

Análise Bidimensional de Estrutura de Concreto Protendido em Regime de Serviço (1ª. Parte)

Guilherme Viana Dantas

No presente trabalho apresenta-se um modelo em elementos finitos para a análise de estruturas de concreto protendido, em regime de serviço, considerando-se os efeitos dependentes do tempo.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho procura estabelecer uma base de conhecimentos sobre os principais fenômenos não lineares das estruturas de concreto armado e protendido, através de estudos teóricos e experimentais.

Pretende-se aqui, particularmente, estabelecer um modelo de comportamento, ao longo do tempo, de estruturas de concreto protendido, considerando-se efeitos de defor-

mação lenta e retração do concreto e relaxação da armadura.

O concreto comporta-se como material linearmente visco-elástico, podendo romper por fissuração ou esmagamento (Fig. 1). O aço, tanto da armadura comum quanto da protensão, é suposto perfeitamente elasto-plástico (Fig. 2). A interação entre os elementos de concreto e aço se dá pela imposição de aderência perfeita entre estes dois materiais.

*Engo. Civil, M.S., Prof. da UNIFOR

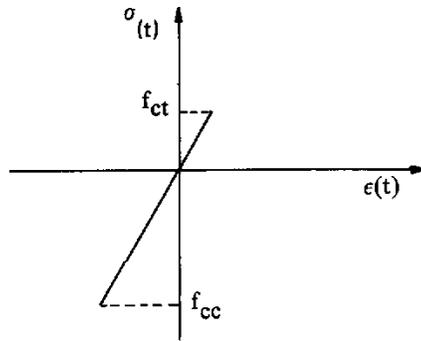


Fig. 1 Diagrama tensão-deformação p/o concreto

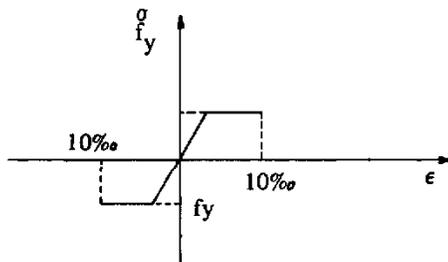


Fig. 2 Diagrama tensão-deformação p/a armadura

A estrutura é analisada a partir de uma formulação incremental do método dos elementos finitos, em função do tempo e do carregamento.

Para a determinação das deformações inelásticas, utiliza-se um processo de integração desenvolvido por Selna [1, 2], em que se admite variação linear das tensões no decorrer de cada intervalo de tempo.

2. EFEITOS DEPENDENTES DO TEMPO

Retração do concreto

A retração é definida como a mudança de volume ao longo do tempo, relacionada com o processo de cura do concreto, que surge independentemente de tensões ou efeitos térmicos. O aumento da retração diminui rapidamente com o tempo, tendendo a um valor limite (Fig. 3).

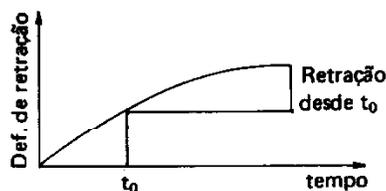


Fig. 3 Retração de um corpo de prova descarregado

Utiliza-se neste trabalho, para o cálculo da retração, o procedimento do CEB [3], segundo o qual a deformação de retração $\epsilon_s(t)$, num instante qualquer, pode ser determinada através da equação.

$$\epsilon_s(t) = \epsilon_{s0} \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 \cdot \beta_5 \cdot \beta_6 \quad (1)$$

onde ϵ_{s0} é função da umidade relativa do ar; β_3 é fator dependente da composição do concreto (fator água/cimento); β_4 é função da espessura fictícia da peça; β_5 é fator dependente do desenvolvimento da retração com o tempo; β_6 é fator que depende da porcentagem geométrica da armadura longitudinal $\rho = A_s/A_c$. Esta dependência é expressa por $\beta_6 = 1/(1 + n\rho)$, em que, para a consideração da deformação lenta, usa-se $n = 20$.

DEFORMAÇÃO LENTA

A deformação lenta é um fenômeno relacionado com carregamentos de longa duração. Consiste na deformação e fluência graduais do concreto, como resposta retardada às solicitações recebidas. Também a deformação lenta tende assintoticamente para um valor constante no tempo (Fig.4).

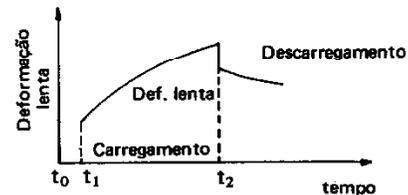


Fig. 4 Deformação lenta devida a carregamento e descarregamento

Para cargas próximas às de serviço, a deformação lenta pode ser suposta proporcional à tensão aplicada [4]. De acordo com esta hipótese, McHenry [5] propôs uma lei deformação-tensão-tempo, em termos de uma integral de superposição:

$$\epsilon^o(t) = \int_{t_0}^t C(t, \tau) \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (2)$$

onde $\epsilon^o(t)$ é a deformação total no instante t , produzida por tensões; $C(t, \tau)$ é função de deformação lenta específica, definida como a deformação total no instante t , devida à aplicação de uma tensão unitária no instante τ . t_0 é a época de aplicação do carregamento inicial; σ é a tensão normal atuante.

O CEB [3], por sua vez, utiliza a expressão

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_{cc}}{E_{c28}} \psi \quad (3)$$

para o mesmo cálculo da deformação lenta, onde σ_{cc} é a tensão de solicitação constante, $E_{C_{28}}$ é o módulo secante de deformação do concreto aos 28 dias de idade e o coeficiente ψ é expresso como o produto de vários fatores, determinados experimentalmente, para levar em conta a umidade relativa do ar, o endurecimento do concreto, o fator água/cimento, a espessura fictícia e o desenvolvimento da deformação não instantânea em função do tempo.

Esta fórmula do CEB, apesar de baseada em um grande número de dados experimentais, não se presta à aplicação direta a programas computacionais, pela dificuldade de se poder expressar analiticamente os diversos coeficientes de ψ .

Selna [1, 2] utilizou então a expressão proposta por McHenry (eq. 2), em que a função deformação lenta específica se escreve.

$$C(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + \sum_{i=1}^m a_i(\tau) \sum_{j=1}^m \alpha_j [1 - e^{-k_j(t, \tau)}] \quad (4)$$

com base em fórmulas sugeridas pelo próprio McHenry [5] e por Arutyunyan [6], onde os diversos coeficientes podem ser determinados a partir de dados experimentais, através de ajustamento de curvas pelo método dos mínimos quadrados.

É evidente que os dados experimentais obtidos pelo CEB podem ser usados aqui. Selna realmente determinou os coeficientes de (4), para $m = 3$, por ajustamento da eq. (2) diretamente à eq. (3), dada pelo CEB. A integral representada em (2) foi resolvida numericamente. Os resultados assim obtidos, para a deformação lenta uniaxial, revelaram-se excelentes [2].

No presente trabalho, utiliza-se este tratamento da deformação lenta, generalizado para o estado plano de tensões (4).

4. O CONCRETO PROTENDIDO

Admite-se neste trabalho que a protensão seja introduzida após o endurecimento do concreto. Além disso, considera-se que o efeito de protensão seja alcançado por meio de cabos internos ao concreto, com o que resulta uma estrutura monolítica sujeita a tensões auto-equilibradas. Após o estiramento dos cabos e injeção de argamassa nas bainhas, os esforços transmitidos à estrutura deveriam ser uniformemente distribuídos ao longo dos cabos, e de valor igual aos esforços iniciais. Ocorrem, porém, várias perdas de protensão, que devem ser levadas em conta.

PERDAS POR ATRITO

Estas perdas devem ao atrito entre os cabos e as bainhas, em virtude de a protensão ser realizada após o endurecimento do concreto, e podem ser determinadas em função do comprimento e da curvatura dos cabos. Assim, expressa-se o valor da força de protensão P_x , a uma distância x da extremidade tracionada do cabo, por

$$P_x = P_i e^{-(\mu\alpha + kx)} \quad (5)$$

onde P_i é a força inicial de protensão (para $x = 0$); α é o ângulo entre as tangentes ao cabo nos pontos 0 e x ; μ é o coeficiente de atrito entre cabo e bainha; k é o coeficiente

PERDAS POR ACOMODAÇÃO DA ANCORAGEM

Devem-se ao recuo da extremidade do cabo, quando do processo de transferência da força de proteção do macaco para o sistema de ancoragem. O comprimento w , onde há perda de protensão por acomodação da ancoragem, pode ser calculado [8] a partir do diagrama inicial de protensão pela fórmula:

$$w = \sqrt{\frac{\Delta L \cdot E_s}{\beta}} \quad (6)$$

onde ΔL é o deslocamento da ancoragem e E_s o módulo de elasticidade do aço. A tangente β ao ângulo do diagrama de protensão inicial (Fig. 5) é suposta constante em todo o trecho em questão, o que é verdade para cabos retos e parabólicos.

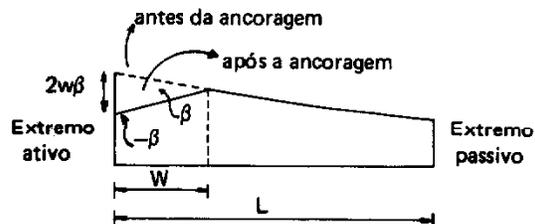


Fig. 5 Variação das tensões em um cabo pós-tensionado

PERDAS POR DEFORMAÇÃO LENTA E RETRAÇÃO DO CONCRETO

Estas perdas variam em função do tempo e do carregamento. São levadas em conta através de um vetor de carregamentos nodais equivalentes, durante a formulação do problema de equilíbrio, e no cálculo das tensões [9].

PERDAS POR RELAXAÇÃO DO AÇO DE PROTENSÃO

A relaxação no aço é a perda de sua tensão, quando mantido a uma deformação constante por um período de tempo. Pela falta de dados experimentais a respeito da relaxação do aço, considera-se neste trabalho uma perda equivalente instantânea de 5% do valor da tensão inicial [9].

APLICAÇÃO DA PROTENSÃO AO CONCRETO

A análise da transferência das tensões de protensão para o concreto endurecido pode ser sumarizada como se segue [9, 11]:

- Calculam-se as forças de protensão ao longo dos cabos (nos pontos gaussianos de cada elemento), considerando-se as diversas perdas de tensão.
- Calcula-se o carregamento nodal estaticamente equivalente à protensão.
- Analisa-se a estrutura para este carregamento, não se considerando a contribuição do aço de protensão para a rigidez da estrutura.

Após a transferência da protensão, pode ser iniciada a análise da estrutura em função do tempo e do carregamento, não havendo formalmente qualquer diferença entre as armaduras de protensão e comum.