



## ALTERATIVAS PARA A CONFIGURAÇÃO DA REGIÃO MACIÇA EM SISTEMAS DE LAJES LISAS NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

**Nívea Gabriela B. de Albuquerque (1); Dênio Ramam C. de Oliveira (2)**

(1) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Faculdade de Tecnologia – Universidade de  
Brasília, Brasil – e-mail: niveagabriela@hotmail.com

(2) Faculdade de Engenharia Civil – Instituto de Tecnologia – Universidade Federal do Pará, Brasil –  
e-mail: denio@ufpa.br

### RESUMO

Vantagens construtivas e arquitetônicas têm motivado engenheiros e arquitetos a conceberem estruturas cada vez mais delgadas e arrojadas, tornando atrativa a utilização de processos construtivos como os sistemas de lajes lisas, ainda que, do ponto de vista da segurança estrutural, defronte maior vulnerabilidade de projeto nas conexões laje-pilar. No caso particular das lajes lisas nervuradas, a solução comumente adotada é tornar maciça a região em torno dos pilares, enrijecendo-a para absorver os momentos negativos que surgem no entorno dos apoios e resistir aos efeitos de punção, estendendo-a cerca de 1/6 do vão para cada lado do pilar. Embora a relevante importância do sistema seja evidenciada pela freqüência de construções de apartamentos em plantas flexíveis de lajes lisas nervuradas, a falta de informações técnicas e normativas a respeito continua agravante, havendo, portanto, necessidade de atender especificações mais rígidas, uma vez que não são fornecidos limites para garantia da segurança. No intuito de contribuir com dados experimentais, considerou-se os resultados dos ensaios apresentados por ALBUQUERQUE (2009), cujos modelos foram idealizados a partir das dimensões e formatos usuais de maciço. No entanto, dada a diversidade de parâmetros que afetam sua resistência última, limitou-se ao estudo de lajes sem armadura de cisalhamento. Desse modo, são avaliadas as implicações resultantes da variação dos parâmetros geométricos do maciço na capacidade máxima e no comportamento pré e pós colapso. Os resultados apontam a possibilidade de diminuição do perímetro do maciço em aproximadamente 70%, conservando ainda considerável capacidade última à punção, sem ocorrer mudança no modo de ruptura.

Palavras-chave: lajes lisas nervuradas; resistência última; punção.

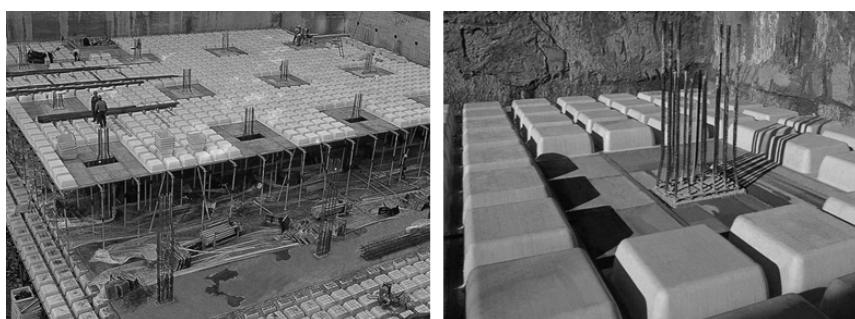
## 1 INTRODUÇÃO

Definir os tipos de lajes a serem empregadas como solução estrutural para pisos de pavimentos múltiplos implica em uma importante decisão que depende de fatores como economia e racionalidade no processo construtivo, além de apresentar também um comportamento estrutural satisfatório, de eficiência comprovada pelos meios técnicos e científicos disponíveis. Dessa forma, a competitividade entre as empresas projetistas tem sido também impulsionada pela adoção de soluções estruturais arrojadas com reduzidos volumes e, consequentemente, menores custos.

Diante deste cenário, a concepção de pavimentos com grandes vãos livres e reduzida quantidade de vigas têm promovido a crescente utilização do sistema de lajes lisas de concreto armado, chegando até mesmo a substituir o dito sistema convencional, de lajes e vigas. Isto porque as lajes, quando maciças, podem se tornar tão espessas devido ao aumento do vão que podem ser responsáveis por até 2/3 do volume total da estrutura tornando-se antieconômica, já que passa a mobilizar parte de sua capacidade resistente para combater as solicitações originadas pelo seu peso próprio.

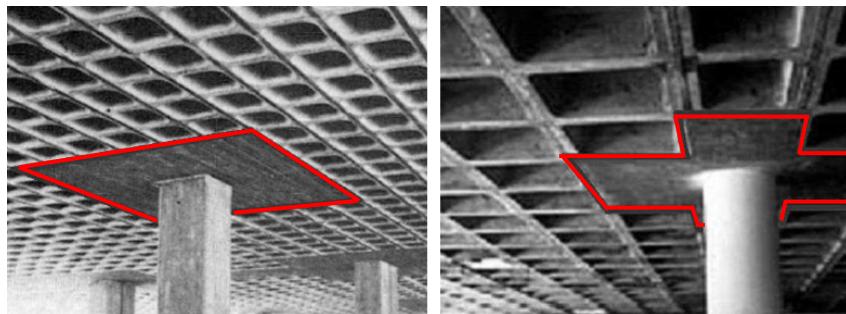
Assim, a construção civil brasileira passou a quebrar a resistência à utilização do sistema de lajes lisas em edifícios, contribuindo para isso, motivos suficientes, mencionados por ALBUQUERQUE e PINHEIRO (2002) como a simplificação da execução e retirada de forma, bem como sua otimização no consumo e reaproveitamento das formas, facilidade na concretagem, menor tempo de execução, maior versatilidade do espaço e economia nas instalações. O sistema de lajes lisas apresenta também certos inconvenientes como menor rigidez às ações laterais com necessidade de núcleos rígidos, possibilidade de sofrer punção da laje pelos pilares, complicada armação na região dos pilares e maior consumo de aço e de concreto.

No entanto, alguns desses impedimentos podem ser transpostos a partir da opção pelo projeto de pavimento com lajes lisas nervuradas, podendo se apresentar ainda mais vantajoso por diversos fatores que lhe são atribuídos, como a redução do peso próprio, custo e quantidade de materiais, resultantes da utilização de moldes reutilizáveis, bem como o preenchimento das regiões adjacentes aos pilares, formando as regiões maciças. Trata-se, portanto, de um sistema estrutural cuja escolha implica também na opção por um processo construtivo mais otimizado, que contribui para a racionalização e padronização dos escoramentos, uma vez que as nervuras ficam embutidas, ou seja, na espessura da laje, tirando proveito de uma vantagem tipicamente própria das lajes lisas que é a simplificação das formas, facilitada pela montagem dos blocos de material menos denso unidas a um tablado contínuo em nível, sem obstáculos e com poucos recortes (Figura 1).



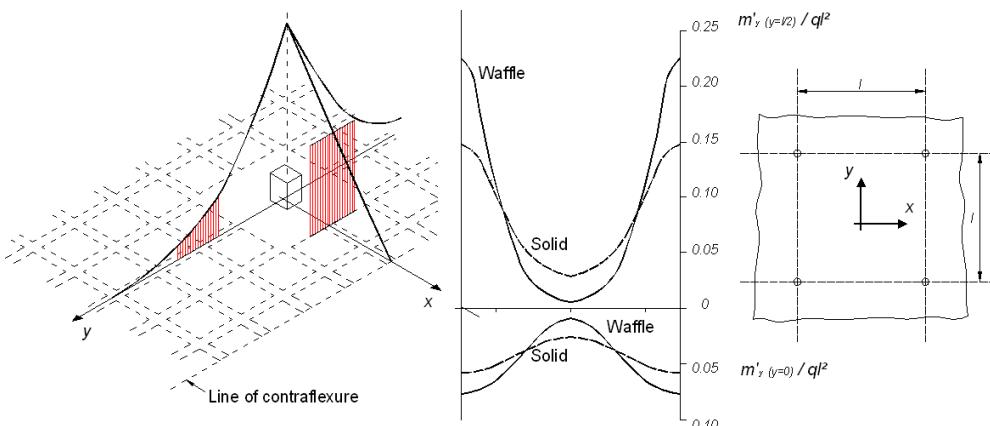
**Figura 1** – Aspecto de uma laje lisa nervurada antes da concretagem (ULMA, 2007)

A solução comumente adotada para combinar monoliticamente as nervuras regularmente espaçadas e o plano de laje superior é formar uma unidade integrada aos apoios a partir do engrossamento do painel, tornando-o maciço. De acordo com TESORO (1991), a região em torno dos pilares é enrijecida para absorver os momentos negativos que surgem no entorno dos apoios, como também resistir aos efeitos de punção, estendendo-a, geralmente, cerca de 1/6 do vão para cada lado do pilar. Por outro lado, embora focadas em processos construtivos mais eficientes e racionais na concepção de projetos de lajes lisas nervuradas de concreto armado, poucas referências em relação à escolha das dimensões e/ou formato desta região maciça comprovam a viabilidade de diferentes alternativas para a escolha da geometria da região maciça. Assim, o sistema é posto em prática nas obras sob experimentação sem, contudo, elucidar completamente as vantagens e desvantagens da geometria do maciço (Figura 2).



**Figura 2** - Exemplos de geometria de lajes lisas nervuradas, adaptado de TESORO (1991)

Dentre os fatores que podem governar a extensão da seção maciça em torno do pilar em lajes lisas nervuradas cita-se sua resistência à punção, a resistência à flexão das nervuras e a resistência ao cisalhamento das nervuras. REGAN (1989) informa que, para assegurar que as equações para o cálculo de punção possam ser aplicadas adjacentes ao pilar, a seção maciça deve estender-se por uma distância de no mínimo 2,5 vezes a altura útil da laje de cada face do pilar. Quanto à resistência à flexão das nervuras, a extensão da seção maciça em cada direção deve ser tal que as capacidades das seções das nervuras aos momentos negativos não sejam excedidas. As situações críticas são indicadas na Figura 3. Já as nervuras oferecem resistência ao cisalhamento desde que a seção maciça não se estenda além do ponto onde os momentos são radialmente nulos em torno do pilar, na qual o cisalhamento máximo em sua periferia pode ser tomado como 1,1 vezes o valor da média. O autor avalia ainda que pode ser possível, através de escolha adequada do tamanho de preenchimento do maciço, evitar a necessidade de armadura de cisalhamento nas nervuras).



**Figura 3** - Distribuição dos momentos em lajes maciças e nervuradas (REGAN, 1989)

REGAN (1989) considera também que as lajes lisas nervuradas divergem mais das lajes lisas maciças que as lajes cogumelo, mostrando que a diferença surge da anisotropia da forma da laje nervurada que, por se tratar de um sistema ortogonal paralelo às linhas de pilares, equivale a uma maior redução da rigidez à torção. A falta de rigidez à torção reduz as possibilidades de redistribuição de momentos na largura da seção, o que significa que a distribuição de armadura deveria combinar-se à distribuição dos momentos elásticos tanto quanto possível.

Assim, embora a relevante importância do sistema seja evidenciada pela freqüência de construções de apartamentos em plantas flexíveis de lajes lisas nervuradas, a falta de informações técnicas e normativas a respeito continua agravante, havendo necessidade de atender especificações mais rígidas, uma vez que não são fornecidos limites para garantia da segurança. Há, portanto, uma lacuna no conhecimento do meio técnico a ser preenchida para o entendimento das modificações dos esforços ocorridos na região maciça decorrente das diferentes geometrias. A busca das respostas para estas incertezas requer ensaios experimentais que permitam esclarecer a influência destes parâmetros no desempenho estrutural. Com este intuito, este trabalho procura fazer uma análise detalhada da capacidade última à punção *versus* o modo de ruptura, a fim de esclarecer seus efeitos sobre o comportamento estrutural.

## **2 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS**

Importantes códigos estruturais, tais como a NBR 6118 (2003), o ACI 318R (2008) e o CEB-FIP MC90 (1993) foram examinados neste trabalho, embora nenhum apresente recomendação específica para o caso de lajes lisas nervuradas, permitindo o julgamento do projetista neste caso. Todos assumem que lajes nervuradas e lajes maciças se comportam da mesma maneira, apesar de existirem diferenças significativas no comportamento entre ambas. Diante dessas limitações, foram abordadas algumas considerações a respeito das dimensões de ábacos em lajes cogumelo, bem como as especificações sobre as dimensões máximas e mínimas de elementos em lajes nervuradas.

### **2.1 Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira (NBR 6118, 2003)**

#### *2.1.1 Lajes Cogumelo*

A NBR 6118 (2003) define as lajes cogumelo como lajes apoiadas diretamente em pilares com capitéis que se diferenciam das lajes lisas por serem apoiadas em pilares sem capitéis, sem fazer referência a ábacos ou espessamento de laje e, portanto, sem estabelecer limites de dimensões para o mesmo. A norma prescreve que devem ser respeitados os limites mínimos para a espessura de *16 cm* para lajes lisas e *14 cm* para lajes cogumelo.

#### *2.1.2 Lajes Nervuradas*

A espessura mínima da mesa ( $h_f$ ), quando não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser  $h_f \geq a/15$  ou  $h_f \geq 3 \text{ cm}$ , onde  $a$  é a distância entre as faces das internas das nervuras. Caso haja tubulações horizontais embutidas de diâmetro  $\varnothing 12,5 \text{ mm}$ , esta deve ser  $h_f \geq 4 \text{ cm}$ . A largura mínima das nervuras ( $b_w$ ) deve ser  $b_w \geq 5 \text{ cm}$  e, quando  $b_w \leq 8 \text{ cm}$ , não necessita conter armadura de compressão. Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a *65 cm*, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje; em lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre *65 cm* e *110 cm*, exige-se a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até *90 cm* e a largura média das nervuras for maior que *12 cm*; e as lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que *110 cm*, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

### **2.2 American Building Code for Structural Concrete, ACI Standard (ACI 318, 2008)**

#### *2.2.1 Lajes Cogumelo*

No caso de lajes cogumelo, o ACI 318R (2008) atribui dimensões mínimas para o projeto de ábacos, quando se deseja reduzir as taxas de armadura negativa na região do pilar ou atingir a espessura mínima exigida, o qual deve apresentar uma projeção da superfície inferior da laje a pelo menos  $1/4$  de sua espessura e estender-se a uma distância de pelo menos  $1/6$  do comprimento do vão em cada direção.

#### *2.2.2 Lajes Nervuradas*

A espessura da mesa ( $h_f$ ) deve variar entre  $a/12 \leq h_f \leq 5 \text{ cm}$ , onde  $a$  é a distância entre as faces das internas das nervuras. A largura da nervura ( $b_w$ ) deve ser  $b_w \geq 10 \text{ cm}$  e altura das nervuras ( $h_b$ ) deve ser  $h_b \leq 3,5 \cdot b_w$ . Em caso de tubulações horizontais embutidas, a laje deve ter, no mínimo, *2,5 cm* a mais de espessura até a extremidade em qualquer ponto. O espaçamento entre as faces das nervuras não deve exceder *75 cm*, exigindo-se a verificação da flexão da mesa e cisalhamento na região das nervuras. São permitidas as considerações dos critérios de laje ou de viga, desde que sejam respeitados os limites de taxa de armadura mínima.

### **2.3 Comité Euro-International du Béton, Model Code (CEB-FIP MC 90, 1993)**

#### *2.3.1 Lajes Cogumelo*

O CEB-FIP MC90 (1993) se remete à verificação dos efeitos transversais no perímetro crítico em ábacos de lajes cogumelos, levando em consideração a altura efetiva do ábaco, indicando também que

deve se proceder uma segunda verificação na área externa ao ábaco, a fim de se utilizar a menor espessura da laje. Se o ábaco for muito extenso, é mais apropriado efetuar a segunda verificação de acordo com as recomendações de cisalhamento em uma seção qualquer.

### 2.3.2 Lajes Nervuradas

A espessura mínima da mesa, no caso de residências, é limitada em  $h_f \geq a/12$  ou  $h_f \geq 4\text{ cm}$ . Para outras construções adota-se  $h_f \geq 5\text{ cm}$  ou  $h_f \geq a/8$ . A largura das nervuras deve ser  $b_w \geq 5\text{ cm}$  e altura das nervuras ( $h_b$ ) deve ser  $h_b \leq 3 \cdot b_w$ . O espaçamento entre nervuras não deve exceder  $70\text{ cm}$ , exigindo-se a verificação de flexão e flechas na mesa e cisalhamento na região das nervuras. Para vãos que excedam  $6\text{ m}$ , exige-se pelo menos uma nervura transversal.

## 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

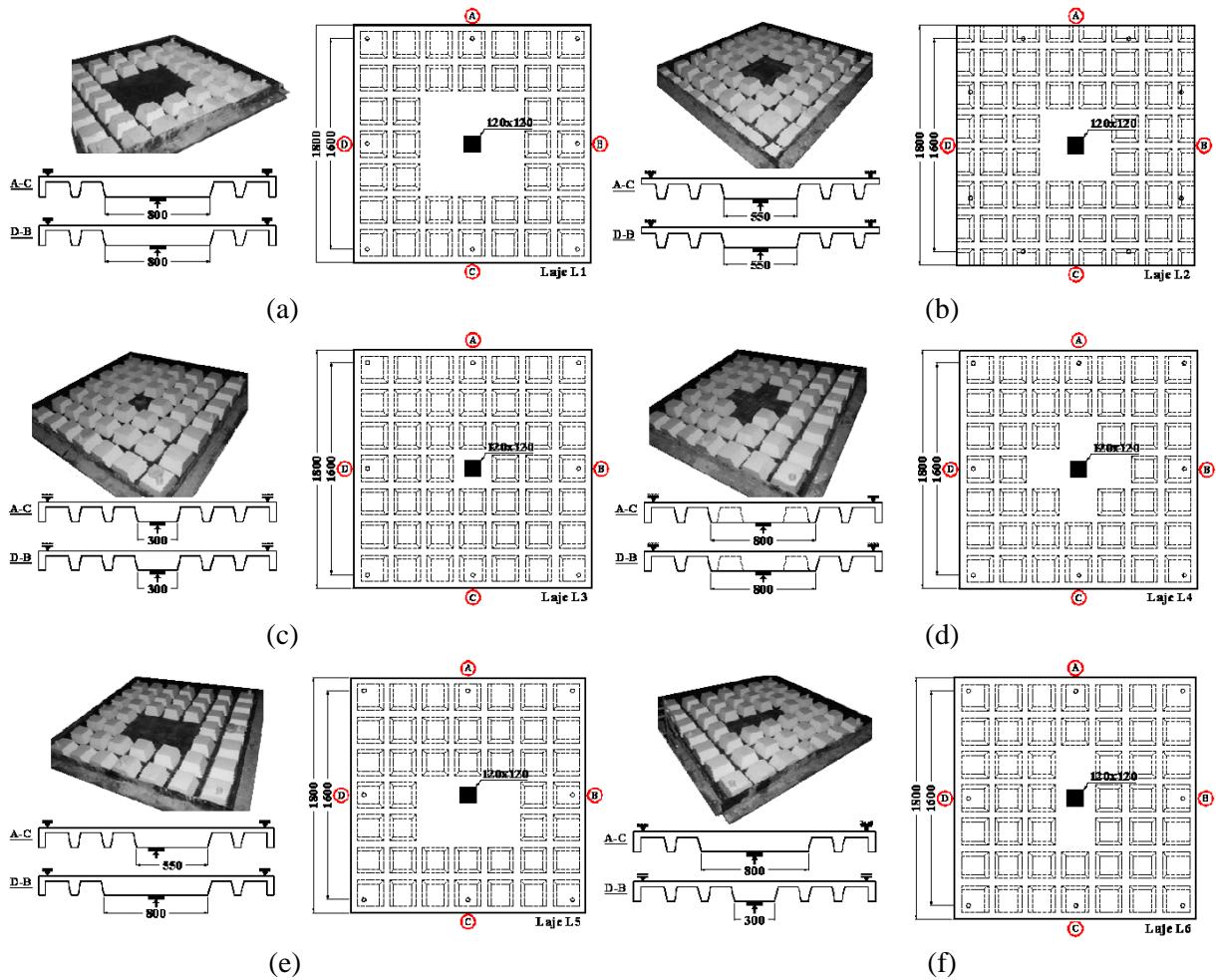
Os resultados dos ensaios realizados por ALBUQUERQUE (2009) são descritos a seguir, os quais são provenientes de uma série de seis lajes com diferentes alternativas de geometria para a região maciça. O estudo se limitou às lajes sem armadura de cisalhamento, onde foram avaliadas as implicações resultantes da variação dos parâmetros geométricos do maciço na capacidade máxima e no comportamento pré e pós colapso.

### 3.1 Características das Lajes

Foram confeccionados e ensaiados até a ruptura seis painéis de lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto armado, idealizados com diferentes configurações de geometria da região maciça, formada de acordo com a quantidade de vazios preenchidos entre nervuras. Os painéis – denominados L1, L2, L3, L4, L5 e L6 – eram quadrados com 1800 mm de lado e tinham espessura de 150 mm, com a mesa de concreto medindo 40 mm na seção transversal. As nervuras componentes possuíram 50 mm de largura e foram dispostas ortogonalmente distando 250 mm entre eixos. O material do núcleo foi composto por enchimento em EPS de dimensões de (200 x 200 x 110) mm, com faces inclinadas a aproximadamente  $75^\circ$  em relação à base do bloco. O vão existente entre os tirantes foi de 1600 mm, com pilar centrado sendo simulado por uma placa quadrada de aço com dimensões de (120 x 120 x 50) mm colocada na parte inferior da laje. Todas as lajes apresentaram as mesmas disposições para as armaduras de flexão, constituídas por barras de 8,0 mm de diâmetro em ambas as direções, gerando malha negativa com taxa de armadura de 0,47 % a uma altura útil determinada em 128 mm. Embora se reconheça que em uma laje nervurada real se inclua armadura positiva na região em torno dos pilares, os modelos foram intencionalmente destituídos de armadura positiva nas nervuras para os efeitos de análise. Os painéis também não dispuseram de armadura de cisalhamento nas nervuras nem armadura de punção no maciço. A resistência à compressão do concreto foi especificada como 30 MPa aos 28 dias. A Tabela 1 apresenta as principais informações sobre as características da região maciça das lajes ensaiadas, com os valores de  $d$  e  $f'_c$  determinados a partir de dados experimentais. Os modelos ensaiados são mostrados na Figura 4.

**Tabela 1** – Características principais da região maciça

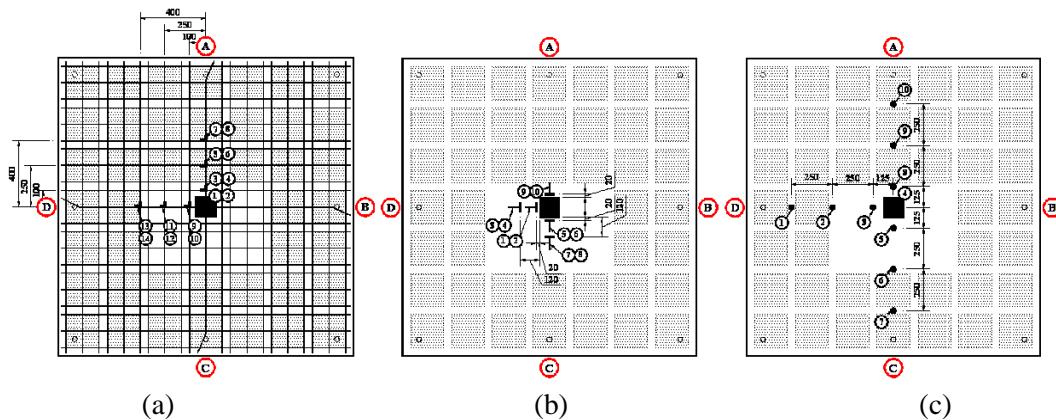
Laje	$d$ (mm)	$\rho$ (%)	$f'_c$	Região Maciça		
				Nº Nervuras convergentes	Nº Vazios preenchidos	Perímetro (mm)
L1	128	0,47	55,9	16	9	3200
L2	130	0,47	55,9	12	4	2200
L3	128	0,47	55,9	8	1	1200
L4	128	0,47	55,9	8	5	3200
L5	127	0,47	55,9	14	6	2700
L6	126	0,47	55,9	12	3	2200



**Figura 4 – Geometrias dos maciços das lajes (a) L1, (b) L2, (c) L3, (d) L4, (e) L5 e (f) L6**

### 3.2 Instrumentação das Lajes

Todas as lajes foram instrumentadas de forma semelhante, utilizando-se uma quantidade suficiente de sensores – total de 48 extensômetros elétricos no aço, 30 extensômetros elétricos no concreto e 7 (10 para lajes de maciço assimétrico) deflectômetros por laje – para a observação discreta da evolução do comportamento que conduziu à ruína. Dessa maneira, os extensômetros foram localizados em pontos apropriados da armadura negativa de flexão e da face inferior do concreto na região maciça, enquanto as medições de deslocamentos foram obtidas a partir de relógios comparadores colocados na parte superior da laje. A distribuição dos sensores foi disposta de maneira a contemplar tanto as lajes com a região maciça simétrica, quanto às que possuem a região maciça assimétrica. Em virtude disso, a L5 apresentou maior quantidade de sensores, conforme as posições indicadas na Figura 5.



**Figura 5 – Posicionamento dos (a) extensômetros do aço (b) extensômetros do concreto e (c) deflectômetros**

### 3.3 Sistema de Ensaio e Aquisição de Dados

O sistema de cargas/reações foi equilibrado por intermédio de uma placa de aço colocada no centro da laje, bem como através da utilização de 8 tirantes de aço junto às suas bordas que, ao atravessarem-na, forneciam o devido travamento para ancorar-se à laje de reação do laboratório. Conforme ilustrado na Figura 6, o sistema de ensaio experimental foi constituído por: macaco hidráulico manual, célula de carga, deflectômetros analógicos e dois tipos de extensômetros da marca Excel Sensores (modelo PA-06-125AA-120L para aço e PA-06-201BA-120L para o concreto), dispostos aos pares, que foram estrategicamente localizados, utilizando-se  $\frac{1}{4}$  ponte de Wheatstone. Estes instrumentos estavam ligados a dois sistemas de aquisição de dados, sendo que os extensômetros da armadura de flexão encontravam-se conectados ao *ALMEMO® 5690-2M* e os utilizados no concreto conectados ao *Spider8*. Os valores medidos foram obtidos e armazenados no computador através dos softwares *AMR WinControl*, que procedeu a leitura dos extensômetros posicionados no aço (registro contínuo) e o *Catman*, que efetuou a leitura dos extensômetros do concreto (registro pontual).

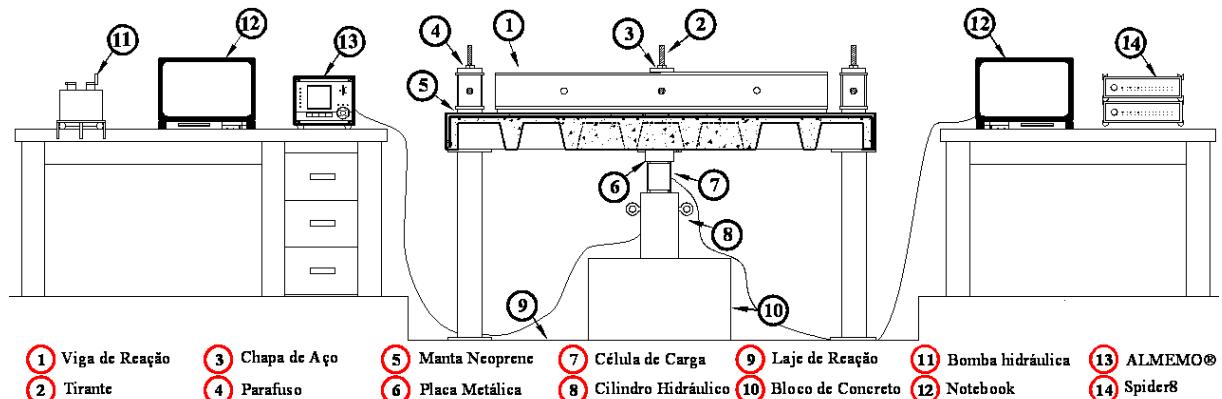


Figura 6 – Visão geral do sistema de ensaio e aquisição de dados

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Dentre os pontos monitorados na armadura de flexão, registrou-se que a maioria das barras de todas as lajes sofreu escoamento sem, contudo, esgotar a capacidade de carga das lajes. Os resultados indicam que estas suportaram ainda cerca de 50 % acima de  $P_{ys}$ . A Tabela 2 informa sobre os modos de ruptura e ruína observados, ressaltando-se que o conceito de ruína aqui estabelecido refere-se à perda total da capacidade resistente das lajes. Observou-se ainda que, para a maioria das lajes, as maiores deformações foram lidas nas barras centrais ao pilar, embora, para alguns casos, as deformações máximas tenham sido observadas nos extensômetros imediatamente adjacentes.

Para as deformações no concreto, as diferenças entre as deformações tangenciais e radiais foram maiores quanto maiores eram as dimensões das regiões maciças e tendiam a decrescer à medida que os sensores se localizavam mais distantes do eixo do pilar, estando as regiões críticas, logicamente, mais próximas ao pilar, e estas se tornavam mais significativas quando a região maciça diminuía e o ponto monitorado encontrava mais próximo à área onde se localizavam as nervuras.

Tabela 2 – Resultados de ensaio e modos de ruptura e ruína observados e previstos

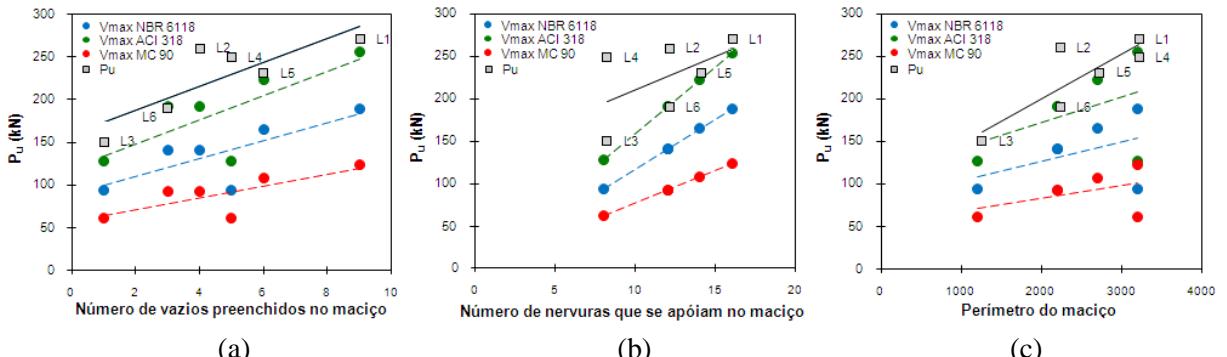
Laje	d (mm)	$\rho$ (%)	$f'_c$	$P_{ys}$ (kN)	$P_u$ (kN)	Modo de ruptura observado	Modo de ruína observado	Modo de ruptura previsto
L1	128	0,47	55,9	105,0	270,5	Flexão	Punção	C/N*
L2	130	0,47	55,9	125,0	260,0	Flexão	Punção	C/N*
L3	128	0,47	55,9	100,0	150,5	Flexo-punção	Punção	C/N*
L4	128	0,47	55,9	115,0	249,0	Flexão	Punção	C/N*
L5	127	0,47	55,9	95,0	231,0	Flexão	Punção	C/N*
L6	126	0,47	55,9	80,0	190,0	Flexão	Punção	C/N*

\* Nota: C/N significa cisalhamento na nervura.

Quanto aos deslocamentos verticais das lajes, monitorados nas direções ortogonais das lajes, os quais apresentaram variações consideráveis em função da geometria e posição da região maciça. Para lajes de maciço simétrico e nas direções em que as lajes de maciço assimétrico apresentavam-se centralizados, a variação dos deslocamentos se desenvolveu com traçados que se conservavam suaves nas mudanças de inclinações, evidenciando-se nas direções das lajes com maiores porções de maciço. Já nas direções em que o maciço apresentava-se de forma excêntrica, observou-se mudança de comportamento, a exemplo da laje L5, que apresentou uma variação substancial em sua deformada, o que pode indicar redistribuição de esforços nas lajes com maciço assimétrico.

A fissuração se tornou mais intensa à medida que o maciço aumentou, fato que parece estar associado ao momento de fissuração – e consequente perda de rigidez – podendo-se sugerir a ocorrência do aumento da ductilidade ao comparar a evolução das fissuras visíveis, desde o instante do seu aparecimento até o instante de ruína. Dessa forma, a presença da região maciça não interferiu na ductilidade da peça, ao contrário, garantiu-se resistente durante a plastificação das barras, enquanto sua seção aumentava a curvatura. Para o caso das lajes ensaiadas, ocorreu a presença de indícios prévios que evidenciaram a proximidade da ruína, como o aparecimento de grandes aberturas das fissuras, escoamento da armadura de flexão e a presença de grandes rotações, confirmando a ruptura por flexão com ruína por punção. Na superfície de fraturamento, estas influenciaram na inclinação das superfícies de ruptura, obtendo-se inclinações mais íngremes para as lajes de menor maciço. Cabe lembrar que o conceito de ruína aqui estabelecido referiu-se à perda total da capacidade resistente das lajes, sendo observada em todos os casos a ruína por punção.

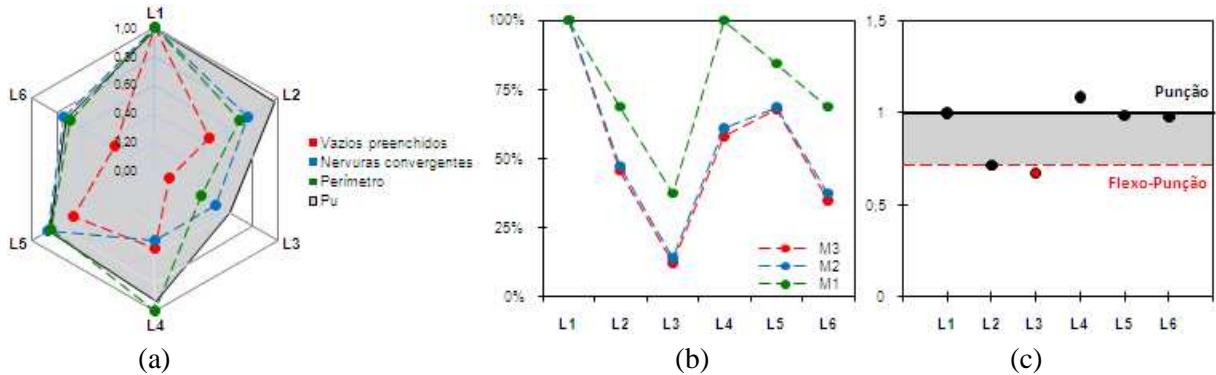
No que se refere às normas avaliadas, todas as lajes romperiam por cisalhamento na nervura, sendo desconsiderados outros aspectos importantes na análise da estrutura, como relacionar por exemplo, os resultados de  $V_{máx}$  estimados com as principais características da região maciça das lajes, tais como a quantidade de nervuras que chegam à região maciça, o número de vazios preenchidos no maciço (núcleo entre nervuras) e o perímetro de cada região maciça. Da análise do Gráfico 1, verifica-se que há uma tendência de aumento da capacidade de carga prevista para as lajes em relação aos parâmetros de análise, quando se relaciona os valores estimados pelas normas, indicando relevante interferência das variáveis de estudo consideradas nas previsões normativas. Dentre as normas avaliadas, as maiores discrepâncias ocorreram ao relacionar a quantidade de vazios preenchidos no maciço, apresentando um erro de 7 % à reta de tendência dos resultados, enquanto para o perímetro da região maciça, o erro caiu para 3 %. No entanto, com a coleta dos dados experimentais obtidos em laboratório, observou-se que os resultados divergiram consideravelmente destas previsões, indicando que o comportamento deste tipo de sistema estrutural se diferenciou bastante do que ocorre em lajes lisas maciças, nas quais são baseadas as recomendações dos códigos normativos. Assim, buscando-se correlacionar os resultados de resistência última alcançados nos ensaios com as variáveis mencionadas, foram superpostos novos pontos com dados experimentais plotados aos gráficos com os dados estimados. A partir dessas informações, verificou-se sensível influência da progressão dos perímetros da região maciça em relação ao aumento da carga última à punção na correlação entre eles para os pontos situados dentro da faixa limitada nos ensaios. No entanto, o interesse nesta investigação pode possibilitar avaliações mais aprofundadas nas considerações de norma, embora haja clara necessidade estudos mais detalhados sobre o assunto e com maior quantidade de dados.



**Gráfico 1** – Capacidade resistente prevista e observada com relação ao (a) número de vazios preenchidos no maciço (b) número de nervuras que se apóiam no maciço e (c) perímetro do maciço

Quando se considera a quantidade de nervuras apoiadas na região maciça, partindo da curva de tendência dos dados experimentais, os resultados mostram-se bem mais dispersos, o que pode ser supostamente aceitável, uma vez que deve-se considerar que as resistências das nervuras não atingiram sua capacidade máxima. As estimativas encontradas para as nervuras foram, em todos os casos avaliados, excetuando-se a laje L3, bastante inferiores aos resultados experimentais, uma vez que estas apresentaram boa capacidade de carga junto à região maciça, sem apresentar ruptura por cisalhamento nas nervuras, o que teoricamente deveria ter ocorrido.

Para efeito de análise comparativa, adotou-se como referência os parâmetros relacionados à laje L1, que compôs a maior região maciça e correspondeu à relação de 1/6 do vão empregado, referente à estrutura protótipo da qual o elemento de laje foi retirado. As demais lajes (L2, L3, L4, L5 e L6) representaram porcentagens sobre a eficácia das diferentes configurações de maciços em função das cargas últimas atingidas, julgando sua representatividade em relação à unidade. A envoltória de cargas de ensaio foi ilustrada a fim de permitir melhor identificação dos limites referentes ao desempenho padrão obtido por L1, conforme mostra o Gráfico 2(a). Visualmente, é possível considerar que a eficiência de desempenho quanto à capacidade resistente das lajes submetidas à ruptura se aproximou mais adequadamente ao desenvolvimento do perímetro. Observe-se que, tanto L1 quanto L4 apresentavam mesmo valor de perímetro da região maciça, correspondente a 1,0. No entanto, esta superou os limites da envoltória de cargas máximas de ensaio, indicando, aparentemente, ter reagido melhor às condições de ruptura que L1, ou seja, apesar da menor capacidade resistente, sua região maciça respondeu melhor às solicitações. Em contraponto à análise unidimensional, foram também delineadas análises bidimensionais ( $m^2$ ) e tridimensionais ( $m^3$ ) a fim de parametrizar as demais dimensões do maciço, embora também confirme que o desempenho mais aproximado é retratado com relação ao perímetro, como indicado no Gráfico 2(b). Tanto o volume quanto a área maciça estabeleceu relações de desempenho bastante próximas entre si, no entanto, se distanciaram do comportamento real da estrutura. Assim, tomando como referência as análises fornecidas pelo parâmetro correto, os resultados apontaram a possibilidade de diminuição do perímetro do maciço em aproximadamente 70%, conservando ainda considerável capacidade última à punção, sem ocorrer mudança no modo de ruptura, como ilustra o Gráfico 2(c). Tal consideração se fundamentou unicamente na distinção do modo de ruptura de flexo-punção, ocorrida na laje L3, para a punção propriamente dita, para as demais lajes. Tratou-se, portanto, de uma avaliação objetiva, cuja escolha baseou-se na identificação do colapso, a partir de um limite inferior e mínimo para a ocorrência da punção, sendo a dedução realizada para L2 penalizada por questões de segurança.



**Gráfico 2** – Comparativo entre as variáveis analisadas

A utilização deste critério satisfez aos resultados obtidos neste trabalho, porém exige ainda confirmação e carece de estudos específicos mais profundos. Além disso, no caso específico das lajes ensaiadas, embora a análise aparente relativamente simples, os dados constituem representatividade preliminar sobre o comportamento mecânico e campos de tensões nas zonas de apoio de regiões maciças com diferentes configurações de sistemas de lajes lisas nervuradas, cuja importância é relevante no dimensionamento e detalhamento, diante da atual conjuntura de construções deste tipo. Assim, somente mediante a consolidação desta hipótese através de estudos mais aprofundados e com maior quantidade de resultados sobre o assunto o conceito de segurança estrutural em sistemas de lajes lisas nervuradas contemplará igualmente os ganhos com economia e eficiência construtiva.

## **5 CONCLUSÕES**

A região em torno do pilar das lajes ensaiadas esteve sob um estado de tensões complexo, com vazios entre nervuras em peças de rigidez variável, onde, por motivos diversos que afetam a maioria dos pesquisadores, restrições de monitoramento limitaram a instrumentação. No entanto, ainda que os dados fornecidos tenham sido parcialmente satisfatórios sobre o comportamento das lajes, foi possível acompanhar com suficiente indicação o funcionamento das mesmas. Ao considerar somente as implicações resultantes da variação dos parâmetros geométricos do maciço na capacidade máxima e no comportamento das lajes submetidas ao colapso estrutural, fazendo-se uso dos indicativos de capacidade última à punção, foi possível esclarecer alguns de seus efeitos sobre as mudanças nos modos de ruptura nos sistemas de lajes lisas nervuradas.

Adicionalmente, é notório o fato de o modo de ruptura estimado pelas normas avaliadas para todas as lajes não ter coincidido com o obtido nos ensaios, confirmado a falta de informações mais precisas sobre o comportamento destas no sistema de lajes lisas nervuradas. Corrobora para isto o fato de que grande parte dos ensaios experimentais destinados ao estudo da ruína ter comumente utilizado elementos de lajes isolados como modelo físico estrutural, cujas características são apropriadas para o caso de lajes maciças, com usual extração dos resultados para os demais sistemas. Assim, é clara a necessidade de dar continuidade ao estudo sobre lajes lisas nervuradas, efetuando-se novos ensaios que reflitam o real comportamento da estrutura e garantam maior confiabilidade, caracterizando conteúdo para estudos adicionais.

## **6 REFERÊNCIAS**

- ACI-318 R. **Building Code Requirements for Structural Concrete.** American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
- ALBUQUERQUE, A. T.; PINHEIRO, L. M. **Viabilidade econômica de alternativas estruturais de concreto armado para edifícios.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2002, n.19.
- ALBUQUERQUE, N. G. **Análise Experimental de Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com Região Maciça de Geometria Variável ao Punctionamento.** Belém. 2009. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 2009.
- CEB-FIP. **Model Code 1990,** Thomas Telford, London, 1993.
- NBR 6118. **Projeto e execução de obras de concreto armado.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.
- TESORO, F. R. **Los Forjados Reticulares – Manual Práctico.** CYPE Ingenieros, Barcelona; 1991. 232 p.
- REGAN, P.E. **Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs.** Construction Industry Research and Information Association - CIRIA Report R89. Feb. 1981. 89 p.
- ULMA Construcción. Encofrado RECUB: Sistema Reticular de Cubetas. 2007. Disponível em: <<http://www.ulma-c.com>>. Acesso em: 26 de março de 2010.

## **7 AGRADECIMENTOS**

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