



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá
Brasil

Castro dos Santos, Altevir; Cesar Piana, Roberto
Análise numérica e experimental de vigotas pré-moldadas em concreto armado para emprego em
lajes nervuradas
Acta Scientiarum. Technology, vol. 33, núm. 3, 2011, pp. 253-258
Universidade Estadual de Maringá
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226532001>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Análise numérica e experimental de vigotas pré-moldadas em concreto armado para emprego em lajes nervuradas

Altevir Castro dos Santos^{*} e Roberto Cesar Piana

*Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Universitária, 2069, 85814-110, Campus de Cascavel, Cascavel, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: altevir@unioeste.br*

RESUMO. Uma das aplicações mais comuns de elementos pré-moldados de concreto se dá nas lajes nervuradas de forro e piso. Numa concepção relativamente recente, surgiram lajes nervuradas pré-moldadas bidirecionais, feitas a partir de nervuras com armadura em forma de treliça espacial, com a possibilidade de uso de blocos de poliestireno expandido (EPS), com um formato diferenciado, como material de enchimento. Para se levar em conta a fissuração do concreto, no cálculo das deformações desse tipo de laje, neste trabalho foram adotados os modelos de momento-curvatura de Ghalli e Frave e de Branson, utilizando-se soluções lineares e não-lineares, por meio dos programas computacionais SAP2000® e ANSYS®. Esses modelos foram comparados com dados experimentais de vigas submetidas a ensaios de flexão pura. Também foi adotado um modelo tridimensional para a análise de vigas, baseado no elemento solid65 disponível no programa ANSYS®, o qual possibilita a análise não-linear de sólidos de materiais reforçados, como o concreto armado.

Palavras-chave: estruturas pré-moldadas em concreto armado, modelo computacional.

ABSTRACT. Numerical and experimental analysis of precast reinforced concrete ribs for slabs. One of the most common applications of precast concrete is done on ribbed slabs. A relatively recent conception emerged from precast concrete ribs with three-dimensional truss reinforcement. The use of expanded polystyrene (EPS) blocks as a core material is possible in substitution of ceramic elements. To take into account the effect of concrete cracking on slab deformation, some theoretical models were considered in this work. These models were based on the moment-curvature equation of Ghalli and Frave and of Branson, using linear and non-linear solutions, through computer programs SAP2000® and ANSYS®. The theoretical values were compared to experimental data of beams tested under four-point loading. Also tested was a numerical solution for three-dimensional analysis of beams, based on the element solid65 available in the program ANSYS®, which allows non-linear analysis of solids with structural reinforcement as the reinforced concrete.

Keywords: precast reinforced concrete ribs, finite element model.

Introdução

Na busca por soluções estruturais econômicas e produtivas, a utilização de lajes pré-moldadas tornou-se comum nos pavimentos de edifícios de pequeno, médio e grande porte, porque esse tipo de laje minimiza o uso de formas, necessita de pouco escoramento, é de fácil manuseio e montagem e dispensa o uso de equipamentos especiais.

Segundo a NBR e NBR 14859-2 (ABNT, 2002a e b), as lajes pré-moldadas mais conhecidas são as nervuradas, que podem ser uni ou bidirecionais constituídas de nervuras, em concreto armado ou protendido, de uma capa em concreto moldada “in loco” e de um material de enchimento. Uma das principais vantagens na sua utilização é a diminuição significativa no peso próprio, já que na região

tracionada grande parte do concreto é substituída por material inerte, o qual pode ser de diversas naturezas (EL DEBS, 2000). Atualmente, os mais utilizados são os blocos cerâmicos e os blocos de EPS (poliestireno expandido), conhecido como isopor.

Inúmeras pequenas empresas estão atuando no mercado e muitas delas não têm capacitação técnica completa para projetar, produzir e executar. Tal situação pode comprometer a qualidade e a segurança das estruturas, com consequente aparecimento de diversas manifestações patológicas, como flechas e fissuração excessivas. Infelizmente esta realidade vem na contramão do desenvolvimento científico, uma vez que o avanço da informática possibilita a realização de análises estruturais mais apuradas, considerando parâmetros

importantes como o comportamento não-linear do concreto e a interação entre os diversos elementos estruturais (CARVALHO CHUST; FIGUEIREDO FILHO, 2005).

Pelos critérios de cálculo da NBR 6118 (ABNT, 2003), as lajes nervuradas unidirecionais são dimensionadas conforme a orientação das nervuras, desprezando-se as rigidezes transversais e a torção. Já as lajes nervuradas bidirecionais podem ser calculadas, para efeitos de esforços solicitantes, como lajes maciças. Quanto à determinação de uma rigidez equivalente à flexão, utilizada para verificação do estado limite de deformações excessivas, a NBR 6118 (ABNT, 2003) recomenda o modelo empírico de Branson, expresso pela equação 1.

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (1)$$

em que:

E_{cs} = Módulo de elasticidade secante do concreto;

M_a = momento fletor na seção crítica do vão considerado;

M_f = momento de fissuração do elemento estrutural;

I_c = inércia bruta da seção, desprezando-se a existência da armadura;

I_{II} = momento de inércia do estádio II “puro”, com consideração das armaduras.

O momento de fissuração do elemento estrutural é dado na equação 2 e seu valor é atingido quando a fibra mais tracionada da seção tem a sua tensão superior à resistência do concreto à tração.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{Y_t t} \quad (2)$$

em que:

α = fator que correlaciona a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta e vale 1,2 para seções T ou duplo T, e 1,5 para seções retangulares;

f_{ct} = resistência do concreto à tração;

I_c = inércia bruta da seção, desprezando-se a existência da armadura;

Y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada.

O modelo de Ghali e Frave também tem sido utilizado por pesquisadores, na determinação do diagrama momento x curvatura, com resultados condizentes com a prática e é apresentado a seguir:

$$M_r = \frac{f_{ct,m} I_I}{(h - x_I)} \quad (3)$$

$$\zeta = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{M_r}{M} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{1}{r_I} = \frac{M}{E_c I_I} \quad (5)$$

$$\frac{1}{r_{II}} = \frac{M}{E_{cs} I_{II}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{r_m} = (1 - \zeta) \cdot \frac{1}{r_I} + \zeta \cdot \frac{1}{r_{II}} \quad (7)$$

em que:

I_I e X_I são o momento de inércia e a posição da linha neutra, respectivamente, no Estádio I;

ζ = coeficiente ponderador dos estádios I e II;

M = momento fletor na seção crítica do vão considerado;

β_1 e β_2 são, respectivamente, coeficientes para se levar em conta as condições de aderência e o tipo do carregamento:

$\beta_1 = 1,0$ para barras de alta aderência;

$\beta_1 = 0,5$ para barras lisas;

$\beta_2 = 1,0$ para o primeiro carregamento, ou para cargas não-permanentes pouco repetitivas;

$\beta_2 = 0,5$ para cargas permanentes ou com grande número de ciclos.

$1/r_I$, $1/r_{II}$ e $1/r_m$ = curvaturas da seção referentes ao estádio I, ao estádio II e a um valor médio entre esses dois estádios, respectivamente.

A rigidez média ($EI)_m$ da Equação 7 faz o papel da rigidez equivalente dada por Branson.

Busca-se analisar neste trabalho o dimensionamento de elementos nervurados pré-moldados, em relação aos esforços últimos de flexão, segundo os critérios da NBR 6118 (ABNT, 2003).

Material e métodos

Confecção das vigas

Para confecção das vigas foram empregadas armaduras do tipo treliçadas conforme especificação NBR 14862 (ABNT, 2002c), disponíveis no comércio e concreto confeccionado no local (Figura 1). Foram moldadas quatro vigas, no Laboratório de Materiais e Tecnologia da

Construção da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Em duas das vigas, V1 e V2, concretou-se somente a base e, somente uma semana mais tarde, a parte superior, isso foi feito com a intenção de se simular uma condição de obra e verificar uma possível zona frágil na junta de concretagem, Figura 2. Para caracterização do concreto foram retirados seis corpos de prova para cada idade.



Figura 1. Moldagem das vigas.



Figura 2. Vigas V1 e V2.

A configuração final das vigas é apresentada na Figura 3.

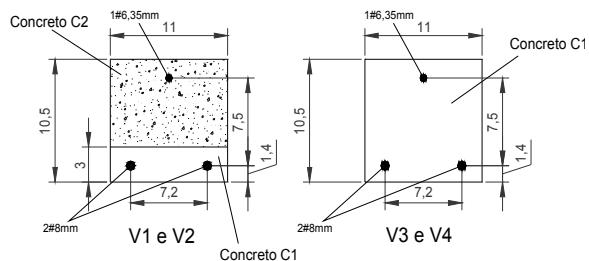


Figura 3. Seção transversal das vigas ensaiadas.

O módulo de deformação longitudinal do concreto foi obtido por meio da correlação apresentada pela NBR 6118 (ABNT, 2003):

$$E_a = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

As resistências à compressão e à tração do concreto foram obtidas por meio de ensaios de compressão normal e compressão diametral em corpos de prova cilíndricos 15 x 30 cm e a densidade foi determinada a partir desses mesmos corpos de prova.

Ensaio das vigas

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos com carregamento a uma distância de um terço do vão, conforme representado na Figura 4.

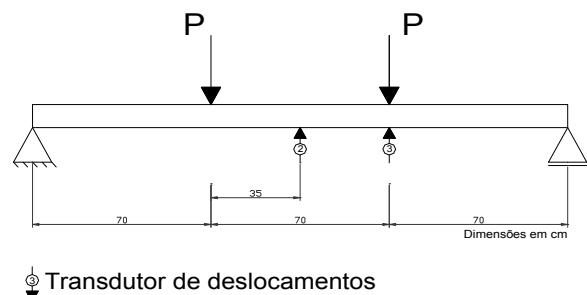


Figura 4. Esquema de ensaio.

Para aplicação de carga foram empregados cilindros hidráulicos e a medição dos deslocamentos foi realizada por meio do sistema de aquisição de dados e transdutores potenciométricos com precisão de 0,001 mm, a linha neutra inicial da seção foi tomada como referência dos deslocamentos conforme Figuras 5 e 6.



Figura 5. Ensaio das vigas.



Figura 6. Leitura da flecha.

Análise computacional

Com o propósito de se avaliar o comportamento dos elementos estruturais, foram adotados três modelos computacionais para simulação numérica das condições de ensaio, conforme ilustrado anteriormente na Figura 4. O primeiro trata-se de um modelo com barras aplicado no programa SAP 2000®, utilizando-se a metodologia de Branson, o segundo, um modelo com barras, aplicado no programa ANSYS®, utilizando-se a metodologia de Ghalli e Frave. E o terceiro um modelo tridimensional com sólidos, utilizando-se o programa ANSYS®.

Modelo 1 - Programa SAP 2000®

Para este modelo, utilizaram-se os elementos de barra do programa SAP 2000®, que possuem dois nós com seis graus de liberdade cada nó: translação e rotação nos três eixos.

Modelo 2 - Programa ANSYS®

Neste modelo foi utilizado o elemento *Beam188* da biblioteca do programa ANSYS®, elemento de barra similar ao utilizado no Modelo 1, com a vantagem de permitir que se atribua uma seção genérica à barra com as propriedades definidas por meio de relações carga axial x deformação específica ou momento-curvatura, (relações stress-strain). Neste caso, a solução do problema é não-linear.

Modelo 3 - Programa ANSYS®

Neste modelo foi empregado o elemento *Solid65* da biblioteca do programa ANSYS® que permite análises não-lineares de materiais com reforço estrutural, como o concreto. O elemento *Solid65* é um elemento sólido tridimensional, com oito nós e 3º de liberdade cada nó: translação nos três eixos.

Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta as características geométricas e parâmetros de cálculos, segundo referenciais da NBR

6118 (ABNT, 2003), empregados para análise em questão.

Tabela 1. Características construtivas e de cálculo das vigas ensaiadas.

| Vigas | V1 e V2 | V3 e V4 |
|---|-----------|-----------|
| F_{ck} (MPa) | 27,70 | 28,20 |
| Aço | CA-50 | CA-50 |
| b (cm) | 11,00 | 11,00 |
| h (cm) | 10,35 | 10,50 |
| d' (cm) | 1,60 | 1,60 |
| d'' (cm) | 1,40 | 1,40 |
| A_s (cm^2) | 1,00 | 1,00 |
| A_s' | 0,31 | 0,31 |
| M último (KN.m) | 4,00 | 4,10 |
| M_r (KN.m) | 0,89 | 0,89 |
| β_{x34} | 0,59 | 0,59 |
| β_x | 0,24 | 0,26 |
| E_c (MPa) | 29.473,24 | 29.738,06 |
| Inércia Estádio I (cm^4) | 1061,16 | 1061,16 |
| Inércia Estádio II (cm^4) | 307,52 | 305,56 |
| Inércia Branson (cm^4) | 315,34 | 313,41 |
| Curvatura Estádio I (cm^{-1}) | 0,000028 | 0,000028 |
| Curvatura Estádio II (cm^{-1}) | 0,000532 | 0,000531 |
| Coeficiente Ponderador de Ghalli e Frave □ | 0,95 | 0,96 |
| Curvatura Branson (cm^{-1}) | 0,000519 | 0,000518 |
| Curvatura das def. específicas (cm^{-1}) | 0,000647 | 0,000646 |

Modelo analítico

Para análise do Modelo 2 foram utilizadas as relações de momento de curvatura para os esforços últimos das vigas ensaiadas, para tanto, o comparativo entre as equações 1 e 4 é apresentado na Figura 7.

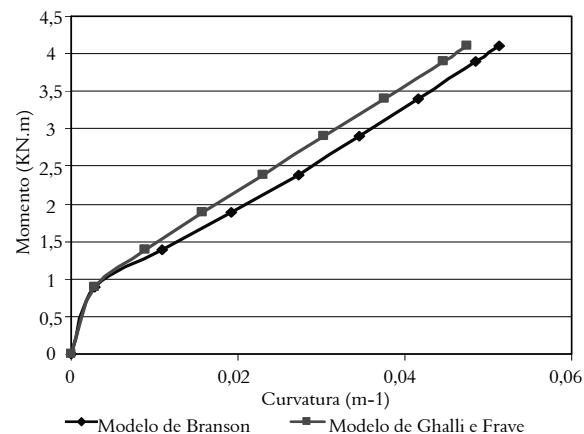


Figura 7. Relações momento-curvatura.

Nota-se uma pequena diferença entre os dois modelos, isso ocorre porque o coeficiente ponderador do modelo de Branson é dado pelo quociente, entre os momentos de fissuração e atuante, elevado à terceira potência, enquanto que no modelo de Ghalli e Frave este coeficiente é ao quadrado. Além disso, o modelo de Ghalli e Frave leva em conta a aderência e o tipo de carregamento, neste caso, os coeficientes β_1 e β_2 têm valor igual a 1,0.

Para efeitos de comparação, a Figura 8 ilustra a mesma relação anterior, porém considerando-se barras de baixa aderência, que corresponde ao valor de β_1 igual a 0,5.

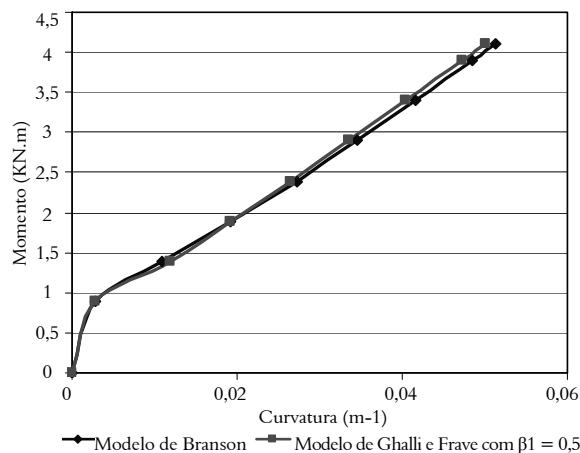


Figura 8. Relações momento-curvatura com $\beta_1=0,5$.

Análise experimental das vigas

Na Figura 9 são apresentados os resultados experimentais das quatro vigas ensaiadas.

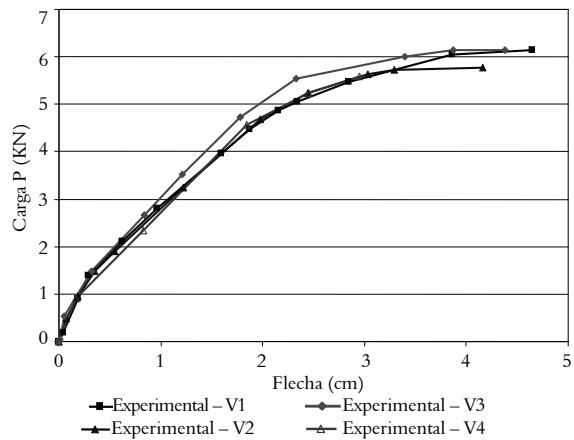


Figura 9. Ensaio experimental das vigas 1, 2, 3 e 4.

A Figura 9 demonstra que os comportamentos estruturais das vigas foram muito semelhantes, as pequenas variações podem ser atribuídas a diferenças geométricas causadas pelas formas. Nas vigas V3 e V4, a concretagem ocorreu em duas etapas e isso ocasionou retração diferenciada, tanto do concreto quanto das formas, em relação às vigas V1 e V2.

Nas Figuras 10 e 11, verifica-se que modos de ruptura das vigas foram semelhantes, e pela grande deformação em relação à altura da viga, houve redução da área comprimida e por consequente esmagamento do concreto no terço central das vigas.



Figura 10. Ruptura - V4.

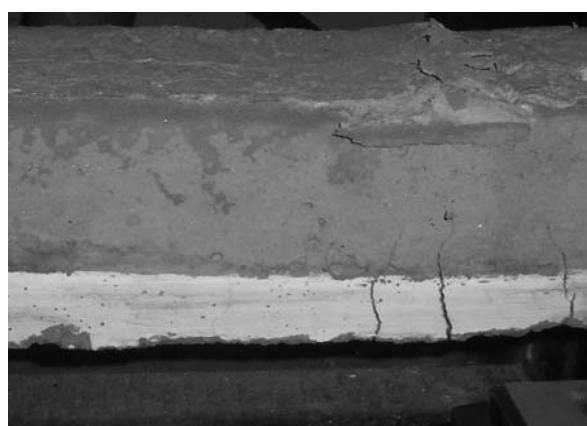


Figura 11. Ruptura - V1.

Na Figura 12, é apresentado o comparativo entre os três modelos teóricos estudados.

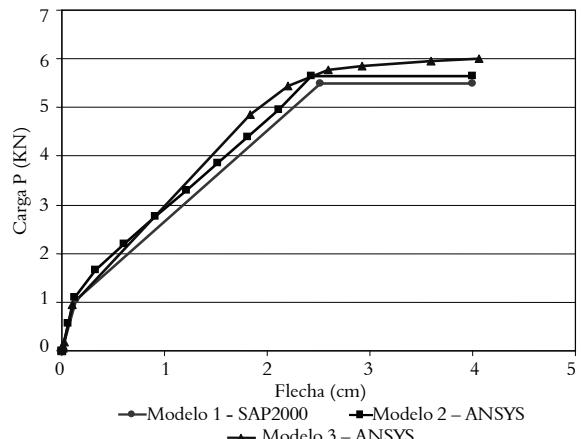


Figura 12. Modelos 1, 2 e 3 avaliados neste trabalho.

Entre os modelos estudados, observa-se que o modelo 3 foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais. Para melhor visualização desses resultados é apresentado na Figura 13 um comparativo do modelo 3 com os resultados experimentais das vigas 3 e 4.

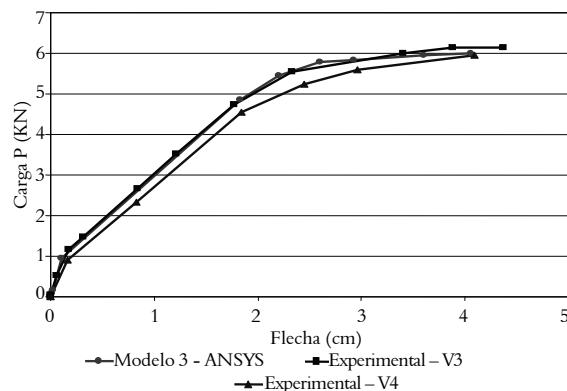


Figura 13. Comparativo do modelo 3 com as vigas V3 e V4.

Conclusão

A análise dos esforços últimos, segundo os critérios da NBR 6118 (ABNT, 2003), mostrou-se adequada ao dimensionamento de elementos nervurados pré-moldados, em relação aos esforços de flexão. Para as deformações, o modelo de Branson, proposto pela norma, mostrou-se adequado e com valores bem próximos dos experimentais.

Entre os modelos computacionais aqui apresentados, o modelo para o concreto disponível no Programa ANSYS apresentou-se como ótima alternativa para análises mais criteriosas. O programa oferece muitas aplicações para o elemento *Solid65*, que vão desde o concreto armado ao concreto protendido e reforçado com fibras. No entanto, as condições de contorno devem ser vistas com cuidado já que algumas são específicas para cada aplicação.

Com os parâmetros apresentados neste trabalho é possível o desenvolvimento de modelos em escala real

de lajes unidirecionais e bidirecionais, confeccionadas com nervuras pré-moldadas em concreto armado, permitindo a análise mais criteriosa dessas estruturas com avaliação dos efeitos de interação e redistribuição de esforços entre os diversos elementos que compõem o sistema estrutural.

Referências

- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14859-1:** laje pré-fabricada: requisitos – Parte 1: lajes unidirecionais. Rio de Janeiro, 2002a.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14859-2:** laje pré-fabricada: requisitos – Parte 2: lajes bidirecionais. Rio de Janeiro, 2002b.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14862:** armaduras treliçadas eletrossoldadas: Requisitos. Rio de Janeiro, 2002c.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- CARVALHO CHUST, A.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Concreto armado:** cálculo e detalhamento de estrutura. 2. ed. São Carlos: Eduscar, 2005.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado:** fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC-USP, 2000

Received on September 23, 2008.

Accepted on September 29, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.