

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES COGUMELO NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO COM PILARES METÁLICOS

Soares, Yasser Vasconcelos (1); Melo, Guilherme Sales (2); Neuenschwander, Raul (3)

(1) Mestre em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília
email: yasservs@hotmail.com

(2) Professor PhD, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília
email: guilherm@unb.br

(3) Mestre em Estruturas, Montar Construções Metálicas Ltda
email: raul@raulneuenschwander.eng.br

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 70910-900 Brasília, DF, Brasil.

Palavras Chaves: laje cogumelo nervurada, punção, cisalhamento, pilar metálico

Resumo

Foram analisadas experimentalmente oito lajes cogumelo nervuradas de concreto armado com pilares centrais metálicos, submetidas a carregamento simétrico, com o objetivo de se investigar o comportamento ao esforço cortante nas nervuras e comportamento à punção na região maciça das lajes.

As lajes eram quadradas com 1850 mm de lado e espessura de 130 mm, com um pilar central metálico constituído por dois perfis "I" (100 x 80 x 3,5 mm) solidarizados, e um capitel metálico (300 x 240 x 10 mm) para a transferência de carga para a laje. As nervuras possuíam espaçamento entre eixos igual a 300 mm e seção transversal com 50 mm de largura e 130 mm de altura. O espaço entre as nervuras foi preenchido com blocos de EPS.

O programa experimental foi constituído por duas lajes de referência, duas lajes com fibras de aço incorporadas ao concreto e quatro lajes que possuíam armadura de cisalhamento nas nervuras, sendo uma com armadura do tipo pino com a cabeça para cima; uma com armadura do tipo pino com a cabeça para baixo; uma laje com estribo aberto com inclinação de 45° e outra com estribo convencional retangular fechado vertical.

São apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos das cargas últimas e tipos de ruptura, padrão de fissuração, deformações da armadura de cisalhamento, deformações da armadura de flexão, deformações no concreto e deslocamentos verticais (flechas). Os resultados experimentais são também comparados com as estimativas teóricas da carga de ruptura para diversas normas de projeto e pela teoria das linhas de ruptura.

1 Introdução

Lajes cogumelo são elementos estruturais que se apóiam diretamente sobre pilares, sem a presença de vigas, podendo ser maciças ou nervuradas e possuíam ou não capitel. A utilização de lajes cogumelo nervuradas em concreto armado, pode resultar em uma solução bastante econômica em relação a estruturas usuais.

No presente trabalho é apresentada uma análise experimental do comportamento de oito lajes cogumelo nervuradas de concreto armado, com pilares centrais metálicos, submetidas a carregamento simétrico, com a presença de fibras de aço incorporadas ao concreto (2 lajes), como a presença de três tipos de armadura de cisalhamento no combate ao esforço cortante nas nervuras (4 lajes); a) duas do tipo pino, composta por barras de aço com uma extremidade estampada e a outra soldada a uma chapa de aço; b) uma com estribo aberto e inclinado a 45° em relação ao plano da laje; e c) uma com estribo fechado convencional vertical.

2 Programa experimental

Foram ensaiadas oito lajes que possuíam lados iguais a 1850 mm de comprimento e espessura de 130 mm, sendo a altura útil (d) das lajes entre 89 mm e 104 mm (Fig. 1 e Tab. 1). Foram distribuídos simetricamente blocos de EPS com dimensões de 250 mm x 200 mm x 90 mm e de 200 mm x 200 mm x 90 mm, fazendo com que o espaçamento entre eixos fosse de 300 mm e as nervuras tivessem a seção transversal de 50 mm de largura e 130 mm de altura.

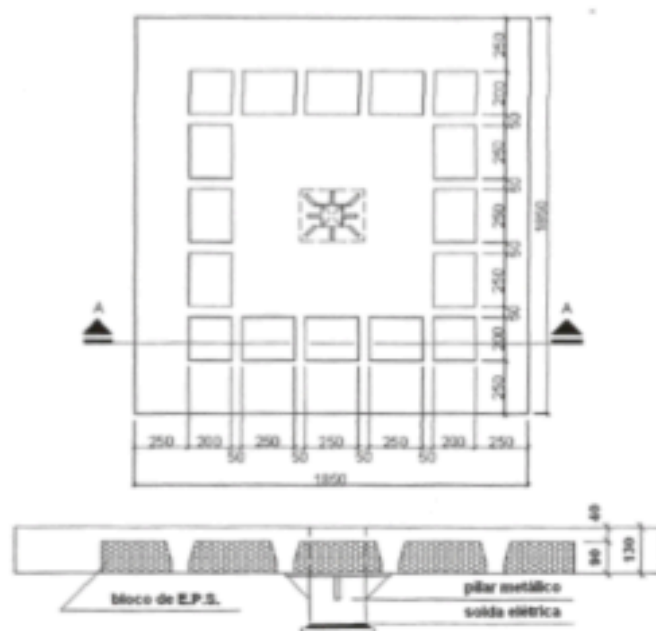


Figura 1 – Planta baixa e corte A-A típicos das lajes ensaiadas (medidas em mm)

Tabela 1 – Características das lajes ensaiadas

Lajes	Altura útil	Arm. flexão	Armadura de cisalhamento nas nervuras				Fibra de aço incorporada
	d (mm)	ρ (%) [*] (CEB)	Tipo de Armadura	Nº de camadas	ϕ (mm)	Inclinação	
LR - 1	96	0,40	-	-	-	-	-
LR - 2	98	0,39	-	-	-	-	-
LD - 1	99	0,38	-	-	-	-	SIM
LD - 2	89	0,46	-	-	-	-	SIM
LAC - 1	103	0,36	PINO (para cima)	4	6,3	Vertical	-
LAC - 2	103	0,36	PINO (para baixo)	4	6,3	Vertical	-
LAC - 3	103	0,36	ESTRIBO-ABERTO	3	5,0	45°	-
LAC - 4	104	0,35	ESTRIBO-FECHADO	3	5,0	Vertical	-

* $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$, dado pelo CEB-FIP MC90 [1]

2.1 Armadura

A Fig. 2 apresenta a armadura de flexão utilizada nas lajes. A armadura de flexão negativa, colocada no bordo superior da laje, foi composta por 6 barras de 10,0 mm de diâmetro (N1), espaçadas a cada 30 cm, e de uma tela soldada com 11 barras de 4,2 mm de diâmetro (N2) em cada direção, espaçadas a cada 15 cm. A tela soldada foi posicionada logo acima dos blocos de E.P.S. A armadura de flexão negativa composta por barras de 10,0 mm foi posicionada por cima da tela soldada. A armadura de flexão positiva era composta por 4 barras de 6,3 mm de diâmetro (N3) em cada direção, disposta no bordo inferior da laje, espaçadas a cada 30 cm, coincidindo com o eixo das nervuras.

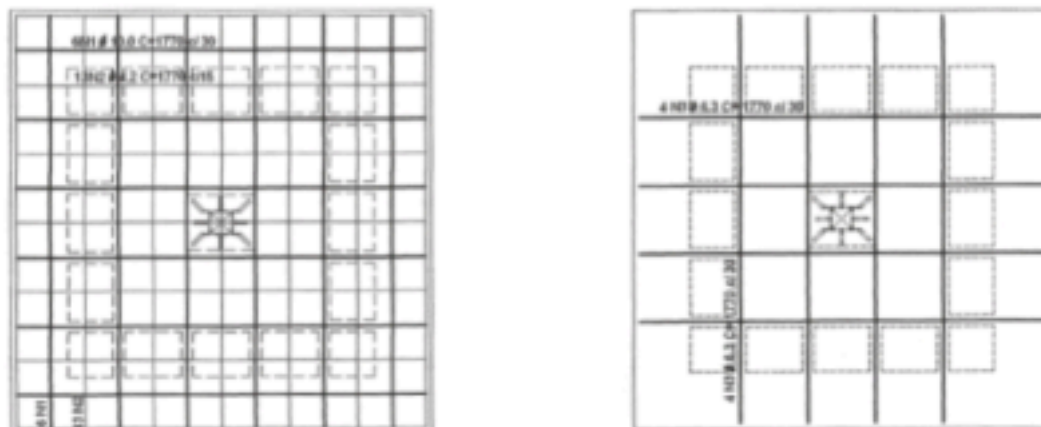


Figura 2 – Detalhe do posicionamento em planta da armadura negativa e positiva

Foram confeccionados três tipos de armadura de cisalhamento (Fig. 3): a) armadura do tipo pino com a cabeça para cima (laje LAC – 1), e com a cabeça do pino para baixo (laje LAC – 2), a fim de se investigar a posição mais eficiente para a ancoragem do pino; b) tipo estribo aberto com inclinação de 45° (laje LAC – 3); c) estribo convencional retangular fechado (laje LAC – 4). Tanto os pinos como os estribos foram posicionados ao longo do eixo longitudinal das nervuras, sendo dispostos em 4 e 3 camadas respectivamente, como mostrado na Fig. 4.

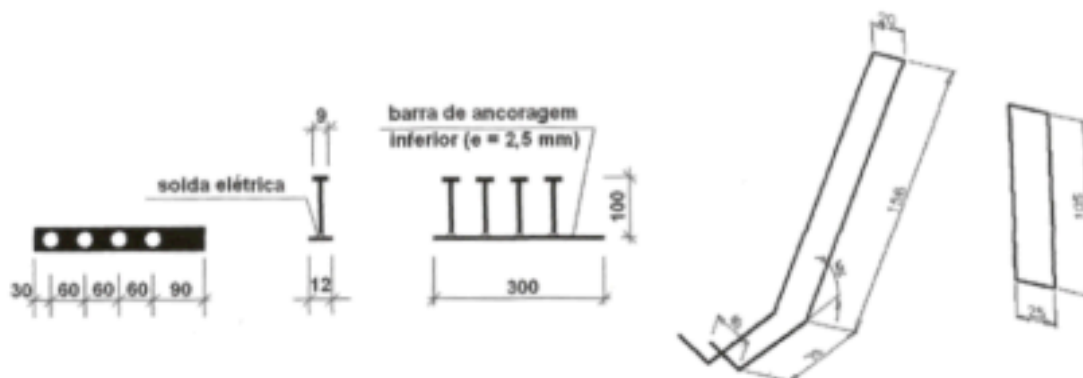


Figura 3 – Detalhe dos pinos e estribos (medidas em mm)

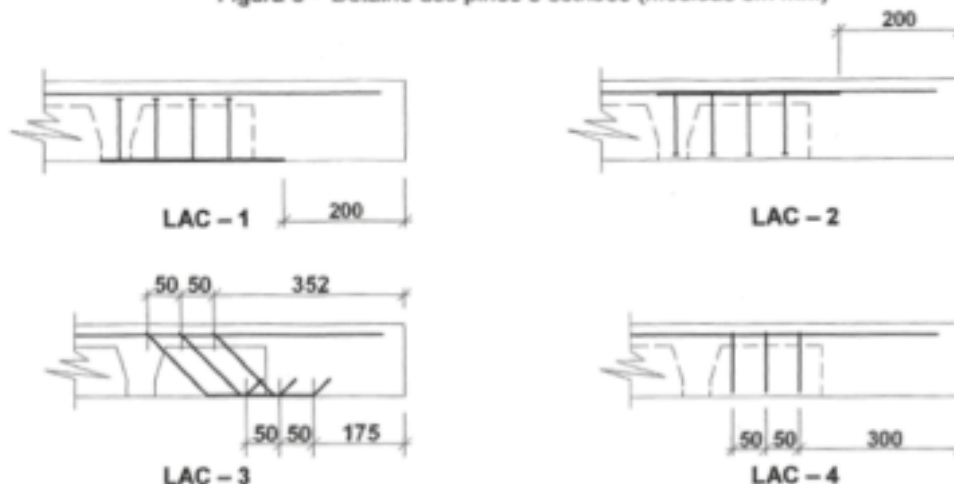


Figura 4 – Disposição dos pinos e estribos nas nervuras (medidas em mm)

2.2 Pilar metálico

Os pilares metálicos centrais utilizados nas lajes eram constituídos por dois perfis "I" (100 x 80 x 3,5 mm) soldados entre si, tendo como área de transferência de carga para a laje, um capitel metálico (300 x 240 x 10 mm) e enrijecedores com o formato de mísulas na parte inferior do capitel com espessura de 13 mm. A Fig. 5 apresenta mais detalhes dos pilares utilizados.

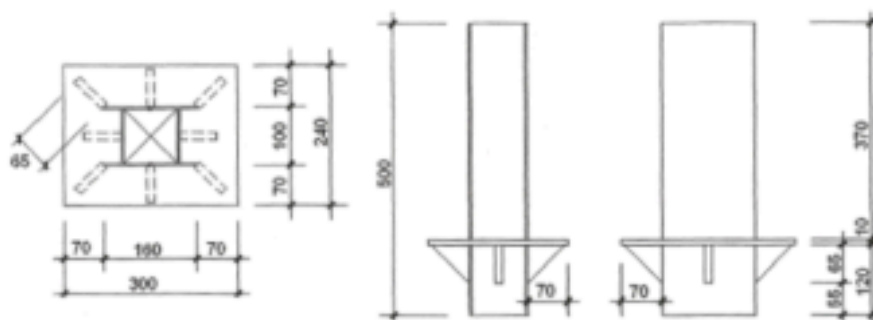


Figura 5 – Detalhe do pilar metálico (medidas em mm)

2.3 Características dos materiais

O concreto utilizado nas lajes foi fornecido por empresa concreteira, com resistência à compressão estimada de 30 MPa. O cimento utilizado foi o CP-II-E-32. O abatimento do concreto foi de 12 cm $\pm$ 2 cm.

Os aços empregados nas lajes foram de um mesmo lote com os seguintes diâmetros: 10,0 mm (CA-50), 6,3 mm (CA-50), 5,0 mm (CA-60) e uma tela soldada com fios de diâmetro 4,2 mm (CA-60).

As fibras utilizadas neste trabalho são conhecidas como DRAMIX e foram fornecidas pela BELGO MINEIRA e tem a forma patenteada pela BEKAERT. As fibras foram incorporadas no concreto das lajes LD-1 e LD-2 e a proporção de fibras utilizadas foi de 40 kg/m³. As fibras foram misturadas ao concreto no caminhão betoneira, conforme as recomendações do fabricante.

2.4 Instrumentação

Foi realizada a medição das deformações específicas no sentido das tensões tangenciais das lajes, na armadura de flexão (Fig. 6a). A preferência por monitorar as deformações neste sentido deve ao fato das mesmas serem mais significativas que as deformações específicas no sentido das tensões radiais, como comprovado experimentalmente por Oliveira [2], Coelho [3] e Andrade [4]. Foram colocados dois extensômetros em cada ponto monitorado, um em cada lateral, onde a deformação no ponto é a média das leituras obtidas nos extensômetros.

O monitoramento das deformações específicas nas armaduras de cisalhamento das lajes LAC-1 a LAC-4 foi realizada em 4 nervuras (Fig. 6b). Foi colocado um extensômetro elétrico em cada estribo ou pino instrumentado, posicionado a meia altura (Fig. 6c). Nas lajes LAC-1 e LAC-2, com pinos, foram instrumentadas as três últimas camadas, enquanto que nas lajes LAC-3 e LAC-4 foram instrumentados todos os estribos nas quatro nervuras selecionadas.

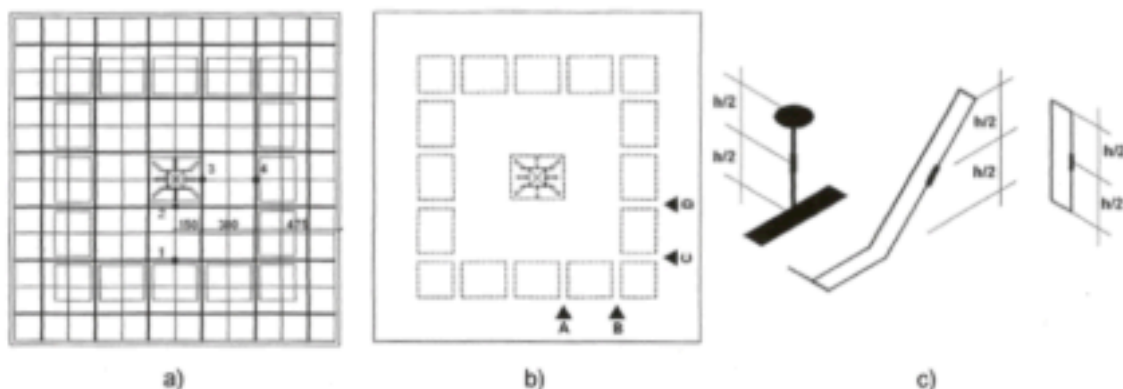


Figura 6 – Localização dos extensômetros nas armaduras de flexão (a) e de cisalhamento (b e c) medidas em mm

Os extensômetros que registravam as deformações do concreto foram fixados na face inferior de todas as lajes com a finalidade de se registrar as deformações radiais e tangenciais do concreto (Fig. 7a).

Os deslocamentos verticais das lajes foram medidos utilizando seis defletômetros no bordo superior (D-5 a D-10). Quatro defletômetros adicionais foram colocados nos quatro apoios da laje (D-1 a D-4) com o objetivo de se registrar o deslocamento global do sistema de ensaio, possibilitando assim a posterior correção dos valores obtidos nos defletômetros posicionados no bordo superior da laje. A Fig. 7b mostra o posicionamento dos defletômetros nas lajes. Os defletômetros utilizados eram mecânicos de haste tipo HUGGENBERGER, com curso de medição de 50 mm e subdivisão de 0,01 mm.

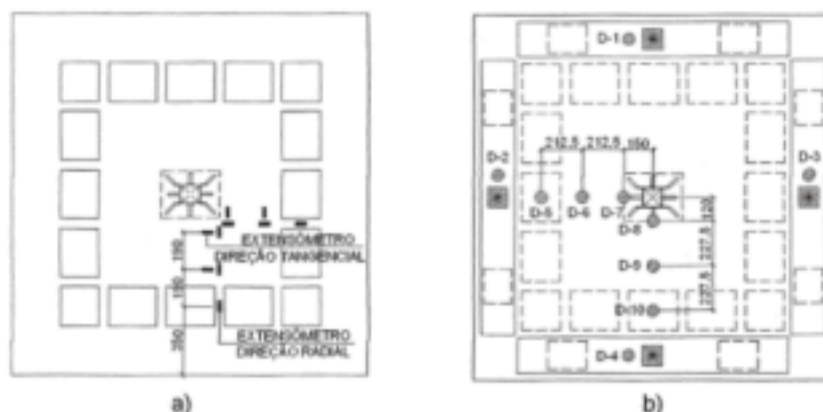


Figura 7 – Localização dos extensômetros no concreto (a) e dos defletômetros na laje (b) medidas em mm

2.5 Sistema de ensaio e aplicação de carga

O sistema de ensaio usado é mostrado na Fig. 8. Os pilares metálicos transferiam a carga para a laje através de uma chapa metálica de 240 x 300 x 15,8 mm. A carga foi aplicada a estes pilares de baixo para cima, simulando a ação de um pilar central através de um macaco hidráulico. Este sistema é constituído basicamente por 4 vigas metálicas de reação, responsáveis por distribuir a carga nos bordos da laje, ancoradas a uma laje de reação por 4 tirantes e os pilaretes de concreto sob as lajes serviam como apoio para o posicionamento das mesmas. Aplicou-se uma pré-carga de 20 kN, de curta duração, visando a acomodação do sistema e o teste da instrumentação. A laje em seguida era descarregada e então se iniciava o ensaio com incremento de carga de 10 kN em intervalos de aproximadamente 15 minutos, após os defletômetros se estabilizarem e as leituras serem efetuadas.

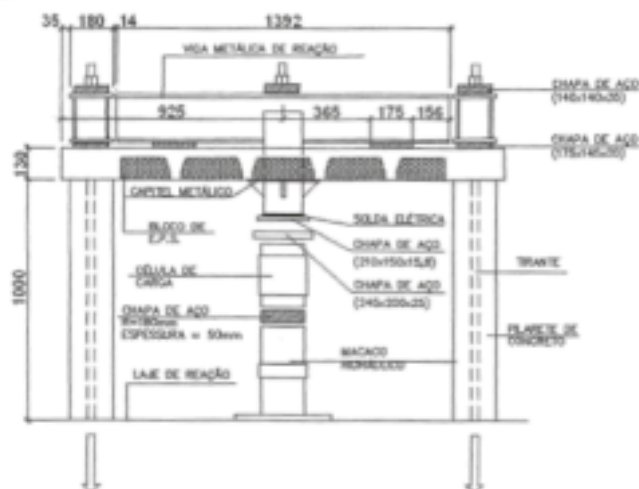


Figura 8 – Esquema de ensaio e aplicação de carga

3 Resultados dos ensaios

3.1 Propriedade dos materiais

As resistências à compressão uniaxial, à tração por compressão diametral e os módulos de elasticidade secante do concreto experimental e teórico (NBR 6118:2003) [5] para as lajes ensaiadas, estão apresentados na Tab. 2. As propriedades mecânicas e geométricas das barras de aço utilizadas nas lajes, estão apresentadas na Tab. 3.

Tabela 2 – Resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade secante do concreto

laje	Idade	f_c^*	f_t^*	E_{cs} Exp	E_{cs} NBR 6118-2003	E_{cs} Exp/ E_{cs} NBR 6118
	(dias)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
LR-1	34	24	2,8	24,5	23,2	1,1
LR-2	41	30	2,7	22,7	26,0	0,9
LD-1	51	34	3,0	22,4	27,6	0,8
LD-2	55	32	3,4	22,4	27,0	0,8
LAC-1	27	35	3,3	29,8	28,1	1,1
LAC-2	26	36	3,1	29,7	28,4	1,0
LAC-3	28	36	2,9	31,6	28,6	1,1
LAC-4	29	37	3,0	31,7	28,8	1,1

* Média de três corpos de prova por laje

Tabela 3 – Propriedades mecânicas e geométricas dos aços utilizados

ϕ	$\phi_{efetiva}$	A_s efetiva	f_{ys}	f_u	E_s	E_c
(mm)	(mm)	(mm ²)	(MPa)	(MPa)	(%)	(GPa)
5,0	4,99	19,57	578	681	4,40	241
6,3	6,12	29,42	551	664	4,49	221
10	9,87	76,51	548	681	2,45	224

3.2 Deslocamentos verticais

Na Fig. 9 é apresentada a média dos deslocamentos verticais máximos nas lajes ensaiadas. Observa-se que os deslocamentos verticais apresentaram-se praticamente simétricos para pontos simétricos das lajes, denotando o bom comportamento dos modelos durante os ensaios. Para um mesmo valor de carga (190 kN, $\approx$ 80% da carga de ruptura das lajes de referência), verificou-se que as lajes sem armadura de cisalhamento nas nervuras e sem fibras (LR-1 e LR-2) apresentaram maiores deslocamentos verticais. As lajes com fibras (LD-1 e LD-2) tiveram uma redução média de 16,8% e as lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras (LAC-1 a LAC-4) apresentaram uma redução média de 8,3% em relação às lajes de referência.

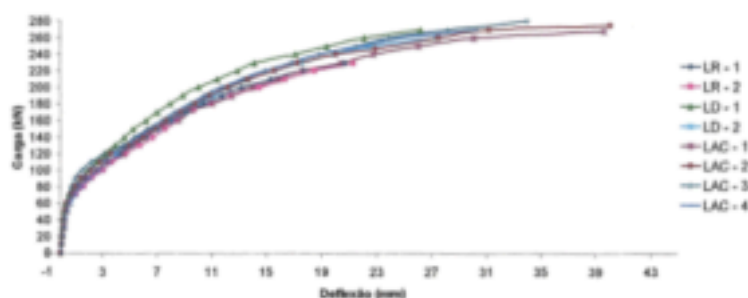


Figura 9 – Média dos deslocamentos verticais máximos das lajes ensaiadas

3.3 Deformações no concreto

As deformações radiais são mais significativas próximas do ponto de aplicação de carga, decrescendo os valores à medida que se aproxima dos bordos. Observou-se em todas as lajes uma descompressão nos extensômetros posicionados nas nervuras e mais próximo dos bordos (extensômetros R5 e R11), para níveis de carregamento próximos da ruptura ($\approx 80\%$). Essa descompressão pode estar associada então à fissuração presente nas nervuras ou também a um início de deslizamento das barras de flexão na ancoragem.

As deformações tangenciais decrescem à medida que se aproxima dos bordos da laje e são superiores para todos os pontos monitorados às deformações radiais, com exceção de alguns pontos nas lajes LD-2 e LAC-3. As lajes LR-1 ($2,99\%$) e LD-2 ($2,94\%$) apresentaram nos pontos monitorados, as maiores deformações tangenciais, indicando que o esmagamento do concreto nessa região não devesse estar longe. Na Fig. 10 são apresentadas as curvas carga x deformações radiais e tangenciais de uma das lajes ensaiadas.

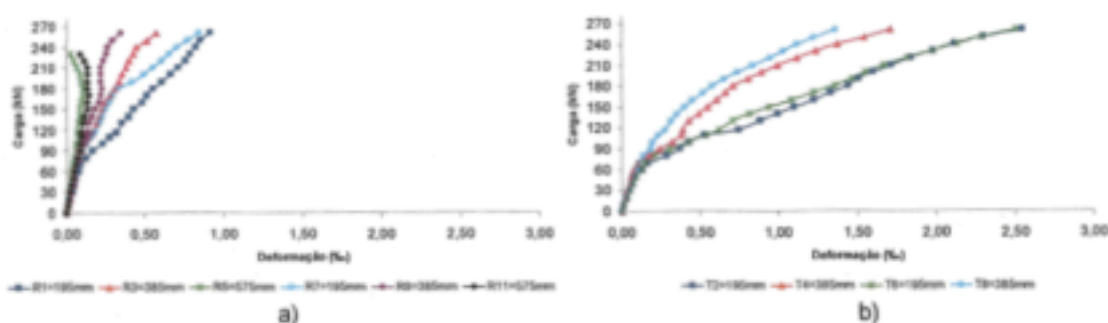


Figura 10 – Deformações radiais (a) e tangenciais (b) do concreto da laje LAC-1

3.4 Deformação na armadura de flexão

Em todos os pontos monitorados, as armaduras atingiram o escoamento (deformação superior a $2,45\%$), indicando um comportamento típico de flexão para as lajes ensaiadas. Esse comportamento era esperado em função das pequenas taxas de armadura de flexão utilizadas nas lajes. Observou-se que para estágios de carga avançados, em algumas barras das lajes LD-1, LD-2, LAC-2, LAC-3 e LAC-4, as deformações das armaduras diminuíram, possivelmente devido a um início de deslizamento dessas barras de flexão na ancoragem, ou devido à fissuração na região das nervuras. Verificou-se que a carga de escoamento da armadura de flexão é menor que a carga de ruptura, ficando em média 56% da carga de ruptura das lajes ensaiadas e que o estado limite último de resistência à flexão nas lajes, havia sido atingido antes da ruptura por cisalhamento ou punção (lajes LR-1, LR-2, LD-1 e LAC-2 a LAC-4). A Fig. 11 mostra as curvas carga x deformação na armadura de flexão de uma das lajes ensaiadas.

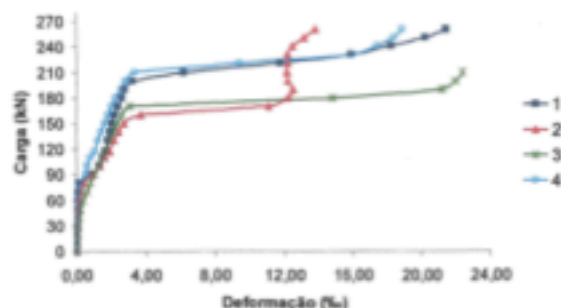


Figura 11 – Deformação na armadura de flexão da laje LAC-1

3.5 Deformações na armadura de cisalhamento

As armaduras de cisalhamento utilizadas se mostraram eficientes, pois todas as lajes com esse tipo de armadura (lajes LAC-1 a LAC-4) não romperam ao cisalhamento nas nervuras, o que havia ocorrido com as lajes de referência (LR-1 e LR-2) e com uma das lajes com fibra de aço dispersa na massa de concreto (laje LD-1). Os resultados das instrumentações dos pinos e dos estribos indicaram o surgimento de microfissuras nas nervuras, mesmo com a armadura transversal não tendo escoado, embora a maior deformação tenha sido registrada no estribo inclinado aberto (laje LAC-3). Pode-se dizer que as deformações registradas pelas armaduras de cisalhamento situadas nas últimas camadas (posições 7, 10, 13 e 16) foram de uma maneira geral superiores as das outras camadas (demais posições), bem como foram superiores as deformações registradas pelos pinos e estribos situados nas nervuras "B" e "C", em comparação com as nervuras "A" e "D" (ver Fig. 6b). A Fig. 12 mostra as curvas carga x deformação na armadura de cisalhamento de uma das lajes ensaiadas.

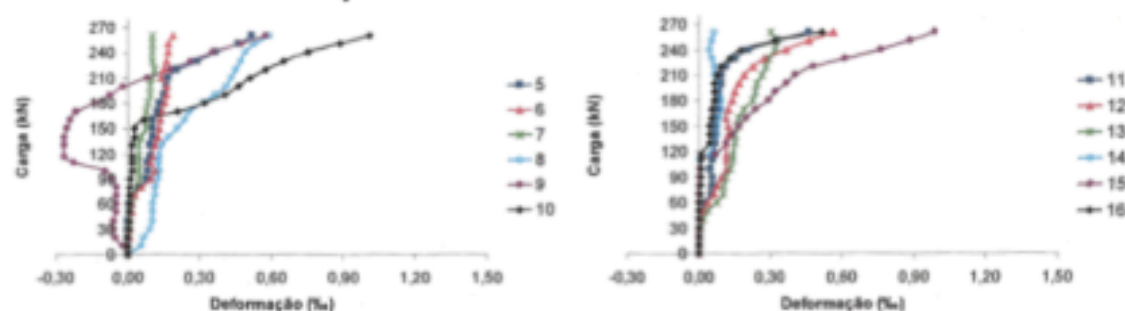


Figura 12 – Deformação na armadura de cisalhamento (pinos) da laje LAC-1

3.6 Cargas últimas e modo de ruptura

A Tab. 4 apresenta as cargas de ruptura alcançadas e os modos de ruptura observados das lajes. A utilização da fibra de aço incorporada ao concreto e a armadura de cisalhamento utilizada nas nervuras não proporcionaram ganhos significativos para a carga última, em parte porque o estado limite último de resistência à flexão já havia sido atingido (ruptura localizada devido ao início de escoamento da armadura) antes das rupturas por cisalhamento nas nervuras ou por punção (modo de ruptura que ocasionou o colapso das lajes LR-1, LR-2, LD-1 e LAC-2 a LAC-4). As lajes LD-1 e LD-2 possibilitaram aumento de carga médio de 14,3%, as lajes LAC-1 e LAC-2 apresentaram cargas últimas médias superiores em 13,8%, as lajes LAC-3 e LAC-4 apresentaram cargas últimas médias superiores em 17,8% em relação às lajes de referência (LR-1 e LR-2).

Tabela 4 – Cargas e modos de ruptura das lajes

Lajes	Altura útil	Arm. flexão	f_c	Armadura de cisalhamento nas nervuras		Fibra de aço	P_u	Modo de ruptura observado
	d (mm)	ρ (%) (CEB)		Tipo de Armadura	f_{tyr} (MPa)	DRAMIX		
LR-1	96	0,40	24	-	-	-	239	flexão*-cisalh. nervura
LR-2	98	0,39	30	-	-	-	238	flexão*-cisalh. nervura
LD-1	99	0,38	34	-	-	sim	278	flexão*-cisalh. nervura
LD-2	89	0,46	32	-	-	sim	267	flexão(DPE)-simétrico
LAC-1	103	0,36	35	PINO(para cima)	551	-	268	flexão(DPE)-assimétrico
LAC-2	103	0,36	36	PINO(para baixo)	551	-	275	flexão*-punção
LAC-3	103	0,36	36	est. aberto inclinado	578	-	286	flexão*-punção
LAC-4	104	0,35	37	est. fechado vertical	578	-	276	flexão*-punção

flexão* - escoamento da armadura de flexão / flexão (DPE) - "ruptura" por deformação plástica excessiva

As lajes LR-1 e LR-2 (de referência) e a laje LD-1 (com fibra de aço incorporado ao concreto) apresentaram o modo de ruptura por flexão* (escoamento da armadura de flexão) / cisalhamento nas nervuras, com a ruptura ocorrendo subitamente em algumas nervuras (ver Fig. 13a). A laje LD-2 (com fibra de aço incorporado ao concreto) apresentou "ruptura por flexão" típica por deformação plástica excessiva (DPE), e o modo de ruptura dessa laje foi classificado como simétrico para diferenciá-la da laje LAC-1 (pino para cima), que apresentou basicamente o mesmo tipo de "ruptura por flexão" típica por deformação plástica excessiva (DPE), mas com a laje se comportando assimetricamente (ver Fig. 13b). As lajes LAC-2 (pino para baixo), LAC-3 (estribos inclinados abertos) e LAC-4 (estribos fechados verticais) tiveram o modo de ruptura classificado como flexão* (escoamento da armadura de flexão) / punção, pois romperam sem dúvidas por punção, mas a ruptura foi classificada também como flexão* pois toda a armadura de flexão já tinha atingido o escoamento (ver Fig. 13c).

Com relação ao padrão de fissuração, as fissuras se desenvolveram de forma semelhante em todas as lajes. Surgem primeiras as radiais, saindo do canto do pilar em direção ao bordo da laje, para cargas em média 30% da carga de ruptura, enquanto que as fissuras circunferenciais surgiram para 66,6% da carga de ruptura conectando-se as fissuras radiais. A Fig. 13d apresenta o padrão de fissuração de uma das lajes ensaiadas.



a)



c)



b)



d)

Figura 13- Ruptura por flexão / cisalhamento nas nervuras da laje LR-2 (a), ruptura por flexão (DPE) da laje LAC-1 (b), ruptura por flexão / punção (c) e padrão de fissuração da laje (d) LAC-3

4 Comparação entre os resultados experimentais e estimados

4.1 Resistência à flexão

A Tab. 5 apresenta uma comparação entre as cargas últimas obtidas nos ensaios e a resistência à flexão das lajes, que foi determinada com a utilização da teoria das linhas de ruptura, empregando-se a expressão utilizada por Hallgren [6] (P_{flex1}), e a expressão desenvolvida por Oliveira [7] (P_{flex2}). As cargas estimadas para ruptura por flexão pelas duas expressões (P_{flex1} e P_{flex2}) são conservadoras, em relação às cargas obtidas nos ensaios, especialmente as obtidas com a expressão, utilizada por Hallgren [6]. Observa-se que as expressões são simplificadas e determinam a carga correspondente ao início do escoamento, e utilizando f_{ys} (tensão de escoamento do aço) ao invés de f_u (tensão de ruptura do aço). Os resultados são ainda mais conservadores, como esperado, para as lajes com fibras de aço incorporadas e para as lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras, pois as expressões não levam em conta a contribuição desses elementos.

Tabela 5 – Cargas últimas estimadas para flexão

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	f_{ys} (MPa)	P_{flex1} (kN)	P_{flex2} (kN)	P_u (kN)	P_u/P_{flex1}	P_u/P_{flex2}	Modo de ruptura observado
LR-1	96	0,40	24	548	121	172	239	1,98	1,39	flexão*-cisalh. nervura
LR-2	98	0,39	30	548	124	176	238	1,91	1,35	flexão*-cisalh. nervura
LD-1	99	0,38	34	548	124	176	278	2,24	1,58	flexão*-cisalh. nervura
LD-2	89	0,46	32	548	121	171	267	2,22	1,56	flexão(DPE)-simétrico
LAC-1	103	0,36	35	548	128	181	268	2,10	1,48	flexão(DPE)-assimétrico
LAC-2	103	0,36	36	548	128	181	275	2,15	1,52	flexão*-punção
LAC-3	103	0,36	36	548	128	181	286	2,24	1,58	flexão*-punção
LAC-4	104	0,35	37	548	127	180	276	2,17	1,53	flexão*-punção
flexão* - escoamento da armadura de flexão										
Flexão (DPE) – "ruptura" por deformação plástica excessiva										
P_{flex1} – Hallgren [6] e P_{flex2} – Oliveira [7]										

4.2 Resistência ao cisalhamento nas nervuras

O comportamento ao cisalhamento nas nervuras das lajes foi verificado pelas normas CEB-FIP MC 1990 [1], NBR 6118:2003 [5] e NBR 6118:1978 [8] como lajes e como vigas (com e sem armadura). Já pela norma do ACI 318M-2002 [9] e pelas recomendações de Zsutty [10] as nervuras das lajes foram verificadas somente como vigas.

As cargas foram estimadas pelas normas citadas, sendo que todas as restrições apresentadas com relação ao limite de escoamento do aço (435 MPa ou 250 MPa) foram utilizadas, e a resistência do concreto encontrada no laboratório para os painéis foi admitida igual à resistência característica do concreto ($f_{ck} \equiv f_c$). Todos os respectivos coeficientes de segurança foram utilizados ($\gamma_c = 1,4$ ou $1,5$ e $\gamma_s = 1,15$). O cálculo da resistência ao cisalhamento das nervuras levou-se em conta apenas a largura da nervura (50 mm em vez de uma largura média, 69 mm) não considerando a contribuição do concreto da capa (40 mm de espessura) resultando numa estimativa conservadora.

Foram feitas as verificações relativas à ruína por esmagamento das diagonais comprimidas do concreto (V_2 , V_{c2} , V_{d2} ou V_{Rd2}); e a ruptura por tração diagonal, para elementos com armadura transversal (V_3 , V_{c3} , V_{d3} ou V_{Rd3}), ou sem armadura transversal (V_1 , V_{c1} , V_{d1} ou V_{Rd1}).

Observa-se que as estimativas para as lajes de referência (LR-1 e LR-2) apresentada na Tab. 6 são muito conservadoras, redundando em resultados experimentais superiores entre 2,41 a 4,81 vezes as estimativas, bem acima dos 1,4 (ACI 2002 [9], NBR 6118:2003 [5] e NBR 6118:1978[8]) ou 1,5 (CEB MC-1990 [1]) que seriam esperados no caso de se considerar a segurança somente nas solicitações.

Já as estimativas para as lajes com a incorporação de fibra de aço (LD-1 e LD-2) apresentadas na Tab. 6 são também muito conservadoras, com as duas metodologias utilizadas: a) sem a consideração da incorporação de fibras (um * nas tabelas); e b) considerando-se a incorporação de fibras em todos os métodos conforme a metodologia sugerida por Holanda [11] para o ACI. As estimativas considerando-se a incorporação de fibras apresentam estimativas entre 5% (CEB MC-1990 [1] e por Zsutty [10]) a 16% (como laje pela NBR 6118:1978 [8]) superiores em relação às estimativas sem a consideração de fibras, resultando em resultados experimentais superiores entre 2,57 a 5,08 vezes e 2,26 a 4,90 vezes respectivamente considerando-se ou não a incorporação de fibras, também bem acima dos 1,4 (ACI 2002 [9], NBR 6118: 2003 [5] e NBR 6118:1978 [8]) ou 1,5 (CEB MC-1990 [1]) que seriam esperados no caso de se considerar a segurança somente nas solicitações.

Os resultados apresentados na Tab. 7 mostram que pelas estimativas uma ruptura por esmagamento das bielas nas nervuras estava longe de ocorrer, para as lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras (LAC-1 a LAC-4), pois as cargas últimas de ruptura obtidas nos ensaios são bem abaixo das cargas estimadas para a ruptura das diagonais comprimidas, com médias entre 33% (CEB MC-1990 [1]) e 74% (viga pela NBR 6118:1978 [8]), e isso ainda sem a consideração dos coeficientes 1,4 e 1,5.

Os resultados apresentados na Tab. 8 mostram que para as lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras (LAC-1 a LAC-4), a maioria das cargas últimas experimentais obtidas nos ensaios foram inferiores às estimativas para uma ruptura por tração diagonal, com médias entre 40% (Mod II / Viga com $\theta = 30^\circ$ – NBR 6118:2003 [5]) e 77% (Mod I / Laje – NBR 6118:2003 [5]), e isso ainda sem a consideração dos coeficientes 1,4 e 1,5. Isso a princípio está correto, pois essas lajes não romperam por tração diagonal nas nervuras, mas romperam sim por flexão (DPE), caso da laje LAC-1, ou por punção na região maciça, no caso das lajes LAC-2 a LAC-4. Algumas estimativas, no entanto, foram inferiores as dos resultados experimentais, indicando que, nesses casos, rupturas por tração diagonal nas nervuras já deveriam ter ocorrido: a) Mod II / Laje – NBR 6118:2003 [5] para as lajes LAC-1 e LAC-2; e b) NBR 6118:1978 [8] para todas as lajes com armadura de cisalhamento (LAC-1 a LAC-4).

Tabela 6 – Cálculo da força cortante resistente para as lajes de referência (LR-1 e LR-2) e lajes com fibras de aço incorporadas ao concreto (LD-1 e LD-2)

Lajes	Cargas (kN)										
	$V_{u,exp}$	ACI (02)	CEB MC - 90		NBR 6118-03				NBR 6118-78		ZSUTTY
		Viga	Laje	Viga	Laje	Viga			Laje	Viga	Viga
						Mod.I	Mod.II	Mod.II			
							($\theta=30^\circ$)	($\theta=45^\circ$)			
$V^1_{u,1}$	$V^2_{u,1}$	$V^3_{u,1}$	$V^4_{u,Rd1}$	$V^5_{u,Rd1}$	$V^6_{u,Rd1}$	$V^7_{u,Rd1}$	$V^8_{u,d1}$	$V^9_{u,d1}$	$V^{10}_{u,1}$		
LR-1	239	62,4	48,0	67,2	68,8	80,0	80,0	80,0	59,2	94,4	64,0
LR-2	238	72,0	51,2	73,6	81,6	96,0	96,0	96,0	67,2	104,0	68,8
LD-1 *	278	76,8	54,4	76,8	88,0	104,0	104,0	104,0	72,0	112,0	73,6
LD-2 *	267	67,2	52,8	70,4	78,4	91,2	91,2	91,2	65,6	100,8	64,0
LD-1 **	278	88,5	56,5	81,1	102,5	121,3	121,3	121,3	83,4	129,3	76,7
LD-2 **	267	77,2	54,8	73,7	91,2	104,7	104,7	104,7	76,3	112,8	67,6
* sem a consideração de fibras de aço incorporada											
** com a consideração da fibra de aço incorporada											

Tabela 7 - Cálculo da força cortante para a ruptura da diagonal comprimida nas nervuras das lajes com armadura de cisalhamento (LAC-1 a LAC-4)

Lajes	V _{u,exp}	Carga (kN)						
		CEB MC-90	NBR 6118-03				NBR 6118-78	
		Viga	Laje	Viga			Laje	Viga
				Mod.I	Mod.II	Mod.II		
					(θ=30°)	(θ=45°)		
V ¹ _{u,d2}	V ² _{u,Rd2}	V ³ _{u,Rd2}	V ⁴ _{u,Rd2}	V ⁵ _{u,Rd2}	V ⁶ _{u,d2}	V ⁷ _{u,d2}		
LAC-1	268	723,2	649,6	670,4	579,2	670,4	453,1	371,2
LAC-2	275	724,8	667,2	684,8	593,6	684,8	459,4	371,2
LAC-3	286	1420,8	667,2	684,8	936,0	1371,2	459,4	371,2
LAC-4	276	756,8	692,8	708,8	612,8	708,8	467,0	385,6

Tabela 8 - Cálculo da força cortante para a ruptura por tração diagonal nas nervuras das lajes com armadura de cisalhamento (LAC-1 a LAC-4)

Laje	$V_{u,exp}$	Cargas (kN)									
		ACI (02)	CEB MC 90	NBR 6118 - 03						NBR 6118-78	ZSUTTY
		Viga	Viga	Laje			Viga			Laje	Viga
				Mod.I	Mod.II	Mod.II	Mod.I	Mod.II	Mod.II		
					($\theta=30^\circ$)	($\theta=45^\circ$)		($\theta=30^\circ$)	($\theta=45^\circ$)		
		$V^1_{u,d3}$	$V^2_{u,d3}$	$V^3_{u,Rd3}$	$V^4_{u,Rd3}$	$V^5_{u,Rd3}$	$V^6_{u,Rd3}$	$V^7_{u,Rd3}$	$V^8_{u,Rd3}$	$V^9_{u,d3}$	$V^{10}_{u,d3}$
LAC-1	268	406,4	340,8	292,8	364,8	262,4	427,2	553,6	374,4	243,4	342,4
LAC-2	275	412,8	334,4	294,4	368,0	265,6	428,8	556,8	377,6	246,7	344,0
LAC-3	286	412,8	737,6	521,6	604,8	488,0	825,6	968,0	766,4	263,0	726,4
LAC-4	276	422,4	542,4	408,0	526,4	360,0	624,0	828,8	540,8	258,2	529,6

4.3 Resistência ao puncionamento

A resistência ao puncionamento da região maciça em torno dos pilares, no estado limite último, é verificada pelas normas ACI 318-2002 [9], CEB-FIP MC 1990 [1], NBR 6118:2003 [5] e NBR 6118:1978 [8]. É importante destacar que nenhuma armadura de cisalhamento foi disposta na região maciça das oito lajes ensaiadas. A resistência do concreto encontrada no laboratório para as lajes foi admitida igual a resistência característica do concreto ($f_{ck} \equiv f_c$). Todos os respectivos coeficientes de segurança foram utilizados ($\gamma_c = 1,4$ ou $1,5$ e $\gamma_s = 1,15$).

A Tab. 9 apresenta as estimativas obtidas com a utilização do ACI 318M - 2002 [9], e uma comparação entre essas estimativas e os resultados experimentais obtidos. Para as lajes LAC-2 a LAC-4, que romperam por punção-flexão, as cargas últimas obtidas experimentalmente são em média 90,3% das cargas estimadas, indicando que os resultados ficaram em média contra a segurança 10,7% nesses casos. Observe-se que a segurança para a ruptura por punção seria ainda superior caso a ruptura fosse somente por punção, e não associada à flexão (escoamento da armadura), observada nesse caso devido à pequena taxa de armadura de flexão utilizada nas lajes.

A Tab. 10 apresenta as estimativas obtidas com a utilização do CEB-FIP MC 1990 [1], e uma comparação entre essas estimativas e os resultados experimentais obtidos. Para as lajes LAC-2 a LAC-4, que romperam por punção-flexão, as cargas últimas obtidas experimentalmente são em média 12,3% superiores às cargas estimadas. Observe-se que igualmente à verificação pelo ACI 318M - 2002 [9], a segurança para a ruptura por punção seria ainda superior caso a ruptura fosse somente por punção.

Tabela 9 - Cargas últimas estimadas para ruptura por punção para o ACI 318M – 2002 [9]

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	f_{cs} (MPa)	V_k (kN)	P_u (kN)	P_u/V_k	Modo de ruptura observado
LR-1	96	0,40	24	548	229	239	1,04	flexão*-cisalh. nervura
LR-2	98	0,39	30	548	263	238	0,90	flexão*-cisalh. nervura
LD-1	99	0,38	34	548	347	278	0,80	flexão*-cisalh. nervura
LD-2	89	0,46	32	548	294	267	0,91	flexão (DPE)-simétrico
LAC-1	103	0,36	35	548	302	268	0,89	flexão(DPE)-assimétrico
LAC-2	103	0,36	36	548	307	275	0,90	flexão*-punção
LAC-3	103	0,36	36	548	307	286	0,93	flexão*-punção
LAC-4	104	0,35	37	548	315	276	0,88	flexão*-punção
flexão* - escoamento da armadura de flexão								
flexão (DPE) - "ruptura" por deformação plástica excessiva								

Tabela 10 – Cargas últimas estimadas para ruptura por punção para o CEB-FIP MC 1990 [1]

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	f_{cs} (MPa)	V_k (kN)	P_u (kN)	P_u/V_k	Modo de ruptura observado
LR-1	96	0,40	24	548	206	239	1,16	flexão*-cisalh. nervura
LR-2	98	0,39	30	548	224	238	1,06	flexão*-cisalh. nervura
LD-1	99	0,38	34	548	252	278	1,10	flexão*-cisalh. nervura
LD-2	89	0,46	32	548	230	267	1,16	flexão (DPE)-simétrico
LAC-1	103	0,36	35	548	244	268	1,10	flexão(DPE)-assimétrico
LAC-2	103	0,36	36	548	247	275	1,11	flexão*-punção
LAC-3	103	0,36	36	548	247	286	1,16	flexão*-punção
LAC-4	104	0,35	37	548	251	276	1,10	flexão*-punção
flexão* - escoamento da armadura de flexão								
flexão (DPE) - "ruptura" por deformação plástica excessiva								

A Tab. 11 apresenta as estimativas obtidas com a utilização da NBR 6118:2003 [5], e uma comparação entre essas estimativas e os resultados experimentais obtidos. Para as lajes LAC-2 a LAC-4, que romperam por punção-flexão, as cargas últimas obtidas experimentalmente são em média 11,0% superiores às cargas estimadas. Observa-se que igualmente às verificações pelo ACI 318M – 2002 [9] e pelo CEB-FIP MC 1990 [1], a segurança para a ruptura por punção seria ainda superior caso a ruptura fosse somente por punção.

A Tab. 12 apresenta as estimativas obtidas com a utilização da NBR 6118:1978 [8], e uma comparação entre essas estimativas e os resultados experimentais obtidos. Para as lajes LAC-2 a LAC-4, que romperam por punção-flexão, as cargas últimas obtidas experimentalmente são em média 42,0% superiores às cargas estimadas. Observe-se que igualmente às verificações pelas normas anteriores, a segurança para a ruptura por punção seria ainda superior caso a ruptura fosse somente por punção.

Tabela 11 – Cargas últimas estimadas para ruptura por punção para a NBR 6118:2003 [5]

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	f_{cs} (MPa)	V_k (kN)	P_u (kN)	P_u/V_k	Modo de ruptura observado
LR-1	96	0,40	24	548	208	239	1,15	flexão*-cisalh. nervura
LR-2	98	0,39	30	548	227	238	1,05	flexão*-cisalh. nervura
LD-1	99	0,38	34	548	255	278	1,09	flexão*-cisalh. nervura
LD-2	89	0,46	32	548	233	267	1,15	flexão (DPE)-simétrico
LAC-1	103	0,36	35	548	247	268	1,09	flexão(DPE)-assimétrico
LAC-2	103	0,36	36	548	250	275	1,10	flexão*-punção
LAC-3	103	0,36	36	548	250	286	1,14	flexão*-punção
LAC-4	104	0,35	37	548	254	276	1,09	flexão*-punção
flexão* - escoamento da armadura de flexão								
flexão (DPE) - "ruptura" por deformação plástica excessiva								

Tabela 12 – Cargas últimas estimadas para ruptura por puncionamento para a NBR 6118:1978 [8]

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	f_{ys} (MPa)	V_k (kN)	P_u (kN)	P_u/V_k	Modo de ruptura observado
LR-1	96	0,40	24	548	146	239	1,64	flexão*-cisalh. nervura
LR-2	98	0,39	30	548	168	238	1,42	flexão*-cisalh. nervura
LD-1	99	0,38	34	548	221	278	1,26	flexão*-cisalh. nervura
LD-2	89	0,46	32	548	189	267	1,42	flexão (DPE)-simétrico
LAC-1	103	0,36	35	548	192	268	1,40	flexão(DPE)-assimétrico
LAC-2	103	0,36	36	548	195	275	1,41	flexão*-punção
LAC-3	103	0,36	36	548	195	286	1,47	flexão*-punção
LAC-4	104	0,35	37	548	200	276	1,38	flexão*-punção
flexão* - escoamento da armadura de flexão								
flexão (DPE) – "ruptura" por deformação plástica excessiva								

5 Conclusões

O trabalho apresentou uma análise experimental do comportamento de oito lajes cogumelo nervuradas de concreto armado, com pilares centrais metálicos, submetidas a carregamento simétrico, com a presença de fibras de aço incorporadas ao concreto (2 lajes), e com três tipos de armadura de cisalhamento no combate ao esforço cortante nas nervuras (4 lajes).

Todas as barras de aço instrumentadas escoaram para uma carga média de 56% da carga de ruptura das lajes ensaiadas e que o estado limite último de resistência à flexão nas lajes já havia sido atingido, indicando um comportamento típico de ruptura por flexão para todas as lajes. Esse comportamento era esperado, em função das pequenas taxas de armadura de flexão utilizadas nas lajes.

Apesar de somente duas lajes terem sido ensaiadas com fibras de aço incorporadas, para um volume de fibra em relação ao volume de concreto de 0,5%, observou-se um aumento médio de resistência de 14,3% em relação às lajes de referência, e a mudança do modo de ruptura em uma das lajes, que passou de cisalhamento na nervura para flexão por deformação plástica excessiva na laje LD-2, com fibra de aço incorporada.

Todas as armaduras de cisalhamento utilizadas nas nervuras mostraram-se eficientes, pois mudaram o modo de ruptura final de cisalhamento na nervura, por um outro tipo de ruptura (flexão ou flexão e punção). As instrumentações dos pinos e estribos indicaram o surgimento de microfissuras nas nervuras e que as deformações na armadura transversal mantiveram-se bem abaixo da deformação de escoamento do aço até a carga de ruptura das lajes. Das três armaduras de cisalhamento, o estribo inclinado e aberto mostrou-se ser mais eficiente em relação às demais armaduras de cisalhamento, devido a sua inclinação ser quase perpendicular à superfície de ruptura. A vantagem desse estribo é que ele pode ser feito no local e posicionado logo após o posicionamento da armadura de flexão.

As estimativas de resistência última ao cisalhamento das nervuras para lajes sem armadura ou fibras nas nervuras são muito conservadoras, com a utilização das normas empregadas. Para as lajes com a incorporação de fibra de aço as estimativas são também conservadoras mesmo com a consideração da incorporação de fibras em todos os métodos conforme a metodologia sugerida por Holanda [11] para o ACI. Para as lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras a maioria das cargas últimas experimentais obtidas nos ensaios, foram inferiores às estimadas pelas normas para uma ruptura por tração diagonal, indicando que a ruptura não seria esperada. No entanto, algumas estimativas foram inferiores as dos resultados experimentais, indicando que as expressões devem ser mais bem estudadas e eventualmente corrigidas.

As cargas últimas obtidas experimentalmente são em média 9,7%, 12,3%, 11,0% e 38,9% superiores às cargas estimadas para as verificações pelas normas do ACI 318M – 2002 [9], CEB-FIP MC 1990 [1], NBR 6118:2003 [5] e NBR 6118:1978 [8], para uma ruptura por punção, respectivamente. Nota-se que para esta última norma os resultados são mais conservadores do que as demais. A segurança para a ruptura por punção por todas as normas seria ainda superior caso a ruptura fosse somente por punção nas três lajes, e não associada à ruptura também por flexão.

6 Referências

- [1] COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. CEB-FIP. **Model Code 1990**. Final Draft. Bulletin D'Information, No 203-205.CEB. Lausanne, July 1991.
- [2] OLIVEIRA, D. R. C. **Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Alta Resistência com Armadura de Cisalhamento Inclinada de Punção**. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília, 1997, 137 p.
- [3] COELHO, A. E. G. **Puncionamento em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Resistência de 30 MPa e Armadura de Cisalhamento Vertical e Inclinada**. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília, 1999, 140 p.
- [4] ANDRADE, J. L. S. **Estudo Experimental da Inclinação de Estribos Abertos em Lajes Cogumelo de Concreto Armado**. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília, 2000, 142 p.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.
- [6] HALLGREN, M. **Punching Shear Capacity Slabs**. Royal Institute of Technology, Doctoral Thesis, Stockholm - Swenden, November, 1996, 206 p.
- [7] OLIVEIRA, D. R. C. **Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares**. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, Brasília, 2003, 214 p.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado -Procedimento**. Rio de Janeiro, 1978.
- [9] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) – Building Code Requirements for Structural Concrete (**ACI 318M-02**) and Commentary (**ACI 318 RM-02**). Michigan, 2002.
- [10] ZSUTTY, T. C. **Beams Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data**. ACI Journal, pp. 943-951. November 1968.
- [11] HOLANDA, K. M. A. **Análise dos Mecanismos Resistentes e das Similaridades de Efeitos da Adição de Fibras de Aço na Resistência e na Ductilidade à Punção de Lajes-Cogumelo e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, São Carlos, São Paulo, 2002, 281 p.