

PUNÇIONAMENTO EM LAJES PLANAS DE CONCRETO ARMADO COM ARMADURA DE CISALHAMENTO INTERNA

Punching in Reinforced Concrete Flat Slabs with Internal Shear Reinforcement

TRAUTWEIN, Leandro Mouta¹, GOMES, Ronaldo Barros², MELO, Guilherme S. S. A.³

Recebido em 26 de maio de 2013; recebido para revisão em 15 de setembro de 2013; aceito em 30 de setembro de 2013; disponível on-line em 12 de novembro de 2013.



PALAVRAS CHAVES:

Lajes planas;
Concreto armado;
Punção;
Armadura de cisalhamento;

RESUMO: São apresentados resultados experimentais de ensaios em 03 (três) lajes planas de concreto armado, de dimensões 3000 x 3000 x 200 mm, com armadura de cisalhamento tipo *stud* com chapa de aço soldada nas extremidades superiores e inferiores e com pinos soldados nas chapas inferiores. Esta armadura de cisalhamento era posicionada internamente em relação à armadura de flexão. As lajes foram submetidas a um carregamento simétrico, com o objetivo de investigar a eficiência dessa armadura na resistência à punção das lajes. A resistência à compressão do concreto variou de 36,8 a 43,4 MPa, e as lajes tinham uma área central carregada representando um pilar central quadrado de 200 mm de lado. A principal variável foi o diâmetro dos *studs* que compunham a armadura de cisalhamento. Resultados de carga última, tipo de ruptura, fissuração, flecha e deformações da armadura de cisalhamento são apresentados. Os resultados são comparados com uma laje similar sem armadura de cisalhamento, e com as estimativas de cargas de ruptura das normas ACI 318M (2011), Eurocode 2 (2004) e NBR 6118/2007. Os resultados mostraram que a armadura de cisalhamento utilizada de forma interna à armadura de flexão pode ser eficaz.

* Contato com os autores:

¹ e-mail : leandromt@fec.unicamp.br (L. M. Trautwein)

Professor, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas

² e-mail : rbggomes@gmail.com (R. B. Gomes)

Professor, Escola de engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás

³ e-mail : melog@unb.br (G. S. S. A. Melo)

Professor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília

ISSN: 2179-0612

© 2013 REEC - Todos os direitos reservados.

1. INTRODUÇÃO

O sistema estrutural composto por lajes planas comparado com o sistema convencional (laje-viga-pilar) apresenta uma série de vantagens, que podem ser resumidas em economia de tempo, execução e custos. Entre as possíveis vantagens deste tipo de estrutura destacam-se: simplificação na execução das formas, adaptação da obra a diferentes finalidades durante a sua vida útil devido à inexistência de vigas, diminuição dos revestimentos e da altura total do edifício. As lajes planas, por serem apoiadas

diretamente sobre os pilares têm sua resistência limitada pela punção na laje, que é uma ruptura por cisalhamento que ocorre para uma carga menor que a associada à ruptura por flexão. Esta ruína acontece de forma abrupta e é uma ruptura frágil, sem aviso prévio. Para aumentar a resistência e, eventualmente, combater a punção, pode-se aumentar a espessura das lajes na região do pilar (uso de capitéis), utilizar concreto de alta resistência, ou usar armadura de cisalhamento nas regiões próximas ao pilar.

O objetivo deste trabalho é investigar a eficiência de uma armadura de cisalhamento tipo *stud*,

com chapas de aço soldadas nas extremidades, posicionada internamente em relação à armadura de flexão. O acréscimo de resistência à punção das lajes, utilizando esse tipo de armadura de cisalhamento é a meta principal deste estudo. Deve-se ressaltar que as normas nacionais e internacionais, não recomendam o posicionamento da armadura de cisalhamento interna à armadura de flexão.

Os resultados dos ensaios foram comparados com resultados obtidos por Gomes (1991) e Andrade (1999) que ensaiaram lajes de mesmas dimensões e propriedades mecânicas dos materiais próximas às das lajes em análise. Gomes (1991) ensaiou 12 lajes com e sem armadura de cisalhamento, entretanto foram utilizadas para comparação neste trabalho apenas as lajes G1 sem armadura de cisalhamento e G9 com armadura de cisalhamento do tipo *stud* ancorada na armadura de flexão. As armaduras de cisalhamento utilizadas nas lajes ensaiadas por Andrade (1999) foram posicionadas internamente à armadura de flexão, como as deste trabalho. Andrade (1999) observou que surgiram fissuras horizontais localizadas entre as armaduras de flexão e de cisalhamento. As cargas de ruptura obtidas experimentalmente também foram comparadas com cargas teóricas previstas pelos métodos de cálculo do ACI 318M (2011), EUROCODE 2 (2004) e a NBR6118/2007.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu em três ensaios de lajes de concreto armado com as mesmas dimensões e armadura de flexão, submetidas a um carregamento aplicado no centro da laje por meio de uma placa metálica (200 x 200 x 50 mm) na face inferior da laje, fixada com gesso, simulando um pilar de mesmas dimensões. As lajes tinham 3000 mm de lado e 200 mm de espessura. Estas dimensões correspondem a uma região de momento fletor nulo ao redor do pilar de aproximadamente um quinto do vão em escala real, o que equivale a um vão de 7,5 m, considerando uma situação de pilar interno e carregamento simétrico.

O sistema de ensaio é mostrado nas Figuras 1 e 2. As lajes foram fixadas nas bordas por 16 tirantes com diâmetro de 25 mm ligados às vigas metálicas para transmissão das cargas à laje de reação. No centro da laje foi aplicada uma carga concentrada com um macaco hidráulico, alimentado por uma bomba manual, através da placa metálica na face inferior da laje. O controle de aplicação da carga foi feito usando uma célula de carga

com capacidade para 2000 kN.

A armadura de flexão foi composta por 31 barras de 16 mm de diâmetro (CA-50) no bordo superior em cada direção, espaçadas a cada 10 cm, enquanto que a armadura do bordo inferior foi constituída por 21 barras de 8 mm (CA-50) em cada direção, espaçadas a cada 15 cm. Para garantir uma adequada ancoragem das barras superiores, foram acrescentadas 31 barras em formas de U com 12,5 mm de diâmetro em cada lado da laje. A Figura 3 apresenta o detalhamento da armadura de flexão utilizada nas lajes ensaiadas. Foi utilizada uma elevada taxa de armadura de flexão, para que a resistência à flexão da laje fosse elevada, de forma que a ruptura ocorresse por punção.

A armadura de cisalhamento utilizada nas três lajes foi do tipo *stud*, composta por pedaços de barras de aço CA50, posicionados verticalmente, com chapas de aço soldadas nas extremidades superiores e inferiores. A armadura de cisalhamento foi composta de oito linhas de “studs” com onze elementos espaçados de 60 mm, e oito linhas de *studs* intermediários com sete elementos também espaçados de 60 mm, conforme ilustrado na Figura 4. Todas as linhas de *studs* foram posicionadas internamente à armadura de flexão. Quatro linhas de studs com onze elementos foram posicionadas perpendicularmente às faces do pilar, e as outras quatro foram situadas a partir dos cantos do pilar. As oito linhas intermediárias, com sete elementos, foram utilizadas em função da distância circunferencial entre os últimos elementos das linhas com onze elementos ter ficado maior que 2,5d. A distância da face do pilar ao primeiro elemento (S_0) foi de 35 mm, e ao último elemento foi de 635 mm.

A altura total do *stud* foi de 115 mm (Figura 4), sendo as barras soldadas a uma chapa de aço com 10 mm de espessura, nas extremidades superior e inferior. Os seis pinos soldados, com diâmetro de 12,5 mm, na chapa inferior mostrados na Figura 5, foram colocados somente nas linhas com onze elementos, com o lado dos pinos adjacente as faces do pilar. Esses pinos foram utilizados para evitar a aparecimento de fissuras entre a armadura de flexão inferior e a chapa inferior da armadura de cisalhamento (Andrade, 1999). Na solda das armaduras de cisalhamento foram utilizados eletrodos “OK 48.4” de 3,5 mm. A Figura 6 apresenta uma fotografia da armadura de cisalhamento posicionada internamente em relação à armadura de flexão. As propriedades mecânicas do concreto, detalhes da armadura de cisalhamento e características das lajes ensaiadas são apresentadas na Tabela 1.

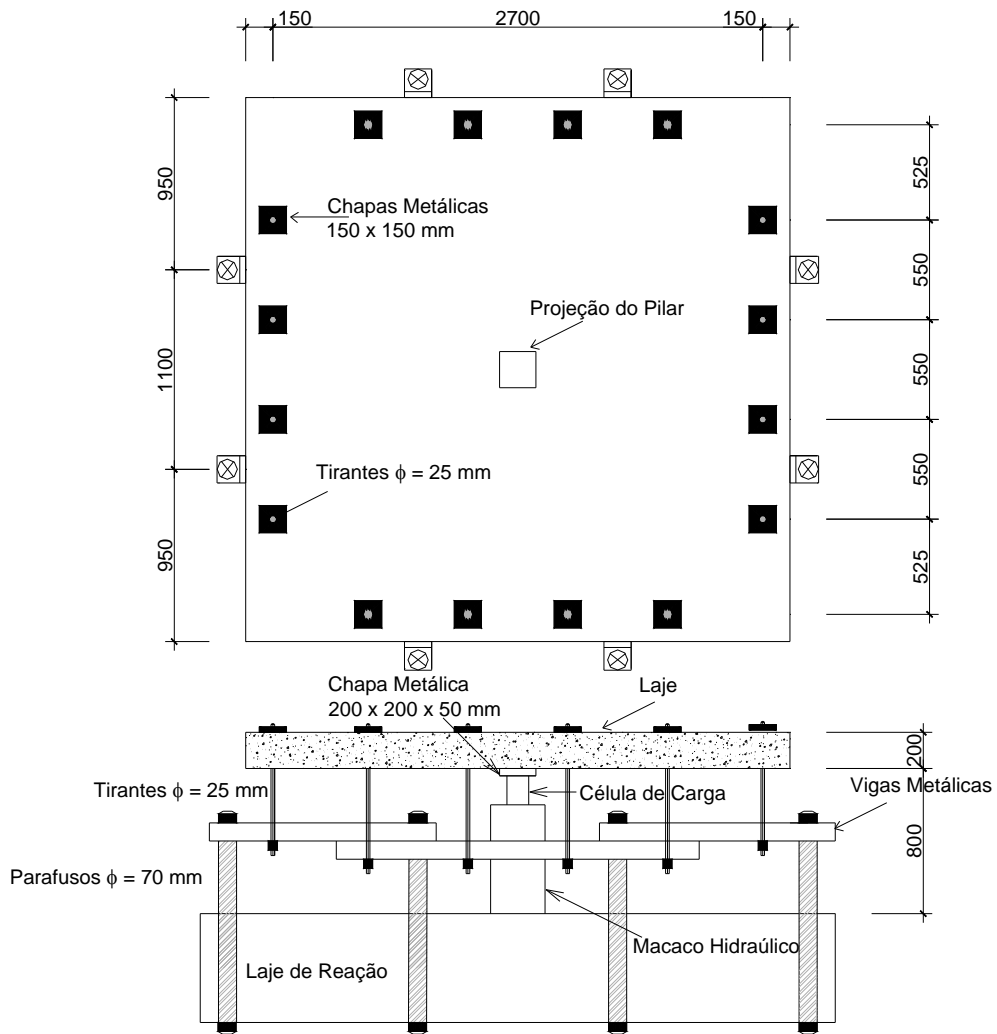


Figura 1: Esquema de Ensaio (unidades em mm).

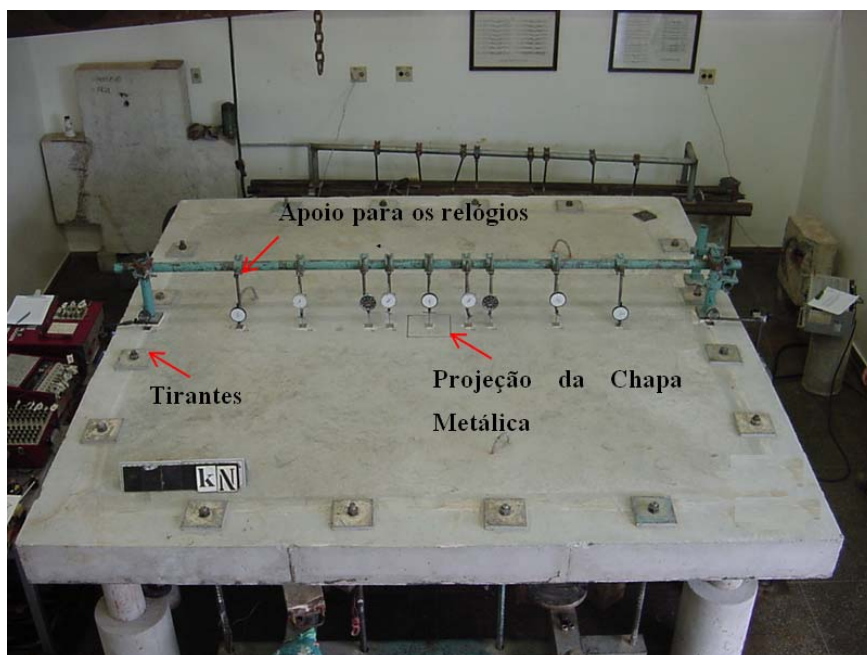


Figura 2: Fotografia do esquema de ensaio (Vista superior).

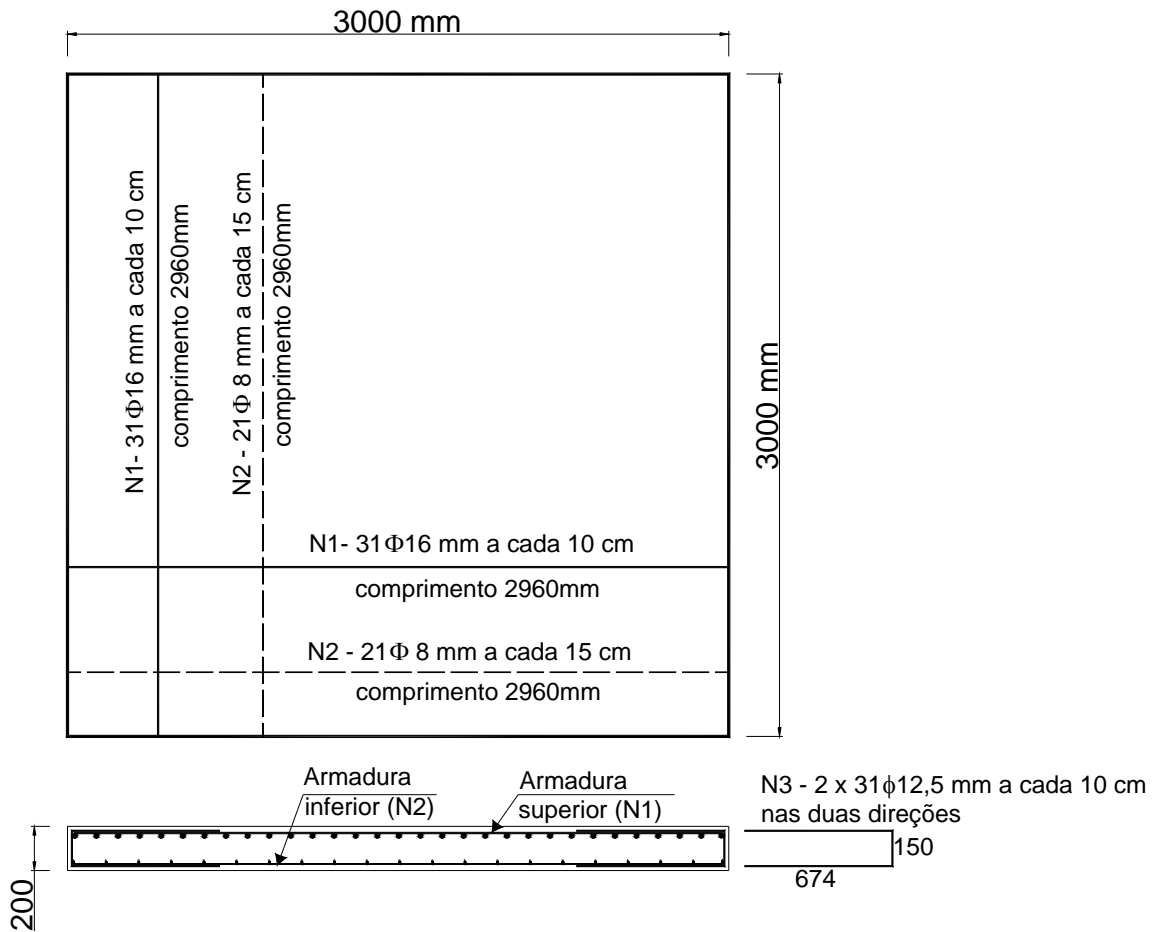


Figura 3: Detalhamento da armadura de flexão.

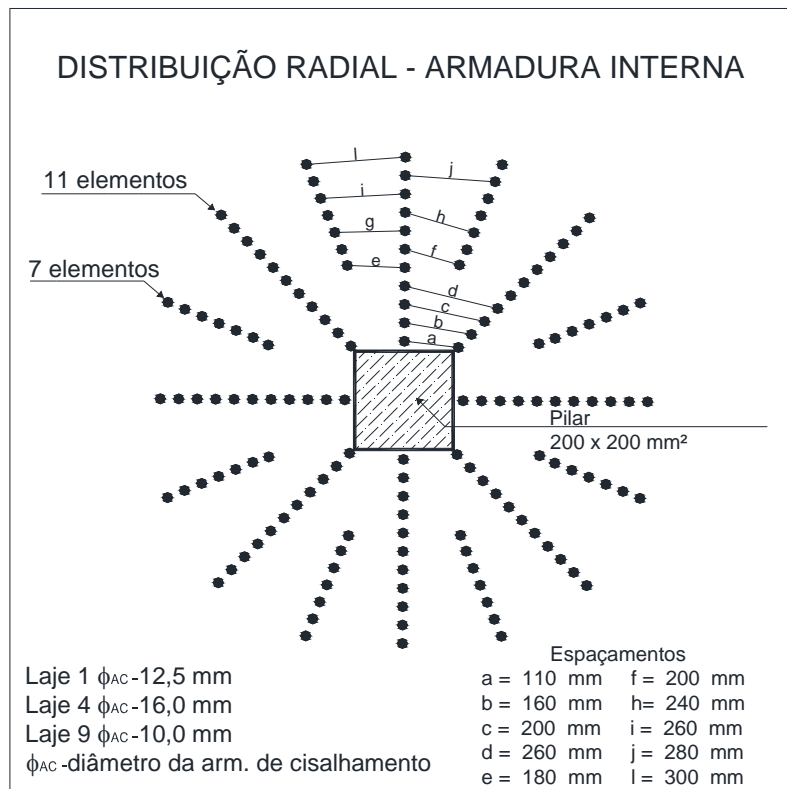


Figura 4: Esquema de distribuição radial da armadura de cisalhamento - lajes 1, 4 e 9.

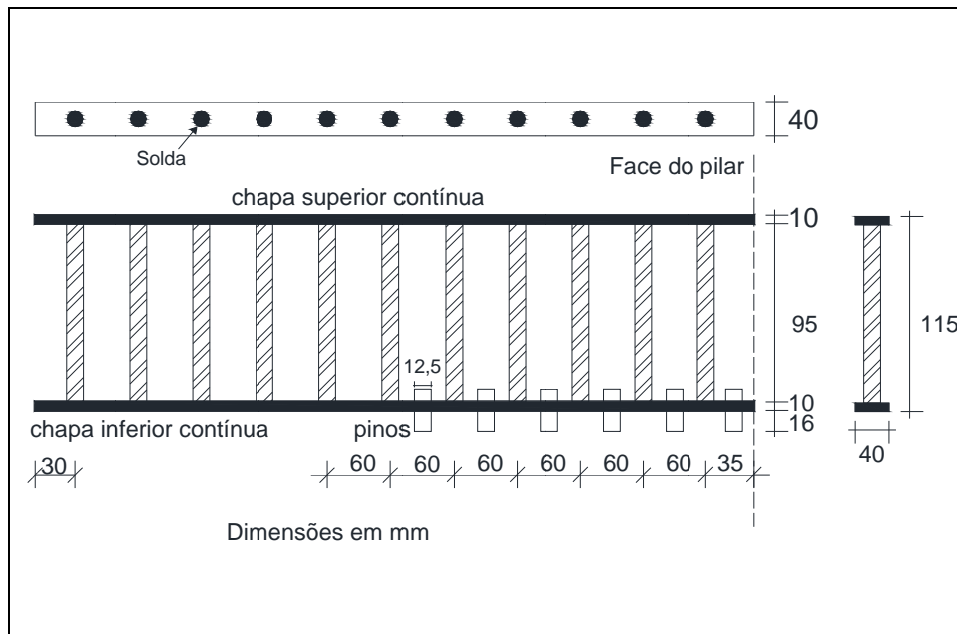


Figura 5: Detalhe da armadura de cisalhamento (dimensões em mm - linhas com onze elementos).

Tabela 1: Características das lajes ensaiadas - lajes 1, 4 e 9.

| LAJE | f_c (MPa) | f_t (MPa) | E (GPa) | d (mm) | $\varnothing_{A_{sw}}$ (mm) | A_{sw}/cam (mm ²) | A_{sw}/S_r (mm ² /mm) |
|------|----------------|----------------|--------------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 36,8 | 2,8 | 22,7 | 159 | 12,5 | 981,25 | 16,35 |
| 4 | 43,4 | 2,7 | 23,4 | 164 | 16,0 | 1607,68 | 26,79 |
| 9 | 39,4 | 4,0 | 20,8 | 154 | 10,0 | 628,00 | 10,47 |



Figura 6: Armadura interna à armadura de flexão.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

São apresentados resultados referentes aos deslocamentos verticais das lajes, deformações da armadura de cisalhamento, cargas de ruptura, bem como a localização das prováveis superfícies de ruptura. Os resultados obtidos também são comparados com os de uma laje sem armadura de cisalhamento, e com os resultados estimados pelas normas ACI 318M (2011), Eurocode 2 (2004) e NBR 6118/2007.

3.1 CARGAS E MODOS DE RUPTURA

Todas as lajes ensaiadas foram carregadas até a ruptura (Tabela 2), e todas romperam por punção, com cargas últimas que variaram de 933 kN (laje 9) à 1050 kN (laje 1).

Pode-se observar nas lajes 1 e 4 um esmagamento do concreto na região da armadura de cisalhamento entre a face do pilar e a terceira camada da armadura de cisalhamento. Observou-se também na laje

1, o aparecimento de duas possíveis superfícies de ruptura, uma superfície de ruptura teria surgido cruzando as duas primeiras camadas, e a outra teria cruzado a terceira e quarta camada da armadura de cisalhamento. As Figuras 7 e 8 mostram respectivamente a laje 1 cortada ao meio e parte da armadura de cisalhamento extraída da laje 4 (a chapa de aço da armadura de cisalhamento foi rompida após a ruptura, no momento do corte da laje), onde pode ser visualizado um possível esmagamento do concreto.

A superfície de ruptura da laje 9 cruzou as três primeiras camadas da armadura de cisalhamento. Deve-se registrar que não houve ruptura das barras nem da solda da armadura de cisalhamento das três lajes testadas. Não foram observadas também fissuras horizontais entre a armadura de flexão e de cisalhamento, na parte inferior da laje. As Figuras 9 e 10 apresentam respectivamente a vista inferior da laje 9 após a ruptura e o desenho esquemático dos modos de ruptura das lajes.

| Tabela 2: Carga de ruptura das lajes. | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|----------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| Laje | f_c (MPa) | d (mm) | ρ (%) | Armadura de cisalhamento | Nº Camadas | \varnothing_{ASW} (mm) | P_u (kN) |
| 1 | 36,8 | 159 | 0,012 | stud | 11 | 12,5 | 1050 |
| 4 | 43,4 | 164 | 0,012 | stud | 11 | 16,0 | 1038 |
| 9 | 39,4 | 154 | 0,013 | stud | 11 | 10,0 | 933 |

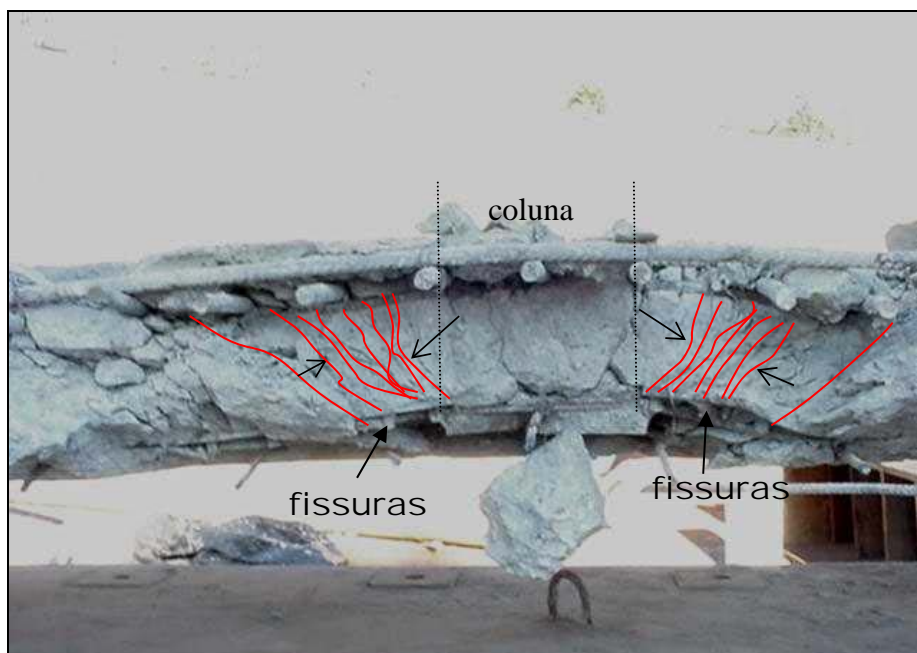


Figura 7: Laje 1 cortada ao meio (possível esmagamento do concreto entre a face do pilar e a terceira camada e também provável superfície de ruptura cruzando a terceira e quarta camada da armadura de cisalhamento).



Figura 8: Armadura de cisalhamento da Laje 4 após a ruptura (possível esmagamento do concreto).



Figura 9: Vista da Laje 9 pela face inferior (coluna penetrou na laje).

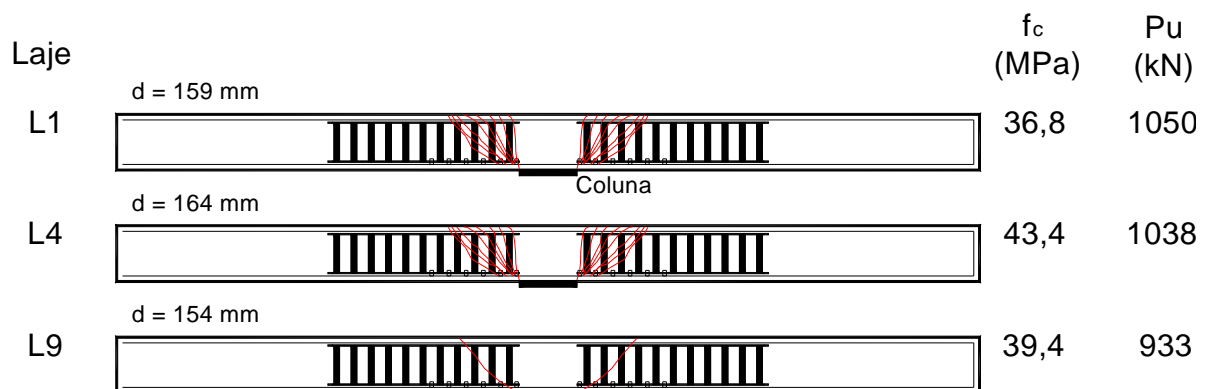


Figura 10: Desenho esquemático das lajes ensaiadas em corte com as cargas e as prováveis superfícies de ruptura.

Para verificar o acréscimo da resistência à punção nas lajes com armadura de cisalhamento do tipo *stud* interno, em relação a uma laje semelhante sem armadura de cisalhamento, os resultados obtidos foram comparados com a laje G1 de Gomes (1991), que tinha as mesmas dimensões, taxa da armadura de flexão, e resistência à compressão do concreto similar e sem armadura de cisalhamento. Nesta laje de referência, a ruptura ocorreu por punção e a carga última foi de 560 kN. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos por Gomes (1991), para a laje G1 em comparação com os resultados desta pesquisa. O acréscimo da carga de ruptura variou de 67% a 87%, indicando também a potencialidade deste tipo de armadura de cisalhamento.

A Tabela 4 apresenta os resultados experimentais obtidos por Gomes (1991) e Andrade (1999) para as lajes com armadura de cisalhamento. A

carga máxima de ruptura para uma laje com armadura de cisalhamento composta por *studs*, que envolviam a armadura de flexão foi registrada na laje G9 de Gomes (1991). A carga de ruptura da Laje 1 ($A_{sw}/cam = 981,25 \text{ mm}^2$), com armadura de cisalhamento interna à armadura de flexão, com os pinos na parte inferior, comparada com a laje G9 (Gomes, 1991), foi 15% inferior. Isto comprova a potencialidade deste tipo de armadura, apesar de serem necessários ainda alguns ajustes como o controle da superfície de ruptura da laje. Com relação à Laje A308 de Andrade (1999), que possui armadura de cisalhamento sem envolver a armadura de flexão e mesma quantidade de armadura por camada da Laje 1, o aumento da resistência à punção foi de 3%. Entretanto é importante ressaltar que não foram visualizadas fissuras horizontais na parte inferior da laje como Andrade (1999) relatou.

Tabela 3: Comparação dos resultados com uma laje sem armadura de cisalhamento.

| Laje | f_c (MPa) | d (mm) | Nº Cam. | $\emptyset_{A_{sw}}$ (mm) | P_u (kN) | $P_u/560$ |
|------|-------------|--------|---------|---------------------------|------------|-----------|
| G1 | 40,2 | 159 | - | - | 560 | - |
| 1 | 36,8 | 159 | 11 | 12,5 | 1050 | 1,87 |
| 4 | 43,4 | 164 | 11 | 16,0 | 1038 | 1,85 |
| 9 | 39,4 | 154 | 11 | 10,0 | 933 | 1,67 |

Tabela 4: Resultados experimentais da literatura utilizados para comparação com os obtidos neste trabalho.

| Laje | f_c (MPa) | d (mm) | S (mm) | ϕ_{AC} (mm) | A_{sw}/cam (mm ²) | $A_{sw} \cdot f_y$ (kN) | P_u (kN) | A_{sw} / S_r (mm ² /mm) |
|------|-------------|--------|--------|------------------|---------------------------------|-------------------------|------------|--------------------------------------|
| G9 | 40,0 | 159 | 80 | 12,2 | 940,0 | 404,2 | 1227 | 11,8 |
| A308 | 31,5 | 154 | 60 | 12,5 | 981,3 | 665,3 | 1020 | 16,4 |

3.2 DESLOCAMENTO VERTICAL

As deflexões foram determinadas utilizando-se relógios comparadores posicionados na face superior das lajes ensaiadas. As leituras dos relógios foram feitas em todos os estágios de carregamento, até no mínimo 85% da carga de ruptura. A Figura 11 apresenta os deslocamentos verticais das lajes ensaiadas, determinados pelo relógio comparador posicionado no centro da laje. Os deslocamentos verticais foram 22,1 mm (laje 1), 23,3 mm (laje 4) e 26,3 mm (laje 9). Apesar das diferentes seções transversais da armadura de cisalhamento, as flechas finais para as três lajes foram bem próximas. Até o carregamento de 200 kN, o deslocamento aumentou de forma similar e quase linear

para todas as lajes ensaiadas. A partir deste nível de carregamento, para um mesmo incremento de carga os acréscimos de deslocamentos tiveram passaram a ser maiores.

O gráfico da Figura 12 apresenta a comparação dos deslocamentos verticais máximos obtidos para as lajes ensaiadas em relação ao valor obtido por Gomes (1991) na Laje G1 sem armadura de cisalhamento. Ao se analisar a Figura 11 fica evidente o ganho de rigidez das lajes com armadura de cisalhamento do tipo *stud* interno em relação à laje sem armadura de cisalhamento. É importante ressaltar que estes deslocamentos foram obtidos para um carregamento menor do que a carga de ruptura, pois para evitar dano aos relógios comparadores, estes foram retirados antes da ruptura.

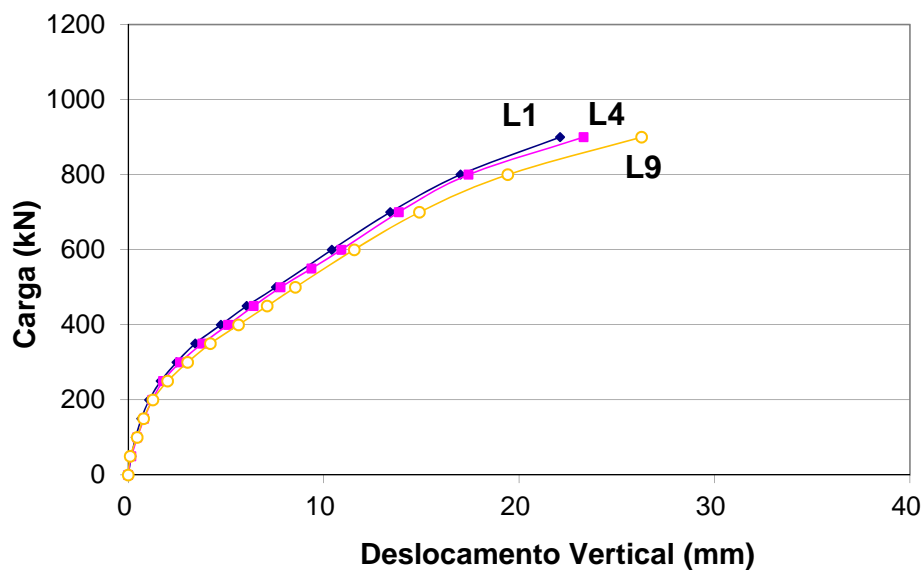


Figura 11: Deslocamentos verticais medidos nas Lajes 1, 4 e 9 no centro da laje.

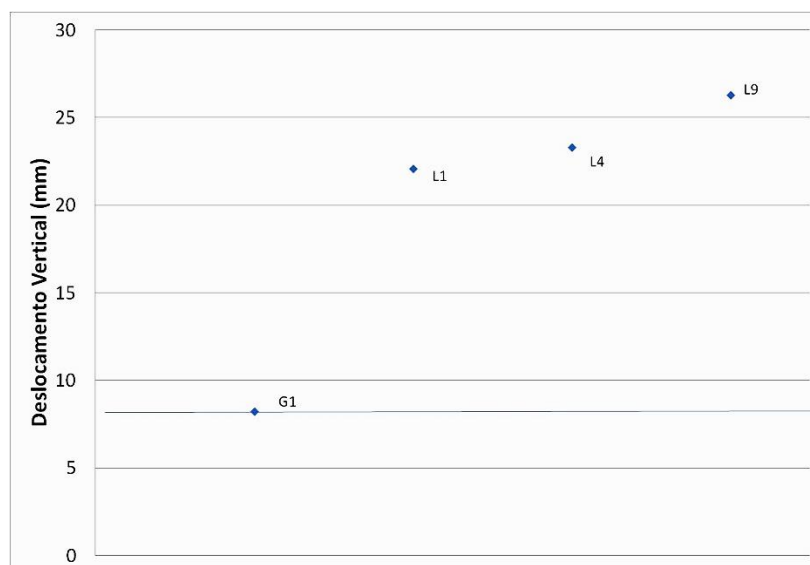


Figura 12: Acréscimo dos deslocamentos verticais obtidos em relação à laje de referência sem armadura de cisalhamento.

3.3 FISSURAS

As primeiras fissuras visíveis foram as radiais, e ocorreram em todas as lajes para carregamentos entre 150kN e 200kN. A partir desta faixa de carregamento em que ocorreu a primeira fissura, os deslocamentos verticais passaram a ter acréscimos maiores para um mesmo incremento de carga, caracterizando uma perda de rigidez devida ao aparecimento de fissuras. As fissuras circunferenciais formaram-se em um estágio de carregamento mais elevado (350 kN e 500kN) ao redor da área carregada.

Nota-se que a primeira fissura radial surgiu em média para uma carga de aproximadamente 18% da carga de ruptura. No entanto, nesta fase do surgimento da primeira fissura radial, as lajes apresentaram um deslocamento vertical central menor que 2mm. Para este nível de carga os elementos da armadura de cisalhamento passaram a ter maiores deformações. Observa-se que a fissura circunferencial surgiu em média

para uma carga de 40% da carga de ruptura. A tabela 5 mostra os carregamentos relativos ao surgimento das primeiras fissuras observadas visualmente para as lajes ensaiadas.

3.4 DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE CISALHAMENTO

Para as três lajes ensaiadas as barras instrumentadas não atingiram a deformação correspondente ao escoamento, como pode ser observado na Tabela 6.

Na Laje 1 com *studs* de 12,5mm as barras mais solicitadas foram as da terceira camada, para a carga de 1000 kN, com uma deformação de $2,1 \times 10^{-3}$. Os *studs* da Laje 4 (16 mm) não foram muito solicitados, com a maior deformação verificada na primeira camada ($0,9 \times 10^{-3}$). Na Laje 9 com *studs* de 10 mm, as barras situadas na segunda camada, foram as mais solicitadas ($2,3 \times 10^{-3}$). A Figura 13 apresenta as deformações da armadura de cisalhamento da Laje 9, que rompeu com a superfície de ruptura cruzando a segunda camada desta armadura.

Tabela 5: Cargas para o surgimento das primeiras fissuras em cada laje.

| Laje | f_c (MPa) | d (mm) | \varnothing_{Asw} (mm) | P (kN) 1° fissura radial | $\frac{P_{1^{\circ} \text{ fis. radial}}}{P_u}$ | P (kN) 1° fissura circunferencial | $\frac{P_{1^{\circ} \text{ fis. circunf.}}}{P_u}$ | P_u (kN) |
|------|-------------|--------|--------------------------|-----------------------------|---|--------------------------------------|---|------------|
| 1 | 36,8 | 159 | - | 200 | 0,19 | 500 | 0,48 | 1050 |
| 4 | 43,4 | 164 | 12,5 | 150 | 0,14 | 350 | 0,34 | 1038 |
| 9 | 39,4 | 154 | 16,0 | 200 | 0,21 | 350 | 0,37 | 933 |

Tabela 6: Deformação máxima registrada na armadura de cisalhamento.

| Laje | \varnothing_{Asw} (mm) | ε_s (‰) | ε_y (‰) | $\varepsilon_s/\varepsilon_y$ | P_u (kN) |
|------|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|------------|
| 1 | 12,5 | 2,1 | 5,5 | 0,38 | 1050 |
| 4 | 16,0 | 0,9 | 4,2 | 0,21 | 1038 |
| 9 | 10,0 | 2,3 | 4,5 | 0,51 | 933 |

ε_s – deformação máxima atingida na armadura de cisalhamento;
 ε_y – deformação de escoamento da armadura de cisalhamento obtido no ensaio de tração realizado.

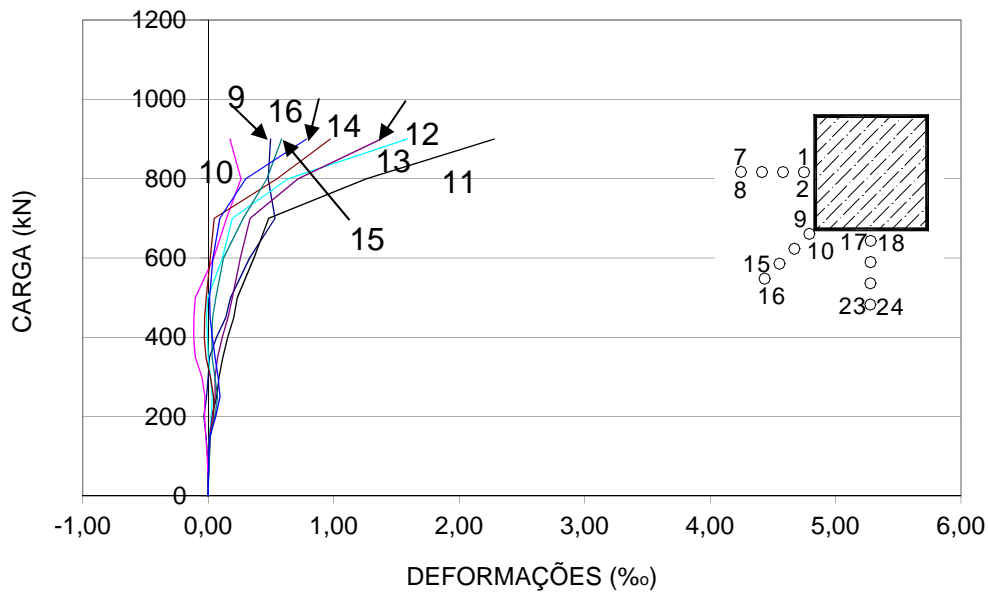


Figura 13: Carga x Deformações – Laje 9 (extensômetros 9 a 16).

3.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS CARGAS DE RUPTURA EXPERIMENTAIS E AS CARGAS ESTIMADAS PELOS MÉTODOS DE CÁLCULO.

Neste item, são apresentadas comparações entre as cargas obtidas experimentalmente e as estimadas pelas normas ACI 318M (2011), Eurocode 2 (2004) e NBR 6118/2007. A Tabela 7 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e os estimados segundo as normas.

De acordo com a NBR6118/2007, as cargas teóricas previstas para as três lajes foram superiores às cargas experimentais. O modo de ruptura previsto para as três lajes também seria adjacente à face do pilar, o que não foi verificado experimentalmente.

Os valores estimados para carga de ruptura

segundo o ACI318M (2001) são conservadores e a favor da segurança. As cargas de ruptura experimentais para as três lajes superaram em até 52% (laje 1) a carga estimada para as lajes. O modo de ruptura previsto pelo ACI318 (2011) para todas as lajes foi uma superfície de ruptura localizada entre a face do pilar e primeira camada de armadura de cisalhamento, situação que não ocorreu para nenhuma das três lajes.

Com relação ao Eurocode 2 (2004), as cargas de ruptura experimentais foram inferiores às estimadas, para a laje 1 a diferença foi de 12% e para as lajes 4 e 9 de 20%. A superfície de ruptura prevista segundo o EC2 (2004) para as lajes 1 e 4 seria na região adjacente a face do pilar e para a laje 9 cruzando a armadura de cisalhamento, o que está bem próximo do observado experimentalmente.

Tabela 7: Comparação de cargas de ruptura experimentais e as estimadas pelas normas em estudo.

| Laje | $P_u (V_{exp})$ (kN) | NBR6118/07 | | ACI318/11 | | EC2 (2004) | |
|------|-------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| | | V_{calc} (kN) | $\frac{V_{exp}}{V_{calc}}$ | V_{calc} (kN) | $\frac{V_{exp}}{V_{calc}}$ | V_{calc} (kN) | $\frac{V_{exp}}{V_{calc}}$ |
| 1 | 1050 | 1078 | 0,97 | 693 | 1,52 | 1198 | 0,88 |
| 4 | 1038 | 1271 | 0,82 | 787 | 1,32 | 1303 | 0,80 |
| 9 | 933 | 1104 | 0,85 | 684 | 1,36 | 1165 | 0,80 |

V_{calc} – Carga de ruptura estimada pelas normas;
 V_{exp} – carga de ruptura obtida experimentalmente.

4. CONCLUSÕES

O objetivo da realização destes ensaios era verificar o comportamento das lajes com armadura de cisalhamento do tipo “stud” interno com pinos na parte inferior.

O processo de formação das fissuras nas lajes ensaiadas (Lajes 1, 4 e 9), com diâmetros de 12,5, 16 e 10 mm, respectivamente, não sofreu modificações em função da seção transversal da armadura de cisalhamento. Até o aparecimento das primeiras fissuras os deslocamentos não apresentaram grandes diferenças. Após o surgimento das primeiras fissuras radiais, para um mesmo incremento de carga, o acréscimo dos deslocamentos eram maiores.

A utilização da armadura de cisalhamento tipo *stud* interno com diferentes seções transversais não provocou diferenças substanciais nas flechas finais das lajes ensaiadas. A Laje 9, com armadura de 10 mm, apresentou o comportamento mais flexível e o maior deslocamento vertical.

As armaduras de cisalhamento instrumentadas das lajes alcançaram tensões muito abaixo da de escoamento. A laje 9, com armadura de 10 mm, atingiu as maiores tensões, que correspondem a cerca de 50% da tensão de escoamento. As camadas de armadura de cisalhamento mais próximas da área carregada foram as mais solicitadas.

Constatou-se o aumento na carga de ruptura em média de 80% nas lajes com este tipo de armadura de cisalhamento, em comparação com a laje de referência ensaiada por Gomes (1991) sem armadura de cisalhamento. Deve-se ressaltar que os métodos de cálculo analisados não preveem o posicionamento da armadura de cisalhamento interna à armadura de flexão. O método do ACI318M (2011) foi o que apresentou os resultados mais conservadores para este tipo de armadura interna à armadura de flexão. A NBR6118/2007 foi o que apresentou as estimativas mais próximas das cargas de ruptura para lajes com este tipo de armadura de cisalhamento, entretanto suas previsões foram inferiores ao que foi obtido experimentalmente.

Com relação às lajes ensaiadas por Andrade (1999) com o mesmo tipo de armadura de cisalhamento, conseguiu-se impedir o surgimento dos planos de fissuras horizontais que formavam na parte inferior das lajes ensaiadas e ainda conseguiu-se um pequeno acréscimo da resistência a punção, com a colocação dos pinos na parte inferior da armadura de cisalhamento interna. A ruptura das Lajes 1 e 4 ocorreram por esmagamento do concreto nas regiões próximas à área

carregada enquanto que na Laje 9 a superfície de ruptura cruzou a armadura de cisalhamento.

Os resultados encontrados neste estudo somados aos obtidos anteriormente e também apresentados nesse trabalho mostram a potencialidade e a eficácia da armadura de cisalhamento do tipo *stud* interno, sem envolver a armadura de flexão, no acréscimo da resistência à punção em lajes planas de concreto armado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318M-11 (2011). **Building code Requirements for Reinforced Concrete**. ACI 318M-2011, American Concrete Institute.

ANDRADE, M.A.S. (1999). **Punção em Lajes Cogumelo – Estudo do Posicionamento da Armadura de Cisalhamento em Relação a Armadura de Flexão**. Goiânia, Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Civil / UFG, 176p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR6118. **Projeto de Estruturas de Concreto Armado - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

COMITÉ INTERNATIONAL DU BETÓN – CEB – FIP **Model Code Design 1990**: Final Draft, Bulletin D’ Information, CEB, Lausanne, July 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, **Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building**, Brussels, 2003, 225p.

GOMES, R. B. (1991). **Punching Resistance of Reinforced Concrete Flat Slabs with Shear Reinforcement**. PhD Thesis, Polytechnic of Central London, England, 185p.

GOMES, R. B.; REGAN, P. E. (1999). **Punching Strength Of Slabs Reinforced For Shear With Offcuts Of Rolled Steel I Section**. Magazine of Concrete Research, London, United Kingdom, v. 51, n.2, p. 121-129, 1999.

GOMES R.B. e ANDRADE M.A.S. (1993) **Resistência à punção de lajes cogumelo de concreto armado com furos próximos da coluna e armadura de cisalhamento**. Revista IBRACON, ano IV, p. 26-29, out/nov, 1993.

HALLGREN, M. (1996). **Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs**. Royal Institute of Technology, Doctoral Thesis, Stockholm-Sweden, November, 1996, 206 p.

REGAN, P.E (1985). **Shear Combs, Reinforcement against Punching**. The Structural Engineer, dec. 1985, v.63b(4), p. 76 – 84.

TRAUTWEIN, L. M.; MELO, G. S.; GOMES, R.B. (2001). **Posicionamento em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento**. 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2001, Foz do Iguaçu.