

Desenvolvimento e avaliação experimental de lajes nervuradas bidirecionais com mesas pré-fabricadas

Development and experimental evaluation of two-way waffle slabs with precast flange

**Agleilson Reis Borges¹, José Guilherme Silva Melo²,
Dênio Ramam Carvalho de Oliveira³**

¹*Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, PA
e-mail: agleilsonreis@hotmail.com*

²*Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, PA
e-mail: guilhermesmelo@gmail.com*

³*Prof. Dr., Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, PA
e-mail: denio@ufpa.br*

RESUMO: Visando contribuir para o aumento da qualidade na construção civil e para a utilização racional do concreto estrutural das lajes, foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA a tecnologia de laje nervurada com mesas pré-fabricadas que proporcionam um melhor acabamento da superfície das lajes. Para a análise experimental foram confeccionadas 4 lajes nervuradas bidirecionais de concreto armado com mesas pré-fabricadas com dimensões idênticas e iguais a 1.800 mm x 1.800 mm x 150 mm para os vãos e espessuras, respectivamente. As lajes foram apoiadas nas quatro bordas e submetidas a carregamentos verticais em quatro pontos simétricos. As nervuras foram espaçadas de 533 mm, suas seções transversais mediam 70 mm x 150 mm e a mesa pré-fabricada com dimensões de 473 mm x 473 mm x 40 mm. A principal variável foi a taxa geométrica de armadura longitudinal nas nervuras. São apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos para as cargas últimas, modos de ruptura, deformações da armadura de flexão, deformações no concreto e deslocamentos verticais.

ABSTRACT: Aiming to contribute to a better quality in the civil construction and for the rational use of structural concrete of slabs, it was developed at the Civil Engineering of UFPA the waffle slab with precast flange technology. Four two-way reinforced concrete waffle slabs with precast flanges were molded measuring 1,800 mm x 1,800 mm x 150 mm. All slabs were supported on four edges and loaded through four steel plates on their top surface. The ribs presented dimensions of 70 mm x 150 mm and were spaced of 533 mm while the precast flange measured 473 mm x 473 mm x 40 mm. The main variable was the geometrical rate of the flexural reinforcement in the ribs. Experimental results for failure loads and modes, steel and concrete strains and vertical displacements are presented and analyzed.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Sattler [1], atender às necessidades do presente sem comprometer as possibilidades de as futuras gerações atenderem às suas próprias necessidades é uma das definições mais abrangentes do conceito de sustentabilidade. Para ser sustentável, portanto, qualquer empreendimento humano deve ser ecologicamente correto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente aceito. Para não entrar na contramão desse movimento, é preciso

compreender a construção da sustentabilidade como um desafio essencial, já que significa estudar profundamente o planeta e a sociedade, para buscar alternativas viáveis e mudar uma cultura.

De acordo a Maracajá [2], a “perda por excesso”, do material concreto estrutural, aplicado em lajes de edificações, varia entre 5,10% e 10,23%, este excesso não gera entulho, pois é incorporado às lajes gerando acréscimo desnecessário de espessura e conseqüentemente aumentando o carregamento sobre os elementos de apoio (vigas, pilares e fundações). Inúmeras

medidas têm sido tomadas para tornar mais eficientes as técnicas construtivas, sendo as técnicas de pré-moldagem as que mais se destacam devido à maior racionalização no uso dos materiais. De acordo com Ordoñez [3] a pré-moldagem é caracterizada como um processo de construção em que a estrutura, ou alguns de seus elementos, é moldado fora de seu local de utilização definitivo, sendo posteriormente transportada e montada mediante o uso de equipamentos especiais.

As lajes nervuradas bidirecionais com mesas pré-fabricadas podem ser úteis ao processo de industrialização da construção. A utilização de mesas pré-fabricadas na confecção de lajes nervuradas permite melhorar a qualidade das estruturas de concreto armado, pois suas espessuras não sofrem variações significativas, melhorando o acabamento da superfície das lajes e na etapa de armação permitem o deslocamento dos operários sem prejudicar o posicionamento das armaduras e de outros elementos. As nervuras são moldadas “*in loco*” e as seções de concreto podem variar nas proximidades dos apoios de modo a aumentar a resistência das lajes ao cisalhamento e a quantidade de concreto moldado no local pode ser reduzida em até 30%. A NBR-6118 [4] define laje nervurada como as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. Com o objetivo de pesquisar o desempenho estrutural das lajes nervuradas bidirecionais com mesas pré-fabricadas, foram confeccionadas três lajes nesse sistema e uma laje nervurada convencional utilizada como referência. O dimensionamento e a execução das lajes com mesa pré-fabricadas e da laje de referência foram realizados conforme recomendações da NBR-6118 [4] para as lajes nervuradas de concreto armado.

2. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Por se tratar de uma nova tecnologia sem norma específica, seu dimensionamento foi efetuado a partir de critérios estabelecidos em norma para as lajes nervuradas. Segundo as prescrições normativas da NBR-6118 [4], as lajes nervuradas podem ser calculadas de acordo com modelos de lajes maciças ou vigas. A norma dispensa o uso de armadura transversal e verificação das nervuras ao cisalhamento desde que a distância entre os eixos

das nervuras não seja maior que 650 mm e sendo satisfeita a equação 1.

$$V_{Rd} \leq V_{Rd1} \quad (1)$$

Sendo que força cortante resistente de cálculo é dada pela equação 2.

$$V_{Rd1} = [v_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

onde,

$$v_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd};$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctm}}{\gamma_c};$$

$$\rho = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02;$$

k é o coeficiente que pode assumir os seguintes valores:

= 1, para elementos onde 50% da armadura inferior não chega ao apoio;

= 1,6 – d > 1, para os demais casos, com d em metros.

f_{ctd} é o valor da resistência à tração de cálculo do concreto;

A_{sl} é o valor da área da armadura de flexão;

b_w é o valor da largura mínima ao longo da altura útil d, em mm;

d é o valor da altura útil da seção, em mm.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Características das lajes

Foram ensaiadas 4 lajes, sendo uma laje de referência e 3 lajes com mesas pré-fabricada, todas com dimensões idênticas e iguais a (1.800 mm x 1.800 mm x 150 mm), e nervuras com (70 mm x 150 mm) e espaçadas de 533 mm e mesa (470 mm x 470 mm x 40 mm), como mostra a figura 1. Sendo que cada uma das lajes é composta por 9 mesas pré-fabricadas, exceto a laje de referência que é moldada em uma só fase. A figura 2 mostra as principais dimensões da seção transversal das lajes e os detalhes da ligação entre os elementos pré-moldados e a nervura moldada “*in loco*”, as barras da armadura das mesas pré-fabricadas foram dobradas para melhorar a ancoragem no concreto das nervuras.

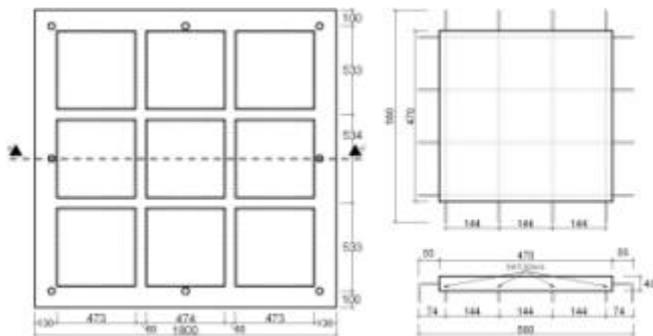


Figura 1: Laje e mesa pré-fabricada em planta



Figura 4: Armadura das lajes

3.2. Processo de Fabricação

3.2.1. Fabricação das placas (mesas pré-fabricadas)

O processo de fabricação das lajes nervuradas com mesas pré-fabricadas foi dividido em duas etapas. A primeira teve como objetivo principal a confecção das mesas pré-fabricadas utilizadas na confecção das lajes. Para isso, foram montadas formas que serviram de molde para os elementos pré-fabricados e paralelamente a fabricação das formas, foram produzidas as armaduras das placas. Com o término da montagem das formas e das armaduras das placas estas foram posicionadas nas formas para a concretagem. Após a concretagem as mesas curaram por 3 dias antes da desforma dos elementos pré-fabricados, finalizando assim a primeira etapa do processo, como mostra a figura 5.



Figura 5: Processo de fabricação das mesas

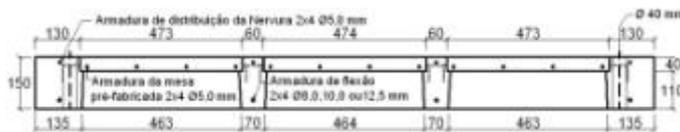


Figura 2: Seção transversal das lajes

As mesas pré-fabricadas apresentaram armadura de distribuição composta por 8 barras de aço CA 60 $\varnothing 5,0$ mm, 4 em cada direção, como mostra a figura 3. Na mesa da laje de referência foi colocada uma malha de armadura de distribuição composta de aço CA 60 de $\varnothing 5,0$ mm a cada 150 mm. Nas lajes com mesas pré-fabricada, na parte superior das nervuras, ao nível da mesa, foram posicionadas barras de aço CA 60 de $\varnothing 5,0$ mm, nas duas direções. A armadura de flexão das lajes foi composta de barras de aço CA 50 ($\varnothing 8,0$ mm, $\varnothing 10,0$ mm ou $\varnothing 12,5$ mm), posicionadas na parte inferior das nervuras, sendo uma barra por nervura. As nervuras não apresentaram armadura de cisalhamento. A figura 4 mostra o posicionamento das armaduras das lajes e a tabela 1 apresenta as características das armaduras das lajes.

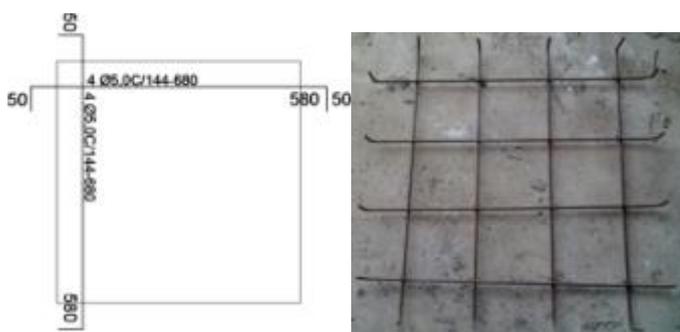


Figura 3: Armadura de distribuição da mesa pré-fabricada

Tabela 1 - Características das armaduras das lajes

| Laje | Armadura de flexão | | d (mm) | ρ (%) |
|---------|---------------------------|-----------------------|--------|------------|
| | Nº. de barras | As (mm ²) | | |
| LMP REF | 2x4 $\varnothing 10,0$ mm | 80,0 | 130,0 | 0,9 |
| LMP 1 | 2x4 $\varnothing 8,0$ mm | 50,0 | 129,0 | 0,5 |
| LMP 2 | 2x4 $\varnothing 10,0$ mm | 80,0 | 130,0 | 0,9 |
| LMP 3 | 2x4 $\varnothing 12,5$ mm | 125,0 | 131,2 | 1,4 |

3.2.2. Confecção das lajes

A segunda etapa teve como objetivo principal a confecção das lajes nervuradas com mesas pré-fabricadas. Primeiramente os blocos de EPS (isopor) foram posicionados em substituição a forma metálica que serviria de suporte das mesas pré-fabricadas. Em seguida foram posicionadas as

armaduras (de flexão e de distribuição) das lajes e os elementos pré-fabricados foram dispostos sobre os blocos de EPS. Após esta fase houve a concretagem das nervuras. Mais detalhes são mostrados nas figuras 6, 7 e 8.

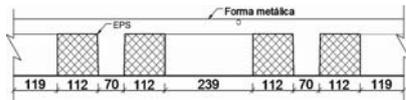


Figura 6: Posicionamento dos blocos de EPS

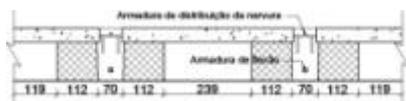


Figura 7: Montagem das mesas pré-fabricadas

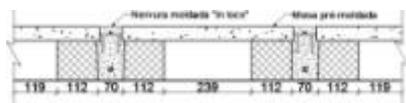


Figura 8: Concretagem das lajes

3.3. Instrumentação e sistema de ensaio

Os deslocamentos verticais (flechas) foram medidos através de 5 deflectômetros analógicos, com leitura máxima de 50 mm e precisão de 0,01 mm, posicionados no centro das lajes e distribuídos nas duas direções (x e y), em contato com a superfície superior das mesmas apoiados em um pórtico independente do sistema de aplicação de carga. Para medir as deformações no aço e no

concreto das lajes (mesas pré-fabricadas e nervuras moldadas “*in loco*”), foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EERs) da marca EXCEL, sendo que para cada laje foram utilizados três extensômetros, um na barra da armadura de flexão (EA), sendo fixado à meia altura da barra, no centro do vão da nervura, um na mesa (EM), posicionado a uma distância de 70 mm do eixo da nervura, onde foi locado o terceiro EER (EN). As leituras foram realizadas a cada passo de carga. A figura 9 mostra o posicionamento dos deflectômetros e extensômetros utilizados para o monitoramento das lajes.

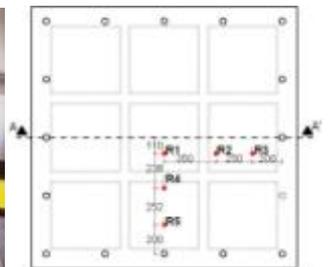
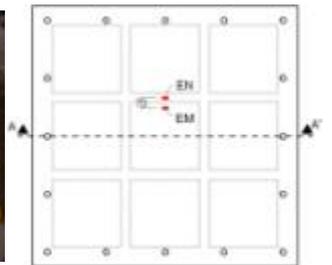


Figura 9: Posição dos deflectômetros e extensômetros

O sistema de ensaio consistiu de lajes apoiadas em todas as bordas através de 4 vigas metálicas de reação, simulando apoios contínuos. A carga foi aplicada através de um cilindro hidráulico com capacidade para 1.000 kN, acionado por uma bomba hidráulica cuja intensidade da força era medida em uma célula de igual capacidade, acoplada ao cilindro hidráulico. O carregamento aplicado às lajes ensaiadas foi transmitido para a laje de reação do laboratório através de 8 tirantes de aço com diâmetro de 29 mm. Finalizando o processo de montagem do sistema, foi aplicado o carregamento no sentido de cima para baixo, adotando-se um incremento de carga de

aproximadamente 5 kN. Para cada incremento de carga foram medidos os deslocamentos verticais através dos 5 deflectômetros, e as leituras das deformações nas armaduras e no concreto foram realizadas com o auxílio do sistema de aquisição de dados *Spider 8*. Os detalhes do sistema de ensaio são mostrados na figura 10.

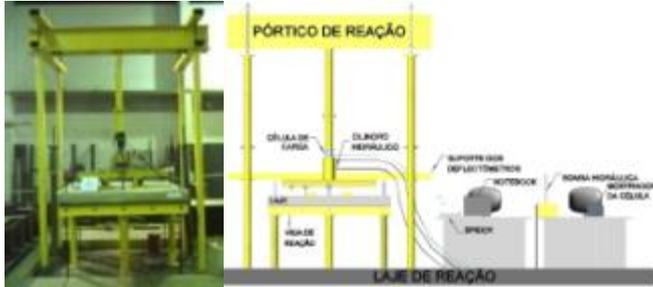


Figura 10: Detalhe do sistema de ensaio

4. RESULTADOS

4.1. Materiais (concreto e aço)

As características dos aços utilizados nesta pesquisa foram obtidas a partir de ensaios de tração em corpos-de-prova retirados aleatoriamente dos lotes de barras de aço, obedecendo aos critérios recomendados em norma NBR-6152 [5]. Estes resultados são apresentados na tabela 2. As propriedades mecânicas do concreto foram determinadas a partir de corpos-de-prova moldados durante as concretagens tanto do concreto utilizado na mesa pré-fabricada (CPn-M) quanto no utilizado na confecção das nervuras (CPn-N). Os ensaios de resistência à compressão, e módulo de elasticidade longitudinal foram realizados de acordo com as normas NBR-5739 [6] e NBR-8522 [7] e os resultados são apresentados na tabela 3.

Tabela 2 - Características do aço utilizado

| Ø (mm) | Área (mm ²) | P _{y,s} (kN) | f _{y,s} (MPa) | ε _{y,s} (%) | f _u (MPa) | E _s (GPa) |
|--------|-------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 5,00 | 20,0 | 13,7 | 548,0 | 4,1 | 685,0 | 133,7 |
| 8,00 | 50,0 | 29,5 | 545,0 | 1,9 | 590,0 | 286,8 |
| 10,00 | 80,0 | 58,1 | 579,2 | 2,2 | 726,2 | 256,0 |
| 12,50 | 125,0 | 87,2 | 560,3 | 2,3 | 697,6 | 243,5 |

Tabela 3 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal

| Corpo-de-prova | Área (mm ²) | f _c (MPa) | E _c (GPa) | f _{c,m} (MPa) | E _{c,m} (GPa) |
|----------------|-------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| CP 1-M | 17671 | 42,1 | 26,7 | | |
| CP 2-M | 17671 | 41,6 | 24,8 | 43,0 | 25,6 |
| CP 3-M | 17671 | 45,0 | 25,3 | | |
| CP 1-N | 7854 | 32,1 | 27,0 | | |
| CP 2-N | 7854 | 33,8 | 24,1 | 33,0 | 26,1 |
| CP 3-N | 7854 | 34,0 | 27,2 | | |

4.2. Deslocamentos e fissuração

Não foram observadas diferenças significativas entre os deslocamentos da laje de referência (LMP REF) e os da laje com mesa pré-moldada LMP 2, que tinha a mesma taxa geométrica de armadura de flexão. As fissuras de flexão nas lajes LMP 1, LMP 3 e na laje de referência apareceram com carregamento em torno de 13% dos valores das cargas de ruptura e na laje LMP 2 apareceram com 28% deste valor. As fissuras de cisalhamento, como esperado, surgiram com carregamentos próximos aos de ruptura. A figura 11 mostra o gráfico dos deslocamentos observados no centro das lajes e os carregamentos relativos às primeiras fissuras, e a figura 12 mostra detalhes do padrão de fissuração das lajes

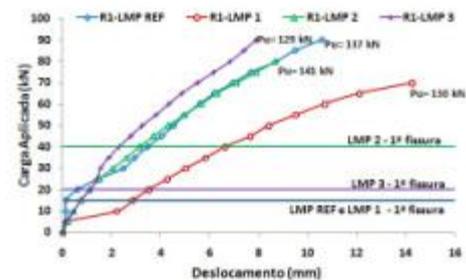


Figura 11: Deslocamentos verticais no centro das lajes



Figura 12: Fissuração característica após a ruptura

4.3. Deformações no aço e no concreto

As deformações nas armaduras de flexão foram compatíveis com o carregamento aplicado. As armaduras das lajes LMP 1, LMP 2 e LMP REF entraram em escoamento. A armadura da laje LMP 3 apresentou deformações significativas, mas permaneceu na zona elástica. A figura 13 mostra as deformações nas armaduras das lajes e o valor da deformação no escoamento para as lajes LMP

REF e LMP 1 (1,9 ‰), LMP 2 (2,2 ‰) LMP 3 (2,3 ‰). As deformações do concreto na superfície das lajes foram baixas, devido à seção transversal das mesmas serem subarmadas. Nas lajes com mesas pré-fabricadas, o concreto das mesas e o das nervuras apresentaram deformações relativamente próximas, não indicando deslizamento entre as nervuras e as mesas pré-fabricadas. As figuras 14 e 15 mostram uma comparação entre as deformações observadas nas nervuras e nas mesas, respectivamente, para todas as lajes ensaiadas.

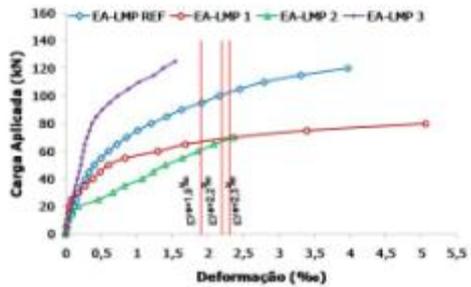


Figura 13: Deformações da armadura de flexão

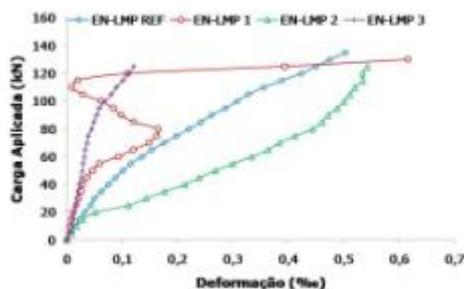


Figura 14: Deformações nas nervuras das lajes

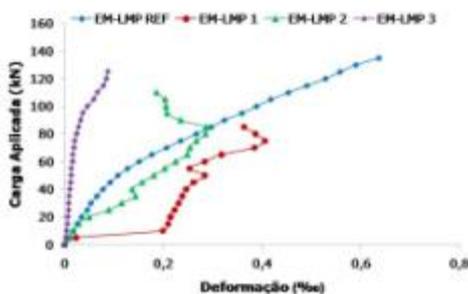


Figura 15: Deformações nas mesas das lajes

4.4. Cargas e modos de ruptura

As cargas de ruptura das lajes foram superiores às cargas estimadas pela NBR-6118 [4]. A laje LMP 1 rompeu por flexão com deformação excessiva na armadura. As armaduras de flexão das lajes LMP 2 e LMP REF entraram em escoamento, mas as lajes romperam por cisalhamento das nervuras. A laje LMP 3 rompeu por cisalhamento e sua armadura de flexão não entrou em escoamento. A tabela 4 apresenta as

resistências estimadas à flexão prevista (P_{flex}), e ao cisalhamento (P_{cis}), as resistências adotadas (P), os carregamentos experimentais para escoamento das armaduras (P_{ys}) e os carregamentos de ruptura (P_u).

Tabela 4 - Cargas últimas observadas

| Laje | P_{flex} (kN) | P_{cis} (kN) | P (kN) | P_{ys} (kN) | P_u (kN) | P_{ys}/P | P_u/P_{ys} |
|---------|-----------------|----------------|----------|---------------|------------|------------|--------------|
| LMP-REF | 89,6 | 67,2 | 67,2 | 103,0 | 137,0 | 1,5 | 1,3 |
| LMP 1 | 51,2 | 66,4 | 51,2 | 65,0 | 130,0 | 1,3 | 2,0 |
| LMP 2 | 89,6 | 67,2 | 67,2 | 69,0 | 141,0 | 1,1 | 2,0 |
| LMP 3 | 135,2 | 68,0 | 68,0 | - | 129,0 | 2,3 | - |

5. CONCLUSÕES

As lajes apresentaram comportamentos satisfatórios e desempenho estrutural compatível com as prescrições normativas. O sistema apresentou praticidade e rapidez na execução. Foi observado nos ensaios que as mesas pré-fabricadas trabalharam solidariamente com as nervuras, não sendo verificadas evidências de separação entre as placas e as nervuras. A comparação dos resultados experimentais da laje LMP 2 com os da laje LMP REF, que apresentaram taxas geométricas de armadura semelhantes, não revelou qualquer incompatibilidade entre o comportamento à flexão da laje nervurada bidirecional com mesas pré-fabricadas e a laje nervurada convencional, submetidas ao sistema de carregamento adotado.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES e à empresa SAENGE pelo apoio financeiro a esta e outras pesquisas desta natureza realizadas na Região Norte do Brasil.

REFERÊNCIAS

- Sattler, M. - *Sustentabilidade: a construção fazendo a sua parte*. Conselho em revista. No. 33, p.15, Rio Grande do Sul, Maio, 2007.
- Maracajá, E. I. G. *Estudo das perdas do concreto estrutural aplicado em lajes de edificações: Resultados de Pesquisa (UFPB)*. p.5, João Pessoa, 2000.
- Ordóñez, J. A. F., ed al. *Prefabricación: teoría y práctica*, 2v. Barcelona, 1974.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado (NBR-6118)*. Rio de Janeiro, 2003.

5. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Materiais metálicos. Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração – Método de Ensaio (NBR-6152)*. Rio de Janeiro, 1992.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto (NBR-5739)*. Rio de Janeiro, 1994.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de Ensaio (NBR-8522)*. Rio de Janeiro, 1984.