

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DE ESTRUTURAS APORTICADAS DE BARRAS CURVAS EM CONCRETO ARMADO POR MEIO DA TEORIA DE DISSIPACÃO CONCENTRADA

David Leonardo Nascimento de Figueiredo Amorim¹; Julio Flórez-López² & Sergio Persival Baroncini Proença³

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a modelagem de estruturas de barras circulares de concreto armado, e.g. anéis e arcos, por meio da teoria de dissipação concentrada. Tal teoria consiste na idealização de rótulas anelásticas nas extremidades de um elemento finito de barra. Desta forma, obtém-se um modelo simplificado capaz de reproduzir, de forma satisfatória, o comportamento não-linear de estruturas aporticadas de concreto armado formadas por barras curvas.

Palavras-chave: Arcos. Pórtico. Teoria de dissipação concentrada. Concreto armado.

NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE CURVED BAR FRAMED STRUCTURES BY MEANS OF THE LUMPED DISSIPATION THEORY

Abstract

This paper aims the modelling of reinforced concrete (RC) curved bar framed structures, e.g. rings and arches, by means of the lumped dissipation theory. Such theory consists in idealization of inelastic hinges placed at the frame element edges. Therefore it is obtained a simplified model capable to reproduce, satisfactorily, the nonlinear behaviour of RC curved bar framed structures.

Keywords: Arch. Frame. Lumped dissipation theory. Reinforced concrete.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, davidnf@usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da ULA, iflorez@ula.ve

³ Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, persival@sc.usp.br



1 INTRODUÇÃO

A mecânica do dano contínuo (Lemaitre e Chaboche, 1988) é a mais recente das grandes teorias para a descrição do processo de deterioração progressiva e falha estrutural. Apesar da intensa atividade científica sobre este tema o número de aplicações práticas da teoria ainda é pequeno, pois há casos em que o problema matemático é mal colocado, quando não, de implementação computacional muito cara. Assim, o desenvolvimento de métodos simplificados surgiu como alternativa para contornar essas dificuldades. Entre as propostas mais utilizadas está a utilização de rótulas anelásticas, localizando à partida os efeitos de plasticidade e dano, comumente conhecidas como teorias de dano concentrado ou de dissipação concentrada (TDC). Tal alternativa tem sido utilizada com grande sucesso para a modelagem de pórticos de barras retas, em concreto armado (e.g.: Cipollina et al, 1995; Araújo e Proença, 2004) ou aço (Febres et al, 2003). Entretanto, arcos e anéis são também elementos estruturais muito importantes que podem ser tratados por essa teoria. No âmbito da TDC, Flórez-López e Proença (2013) propuseram um elemento finito para arcos circulares com rótulas plásticas. Neste trabalho apresenta-se uma extensão daquele modelo, que passa a contemplar também os elementos estruturais em concreto armado. Desse modo, consegue-se gerar um modelo numérico de conceituação simples e muito eficiente para a análise de estruturas aperticadas em regime de comportamento não-linear.

2 DESENVOLVIMENTO

Considere-se o pórtico da figura 1, segundo um sistema de referência global $X_G Z_G$. O vetor de forças nodais externas de uma estrutura é $\{\mathbf{P}\}$. Considere-se agora um elemento b , definido entre os nós i e j , onde $\{\mathbf{Q}\}_b$ é o vetor das forças internas, sendo ampliado $\{\mathbf{Q}_A\}_b$ incluindo zeros nos graus de liberdade que não correspondem aos nós do elemento, onde o equilíbrio é assim descrito:

$$\sum_b \{\mathbf{Q}_A\}_b = \{\mathbf{P}\} \quad (1)$$

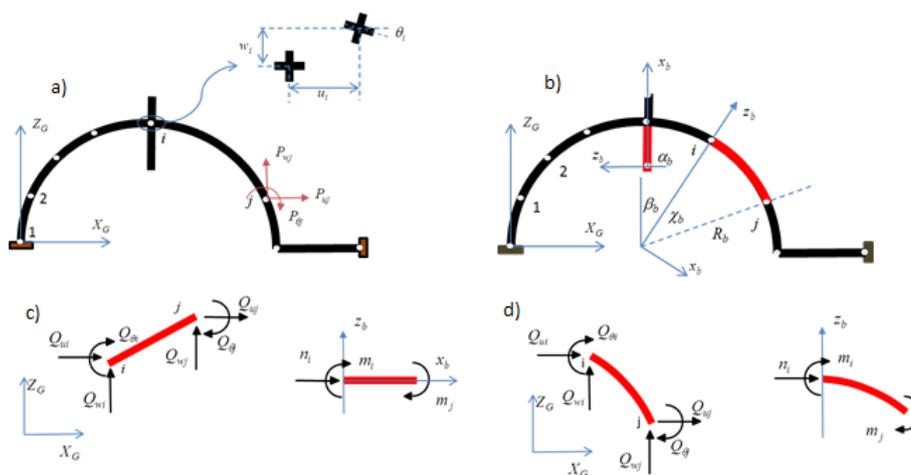


Figura 1 – Elementos retos e circulares.

Cada elemento é definido em um sistema de referência local $x_b z_b$ (figuras 1c e d), onde nos elementos retos L_b é o comprimento e α_b é o ângulo entre os eixos local x_b e global X_G ; nos elementos de arco χ_b é o ângulo do arco, R_b é o raio e β_b é o ângulo entre o eixo global Z_G e local

z_b . Utilizando a abordagem de Powell (1969) define-se o vetor de tensões generalizadas do elemento: $\{\sigma\}_b^t = (m_i, m_j, n_i)$, onde m_i e m_j são momentos fletores e n_i é a força axial em i . Os vetores de forças internas e de tensões relacionam-se por meio de uma matriz de transformação cinemática $[\mathbf{B}]_b$, e sua versão ampliada $[\mathbf{B}_A]_b$ relaciona as forças externas com as tensões generalizadas:

$$\{\mathbf{Q}\} = [\mathbf{B}]_b^t \{\sigma\}_b; \sum_b [\mathbf{B}_A]_b^t \{\sigma\}_b = \{\mathbf{P}\} \quad (2)$$

Definem-se os vetores de deslocamentos nodais generalizados da estrutura $\{\mathbf{U}\}$ e de um elemento $\{\mathbf{q}\}_b$ de pórtico, e a matriz de deformações generalizadas $\{\epsilon\}_b$. Considerando-se regime de pequenos deslocamentos pode-se afirmar que: $\{\epsilon\}_b = [\mathbf{B}_A]_b \{\mathbf{U}\}$. Para levar em conta os efeitos anelásticos admite-se que as deformações generalizadas $\{\epsilon\}_b$ são dadas pela soma entre as parcelas elástica: $\{\epsilon^e\}_b = [\mathbf{F}_o] \{\sigma\}_b$, plástica: $\{\epsilon^p\}_b^t = (\phi_i^p, \phi_j^p, 0)$ e de dano: $\{\epsilon^d\}_b = [\mathbf{C}(\mathbf{D})] \{\sigma\}_b$. Sendo $[\mathbf{F}(\mathbf{D})]$ a soma das flexibilidades do elemento elástico $[\mathbf{F}_o]$ e das rótulas $[\mathbf{C}(\mathbf{D})]$, a lei de elasticidade é:

$$\{\epsilon - \epsilon^p\}_b = [\mathbf{F}(\mathbf{D})] \{\sigma\}_b \quad (3)$$

As leis de evolução da rotação plástica ϕ_i^p e do dano d_i são:

$$\begin{cases} \Delta d_i > 0 & \Rightarrow G_i = R(d_i) \\ G_i < R(d_i) & \Rightarrow \Delta d_i = 0 \end{cases}; G_i = \frac{m_i^2 F_{11}^0}{2(1-d_i)^2}; R(d_i) = R_0 + q \frac{\ln(1-d_i)}{(1-d_i)} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta \phi_i^p \neq 0 & \Rightarrow f_i = 0 \\ f_i < 0 & \Rightarrow \Delta \phi_i^p = 0 \end{cases}; f_i = \left| \frac{m_i^b}{1-d_i} - c \phi_i^p \right| - M_y \quad (5)$$

Por meio da teoria convencional do concreto armado R_0 , q , c e M_y são identificados.

3 RESULTADO OBTIDO

Em Caratelli et al (2011) descrevem-se ensaios experimentais realizados sobre segmentos pré-moldados que compõem o túnel Brennero, que liga a Itália à Áustria (vide figura 2).

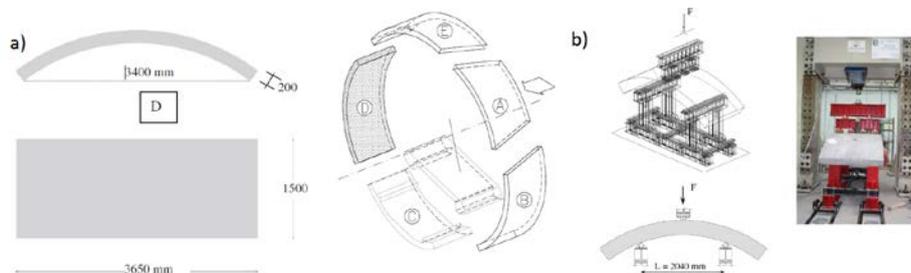


Figura 2 – a) geometria do segmento de túnel e b) ensaio de flexão (Caratelli et al, 2011).

De posse das propriedades dos materiais adotados e das características da seção transversal (Caratelli et al, 2011) foram obtidos os parâmetros do modelo, com recurso à teoria clássica do

concreto armado (Amorim et al, 2013). A simulação numérica realizada proporcionou uma curva de resposta que se mostrou bem ajustada à resposta experimental (figura 3).

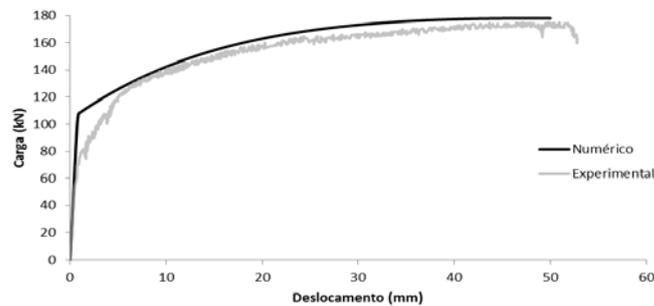


Figura 3 – Comparação entre as respostas experimental e numérica.

4 CONCLUSÕES PARCIAIS

No exemplo apresentado, além da boa precisão, em certo sentido a própria robustez da formulação proposta foi posta à prova, uma vez que a obtenção dos parâmetros foi feita por meio da teoria convencional de concreto armado. Assim sendo, ficou evidenciado que o modelo proposto é capaz de reproduzir, de modo consistente, regimes de comportamentos não-lineares de estruturas de concreto armado.

5 REFERÊNCIAS

AMORIM, D. L. N. F.; PROENÇA, S. P. B.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. A model of fracture in reinforced concrete arches based on lumped damage mechanics. **International Journal of Solids and Structures**, v. 50, n. 24, p. 4070-4079, Nov., 2013. ISSN: 0020-7683.

ARAÚJO, F. A.; PROENÇA, S. P. B. Application of a lumped dissipation model to reinforced concrete structures with the consideration of residual strains and cycles of hysteresis. **Journal of Mechanics of Materials and Structures**, v. 3, n. 5, p. 1011-1031, Jul., 2008. ISSN: 1559-3959.

CARATELLI, A., MEDA, A., RINALDI, Z., ROMUALDI, P. Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete. **Tunnelling Underground and Space Technology**, v. 26, n. 2, p. 284-291, Mar., 2011. ISSN: 0886-7798.

CIPOLLINA, A.; LÓPEZ-INOJOSA, A.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. A simplified damage mechanics approach to nonlinear analysis of frames. **Computers and Structures**, v. 54, n. 6, p. 1113-1126, Mar., 1995. ISSN: 0045-7949.

FEBRES, R.; INGLESSIS, P.; FLÓREZ-LÓPEZ, J. Modeling of local buckling in tubular steel frames subjected to cyclic loading. **Computers and Structures**, v. 81, n. 22-23, p. 2237-2247, Set., 2003. ISSN: 0045-7949.

FLÓREZ-LÓPEZ, J.; PROENÇA, S. P. B. (2013). A curvilinear frame element with plastic hinges. In: IV International Symposium on Solid Mechanics, Porto Alegre, 2013. **Anais...** Porto Alegre.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of Solids Materials**. Dunod, Paris, 1988.

POWELL, H. G. Theory for nonlinear elastic structures. **Journal of the Structural Division (ASCE)**, v. 95, ST12, p. 2687-2701, 1969. ISSN: 0044-8001.