

Study on Minimum Shear Reinforcement of Reinforced Concrete Flat Slabs

Estudo sobre Armadura Mínima de Cisalhamento de Lajes-Cogumelo de Concreto Armado

A. P. R. VAZ^a
anapjansen@gmail.com

R. B. GOMES^b
rgomes@eec.ufg.br

L. C. D. SHEHATA^c
lidiashata@vm.uff.br

Abstract

In a preliminary study that aims to define the minimum shear reinforcement of flat slabs that, leading to a punching shear failure surface that crosses that reinforcement, can avoid a sudden failure, nine slabs with 1800 mm x 1800 mm x 130 mm dimensions were tested. Their main variables were the number of shear reinforcement layers of the stud type, the cross-section area of that reinforcement in each circumferential layer and the diameter of the studs. In the attempt to define the minimum punching reinforcement of the slabs, a parameter κ , equal to the total force in the transverse reinforcement inside a truncated cone bounded by the shear crack divided by the punching strength of a similar slab without shear reinforcement, was used. The values of κ of the slabs varied between 0.27 and 1.03 and the punching failure surface crossed the shear reinforcement when κ was smaller than around 0.70. The value of κ equal to 0.6 was defined as close to the minimum for slabs with effective depth of 90 mm and flexure reinforcement ratio of 1.38%. In comparison with the slab with no shear reinforcement, slabs having κ of that order had a punching strength and rotation increase of about 10% and 30%, respectively.

Keywords: flat slabs, minimum shear reinforcement, reinforced concrete

Resumo

Dando início a estudo que visa definir a armadura transversal mínima de lajes-cogumelo de concreto armado que, levando a uma superfície de ruptura por punção atravessando essa armadura, pode evitar uma ruptura brusca, foram testadas nove lajes de dimensões 1800 mm x 1800 mm x 130 mm. Suas principais variáveis foram o número de camadas de armadura de cisalhamento do tipo *studs*, a área dessa armadura em cada camada circunferencial e o diâmetro dos *studs*. Na tentativa da definição da armadura mínima de punção das lajes, utilizou-se o parâmetro κ , igual à força total da armadura transversal situada dentro de tronco de cone de ruptura delimitado pela fissura de cisalhamento dividida pela resistência à punção de laje semelhante sem armadura de cisalhamento. Os valores de κ das lajes variaram de 0,27 a 1,03 e ocorreu superfície de ruptura cruzando as camadas de *studs* quando κ foi menor que cerca de 0,70. Definiu-se o valor de κ igual a 0,6 como próximo daquele mínimo para lajes com altura efetiva igual a 90 mm e taxa de armadura de flexão de 1,38%. Para as lajes com valor de κ dessa ordem, em relação à laje sem armadura transversal, os acréscimos de resistência à punção e de rotação foram, respectivamente, cerca de 10% e 30%.

Palavras-chave: lajes-cogumelo, armadura transversal mínima, concreto armado

^a Saneamento de Goiás S/A, SANEAGO, anapjansen@gmail.com, Avenida Fued José Sebbá 570, Jardim Goiás, Goiânia, Goiás, GO, CEP 74805-100

^b Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, UFG, rgomes@eec.ufg.br, Praça Universitária s/n., Setor Universitário, Goiânia, Goiás, GO, CEP 74605-220

^c Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, UFF, lidiashata@vm.uff.br; COPPE-UFRJ, lidia@coc.ufrj.br, Caixa Postal 68506, Rio de Janeiro, RJ, CEP 21945-970

Received 08/08/2008. Accepted 20/02/2009. Available Online 03/04/2009

1. Introdução

A utilização de lajes-cogumelo em estruturas de concreto tornou-se comum nos últimos anos, devido à redução de tempo de execução e custos, assim como à flexibilidade de utilização dos espaços construídos que ela proporciona.

Na região de ligação entre laje e pilar dessas lajes, verificam-se tensões que podem provocar ruptura das lajes por punção com carga inferior à de ruptura por flexão. Armaduras de cisalhamento são normalmente utilizadas nessa região visando aumentar a resistência e a ductilidade das lajes e um dos tipos dessa armadura é a constituída por pinos de aço soldados a chapas metálicas (*studs*).

O objetivo do estudo experimental aqui descrito foi dar uma contribuição inicial para o estabelecimento da armadura transversal mínima de lajes-cogumelo de concreto armado, do tipo *stud*, que, levando a uma superfície de ruptura por punção atravessando essa armadura, evita uma ruptura brusca. As principais variáveis consideradas no estudo foram o número de camadas de armadura de cisalhamento, a área dessa armadura em cada camada circunferencial e o diâmetro dos *studs*. Na tentativa de definir essa armadura mínima, utilizou-se o índice de armadura transversal $\kappa = (A_{sw} f_{yw})_{ef} / P_{ul,ref}$, onde $(A_{sw} f_{yw})_{ef}$ é a força total da armadura transversal situada dentro do tronco de cone de ruptura assumido e $P_{ul,ref}$ é a carga de ruptura da laje de referência, sem armadura de cisalhamento. Na Figura 1 é representada a fissura de cisalhamento que delimita o tronco de cone de ruptura [1]. Embora $P_{ul,ref}$ possa ser calculada a partir de fórmula de qualquer norma de cálculo adotada, na análise aqui apresentada optou-se por considerar para essa carga o valor obtido experimentalmente.

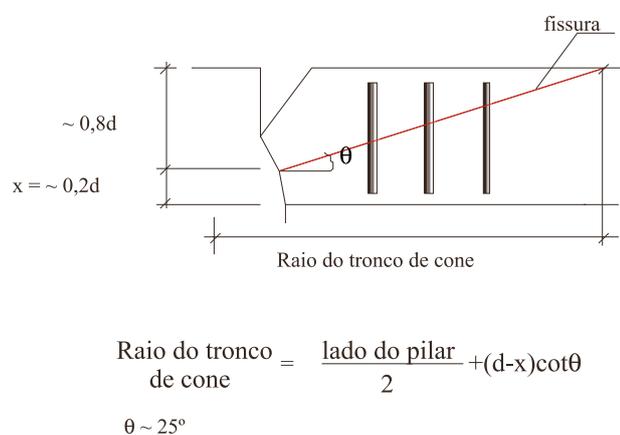
2. Programa experimental

2.1. Características das lajes e método de ensaio

As principais variáveis das 9 lajes ensaiadas foram:

- número de camadas de armadura de cisalhamento (2 a 4)
- área de armadura de cisalhamento em cada camada circunferencial, que definiu o número de linhas de armadura (4 a 8)

Figura 1 – Representação do raio do tronco de cone delimitado pela fissura de cisalhamento



- diâmetro dos *studs* (4,2 mm e 5,0 mm)

As lajes foram divididas em dois grupos. Nas do Grupo 1, mantiveram-se constantes o número de linhas (8) e a área de armadura transversal por camada (157 mm²) e variou-se o número de camadas de armadura transversal (2, 3 ou 4). Estas lajes, junto com as que tiveram superfície de ruptura interna, ensaiadas por outros autores, levaram à definição dos números de camadas e linhas de armadura transversal e também do diâmetro dessa armadura das lajes do Grupo 2. Neste grupo, todas as lajes tinham 3 camadas de armadura transversal, variando-se o número de linhas (4, 5 ou 6) e a área de armadura por camada (55,4 mm², 69,3 mm² ou 83,1 mm²), que foi sempre menor que a adotada nas lajes do Grupo 1 já que se desejava ter superfície de ruptura atravessando essa armadura. A Figura 2 e a Tabela 1 apresentam as características das lajes testadas.

O carregamento foi aplicado de baixo para cima com um atuador hidráulico, posicionado no centro da laje, e uma chapa metálica de seção transversal circular de diâmetro de 150 mm simulou o pilar. A reação ao carregamento foi feita por um conjunto de vigas metálicas atirantadas na laje de reação e apoiadas sobre oito placas de aço, posicionadas entre as vigas metálicas e a laje em estudo, a uma distância de 825 mm do centro da laje (Figura 3).

A medição dos deslocamentos na face superior da laje foi feita com relógios comparadores e transdutores de deslocamentos (potenciômetros lineares) e os pontos de medição foram distribuídos em linha reta sobre as lajes, nas direções x e y (Figura 4). Para a medição das deformações nas armaduras de flexão e cisalhamento foram utilizados extensômetros elétricos de resistência.

A medição da carga aplicada foi feita por uma célula de carga ligada a um sistema de aquisição automática de dados. Foram feitos incrementos de carga próximos de 10 kN, 20 kN ou 25 kN até que fosse alcançada a carga de ruptura, definida como sendo a maior registrada durante o ensaio.

2.2. Materiais

As barras de aço utilizadas na armadura de flexão eram de CA-50 e diâmetros de 6,3 mm e 12,5 mm. Para a armadura de cisalhamento, utilizaram-se barras de aço CA-60 com diâmetros de 4,2 mm e 5,0 mm. Para a obtenção das propriedades mecânicas foram ensaiadas quatro amostras de cada tipo de barra. Os valores das tensões de escoamento e de ruptura médios obtidos foram, respectivamente, 708 MPa e 725 MPa (4,2 mm), 624 MPa e 757 MPa (5,0 mm), 594 MPa e 714 MPa (6,3 mm), 555 MPa e 673 MPa (12,5 mm).

O concreto foi dosado para alcançar resistência à compressão de 35 MPa aos 28 dias. Em cada concretagem foram moldados corpos-de-prova cilíndricos para a obtenção da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e do módulo de deformação longitudinal. Os valores médios obtidos nos corpos-de-prova referentes às primeira e segunda concretagens foram, respectivamente: 38,0 e 38,5 MPa para resistência à compressão, 3,28 e 3,56 MPa para resistência à tração e 21,6 e 25,3 GPa para módulo de deformação longitudinal.

3. Resultados e discussões

3.1. Carga e modo de ruptura e índice de armadura de cisalhamento

A carga e modo de ruptura das lajes testadas, junto com o índice de armadura de cisalhamento, são apresentados na Tabela 2. Todas

as lajes tiveram ruptura por punção. Das com armadura transversal, as do Grupo 1 tiveram superfície de ruptura externa à região onde se situava essa armadura (Figura 5) e as do Grupo 2 super-

fície de ruptura atravessando essa região (Figura 6). As Tabelas 1 e 2 mostram que nem sempre todas as camadas são abrangidas pelo tronco de cone de ruptura assumido.

Figura 2 - Características das lajes ensaiadas

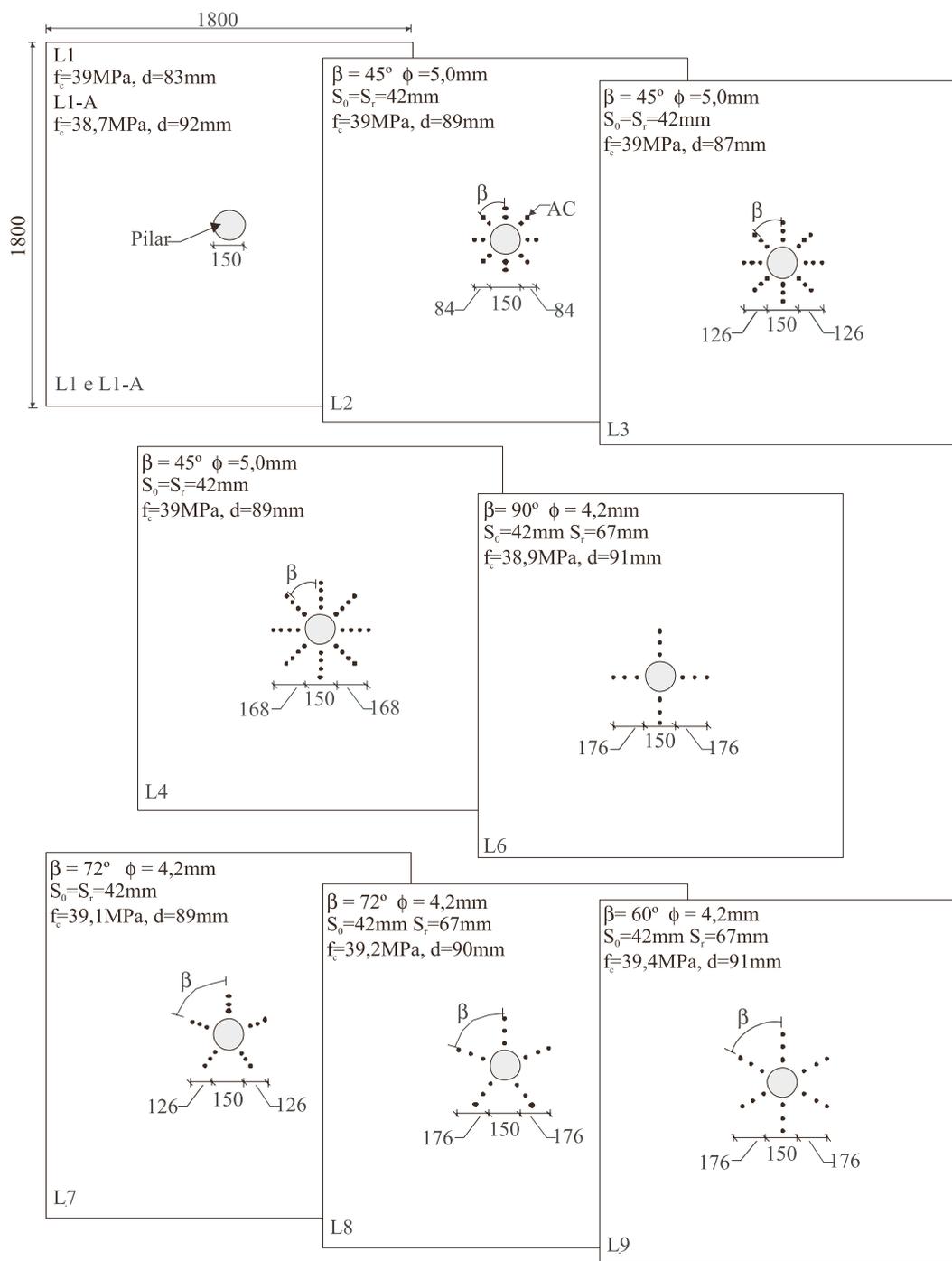


Tabela 1 - Características das lajes ensaiadas

Lajes	f_c (MPa)	d (±2mm)	Armadura de cisalhamento							
			n° de linhas	n° de camadas	$A_{sw} f_{yw}$ (kN)	S_r (mm)	ϕ (mm)	f_{yw} (MPa)	ângulo entre linhas	
Grupo 1	L1	39,0	83	-	-	-	-	-	-	-
	L2	39,0	89	8	2	98	42	5,0	624	45°
	L3	39,0	87	8	3	98	42	5,0	624	45°
	L4	39,0	89	8	4	98	42	5,0	624	45°
Grupo 2	L1-A	38,7	92	-	-	-	-	-	-	-
	L6	38,9	91	4	3	39	67	4,2	708	90°
	L7	39,1	89	5	3	49	42	4,2	708	72°
	L8	39,2	90	5	3	49	67	4,2	708	72°
	L9	39,4	91	6	3	59	67	4,2	708	60°

S_0 - Distância entre o primeiro conector e a face do pilar = 42 mm
 S_r - Distância radial entre os studs
 ρ - Taxa da armadura de flexão = 1,38%
 f_c - Resistência à compressão do concreto no dia do ensaio da laje
d - Altura efetiva da laje
h - Altura da laje = 130 mm
 ϕ - Diâmetro da armadura de cisalhamento
 f_{yw} - Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento
 $A_{sw} f_{yw}$ - força de uma camada de armadura de cisalhamento

Figura 3 - Esquema de ensaio (dimensões em mm)

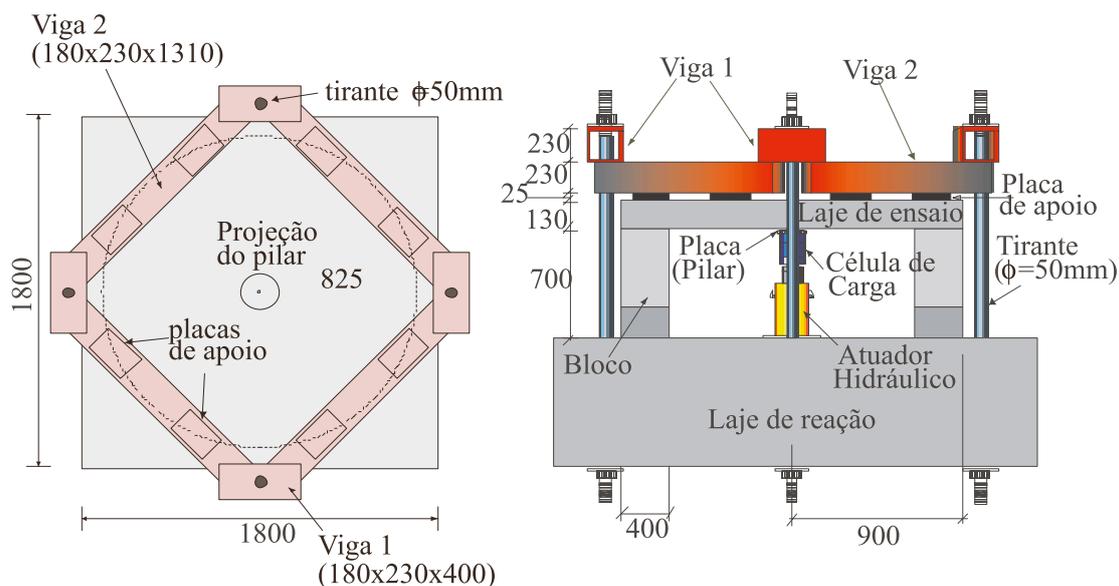
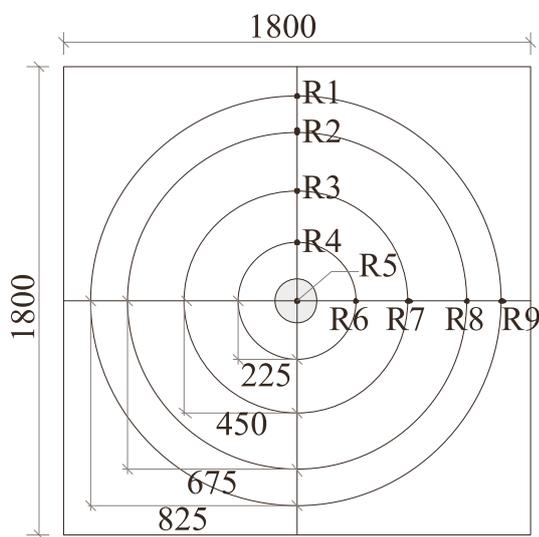


Figura 4 - Posição dos medidores de deslocamentos verticais ao longo da laje (em mm)



No Grupo 1, os acréscimos de carga de ruptura em relação à laje de referência L1-A ficaram entre 12% e 25% e no Grupo 2, esses acréscimos

variaram de 5% a 10%. A laje L1-A foi considerada como referência nos dois grupos porque sua resistência ficou mais próxima dos resultados de lajes similares de trabalhos anteriores ([2] e [3]), e sua altura efetiva foi mais parecida com as das demais lajes ensaiadas nesta pesquisa.

Na Figura 7 constam os valores de P_u/P_{Lref} em função do índice κ das lajes deste estudo e das de outros estudos que tinham os mesmos tipos de armadura ([2], [3], [4] e [5]), sendo P_{Lref} a carga de ruptura da laje de referência de cada estudo. As lajes L2, L10 e L11 ensaiadas por Gomes [5] romperam com as superfícies de ruptura cruzando a região de armadura de cisalhamento. A laje L3 apresentou, na ruptura, duas superfícies, cruzando a região de armadura de cisalhamento e outra imediatamente externa a essa região. As demais lajes romperam, por punção, com superfície de ruptura externa à região da armadura de cisalhamento. A laje L9 apresentou sinais de esgotamento da resistência de flexão com o escoamento de quase toda a armadura de flexão, grandes rotações e princípio de esmagamento do concreto na região comprimida, próximo ao pilar, na face inferior da laje. A Figura 7 sugere que valores de κ até cerca de 0,7 levam a superfície de ruptura atravessando a região onde está a armadura transversal, enquanto valores maiores de κ acarretam superfície de ruptura externa a essa região.

3.2. Deslocamentos verticais e rotações

Para níveis de carregamento maiores que 100 kN, os deslocamentos verticais variaram quase que linearmente em relação à distância ao centro da laje e os maiores valores foram medidos na região central, onde foi aplicada a carga. Em função disso, a rotação da laje ψ , em

Tabela 2 - Carga e modo de ruptura e índice de armadura de cisalhamento das lajes ensaiadas

Lajes	f_c (MPa)	d (±2mm)	Armadura de cisalhamento			P_u (kN)	κ	Modo de ruptura
			n° de linhas	n° camadas no tronco de cone assumido	$(A_{sw}f_{yw})_{ef}$ (kN)			
Grupo 1	L1	39,0	83	-	-	203	-	P
	L2	39,0	89	8	2	196	0,69	E
	L3	39,0	87	8	3	294	1,03	E
	L4	39,0	89	8	3	294	1,03	E
Grupo 2	L1-A	38,7	92	-	-	286	-	P
	L6	38,9	91	4	2	78	0,27	I
	L7	39,1	89	5	3	147	0,51	I
	L8	39,2	90	5	2	98	0,34	I
L9	39,4	91	6	2	118	0,41	I	

$(A_{sw}f_{yw})_{ef}$ - Força da armadura de cisalhamento dentro do cone de ruptura assumido

P_u - Carga de ruptura

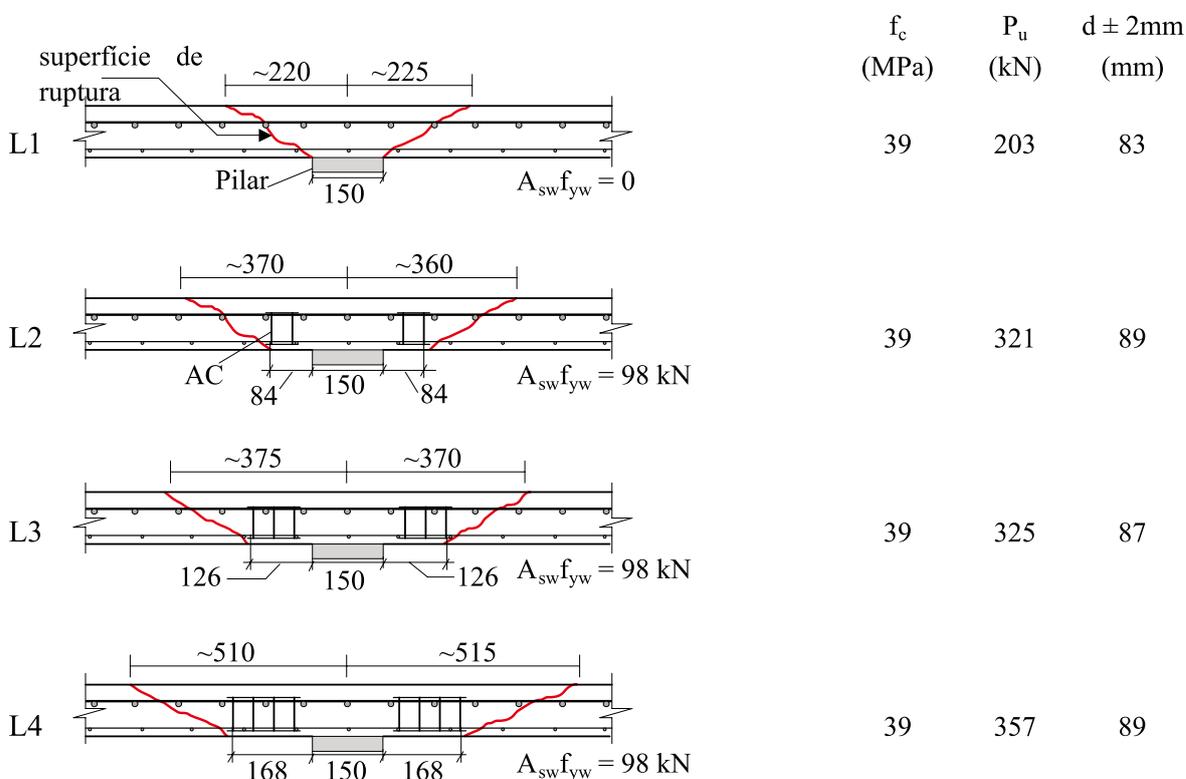
κ - Índice de armadura de cisalhamento, igual a $(A_{sw}f_{yw})_{ef}/P_{UL1-A}$

P - Ruptura por punção

E - Ruptura por punção, com superfície de ruptura externa às camadas de studs

I - Ruptura por punção, com superfície de ruptura interna às camadas de studs

Figura 5 – Superfícies de ruptura das lajes do Grupo 1 (dimensões em mm)



radianos, foi obtida dividindo-se o deslocamento vertical no centro da laje pela distância desse ponto à circunferência que passa pelo centro das placas de apoio, com raio de 825 mm.

A Figura 8 mostra os gráficos de deslocamento vertical de duas lajes (uma sem e uma com armadura transversal) em função da distância ao centro, para diferentes valores de carga, enquanto a Figura 9 apresenta os deslocamentos verticais centrais das lajes em função dos carregamentos. Na Figura 8 pode-se observar que os deslocamentos são praticamente iguais nas direções x e y, o que ocorreu em todas as lajes, e na Figura 9 nota-se o comportamento diferenciado entre as lajes dos Grupos 1 e 2.

A Figura 10 apresenta os valores de ψ_u/ψ_{Lref} em função de κ para as lajes ensaiadas nesta e em outras pesquisas que tinham os mesmos tipos de armadura, sendo ψ_{Lref} a rotação da laje de referência de cada trabalho realizado. No caso das lajes do grupo 2 deste estudo, ψ_u e ψ_{Lref} referem-se à carga de ruptura, enquanto para as demais referem-se a carga próxima à de ruptura (entre cerca de 85% e 95% da carga de ruptura).

Os maiores valores de P_u/P_{Lref} e ψ_u/ψ_{ulref} relativos às lajes ensaiadas por Gomes [5] mostrados nas Figuras 7 e 10 sugerem que essas relações dependem da altura efetiva da laje que, nessas lajes, era em torno de 160 mm.

3.3. Deformações específicas

a) Armadura de flexão

Os maiores valores de deformação específica na armadura de flexão

foram verificados na região central das lajes. A armadura de flexão das lajes do Grupo 1 atingiu o escoamento com carga próxima de 200 kN e, nas com armadura transversal, a região onde houve escoamento da armadura de flexão abrangeu a externa àquela onde havia armadura de cisalhamento (Figura 11, laje L2). Nas lajes do Grupo 2, o escoamento da armadura longitudinal não ocorreu em todas as lajes e, naquelas em que houve o escoamento, isto ocorreu na região de carregamento e para carga em torno de de 250 kN (Figura 12, laje L8).

b) Armadura de cisalhamento

As deformações da armadura de cisalhamento das lajes que tiveram superfície de ruptura cruzando as camadas de studs (L6, L7, L8 e L9) foram maiores que as das lajes com superfície de ruptura externa a essas camadas (L2, L3 e L4), atingindo a deformação de escoamento. No gráfico de deformações da armadura de cisalhamento da laje L9 (Figura 13) observa-se que elas foram maiores para os studs situados mais próximos à região de carregamento, o que também foi constatado nas demais lajes.

3.4. Fissuras

As fissuras radiais foram as primeiras a serem observadas visualmente, para um carregamento entre 45 kN e 55 kN. A primeira fissura radial surgiu com 19% da carga de ruptura para a L1-A, com cerca de 14% da carga de ruptura para as lajes com armadura de cisalhamento do Grupo 1, e com cerca de 16% da carga de ruptura para as lajes com studs do Grupo 2. Quando do surgimento das pri-

meias fissuras radiais, as deformações obtidas nos pontos monitorados da armadura de flexão foram inferiores a 0,35 mm/m nas lajes com superfície de ruptura externa à região da armadura transversal e a 0,20 mm/m naquelas com superfície de ruptura interna.

Para um carregamento entre 75 kN e 100 kN surgiram, em todas as lajes, as fissuras circunferenciais e, a partir desse nível de carga, os elementos da armadura de cisalhamento passaram a apresentar maiores deformações. As fissuras circunferenciais surgiram com 26% da carga de ruptura para a laje L1-A, com cerca de 22% da carga de ruptura para as lajes com armadura de cisalhamento do Grupo 1, e com 33% a 40% das cargas de ruptura para as lajes com armadura de punção do Grupo 2.

3.5. Avaliação do índice de armadura de cisalhamento para lajes com superfície de ruptura cruzando as camadas de studs.

Diversas variáveis podem influenciar a carga de ruptura e a rota-

ção das lajes-cogumelo de concreto armado, tais como a taxa de armadura de flexão, altura efetiva, resistências à compressão e à tração do concreto, perímetro da área carregada, existência de furos, etc.

Na Tabela 3 são apresentadas as relações entre as rotações (ψ_u / ψ_{L1-A}) e cargas (P_u / P_{L1-A}) de cada laje ensaiada em função do índice de armadura de cisalhamento κ . Nela observa-se que há uma tendência de diminuição dos acréscimos de rotação e dos acréscimos de carga quando se diminui o índice κ . Os maiores acréscimos de rotação e de carga de ruptura ocorreram nas lajes L4 e L3, com os maiores índices de armadura de cisalhamento ($\kappa = 1,03$) e os menores acréscimos de rotação e de carga de ruptura ocorreram na laje L6, com o menor índice de armadura de cisalhamento ($\kappa = 0,27$).

As lajes com superfície de ruptura externa às camadas de armadura de cisalhamento (Grupo 1) apresentaram, com relação à laje L1-A, acréscimos de rotação de pelo menos 46% e de carga de ruptura de pelo menos 12%. Nas lajes com superfície de ruptura

Figura 6 - Superfícies de ruptura das lajes do Grupo 2 (dimensões em mm)

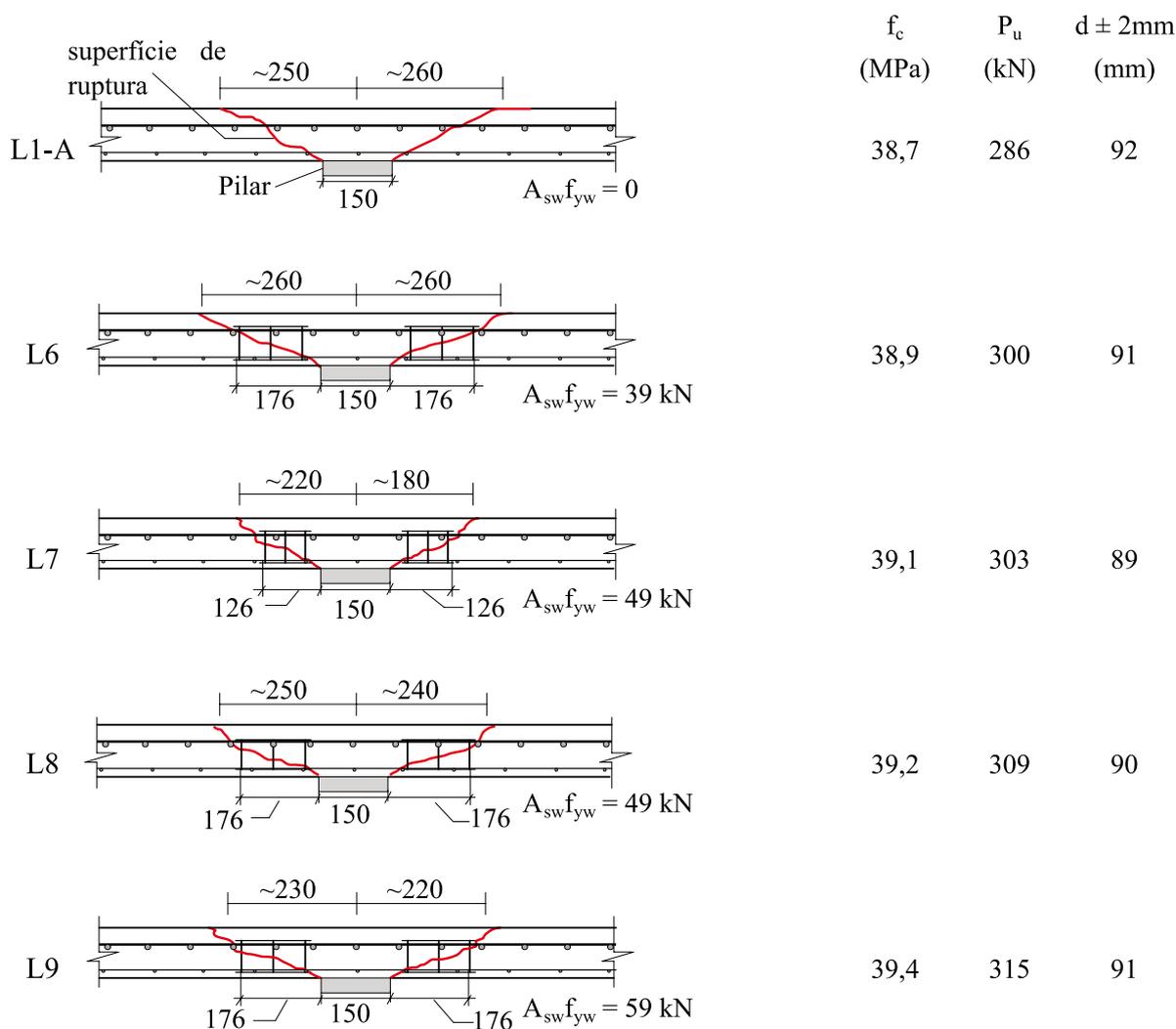
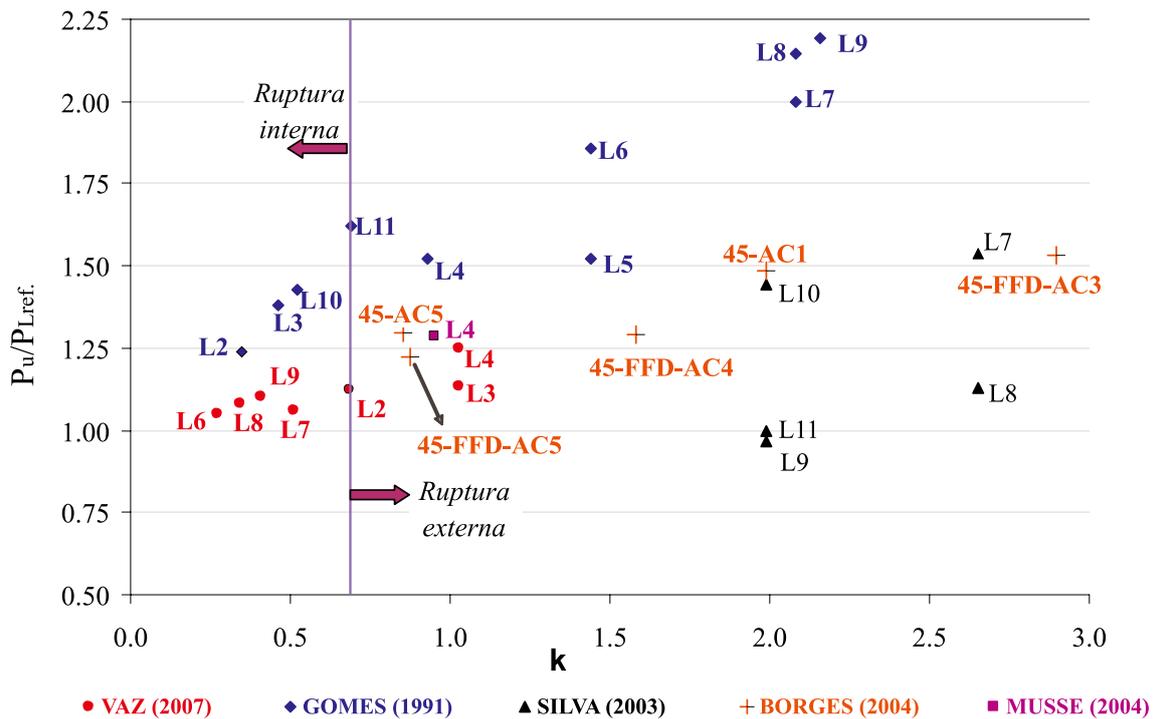


Figura 7 – Valores de $P_u/P_{Lref.}$ em função do índice κ para as lajes desta e de outras pesquisas



cruzando a região de armadura de cisalhamento (Grupo 2) esses acréscimos foram de pelo menos 8% e 5%, respectivamente. A laje L6, com o menor número de linhas (4) de armadura de cisalhamento, ângulo entre linhas de 90° e espaçamento radial entre camadas de 67 mm, apresentou os menores acréscimos de rotação e carga.

A laje L9, com o índice $\kappa = 0,41$, apresentou acréscimo de rotação de 29%, praticamente o mesmo da L7 (30%), com $\kappa = 0,51$, e um aumento de carga igual a 10%, maior que o da L7 (6%). A distância radial entre as camadas dos *studs* na laje L9 era igual à das lajes L6 e L8 (~0,75d) mas, devido ao seu número de linhas ter sido igual a seis, maior que o das demais lajes do Grupo 2, o espaçamento circunferencial entre os elementos mais externos da laje L9 foi de 251 mm (~2,8d), maior que o da laje L7 (~2,62d), porém menor que os das lajes L6 (~3,95d) e L8 (~3,28d).

Comparando o comportamento das lajes L7 e L9, constata-se que o espaçamento circunferencial parece não ter influenciado significativamente o acréscimo de rotação (próximo de 30% para as duas lajes). Entretanto, o número de linhas de armadura de cisalhamento da laje L9 (seis) maior do que o da laje L7 (cinco) pode ter acarretado seu maior ganho na carga de ruptura (L9 = 10%, L7 = 6%), apesar dos seus maiores espaçamentos radial e circunferencial.

Esses resultados e os de outros autores (Figuras 7 e 10) indicam a possibilidade de uma armadura mínima de cisalhamento ser definida considerando-se um valor de κ em torno de 0,6. Para lajes com alturas úteis e demais características semelhantes às das lajes ensaiadas neste estudo e κ dessa ordem, deve-se ter ganho de carga de ruptura de cerca de 10% e ganho de rotação de cerca de 30%. As lajes ensaiadas por Gomes [5] sugerem que esses acréscimos são maiores em lajes com maior altura útil .

4. Considerações finais

Os resultados deste e de outros trabalhos, que são mais detalhados por

Vaz [6], indicam que a armadura mínima de cisalhamento para evitar a ruptura brusca apresentada por lajes-cogumelo sem essa armadura pode ser definida a partir do parâmetro κ aqui adotado. Os resultados de ensaios analisados sugerem que o valor de κ correspondente à armadura mínima deve ficar em torno de 0,5 a 0,7. Entretanto, estudos complementares se fazem necessários dado que os acréscimos de carga de ruptura e de deformação relativos a um determinado valor de κ provavelmente dependem da altura útil, dos espaçamentos radiais e circunferenciais e camadas da armadura de cisalhamento da laje.

5. Agradecimentos

Às empresas: Carlos Campos Consultoria Limitada; Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; Perfinasa – Perfilados e Ferros Nossa Senhora Aparecida Ltda; Realmix – Concreto e Argamassa, por terem colaborado no fornecimento de diversos materiais e na realização de ensaios de caracterização. Ao CNPq e ao PROCAD/CAPES pelos auxílios financeiros.

6. Referências bibliográficas

- [01] GOMES, R.B. e REGAN, P.E. Punching resistance of rc flat slabs with shear reinforcement. Journal of Structural Engineering, EUA, v. 125, n. 6, p. 684-692, junho 1999.
- [02] SILVA, J.A. Punção em lajes cogumelo: pilares retangulares, furos e armadura de cisalhamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2003.
- [03] MUSSE, T.H. Punção em lajes cogumelo – fibras de aço e armaduras de cisalhamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2004.

- [04] BORGES, L.L.J. Comportamento ao puncionamento de lajes cogumelo de concreto armado com pilares retangulares e furos de grandes dimensões. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.TD-002A/04, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.
- [05] GOMES, R.B. e REGAN, P.E. . Punching strength of slabs reinforced for shear with offcuts of rolled

- steel I section. Magazine of Concrete Research, v. 51, n. 2, p. 121-129, 1999.
- [06] VAZ, A.P.R., Resistência à punção em lajes cogumelo de concreto armado: uma contribuição para definição de armadura mínima de cisalhamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2007.

Figura 8 - Deslocamento vertical das lajes L1-A e L9 em função da distância ao centro

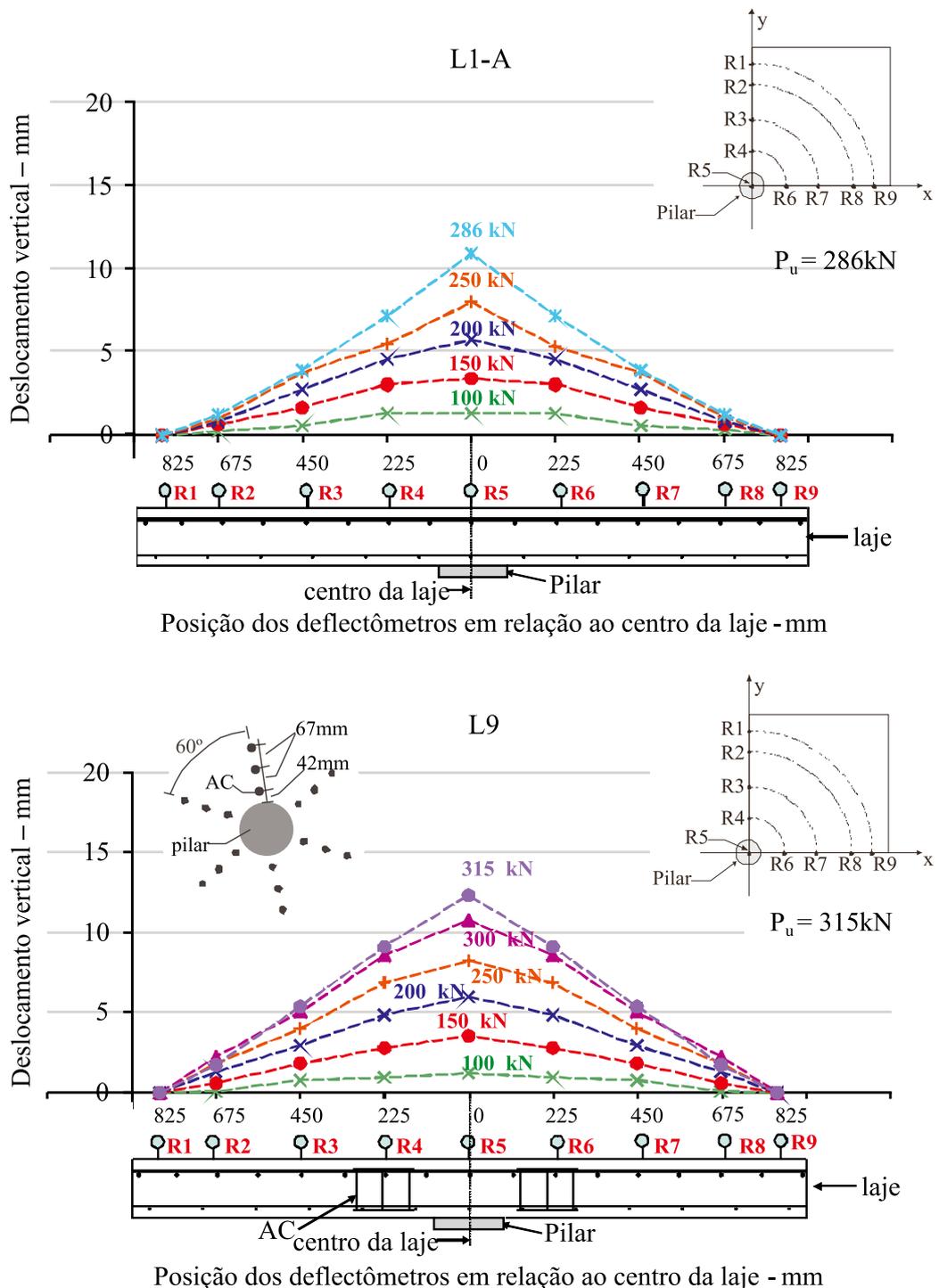


Figura 9 - Deslocamentos verticais centrais das lajes em função dos carregamentos

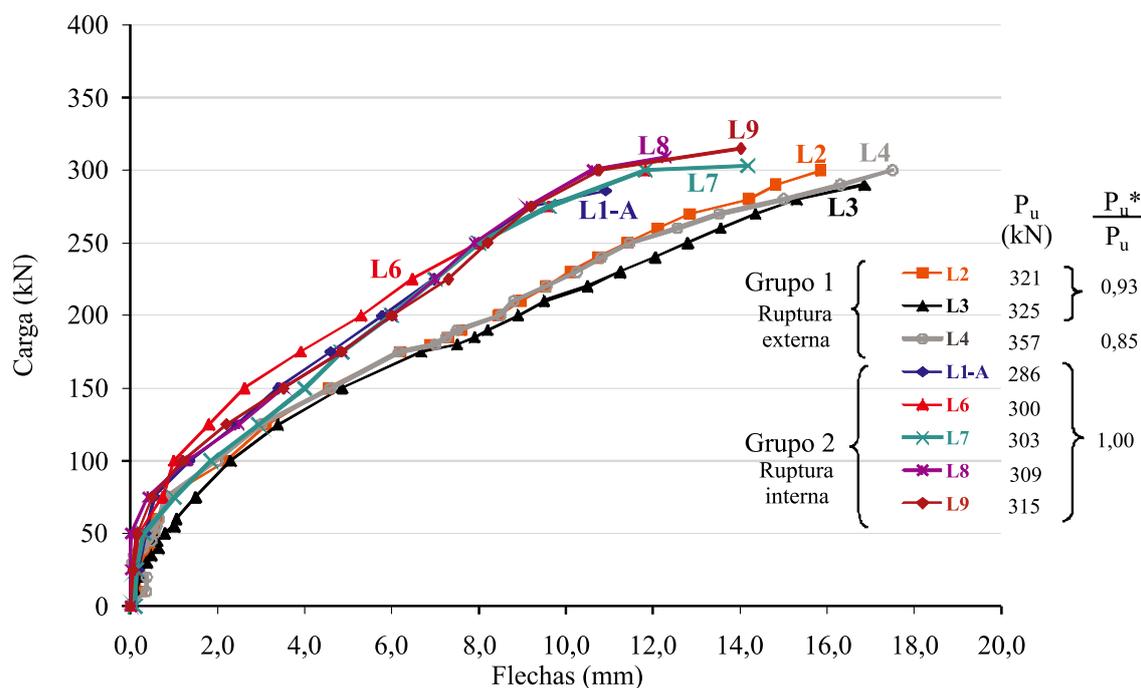


Figura 10 - Valores de Ψ_u/Ψ_{Lref} em função do índice κ para as lajes desta e de outras pesquisas

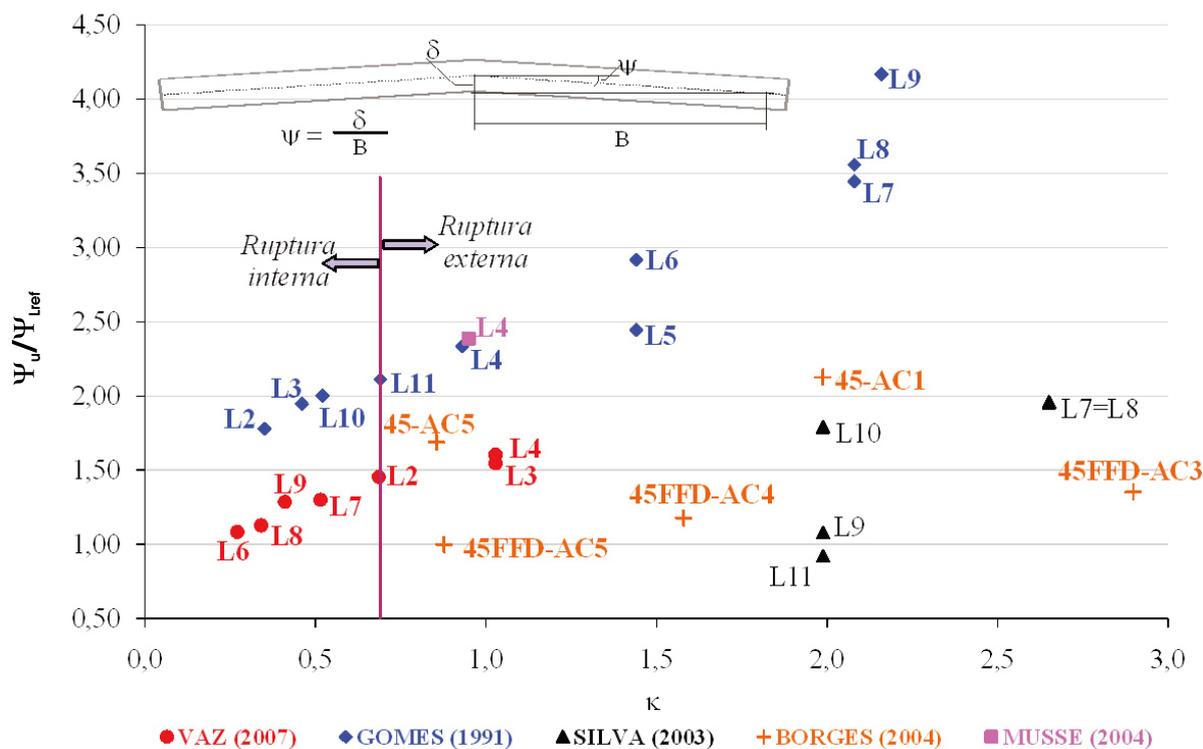


Figura 11 - (ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L2

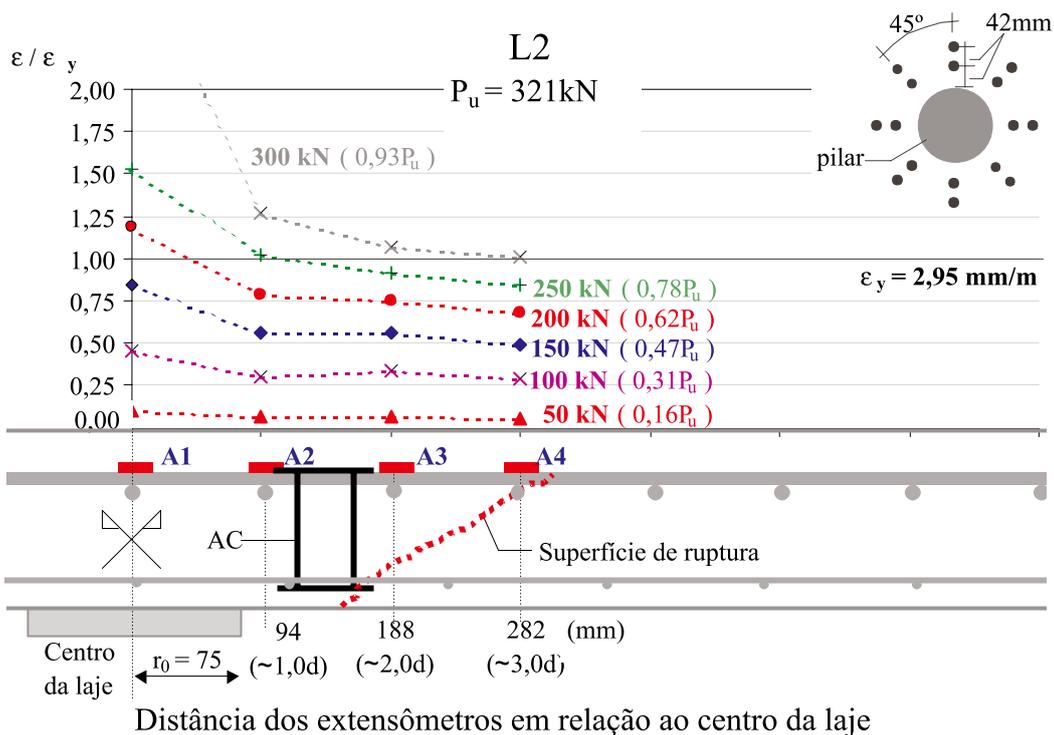


Figura 12 - (ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L8

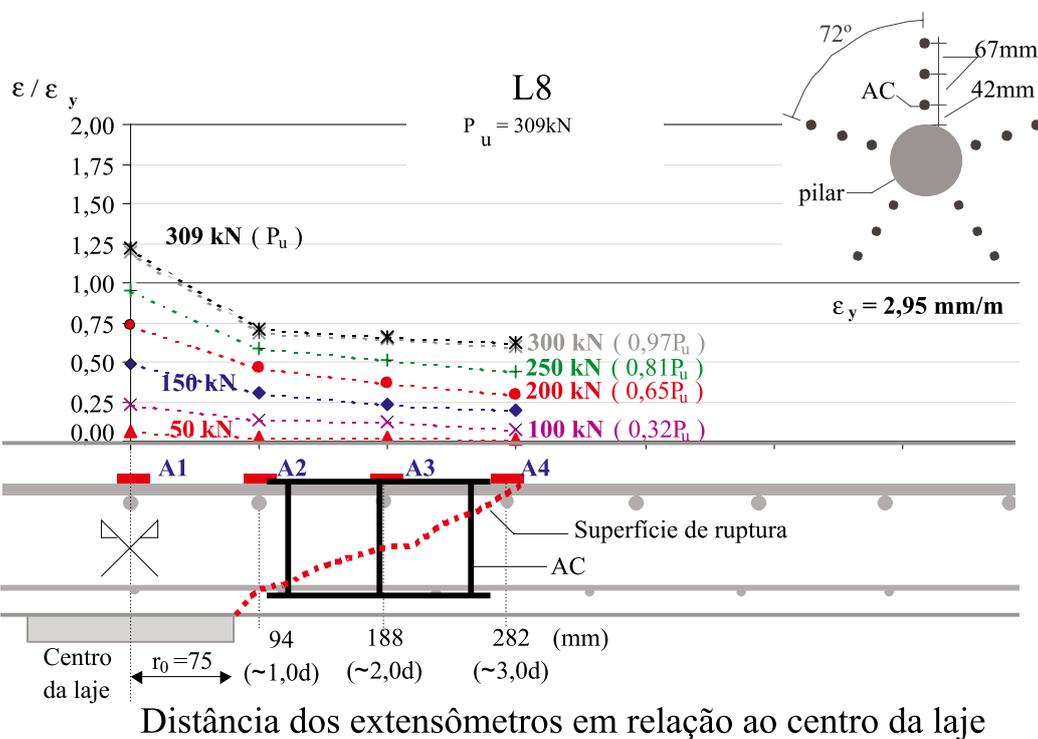


Figura 13 - Relação carga-deformação específica da armadura de cisalhamento da laje L9

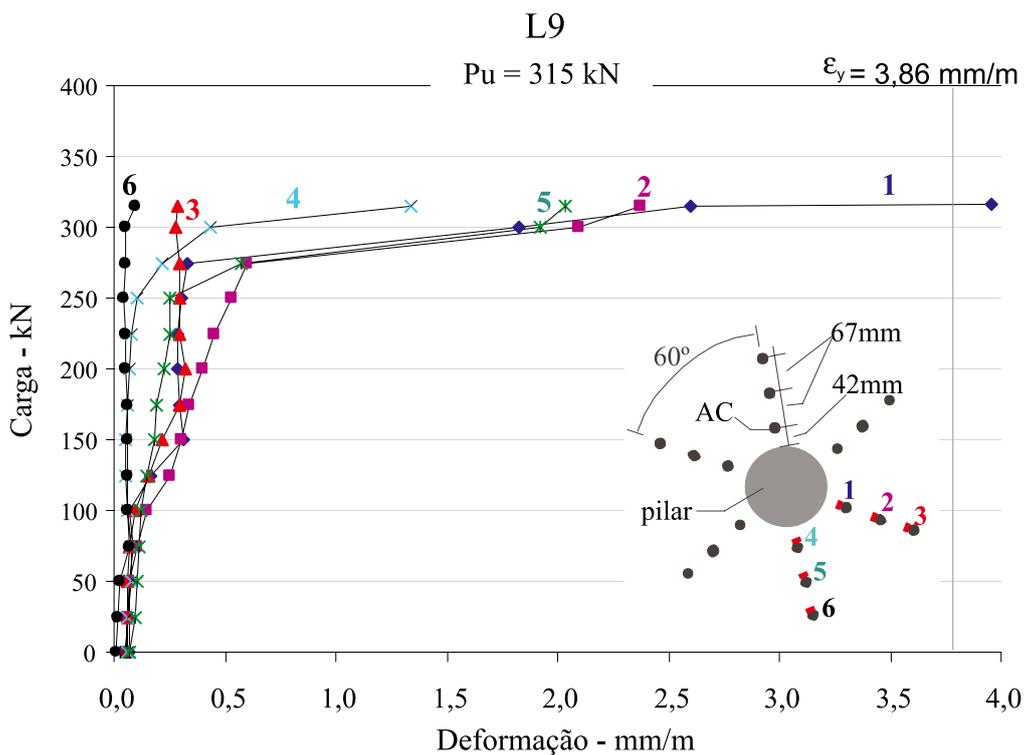


Tabela 3 - Relações entre as rotações e cargas últimas das lajes com armadura transversal e as da laje de referência L1-A, Ψ_u/Ψ_{L1-A} e P_u/P_{L1-A} , e índices de armadura de cisalhamento κ

Lajes	Ψ_u (x 10^{-4} rad)	P_u (kN)	$\frac{\Psi_u}{\Psi_{L1-A}}$	$\frac{P_u}{P_{L1-A}}$	κ	Superfície de ruptura
Grupo 1	L4	357	1,61	1,25	1,03	E
	L3	325	1,55	1,14	1,03	E
	L2	321	1,46	1,12	0,69	E
Grupo 2	L7	303	1,30	1,06	0,51	I
	L9	315	1,29	1,10	0,41	I
	L8	309	1,13	1,08	0,34	I
	L6	300	1,08	1,05	0,27	I

$P_{L1-A} = 286 \text{ kN}$; $\Psi_{L1-A} = 132 \times 10^{-4} \text{ rad}$