

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

Marcelo R. S. Leite^a; José G. S. da Silva^b;
Maria E. da N. Tavares^b e Francisco J. da C. P. Soeiro^c

^a*Aluno de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, marcelloleite@yahoo.com.br*

^b*Departamento de Estruturas e Fundações, ESTR, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, jgss@uerj.br, etavares@uerj.br*

^c*Departamento de Engenharia Mecânica, MECAN, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, soeiro@uerj.br*

Palavras-chave: Lajes Nervuradas, Modelagem Computacional, Comportamento Estrutural.

Resumo. Este trabalho de pesquisa objetiva o estudo do comportamento estático e dinâmico de lajes nervuradas de concreto armado em regime de serviço. Ao longo desta investigação desenvolve-se um extenso estudo numérico, considerando-se variações sobre a geometria das vigas de bordo deste tipo de sistema estrutural. De forma a dar respaldo a presente análise, um modelo numérico-computacional é desenvolvido onde tanto a laje, as nervuras e as vigas de bordo dos modelos são simuladas por meio de elementos finitos de casca tridimensionais; e, desta forma, o comportamento gerado pela excentricidade entre os elementos estruturais (laje, nervuras e vigas de bordo) é obtido naturalmente. Para tal, são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS. Os resultados obtidos ao longo desta investigação são confrontados e comparados, objetivando avaliar a influência da flexibilidade dos apoios (efeito das vigas de bordo), sobre a resposta estática (deslocamentos e esforços) e dinâmica (frequências naturais e modos de vibração), deste tipo de sistema estrutural.

1 INTRODUÇÃO

No âmbito da construção civil, as lajes nervuradas de concreto armado vêm sendo escolhidas como opções cada vez mais difundidas, diante da necessidade de racionalização do espaço físico e, ainda, objetivando a minimização dos custos e prazos (Bocchi Júnior, 1995; De Paula, 2007; Dias, 2003). Recentemente, a partir de uma análise de custos ficou demonstrado que um pavimento em laje nervurada convencional (juntamente com vigas), utilizando caixotes de polipropileno foi o mais econômico dentre diversas alternativas estudadas, apresentando uma redução da ordem de 15% no custo total da estrutura Albuquerque apud (Almeida Filho et al., 2003).

Além do critério economia, outros que influenciam decisivamente para a escolha das lajes nervuradas como solução estrutural para pisos de edificações diz respeito à liberdade arquitetônica, pois permitem grandes vãos e, também, a simplificação na execução da obra, em termos de formas e escoramentos, quando aplicado em sistemas estruturais sem vigas (Rezende, 1990).

Apesar das vantagens acima apresentadas, como em qualquer outra escolha de sistema construtivo, alguns cuidados devem ser tomados para que as lajes nervuradas apresentem um comportamento adequado. Deste modo, este trabalho de pesquisa objetiva o estudo do comportamento estático e dinâmico de lajes nervuradas de concreto armado, a partir do desenvolvimento de modelos numérico-computacionais que simulem este comportamento da forma mais adequada possível, de acordo com a resposta de modelos estruturais reais.

Assim sendo, ao longo desta investigação desenvolve-se uma análise paramétrica, onde o objetivo central é o de verificar a influência da flexibilidade dos apoios (efeito das vigas de bordo), sobre a resposta estática (deslocamentos e esforços) e dinâmica (frequências naturais e modos de vibração) das lajes nervuradas de concreto armado.

Neste trabalho de pesquisa são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS (ANSYS, 2003). Os resultados obtidos ao longo desta investigação (deslocamentos, esforços, frequências naturais e modos de vibração) são confrontados e comparados, objetivando avaliar, qualitativamente e quantitativamente, o efeito da flexibilidade dos apoios, de forma a obter resultados numéricos mais próximos do comportamento real desse tipo de sistema estrutural.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL

O modelo estrutural investigado neste trabalho de pesquisa consiste de uma laje nervurada de concreto armado, quadrada, com 8,5 m x 8,5 m, simplesmente apoiada, submetida a um carregamento distribuído de 7,64 kN/m² (Polillo, 1977). Ao longo da análise numérica foi considerado um concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) aos 28 dias de 30 MPa, com módulo de elasticidade longitudinal secante (E_{cs}), igual a $2,61 \times 10^{10}$ N/m², coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2 e densidade (γ_c) de 25 kN/m³, em concordância com a norma brasileira (NBR 6118, 2003). As Figuras 1 e 2 ilustram as características geométricas do modelo estrutural correspondente à laje nervurada de concreto armado estudada.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Os modelos numéricos foram gerados usando técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS (ANSYS, 2003). Neste trabalho objetiva-se estudar a influência da rigidez dos apoios (efeitos das vigas de bordo) sobre o comportamento estrutural de lajes nervuradas de concreto armado. Ao longo da análise foi considerado um comportamento linear-elástico para o material concreto armado.

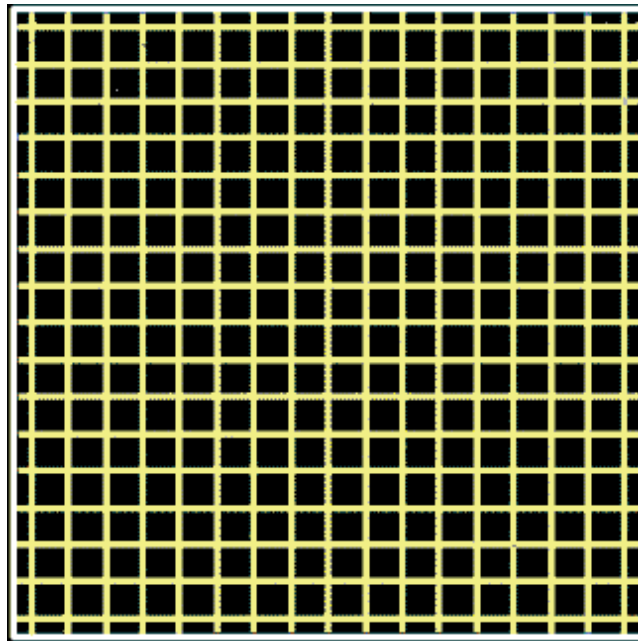


Figura 1: Modelo estrutural da laje nervurada investigada (Alto QI, 2002).

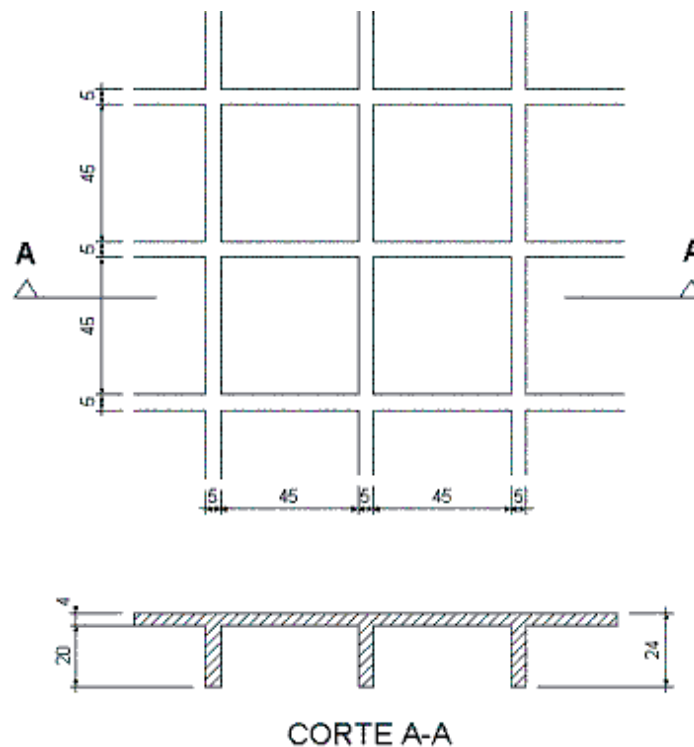


Figura 2: Detalhamento das nervuras e seção transversal (Alto QI, 2002).

Inicialmente, um modelo numérico-computacional bastante refinado é desenvolvido onde tanto a placa quanto as nervuras são simuladas por meio de elementos finitos de casca SHELL63 (ANSYS, 2003); e, desta forma, o comportamento gerado pela excentricidade entre os elementos estruturais (laje e nervuras) é obtido naturalmente. O modelo em elementos finitos gerado apresenta 718 nós, 936 elementos de casca e 4225 graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura 3, considerando as restrições de apoios nos extremos das nervuras.

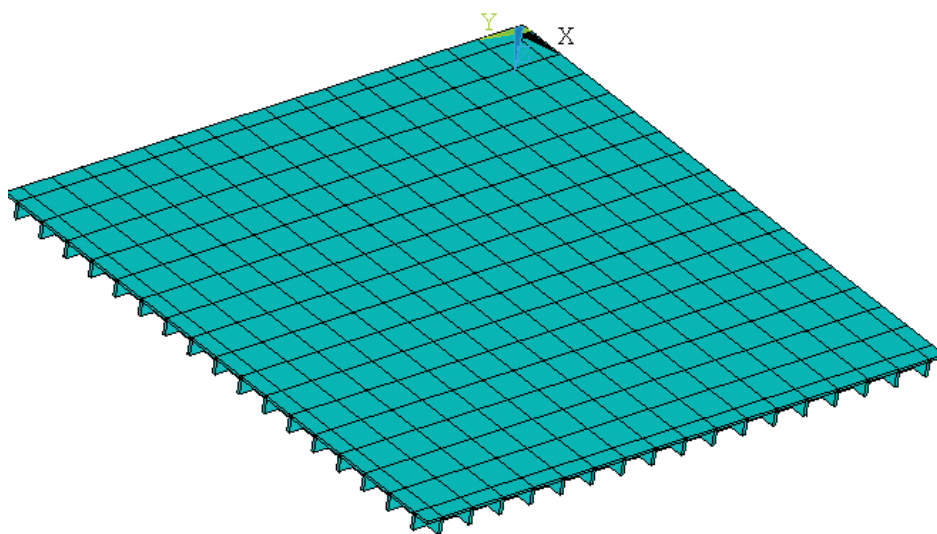


Figura 3: Modelo em elementos finitos: laje (casca) + nervuras (casca).

Na tentativa de estudar um modelo numérico que representasse o comportamento estrutural das lajes nervuradas de maneira mais realista foi considerada, em seguida, a influência da rigidez dos apoios (efeito das vigas de bordo), a partir da modelagem das vigas de bordo de concreto armado, com base na utilização de elementos de casca SHELL63 (ANSYS, 2003). Assim sendo, o modelo em elementos finitos desenvolvido apresenta 790 nós, 1008 elementos de casca e 4228 graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura 4.

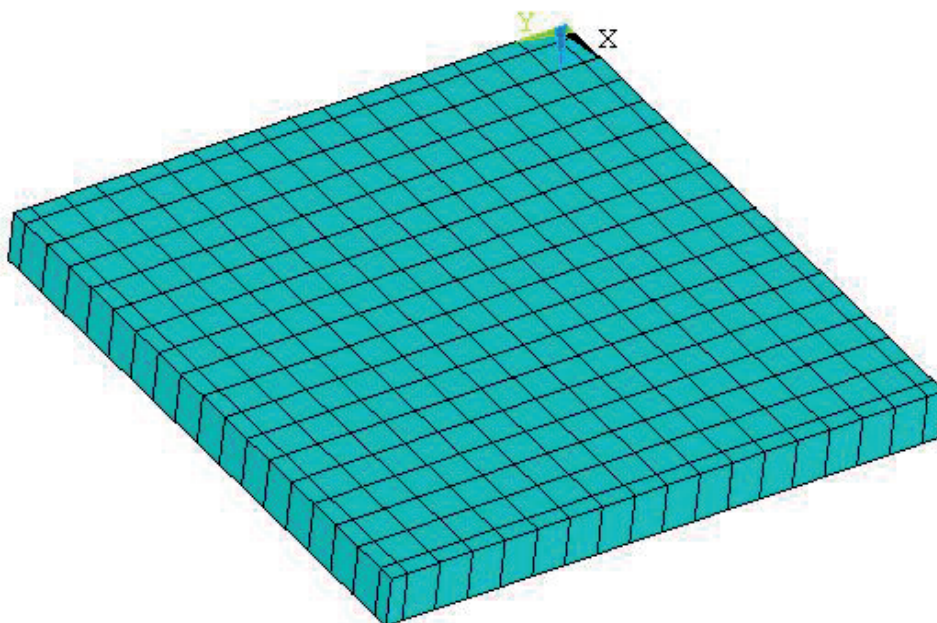


Figura 4: Modelo em elementos finitos: laje (casca) + nervuras (casca) com viga de bordo.

O elemento finito de casca SHELL 63 é definido por quatro nós apresentando seis graus de liberdade em cada nó: três translações e três rotações associadas aos eixos x , y , e z , como ilustrado na Figura 5.

No que diz respeito à análise da flexibilidade dos apoios foram adotadas vigas com dimensões de altura variando de cinco em cinco centímetros e base igual a 15 cm e 20 cm, respectivamente. A dimensão da altura mínima adotada foi de 50 cm e máxima de 100 cm.

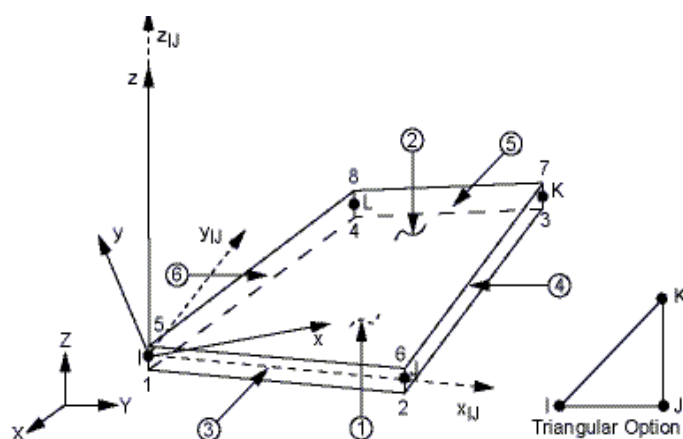


Figura 5: Elemento finito de casca SHELL63 (ANSYS, 2003).

4 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Neste item são descritas resumidamente as análises realizadas com base na utilização do programa ANSYS (ANSYS, 2003), objetivando testar a eficiência e a confiabilidade dos modelos numéricos propostos, no que diz respeito ao estudo de lajes nervuradas de concreto armado.

A validação dos modelos numéricos desenvolvidos, ilustrados nas Figuras 3 e 4, foram feitas comparando-se os valores máximos da resposta da estrutura, correspondentes aos deslocamentos translacionais verticais, momentos fletores e momentos torsões, obtidos de acordo com a presente metodologia de análise, em comparação com aqueles obtidos por outros autores (Alto QI, 2002), (Polillo, 1977). Ressalta-se que a comparação destes resultados revelou que os mesmos são absolutamente idênticos e, portanto, considerados satisfatórios.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo central deste trabalho de pesquisa é o de verificar a influência da flexibilidade dos apoios (efeito das vigas de bordo), sobre a resposta estática (deslocamentos e esforços) e dinâmica (frequências naturais e modos de vibração) das lajes nervuradas de concreto armado. Para tal emprega-se um modelo em elementos finitos onde a laje, nervuras e vigas de bordo são representadas por elementos de casca.

5.1 Análise de deslocamentos e esforços máximos

Na seqüência do estudo, a Figura 6 ilustra uma curva associada aos deslocamentos translacionais verticais, obtidos no centro da laje de concreto armado, em função da variação da altura das vigas de bordo dos modelos investigados. De acordo com o valor da flecha máxima estabelecida pela norma brasileira (NBR 6118, 2003), o deslocamento limite para elementos estruturais visíveis apresenta um valor de aceitabilidade máximo de $L/250$, onde L corresponde ao vão máximo considerado.

Assim sendo, para o vão de 8,5 m o deslocamento máximo admissível corresponde a 3,4 cm. Observa-se que todos os modelos estruturais investigados não apresentam problemas, no que tange aos valores das flechas máximas, Figura 6. Por outro lado, verifica-se que existe uma variação não-linear decrescente dos deslocamentos translacionais verticais, obtidos no centro da laje, na medida em que aumenta-se a rigidez das vigas de bordo, Figura 6.

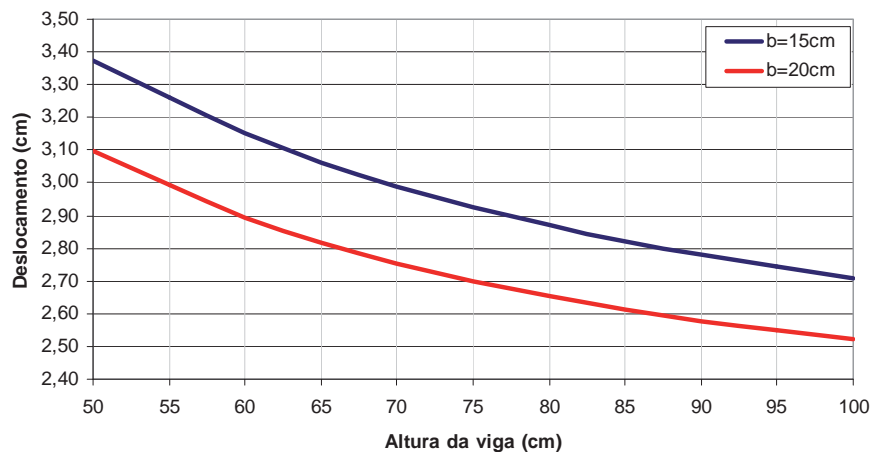


Figura 6: Variação do deslocamento translacional vertical em função da altura da viga de bordo.

As Figuras 7 e 8 ilustram as curvas dos momentos fletores e torsões máximas, respectivamente. Basicamente, observa-se uma variação não-linear dos valores máximos destes momentos (fletores e torsões), onde ocorre um decréscimo destes valores em relação à variação da altura da viga de bordo, devido a influência da rigidez dessas vigas sobre cada modelo numérico, a qual é modificada em função do aumento da altura da viga de bordo.

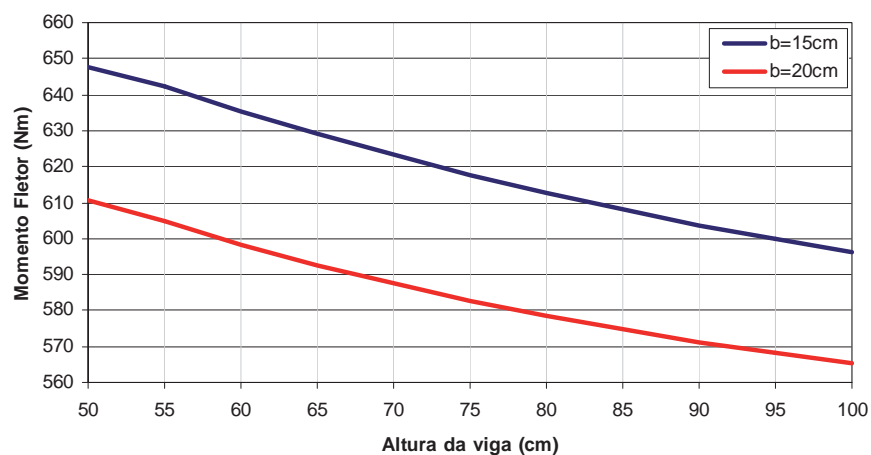


Figura 7: Variação do momento fletor em função da altura da viga de bordo.

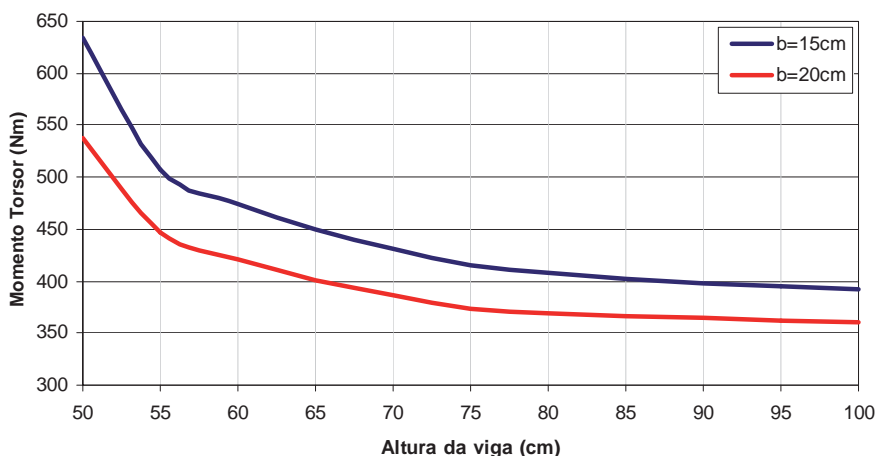


Figura 8: Variação do momento torsor em função da altura da viga de bordo.

5.2 Análise das frequências naturais e modos de vibração

Na seqüência do estudo, a Tabela 1 ilustra valores para frequências críticas (f_c), de acordo com a norma brasileira (NBR 6118, 2003), no que tange a alguns casos de sistemas estruturais submetidos a vibrações induzidas pela ação de pessoas. Em seguida, a Figura 9 apresenta as curvas das frequências naturais para cada modelo analisado neste trabalho de pesquisa.

Sistema Estrutural	f_c (Hz)
Ginásio de esportes	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4

Tabela 1: Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas (NBR 6118, 2003).

De acordo com a análise dos resultados ilustrados pela Figura 9, fica evidenciado que a partir do aumento da rigidez dos apoios das lajes nervuradas (efeito das vigas de bordo), os valores das frequências naturais tendem a crescer. Verifica-se, também, que alguns dos modelos estruturais investigados teriam limitações, no que tange a alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações induzidas pela ação dinâmica de pessoas, devido ao fato de que o valor da frequência fundamental destes modelos (f_{01}), para determinadas situações, é inferior ao valor da frequência crítica ($f_{01} < f_c$), recomendada pela norma brasileira (NBR 6118, 2003), conforme ilustrado na Tabela 1 e Figura 9.

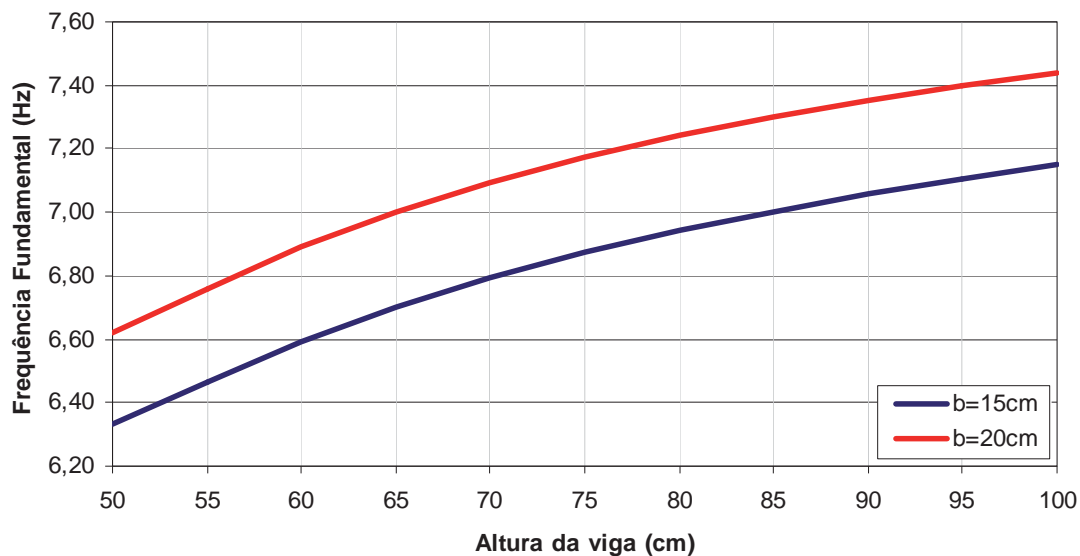
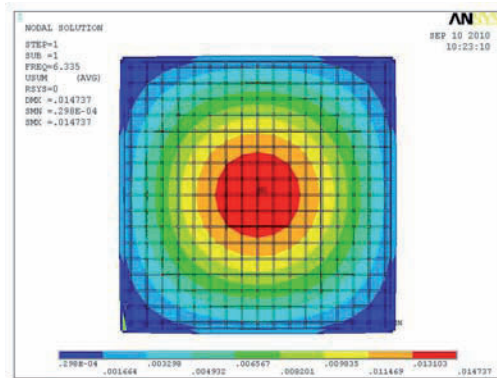
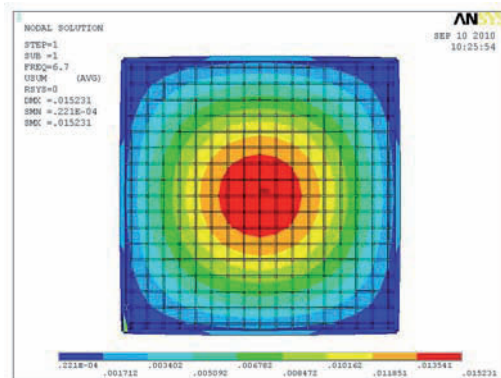


Figura 9: Curva das frequências naturais em função da altura da viga de bordo

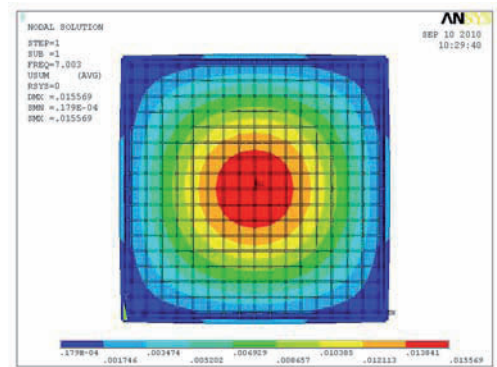
Na seqüência do estudo, as Figuras 10 e 11 ilustram os modos de vibração referentes a alguns dos modelos numérico-computacionais investigados neste estudo. Com referência ao modo fundamental de vibração dos modelos numérico analisados, percebe-se, claramente a predominância dos efeitos de flexão em todos os casos, sendo que o modo fundamental de vibração é bastante semelhante em todas as situações. Portanto, conclui-se que o efeito das vigas de bordo influencia diretamente nos valores das frequências naturais, mas não possui influência significativa, no que tange as formas modais dos modelos investigados ao longo deste trabalho de pesquisa.



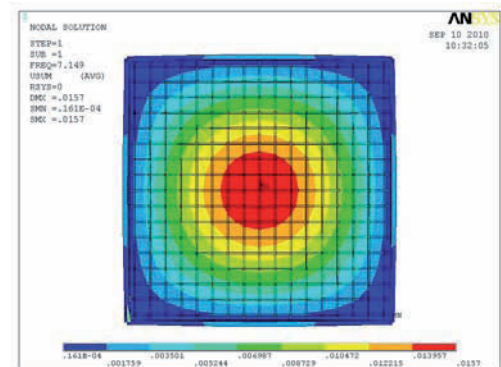
a) Modelo com viga de bordo (0,15 x 0,50)m.



b) Modelo com viga de bordo (0,15 x 0,65)m.

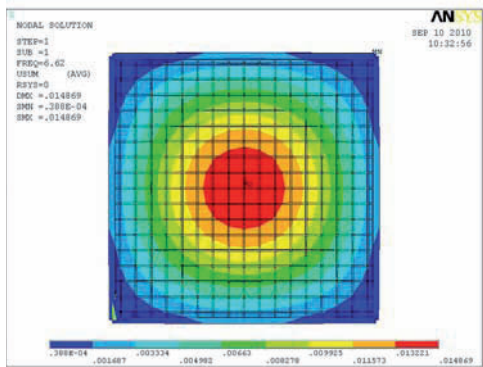


c) Modelo com viga de bordo (0,15 x 0,85)m.

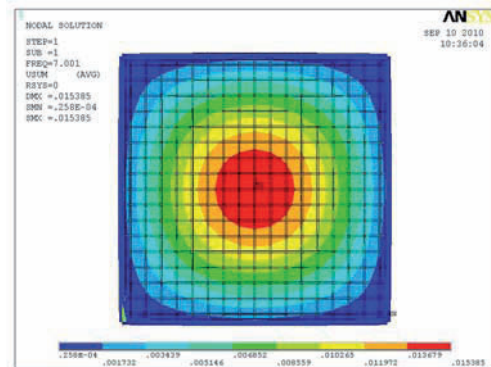


d) Modelo com viga de bordo (0,15 x 1,00)m.

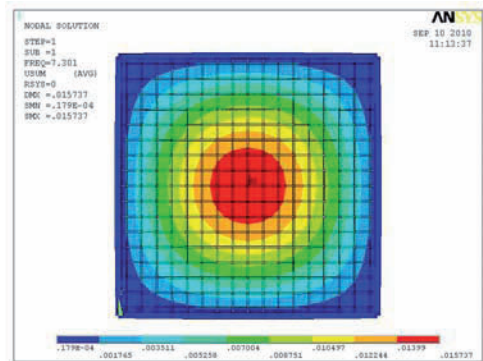
Figura 10: Modo fundamental de vibração. Vigas de bordo com base de 15 cm.



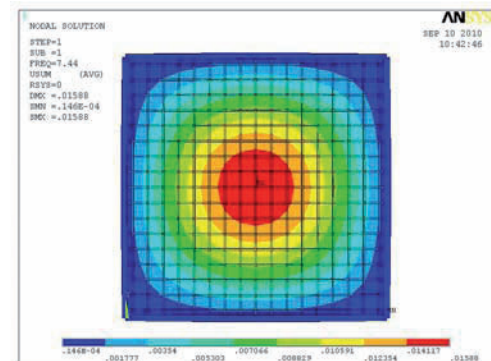
a) Modelo com viga de bordo (0,20 x 0,50)m.



b) Modelo com viga de bordo (0,20 x 0,65)m.



c) Modelo com viga de bordo (0,20 x 0,85)m.



d) Modelo com viga de bordo (0,20 x 1,00)m.

Figura 11: Modo fundamental de vibração. Vigas de bordo com base de 20 cm.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de pesquisa desenvolve-se uma extensa análise paramétrica, onde o objetivo central é o de verificar a influência da flexibilidade dos apoios (efeito das vigas de bordo), sobre a resposta estática (deslocamentos e esforços) e dinâmica (frequências naturais e modos de vibração) de sistemas estruturais associados a lajes nervuradas de concreto armado. Para tal, os modelos numéricos foram desenvolvidos com base no emprego de técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio da utilização do programa ANSYS (ANSYS, 2003).

Os resultados do presente estudo revelam que o efeito da flexibilidade dos apoios (efeito das vigas de bordo) é bastante significativo para a resposta estática e dinâmica das lajes nervuradas de concreto armado. Tal efeito é relevante para o cálculo dos deslocamentos e esforços (momentos fletores e torsões); e, bem como, para uma avaliação mais apropriada das frequências naturais da estrutura, objetivando evitar problemas de vibração excessiva e posterior desconforto humano. Por outro lado foi observado que a flexibilidade dos apoios não apresenta influência significativa sobre as formas modais das lajes nervuradas investigadas neste trabalho de pesquisa.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.M., Correa, M.R.S., Ramalho, M.A., Comparações de consumo e pavimentos de edifícios em concreto armado protendido com cordoalhas engraxadas. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003.
- Alto QI, Análise de lajes de concreto armado (Parte IX). Artigo 308: Análise de lajes nervuradas por analogia de grelha (<http://www.altoqi.com.br/index2.asp?browser=ff>), 2002.
- ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2003.
- Bocchi, C.F.J., Lajes nervuradas de concreto armado: projeto e execução. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- De Paula, C.W., Comportamento estrutural de lajes nervuradas de concreto armado com base no emprego do programa ANYSYS. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- Dias, R. H., Análise numérica de pavimentos de edifícios em lajes nervuradas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto Armado e Protendido - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2003.
- Polillo, A., *Dimensionamento de concreto Armado*. Volume II. Editora Científica. 3^o Edição, Rio de Janeiro, 1977.
- Resende, M.N., Análise de pavimentos de edifícios pelo método dos elementos finitos em microcomputador. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.