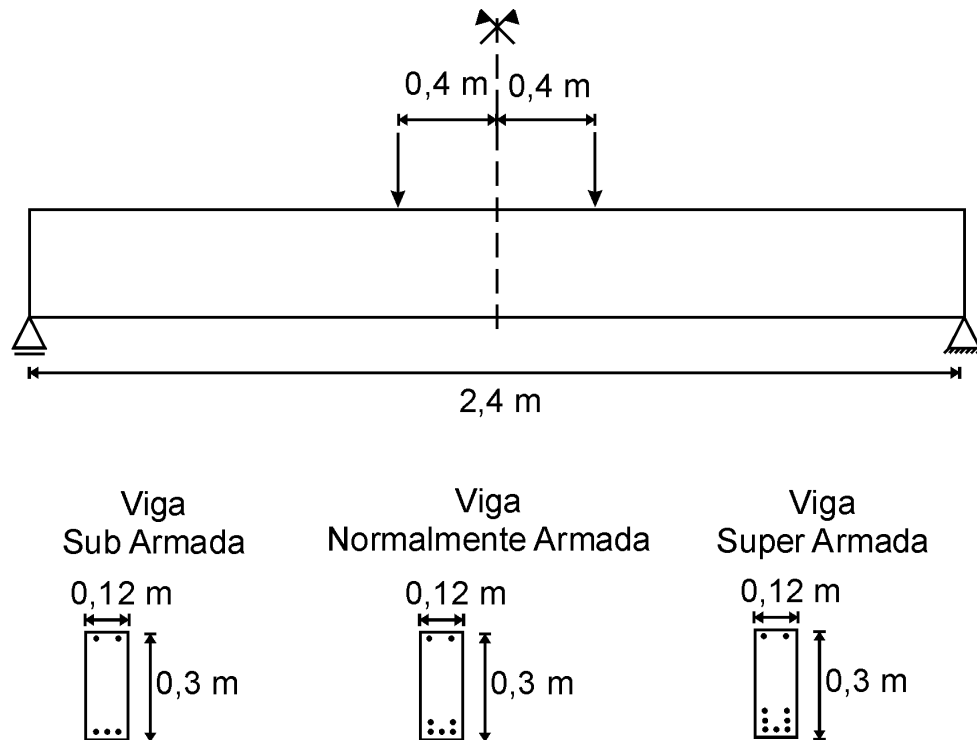


Figura 7 - Geometria das vigas

2.2.2. Análise

A análise das vigas através do modelo de Dano de Mazars foi feita com o uso do método dos elementos finitos. Para a discretização foram utilizados elementos quadráticos de quatro nós com quatro pontos de Gauss. Foi utilizada uma malha de 12 por 11 elementos distribuídos como mostrado na Figura 8.

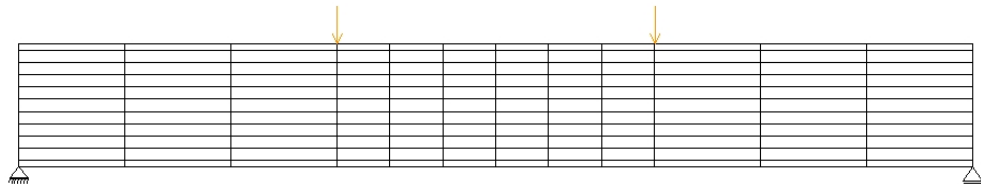


Figura 8 - Modelo das vigas

Os parâmetros de material utilizado foram:

Concreto	Aço
$E = 29200000 \text{ kN/m}^2$ $\nu = 0,2$ $A_T = 0,995$ $B_T = 8000$ $A_C = 0,85$ $B_C = 1620$ $\varepsilon_{d0} = 7 \times 10^{-5}$	$E = 196000000 \text{ kN/m}^2$ $\nu = 0,2$

2.2.3. Resultados

A seguir mostramos dois resultados numéricos distintos. O primeiro intitulado Numérico refere-se à aplicação do modelo de Mazars com o Método de Newton-Raphson com critério de força. Como no exemplo do tirante, foi possível representar bem o trecho inicial, mas a partir de um determinado ponto, as deformações se tornam excessivas.

Uma tentativa foi limitar o valor do dano a 0,87. Com esta restrição, foi possível atingir valores de carga maiores e o resultado ficou muito próximo do experimental.

A seguir apresenta-se o gráfico carga x deslocamento para a viga sub armada.

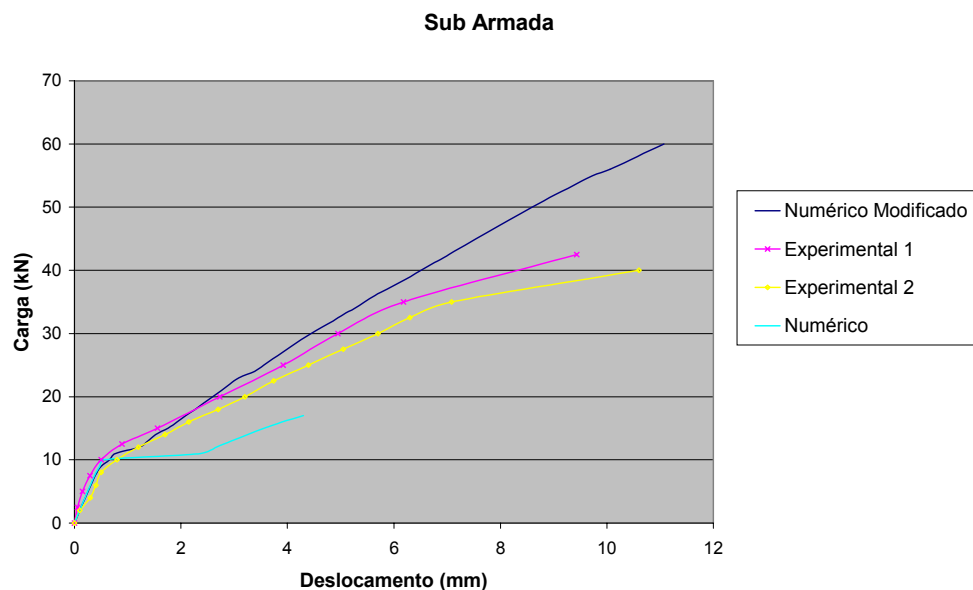


Figura 9 - Gráfico carga x deslocamento para viga sub armada

O gráfico carga x deslocamento para a viga normalmente armada é apresentado abaixo.

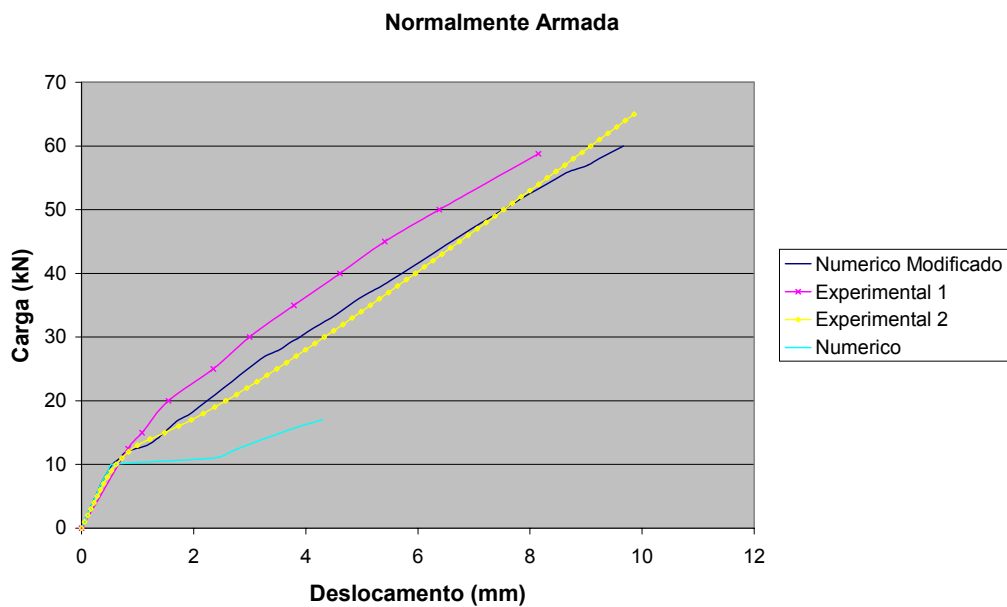


Figura 10 - Gráfico carga x deslocamento para viga normalmente armada

Finalmente temos o gráfico carga x deslocamento para a viga super armada.

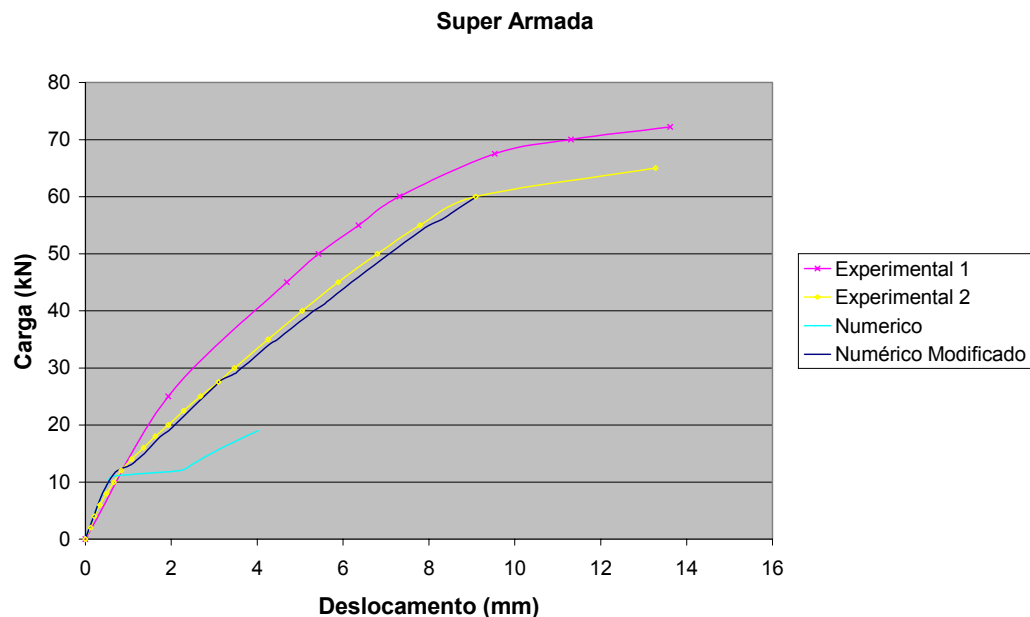


Figura 11 - Gráfico carga x deslocamento para viga super armada

3. Discussão dos resultados

O primeiro exemplo é apresentado como forma de validação da implementação do modelo. Os resultados carga x deslocamento e a envoltório de dano foram próximos aos apresentados em PROENÇA (1991).

No exemplo das vigas de concreto armado, as curvas carga x deslocamento ficaram abaixo das curvas experimentais e numéricas encontrada em ÁLVARES (1993). Após contato com o grupo do Professor Sérgio Proença, orientador do trabalho, descobriu-se que o cálculo do ε_{d0} no elemento estava sendo feito de forma diferente. Quando um dos pontos de Gauss atingia valor de deformação maior que ε_{d0} , este limite era atualizado para todos os pontos do elemento. Aparentemente, este procedimento evita que o dano se espalhe rapidamente pelos elementos vizinhos. Em nenhum dos trabalhos pesquisados existe justificativa para a aplicação deste procedimento. Uma tentativa mais simples foi a limitação do valor máximo do dano. Os resultados obtidos ficaram próximos dos experimentais. Este procedimento foi

adotado apenas como comparação e não foi incorporado nos demais exemplos porque modifica o modelo original de Mazars.

Em outros exemplos, também não foi possível a obtenção dos resultados da literatura. Na tese de doutorado de Mazars (MAZARS (1984)), o modelo de Newton-Raphson foi enriquecido com um teste de estabilidade e outro que leva em conta o aspecto estatístico de distribuição da resistência do concreto. Parece que a implementação do modelo de dano de Mazars com o algoritmo de solução de Newton-Raphson ou de controle de deslocamento não permite a obtenção de resultados satisfatórios.

Outro passo foi a correção do procedimento de cálculo do ε_{d0} no programa do ÁLVARES. Após processar novamente o modelo das vigas, chegou-se aos mesmos resultados do QUEBRA2D. Também foi possível reproduzir o modelo da viga parede com ótimos resultados. Esta etapa foi importante para validar a implementação do modelo.

Outra tentativa de reproduzir os resultados foi a implantação de um método não local. Neste método, a deformação no ponto é calculada em função das deformações de pontos na vizinhança. Com isso, os resultados foram melhores, mas ainda longe dos resultados experimentais.

4. Referências bibliográficas

ÁLVARES, M. S. (1993). Estudo de um modelo de dano para o concreto: formulação, identificação paramétrica e aplicação com o emprego do método dos elementos finitos. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

MAZARS, J. (1984). Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non lineare et à la rupture du béton de structure. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris 6.

PROENÇA, S. P. B. ; PAPA, E. ; MAIER, G.(1991). Meccanica Del danneggiamento di materiali e strutture: applicazioni al calcestruzzo. Rapporto sul contratto di ricerca 90-91. Dipartimento di Ingegneria Strutturale – Politecnico, Milano.