

Two-way ribbed flat slabs with shafts

Lajes lisas nervuradas bidirecionais com furos



G. M. MATEUS^a
gustavomateus.ac@bol.com.br

A. J. AGUIAR^a
ajdeaguiar@gmail.com

M. P. FERREIRA^a
mpinaf@ufpa.br

D. R. C. OLIVEIRA^a
denio@ufpa.br

Abstract

The position of pipes and hoses for several installations still deserves special attention from designers mainly when the failure mode can be modified due to changes in behavior. This work compares experimental results of six two-way reinforced concrete ribbed flat slabs with rectangular holes close to the column and without shear reinforcement with the estimates obtained from codes ACI 318 and NBR 6118 equations. All slabs were casted and tested in the Civil Engineering Laboratory of UFPA and had dimensions of 1.800 mm x 1.800 mm x 150 mm and were submitted to central loading applied through 120 mm side square steel plates simulating the columns. EPS was used as inert material and the ribs were spaced 250 mm with 130 mm height and 75 mm average wide. The results showed that the codes' shear equations estimates agree when the ribs are considered as beam and also for punching shear, but trend to be safer when the slabs present two shafts.

Keywords: flat slab, ribbed slab, shaft, holes, shear, punching.

Resumo

A passagem de tubulações em elementos estruturais ainda merece atenção especial dos projetistas, principalmente quando o modo de ruptura dos mesmos pode ser alterado devido às mudanças em seus comportamentos. Este trabalho compara os resultados experimentais obtidos para 06 (seis) lajes lisas nervuradas bidirecionais em concreto armado, com furos retangulares adjacentes aos pilares e sem armadura de cisalhamento, com as estimativas das formulações dadas pelas normas ACI 318 e NBR 6118. As lajes foram moldadas e ensaiadas no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA e apresentaram dimensões de 1.800 mm x 1.800 mm x 150 mm, sendo submetidas a carregamento central em placas quadradas que simularam pilares com 120 mm de lado. O material inerte entre as nervuras foi o EPS e o espaçamento entre as mesmas foi de 250 mm, com largura média de 75 mm e altura 130 mm. Os resultados mostraram que as normas convergem em suas estimativas de resistência ao cisalhamento, quando as nervuras são tratadas isoladamente como vigas, e também ao punçionamento, mas neste caso tendem a ser conservadoras quando as lajes apresentam dois furos.

Palavras-chave: laje lisa, laje nervurada, punçionamento, furo, cisalhamento.

^a Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

1. Introdução

Diante da crescente utilização de lajes lisas nervuradas pelos projetistas estruturais, importantes questões têm sido levantadas considerando o comportamento deste sistema estrutural em serviço como, por exemplo, em situações que haja furo na laje adjacente a um pilar. Como neste tipo de ligação a laje é apoiada diretamente sobre pilares, as tensões de cisalhamento tendem a se concentrar em torno da ligação laje-pilar e a reduzir a capacidade resistente da laje, que é penalizada pela presença de furos. Segundo SOUZA e CUNHA (1998) [1], se estas peças virem a sofrer uma falha na capacidade resistente pode-se ter o colapso total da edificação, pois a ruptura por punção geralmente não apresenta aviso prévio, sendo uma ruptura frágil. Este fator é agravado quando são utilizadas normas para projeto que notoriamente superestimam a resistência ao punção e tende a piorar quando o pilar retangular apresenta grandes relações entre seus lados. Um exemplo deste tipo de ruptura, com lajes lisas apresentando furos adjacentes aos pilares, pode ter sido responsável pelo acidente ocorrido em julho de 2013 durante a construção do Shopping Rio Poty, em Teresina, onde aproximadamente 50% da estrutura desabou como provável consequência do colapso progressivo horizontal e vertical. Assim, o objetivo do trabalho é avaliar experimentalmente e analiticamente o comportamento de 6 (seis) lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto armado, sendo 1 (uma) de referência e 5 (cinco) com furos adjacentes ao pilar. Os resultados foram comparados às estimativas normativas da ACI 318 (ACI, 2008) [2] e NBR 6118 (ABNT, 2007) [3]. As lajes não apresentaram armadura de cisalhamento nas nervuras nem armaduras de punção, ou seja, a resistência ao cisalhamento foi determinada levando-se em consideração apenas a resistência característica do concreto e a influência da armadura de flexão.

2. Prescrições normativas

As normas consultadas para este trabalho, em geral, tratam os furos nas lajes da mesma forma, diferindo apenas na forma e afastamento do perímetro crítico. Os critérios para interrupção dos perímetros críticos na região do furo são iguais na ACI 318 e na NBR 6118, de forma que do centro de gravidade da seção do pilar são traçadas retas em direção aos vértices do furo, e estas retas interrompem o perímetro crítico. Já a distância da face do pilar onde o perímetro de controle é posicionado corresponde a $0,5d$ na NBR

6118, enquanto que a ACI posiciona seu perímetro de controle a $2d$ da face do pilar, onde h é a altura útil da laje. A Figura 1 mostra os perímetros críticos ou de controle e o tratamento dados aos furos de acordo com a ACI 318 e a NBR 6118, respectivamente. E a resistência característica ao punção pode ser estimada pela ACI e NBR 6118 usando as equações 1 e 2, respectivamente.

$$V_p = \frac{\sqrt{f_c}}{3} \cdot u \cdot d \quad (1)$$

$$V_p = 0,13 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u \cdot d \quad (2)$$

onde,

d é a altura útil da laje;

h é a espessura da laje;

f_c é a resistência à compressão do concreto;

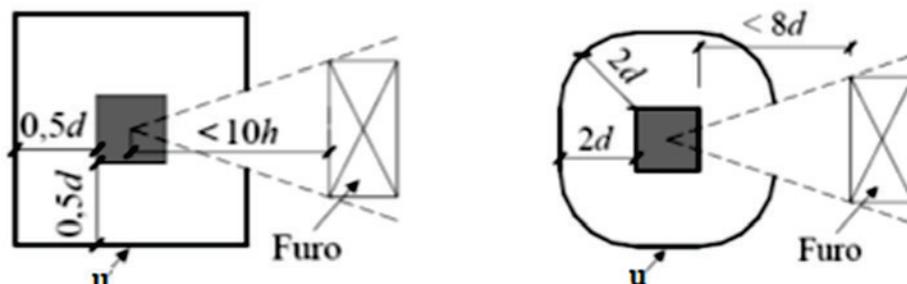
ρ é a taxa geométrica de armadura de flexão.

A consideração a ser feita na resistência característica ao cisalhamento das nervuras das lajes leva em conta duas situações. Na primeira delas as nervuras da laje comportam-se como vigas e devem ser analisadas como elementos de barras e, na segunda, supõe-se que o cisalhamento nas nervuras seja analisado como laje. A norma norte americana recomenda a Equação 1 para a primeira situação e 50% dos valores obtidos usando a Equação 1 para a segunda situação, substituindo apenas u por $u/2$ (largura da nervura). A norma brasileira apresenta as equações 3 e 4, respectivamente.

$$V = 0,18 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

$$V = \left[0,08 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \cdot \left(1,6 - \frac{d}{1000} \right) \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho) \right] b_w \cdot d \quad (4)$$

Figura 1 - Perímetro de controle segundo o ACI 318 e a NBR 6118 (direita)



A resistência à flexão foi estimada de acordo com a teoria das linhas de ruptura, ou charneiras plásticas, desenvolvida por JOHANSEN (1943) [4]. O procedimento consiste em determinar o momento fletor último com as Equações 5 e 6 a partir de uma configuração conhecida do caminhamento das charneiras plásticas, esta configuração foi a mesma utilizada por OLIVEIRA (2003) [5] e é mostrada na Figura 2. Já para a laje L4 a configuração das linhas de ruptura desenvolvidas por OLIVEIRA (2003) [5] não foi a mais adequada por fornecer valores elevados, além de não corresponder à configuração observada experimentalmente. Neste caso foi empregado o método para cálculo de vigas, sendo que o esquema estático adotado considerou o pilar como um carregamento concentrado no meio do vão de uma viga bi-engastada e com comprimento 240 mm.

$$m_u = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \rho \cdot \frac{f_{ys}}{f_c} \right) \quad (5)$$

$$P_f = \frac{2 \cdot m_{ux}}{a_x} \cdot [l_y - 2 \cdot e_y] + \frac{2 \cdot m_{uy}}{a_y} \cdot [l_x - 2 \cdot e_x] \quad (6)$$

3. Programa experimental

Foram ensaiadas no laboratório de engenharia civil da UFPA 6 (seis) lajes nervuradas de concreto armado com furos na região maciça em torno dos pilares. As lajes apresentaram dimensões de (1800 x 1800 x 150) mm³ e as principais variáveis nos ensaios foram o posicionamento e a geometria dos furos. Uma laje sem furos foi a referência (laje LR), como mostra a Figura 3, mas as demais apresentaram furos adjacentes aos pilares e com as dimensões apresentadas na Tabela 1. A Figura 4 mostra o posicionamento dos furos e o perímetro de controle das normas analisadas para cada situação. No número de barras das armaduras de flexão nem o espaçamento entre as mesmas sofreram variação. No entanto, a taxa de armadura de flexão das lajes () sofreu variação devido à altura útil que variou de 128 mm a 134 mm. As taxas geométricas da armadura de flexão ficaram entre 0,42% e 0,46%. O material inerte utilizado para substituir o volume de concreto sob a capa e entre as nervuras das lajes foi o EPS. As lajes foram submetidas a um carregamento central através de uma placa metálica simulando um pilar de (120 x 120 x 50) mm³, sendo empurrada de baixo para cima por um cilindro hidráulico com capacidade para 1000 kN, cujo sistema de ensaio está mostrado na Figura 5. Foram posicionadas vigas de reação sobre borrachas fretadas e a distância entre os eixos dos tirantes de reação foi de 1600 mm.

Figura 2 - Configuração das linhas de ruptura adotada

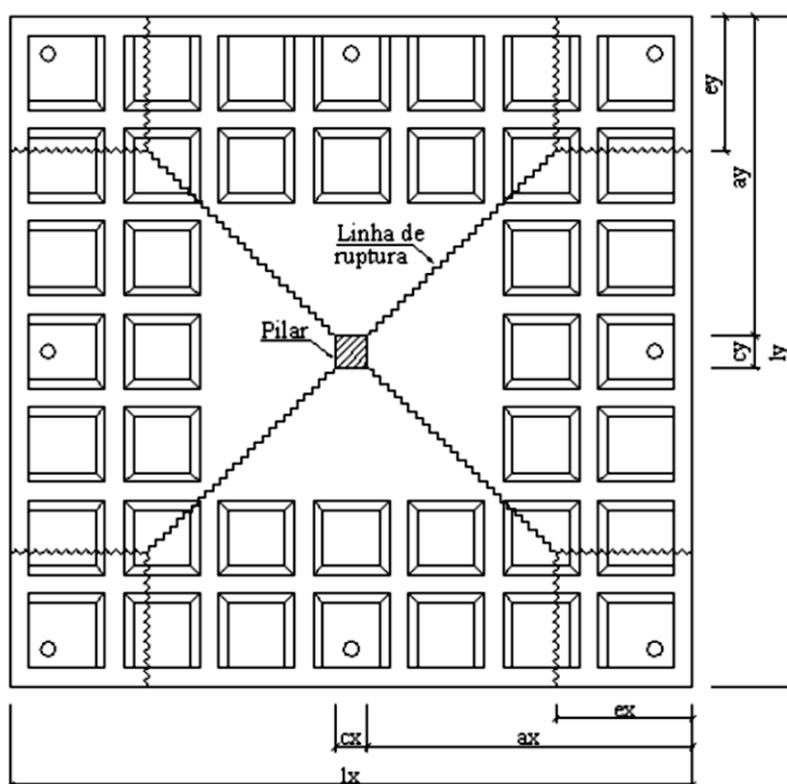
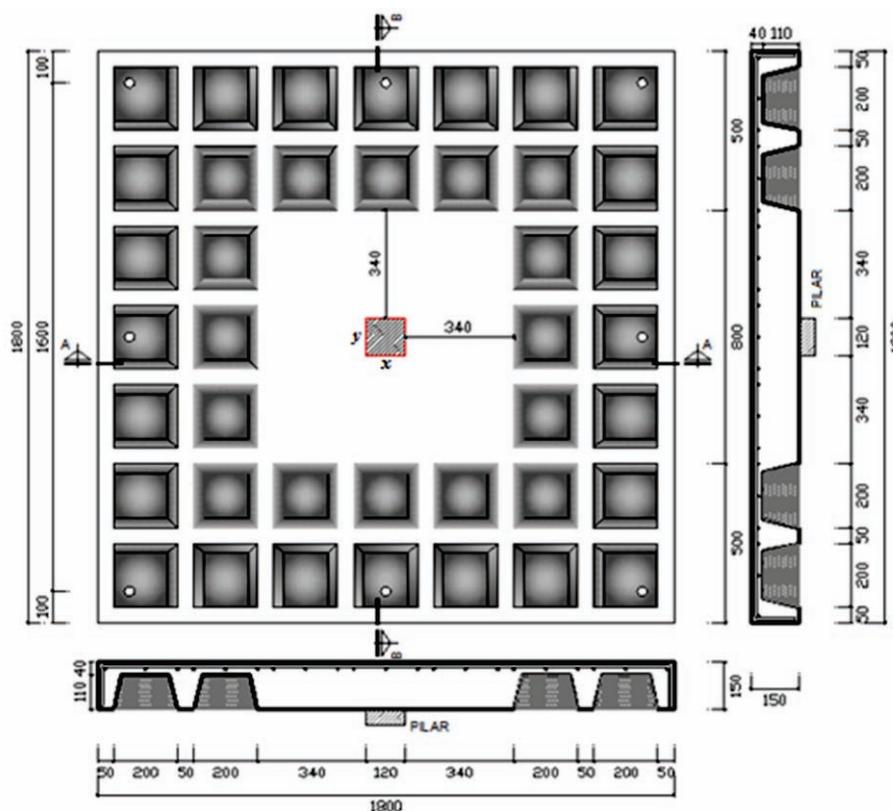


Figura 3 - Dimensões das lajes



As armaduras das lajes foram confeccionadas e posicionadas de forma ortogonal, próximo à face superior das lajes. O cobrimento de concreto utilizado foi de 10 mm e para melhorar as ancoragens foram confeccionados ganchos nas extremidades das barras da armadura de flexão quanto nas armaduras nos contornos dos furos. As Figuras 6 e 7 mostram o projeto de armação, a instrumentação das barras de aço e a instrumentação do concreto das lajes LR, L1, L2, L3, L4 e L5, respectivamente. Os extensômetros das barras foram posicionados tangencialmente ao pilar, enquanto que na superfície do concreto os mesmos fo-

ram dispostos tangencialmente e radialmente ao pilar. Todos os extensômetros foram da marca Excel. A Figura 8 mostra as armaduras posicionadas nas bordas dos furos, de acordo com as recomendações normativas brasileiras.

4. Resultados

4.1 Materiais (concreto e aço)

As propriedades mecânicas do concreto utilizado na confecção

Tabela 1 - Características das lajes

Laje	ρ (%)	d (mm)	f_c (MPa)	N° de furos	Dimensões dos furos (mm)	
					x	y
LR	0,46	128	43	–	–	–
L1	0,43	134	43	1	120	120
L2	0,42	132	43	2	120	120
L3	0,43	133	43	1	240	120
L4	0,43	134	43	2	240	120
L5	0,42	132	43	1	120	240

Figura 4 – Perímetros de controle normativos

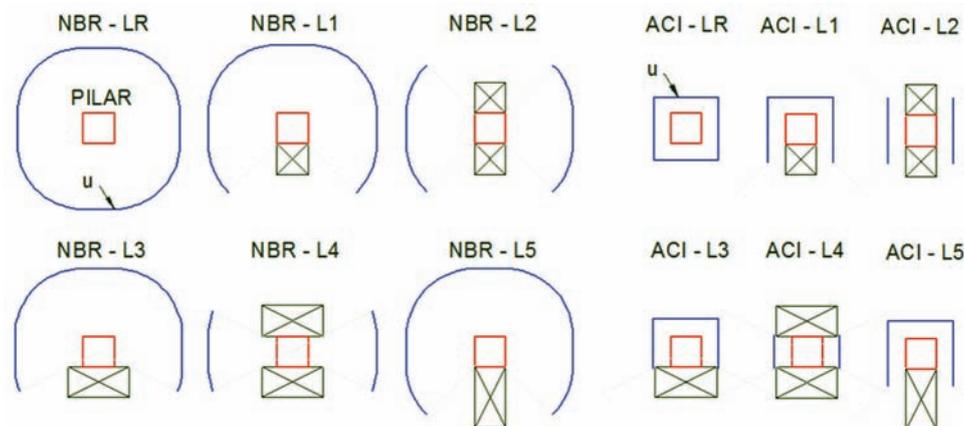
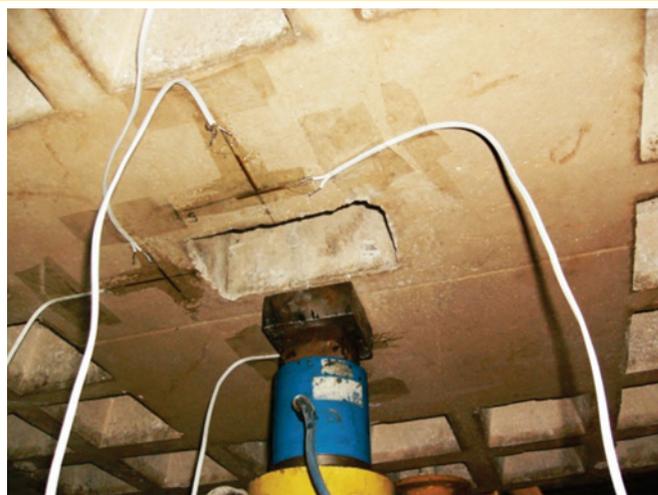


Figura 5 – Sistema de ensaio



das lajes foram obtidas experimentalmente no dia de cada ensaio, de acordo com as recomendações das normas NBR 5739 (ABNT, 2007) [6] e NBR 8522 (ABNT, 2008) [7] para a resistência à compressão axial, compressão diametral e módulo de elasticidade, cujos resultados médios para 3 corpos-de-prova foram de 43 MPa, 2,4 MPa e 25,6 GPa, respectivamente. Os ensaios para caracterização do aço basearam-se na NBR 6892 (ABNT, 2002) [8], e os resultados médios para 3 amostras de barras de aço de diâmetro 8,0 mm foram de 553 MPa para a tensão de escoamento, correspondendo a uma deformação de 1,95‰, e de 284 GPa para o módulo de elasticidade.

4.2 Carga última

A Tabela 2 apresenta as cargas de ruptura experimentais e as estimativas normativas. Todas as lajes ensaiadas ruíram por puncionamento com escoamento das barras das armaduras de flexão. A

resistência ao cisalhamento das nervuras não foi alcançada, discordando do modo de ruptura previsto pela ACI 318 tratando-as como laje. Neste caso, as razões entre as cargas experimentais e as cargas estimadas para rupturas por cisalhamento nas nervuras foram aproximadamente 1,4, exceto para a laje L4, 0,73. Apesar das normas analisadas concordarem em suas estimativas de resistência ao cisalhamento das nervuras sendo tratadas como vigas, há uma divergência significativa quando o tratamento é como laje, com norma brasileira ultrapassando em 67% (média) as estimativas da norma norte americana.

Para as estimativas da carga de puncionamento, exceto para a laje LR, todas as normas tenderam a subestimar os resultados, principalmente quando as lajes apresentavam dois furos ou apenas um furo com a maior dimensão superior à dimensão do lado do pilar, onde se tem as maiores reduções nos perímetros de controle, chegando a 72% (L4) para a ACI 318 e 50% (L2) para a NBR 6118 no caso de dois furos, e 21% para a ACI 318 e 12% para a

NBR 6118 no caso de um furo (L3). Quanto à resistência à flexão, as estimativas para as lajes LR, L1, L2, L3 e L5 foram superiores aos carregamentos últimos experimentais em 25% (média), mas esta estimativa foi satisfatória para a laje L4. A discordância entre as cargas estimadas e observadas pode estar relacionada ao fato da fissuração por flexão favorecer a ruptura por punção (cisalhamento) antes que a configuração completa da linha de ruptura se configure, ou mesmo pela imprecisão da configuração adotada.

4.3 Fissuração

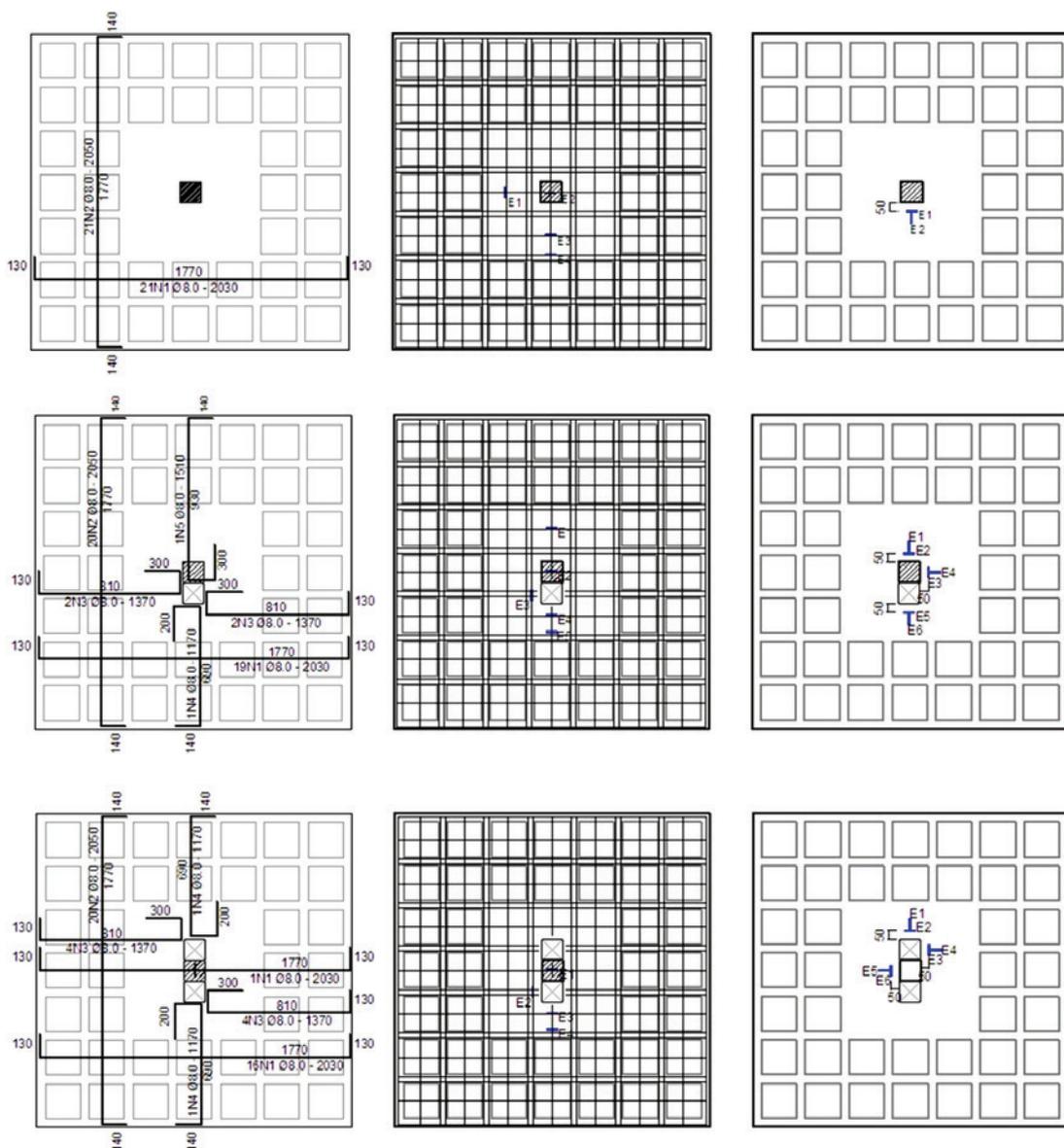
O padrão de fissuração das lajes é mostrado na Figura 9. Para todas as lajes a fissuração iniciou radialmente e se propagou na

direção dos furos com uma discreta redução no número de fissuras na região posterior aos furos. Nas lajes furadas também foi possível observar que a maioria das fissuras partia dos cantos dos furos, como se nestas regiões houvesse uma concentração de tensões mais intensa, o que já era esperado após a simulação das lajes computacionalmente.

4.4 Deformações

As armaduras de flexão das lajes, tanto com furo quanto a de referência, se comportaram com clara ductilidade, com todos os extensômetros registrando deformações superiores a de escoamento (1,95‰). A Figura 10 mostra as curvas referentes às deformações

Figura 6 – Armação e instrumentação das lajes LR, L1 e L2



máximas em cada laje ensaiada. A laje LR apresentou as maiores deformações, chegando a 8,5%. As demais lajes apresentaram deformações das armaduras de flexão entre 2,6‰ (L4) e 5,2‰, ou seja, todas haviam escoado no momento da ruptura. Entretanto, a laje L1 apresentou comportamento peculiar, com as menores deformações a partir de 75 kN. Deve-se destacar, no entanto, que este comportamento não caracteriza a ruptura da laje com escoamento de suas armaduras de flexão, pois o escoamento pode ter ocorrido apenas na região monitorada e as lajes continuaram absorvendo carga normalmente até o final dos ensaios. As deformações do concreto também são mostradas na Figura 10, e não atingiram o limite de 3,5‰. Os valores ficaram em torno de 0,5‰ para a laje LR e 2,0‰ para a laje L3.

5. Conclusões

Todas as lajes ruíram por punção com o escoamento das armaduras de flexão, mas sem o esgotamento da capacidade resistente à flexão, pois a plastificação foi localizada e as lajes continuaram a reagir aos carregamentos. Este modo de ruína é diferente dos previstos pela norma ACI para 4 das 6 lajes, o que corrobora os resultados de outros autores de que estas estimativas normativas são conservadoras. Já a norma brasileira acertou 5 modos de ruína, errando apenas o da laje de referência. No que se refere à punção, para as lajes com furos, a norma NBR 6118 ficou mais próxima da carga última, subestimando em até 50% os

Figura 7 – Armação e instrumentação das lajes L3, L4 e L5

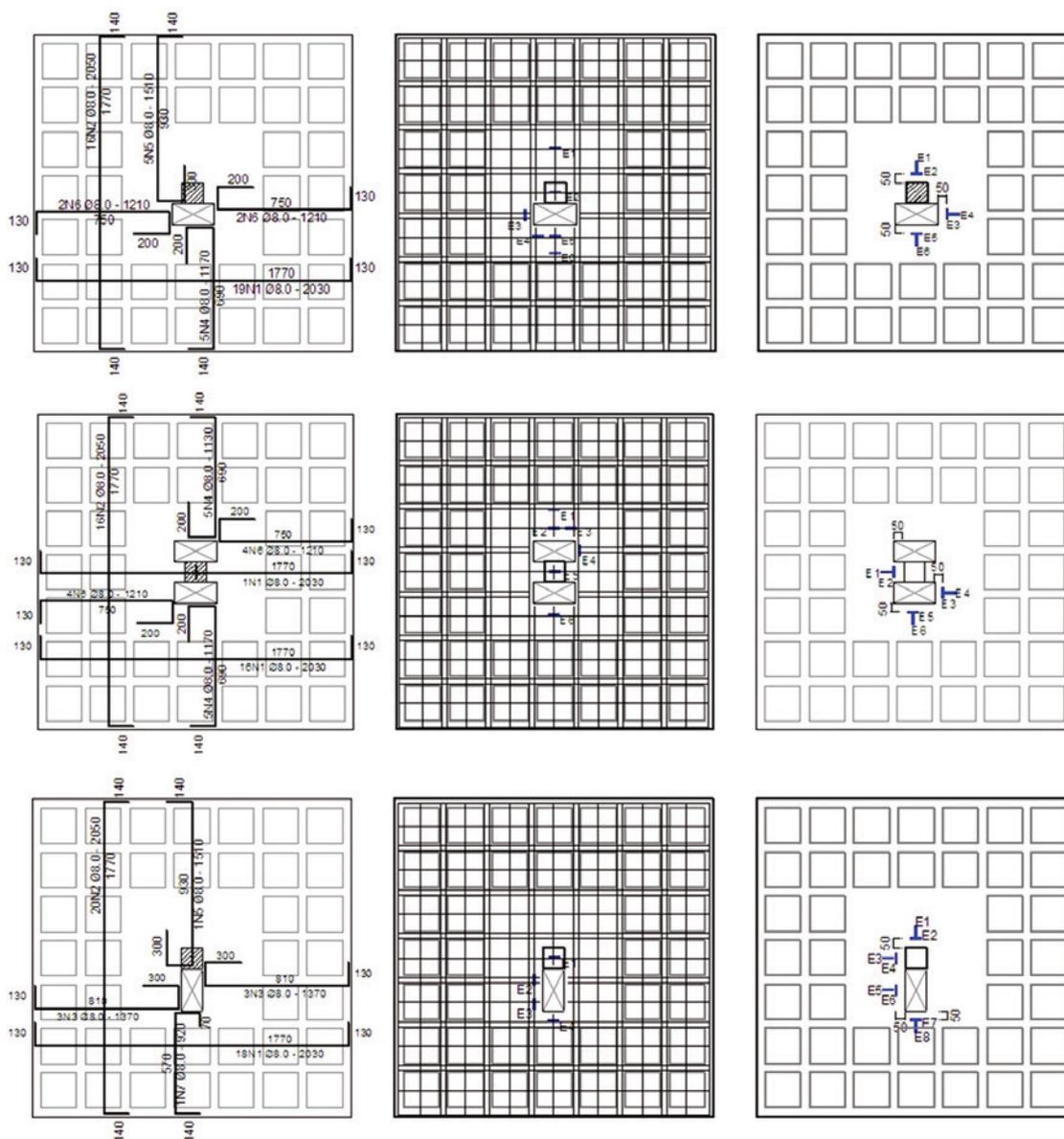
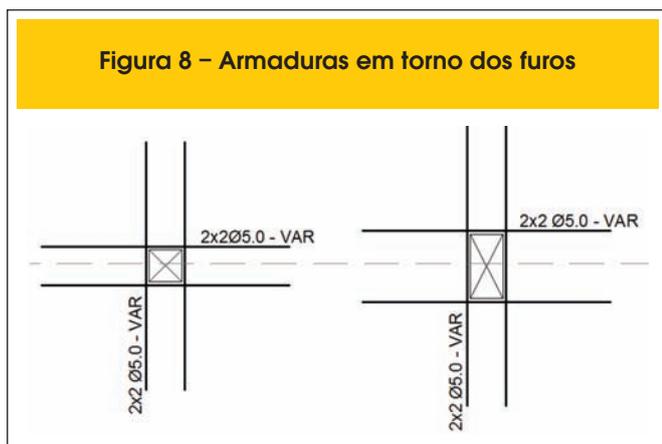


Figura 8 – Armaduras em torno dos furos



resultados para lajes com dois furos, sendo que a ACI 318 chegou a 72% na laje L4. Para as lajes L1 e L5 todas as estimativas foram satisfatórias. De modo geral a presença de furos não diminuiu significativamente a resistência última das lajes, exceto para a laje L4, onde houve uma redução de 48% nesta resistência para um perímetro de controle 74% menor em relação à laje de referência.

6. Agradecimentos

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

7. Referências

- [01] SOUZA, V. C. M., CUNHA, A. J. P. Lajes em Concreto Armado e Protendido. Rio de Janeiro Ed. UERJ, 1998, 580p.
- [02] ACI 318:2008. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
- [03] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2007.
- [04] JOHANSEN, K. W. Brudlinieteorier (Yield line theories), Copenhagen, Gjellerup, 1943.
- [05] OLIVEIRA, D. R. C. Análise Experimental de Lajes Cog-

melo de Concreto Armado com Pilares Retangulares. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, Brasília, 2003, 214p.

- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2008.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6892 – Materiais metálicos. Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração em Temperatura Ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

Tabela 2 – Cargas de ruptura e cargas estimadas pelas normas

Laje	ACI 318			NBR 6118			Experimental	
	Cisalhamento nervuras (V)		V_p (kN)	Cisalhamento nervuras (V)		V_p (kN)	P_r (kN)	P_u (kN)
	Viga (kN)	Laje (kN)		Viga (kN)	Laje (kN)			
LR	336	168	278	333	282	296	297	243,0
L1	351	176	223	348	292	234	297	242,5
L2	346	173	147	343	289	153	297	230,0
L3	349	174	185	346	291	200	297	223,5
L4	351	176	74	348	292	91	121	127,5
L5	346	173	220	343	289	230	297	233,0

Figura 9 – Mapa de fissuração das lajes ensaiadas

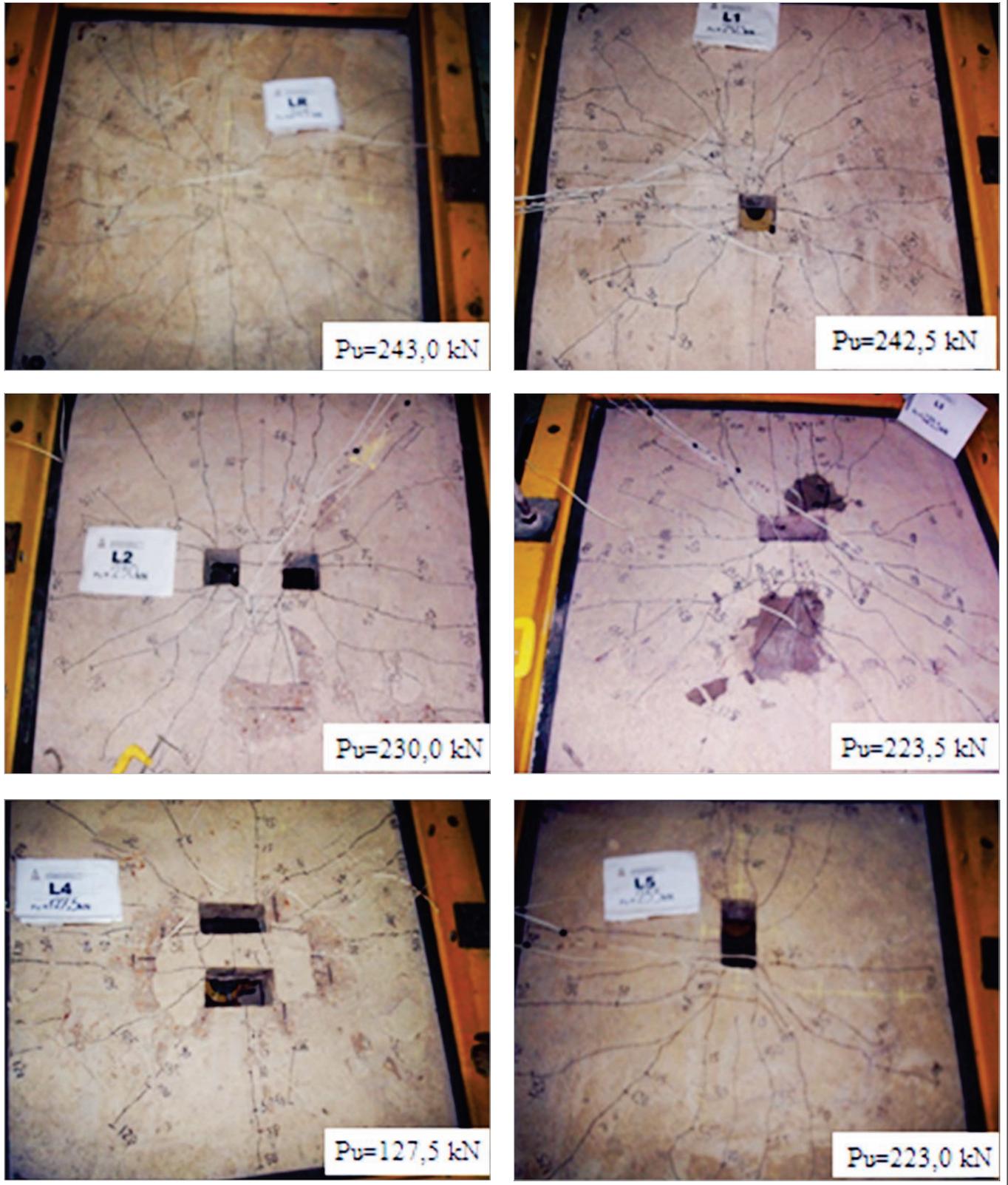


Figura 10 – Deformações no concreto e na armadura de flexão

