

# Reinforced concrete waffle flat slabs under shearing

## *Lajes lisas nervuradas de concreto armado ao cisalhamento*



S. S. M. SOUZA<sup>a</sup>  
shirley\_mellocc@yahoo.com.br

D. R. C. OLIVEIRA<sup>b</sup>  
denio@ufpa.br

### Abstract

The structural systems with waffle flat slabs are the most used in Brazil when the main requirement is flexible “layouts” and long spans with reasonable economy. However, few studies have been developed in Brazil regarding 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 analysis of 8 two-way reinforced concrete waffle flat slabs under centered load. The dimensions of the slabs were the same and equal to 1800 mm x 1800 mm x 140 mm. The ribs were 80 mm (height) by 50 mm (width) and the compressive concrete strength was approximately 40 MPa. The experimental results were compared to 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, which excessively underestimates the results for ribs with and without shear reinforcement.

**Keywords:** reinforced concrete, waffle slab, flat slab, shearing, punching.

### Resumo

Os sistemas estruturais com lajes lisas nervuradas são os mais utilizados no Brasil quando a exigência principal é a disponibilidade de “layouts” flexíveis e grandes vãos com razoável economia. Entretanto, poucos estudos foram realizados no Brasil considerando o comportamento destas lajes quando a resistência à flexão é satisfatória e as resistências ao cisalhamento nas nervuras e ao punção 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 foram comparados aos estimados pela norma brasileira NBR 6118:2003 [1]. Verificou-se que a resistência das nervuras não é satisfatoriamente estimada pela norma, subestimando demasiadamente os resultados para as nervuras sem e com armadura de cisalhamento.

**Palavras-chave:** concreto armado, laje nervurada, laje lisa, cisalhamento, punção.

<sup>a</sup> Federal University of Para, PPGEC, shirley\_mellocc@yahoo.com.br, Augusto Correa Street, nº 01, district Guama, Belem, Para, Brazil.

<sup>b</sup> Federal University of Para, PPGEC, denio@ufpa.br, Augusto Correa Street, nº 01, district Guama, Belem, Para, Brazil.

## 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 espessuras elevadas, 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 eliminada, 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 em lajes lisas nervuradas apresenta diversas vantagens em relação ao sistema convencional de lajes maciças (vigas e pilares) de mesmos vãos, podendo-se citar a redução na quantidade de formas, no consumo de materiais e mão-de-obra, e menor peso próprio, gerando um alívio nas fundações, com ou sem material inerte entre as nervuras. Tem-se também maior liberdade e flexibilidade para adaptação do espaço interno da obra (devido à ausência de vigas), sendo indicado principalmente para edificações residenciais, hospitalares e garagens, pela facilidade da passagem de dutos e tubulações especiais.

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 devido 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) [2], este tipo de ruína ocorre de forma frágil e brusca (sem aviso prévio), pois normalmente ocorre antes que a armadura de flexão

atinga 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 a carregamentos centrados.

## 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. Foram aplicados carregamentos 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 ação de um 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 geométrica de armadura de flexão ( $\rho$ ) de aproximadamente 1,40%, determinada a partir das recomendações do CEB-FIP MC90 [3]. 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 a 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.

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. 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 cisalha-

Tabela 1 – Características das lajes

Lajes	$\rho$ (%)	Altura útil (mm)	$f_c$ (MPa)	Armadura de cisalhamento		Punção
				Nervura (direção $x$ )	Nervura (direção $y$ )	
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

$\rho$ : taxa geométrica de armadura de flexão;  $f_c$ : resistência à compressão do concreto.

mento, estribos verticais fechados e estribos abertos inclinados a 45°, sendo que, todos os estribos utilizados nas nervuras foram confeccionados com barras de 4,2 mm de diâmetro. A Figura 3 mostra os 3 tipos de armadura utilizados.

Em relação às armaduras de combate à punção na região maciça, foram utilizados estribos abertos com inclinação de 45°, a partir de barras com 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 também por apresentarem desempenho superior ao dos estribos verticais, considerando a resistência última dos elementos, segundo comprovado experimentalmente por Oliveira (1998) [4]. A Figura 4 mostra o posicionamento das armaduras de cisalhamento nas nervuras e de punção na região maciça.

2.2 Instrumentação

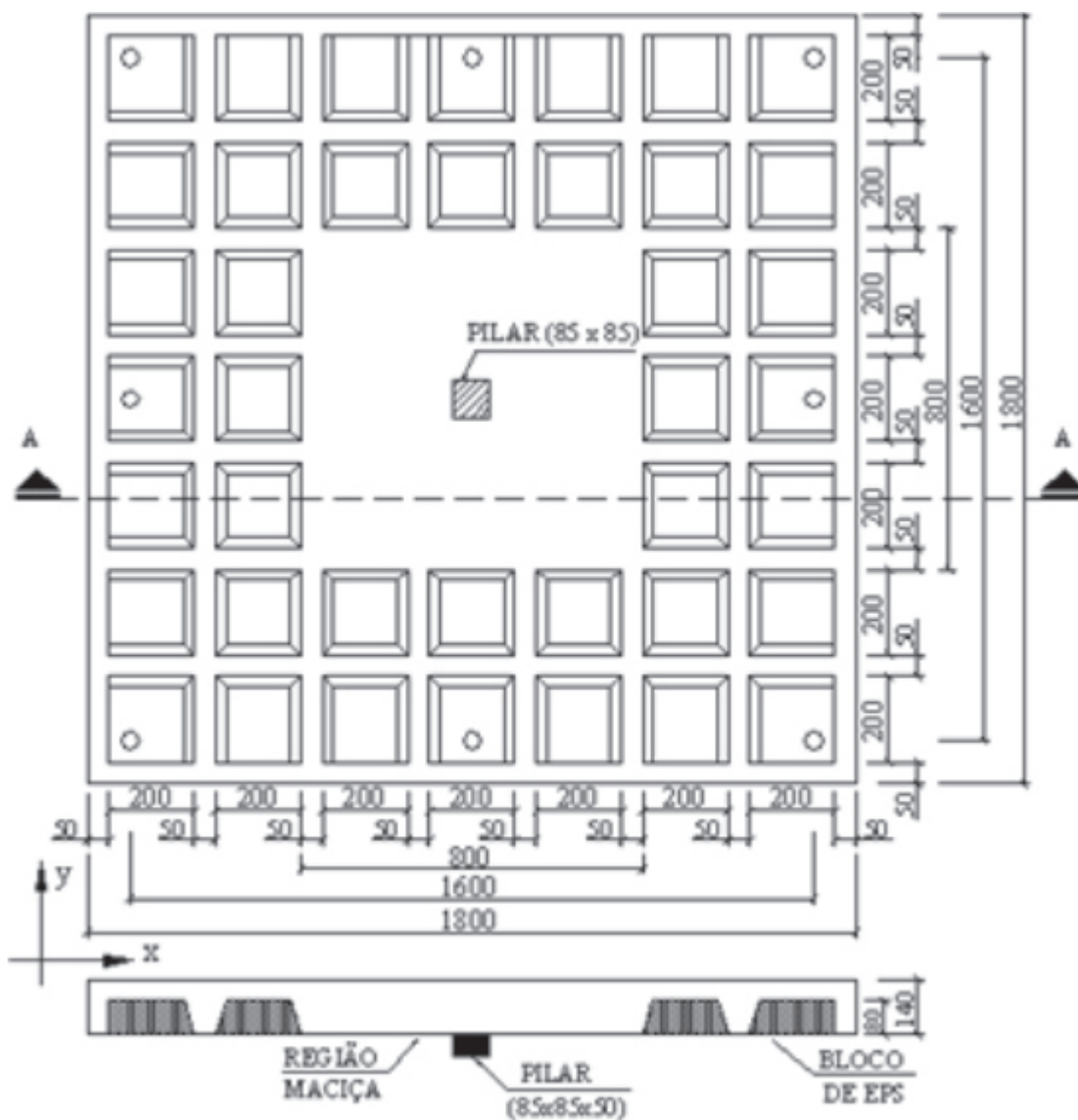
2.2.1 Deslocamentos

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 na laje, indicados pela letra D.

2.2.2 Superfície do concreto

Para medir as deformações no concreto foram utilizados exten-

Figura 1 - Planta baixa e seção transversal das lajes (corte AA)



sômetros elétricos de resistência (EERs) fixados na superfície inferior de todas as lajes, sendo posteriormente conectados ao equipamento de aquisição de dados (Spider 8). Foram utilizados 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 posicionados na região maciça estavam distantes 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.

### 2.2.3 Armadura de Flexão

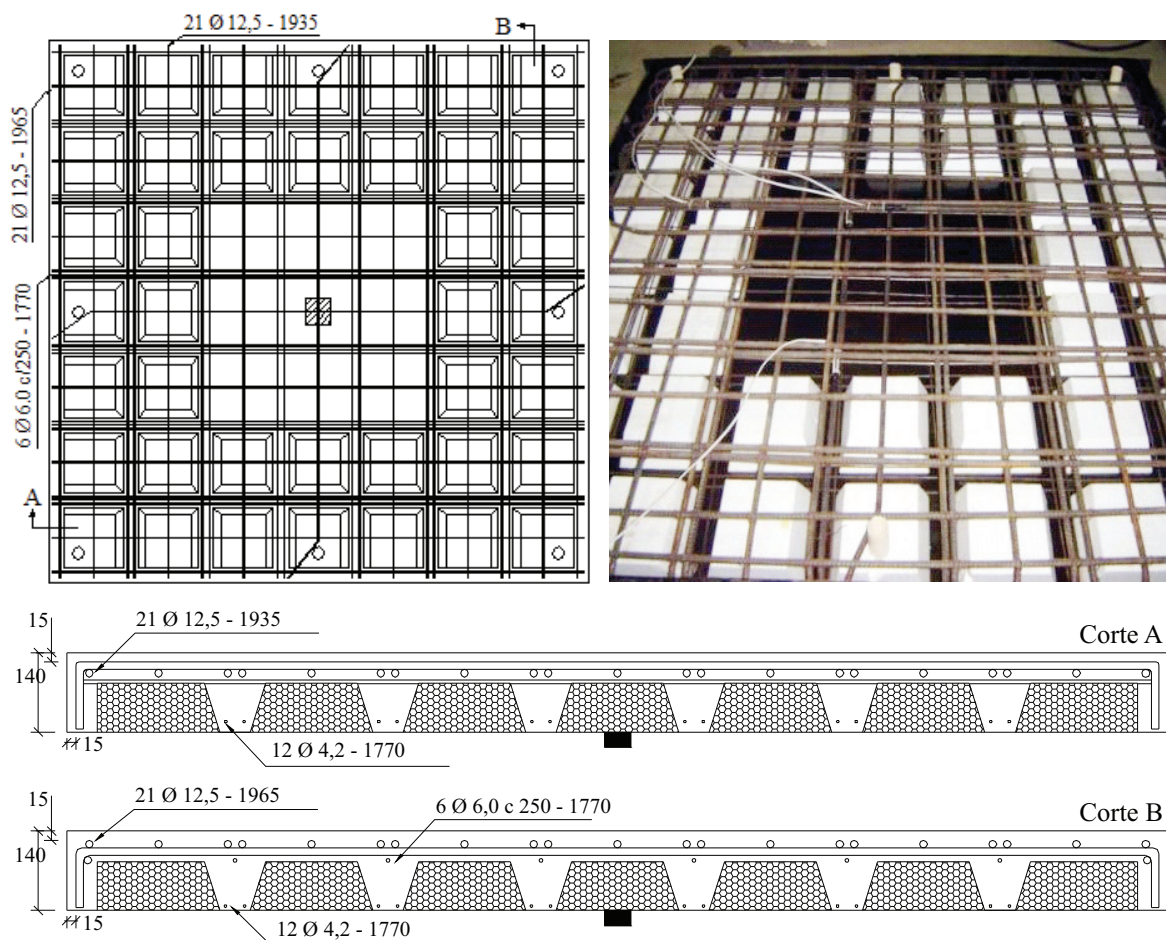
As deformações na armadura de flexão foram monitoradas da mesma forma que foram monitoradas as deformações no concreto, levando-se em consideração o tipo de armadura de cisalha-

mento 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, posicionado à meia altura da barra. As lajes L1, L2, L3, L4 e L6 apresentaram o mesmo posicionamento e quantidade de extensômetros (E1, E2, E3 e E4) e, da mesma forma, as lajes L5, L7 e L8 apresentaram 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.

### 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  $45^\circ$ , foi

Figura 2 – Posicionamento das armaduras de flexão



fixado 1 extensômetro em um dos ramos do estribo, posicionado à meia altura (Figura 8).

### 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 sobre uma placa metálica simulando a ação de um pilar, acionado por uma bomba hidráulica cuja intensidade era medida por célula de carga acoplada a um indicador digital. 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 realizadas com 2 módulos do equipamento de aquisição de dados *Spider 8*. Os detalhes do sistema de ensaio são exibidos nas Figuras 9 e 10.

## 3. Resultados

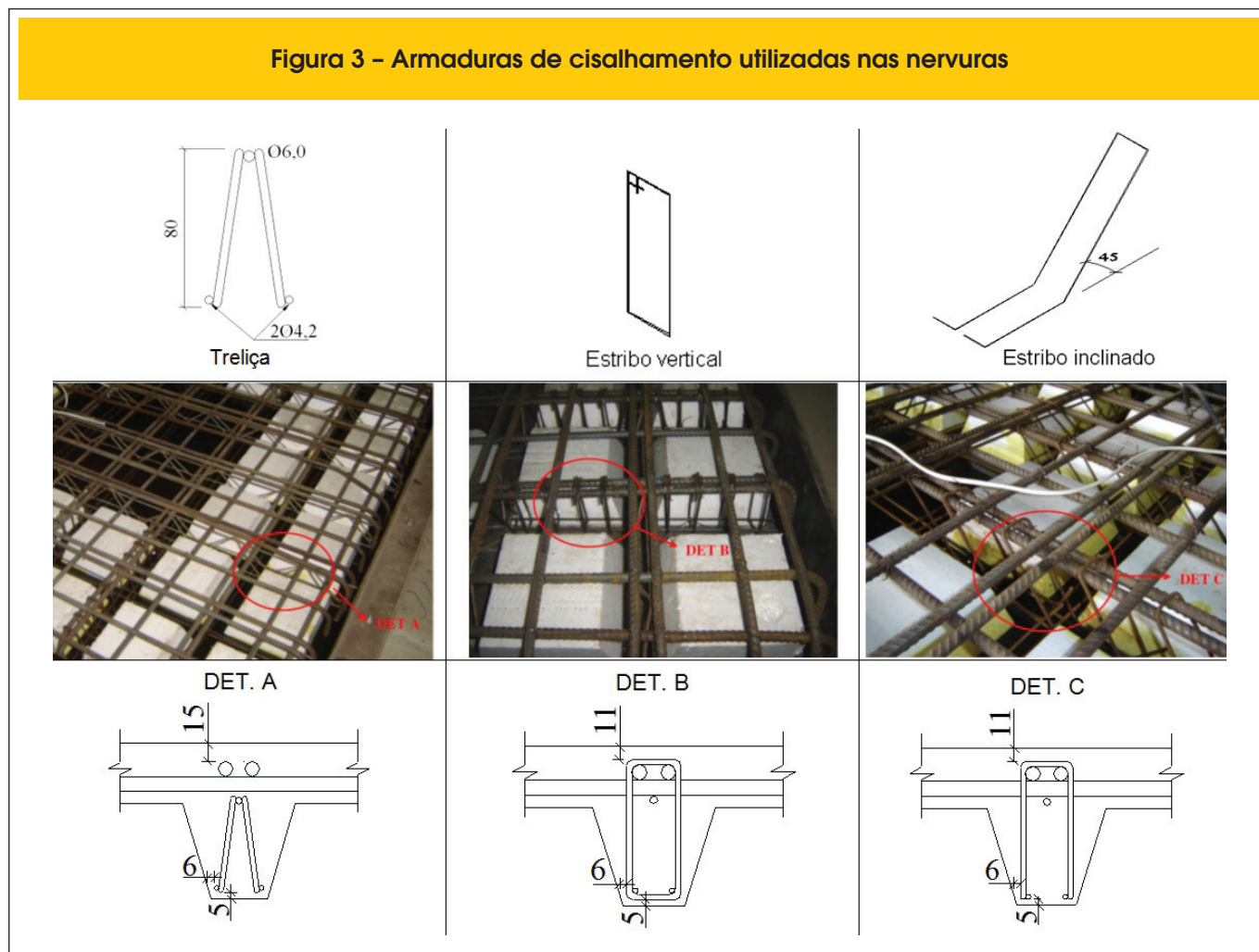
### 3.1 Materiais

As propriedades mecânicas do concreto foram determinadas a partir de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, segundo as normas NBR 5739:1994 [5], NBR 7227:1994 [6] e NBR 8522:1984 [7], respectivamente. Os resultados apresentados na Tabela 2 representam a média entre os 3 corpos-de-prova cilíndricos ensaiados para cada laje em suas respectivas idades. As características dos aços utilizados neste trabalho foram obtidas a partir do ensaio de tração axial, de acordo com a NBR 6152:1992 [8], e são apresentadas na Tabela 3.

### 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. A Figura 12 mostra o gráfico dos deslocamentos verticais

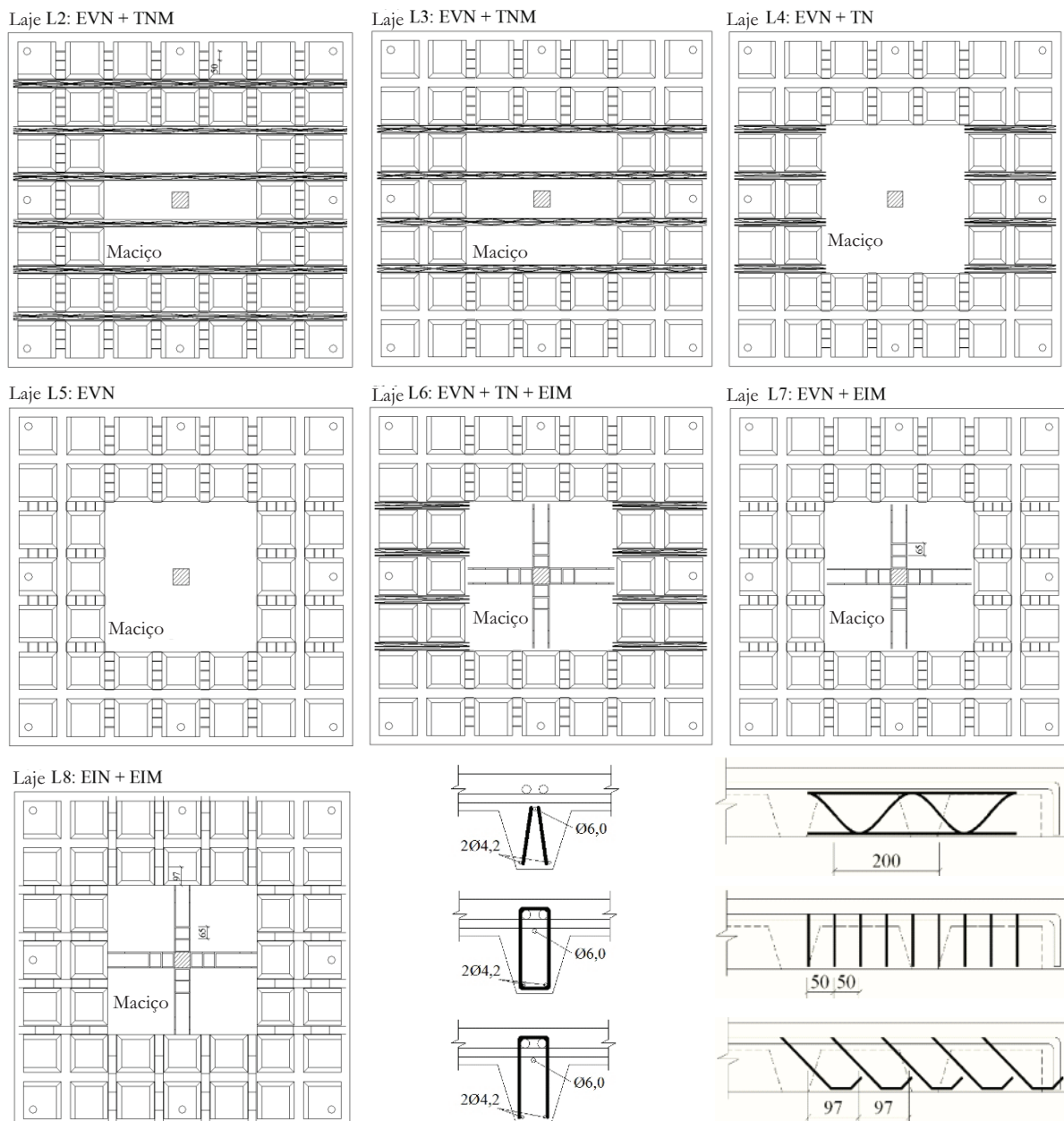
Figura 3 – Armaduras de cisalhamento utilizadas nas nervuras



centrais (D4) de todas as lajes para cada carregamento aplicado. Os deslocamentos verticais das lajes foram diferentes para os pontos correspondentes nas duas direções, indicando possíveis problemas de simetria do pilar ou dos apoios, e até mesmo a ocorrência de acomodações diferenciais do sistema de ensaio durante os ensaios. As maiores discrepâncias foram encontradas na laje L4, para os medi-

dores D1, D2, D6 e D7. Já o deflectômetro central (D4), posicionado sobre 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, sendo que as três lajes com armadura de punção (L6, L7 e L8) apresentaram os maiores deslocamentos finais.

**Figura 4 - Armaduras de cisalhamento (nervura e regiões maciças)**



EVN: Estribo vertical fechado na nervura:  $\varnothing 4,2$  c 50; EIN: Estribo aberto inclinado na nervura:  $\varnothing 4,2$  c 97; EIM: Estribo aberto inclinado no maciço:  $\varnothing 6,3$  c 65; TN: Treliza na nervura:  $\varnothing 4,2$  c 200; TNM: Treliza na nervura e no maciço:  $\varnothing 4,2$  c 200.

Figura 5 - Posicionamento dos deflectômetros nas lajes

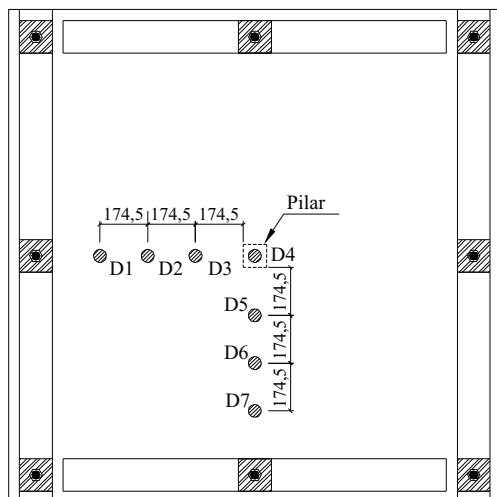
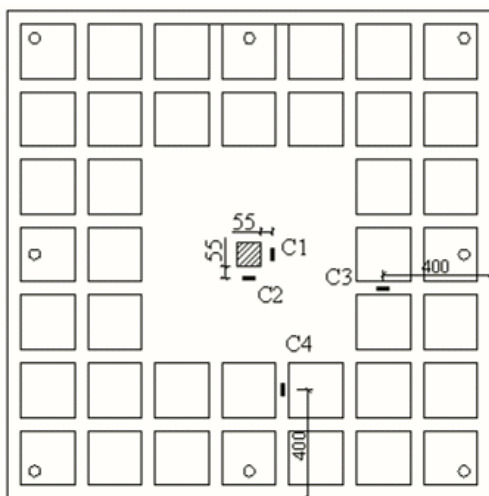


Figura 6 - Posicionamento dos extensômetros nas superfícies de concreto



### 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 [9]). 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.

### 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. A Figura 14 mostra as deformações máximas nas armaduras de flexão para as lajes.

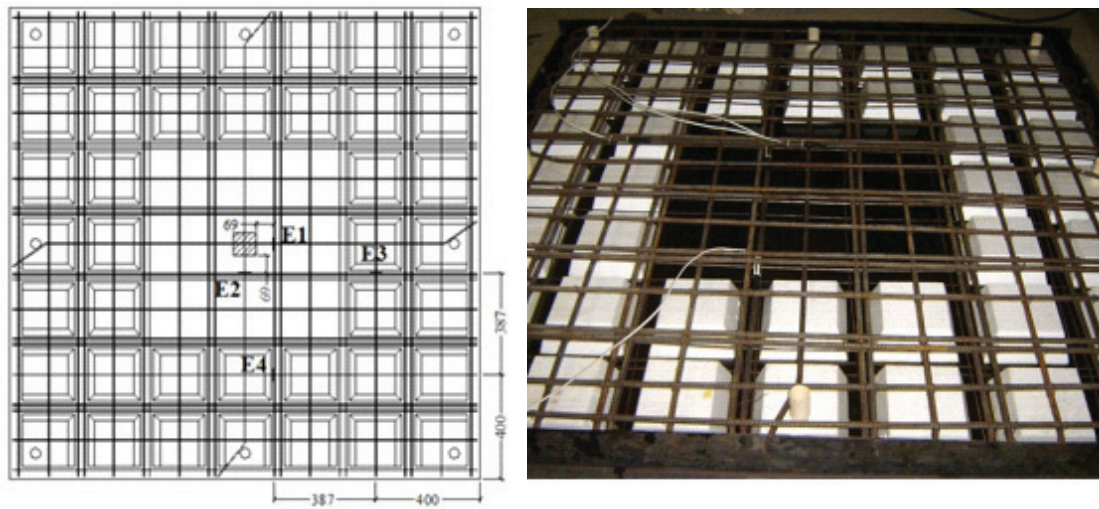
### 3.5 Deformações da armadura de cisalhamento

As deformações das armaduras de cisalhamento nas nervuras foram bem menores que a deformação de escoamento do aço ( $\epsilon_{ysw} = 4,7‰$ ). Entretanto, em algumas lajes (L6 e L7), houve uma

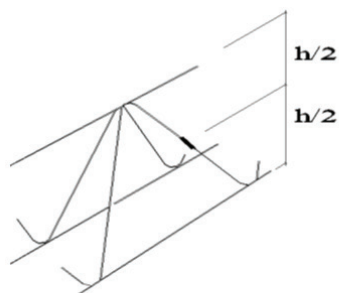
mudança no modo de ruptura de cisalhamento nas nervuras para flexão, mostrando-se eficientes as armaduras inclinadas (treliça e estribo aberto inclinado a 45°) por proporcionarem maior ductilidade às lajes. A Figura 15 mostra as deformações na armadura de cisalhamento em duas das lajes ensaiadas. Em 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

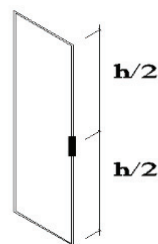
**Figura 7 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão**



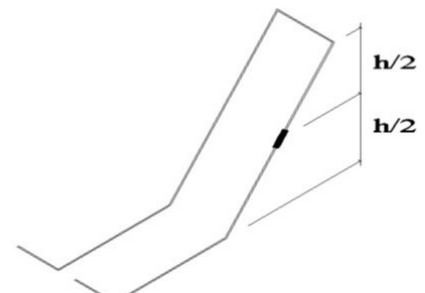
**Figura 8 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento**



Treliça



Estribo vertical



Estribo inclinado





Figura 9 - Detalhes do sistema de ensaio

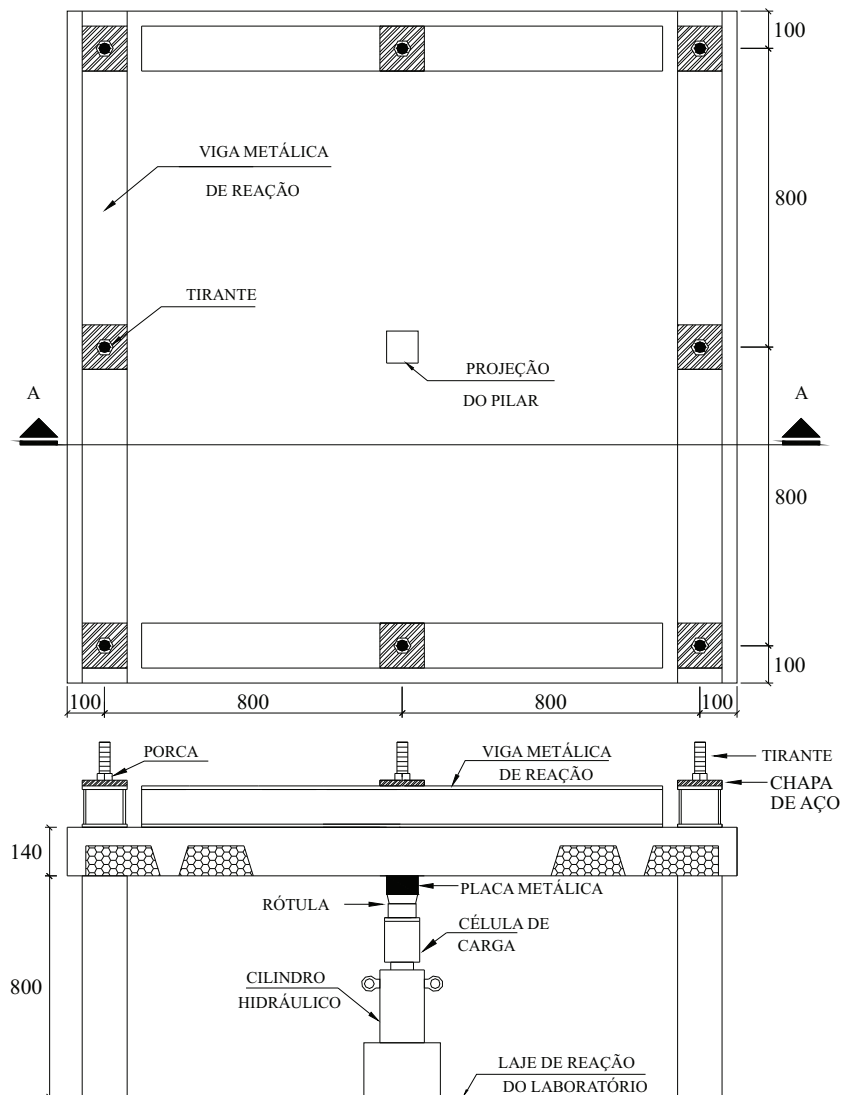


Figura 10 - Sistema de ensaio e aplicação de carregamento



**Tabela 2 – Propriedades mecânicas do concreto**

Laje	Idade (dias)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
L1	54	37	3,5	24,9
L2	49	38	3,4	17,8
L3	64	41	2,5	17,9
L4	60	39	2,9	18,7
L5	56	38	2,8	26,5
L6	70	40	2,1	27,0
L7	68	41	1,8	27,8
L8	74	39	1,8	27,6

$f_t$ : resistência à tração do concreto;  
 $E_c$ : módulo de elasticidade do concreto.

**Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados**

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

$\phi$ : diâmetro da barra;  
 $f_{ys}$  e  $f_u$ : tensões de escoamento e ruptura, respectivamente;  
 $\epsilon_{ys}$ : deformação de escoamento;  
 $E_s$ : módulo de elasticidade longitudinal.

que o escoamento não estava longe de ocorrer e confirmando o ganho de ductilidade que as lajes obtiveram com a introdução da armadura transversal.

### 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. Nas situações onde não foi possível observar claramente o modo de ruptura, o critério adotado para sua classificação foi baseado naquele apresentado por Oliveira (1998) [4], onde o modo de flexão ocorre para  $P_u/P_{flexão} > 1,0$ , com deformações nas barras da armadura de flexão maiores ou iguais à deformação de escoamento característica do aço empregado; e os modos de cisalhamento (punção e cisalhamento nas nervuras) para valores menores que 1,0. Aqui  $P_{flexão}$  é a resistência última à flexão da laje e  $P_u$  é a resistência última observada experi-

mentalmente. Assim, os modos de ruptura das lajes L6 e L7 foram classificados como flexão, seguidos de punção (formação do cone de punção). As demais lajes romperam por punção, caracterizada por uma ruptura brusca. A Figura 17 mostra a superfície de ruptura das lajes e a Figura 18 mostra os mapas de fissuração das lajes ao término dos ensaios.

### 3.7 Comparação entre os resultados experimentais e estimados

A Tabela 5 apresenta as cargas últimas estimadas pela NBR 6118:2003 para resistência à punção e ao cisalhamento nas nervuras, e a resistência à flexão das lajes obtida com a utilização da teoria das linhas de ruptura, através das equações desenvolvidas por Oliveira (2003) [10], e as cargas últimas obtidas nos ensaios. 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 6118:2003, 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, mas forneceu também alguns resultados conservadores. Para a 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 estava longe de ocorrer, com as lajes L1 e L2 rompendo por punção. As lajes com armadura de punção L6 e L7 apresentaram resistências estimadas bem próximas das experimentais, sendo consideradas satisfatórias, concordando com os modos de ruptura observados.

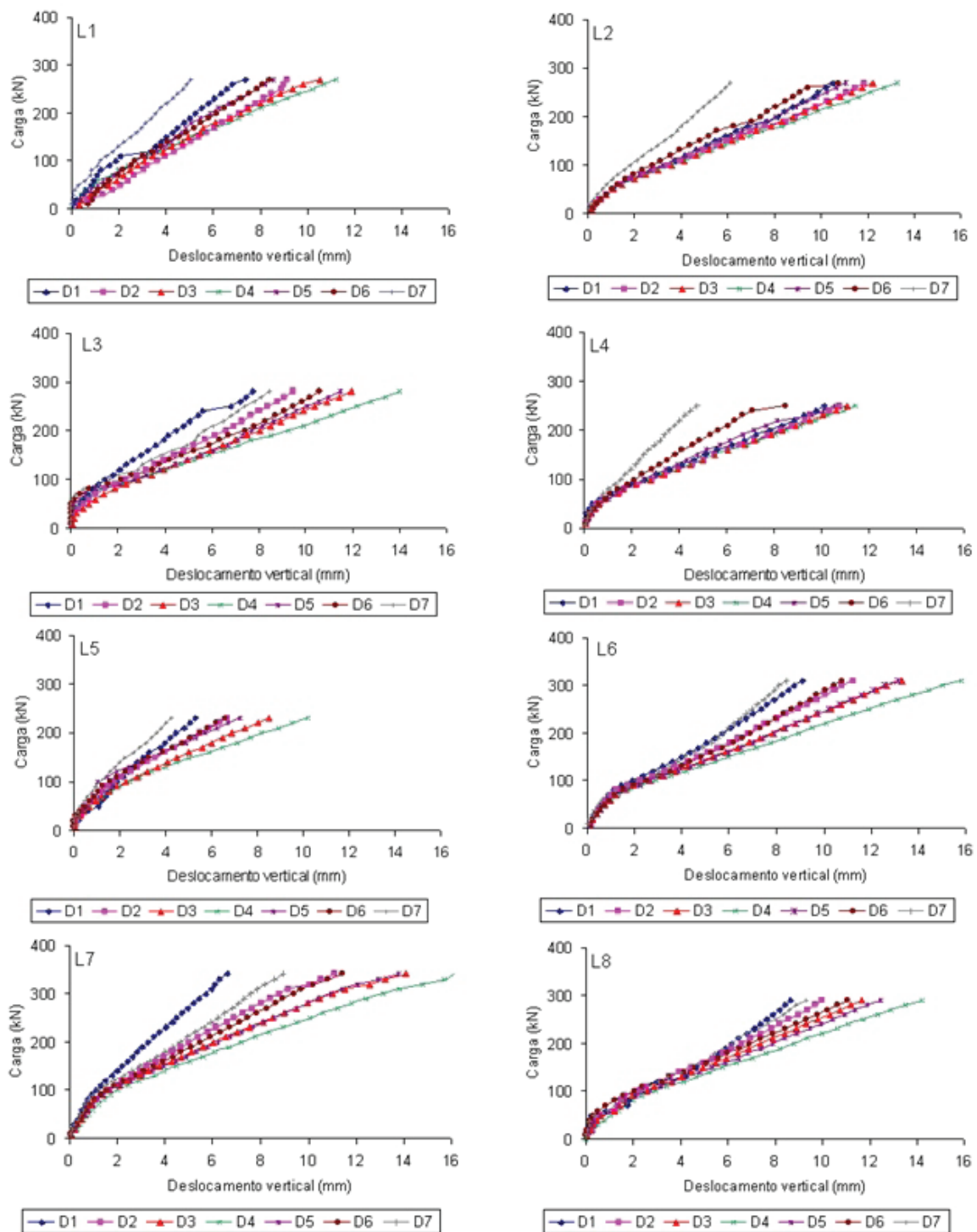
## 4. Conclusões

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). Em relação às lajes com armadura de punção (L6, L7 e L8), estas apresentaram resistências superiores à da laje L1, em torno de 26%, 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 diferenças entre os resultados experimentais de até 5%. Cabe ressaltar que nem sempre ocorreu a ruptura por punção, mesmo para as lajes em que os resultados foram considerados satisfatórios.

Figura 11 - Deslocamentos verticais nas lajes



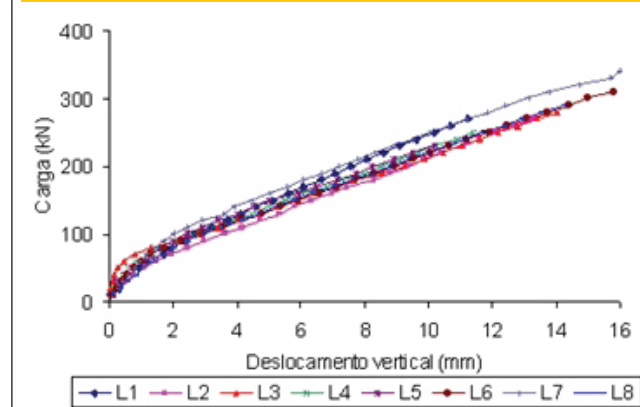
## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPESP, ITEGAM e FAPESPA pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

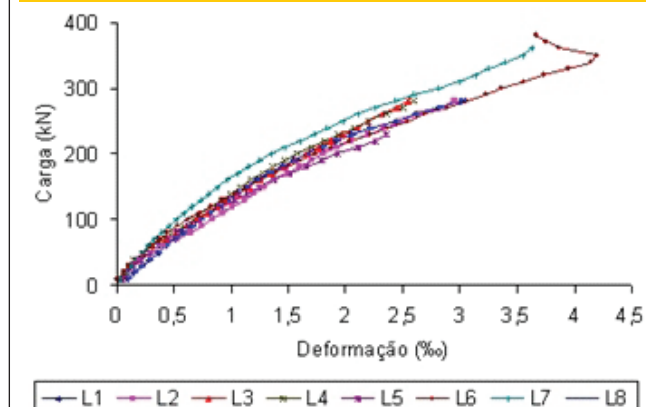
## 6. Referências

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2003.
- [02] SOUZA, V. C. M. de, CUNHA, A. J. P. da, Lajes em Concreto Armado e Protendido. Rio de Janeiro Ed. UERJ, 1998, 580p.
- [03] CEB - FIP (1990). Model Code 1990: Final Draft. Bulletin D'Information, No 203-205, CEB, Lausanne, July 1991.
- [04] 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.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 – Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 – Concreto – Determinação

**Figura 12 – Deslocamentos verticais centrais (D4) das lajes**



**Figura 13 – Deformações de compressão nas superfícies de concreto das lajes**



**Figura 14 – Deformações de tração nas armaduras de flexão das lajes**

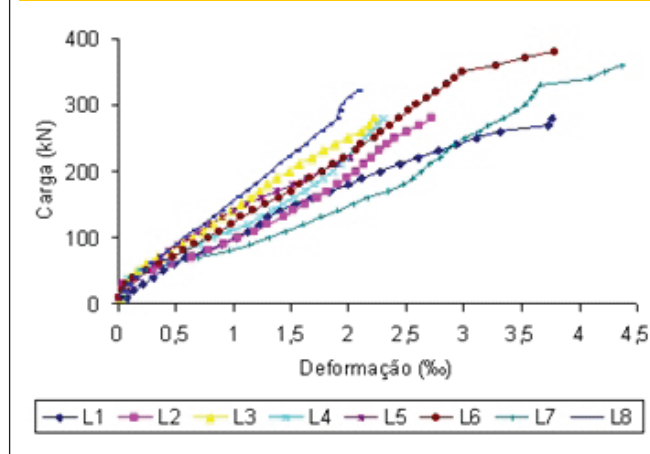


Figura 15 - Deformações de tração nas armaduras de cisalhamento das nervuras das lajes L2 e L5

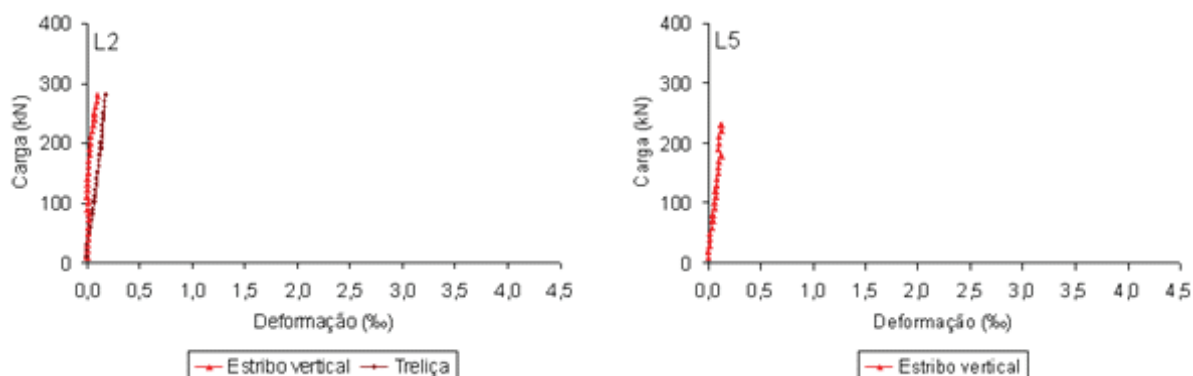


Figura 16 - Deformações de tração nas armaduras de punção das lajes L6 e L8

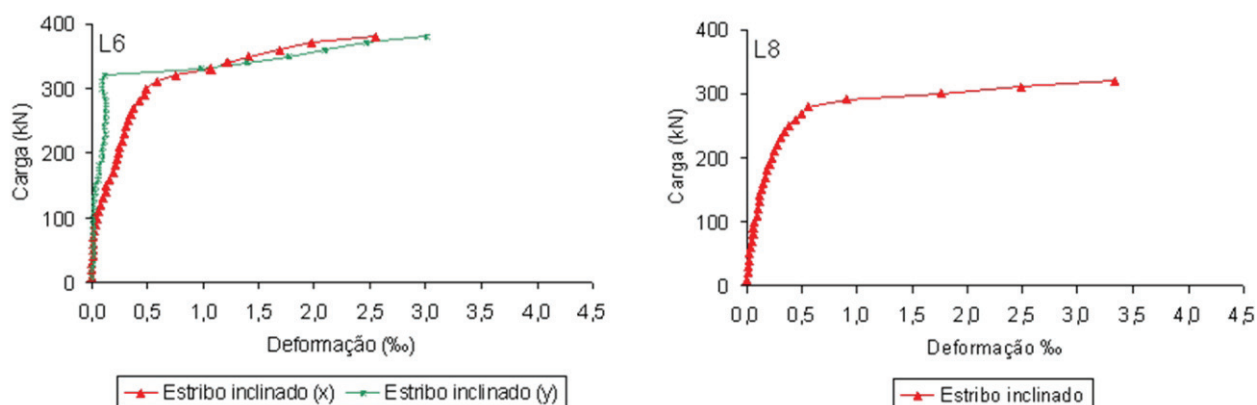


Tabela 4 - Cargas e modos de ruptura das lajes

Laje	Altura útil (mm)	$\rho$	$f_c$ (MPa)	$\epsilon_{s, \text{máx}}$ (‰)	$\epsilon_{c, \text{máx}}$ (‰)	Armadura de cisalhamento		$P_u$ (kN)	Modo de ruptura
						Nervura	Punção		
L1	120	0,0127	41	3,8	3,1	-	-	280,0	punção
L2	106	0,0144	37	2,7	2,9	Trelça	-	278,5	punção
L3	111	0,0137	38	2,2	2,8	Trelça	-	287,5	punção
L4	118	0,0129	39	2,3	2,8	Trelça	-	287,0	punção
L5	115	0,0133	38	2,8	2,5	Estribo vertical	-	235,0	punção
L6	104	0,0147	40	3,8	4,2	Trelça	Estribo inclinado	380,0	flexão
L7	112	0,0136	41	4,4	3,6	Estribo vertical	Estribo inclinado	361,0	flexão
L8	108	0,0141	39	2,2	-	Estribo aberto	Estribo inclinado	322,0	punção

$\epsilon_{s, \text{máx}}$ : deformação máxima de tração observada na armadura de flexão;

$\epsilon_{c, \text{máx}}$ : deformação máxima de compressão observada na superfície de concreto inferior;

$P_u$ : carregamento último aplicado à laje.

do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152 – Materiais metálicos. Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1992.
- [09] 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.

- [10] 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.

Figura 17 – Superfícies de ruptura nas regiões maciças das lajes ensaiadas

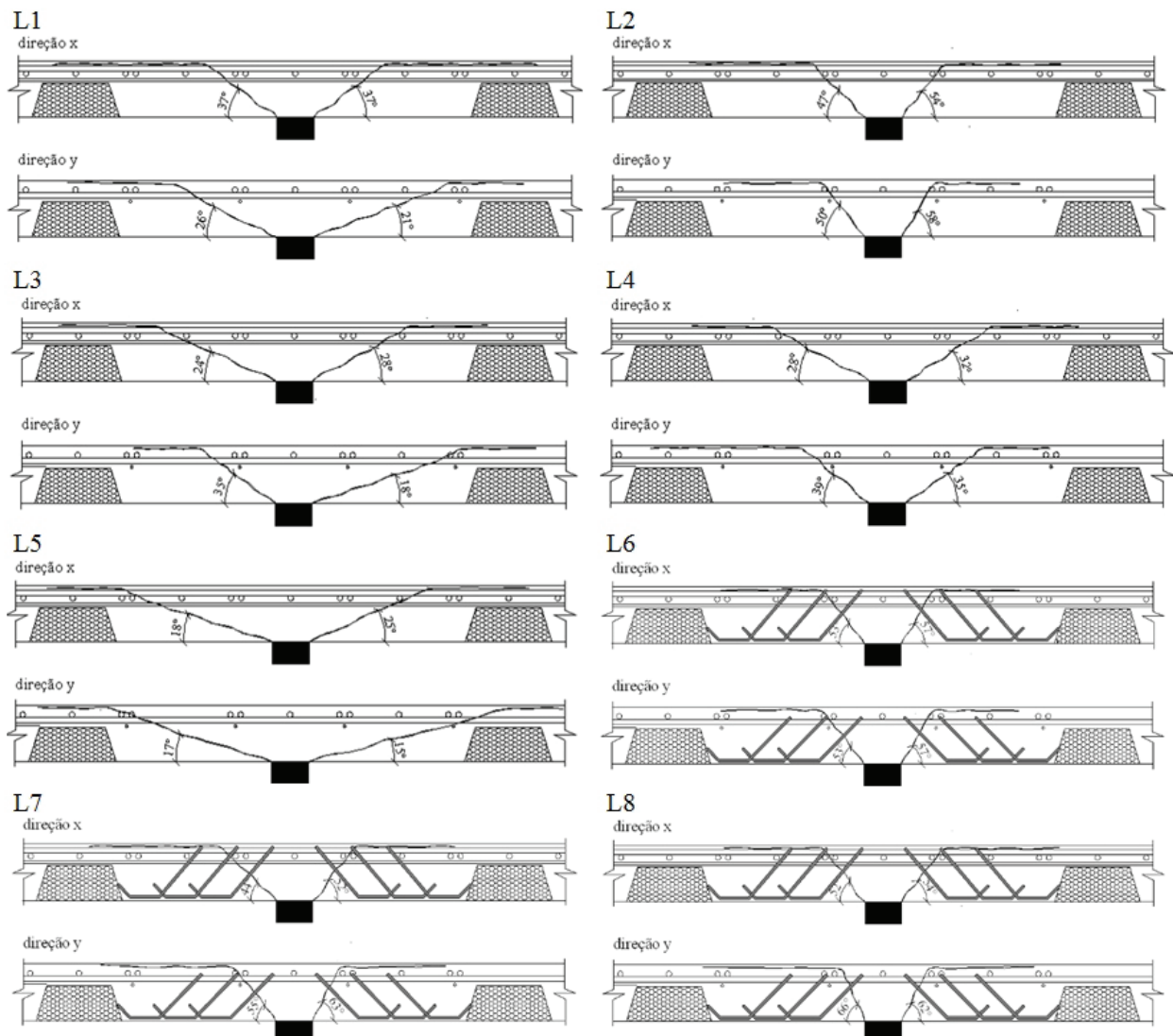


Figura 18 – Mapas de fissuração das lajes

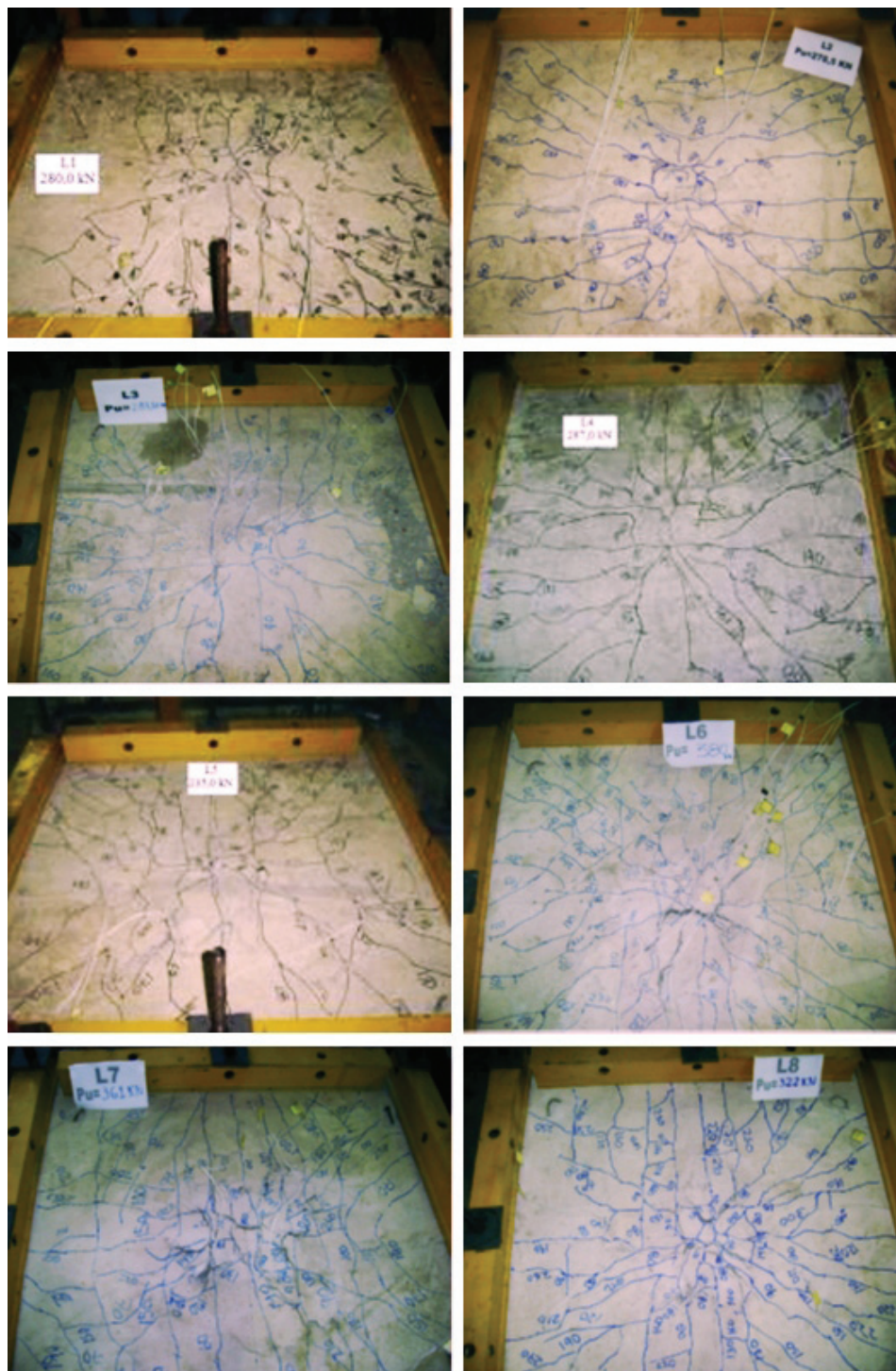


Tabela 5 - Cargas últimas estimadas e experimentais

Laje	Altura útil (mm)	$\rho$	$f_c$ (MPa)	$P_{\text{punção}}$ (kN)	$P_{\text{cisalh.}}$ (kN)	$P_{\text{flexão}}$ (kN)	$P_u$ (kN)	Modo de ruptura
L1	120	0,0127	41	345	144	363	280,0	punção
L2	106	0,0144	37	288	257	358	278,5	punção
L3	111	0,0137	38	307	271	359	287,5	punção
L4	118	0,0129	39	333	291	361	287,0	punção
L5	115	0,0133	38	320	228	359	235,0	punção
L6	104	0,0147	40	431	258	362	380,0	flexão
L7	112	0,0136	41	477	229	363	361,0	flexão
L8	108	0,0141	39	448	266	361	322,0	punção

$P_{\text{punção}}$ : resistência última estimada para ruptura por punção;  $P_{\text{cisalh.}}$ : resistência última estimada para ruptura por cisalhamento nas nervuras;  $P_{\text{flexão}}$ : resistência última estimada para ruptura por flexão.