

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES LISAS NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO AO CISALHAMENTO

Shirley de Melo Souza⁽¹⁾, Dênio Ramam Carvalho de Oliveira⁽²⁾

Resumo

Os sistemas estruturais com lajes lisas nervuradas são os mais utilizados no Brasil quando a exigência principal é a disponibilidade de “layouts” flexíveis. Além de vencer grandes vãos, as lajes lisas nervuradas proporcionam maior facilidade na execução de tubulações e acarretam certa economia à estrutura. Entretanto uma das principais desvantagens destes sistemas é o risco de punção ou cisalhamento nas nervuras. Poucos estudos têm sido realizados no Brasil no sentido de elucidar dúvidas em relação ao comportamento destas lajes quando a resistência à flexão é satisfatória e as resistências ao cisalhamento nas nervuras e ao puncionamento tornam-se concorrentes. Este trabalho traz as análises experimentais de 8 lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto armado sujeitas a carregamento centrado. As dimensões das lajes foram constantes e iguais a 1.800 mm x 1.800 mm x 140 mm. As nervuras apresentaram 80 mm de altura por 50 mm de base e a resistência do concreto à compressão foi de aproximadamente 40 MPa. Os resultados experimentais foram comparados aos estimados pela norma brasileira NBR 6118:2003. Verificou-se que a resistência das nervuras não é satisfatoriamente estimada pela norma, subestimando os resultados para as nervuras sem e com armadura de cisalhamento.

Palavras-chave: Concreto armado, Laje nervurada, Laje lisa, Cisalhamento, Punção.

⁽¹⁾ *Doutoranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio de Janeiro,
Shirley_malloc@yahoo.com.br*

⁽²⁾ *Ph.D., Lecturer, Federal University of Para, denio@ufpa.br*

1 INTRODUÇÃO

A utilização de vãos cada vez maiores e a disposição de paredes de alvenaria diretamente sobre as lajes, principalmente por exigências da arquitetura, são cada vez mais comuns nos pavimentos de edifícios. O uso de lajes lisas maciças, nesses casos, leva a espessura elevada, podendo tornar a estrutura antieconômica, já que parte da capacidade resistente da laje é utilizada para combater as solicitações decorrentes do peso próprio.

Neste caso, a utilização de lajes lisas nervuradas é uma alternativa atrativa, pois é um sistema estrutural que consiste de lajes apoiadas diretamente nos pilares (sem vigas), através de uma região maciça, e de nervuras uni ou bidirecionais, onde parte do concreto abaixo da linha neutra é eliminado, sendo substituído por um material de enchimento, onde normalmente são usados blocos de poliestireno expandido (EPS), ou ainda fôrmas removíveis, reduzindo o peso próprio da laje e possibilitando vãos maiores.

O sistema estrutural com lajes lisas nervuradas apresenta diversas vantagens em relação ao sistema convencional de lajes (vigas e pilares) de mesmos vãos, podendo-se citar: redução da quantidade de formas, consumo de materiais e mão de obra, menor peso próprio, provocando um alívio nas fundações, através da utilização ou não de material inerte entre as nervuras, maior liberdade e flexibilidade para adaptação do espaço interno da obra (devido a ausência de vigas), sendo indicado principalmente para edificações residenciais, hospitalares, garagens pela facilidade da passagem de dutos e tubulações especiais, além de permitir vencer grandes vãos devido ao menor peso próprio, liberando espaços que seriam ocupados pelos pilares.

Apesar das vantagens citadas, a eliminação das vigas acarreta algumas desvantagens, tais como: aumento dos deslocamentos verticais (flechas) em relação às lajes convencionais com mesmos vãos, diminuição da estabilidade global da estrutura com relação às ações horizontais, possibilidade de ruptura por punção e, conseqüentemente, colapso progressivo, além da possibilidade de ruptura por cisalhamento nas nervuras próximas à região maciça de concreto.

A ruína por punção pode ocorrer devido à aplicação de cargas concentradas, ou distribuídas em pequenas áreas, diretamente sobre as lajes. Segundo Souza e Cunha (1998), este tipo de ruína ocorre de forma frágil e brusca (sem aviso prévio), pois normalmente ocorre antes que a armadura de flexão atinja a tensão de escoamento, podendo ocasionar o colapso progressivo da estrutura. Dessa forma, é objetivo deste trabalho avaliar o comportamento de 8 lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto

armado, com armadura de cisalhamento nas nervuras e armadura de punção na região maciça, submetidas à carregamento centrado.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Características das Lajes

Foram realizados ensaios em 8 lajes lisas nervuradas quadradas bidirecionais de concreto armado, com 1.800 mm de lado e 140 mm de espessura. Foi aplicado carregamento de baixo para cima e no meio do vão através de uma placa metálica quadrada com 85 mm de lado e 50 mm de espessura, simulando a ligação laje-pilar.

As armaduras de flexão foram as mesmas para todas as lajes, constituídas por barras de 6,0 mm e 12,5 mm de diâmetro na direção x e barras de 12,5 mm de diâmetro na direção y, proporcionando uma taxa de armadura de flexão (ρ) de aproximadamente 1,40%, determinada a partir das recomendações do CEB-FIP MC90.

As principais variáveis consideradas foram os tipos de armadura de cisalhamento nas nervuras, constituídas por treliças, estribos verticais fechados e estribos abertos inclinados a 45° e a utilização de estribo inclinado à 45° com armadura de punção na região maciça. A Tabela 1 apresenta as principais características das lajes e as dimensões são apresentadas na Figura 1.

Tabela 1: Características das lajes

Lajes	ρ	Altura Útil	f_c	Armadura de cisalhamento		
	(%)	d (mm)	(MPa)	Nervura (direção x)	Nervura (direção y)	Punção
L1	1,27	120	41	-	-	-
L2	1,44	106	37	treliça	estribo vertical fechado	-
L3	1,37	111	38	treliça	estribo vertical fechado	-
L4	1,29	118	39	treliça	estribo vertical fechado	-
L5	1,33	115	38	estribo vertical fechado	estribo vertical fechado	-
L6	1,47	104	40	treliça	estribo vertical fechado	estribo aberto inclinado
L7	1,36	112	41	estribo vertical fechado	estribo vertical fechado	estribo aberto inclinado
L8	1,41	108	39	estribo aberto inclinado	estribo aberto inclinado	estribo aberto inclinado

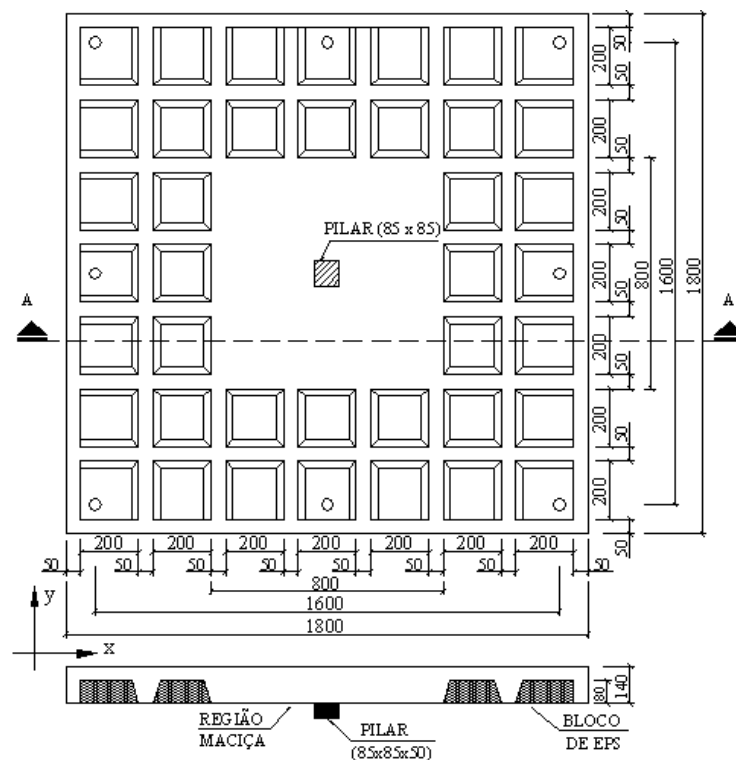


Figura 1: Planta baixa e seção transversal da laje (corte AA)

A armadura principal, localizada na superfície superior da laje, foi composta por 21 barras de 12,5 mm e 6 barras de 6,0 mm de diâmetro na direção x e 21 barras de 12,5 mm de diâmetro na direção y. Na superfície inferior da laje foram colocadas apenas armaduras de distribuição posicionadas longitudinal e transversalmente, compostas por 12 barras de 4,2 mm de diâmetro em cada direção, sendo dispostas 2 barras por nervura. A Figura 2 mostra o posicionamento das armaduras de flexão.

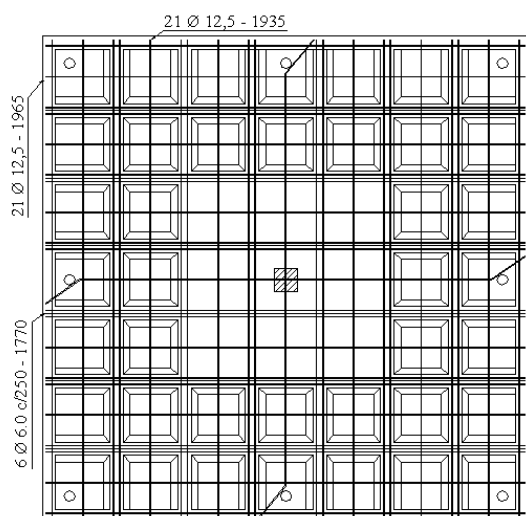


Figura 2: Posicionamento das armaduras de flexão

Para as lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras foram utilizados 3 tipos diferentes de armadura, constituídos, por treliças (TR 8644), com o objetivo de se investigar a eficiência das diagonais no combate ao cisalhamento, estribos verticais fechados e estribos abertos inclinados a 45°, sendo que, todos os estribos utilizados nas nervuras tinha diâmetro de 4,2 mm. A Figura 3 mostra os 3 tipos de armadura utilizados.

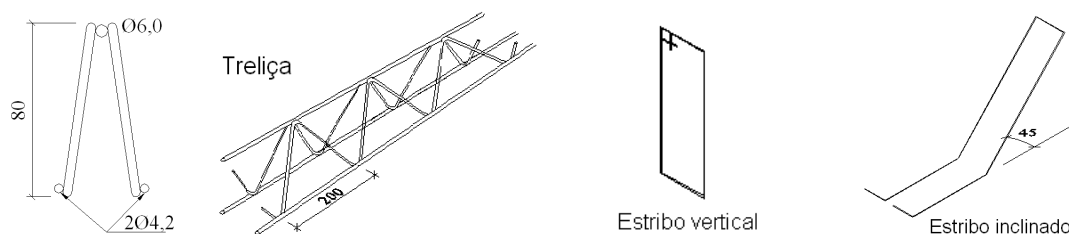


Figura 3: Armaduras de cisalhamento utilizadas nas nervuras

Em relação às armaduras de combate à punção na região maciça, foram utilizados estribos abertos com inclinação de 45°, diâmetro de 6,3 mm e dispostos em 3 camadas distribuídas em cruz. A escolha por este tipo de armadura de cisalhamento se deu pela facilidade de instalá-los nas lajes, mas principalmente por apresentarem desempenho superior em relação aos estribos verticais, referente à carga de ruptura, segundo comprovado experimentalmente por Oliveira (1998). A Figura 4 mostra o posicionamento das armaduras de cisalhamento nas nervuras e de punção na região maciça.

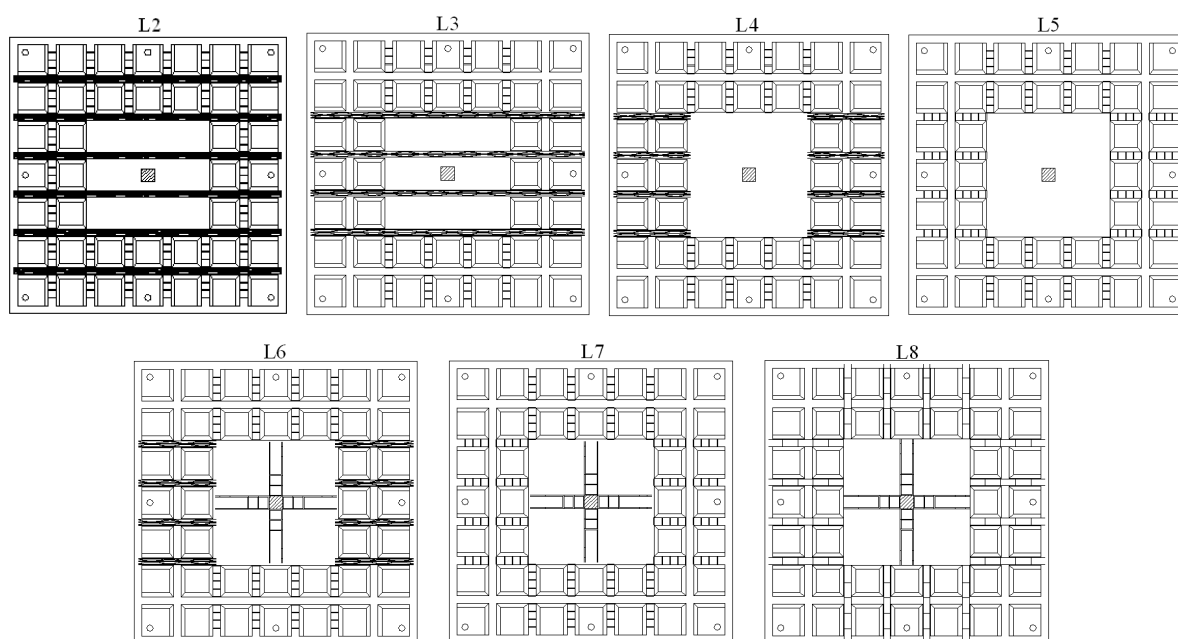


Figura 4: Armaduras de cisalhamento (nervura e região maciça)

2.2 Instrumentação

2.2.1 Deslocamento

Os deslocamentos verticais (flechas) foram medidos através de 7 deflectômetros posicionados no meio do vão, distribuídos nas duas direções (x e y), espaçados de 174,5 mm entre si e em contato com a superfície superior das lajes. A Figura 5 mostra o esquema de posicionamento dos deflectômetros, indicados pela letra D, na laje.

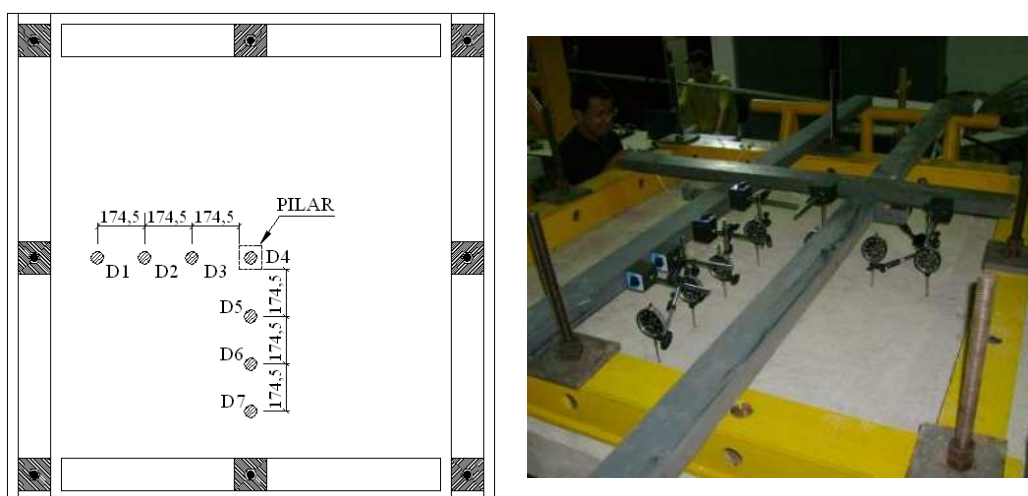


Figura 5: Posicionamento dos deflectômetros nas lajes

2.2.2 Superfície do concreto

Para medir as deformações no concreto, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EERs) que foram fixados na superfície inferior de todas as lajes, sendo ligados ao aparelho utilizado para leitura das deformações (Spider). Foram fixados 4 EERs (C1, C2, C3 e C4) na laje sem armadura de cisalhamento (L1) e nas lajes em que a armadura de cisalhamento era diferente nas direções x e y (L2, L3, L4 e L6), enquanto que nas lajes com mesma armadura de cisalhamento nas duas direções (L5, L7, L8) foram fixados apenas 2 EERs (C1 e C3).

Os EERs fixados na região maciça foram posicionados a uma distância de 55 mm da face do pilar, e apenas na direção tangencial, sendo tal posicionamento justificado pelo fato de se ter uma predominância das tensões tangenciais sobre as tensões radiais neste tipo de sistema estrutural (Oliveira, 1998). O posicionamento dos extensômetros na superfície do concreto é mostrado na Figura 6.

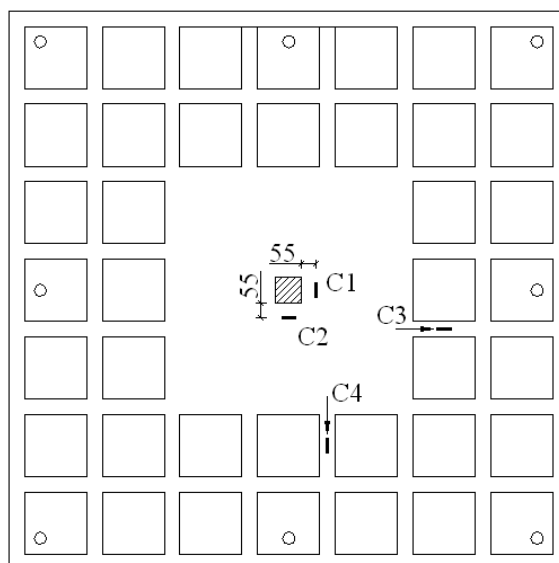


Figura 6: Posicionamento dos extensômetros na superfície de concreto

2.2.3 Armadura de flexão

As deformações na armadura de flexão foram monitoradas da mesma forma que foram monitoradas as deformações no concreto, levando-se em consideração o tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras nas direções x e y, mas sempre no sentido das tensões tangenciais das lajes, pois, assim como no concreto, as deformações tangenciais são bem mais significativas que as radiais. Para cada barra instrumentada foi utilizado um extensômetro, sendo fixado a meia altura da barra. As lajes L1, L2, L3, L4 e L6 tiveram o mesmo posicionamento e quantidade de extensômetros (E1, E2, E3 e E4), da mesma forma, as lajes L5, L7 e L8 tiveram o mesmo posicionamento e quantidade de extensômetros (E1 e E3). A Figura 7 mostra o posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão e um detalhe da fixação do extensômetro na barra.

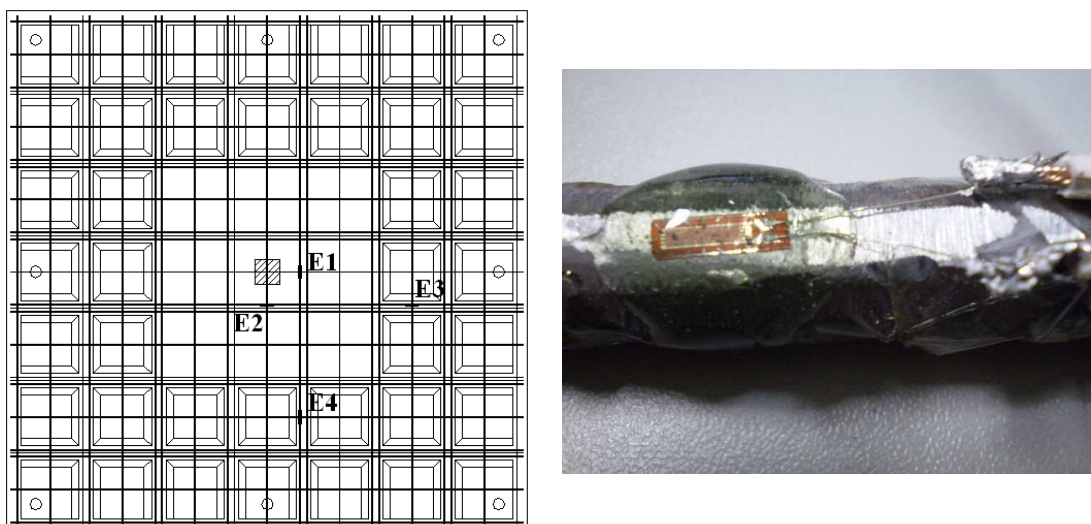


Figura 7: Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão

2.2.4 Armadura de Cisalhamento

Para medir as deformações nas armaduras de cisalhamento nas nervuras e na região maciça, foram fixados EERs do mesmo tipo utilizados nas armaduras de flexão. Nas armaduras de cisalhamento compostas por treliças, foi colocado 1 extensômetro na diagonal tracionada e nas armaduras de cisalhamento compostas por estribos, tanto vertical fechado, quanto aberto inclinado a 45°, foi fixado 1 extensômetro em um dos ramos do estribo, posicionado a meia altura (Figura 8).

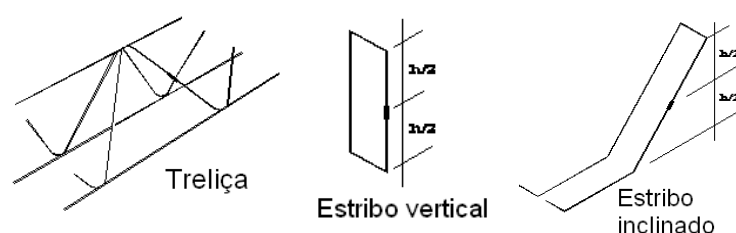


Figura 8 – Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento

2.3 Sistema de ensaio

O sistema de ensaio consistiu de lajes apoiadas em todos os bordos através de 4 vigas metálicas de reação, simulando um apoio contínuo às lajes. A carga foi aplicada através de um cilindro hidráulico em uma placa metálica simulando a ação de um pilar, alimentado por uma bomba hidráulica, cuja intensidade era medida por célula de carga

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.

Terminado o processo de montagem do sistema, foi aplicado o carregamento no sentido de baixo para cima, adotando-se um incremento de carga de aproximadamente 10% da carga de ruptura estimada. Para cada incremento de carga foram medidos os deslocamentos verticais através dos 7 deflectômetros e as leituras das deformações nas armaduras e no concreto foram feitas através de 2 módulos de excitação modelo Spider 8. Os detalhes do sistema de ensaio são exibidos nas Figuras 9 e 10.

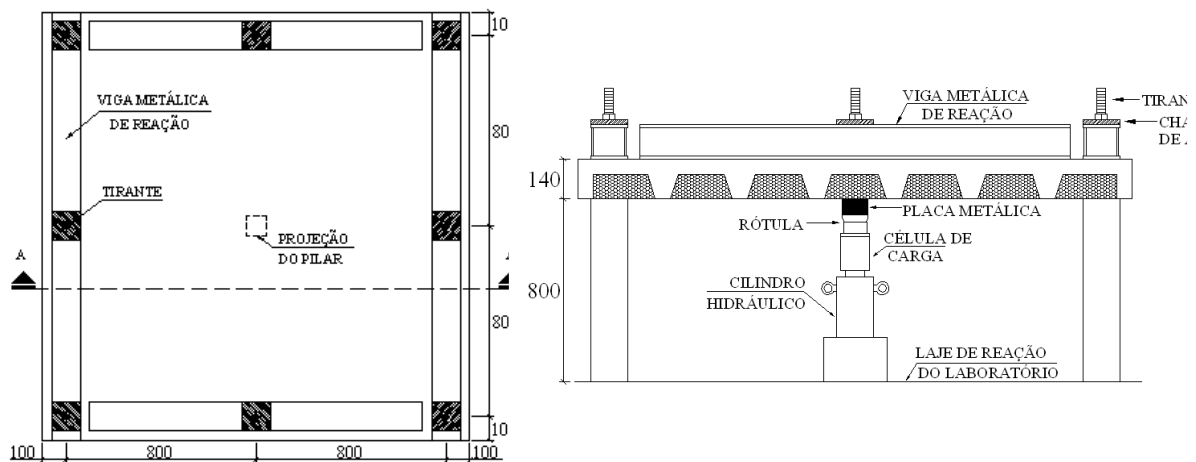


Figura 9: Detalhe do sistema de ensaio



Figura 10: Sistema de ensaio utilizado

3 RESULTADOS

3.1 Materiais

As propriedades mecânicas do concreto foram determinadas a partir de ensaios de resistência à compressão (NBR 5739/94), resistência à tração por compressão diametral (NBR 7227/94) e do módulo de elasticidade longitudinal (NBR 8522/84). Os resultados apresentados na Tabela 2 representam a média entre os 3 corpos de prova cilíndricos ensaiados para cada laje para as propriedades mecânicas do concreto, nas respectivas idades. As características dos aços utilizados nesta pesquisa foram obtidas a partir do ensaio de tração (NBR 6152/92) e são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do concreto

Laje	Idade	f_c	f_t	$E_{c\ Exp}$
	(dias)	(MPa)	(MPa)	(GPa)
L1	54	37	3,49	24,9
L2	49	38	3,38	17,8
L3	64	41	2,47	17,9
L4	60	39	2,86	18,7
L5	56	38	2,78	26,5
L6	70	40	2,06	27
L7	68	41	1,75	27,8
L8	74	39	1,75	27,6

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos aços utilizados

ϕ	f_{ys}	f_u	ϵ_{ys}	E_s
(mm)	(MPa)	(MPa)	(‰)	(GPa)
4,2	630	705	4,7	233
6,0	590	688	4,5	236
6,3	588	794	4,43	242
12,5	601	740	2,5	255

3.2 Deslocamentos

Os deflectômetros foram distribuídos nas duas direções (x e y) com a finalidade de comparar o comportamento das lajes, devido à variação da armadura de cisalhamento nas nervuras e ao uso de armadura de punção. A Figura 11 mostra os deslocamentos verticais observados nas lajes.

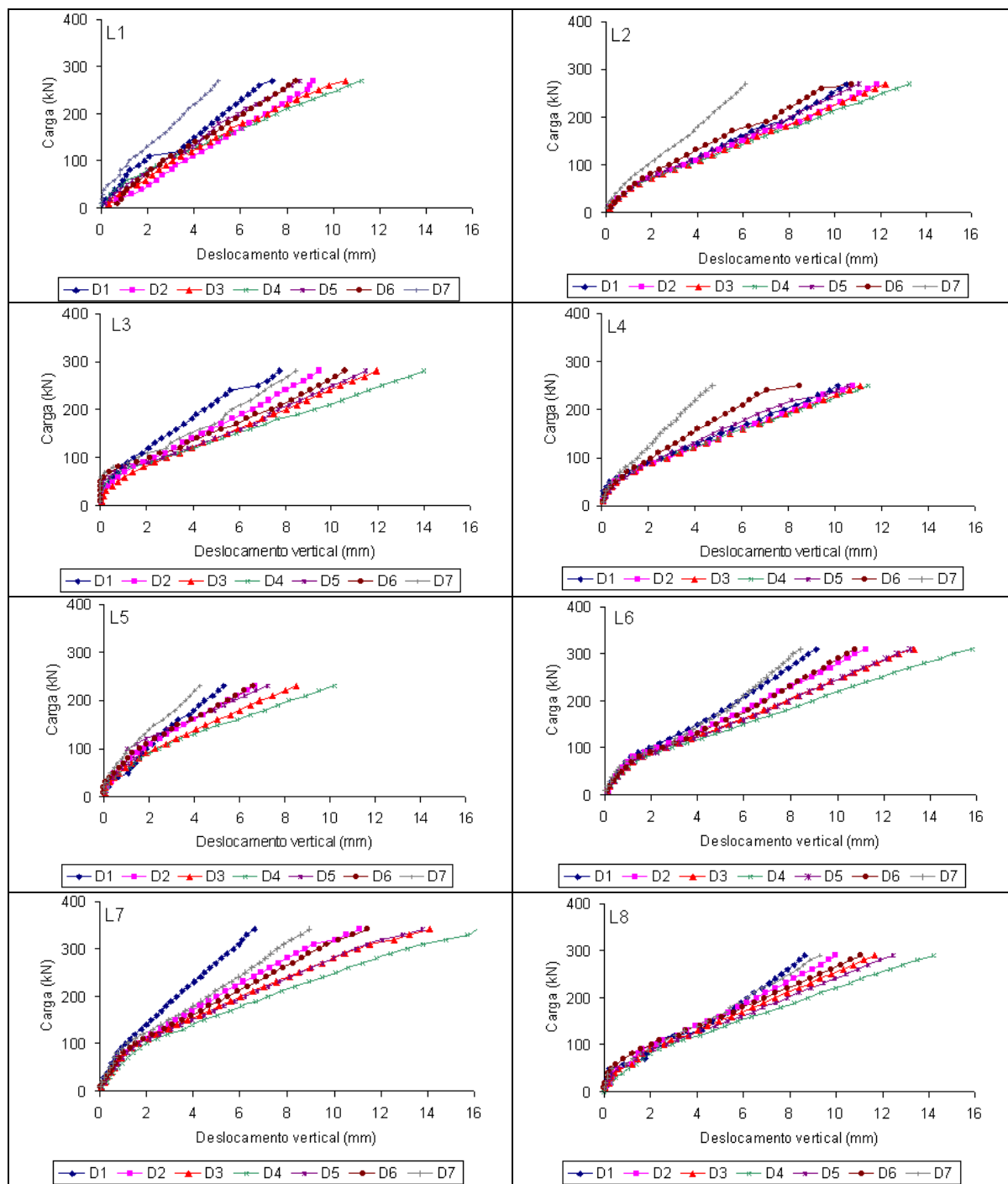


Figura 11: Deslocamentos verticais nas lajes

A Figura 12 mostra o gráfico dos deslocamentos verticais centrais (D4) de todas as lajes para cada carregamento aplicado.

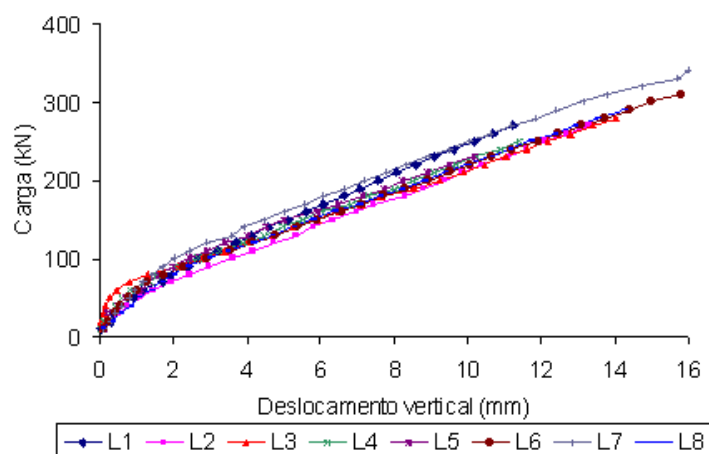


Figura 12: Deslocamentos verticais centrais (D4) das lajes

Pode-se observar nos gráficos que os deslocamentos verticais das lajes apresentaram bastante simetria para os pontos correspondentes nas duas direções (D2≈D6; D3≈D5). O deflectômetro central (D4) posicionado na região carregada apresentou os maiores deslocamentos verticais para todas as lajes, como era esperado. O gráfico do deslocamento máximo (figura 12) mostra um comportamento semelhante entre as lajes e o ganho de deformabilidade que se obteve com a introdução da armadura de punção (L6, L7 e L8), conferindo, a estas lajes, um comportamento mais dúctil devido ao acréscimo de carga proporcionado por esse tipo de armadura.

3.3 Deformações do concreto

Optou-se por medir apenas as deformações tangenciais, pois são comprovadamente superiores às deformações radiais (Oliveira, 1998 e Soares, 2004). As lajes L6 e L7 foram as que apresentaram as maiores deformações (4,19‰ e 3,64‰, respectivamente) indicando a ocorrência do esmagamento do concreto nessas lajes. A Figura 13 mostra as deformações máximas do concreto para todas as lajes.

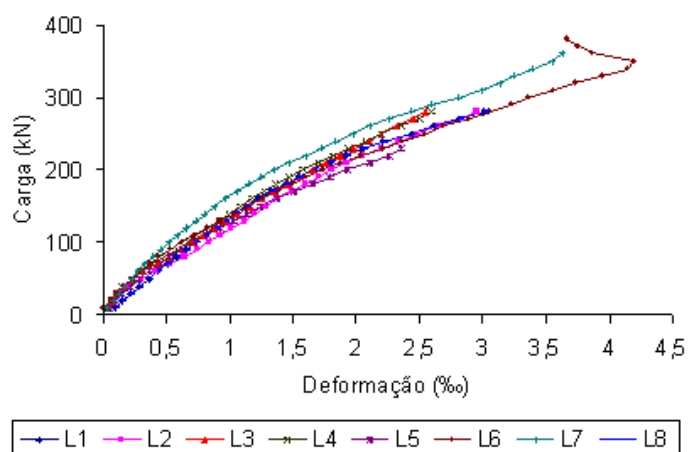


Figura 13 – Deformações máximas do concreto das lajes

3.4 Deformações da armadura de flexão

As maiores deformações foram registradas nas proximidades do pilar (E1) na laje L7, com a armadura de flexão apresentando deformação máxima de 4,38%, atingindo o escoamento (deformação maior que 2,5%). Além da laje L7, as armaduras de flexão das lajes L1 (3,76%), L2 (2,72%), e L6 (3,79%) também escoaram, caracterizando um comportamento típico de ruptura por flexão. A Figura 14 mostra as deformações máximas nas armaduras de flexão para as lajes.

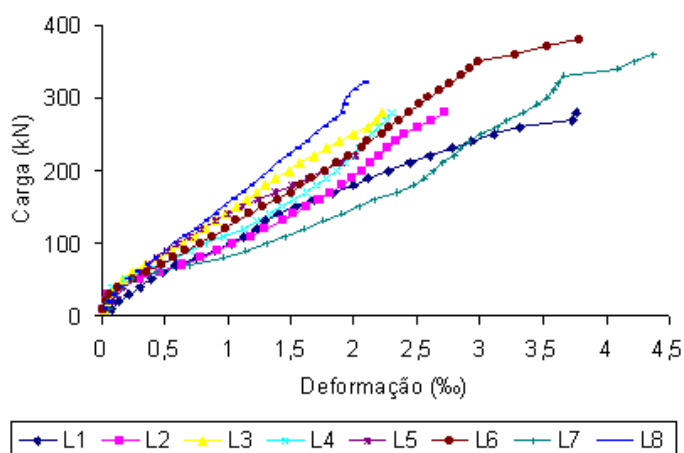


Figura 14: Deformações máximas da armadura de flexão das lajes

3.5 Deformações da armadura de cisalhamento

As deformações das armaduras de cisalhamento nas nervuras foram bem menores que a deformação de escoamento do aço ($\varepsilon_{ysw}=4,7\%$). Entretanto, em algumas lajes (L2, L6 e L7), possibilitaram uma mudança no modo de ruptura de cisalhamento nas nervuras para flexão, mostrando-se eficientes, principalmente as armaduras inclinadas (treliça e estribo aberto inclinado a 45°) por proporcionarem uma maior rigidez às lajes. A Figura 15 mostra as deformações na armadura de cisalhamento em duas das lajes ensaiadas. Em relação às armaduras de punção (estribo inclinado a 45°), apesar de terem sido bastante solicitadas, nenhum estribo apresentou escoamento (deformação maior que $4,43\%$), sendo, a deformação máxima alcançada, de $3,34\%$, verificada na laje L8 (laje com estribo inclinado nas nervuras), ou seja, apresentaram um melhor desempenho quando associadas ao uso de estribos inclinados nas nervuras. Observa-se nos gráficos (Figura 16) que com aproximadamente 80% da carga de ruptura, as armaduras passaram a deformar de maneira não mais proporcional ao acréscimo de carga, indicando que o escoamento não estava longe de ocorrer e confirmando o ganho de ductilidade que as lajes obtiveram com a introdução da armadura transversal.

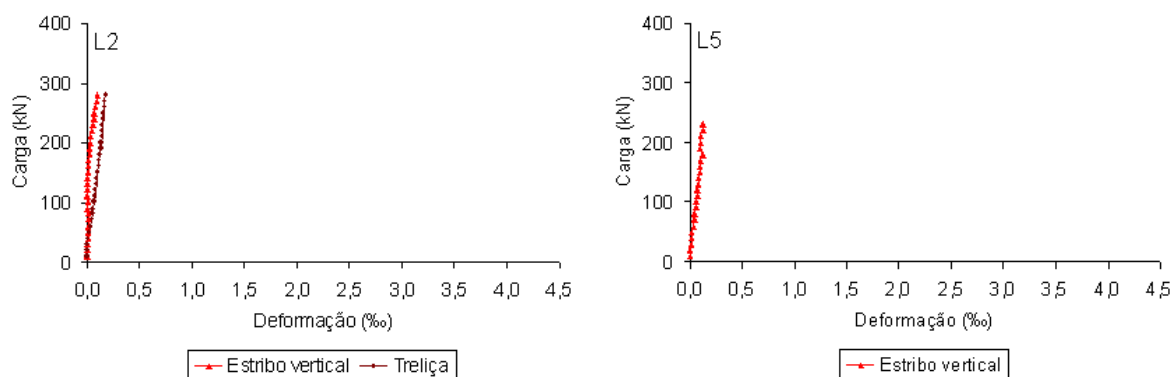


Figura 15 – Deformações das armaduras de cisalhamento nas nervuras das lajes L2 e L5

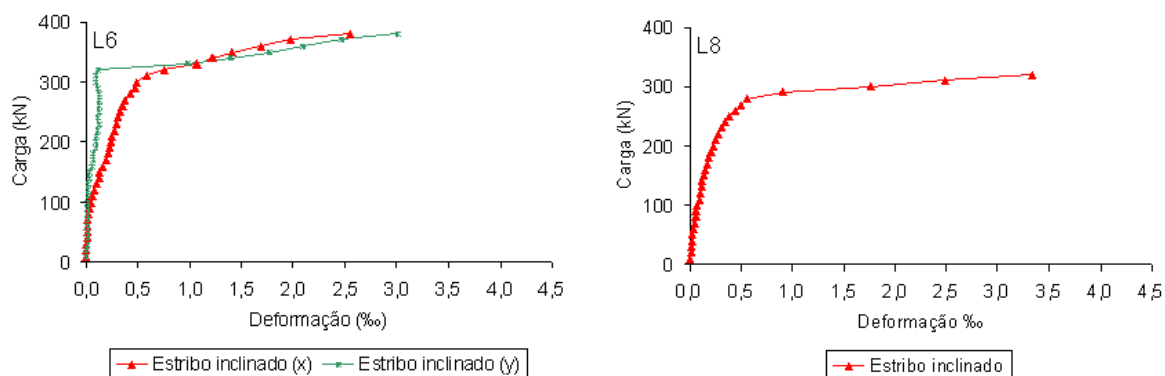


Figura 16: Deformações das armaduras de punção das lajes L6 e L8

3.6 Cargas e modos de ruptura

A utilização de armadura de cisalhamento nas nervuras não ocasionou ganhos na carga última, isso porque ora a resistência última à flexão tinha sido atingida ora a resistência última à punção, impossibilitando que as armaduras de cisalhamento fossem solicitadas de maneira a proporcionarem aumento nas cargas últimas. Em relação à armadura de punção, estas proporcionaram ganhos significativos para carga última, em relação à laje de referência (L1), conferindo às lajes, com esse tipo de armadura, um comportamento mais dúctil. A tabela 4 apresenta as cargas e os modos de ruptura observados nas lajes.

Tabela 4: Cargas e modos de ruptura das lajes

Laje	Altura Útil	ρ	f_c	Armadura de cisalhamento		P_u (kN)	Modo de Ruptura
	(mm)		(MPa)	nervura	punção		
L1	120	0,0127	41	-	-	280	flexão/punção
L2	106	0,0144	37	Treliça	-	278,5	flexão/punção
L3	111	0,0137	38	Treliça	-	287,5	punção
L4	118	0,0129	39	Treliça	-	287	punção
L5	115	0,0133	38	Estribo vertical fechado	-	235	punção
L6	104	0,0147	40	Treliça	Estribo inclinado	380	flexão/punção
L7	112	0,0136	41	Estribo vertical fechado	Estribo inclinado	361	flexão/punção
L8	108	0,0141	39	Estribo aberto inclinado	Estribo inclinado	322	punção

As lajes L1 (referência), L2, L6 e L7 tiveram o modo de ruptura classificado como flexão (com escoamento da armadura de flexão), seguido de punção (formação do cone de punção). As demais lajes romperam por punção, caracterizado por uma ruptura brusca.

3.7 Comparação entre os resultados experimentais e estimados

A Tabela 5 apresenta as cargas últimas estimadas pela NBR 6118/03 para resistência à punção e ao cisalhamento nas nervuras, a resistência à flexão das lajes obtida com a utilização da teoria das linhas de ruptura, através das equações desenvolvidas por Oliveira (2003) e as cargas últimas obtidas nos ensaios.

Tabela 5: Cargas últimas estimadas e experimentais

Laje	Altura útil (mm)	ρ	f_c (MPa)	P _{punção} (kN)	P _{cisalh.} (kN)	P _{flexão} (kN)	P _u (kN)	Modo de ruptura
L1	120	0,0127	41	345	144	363,1	280	flexão/punção
L2	106	0,0144	37	288	257	357,6	278,5	flexão/punção
L3	111	0,0137	38	307	271	359,1	287,5	punção
L4	118	0,0129	39	333	291	360,5	287	punção
L5	115	0,0133	38	320	228	359,1	235	punção
L6	104	0,0147	40	431	258	361,9	380	flexão/punção
L7	112	0,0136	41	477	229	363,1	361	flexão/punção
L8	108	0,0141	39	448	266	360,5	322	punção

De maneira geral, as estimativas normativas para resistência ao cisalhamento em lajes nervuradas se mostraram conservadoras, incluindo aquelas com armadura de cisalhamento nas nervuras, mostrando que a segurança para ruptura por cisalhamento seria ainda maior caso a ruptura se desse por cisalhamento nas nervuras.

Em relação à resistência ao puncionamento, as estimativas obtidas através da NBR 6118/03, mostraram que esta norma tende a superestimar os resultados, sendo em alguns casos considerados satisfatórios, apesar de nem sempre coincidir com o modo de ruptura observado e apresentou também alguns resultados conservadores.

Para resistência à flexão, pode ser observado que, com exceção da laje L6, todas as lajes apresentaram estimativas superiores aos resultados experimentais. Nas lajes sem armadura de punção a resistência foi superestimada em média 23%, indicando que uma ruptura por flexão estivesse longe de ocorrer. Porém, observa-se que as lajes L1 e L2 romperam por flexão. As lajes com armadura de punção L6 e L7 apresentaram resultados estimados bem próximos aos experimentais, sendo considerados satisfatórios, concordando com o modo de ruptura observado.

4 CONCLUSÕES

As lajes apenas com armadura de cisalhamento nas nervuras (L2, L3, L4 e L5) não alcançaram resistência significativa em relação à laje de referência (L1). Tal fato pode ser justificado devido aos efeitos de flexão (escoamento da armadura de flexão, alto grau de fissuração). Em relação às lajes com armadura de punção (L6, L7 e L8), estas apresentaram uma resistência superior em torno de 26% em relação à L1, confirmando a eficiência dos estribos inclinados como armadura de punção.

Para a laje de referência (L1) a resistência última foi demasiadamente subestimada para uma ruptura por cisalhamento nas nervuras. As demais lajes também apresentaram estimativas bastante inferiores aos resultados experimentais. Para as lajes que, além da armadura de cisalhamento nas nervuras, apresentaram armadura de punção (L6, L7 e L8), essa disparidade foi bem maior, resultando em cargas estimadas aproximadamente 2 vezes menores que as experimentais, uma vez que a contribuição da armadura de punção não é considerada neste dimensionamento.

Em relação às estimativas para ruptura por punção, a maioria dos resultados foi considerada satisfatória, com diferença entre os resultados experimentais em torno de 5%. Cabe ressaltar que nem sempre ocorreu ruptura por punção, mesmo para as lajes em que os resultados foram considerados satisfatórios.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e à empresa SAENGE pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739/94 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6152/92 – Materiais metálicos. Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222/94 – Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522/84 – Concreto -*

Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação –

Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ***NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto.*** Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, D. R. C., ***Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento ao Puncionamento.*** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília, 1998, 137p.

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, 214p.

SOARES, Y.V., ***Análise Experimental de Lajes Cogumelo Nervuradas de Concreto Armado com Pilares Metálicos.*** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília, 2004, 200p.

SOUZA, V. C. M. de, CUNHA, A. J. P. da, ***Lajes em Concreto Armado e Protendido.*** Rio de Janeiro Ed. UERJ, 1998, 580p.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE WAFFLE FLAT SLABS TO SHEAR

Abstract

The structural systems with waffle flat slabs are the most used in Brazil when the main exigency are flexible "layouts." Besides reaching great spans, the waffle flat slabs provide larger easiness in the execution of pipeline and they cart certain economy to the structure. However one of the main disadvantages of these systems is the punching risk or shear in the ribs. Few studies have been developed in Brazil in the sense to elucidate doubts in relation to the behavior of these slabs when the flexural resistance is satisfactory and the shear in the ribs and punching resistances become competitive. This work shows the experimental analyses of 8 two-way reinforced concrete waffle flat slabs under centered load. The dimensions of the slabs were constant and same the (1.800 x 1.800 x 140) mm. The ribs presented 80 mm (height) for 50 mm (width) and the compression resistance of the concrete was of approximately 40 MPa. The experimental results were compared to the observed ones with those estimated by the Brazilian code NBR 6118:2003. It was verified that the resistance of the ribs is not satisfactorily estimated by the code, underestimating the results too much for the ribs with and without shear reinforcement.

Key words: Reinforced concrete. Waffle slabs. Flat slab. Shear. Punching.

1 INTRODUCTION

The structural system with waffle flat slabs presents several advantages in relation to the conventional system of slabs (beams and columns) of same spans, as follows: reduction in the quantity of materials and greater freedom and flexibility to adapt the internal space (due the absence of beams). However, the elimination of beams carries some disadvantages, the main one, the possibility of failure by punching, characterized as the fragile and brusque type. Thus objective of this study is to evaluate the behaviour of 8 waffle flat slabs of reinforced concrete, with shear reinforcement in the ribs and in the solid area, under centered loads.

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

The tested slabs were square, with 1.800 mm of side and 140 mm of height. The rate of flexural reinforcement was same for all the slabs and the main variable considered were the type of shear reinforcement in the ribs constituted by trusses, vertical and inclined stirrups and the inclined stirrup use as shear reinforcement in the solid area. Table 1 presents the main characteristics of slabs and the dimensions are presented in Figure 1.

3 CONCLUSIONS

The slabs with only shear reinforcement in the ribs have not achieved significant resistance in relation to the reference slab (L1). This may be justified because of the effects of flexural. In relation to the slabs with shear reinforcement, these had a higher resistance in relation to the L1, confirming the efficiency of inclined stirrups as shear reinforcement.

Overall, the shear resistance estimates for waffle slabs were too low, including those with shear reinforcement in the ribs, showing that security for failure by shear would be even greater if the failure is that by shear in the ribs.

In relation to the estimates for failure by punching, the majority of results was considered satisfactory, with a difference between the experimental results around 5%. It is noteworthy that not always failure by punching occurred, even for the slabs on which the results were considered satisfactory.