



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL**

ANA PAULA RODRIGUES VAZ

**RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE
CONCRETO ARMADO**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE ARMADURA
MÍNIMA DE CISALHAMENTO**

**Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Goiás para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.**

**Goiânia
-2007-**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE
CONCRETO ARMADO
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE ARMADURA
MÍNIMA DE CISALHAMENTO

Ana Paula Rodrigues Vaz
Orientador: Prof. Ronaldo B. Gomes, Ph.D.
Co-orientador: Prof^a. Lídia C. D. Shehata, Ph.D.

Goiânia
-2007-

ANA PAULA RODRIGUES VAZ

**RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE
CONCRETO ARMADO
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE ARMADURA
MÍNIMA DE CISALHAMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Materiais de Construção

Orientador: Prof. Ph.D. Ronaldo Barros Gomes

Co-orientadora: Prof^ª. Ph.D. Lídia C. D. Shehata

**Goiânia
- 2007 -**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

Vaz, Ana Paula R.

Resistência à Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: uma contribuição para definição de armadura mínima de cisalhamento - Goiânia, 2007.
136 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2007.

Bibliografia: 99 – 100.

Anexos

**1. Lajes cogumelo - punção 2. Armadura de
cisalhamento 3. Concreto armado 4. Índice de
Armadura transversal 5. Armadura mínima**

**I – Universidade Federal de Goiás – Escola de
Engenharia Civil II – Título**

Referência Bibliográfica

VAZ, ANA PAULA R. (2007). *Resistência à Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Uma contribuição para definição de armadura mínima de cisalhamento*. Dissertação de Mestrado, Publicação/2007, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 136 p.

Cessão de Direitos

Nome do Autor: **Ana Paula Rodrigues Vaz**

Título da Dissertação de Mestrado: **Resistência à Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Uma contribuição para definição de armadura mínima de cisalhamento**

Grau/Ano: **Mestre/2007**

É concedida à Universidade Federal de Goiás permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ana Paula Rodrigues Vaz

RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE
CONCRETO ARMADO
UMA CONTRIBUIÇÃO PARA DEFINIÇÃO DE ARMADURA MÍNIMA
DE CISALHAMENTO

ANA PAULA RODRIGUES VAZ

**Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 29 de junho de 2007,
pela Banca Examinadora constituída pelos professores:**

Prof. Ronaldo Barros Gomes, Ph.D. (UFG)
(ORIENTADOR)

Prof. Lídia C. D. Shehata, Ph.D. (UFRJ)
(CO-ORIENTADORA)

Prof. Gilson Natal Guimarães, Ph.D. (UFG)
(EXAMINADOR INTERNO)

Prof. Ibrahim A.M. Shehata, Ph.D. (UFRJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DEDICATÓRIA

*Aos meus amados pais, Floriano e Selma,
e ao querido Leonardo.*

AGRADECIMENTOS

Meu sincero agradecimento ao professor Ronaldo Barros Gomes, pela paciência e competente orientação, incentivo, acompanhamento e amizade.

À minha co-orientadora Lídia Shehata pela dedicação, esclarecimentos e valiosa contribuição para o desenvolvimento do meu trabalho.

Ao professor Ibrahim, pelas orientações sobre os equipamentos de medição e esclarecimentos para a realização dos ensaios e escrita da dissertação.

Aos professores do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG), que em muito contribuíram para o meu aprendizado.

Ao arquiteto Sebastião Andrade de Freitas Filho, gerente da E-GAE – SANEAGO, pela boa vontade e apoio constante durante todo o período do curso de mestrado.

Ao querido Leonardo Jansen, pelo carinho, apoio e imensurável contribuição para a realização dos meus ensaios no laboratório.

Às empresas: Realmix – Concreto e Argamassa, na pessoa do engenheiro Reginaldo de Aquino Porto, pela doação do concreto; Carlos Campos Consultoria Limitada; Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira; e Perfinasa – Perfilados e Ferros Nossa Senhora Aparecida Ltda, pela colaboração prestada e pelos ensaios de caracterização.

Aos funcionários do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da UFG, em especial ao João Carlos, pelo auxílio no laboratório e amizade.

Aos alunos do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da UFG, em especial ao Murilo, que muito ajudou no laboratório da Escola de Engenharia Civil da UFG.

Aos ex-alunos do Curso de Mestrado que, de alguma forma, me auxiliaram ao longo do curso: Alessandra, Jales, Rúbia, Taís, Valéria e Raphael (UnB).

Aos meus pais, irmãos, sogros e à querida Arlette, por estarem sempre ao meu lado me apoiando e incentivando.

Aos meus verdadeiros amigos Cássio Inumarú e Andréa Cristina Leão, por me apoiarem e contribuírem na realização dos meus ensaios.

A Deus, pela presença constante em todos os momentos de minha vida.

RESUMO

A presente pesquisa apresenta uma análise experimental de resistência à punção e rotação de lajes-cogumelo de concreto armado, dotadas de taxas de armadura de cisalhamento inferiores às utilizadas na prática, submetidas a um carregamento concêntrico.

É realizada uma revisão bibliográfica sobre as pesquisas feitas com o uso de armadura de cisalhamento em lajes-cogumelo, destacando as principais variáveis e comportamentos apresentados pelas estruturas até a ruptura.

A parte experimental engloba ensaios de 10 (dez) lajes-cogumelo de concreto armado de dimensões 1800 mm x 1800 mm x 130 mm, altura efetiva de aproximadamente 90 mm e resistência à compressão do concreto em torno de 35 MPa. As principais variáveis da pesquisa foram: o número de camadas de armadura de cisalhamento, a área de armadura transversal em cada camada circunferencial e o diâmetro dos *studs*.

Tendo por base os resultados obtidos, faz-se uma análise do comportamento das lajes ensaiadas e verifica-se o acréscimo de rotação e de resistência ao puncionamento dessas lajes, decorrentes da adição de armadura transversal. A comparação desses resultados com os dos ensaios de lajes com maiores dimensões (3000 x 3000 x 200 mm) é realizada principalmente para o caso de superfície de ruptura interna às camadas de armadura de cisalhamento.

Para a determinação da quantidade de armadura de punção nas lajes, utilizou-se um parâmetro “ κ ”, denominado índice de armadura transversal situada dentro do tronco de cone de ruptura que é delimitado pela fissura de cisalhamento. Nesta pesquisa, os valores de κ variaram de 0,41 a 1,03 e as lajes tiveram superfície de ruptura cruzando as camadas de *studs* quando o índice foi menor que 0,70.

Definiu-se um valor de κ igual a 0,60 como índice próximo do mínimo para lajes com altura efetiva igual a 90 mm. Os acréscimos de carga e rotação proporcionados por um valor κ de 0,60 foram, respectivamente, 10% e 29%.

ABSTRACT

This thesis presents an experimental analysis on punching shear resistance and rotation of concrete flat slabs, with lower shear reinforcement ratios than the ones seen in practical use, submitted to concentric load.

A bibliographical review is carried out, focusing on researches which previously employed shear reinforcement on flat slabs and highlighted the main variables and behavior shown by structures up to failure.

The experimental section encompasses tests of 10 (ten) concrete flat slabs with dimensions 1800 mm x 1800 mm x 130 mm, effective height of approximately 90 mm and concrete compression resistance around 35 MPa. The main variables of the present research were: the number of shear reinforcement layers, the area of transverse reinforcement in each circumferential layer, and the diameter of the studs.

Based on the obtained results, an analysis of the behavior of tested slabs is done and it verifies an increase of rotation and resistance in the punching of these slabs, due to the addition of transverse reinforcement. The comparison of these results with those tests with greater dimensions slabs (3000 x 3000 x 200 mm) is especially performed in the case of internal failure surface in shear reinforcement layers.

In order to determine the amount of punching reinforcement on the slabs a “ κ ” parameter was used, which was called transverse reinforcement index, situated within the slump failure which is delimited by shear fissure. In this research, the κ values ranged from 0,41 up to 1,03 and the slabs’ failure surface crossed the studs’ layers when the index was lower than 0,70.

A value of κ was set as equal to 0,60 as a near minimum index for slabs with an effective height of 90. The increase of load and rotation motivated by a κ value of 0,60 were 10% and 29% ($d = 90$ mm), respectively.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 PUNÇÃO EM LAJES-COGUMELO.....	4
2.1.1 SHEHATA (1985).....	5
2.1.2 GOMES (1991).....	5
2.1.3 GOMES & ANDRADE (1993).....	11
2.1.4 ANDRADE (1999).....	12
2.1.5 TRAUTWEIN (2001).....	14
2.1.6 SILVA (2003).....	17
2.1.7 BORGES (2004).....	20
2.1.8 MUSSE (2004).....	24
2.1.9 TRAUTWEIN (2006).....	27
2.2 NORMAS DE PROJETO.....	31
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	36
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	36
3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MODELOS ENSAIADOS.....	37
3.3 ESQUEMA DE ENSAIO.....	39
3.4 MATERIAIS E ARMADURAS.....	40
3.4.1 Concreto.....	40
3.4.2 Armadura de flexão.....	41
3.4.3 Armadura de cisalhamento.....	42
3.5 INSTRUMENTAÇÃO.....	45
3.5.1 Deslocamento vertical da laje.....	46
3.5.2 Deformações específicas.....	47
a) Armadura de flexão.....	48
b) Armadura de cisalhamento.....	48
c) Concreto.....	50
3.7 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	50
4 RESULTADOS.....	52
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	52

4.2 MATERIAIS.....	52
4.2.1 Concreto.....	52
4.2.2 Aço.....	54
4.3 CARGA E MODO DE RUPTURA.....	55
4.4 DESLOCAMENTO VERTICAL.....	61
4.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA.....	64
4.5.1 Armadura de flexão.....	64
4.5.2 Armadura de cisalhamento.....	66
4.5.3 Concreto.....	69
4.6 FISSURAS.....	70
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
5.1 CARGA E MODO DE RUPTURA.....	72
5.2 ROTAÇÕES.....	75
5.3 DESLOCAMENTO VERTICAL.....	81
5.4 CARGAS DE FISSURAÇÃO.....	82
5.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA.....	84
a) Armadura de flexão.....	84
b) Armadura de cisalhamento.....	85
c) Concreto.....	86
5.6 COMPARAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIAS À PUNÇÃO EXPERIMENTAIS E AVALIADAS.....	86
5.7 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE ARMADURA DE CISALHAMENTO PARA LAJES COM SUPERFÍCIES DE RUPTURA CRUZANDO AS CAMADAS DE <i>STUDS</i>	93
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
6.1 CONCLUSÕES.....	96
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXO 1 RESULTADOS DOS ENSAIOS - FLECHAS E DEFORMAÇÕES.....	101
1 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	101
2 - DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO.....	105
3 - DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE CISALHAMENTO.....	111
ANEXO 2 VALORES UTILIZADOS NOS GRÁFICOS DAS FIGURAS 5.1 E 5.3.....	117
ANEXO 3 CÁLCULOS DIVERSOS.....	120
1 - CARGAS DE RUPTURA ESTIMADAS PARA A LAJE L2 DESTA PESQUISA, SEGUNDO OS MÉTODOS APRESENTADOS.....	120
1.1 NBR 6118 / 2003.....	120

1.2	ACI 318 / 2005.....	121
1.3	CEB / MC 90.....	122
1.4	EUROCODE 2 / 2004.....	123
2 -	EQUAÇÕES UTILIZADAS NA DETERMINAÇÃO DOS PERÍMETROS DE CONTROLE EXTERNOS (u_2), SEGUNDO AS NORMAS.....	123
2.1	NBR 6118 / 2003.....	123
2.2	ACI 318 / 2005.....	123
2.3	CEB / MC 90.....	124
2.4	EUROCODE 2 / 2004.....	125
3 -	CÁLCULO DA CARGA DE RUPTURA POR FLEXÃO (V_{fl}) DA LAJE L1-A, UTILIZANDO O MÉTODO DAS LINHAS DE RUPTURA.....	126
ANEXO 4	DETALHAMENTO DE LAJES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	128
ANEXO 5	FOTOGRAFIAS.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Armadura de cisalhamento – L6 – (GOMES, 1991).....	6
Figura 2.2 Distribuição da armadura de cisalhamento – lajes (GOMES, 1991).....	7
Figura 2.3 Diagrama de forças da armadura de cisalhamento – (GOMES, 1991).....	9
Figura 2.4 Delimitação da quantidade de camadas de armadura de cisalhamento pelo tronco de cone de ruptura.....	11
Figura 2.5 Posicionamento das armaduras de cisalhamento – (ANDRADE, 1999).....	13
Figura 2.6 Disposição da armadura de cisalhamento – lajes de Andrade (1999).....	13
Figura 2.7 Disposição da armadura de cisalhamento – lajes Grupo 1 – (TRAUTWEIN, 2001).....	15
Figura 2.8 Armadura de cisalhamento – laje 8 Grupo 2 – (TRAUTWEIN, 2001).....	15
Figura 2.9 Detalhe dos estribos das lajes do Grupo 2, segundo Trautwein (2001).....	16
Figura 2.10 Armaduras das lajes do Grupo 4 - (SILVA, 2004).....	17
Figura 2.11 Características das lajes ensaiadas por Silva (2003).....	18
Figura 2.12 Esquema de ensaio utilizado (vista superior e vista lateral) – (SILVA, 2003).....	19
Figura 2.13 L6 após a ruptura - vista inferior – (SILVA, 2003).....	20
Figura 2.14 Lajes das três séries – (BORGES, 2004).....	21
Figura 2.15 Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada na Série 3 de Borges (2004).....	22
Figura 2.16 Superfície de ruptura – L45FFD_AC2 e L45FFD_AC5 – (BORGES, 2004).....	23
Figura 2.17 Distribuição da armadura de cisalhamento – lajes de Musse (2004).....	24
Figura 2.18 Armadura de cisalhamento – (MUSSE, 2004).....	25
Figura 2.19 Lajes L3 e LF3 próximo da ruptura – vista superior (MUSSE, 2004).....	26
Figura 2.20 Desenho esquemático do posicionamento da armadura de cisalhamento utilizado por Trautwein (2006).....	28
Figura 2.21 Distribuição da armadura de cisalhamento da laje E1, de Trautwein (2006).....	28
Figura 2.22 Distribuição da armadura de cisalhamento da laje E2, de Trautwein (2006).....	29
Figura 2.23 Distribuição da armadura de cisalhamento das lajes E3, E4 e E5, de Trautwein (2006).....	29
Figura 2.24 Esquema de distribuição da armadura de cisalhamento utilizada nas Lajes I6, I7 e I8, de Trautwein (2006).....	30
Figura 2.25 Esquema de distribuição da armadura de cisalhamento nas lajes I9, I10 e I11, testadas por Trautwein (2006).....	30
Figura 3.1 Pórtico hipotético caracterizando a região estudada na pesquisa.....	36
Figura 3.2 Características das lajes ensaiadas – dimensões em mm.....	38
Figura 3.3 Esquema de ensaio utilizado.....	39
Figura 3.4 Laje montada para a realização do ensaio – Vista superior e vista lateral.....	40
Figura 3.5 Detalhamento da armadura de flexão	42
Figura 3.6 Dimensões dos elementos de armadura de cisalhamento	43
Figura 3.7 Armadura de cisalhamento do tipo <i>stud</i>	43
Figura 3.8 Dimensões adotadas no posicionamento dos <i>studs</i>	44

Figura 3.9	Distribuição da armadura de cisalhamento de todas as lajes.....	44
Figura 3.10	Fotografia da distribuição da armadura de cisalhamento na laje L8.....	45
Figura 3.11	Fixação dos relógios comparadores e potenciômetros.....	46
Figura 3.12	Posição dos medidores de deslocamentos verticais ao longo da laje.....	47
Figura 3.13	Posicionamento e numeração dos extensômetros na armadura de flexão.....	48
Figura 3.14	Posição e numeração dos EER nas armaduras de punção das lajes do Grupo 1.....	49
Figura 3.15	Posição e numeração dos EER nas armaduras de punção das lajes do Grupo 2.....	49
Figura 3.16	Posições dos EER na face comprimida da laje	50
Figura 4.1	Resistência à compressão do concreto ao longo do tempo.....	53
Figura 4.2	Resistência à tração por compressão diametral do concreto ao longo do tempo.....	53
Figura 4.3	Diagramas tensão - deformação das amostras de aço ensaiadas.....	55
Figura 4.4	Esquema da superfície de ruptura das lajes do Grupo 1 (dimensões em mm).....	57
Figura 4.5	Fotografias das lajes do Grupo 1 após a ruptura – (a) Vista superior;(b) Vista inferior.....	58
Figura 4.6	Superfícies de ruptura das lajes do Grupo 2 (dimensões em mm).....	59
Figura 4.7	Fotografias das lajes L1-A, L5, L6 e L7 após a ruptura – (a) Vista superior; (b) Vista inferior.....	60
Figura 4.8	Fotografias das lajes L8 e L9 após a ruptura – (a) Vista superior;(b) Vista inferior.....	61
Figura 4.9	Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L1-A.....	62
Figura 4.10	Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L4.....	62
Figura 4.11	Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L6.....	63
Figura 4.12	Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L9.....	63
Figura 4.13	(ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L1.....	64
Figura 4.14	(ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L2.....	65
Figura 4.15	(ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L8.....	65
Figura 4.16	Relação de carga - deformação da armadura de flexão da laje L7.....	66
Figura 4.17	Carga – deformação da armadura de cisalhamento da L2.....	67
Figura 4.18	Carga – deformação da armadura de cisalhamento da L5.....	67
Figura 4.19	Carga – deformação da armadura de cisalhamento da L8.....	68
Figura 4.20	Carga – deformação da armadura de cisalhamento da L9.....	68
Figura 4.21	Relação ϵ/ϵ_u em função das distâncias à face do pilar da L2.....	69
Figura 4.22	Relação ϵ/ϵ_u em função das distâncias à face do pilar da L9.....	70
Figura 4.23	Fissuração, após a ruptura, das lajes com armadura de cisalhamento.....	71
Figura 5.1	Gráfico $P_u/P_{u,ref.}$ em função de κ das lajes deste e de outros trabalhos.....	73
Figura 5.2	$P_u/P_{u,ref.}$ em função de κ – lajes sem furos, sem fibras e armadura de punção do tipo <i>stud</i>	75
Figura 5.3	Carga - rotação ($P_u - \psi$) das lajes ensaiadas.....	76
Figura 5.4	Rotação relativa em função de κ para as lajes desta e de outras pesquisas.....	81
Figura 5.5	Deslocamentos verticais centrais das lajes em função dos carregamentos.....	82
Figura 5.6	Gráfico de Carga – deformação da armadura de cisalhamento da laje L6.....	85

Figura 5.7 Comparação de carga experimental com a estimada pelas expressões da NBR 6118:2003, ACI 318:2005, CEB-FIP MC90 e EC 2:2004.....	92
Figura 5.8 Gráfico de κ em relação à altura efetiva das lajes.....	94
Figura A-01 Modelo de ruptura por flexão, desenvolvido por Oliveira (2003).....	126
Figura A-02 Detalhe de camadas adicionais de armadura de cisalhamento para resistência pós-punção.....	130
Figura A-03 Distribuição da armadura de cisalhamento para laje com pilar quadrado.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características das lajes ensaiadas por Gomes (1991).....	8
Tabela 2.2	Características, cargas e modos de ruptura das lajes de Gomes e Andrade (1993).....	12
Tabela 2.3	Características das lajes de Andrade (1999).....	14
Tabela 2.4	Características das lajes de Trautwein (2001).....	16
Tabela 2.5	Resumo das características das lajes de Silva (2003).....	19
Tabela 2.6	Principais características – lajes de Borges (2004).....	23
Tabela 2.7	Características das lajes de Musse (2004).....	26
Tabela 2.8	Características geométricas e resultados dos ensaios de Trautwein (2006).....	31
Tabela 2.9	Perímetros de controle e expressões de normas para cálculos da resistência à punção para o caso de pilares internos.....	33
Tabela 2.10	Perímetros de controle e expressões de normas para cálculos da resistência à punção para o caso de pilares internos e armadura de punção.....	34
Tabela 3.1	Características da armadura de cisalhamento das lajes ensaiadas.....	37
Tabela 3.2	Composição por m ³ de concreto.....	41
Tabela 3.3	Detalhes da distribuição da armadura de cisalhamento.....	45
Tabela 4.1	Propriedades mecânicas do concreto.....	52
Tabela 4.2	Idades e resistências à compressão das lajes no dia do ensaio.....	54
Tabela 4.3	Propriedades mecânicas do aço e local de utilização.....	54
Tabela 4.4	Resistência à tração dos <i>studs</i>	55
Tabela 4.5	Características das lajes, cargas e modos de ruptura por punção.....	57
Tabela 5.1	Principais características das lajes e comparações das cargas de ruptura.....	72
Tabela 5.2	Resultados experimentais e principais características das lajes de Gomes (1991) e dessa pesquisa.....	77
Tabela 5.3	Resultados experimentais e principais características das lajes ensaiadas por Silva (2003) e Musse (2004).....	78
Tabela 5.4	Principais características e resultados das lajes testadas por Andrade (1999), Trautwein (2001), Borges (2004) e Trautwein (2006).....	79
Tabela 5.5	Valores de carga, deslocamento e deformação da armadura de flexão relativas ao surgimento da primeira fissura radial.....	83
Tabela 5.6	Comparações de carga, deslocamento e deformação das armaduras de flexão e cisalhamento, no surgimento da primeira fissura circunferencial.....	84
Tabela 5.7	Características das lajes ensaiadas nessa pesquisa.....	87
Tabela 5.8	Comparações da carga experimental com a estimada pelas normas NBR 6118:2003 e ACI 318:2005.....	88
Tabela 5.9	Comparações da carga experimental com a estimada pelas normas CEB-FIP MC90 e EC2:2004.....	91
Tabela 5.10	Relações (ψ_u/ψ_{L1-A}) e (P_u/P_{uL1-A}) das lajes desta pesquisa.....	93

Tabela A-1	Varição de ρ para as lajes dessa pesquisa com κ menor que 0,70.....	128
Tabela A-2	Varição da altura e comprimento das lajes dessa pesquisa com κ menor que 0,70.....	129
Tabela A-3	Sugestões de possíveis variações para lajes com 6 linhas e 3 camadas de AC.....	129
Tabela A-4	Sugestões para armadura de cisalhamento com camadas adicionais e resultados de cálculos de ruptura, segundo a NBR 6118:2003.....	131

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_s Área da armadura de cisalhamento
- AC Armadura de cisalhamento
- AF Armadura de flexão
- A_{sn} Área do n-ésimo elemento de armadura de punção do modelo teórico de Gomes (1991)
- α Ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje
- b Largura da chapa de aço utilizada na confecção dos *studs*
- β Ângulo entre as linhas de armadura de cisalhamento
- $c_{máx}$ Maior lado do pilar retangular
- c_{min} Menor lado do pilar retangular
- d Altura efetiva da laje
- E_c Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto
- E_s Módulo de elasticidade do aço
- ϵ_y Deformação correspondente ao escoamento do aço
- ϵ_{AF} Deformações monitoradas nas barras de armadura de flexão
- ϵ_{AC} Deformações monitoradas nas barras de armadura de cisalhamento
- ϵ_u Deformação última do concreto
- e espessura da chapa de aço utilizada na confecção dos *studs*
- F_{cr} Força radial do concreto do modelo teórico de Gomes (1991)
- F_{ct} Força tangencial do concreto do modelo teórico de Gomes (1991)
- F_{st} Força tangencial da armadura de flexão do modelo teórico de Gomes (1991)
- F_e Força da armadura de cisalhamento do modelo teórico de Gomes (1991)
- f_c Resistência à compressão do concreto
- f_t Resistência à tração do concreto por compressão diametral
- f_y Tensão de escoamento do aço
- f_u Tensão de ruptura do aço
- f_{ck} Resistência característica do concreto à compressão
- f_{en} tensão atuante no n-ésimo elemento do modelo teórico de Gomes (1991)
- ϕ Diâmetro das barras de aço
- h Altura da laje
- κ Índice de armadura de cisalhamento situada dentro do maior raio do tronco de conde de ruptura delimitado pela fissura de cisalhamento
- MR Modo de ruptura
- n Número de elementos da armadura de cisalhamento
- P_u Carga de ruptura das lajes
- P_{uLref} Carga de ruptura da laje de referência
- P_r Carga no instante da primeira fissura radial detectada visualmente
- P_u^* Carga referente à última leitura realizada nos deflectômetros

Ψ	Rotação das lajes
$\Psi_{u,ref}$	Rotação da laje de referência
S_0	Distância entre o primeiro elemento cisalhante e a face do pilar
S_r	Distância radial entre elementos da armadura de cisalhamento
S_1	Distância entre a última camada de AC e a primeira camada adicional
S_n	Distância radial entre o n-ésimo elemento de armadura de cisalhamento e a face do pilar
θ	Ângulo entre a fissura de cisalhamento e o plano horizontal
V_{Rd}	Força cortante resistente de cálculo
$V_{Rd,c}$	Parcela da força cortante resistente devida ao concreto
$V_{Rd,s}$	Parcela da força cortante resistente devida à armadura de cisalhamento
V_{calc}	Força cortante resistente calculada
u_0	Perímetro de controle junto ao pilar
u_1	Perímetro de controle a $d/2$ ou $2,0d$ da face do pilar
u_2	Perímetro de controle a $d/2$, $1,5d$ ou $2,0d$ da da última camada de AC
ρ	Taxa de armadura de flexão
ξ	Coefficiente em função da altura da laje
δ_r	Deslocamento central na carga da primeira fissura radial detectada visualmente
δ_u	Deslocamento central máximo medido
δ_c	Deslocamento central na carga da primeira fissura circunferencial



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás–UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):	ANA PAULA RODRIGUES VAZ		
CPF:		E-mail:	anapjansen@gmail.com
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não			
Vínculo Empregatício do autor			
Agência de fomento:		Sigla:	
País:		UF:	
		CNPJ:	
Título:	RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE CONCRETO ARMADO: uma contribuição para Definição de Armadura Mínima de Cisalhamento		
Palavras-chave:	Lajes cogumelo-punção; Lajes cogumelo-resistência; Concreto Armado; Armadura de cisalhamento; Armadura Transversal.		
Título em outra língua:			
Palavras-chave em outra língua:			
Área de concentração:	Estruturas e Materiais de Construção		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	29 / 06 / 2007		
Programa de Pós-Graduação:			
Orientador(a):	Ronaldo Barros Gomes		
CPF:		E-mail:	
Co-orientador(a):	Lídia C. D. Shehata		
CPF:		E-mail:	

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ total parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: _____

Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do(a) autor(a)

Data: ____ / ____ / ____

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

Vaz, Ana Paula Rodrigues.

V393r Resistência à punção em lajes cogumelo de concreto armado [manuscrito]: uma contribuição para definição de armadura mínima de cisalhamento / Ana Paula Rodrigues Vaz. – 2007.
ix,136 f. : il., figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás.
Escola de Engenharia Civil, 2007.

Orientador: Prof. PhD. Ronaldo Barros Gomes; Co-Orientadora: Profa. PhD. Lídia C. D. Shehata.

Bibliografia: f. 99-100.

Inclui listas de figuras, tabelas e de símbolos.

Anexos.

1. Lages cogumelo – Punção 2. Lages cogumelo – Resistência
3. Concreto armado 4. Armadura [Engenharia Civil] – Cisalhamento 5. Armadura [Engenharia Civil] – Transversal I. Gomes, Ronaldo Barros II. Shehata, Lídia C. D. III. Universidade Federal de Goiás. **Escola de Engenharia Civil** IV. Título.

CDU: 624.073.135:624.012.45

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – ASPECTOS GERAIS

A utilização de lajes-cogumelo em estruturas de concreto tornou-se habitual nos últimos anos devido à simplicidade, economia de tempo, execução e custos, assim como à flexibilidade de utilização dos espaços construídos.

Entre as possíveis vantagens desse tipo de estrutura podem-se citar:

- A ausência de vigas proporciona a diminuição dos recortes, ocasionando maior agilidade no processo construtivo e redução de custo;
- Maior simplicidade no arranjo das armaduras de flexão e, conseqüentemente, maior facilidade de execução, possibilitando também o uso de telas soldadas;
- Redução da possibilidade de ocorrência de falhas devido à maior facilidade no lançamento, adensamento e desforma do concreto;
- Redução da altura total do edifício, possibilitando aumentar o número de pavimentos.

Com base nos resultados disponíveis na literatura, quando comparadas às lajes usuais, apoiadas em vigas, as lajes-cogumelo podem apresentar maiores deslocamentos verticais para um mesmo vão. Torna-se necessário, então, um aumento na espessura da laje cogumelo para que o valor da flecha seja o mesmo de uma laje convencional. A estabilidade global da estrutura pode diminuir, devido à ausência de vigas, sendo necessário vincular a laje a núcleos rígidos ou paredes estruturais.

Na região de ligação laje e pilar em lajes-cogumelo, verificam-se elevadas tensões originadas pelos esforços de flexão e de cisalhamento, que podem provocar ruptura por punção da laje, com uma carga inferior à de flexão. A ruptura por punção pode ocorrer sem nenhum aviso prévio e de forma frágil.

A resistência à punção é um fator importante no dimensionamento desse tipo de laje, sendo frequentemente um fator condicionante para a definição da espessura da laje, da geometria dos pilares, da resistência à compressão do concreto, do uso de capitel ou do uso de armadura de cisalhamento.

A resistência à punção de lajes-cogumelo sem armadura transversal, segundo várias normas (ACI-318 (2005), CEB-FIP MODEL CODE (1991), EUROCODE 2 (2004) e

NBR 6118 (2003)) é avaliada a partir da tensão nominal de cisalhamento em uma dada superfície de controle, que deve ser menor ou igual a uma tensão limite calculada em função da resistência característica do concreto à compressão, e outros parâmetros como geometria do pilar, taxa de armadura de flexão e espessura da laje.

Nas lajes-cogumelo com de armadura de cisalhamento, a avaliação da resistência à punção é feita somando-se a parcela resistente da armadura transversal à do concreto.

1.2 – OBJETIVOS

Nesta pesquisa verificou-se a resistência à punção e rotação de lajes cogumelo de concreto armado com uma quantidade pequena de armadura de cisalhamento do tipo “stud”, visando uma contribuição inicial para a determinação de armadura mínima de cisalhamento em lajes-cogumelo de concreto armado.

1.3 – ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese é constituída por seis capítulos e anexos. No capítulo 2, de revisão bibliográfica, apresenta-se o estado de conhecimento atual sobre resistência à punção em lajes-cogumelo de concreto armado. Faz-se referência a ensaios realizados recentemente por outros pesquisadores no Brasil e o exterior, enfocando o acréscimo da resistência ao puncionamento das lajes utilizando armadura de cisalhamento do tipo *stud*. Nesse capítulo também são apresentadas as expressões de normas nacionais e internacionais para estimar a resistência ao puncionamento desse tipo de estrutura.

A apresentação do programa experimental para o estudo da resistência ao puncionamento de lajes-cogumelo de concreto armado com armadura de cisalhamento do tipo “stud” é feita no Capítulo 3. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Goiás.

As características dos materiais componentes da laje e os resultados dos testes, tais como deformações da armadura de cisalhamento, deslocamentos verticais das lajes, modo e cargas de ruptura são apresentados no Capítulo 4.

O Capítulo 5 apresenta a análise dos resultados obtidos nos ensaios. Estes resultados são comparados com os de outros pesquisadores e os estimados segundo expressões das normas.

O Capítulo 6 faz um resumo das principais conclusões deste trabalho e são apresentadas sugestões para futuras investigações. Os Anexos apresentam os valores medidos das deformações e dos deslocamentos verticais das lajes, demonstrativos de cálculos utilizados com o uso das expressões das normas e um relatório fotográfico dos ensaios realizados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados resumos de pesquisas que trataram do estudo do funcionamento em lajes-cogumelo de concreto armado, ressaltando aquelas com armadura de cisalhamento, realizadas na Universidade Federal de Goiás, Universidade de Brasília, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e no exterior. Também são apresentados métodos de cálculo prescritos por normas técnicas.

2.1 –PUNÇÃO EM LAJES-COGUMELO

A resistência à punção em lajes-cogumelo tem sido estudada através da utilização de vários processos, como modelagens teóricas, métodos numéricos e análises experimentais.

A primeira teoria racional para a determinação da resistência à punção em lajes-cogumelo de concreto armado foi proposta por Kinnunen e Nylander (1960). Teve como base testes em lajes circulares, com carga aplicada no centro da laje por um macaco hidráulico, correspondendo à região do pilar. O modelo supõe que cada segmento de laje, considerado como corpo rígido, seja carregado por uma casca cônica comprimida que se estende desde o pilar até a origem da fissura de cisalhamento. A ruptura da laje ocorre quando a deformação tangencial do concreto abaixo da fissura de cisalhamento atinge um determinado valor limite na base da laje a uma certa distância da face do pilar. Kinnunen (1963) ampliou essa modelagem considerando os efeitos de pino e de membrana.

Regan (1985) sugeriu três possíveis superfícies de ruptura em uma laje-cogumelo com armadura de cisalhamento, sendo elas adjacentes ao pilar, cruzando as camadas de armadura de cisalhamento e externas à região armada à punção. Segundo esse autor, uma laje-cogumelo sem armadura de cisalhamento possui uma superfície de ruptura com raiz na face do pilar e uma inclinação próxima de 25° com o plano horizontal. Ao se adicionar à laje uma camada de armadura de punção que force a mudança na inclinação da superfície de ruptura, ocorre um acréscimo na contribuição de resistência do concreto na carga de ruptura. Esse acréscimo é moderado até que a inclinação se aproxime de 45° e, a partir dessa inclinação, o aumento vai sendo mais significativo.

No estado da arte de 1985, sobre punção em lajes-cogumelo de concreto armado do CEB, Regan (1985) citou autores que utilizaram elementos finitos para suas análises e

também estudos utilizando mecânica de fratura para o estudo da ruptura do concreto armado submetido a esforços de punção.

2.1.1 – SHEHATA (1985)

O modelo teórico proposto por Shehata (1985) considera a laje dividida em segmentos rígidos. Com o incremento de carga, formam-se fissuras, sendo que cada segmento formado é dividido por duas fissuras radiais, uma circunferencial e pela extremidade da laje e possui perfil de deflexão praticamente linear.

Os segmentos radiais da laje formados pelas fissuras, com o carregamento, giram em torno do centro de rotação C.R. localizado na face da coluna na altura da linha neutra, acarretando o escoamento da armadura de flexão atravessada pela fissura tangencial. Esse autor abordou lajes sem armadura de cisalhamento, sendo que as tensões de cisalhamento originadas causam fissura interna inclinada, considerada a 20° para lajes com armadura de flexão distribuída ortogonalmente. O concreto comprimido no bordo inferior da laje próximo à face da coluna é considerado no estado plástico.

O critério de ruptura proposto por Shehata (1985) considera três situações críticas:

- uma compressão diametral do concreto quando a força radial de compressão alcança uma inclinação de 20°
- um esmagamento radial do concreto quando a deformação radial média na face comprimida alcança o valor de 0,0035 em um comprimento plástico de 150 mm começando na face do pilar
- um esmagamento tangencial do concreto se a deformação tangencial da face comprimida alcança 0,0035 na distância da face do pilar igual à altura da linha neutra.

Em 1990, Shehata formulou uma simplificação de seu modelo teórico, onde os conceitos fundamentais permaneceram os mesmos, havendo alterações que simplificaram o cálculo de alguns parâmetros.

2.1.2 – GOMES (1991)

Com o objetivo de avaliar a resistência à punção de lajes-cogumelo com armadura de cisalhamento, Gomes (1991) ensaiou 12 lajes com 3000mm de lado e 200mm de espessura. O pilar era central e quadrado, com lados de 200mm. A carga foi aplicada no centro da laje através de um macaco hidráulico, agindo em uma placa de aço. A reação ocorria em 4 tirantes de aço colocadas em cada uma das extremidades da laje. Os tirantes passavam através de furos e foram conectados aos pares em vigas metálicas abaixo da laje e, em seqüência, à laje de reação.

Foi utilizada a mesma armadura de flexão em todas as lajes, que consistiu em 31 barras de 16,0 mm de diâmetro dispostas ortogonalmente, com espaçamento de 100 mm. A armadura de cisalhamento foi constituída por seções de perfil metálico I com espaçamento de 80 mm ($f_y = 430 \text{ N/mm}^2$), distribuídos de três maneiras:

- Distribuição em cruz, nas lajes 2, 3 (com duas camadas de armadura de cisalhamento), 4 (com três camadas) e 5 (com quatro camadas);
- Distribuição radial - nas lajes: 6, com 4 camadas; 7, 10 e 11, com 5 camadas, e 8, com 6 camadas de armadura de cisalhamento;
- Distribuição radial com camadas radiais intermediárias a partir da 6ª camada, com um total de 9 camadas, na laje 9.

Quanto à execução da armadura de cisalhamento, o autor recomendou que a chapa tivesse uma área de ancoragem com diâmetro três vezes o diâmetro da barra do “stud” e uma espessura com dimensão de uma vez o diâmetro da barra. Os detalhes da disposição da armadura de cisalhamento nas lajes de Gomes (1991) podem ser vistos nas Figuras 2.1 e 2.2.



Figura 2.1- Armadura de cisalhamento – L6 – (GOMES, 1991)

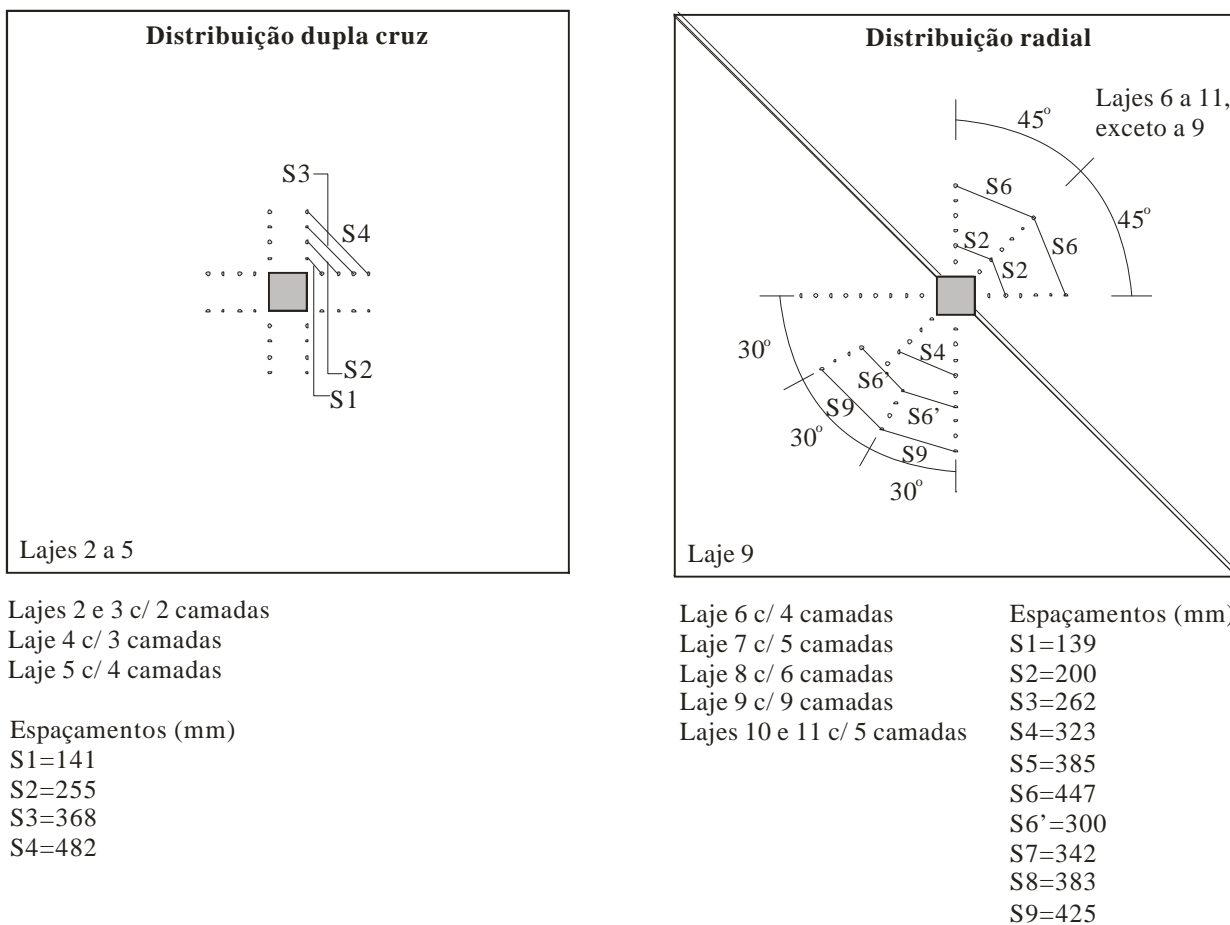


Figura 2.2- Distribuição da armadura de cisalhamento – lajes (GOMES, 1991)

A Tabela 2.1 apresenta as principais características geométricas e dos materiais utilizados, e também mostra a carga e o modo e superfície de ruptura. Esta superfície apresentou três formas distintas:

- Interna – superfície de ruptura cruzando a região de armadura de cisalhamento;
- Externa – superfície de ruptura ocorrendo na região externa à armadura de cisalhamento,
- Interna / Externa – a superfície de ruptura não foi bem definida (laje 3), houve fissuração nas regiões interna e externa à armadura de cisalhamento.

Gomes (1991) concluiu que a distribuição radial dos elementos de reforço à punção proporciona melhores resultados do que a distribuição em cruz. Observou também que a resistência à punção de lajes-cogumelo pode ser aumentada em até 100% com o uso da armadura de cisalhamento.

Tabela 2.1 – Características das lajes ensaiadas por Gomes (1991)

lajes	d (mm)	concreto		Armadura de Cisalhamento				Ruptura	
		f _c (MPa)	f _{ct} (MPa)	φ (mm)	âng.entre linhas	nº de camadas	distrib.	P _u (kN)	Modo
L1	159	50,3	3,4	-	-	-	-	560	punção
L1A	159	51,4	3,3	-	-	-	-	587	punção
L2	153	43,1	3,0	6,0	90°	2	Cruz	693	interna
L3	158	49,0	3,4	6,9	90°	2	Cruz	773	interna / externa
L4	159	40,1	3,1	8,0	90°	3	Cruz	853	externa
L5	159	43,4	3,5	10,0	90°	4	Cruz	853	externa
L6	159	46,7	3,5	10,0	45°	4	Radial	1040	externa
L7	159	42,3	3,0	12,0	45°	5	Radial	1120	externa
L8	159	42,6	3,4	12,0	45°	6	Radial	1200	externa
L9	159	50,0	3,0	12,2/10,0	45° / 22,5°	9 / 5 / 4	Radial	1227	externa
L10	154	44,2	3,0	6,0	45°	5	Radial	800	interna
L11	154	43,2	3,1	6,9	45°	5	Radial	907	interna

altura das lajes - h = 200mm, taxa de armadura de flexão - ρ = 1,20%

tensão de escoamento da armadura de cisalhamento - f_y = 430 MPa

nº de linhas de armadura de cisalhamento = 8;

distância entre a face do pilar e a primeira camada de armadura de cisalhamento - S₀ = 80mm

distância entre as camadas de armadura de cisalhamento - S_r = 80 mm

punção - ruptura por punção

interna - ruptura por punção com superfície cruzando as camadas de armadura de cisalhamento

externa - ruptura por punção com superfície externa à região de armadura de cisalhamento

De acordo com o modelo teórico proposto por Gomes (1991) para determinação da resistência à punção em lajes-cogumelo de concreto armado, em estágio avançado de carregamento, as fissuras de flexão e cisalhamento dividem a laje basicamente em três partes, sendo elas:

- coluna ou pilar, limitada pela fissura circunferencial mais interna e a face da coluna;
- cunha, limitada pela fissura circunferencial mais interna, pela fissura circunferencial de cisalhamento e pelas fissuras radiais de flexão;
- segmentos de laje, limitados pelas fissuras circunferenciais de cisalhamento, pelas fissuras radiais de flexão e pela extremidade da laje.

No modelo idealizado por Gomes (1991) para lajes com armadura de cisalhamento, tem-se a representação de cinco forças atuantes:

- Força radial do concreto (F_{cr}), que atua com uma inclinação α no segmento de laje abaixo da origem da fissura de cisalhamento na seção próxima à coluna;
- Força tangencial do concreto (F_{ct}), que atua tangencialmente ao segmento de laje e abaixo do centro de rotação, com sentido do exterior para o interior do mesmo;
- Força tangencial da armadura de flexão (F_{st}), proveniente das armaduras de flexão nas fissuras radiais.
- Força radial da armadura de flexão (F_{sr}), que aparece junto à fissura circunferencial da cunha na seção próxima à coluna na direção radial, atuando também na parte superior da laje, onde está a armadura negativa de flexão.
- Força de cisalhamento (F_e), que é transmitida para o segmento de laje através da cunha pela armadura de cisalhamento, seguindo um determinado ângulo β com a horizontal. É importante a observação de que somente as armaduras que cruzam a fissura de cisalhamento contribuem para produzir esta força.

A Figura 2.3 mostra o diagrama das forças das armaduras de cisalhamento. É considerada para cálculo da força somente a contribuição das armaduras que são atravessadas pela fissura de cisalhamento e que estão dentro da cunha.

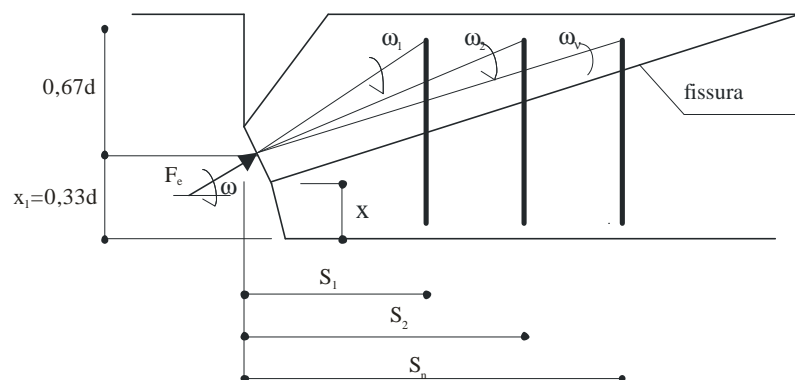


Figura 2.3 – Diagrama de forças da armadura de cisalhamento – (GOMES, 1991)

A componente vertical de F_e é dada por:

$$F_e \text{sen} \mathbf{w} = A_{s1} f_{e1} + A_{s2} f_{e2} + \dots + A_{sn} f_{en} \quad (2.1)$$

onde:

\mathbf{w} = ângulo entre a força da armadura de cisalhamento, F_e , e o plano horizontal;

A_{sn} = área do n-ésimo elemento de armadura de cisalhamento;

f_{en} = tensão do n-ésimo elemento.

E a componente horizontal pela equação 2.2:

$$F_e \cos \mathbf{w} = F_{e1} \cos \mathbf{w}_1 + F_{e2} \cos \mathbf{w}_2 + \dots + F_{en} \cos \mathbf{w}_n \quad (2.2)$$

$$\text{onde: } F_{en} = \frac{A_{sn} f_{en}}{\text{sen} \mathbf{w}_n} \quad (2.3)$$

Considerando $\cotg \mathbf{w}_n$ aproximadamente igual a $\frac{s_n}{(d-x)}$, onde s_n é a distância entre o n-ésimo elemento de armação a cisalhamento e a face do pilar, tem-se:

$$F_e \cos \mathbf{w} = \frac{1}{(d-x)} (A_{s1} f_{e1} s_1 + A_{s2} f_{e2} s_2 + \dots + A_{sn} f_{en} s_n) \quad (2.4)$$

A partir da resolução do sistema formado pelas Equações 2.1 a 2.4, com três incógnitas (F_e , ω e x) e assumindo-se $x_1 = 0,33d$, Gomes (1991) obteve as seguintes expressões para cálculo do ângulo β e da força da armadura de cisalhamento (F_e):

$$\mathbf{w} = \text{arctg} \left[\frac{0,67d \sum_{i=1}^n A_{si} f_{ei}}{\sum_{i=1}^n A_{si} f_{ei} s_i} \right] \quad (2.5)$$

$$F_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_{si} f_{ei}}{\text{sen} \mathbf{w}} \quad (2.6)$$

sendo n o último elemento da última camada contribuinte da armadura de cisalhamento.

A delimitação da quantidade de camadas de armadura de cisalhamento pelo do tronco de cone de ruptura considerada por Gomes (1991) é apresentada na Figura 2.4.

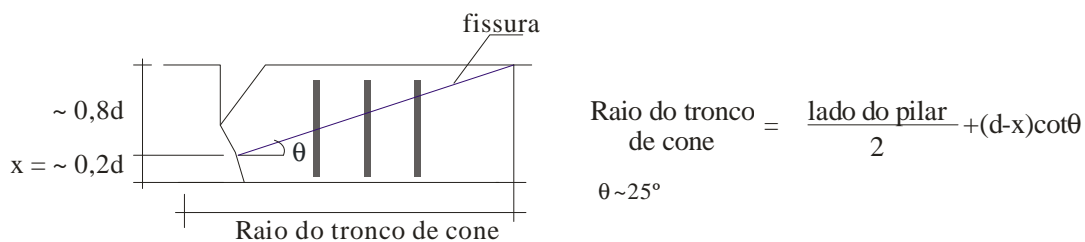


Figura 2.4 – Delimitação da quantidade de camadas de armadura de cisalhamento pelo tronco de cone de ruptura

2.1.3 – GOMES e ANDRADE (1993)

Os autores realizaram uma pesquisa para verificar a influência da armadura de cisalhamento na resistência à punção em lajes-cogumelo com furos próximos ao pilar (área de carregamento). Os modelos estudados possuíam as mesmas dimensões e armadura de flexão das lajes estudadas por Gomes (1991).

A investigação experimental consistiu na ruptura de 16 lajes quadradas, sendo 5 lajes sem armadura de cisalhamento e 2 lajes sem furos. Os furos existentes em algumas lajes diferiram em número (1, 2 ou 4) e em diâmetro diferente (90 mm, 151 mm ou 166 mm). As lajes com armadura de cisalhamento apresentaram uma distribuição radial em 8 e 16 linhas e $A_s f_y$ por camada teve cinco valores (113,1kN, 157,1kN, 201,1kN, 314,2kN, 2x314,2kN).

Gomes e Andrade (1993) relataram que a utilização de armadura de cisalhamento em lajes-cogumelo, posicionada ao lado de furos, pode suprir a resistência perdida devido aos furos. Tal eficiência é caracterizada pelo fato de possibilitar um acréscimo na carga última à punção de 20% (laje 20) a 75% (laje 16) quando comparadas com a laje 12A, sem furos e sem armadura de cisalhamento.

Entretanto, os resultados também sugerem que deve existir um limite para a capacidade de restabelecer a perda da resistência devido à existência de furos com o uso de armadura de cisalhamento na região em torno do pilar. Duas das lajes testadas pelos autores sugerem que possivelmente esse limite pode ser aumentado com o uso de tubos de aço em torno dos furos (lajes 26 e 27).

As principais características, bem como as cargas e os modos de ruptura das lajes ensaiadas por Gomes e Andrade (1993) estão na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características, cargas e modos de ruptura das lajes de Gomes e Andrade (1993)

Lajes	d (mm)	f_c (MPa)	<i>Furos</i>		<i>Armadura de cisalhamento</i>			<i>Ruptura</i>	
			nº	ϕ (mm)	nº de camadas	nº de linhas	ϕ (mm)	P_u (kN)	Modo
12A	163	36,5	-	-	-	-	-	650	punção
13	153	31,4	1	90	-	-	-	600	punção
14	155	31,4	1	151	-	-	-	556	punção
15	148	27,8	2	166	-	-	-	554	punção
16	156	34,6	-	-	4	8	10,0	1140	externa
17	166	34,1	1	90	4	8	10,0	1096	externa
18	165	36,8	1	166	4	8	10,0	992	externa
19	165	36,6	2	166	4	8	10,0	1010	externa
20	159	33,8	4	166	4	8	10,0	780	interna
21	165	36,3	2	166	6	8	8,0	896	interna
22	164	34,5	2	166	6	8	6,0	832	interna
23	160	36,4	4	166	-	-	-	550	punção
24	161	35	4	166	4	8	10,0	890	externa
25	160	34,2	4	166	6 / 3	2x8	10,0	900	interna
26	169	36,7	4	166	6 / 3	2x8	10,0	985	externa
27	169	30,7	4	166	10 / 5	2x8	10,0	985	flexão

punção - ruptura por punção

interna - ruptura por punção com superfície cruzando as camadas de armadura de cisalhamento

externa - ruptura por punção com superfície externa à região de armadura de cisalhamento

flexão - ruptura por flexão

2.1.4 – ANDRADE (1999)

Andrade (1999) investigou o comportamento de 8 (oito) lajes quadradas de concreto armado onde foi variada a armadura de cisalhamento. As lajes tinham dimensões de 3000 mm x 3000 mm x 200 mm (d variando entre 154 e 164mm), f_c em torno de 35 MPa e foram submetidas a carregamento concêntrico.

A armadura de flexão (1,2 %) era composta de uma malha superior com barras de diâmetro de 16 mm espaçadas a cada 20 cm nas duas direções. A malha inferior tinha barras com diâmetro de 8 mm, espaçadas a cada 20 cm nas duas direções. Todas as lajes possuíam a mesma armadura de flexão.

Todas as lajes tinham armadura de cisalhamento, de barras de aço CA-50 com diâmetro de 10 mm, exceto a laje 7, onde foram utilizadas barras com diâmetro de 12,5 mm. O posicionamento e a distribuição das armaduras de cisalhamento utilizadas estão apresentados nas Figuras 2.5 e 2.6.

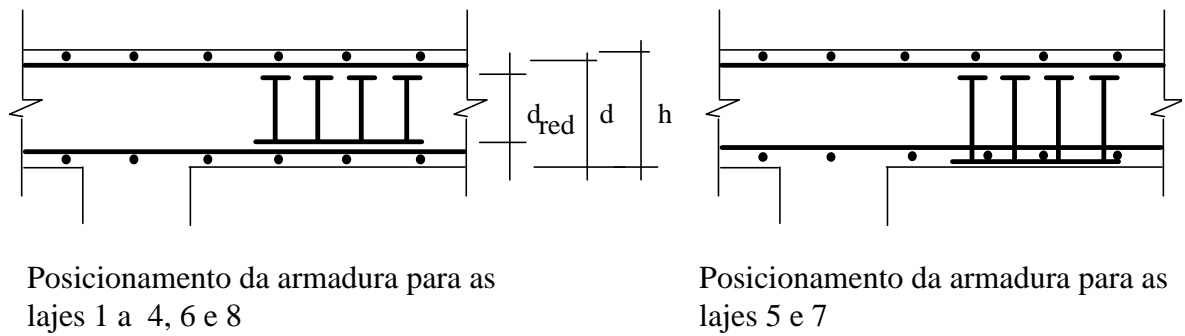


Figura 2.5 – Posicionamento das armaduras de cisalhamento – (ANDRADE, 1999).

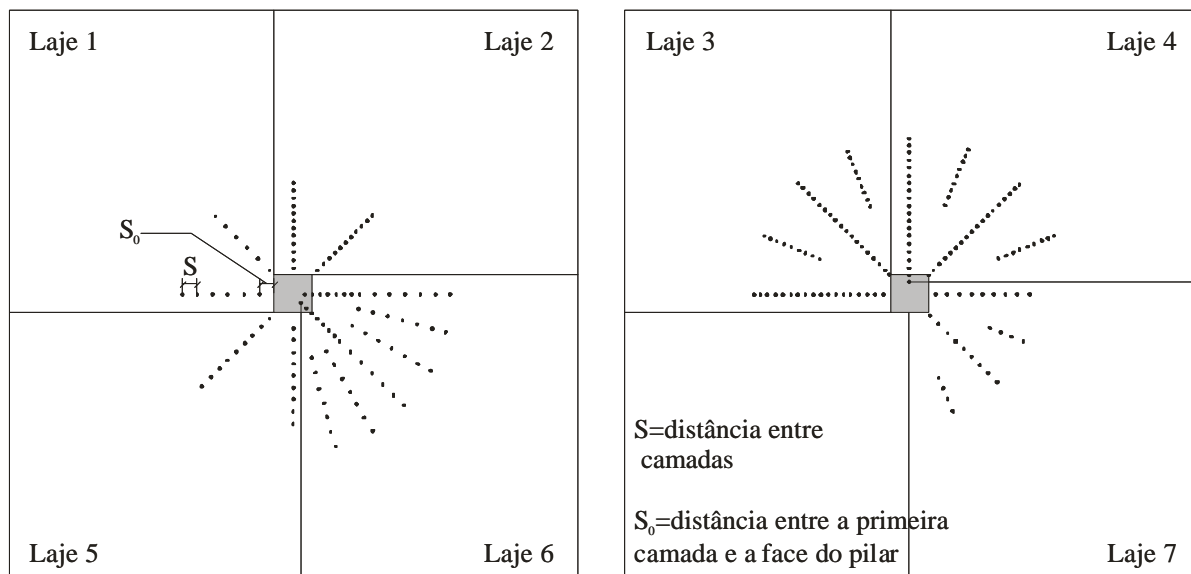


Figura 2.6- Disposição da armadura de cisalhamento – lajes de Andrade (1999)

Todas as lajes romperam por punção com cargas que variaram entre 790 kN e 1090 kN; As com armadura transversal tiveram um acréscimo de até 90% na resistência à punção, em relação às lajes similares sem armadura de cisalhamento. Nas lajes com a armadura de cisalhamento posicionada internamente à armadura de flexão, surgiram fissuras horizontais localizadas entre as armaduras de flexão e de cisalhamento.

O autor concluiu que o tipo de posicionamento proposto para a armadura de cisalhamento, sem envolver a armadura de flexão, é justificável, mas há necessidade de ajustar os métodos de cálculos para que as cargas estimadas fiquem mais próximas das reais. Para tentar aproximar a carga de ruptura real das previstas pelos métodos de cálculo, foi sugerido que se considere para altura útil a altura da armadura de cisalhamento e que se verifique a tensão cisalhante entre a primeira camada da armadura de cisalhamento e a face do pilar. A Tabela 2.3 mostra as características das lajes ensaiadas por Andrade (1999).

Tabela 2.3 – Características das lajes de Andrade (1999)

lajes	d (mm)	concreto		Armadura de Cisalhamento						Ruptura	
		f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	ϕ	nº linhas	âng.entre linhas	nº de camadas	S_0	S_r	P_u (kN)	Modo
L1	164	37,8	3,7	10,0	8	45°	6	80	80	830	interna
L2	164	34,2	2,7	10,0	8	45°	12	40	40	790	interna
L3	154	42,4	3,3	10,0	8 / 8	45° / 22,5°	18 / 9	40	40	966	externa
L4	164	36,1	3,4	10,0	8 / 8	45° / 22,5°	20 / 10	40	40	956	interna
L5	154	29,6	2,9	10,0	8	45°	8	60	60	785	interna
L6	164	37,4	2,8	10,0	8 / 16	45° / 11,25°	14 / 7	40	40	950	interna
L7	164	34,0	3,7	12,5	8 / 8	45°	8 / 4	40	60	1090	externa
L8	154	37,5	2,8	12,5	8 / 8	45° / 22,5°	8 / 4	40	60	1020	interna

altura das lajes - $h = 200\text{mm}$

taxa de armadura de flexão - $\rho = 1,20\%$

tensão de escoamento da armadura de cisalhamento - $\phi = 10,0 = 602\text{ MPa}$ e $\phi = 12,5 = 678\text{ MPa}$

distribuição da armadura de cisalhamento - radial

As superfícies de ruptura consideradas internas pelo autor aconteceram entre a armadura de flexão e cisalhamento e houve o esmagamento do concreto na região de aplicação da carga.

2.1.5 – TRAUTWEIN (2001)

A pesquisa de Trautwein (2001) incluiu ensaios de nove lajes de concreto armado com as mesmas dimensões (3000 x 3000 x 200 mm), submetidas a um carregamento aplicado no centro inferior da laje através de uma placa metálica (200 x 200 x 50 mm). As principais variáveis dos ensaios foram o tipo e quantidade de armadura de cisalhamento.

Todas as lajes possuíam a mesma armadura de flexão, sendo que a armadura superior era composta por 31 barras de 16 mm de diâmetro (CA – 50) em cada direção,

espaçadas de 10 cm, enquanto que a armadura inferior era constituída por 21 barras de 8 mm (CA – 50) em cada direção, espaçadas de 15 cm.

Foi investigada a eficiência de dois tipos de armadura de cisalhamento no combate à punção, um do tipo “stud”, sem envolver a armadura de flexão (Grupo 1 - 3 lajes), e outro com estribos inclinados a 60° (Grupo 2 – 6 lajes). A distribuição da armadura de punção do Grupo 1 é mostrada na Figura 2.7. Os detalhes e a distribuição dos estribos inclinados podem ser observados nas Figuras 2.8 e 2.9.

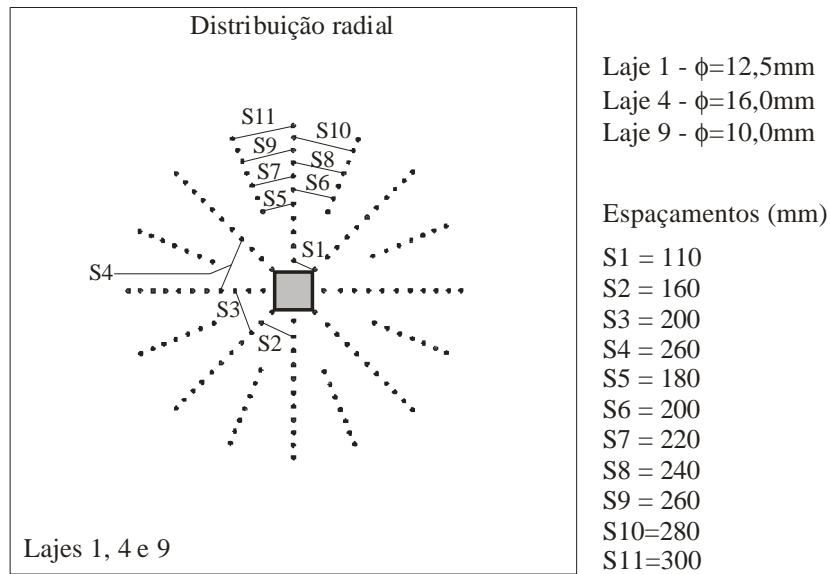


Figura 2.7- Disposição da armadura de cisalhamento – lajes Grupo 1 – (TRAUTWEIN, 2001)

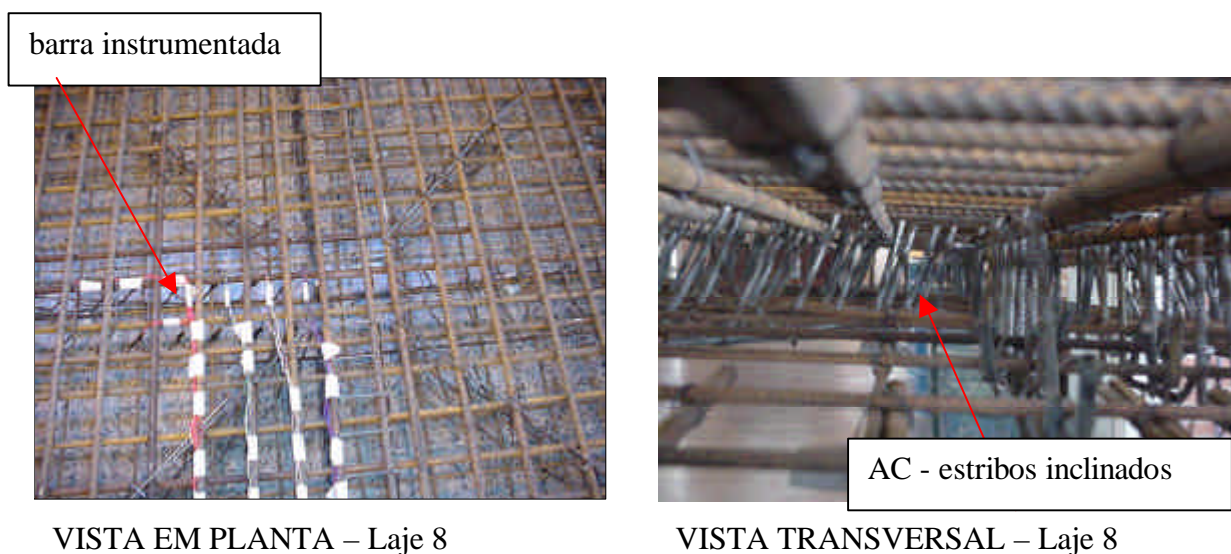
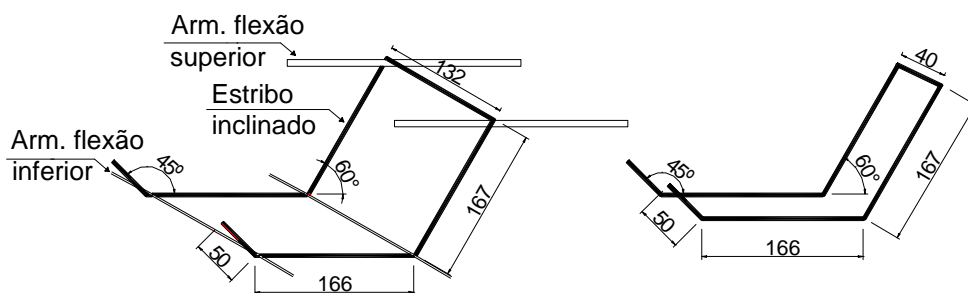


Figura 2.8- Armadura de cisalhamento – laje 8 Grupo 2 – (TRAUTWEIN, 2001)



- a) estribo inclinado 60° -
 - lajes 2 e 3 - distribuição em cruz
 - laje 5 - distribuição radial
 - lajes 6, 7 e 8 - distribuição radial

- b) estribo inclinado 60° , utilizado nas
 linhas diagonais
 - lajes 6, 7 e 8 - distribuição radial

Figura 2.9 - Detalhe dos estribos das lajes do Grupo 2, segundo Trautwein (2001)

As lajes armadas com “studs” e estribos inclinados tiveram ganho na carga de ruptura de até 94% (laje 7), em relação às lajes sem armadura de cisalhamento testadas por GOMES (1991). As maiores cargas de ruptura foram alcançadas para as lajes com estribos distribuídos radialmente. Quando foram usados estribos inclinados, houve uma grande concentração de armaduras nas linhas diagonais às faces do pilar, havendo necessidade de cuidado especial quanto ao cobrimento da armadura para essa situação. A Tabela 2.4 mostra as características das lajes de Trautwein (2001).

Tabela 2.4 – Características das lajes de Trautwein (2001)

lajes	d (mm)	concreto		Armadura de Cisalhamento						Ruptura		
		f _c (MPa)	f _{ct} (MPa)	φ (mm)	nº linhas	âng.entre linhas	nº de camadas	distrib.	S ₀	S _r	P _u (kN)	Modo
L1	159	40,2	2,8	12,5	8 / 8	45° / 22,5°	11 / 7	Radial	35	60	1050	interna
L4	164	46,2	4,1	16,0	8 / 8	45° / 22,5°	11 / 7	Radial	35	60	1038	interna
L9	154	45,0	3,6	10,0	8 / 8	45° / 22,5°	11 / 7	Radial	35	60	933	interna
L2	139	48,4	4,0	6,3	8	90°	3	Cruz	-	80	650	interna
L3	164	53,1	4,0	8,0	8	90°	3	Cruz	-	80	999	interna
L5	159	51,9	4,3	6,3/8,0	16	45°	4	Radial	-	80	975	externa
L6	159	55,5	4,2	8,0	16	45°	7	Radial	-	80	1087	externa
L7	159	49,3	4,5	8,0	16	45°	9	Radial	-	80	1160	externa
L8	154	48,5	3,9	5,0	16	45°	7	Radial	-	80	975	interna

altura das lajes - h = 200mm

taxa de armadura de flexão - ρ = 1,20%

nº de linhas de armadura de cisalhamento - lajes 1, 4, 9, 2 e 3 = 8; lajes 5, 6, 7 e 8 = 16

tipo de armadura de cisalhamento - lajes 1, 4 e 9 = studs; demais lajes = estribos

φ -5,0:f_y =794MPa, φ -6,3:f_y =636MPa, φ -8,0:f_y =616MPa, φ -10,0: f_y =577MPa, φ -12,5: f_y = 658MPa, φ -16,0: f_y =561MPa

2.1.6 – SILVA (2003)

Nesse trabalho estudou-se o comportamento de 12 (doze) lajes quadradas de concreto armado, que tinham dimensões de 1800 mm x 1800 mm x 130 mm ($d = 90\text{mm}$), f'_c em torno de 40 MPa e foram submetidas a carregamento concêntrico.

As principais variáveis das lajes foram: dimensões da seção do pilar ($c_{máx}$ e c_{min}); presença ou não de dois furos ao lado do pilar, e armadura de cisalhamento. Os demais parâmetros, tais como a taxa de armadura de flexão, a posição do carregamento (centrado), resistência à compressão do concreto e as dimensões das lajes, foram mantidos constantes.

O Grupo 1 foi composto por lajes sem furos, sem armadura de cisalhamento e com pilares retangulares e uma laje com pilar circular (L12). As lajes do Grupo 2 possuíam furos adjacentes ao menor lado da seção do pilar. O Grupo 3 tinha lajes com armadura de cisalhamento onde o perímetro formado pela última camada da AC era igual ao perímetro do pilar circular da laje do Grupo 1. O Grupo 4 era constituído de lajes com furos adjacentes ao menor lado da seção do pilar e armadura de cisalhamento. A Figura 2.10 mostra a armadura das lajes do Grupo 4.

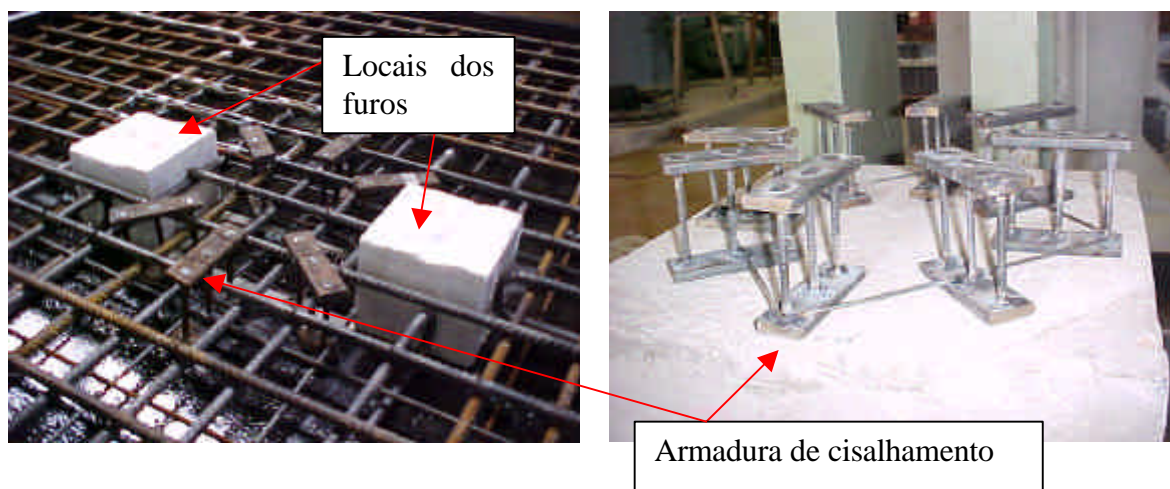
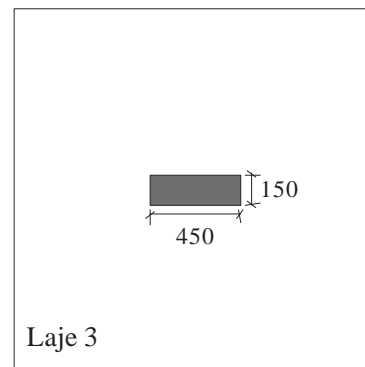
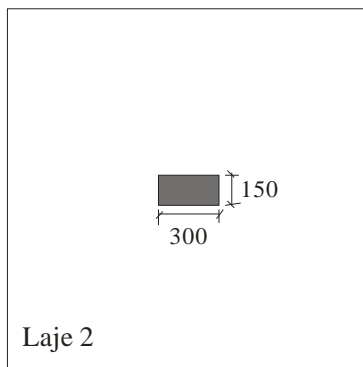
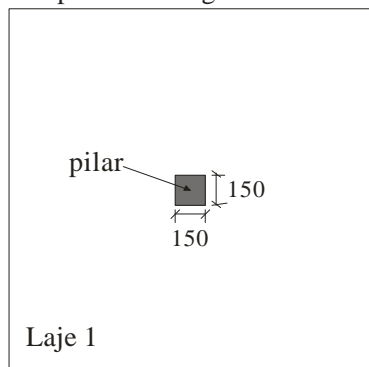


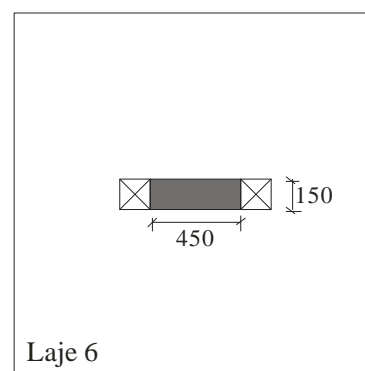
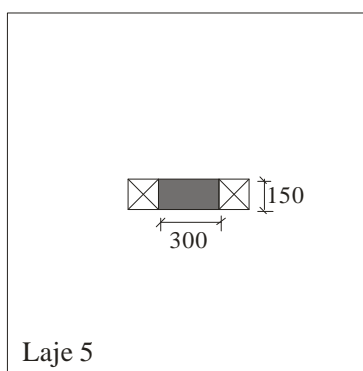
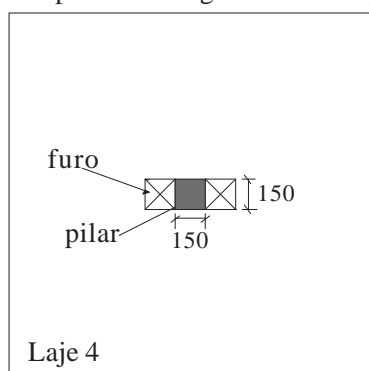
Figura 2.10 – Armadura das lajes do Grupo 4 - (SILVA, 2003)

A distribuição da armadura de cisalhamento e demais variáveis das lajes ensaiadas por Silva (2003) podem ser observadas na Figura 2.11.

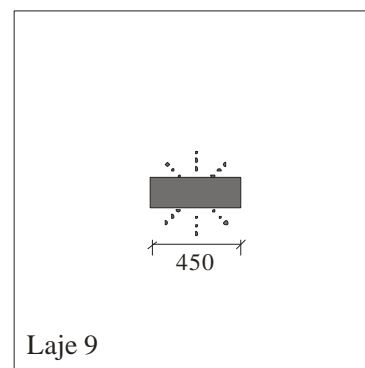
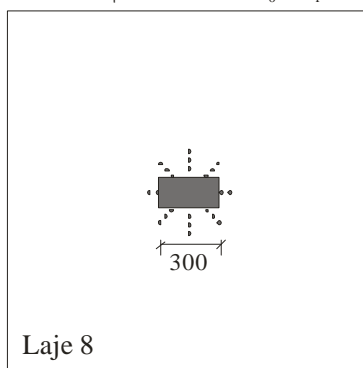
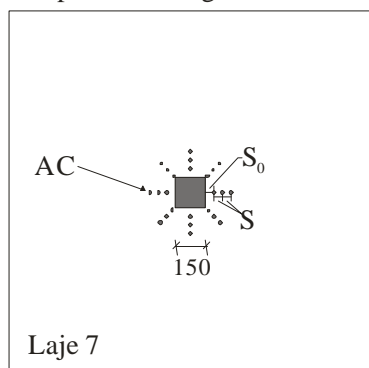
Grupo 1 - Retangularidade de pilares



Grupo 2 - Retangularidade de pilares e furos



Grupo 3 - Retangularidade de pilares e AC $\phi = 8,0\text{mm} - S_0 = S_1 = 42\text{mm}$



Grupo 4 - Retangularidade de pilares, furos e AC $\phi = 8,0\text{mm} - S_0 = S_1 = 42\text{mm}$, e Laje 12- Grupo 1

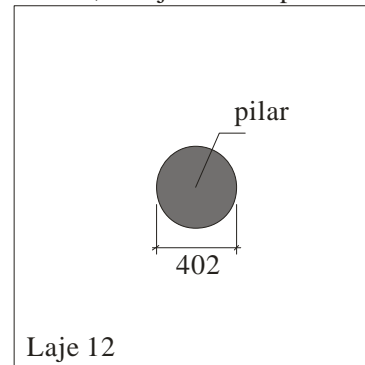
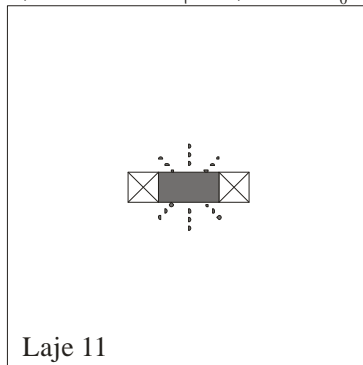
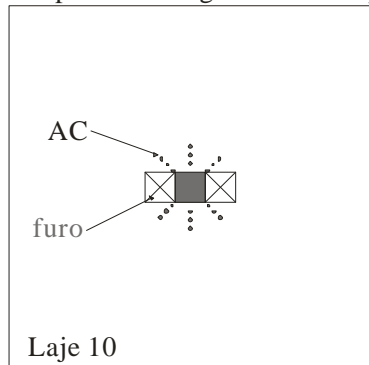


Figura 2.11 – Características das lajes ensaiadas por Silva (2003)

A Figura 2.12 apresenta o esquema de ensaio utilizado para o teste e um resumo das principais características das lajes descritas pode ser visto na Tabela 2.5.

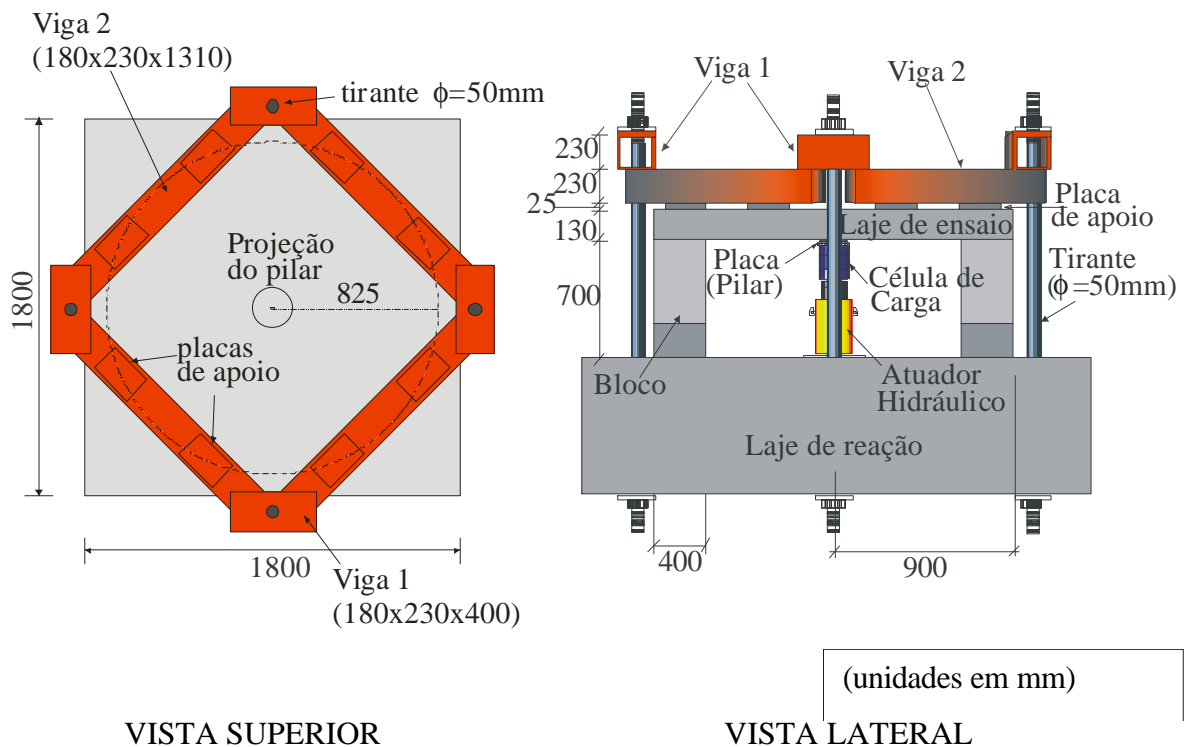


Figura 2.12 - Esquema de ensaio utilizado (vista superior e vista lateral) – (SILVA, 2003)

Tabela 2.5 – Resumo das características das lajes de Silva (2003)

lajes	pilar	A_s flexão	concreto		furos	AC		Ruptura	
			f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)		nº de linhas	nº de camadas	P_u (kN)	Modo
L1	1	1,45	39,6	3,8	-	-	-	273	punção
L2	2	1,45	40,4	3,9	-	-	-	401	punção
L3	3	1,45	40,8	4,0	-	-	-	469	adj.(lado maior)/afastado (lado menor)
L4	1	1,57	39,4	4,0	150x150	-	-	225	punção
L5	2	1,57	39,6	4,1	150x150	-	-	350	adj.(lado maior)/afastado (lado menor)
L6	3	1,57	39,1	4,3	150x150	-	-	375	adj.(lado maior)/afastado (lado menor)
L7	1	1,45	49,0	3,7	-	8	3	420	externa
L8	2	1,45	49,1	3,7	-	8	3	452	externa
L9	3	1,45	50,2	3,7	-	6	3	452	externa
L10	1	1,57	40,0	3,6	150x150	6	3	325	externa
L11	2	1,57	40,8	3,7	150x150	6	3	350	externa
L12	*	1,45	42,3	3,7	-	-	-	525	punção

* pilar circular - diâmetro = 402mm

altura das lajes - h = 130mm; altura efetiva - d = 90 mm

$S_0 = S_r = 42$ mm; $f_y = 600$ MPa - $\phi = 8,0$ mm

distribuição da armadura de cisalhamento - radial, ângulo entre linhas = 45°

Os modos e superfícies de ruptura apresentaram-se de três formas distintas:

- interna – superfície de ruptura cruzando as camadas de armadura de cisalhamento;
- externa – superfície de ruptura externa à região de armadura de cisalhamento;
- adjacente ao pilar na direção do lado maior e afastado na outra direção (no caso de alguns pilares retangulares). Esse tipo de ruptura pode ser observado na Figura 2.13.

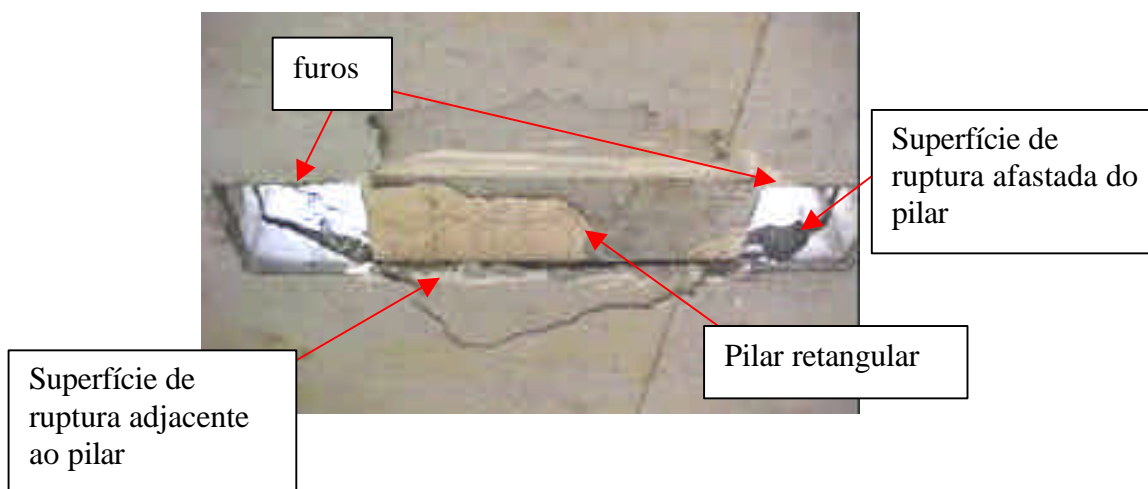


Figura 2.13 – L6 após a ruptura – vista inferior – (SILVA, 2003)

Todas as lajes testadas apresentaram ruptura por punção. As lajes com armadura de cisalhamento apresentaram ruptura do tipo externa, com superfície iniciando-se após a última camada de *studs*. Em quase todas as lajes sem armadura de cisalhamento, a superfície de ruptura iniciou-se na face do pilar.

Com o aumento de uma das dimensões do pilar, que conseqüentemente aumenta o perímetro de controle (da região armada), ocorre um acréscimo na carga de ruptura. No entanto, o autor observou que, na medida em que se aumenta a relação entre os lados do pilar, o acréscimo de carga vai sendo menor. SILVA (2003) observou também que a existência de furos adjacentes ao pilar pode afetar a resistência à punção de lajes cogumelo. Os resultados mostraram que a carga última diminuiu em até 20% quando se reduziu a porção resistente do concreto na região crítica, com dois furos quadrados de 150 mm de lado.

2.1.7 – BORGES (2004)

A pesquisa de Borges (2004) incluiu ensaios de vinte lajes-cogumelo quadradas, de concreto armado, com 3000 mm de lado e 200 mm de espessura, apoiadas em pilares internos e retangulares. Esse conjunto de lajes foi dividido em três séries. A Série 1 foi formada por oito lajes com pilares retangulares; a Série 2 seis lajes com furos retangulares, e a Série 3 quatro lajes com furos e armadura de cisalhamento e duas lajes com armadura de cisalhamento.

A armadura de flexão foi constante e foi determinada para prevenir a ruptura por flexão. A armadura de flexão negativa, do bordo superior da laje, foi composta de 31 barras de 16 mm de diâmetro (aço CA50), em cada direção e espaçadas de 100 mm. A armadura de flexão positiva compôs-se de 21 barras de 8 mm de diâmetro (aço CA50), em cada direção, espaçadas de 150 mm. As variáveis das três séries podem ser observadas na Figura 2.14.

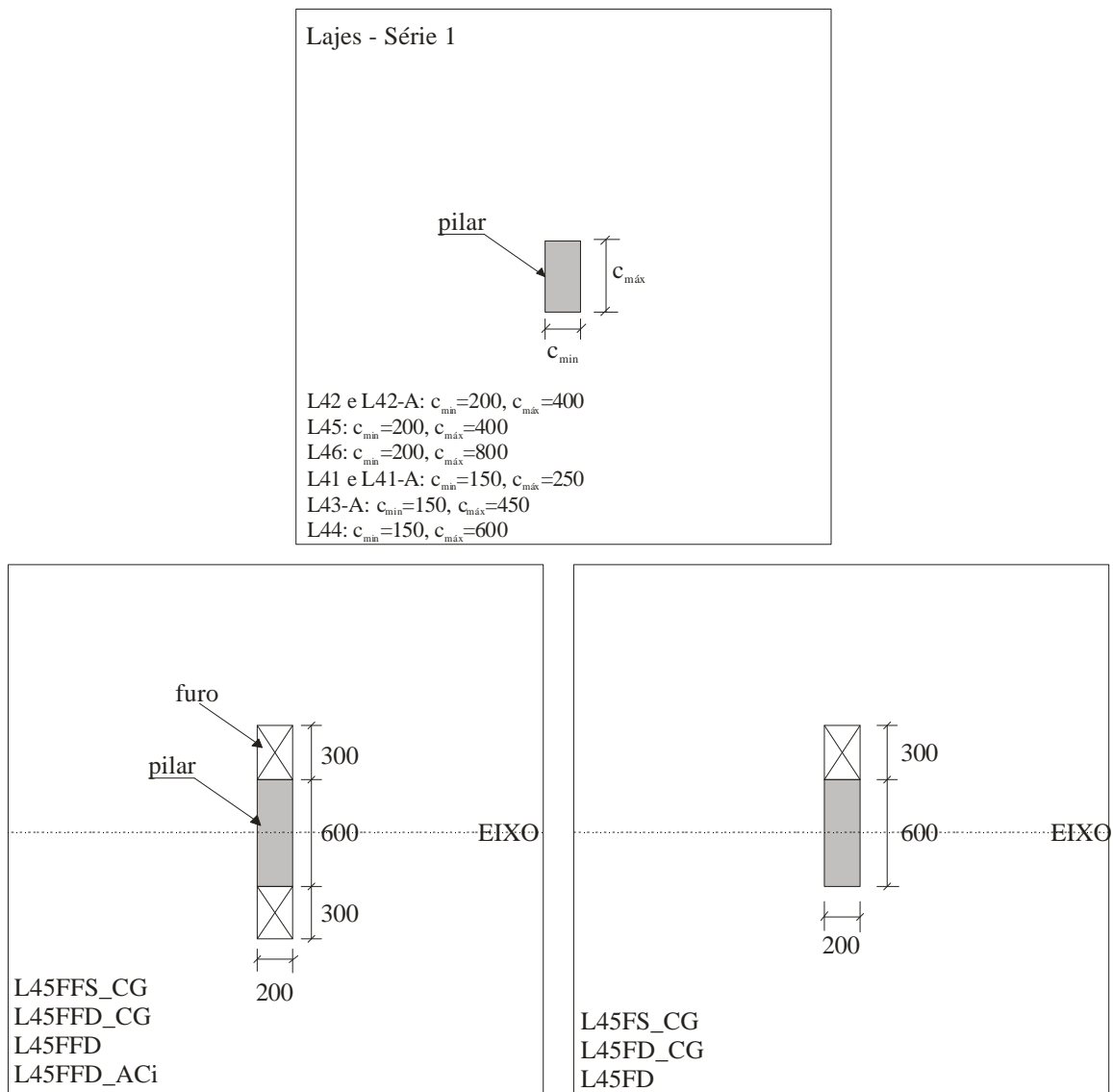


Figura 2.14 – Lajes das três séries – (BORGES, 2004)

Para a simulação dos pilares nas lajes, foram utilizadas chapas grossas de aço com espessura entre 35 mm e 63 mm, dependendo da seção do pilar estudada, no centro da face inferior das lajes. A armadura de cisalhamento utilizada nas lajes da Série 3 foi o *stud*, que foi ancorado externamente às barras da armadura de flexão superior e inferior, envolvendo-as e conduzindo, assim, a uma ancoragem mais efetiva da armadura de cisalhamento. A Figura 2.15 mostra detalhes dos *studs* utilizados nessas lajes.

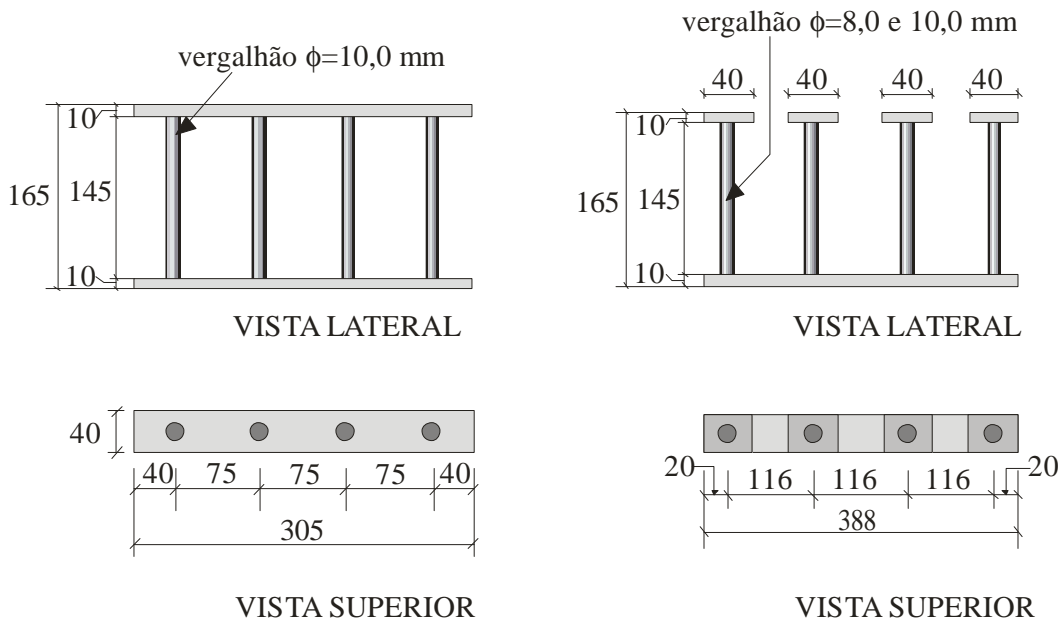


Figura 2.15 – Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada na Série 3 de Borges (2004)

Todas as lajes romperam por punção. A autora verificou que o aumento da relação $c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$ do pilar conduziu ao aumento da carga de ruptura das lajes. No entanto, o crescimento da carga de ruptura não ocorreu na mesma proporção do acréscimo da relação $c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$ ($c_{m\acute{i}n}$ constante). A armadura de cisalhamento constituída de *studs* apresentou um adequado desempenho sendo ancorada externamente às barras superior e inferior da armadura de flexão. Nas lajes com furos, sem armadura de cisalhamento, a ruptura ocorreu de forma brusca e repentina, enquanto que nas lajes com armadura transversal a ruptura se desenvolveu com algum aviso prévio. A presença de furos adjacentes ao pilar reduziu a carga de ruptura das lajes em até 24%.

Borges (2004) concluiu também que a utilização de armadura de cisalhamento nas lajes sem furos conduziu a um aumento de até 48% na carga de ruptura, chegando a atingir níveis próximos ao da resistência à flexão. Nas lajes com furos, a armadura de cisalhamento

elevou a carga de ruptura em até 80%. A Tabela 2.6 apresenta as características das lajes ensaiadas. A Figura 2.16 mostra as superfícies de ruptura de duas lajes com furos e armadura de cisalhamento, ensaiadas por Borges (2004).

Tabela 2.6 – Principais características – lajes de Borges (2004)

lajes	<i>d</i> (mm)	<i>pilar</i> $\frac{c_{max}}{c_{min}}$	<i>A_s</i> , flexão ρ (%)	<i>concreto</i>		<i>Furos</i> Quant.	<i>Armadura de cisalhamento</i>					<i>Ruptura</i>		
				<i>f_c</i> (MPa)	<i>f_{ct}</i> (MPa)		ϕ	nº de linhas	nº de camadas	distrib.	<i>S₀</i>	<i>S_r</i>	<i>P_u</i> (kN)	Modo
L42	139	2,00	1,53	43,2	4,0	-	-	-	-	-	-	-	703	P
L42A	164	2,00	1,15	36,2	3,6	-	-	-	-	-	-	-	743	P
L45	154	3,00	1,37	42,0	4,3	-	-	-	-	-	-	-	843	P
L46	164	4,00	1,15	39,3	4,4	-	-	-	-	-	-	-	947	P
L41	139	1,67	1,39	44,7	4,3	-	-	-	-	-	-	-	600	P
L41A	164	1,67	1,24	38,9	3,4	-	-	-	-	-	-	-	650	P
L43A	164	3,00	1,24	38,7	3,3	-	-	-	-	-	-	-	776	P
L44	164	4,00	1,18	40,0	3,7	-	-	-	-	-	-	-	814	P
L45FS_CG	154	3,00	1,14	40,5	3,6	1	-	-	-	-	-	-	792	P
L45FD_CG	154	3,00	1,38	39,0	4,2	1	-	-	-	-	-	-	750	P
L45FD	154	3,00	1,38	41,4	4,0	1	-	-	-	-	-	-	776	P
L45FFS_CG	154	3,00	1,00	41,6	4,2	2	-	-	-	-	-	-	750	P
L45FFD_CG	164	3,00	1,24	40,6	4,2	2	-	-	-	-	-	-	850	P
L45FFD	144	3,00	1,55	37,0	4,3	2	-	-	-	-	-	-	685	P
L45FFD_AC2	154	3,00	1,38	44,5	4,1	2	10,0	22	4	Radial	77	116	1230	E
L45FFD_AC3	154	3,00	1,38	39,6	3,5	2	8,0	22	3	Radial	77	116	1050	E
L45FFD_AC4	154	3,00	1,38	43,2	3,1	2	8,0	12	3	Cruz	77	116	885	E
L45FFD_AC5	154	3,00	1,38	40,7	3,2	2	8,0	10	2	Radial	77	116	837	E
L45_AC1	154	3,00	1,38	39,0	3,2	-	10,0	12	4	Radial	75	75	1250	E
L45_AC5	154	3,00	1,38	41,1	3,4	-	8,0	12	2	Radial	77	116	1092	E

P - ruptura por punção; E - ruptura por punção com superfície de externa à região de AC

altura das lajes - *h* = 200mm

tensão de escoamento da armadura de cisalhamento - ϕ - 10,0 - $f_y = 593$ MPa e ϕ -8,0 - $f_y = 598$ MPa

dimensões dos furos - 200 x 300mm, adjacentes aos pilares



Figura 2.16 – Superfície de ruptura – L45FFD_AC2 e L45FFD_AC5 – (BORGES, 2004)

2.1.8 – MUSSE (2004)

Musse (2004) ensaiou até a ruptura oito lajes-cogumelo de concreto armado, quadradas com 1800 mm de comprimento e 130 mm de espessura. As principais variáveis foram existência e quantidade de armadura de cisalhamento e utilização de concreto com fibras de aço. Os modelos de ensaio foram divididos em dois grupos; Grupo 1 com concreto convencional e Grupo 2 com adição de fibras de aço ao concreto.

A presença, quantidade e espaçamento da armadura de cisalhamento (*studs*) foram variados entre as lajes do mesmo grupo. Para todas as lajes a distribuição dos *studs* foi de forma radial. As lajes L1 e LF1 foram de referência, sem armadura de cisalhamento. Nas lajes L2 e LF2 havia três camadas de studs espaçadas a 42 mm. Nas lajes L3 e LF3 o número de camadas aumentou para cinco, e nas lajes L4 e LF4 para sete, e a distribuição destas foi feita de modo que o comprimento total ocupado pelos *studs* fosse igual ao das lajes L3 e LF3.

A armadura de cisalhamento foi posicionada de maneira que envolvesse a armadura de flexão. A distância da face do pilar ao primeiro elemento da armadura de cisalhamento de linha perpendicular à face do mesmo (S_0) foi 42mm para todas as lajes. A distância entre os conectores foi igual a 42 mm para as lajes L2, LF2, L4 e LF4, enquanto que nas lajes L3 e LF3 essa distância foi igual a 63 mm. A distribuição e os detalhes da armadura de cisalhamento utilizada por Musse (2004) são apresentados nas Figuras 2.17 e 2.18.

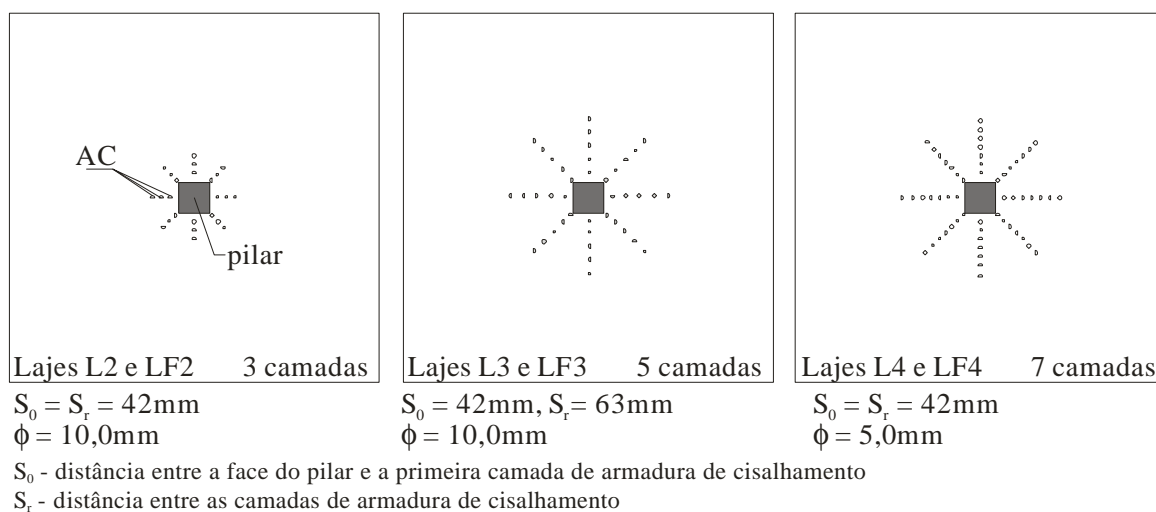


Figura 2.17 – Distribuição da armadura de cisalhamento das lajes de Musse (2004)

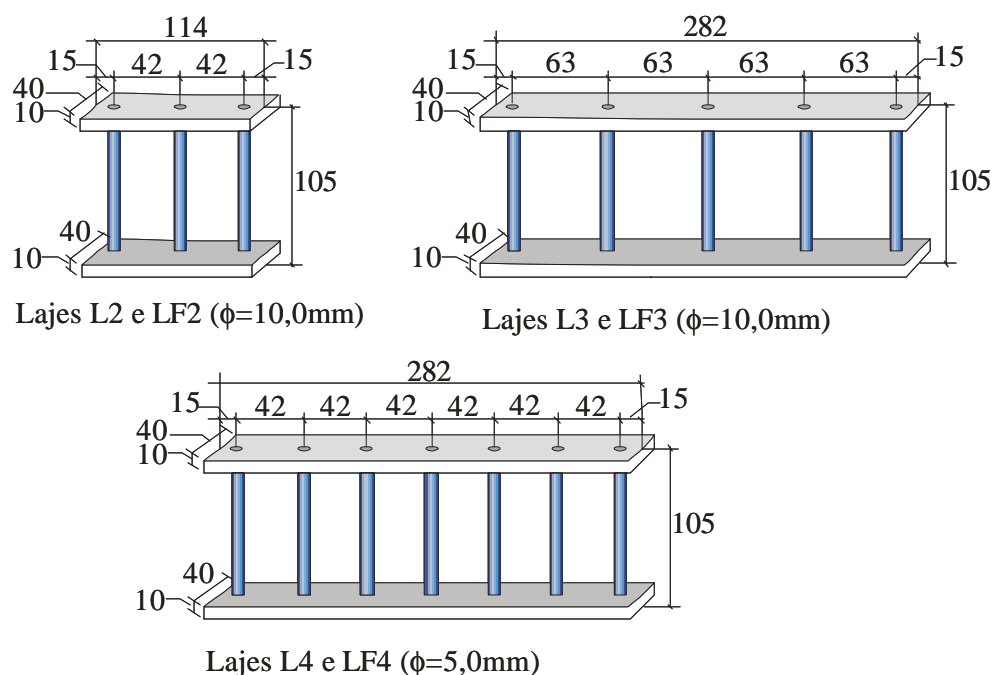


Figura 2.18 – Armadura de cisalhamento (MUSSE, 2004)

As lajes foram dimensionadas de forma que rompessem por punção, porém com superfícies de ruptura cruzando a região com armadura de cisalhamento (L4 e LF4) e externa à região armada ao cisalhamento (L2, LF2, L3 e LF3). Por isso, apesar do comprimento da linha dos conectores ter sido o mesmo (282 mm) para as lajes L3, LF3, L4 e LF4, o número de camadas, o espaçamento entre elas e o diâmetro foram diferentes.

Musse (2004) verificou que a carga última foi aumentada tanto com o uso de armadura de cisalhamento quanto com a utilização de fibras. Com a combinação dos dois foi possível aumentar a carga de ruptura em até 75% em relação à laje L1 (sem fibras e sem armadura de cisalhamento). Os deslocamentos centrais últimos das lajes com fibras e armadura transversal foram maiores que os daquelas similares sem fibras (em torno de 74%).

Quanto ao aparecimento de fissuras, a autora verificou que as fissuras radiais surgiram praticamente com a mesma carga para todas as lajes, independente da presença de fibras ou armadura de cisalhamento. Nas lajes com fibras e armadura de cisalhamento notou-se um maior número de fissuras radiais e com aberturas menores do que nas similares, sem fibras. A Figura 2.19 mostra uma vista superior da laje L3 e da LF3 com cargas próximas da ruptura.



Figura 2.19 - Lajes L3 e LF3 próximas da ruptura – vista superior (MUSSE, 2004)

A Tabela 2.7 contém os dados referentes à geometria das lajes e também os resultados dos ensaios. Os modos e superfícies de ruptura das lajes de Musse (2004) apresentaram-se de duas formas:

- punção – ruptura por punção, para as lajes sem armadura de cisalhamento;
- externa – punção, com superfície de ruptura externa à região de armadura de cisalhamento;
- interna – punção, com superfície de ruptura cruzando as camadas de armadura de cisalhamento.

Tabela 2.7 – Características das lajes de Musse (2004)

lajes	d (mm)	concreto		fibras	Armadura de Cisalhamento					Ruptura	
		f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	%	ϕ	f_y (MPa)	nº de linhas	nº de camadas	S_r	P_u (kN)	Modo
L1	91	41,7	3,7	-	-	-	-	-	-	309	punção
L2	89	42,0	3,8	-	10,0	839	8	3	42	460	externa
L3	88	42,2	3,8	-	10,0	839	8	5	63	472	externa
L4	93	42,2	3,8	-	5,0	624	8	7	42	467	externa
LF1	90	35,8	3,9	0,9	-	-	-	-	-	390	punção
LF2	86	36,0	3,9	0,9	10,0	839	8	3	42	517	externa
LF3	91	36,2	4,0	0,9	10,0	839	8	5	63	541	externa
LF4	88	36,2	4,0	0,9	5,0	624	8	7	42	501	interna

altura das lajes - $h = 130\text{mm}$

taxa da armadura de flexão - $\rho = 1,38\%$

$S_0 = 42\text{ mm}$; distribuição radial

S_r - distância entre as camadas de armadura de cisalhamento

2.1.9 – TRAUTWEIN (2006)

Este trabalho consistiu em uma pesquisa experimental de lajes-cogumelo de concreto armado com armadura de cisalhamento sem envolver a armadura de flexão. Onze lajes-cogumelo quadradas de concreto com 200 mm de espessura e 3000 mm de lado, com uma área central carregada de 200 mm de lado, foram testadas até a ruptura. Todas as lajes romperam por punção, com cargas de rupturas superiores em até 110%, em relação às cargas de ruptura de lajes similares sem armadura de cisalhamento, demonstrando a eficiência da armadura.

O estudo compreendeu dois grupos de lajes de concreto armado com as mesmas dimensões e armadura de flexão, e cisalhamento do tipo “*stud*” interno. O Grupo 1 teve a armadura dimensionada para que a superfície de ruptura ocorresse externamente à região armada transversalmente, e o Grupo 2 para que a superfície de ruptura cruzasse a região com armadura transversal. As lajes do Grupo 1 foram denominadas pela letra “E” para caracterizar que foram dimensionadas para ruptura externa e as lajes do Grupo 2 foram denominadas pela letra “I”, já que foram dimensionadas para ruptura interna à armadura de cisalhamento.

No total foram ensaiadas onze lajes, cinco no Grupo 1 e seis no Grupo 2. Nas lajes do Grupo 1 as principais variáveis foram forma de distribuição da armadura de cisalhamento e os pinos ou ganchos em forma de “U” utilizados na parte inferior da armadura de cisalhamento. Com relação às lajes do Grupo 2 as principais variáveis foram diâmetro da armadura de cisalhamento e número de camadas utilizadas.

As lajes eram quadradas com 3000 mm de lado e 200 mm de altura. Os materiais constituintes do concreto das lajes foram dosados de forma a obter uma resistência à compressão do concreto (f_{cm}) em torno de 40 MPa, aos 14 dias. A altura útil das lajes foi definida em 164 mm, podendo ocorrer algumas variações devido ao processo executivo da concretagem.

A armadura de cisalhamento utilizada em todas as lajes foi do tipo “*stud*”, onde barras de aço CA-50 (comprimento de 95 mm) foram soldadas, em suas extremidades, às chapas de aço de 30 mm de largura e 10 mm de espessura. A altura total dos “*studs*” foi 115 mm. Os “*studs*” foram colocados de forma interna à armadura flexão, sem envolver as barras da armadura superior e inferior.

Nas lajes E1, E3, E4 e E5 a armadura de cisalhamento foi composta de doze linhas de “studs”, distribuídos em planta de forma radial, com onze elementos espaçados de 60 mm. Quatro linhas de “studs” foram posicionadas perpendicularmente às faces do pilar e as outras oito situadas a 30° dos eixos verticais e horizontais. Nas linhas posicionadas perpendicularmente às faces do pilar, a distância da face do pilar ao primeiro elemento (S_0) foi de 35 mm e ao último elemento foi de 635 mm. As demais linhas foram posicionadas de forma que todos os elementos tivessem a mesma distância do eixo do pilar.

Na laje E2 a armadura de cisalhamento foi distribuída de forma diferente das demais lajes do Grupo 1. As três primeiras linhas de “studs” estavam posicionadas paralelas às faces do pilar. A partir da quarta camada as linhas de “studs”, agora com oito elementos, passaram a ser posicionadas de forma radial. A Figura 2.20 mostra um desenho esquemático do posicionamento da armadura de cisalhamento utilizado e as Figuras 2.21 a 2.23 a distribuição da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes do Grupo 1.

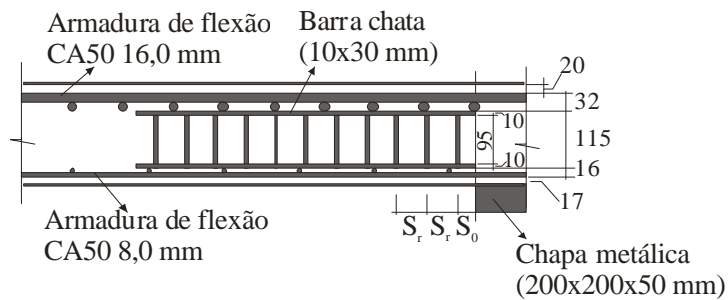


Figura 2.20 – Desenho esquemático do posicionamento da armadura de cisalhamento utilizado por Trautwein (2006)

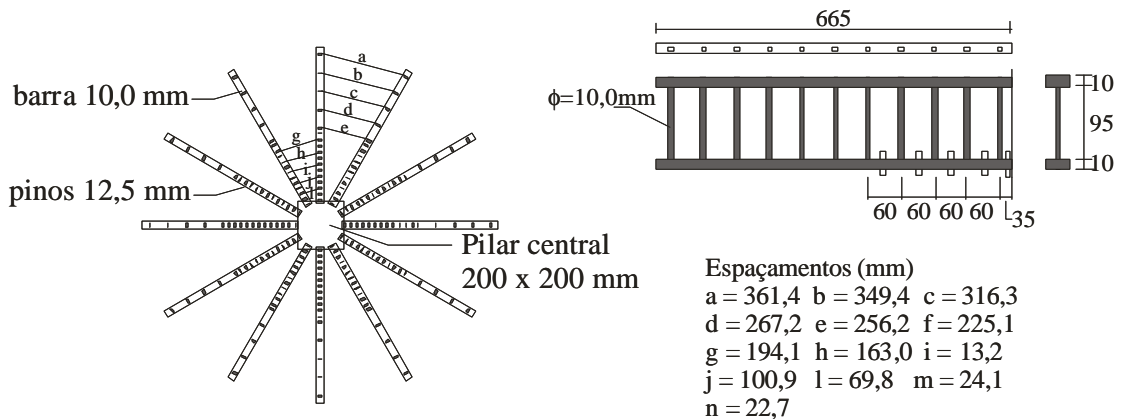


Figura 2.21 – Distribuição da armadura de cisalhamento da laje E1, de Trautwein (2006)

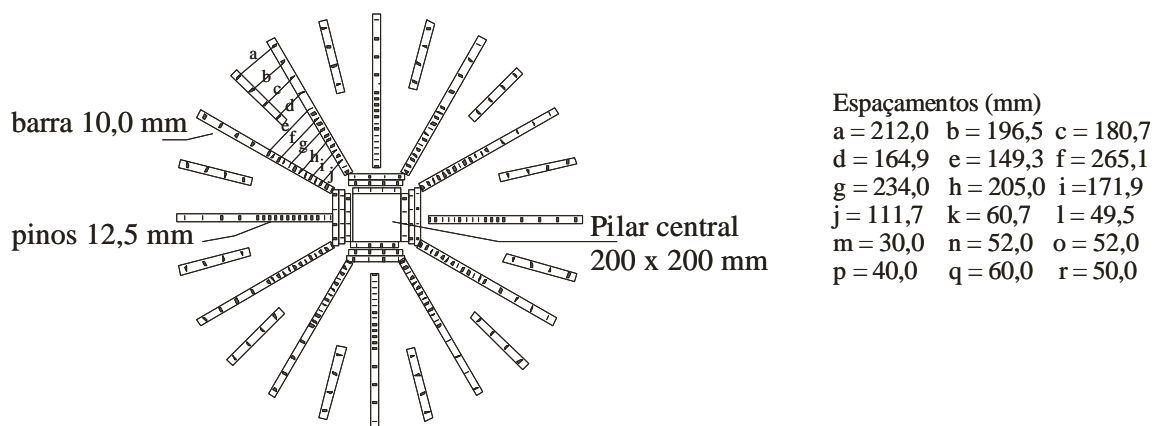


Figura 2.22 – Distribuição da armadura de cisalhamento da laje E2, de Trautwein (2006)

LAJE E3 - 3 camadas de gancho U
 LAJE E4 - 4 camadas de gancho U
 LAJE E5 - 7 camadas de gancho U

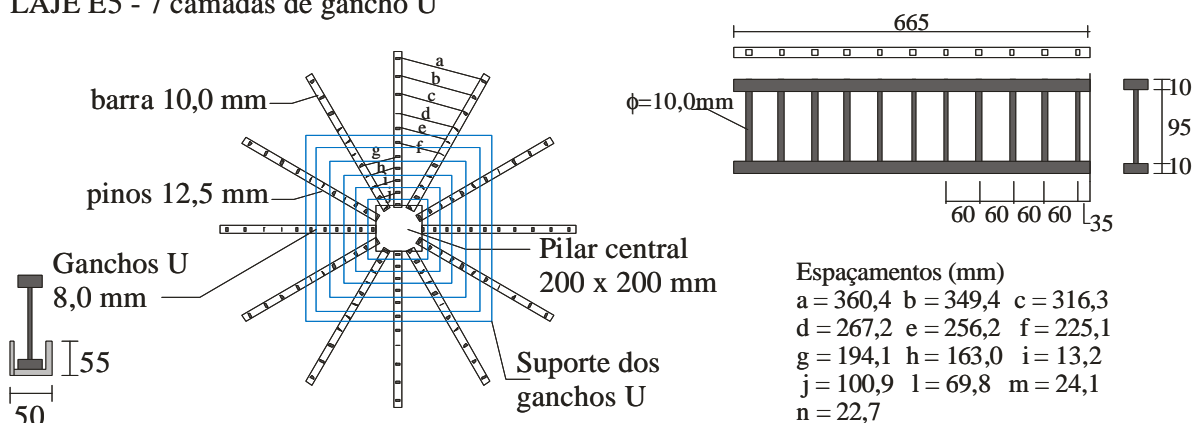


Figura 2.23 – Distribuição da armadura de cisalhamento - E3, E4 e E5, de Trautwein (2006)

O Grupo 2 foi composto por seis lajes, sendo as principais variáveis o número de camadas, o diâmetro e o espaçamento entre as barras da armadura de cisalhamento. Essas lajes apresentaram uma densidade de armadura de cisalhamento reduzida em relação ao Grupo 1, induzindo a ruptura cruzando a região armada por punção.

As lajes I6, I7 e I8 continham 11 camadas de armadura de cisalhamento, sendo as barras espaçadas (S_r) de 60 mm, e 8 das camadas tinham ganchos em forma de U ($\phi=8$ mm). O diâmetro das barras da armadura de cisalhamento foi de 6,3 mm ($A_{sv}/\text{cam} = 249,25 \text{ mm}^2$) na laje I6, 10 mm ($A_{sv}/\text{cam} = 628 \text{ mm}^2$) na laje I7 e 8,0 mm ($A_{sv}/\text{cam} = 401,92 \text{ mm}^2$) na laje I8.

Nas lajes I9, I10 e I11 o número de camadas da armadura de cisalhamento e de camadas de ganchos U foi reduzido para 5. O espaçamento entre as barras (S_r) e a distância entre a face do pilar e a primeira camada (S_0) foi de 80 mm. O diâmetro das barras utilizadas na armadura de cisalhamento variou foi 5 mm ($A_{sv}/cam = 157 \text{ mm}^2$) na laje I9, 8 mm ($A_{sv}/cam = 401,92 \text{ mm}^2$) na laje I10 e 6,3 mm ($A_{sv}/cam = 249,25 \text{ mm}^2$) na laje I11.

A Figura 2.24 apresenta em planta o esquema de distribuição da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes I6, I7 e I8, de Trautwein (2006).

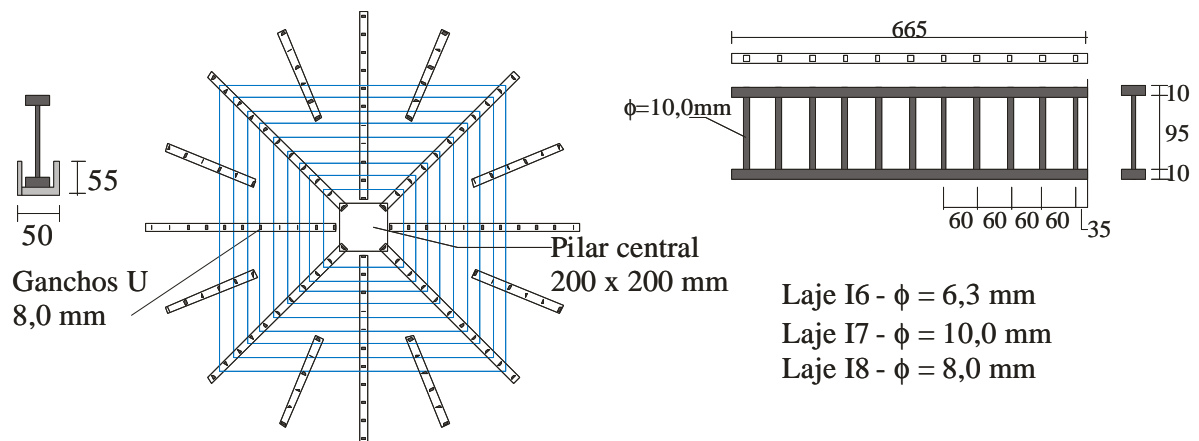


Figura 2.24 – Esquema de distribuição da armadura de cisalhamento das lajes I6, I7 e I8, de Trautwein (2006)

A Figura 2.25 apresenta o esquema de distribuição da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes I9, I10 e I11, e a Tabela 2.8 as características geométricas e os resultados dos ensaios de todas as lajes testadas por Trautwein (2006).

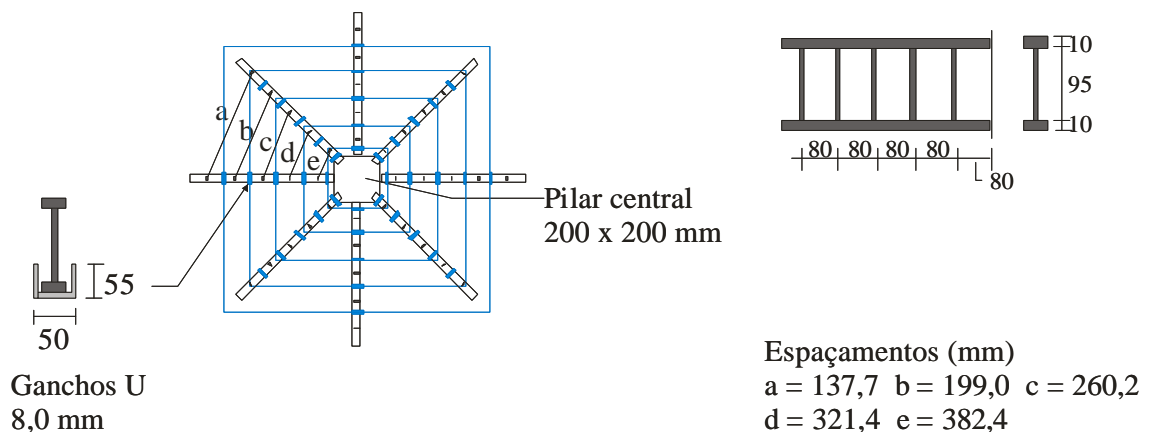


Figura 2.25 – Esquema de distribuição da armadura de cisalhamento das lajes I9, I10 e I11, testadas por Trautwein (2006)

Tabela 2.8 – Características geométricas e resultados dos ensaios de Trautwein (2006)

lajes	d (mm)	concreto		Armadura de Cisalhamento						Ruptura		
		f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	ϕ	nº de linhas	âng.entre linhas	nº de camadas	distrib.	S_0	S_r	P_u (kN)	Modo
E2	159	35,2	3,3	10,0	12	30°	11	Radial	35	60	1100	externa
E2	159	36,6	3,6	10,0	12 / 12	*	3 / 8 / 5	Par. / Rad	35	60	990	externa
E3	159	41,1	3,7	10,0	12	30°	11	Radial	35	60	1090	externa
E4	154	40,6	4,5	10,0	12	30°	11	Radial	35	60	1205	externa
E5	154	42,1	3,2	10,0	12	30°	11	Radial	35	60	1222	externa
I6	159	39,1	3,7	6,3	8 / 8	45° / 22,5°	11	Radial	35	60	830	interna
I7	159	39,6	3,4	10,0	8 / 8	45° / 22,5°	11	Radial	35	60	978	interna
I8	159	35,4	2,6	8,0	8 / 8	45° / 22,5°	11	Radial	35	60	856	interna
I9	161	43,6	4,0	5,0	8	45°	5	Radial	80	80	853	interna
I10	161	44,4	3,2	8,0	8	45°	5	Radial	80	80	975	interna
I11	161	41,4	3,7	6,3	8	45°	5	Radial	80	80	945	interna

altura das lajes - $h = 200\text{mm}$

taxa de armadura de flexão - $\rho = 1,20\%$

* as três primeiras linhas foram paralelas à face do pilar (1ª camada - $S_r=75\text{mm}$, 2ª - $S_r=105\text{mm}$, 3ª - $S_r=135\text{mm}$) e, a partir da 4ª linha, distribuição radial com $S_r=60\text{mm}$

Todas as lajes romperam por punção e Trautwein (2006) verificou que as lajes do Grupo 1 alcançaram cargas de 77% a 118% superiores à carga de ruptura da laje L1 de GOMES (1991) sem armadura de cisalhamento. Nas lajes do Grupo 2, o acréscimo da carga de ruptura variou de 48 a 72% em relação à laje de referência.

Esse acréscimo de resistência das lajes testadas por Trautwein (2006) comprovou a potencialidade desse tipo de armadura de cisalhamento, interna à armadura de flexão. O autor concluiu também que para valores maiores da relação entre a quantidade de armadura de cisalhamento por camada e o espaçamento radial entre as camadas, a resistência à punção de uma laje aumenta.

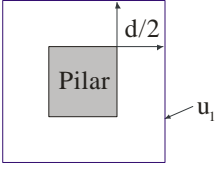
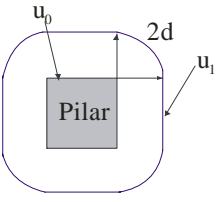
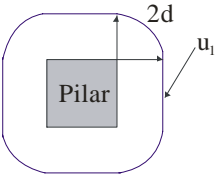
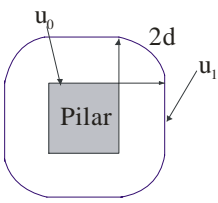
2.2- NORMAS DE PROJETO

As normas apresentam modelos de cálculo para avaliação da carga de ruptura de uma laje-cogumelo considerando a tensão nominal de cisalhamento em uma determinada superfície de controle, igual a um perímetro de controle multiplicado pela altura efetiva da laje. Essa tensão é comparada à tensão de cisalhamento nominal resistente, calculada em função da resistência do concreto à compressão (f_c), ou deste parâmetro e de outros.

As recomendações do ACI-318 (2005), CEB-FIP MODEL CODE (1991), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2003) são apresentadas nas Tabelas 2.9 e 2.10, para o caso de região de laje no entorno de pilares internos, com carregamento simétrico. Essas tabelas mostram os perímetros de controle considerados por essas normas e as equações utilizadas para o cálculo da resistência à punção de lajes-cogumelo com e sem armadura de cisalhamento.

O ACI / 2005 adota um perímetro de controle a $0,5d$ da face do pilar, para o cálculo da resistência à punção com superfície de ruptura cruzando a armadura de cisalhamento. Para superfície de ruptura externa à região armada, o perímetro de controle é considerado a uma distância de $0,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento. A NBR 6118/2003 e o CEB MC90 consideram os perímetros de controle a $2,0d$ da face do pilar ou da última camada de armadura de cisalhamento. O Eurocode 2 (2004) adota perímetro de controle a $2,0d$ da face do pilar e a $1,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento.

Tabela 2.9 – Perímetros de controle e expressões de normas para cálculos da resistência à punção para o caso de pilares internos.

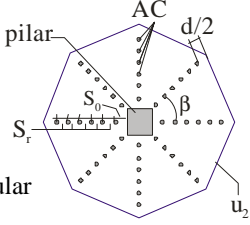
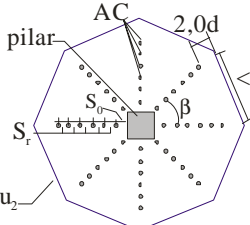
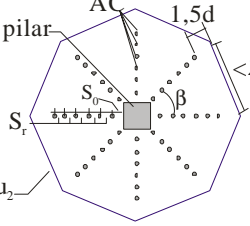
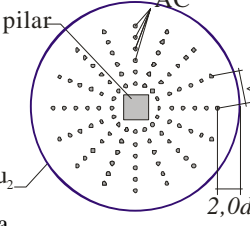
Normas	Perímetros de controle	Equações utilizadas no cálculo da carga de ruptura
<p>ACI - 318 (2005)</p> <p>$u_1 = 2p (a/2 + d/2)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + d)$ - seção quadrada $\gamma = 1/0,75 = 1,33$ a - dimensão da seção do pilar</p>		$V_{Rd,c} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma} (0,5 \sqrt{f_c'} u_1 d) \\ \frac{1}{\gamma} \left[0,0833 \left(\frac{40d}{u_1} + 2 \right) \sqrt{f_c'} u_1 d \right] \\ \frac{1}{\gamma} [0,333 \sqrt{f_c'} u_1 d] \end{cases}$
<p>CEB-FIP MC 90 (1991)</p> <p>$u_0 = 4a$; $u_0 = \pi a$ (circular) $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $u_1 = \pi (a + 4d)$ - seção circular $\gamma_c = 1,50$ a - dimensão da seção do pilar</p>		$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} u_1 d$ $V_{Rd,c} \geq 0,3 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{g_c}$
<p>EUROCODE 2 (2004)</p> <p>$u_1 = \pi (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $\gamma_c = 1,50$ a - dimensão da seção do pilar</p>		$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} u_1 d$ $V_{Rd,c} \geq 0,3 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{g_c}$ $V_{Rd,c} \leq 0,0035 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) f_{ck}^{1/2} u_1 d$ $\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \leq 2 \quad r \leq 0,02$
<p>NBR 6118 (2003)</p> <p>$u_0 = 4a$; $u_0 = \pi a$ (circular) $u_1 = \pi (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $\gamma_c = 1,40$ a - dimensão da seção do pilar</p>		$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} u_1 d$ $V_{Rd,c} \geq 0,27 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{g_c}$

d é a altura útil da laje (mm)

$r = \sqrt{r_x r_y}$, sendo ρ_x e ρ_y as taxas de armadura nas direções ortogonais calculada considerando uma largura igual à dimensão do pilar mais a distância $3d$ para cada lado;

f_c' , f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto.

Tabela 2.10 – Perímetros de controle e expressões de normas para cálculos da resistência à punção para o caso de pilares internos e armadura punção.

Normas	Perímetros de controle	Equações utilizadas no cálculo da carga de ruptura
<p>ACI 318 (2005)</p> <p>$f_{yw} = 420 \text{ MPa}$ $\gamma = 1/0,75 = 1,33$ $u_1 = 2p (a/2 + d/2)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + d)$ - seção quadrada $u_2 =$ perímetro a 0,5d da última camada de AC</p>		<p>Zona com Armadura de punção</p> $V_{Rd} = \frac{1}{\gamma} \left[0,17 \sqrt{f'_c} u_1 d + \frac{A_{sw} f_{yw} d}{S_r} \right] \leq \frac{1}{\gamma} (0,5 \sqrt{f'_c} u_1 d)$ <p>Zona externa à região de AC</p> $V_{Rd} = \frac{1}{\gamma} \left[0,17 (\sqrt{f'_c} u_2 d) \right]$
<p>CEB - FIP MC90 (1991)</p> <p>$u_0 = 4a$; $u_0 = pa$ (circular) $u_1 = p (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $u_2 =$ perímetro a 2,0d da última camada de AC $\gamma_c = 1,5$, $\gamma_s = 1,15$ $f_{ywk}/1,15 = 300 \text{ MPa}$</p>		<p>Zona Adjacente à face do pilar</p> $V_{Rd} = 0,3 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{g_c} u_0 d$ <p>Zona com armadura de punção</p> $V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 d \frac{A_{sw}}{S_r} \frac{f_{ywk}}{g_s} \text{sen } \alpha$ <p>onde :</p> $1,5 d \frac{A_{sw}}{S} f_{ywd} \text{sen } \alpha \geq 0,03 (100 r f_{ck})^{1/3} u_1 d$ <p>Zona Externa à região de AC</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$
<p>EUROCODE 2 (2004)</p> <p>$u_0 = 4a$; $u_0 = pa$ (circular) $u_1 = p (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $u_2 =$ perímetro a 1,5d da última camada de AC $\gamma_c = 1,5$, $\gamma_s = 1,15$, $f_{ywd,ef} = (250 + 0,25d) = f_{ywd}$</p>		<p>Zona Adjacente à face do pilar</p> $V_{Rd} = 0,3 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{g_c} u_0 d$ <p>Zona com armadura de punção</p> $V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 d \frac{A_{sw}}{S_r} \frac{f_{yw,ef}}{g_s} \text{sen } \alpha$ <p>Zona Externa à região de AC</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$
<p>NBR 6118 (2003)</p> <p>$u_0 = 4a$; $u_0 = pa$ (circular) $u_1 = p (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $u_2 =$ perímetro a 2,0d da última camada de AC $\gamma_c = 1,4$, $\gamma_s = 1,15$ $f_{ywk}/1,15 = 300 \text{ MPa}$</p>		<p>Zona Adjacente à face do pilar</p> $V_{Rd} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \frac{f_{cks}}{g_c} u_0 d$ <p>Zona com armadura de punção</p> $V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 \frac{d}{S_r} A_{sw} \frac{f_{ywk}}{1,15} \text{sen } \alpha$ <p>Zona externa à região de AC</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$

d é a altura útil das lajes

S_r é o espaçamento radial entre as camadas de armadura de cisalhamento

A_{sw} é a área da seção da armadura de cisalhamento em uma camada

α = ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje; β = ângulo entre linhas de AC

AC = armadura de cisalhamento, f_{ywd} = tensão de escoamento da AC

Tabela 2.10 – Perímetros de controle e expressões de normas para cálculos da resistência à punção para o caso de pilares internos e armadura punção – continuação.

Normas	Perímetros de controle	Equações utilizadas no cálculo da carga de ruptura
<p>ACI 318 (2005)</p> <p>$f_{yw} = 420 \text{ MPa}$ $\gamma = 1/0,75 = 1,33$ $u_1 = 2p (a/2 + d/2)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + d)$ - seção quadrada $u_2 = \text{perímetro a } 0,5d \text{ da última camada de AC}$</p>		<p>Zona com Armadura de punção</p> $V_{Rd} = \frac{1}{\gamma} \left[0,17\sqrt{f'_c} u_1 d + \frac{A_{sw} f_{yw} d}{S_r} \right] \leq \frac{1}{\gamma} (0,5\sqrt{f'_c} u_1 d)$ <p>Zona externa à região de AC</p> $V_{Rd} = \frac{1}{\gamma} [0,17(\sqrt{f'_c} u_2 d)]$
<p>CEB - FIP MC90 (1991)</p> <p>$u_0 = 4a; u_0 = pa$ (circular) $u_1 = p (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $u_2 = \text{perímetro a } 2,0d \text{ da última camada de AC}$ $\gamma_c = 1,5, \gamma_s = 1,15 \quad f_{ywk}/1,15 = 300 \text{ MPa}$</p>		<p>Zona Adjacente à face do pilar</p> $V_{Rd} = 0,3 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{g_c} u_0 d$ <p>Zona com armadura de punção</p> $V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 d \frac{A_{sw} f_{ywk}}{S_r g_s} \text{sen } \alpha$ <p>onde :</p> $1,5 d \frac{A_{sw}}{S} f_{ywd} \text{sen } \alpha \geq 0,03 (100 r f_{ck})^{1/3} u_1 d$ <p>Zona Externa à região de AC</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$
<p>EUROCODE 2 (2004)</p> <p>$u_0 = 4a; u_0 = pa$ (circular) $u_1 = p (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $u_2 = \text{perímetro a } 1,5d \text{ da última camada de AC}$ $\gamma_c = 1,5, \gamma_s = 1,15, f_{ywd,ef} = (250 + 0,25d) = f_{ywd}$</p>		<p>Zona Adjacente à face do pilar</p> $V_{Rd} = 0,3 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{g_c} u_0 d$ <p>Zona com armadura de punção</p> $V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 d \frac{A_{sw} f_{yw,ef}}{S_r g_s} \text{sen } \alpha$ <p>Zona Externa à região de AC</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$
<p>NBR 6118 (2003)</p> <p>$u_0 = 4a; u_0 = pa$ (circular) $u_1 = p (a + 4d)$ - seção circular $u_1 = 4 (a + pd)$ - seção quadrada $u_2 = \text{perímetro a } 2,0d \text{ da última camada de AC}$ $\gamma_c = 1,4, \gamma_s = 1,15 \quad f_{ywk}/1,15 = 300 \text{ MPa}$</p>		<p>Zona Adjacente à face do pilar</p> $V_{Rd} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \frac{f_{cks}}{g_c} u_0 d$ <p>Zona com armadura de punção</p> $V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 \frac{d}{S_r} A_{sw} \frac{f_{ywk}}{1,15} \text{sen } \alpha$ <p>Zona externa à região de AC</p> $V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$

d é a altura útil das lajes

S_r é o espaçamento radial entre as camadas de armadura de cisalhamento

A_{sw} é a área da seção da armadura de cisalhamento em uma camada

α = ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje;

AC = armadura de cisalhamento, f_{ywd} = tensão de escoamento da AC

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste trabalho estuda-se a punção centrada em lajes-cogumelo de concreto armado, comum em pilares centrais de edifícios que apresentam carregamento simétrico.

A finalidade dos testes foi investigar os efeitos da variação do número de linhas e camadas de armadura de cisalhamento na resistência ao puncionamento das lajes para se determinar a armadura mínima. As principais variáveis envolvidas foram:

- número de camadas de armadura de cisalhamento;
- área de armadura de cisalhamento em cada camada circunferencial e
- diâmetro dos *studs*.

Os modelos ensaiados representam a região de momento negativo proporcionado por um pilar interno ou a região de momento positivo relativa a um carregamento concentrado, em uma laje-cogumelo com diversos vãos sucessivos de mesmo comprimento nas duas direções. As lajes e o esquema de ensaio adotado procuram simular uma região delimitada pelos pontos de inflexão com um comprimento de aproximadamente dois quintos ($2 \times 825 \text{ mm}$) do vão entre pilares ($\sim 4,00 \text{ m}$), mostrada na Figura 3.1.

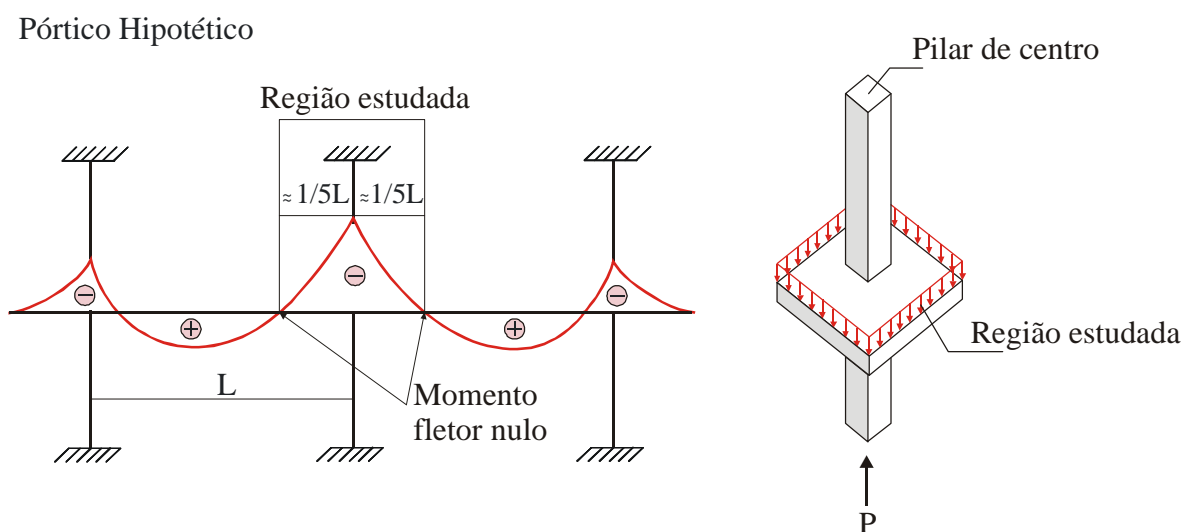


Figura 3.1 – Pórtico hipotético caracterizando a região estudada na pesquisa

3.2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MODELOS ENSAIADOS

As características mais importantes das lajes desta pesquisa são: pilar circular com diâmetro igual a 150mm, altura efetiva de 90mm, largura de 1800mm e armadura de cisalhamento (AC) com distribuição radial ou em cruz. Os modelos da pesquisa foram divididos em dois grupos: Grupo 1 (L1, L2, L3 e L4) e Grupo 2 (L1-A, L5, L6, L7, L8 e L9). Os grupos apresentam como principal parâmetro de diferenciação o número de linhas, o diâmetro da armadura de cisalhamento e a forma de ruptura prevista.

O Grupo 1, excetuando-se L1, é formado por lajes com oito linhas de armadura de punção e número de camadas variando de dois a quatro; o Grupo 2, com exceção da L1-A, por lajes com três camadas de armadura de cisalhamento e número de linhas variando de quatro a seis. As lajes L1 e L1-A são de referência, sem armadura transversal. As características das lajes são apresentadas na Tabela 3.1 e na Figura 3.2.

Tabela 3.1 – Características da armadura de cisalhamento das lajes ensaiadas

Lajes		Armadura de cisalhamento do tipo <i>stud</i>					
		nº de linhas	nº de camadas	ϕ (mm)	S_r (mm)	$A_s f_y$ por camada	ângulo entre linhas
Grupo 1	L1	-	-	-	-	-	-
	L2	8	2	5,0	42	98	45°
	L3	8	3	5,0	42	98	45°
	L4	8	4	5,0	42	98	45°
Grupo 2	L1-A	-	-	-	-	-	-
	L5	4	3	4,2	42	39	90°
	L6	4	3	4,2	67	39	90°
	L7	5	3	4,2	42	49	72°
	L8	5	3	4,2	67	49	72°
	L9	6	3	4,2	67	59	60°

Taxa de armadura de flexão $\rho = 1,38\%$

Distância entre a face do pilar e o primeiro stud - $S_0 = 42$ mm

S_r - Distância entre os studs

O número de linhas e camadas das lajes do Grupo 2 foi reduzido em relação ao das lajes do Grupo 1 para que se obtivesse superfície de ruptura interna às camadas de armadura de cisalhamento.

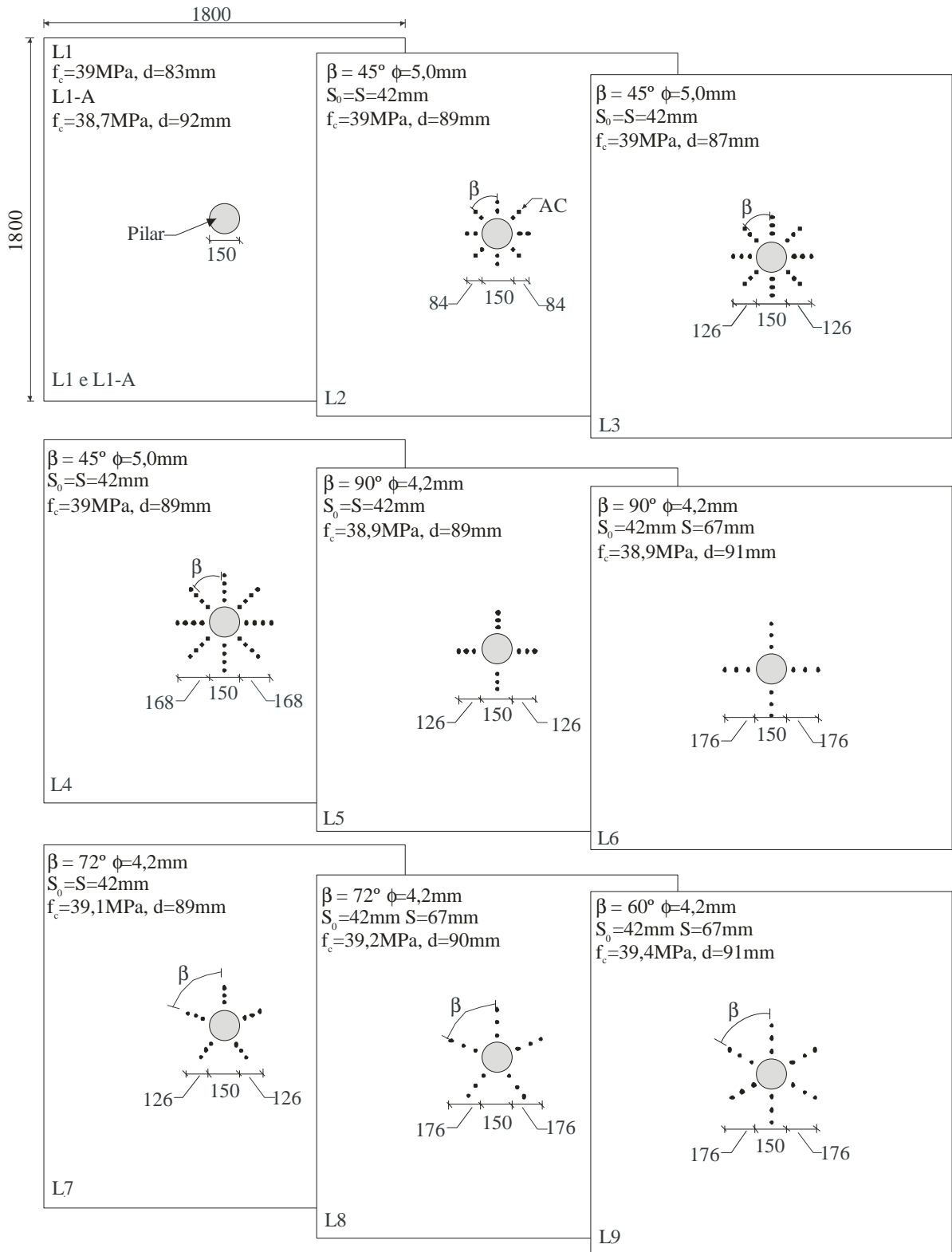
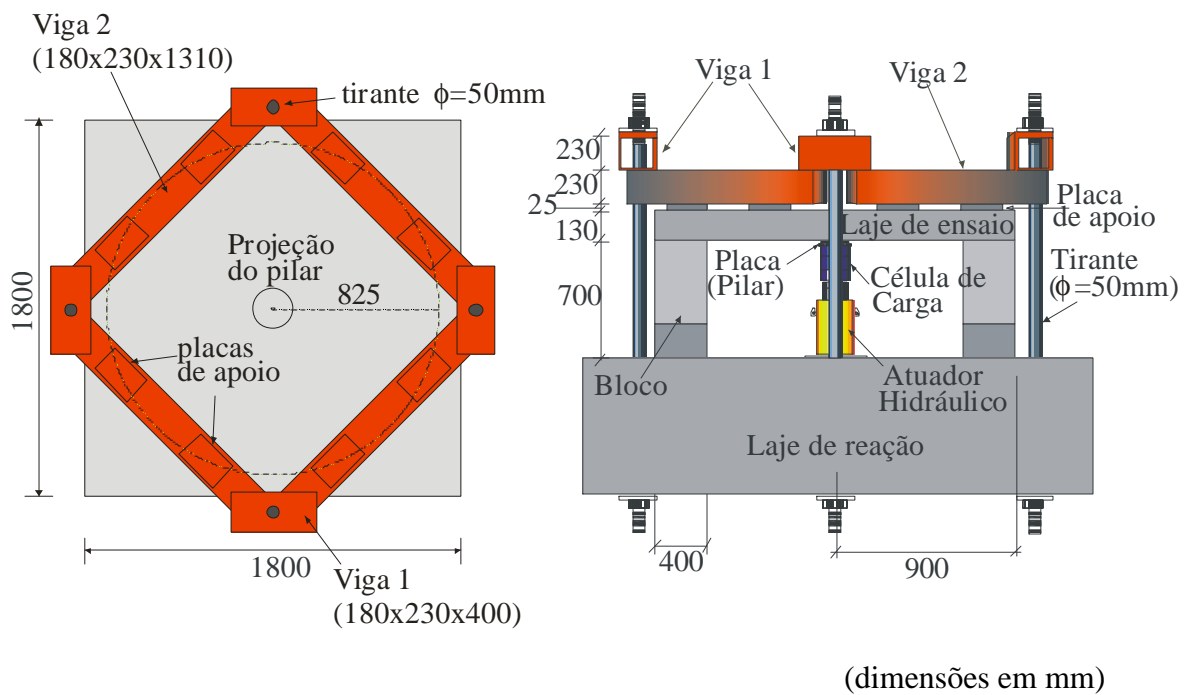


Figura 3.2 – Características das lajes ensaiadas – dimensões em mm

3.3 – ESQUEMA DE ENSAIO

A carga foi aplicada 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 e 50 mm de espessura, que simulou o pilar.

A reação ao carregamento centrado foi feita por um conjunto de vigas metálicas atirantadas na laje de reação e apoiadas sobre oito placas de aço que foram posicionadas entre as vigas metálicas e a laje em estudo, a uma distância de 825mm do centro da laje. Esse arranjo foi adotado para propiciar uma melhor distribuição dos esforços e aproximação da situação estudada. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam o esquema de ensaio e uma fotografia de laje preparada para o teste.



VISTA SUPERIOR

VISTA LATERAL

Figura 3.3 – Esquema de ensaio utilizado

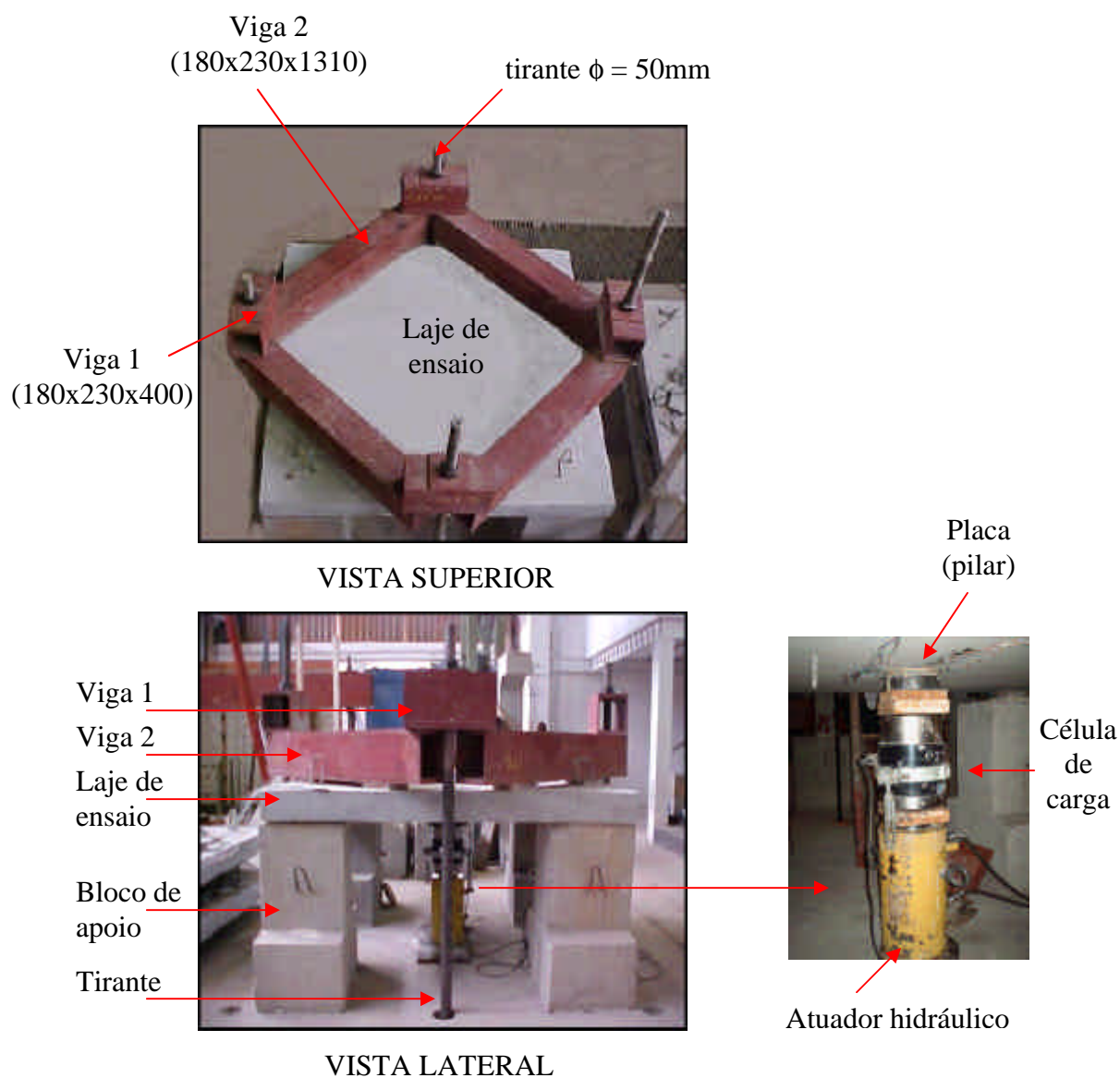


Figura 3.4 –Laje montada para a realização do ensaio – Vista superior e vista lateral

3.4 – MATERIAIS E ARMADURAS

3.4.1 - Concreto

Todas as lajes foram moldadas em formas metálicas e o concreto utilizado foi dosado para atingir resistência à compressão, aos 28 dias, de cerca de 30 MPa. A mistura foi composta de cimento Portland, areias natural e artificial, agregado graúdo, aditivo e água. O concreto foi adensado com o uso de vibradores de imersão utilizando-se mangotes com

diâmetro de 35mm. Após a concretagem, as lajes foram cobertas por lonas plásticas. Realizou-se a cura molhando os modelos duas vezes ao dia, e deixando-os cobertos pela lona, durante os sete dias posteriores à concretagem.

A concretagem das lajes foi feita em duas etapas. Na primeira etapa, foram concretadas as lajes do Grupo 1 e, na segunda, as do Grupo 2. Em cada etapa foram moldados 60 corpos-de-prova cilíndricos, dos quais 30 eram de 150mm x 300mm e 30 de 100mm x 200mm para determinação de cada propriedade mecânica do concreto (compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de deformação longitudinal).

A dosagem e a mistura do concreto foram feitas pela empresa Realmix, e a sua composição por metro cúbico encontra-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição por m³ de concreto

Materiais	Quantidade
Agregado graúdo	
- brita 0 (kg)	400
- brita 1 (kg)	620
Agregado miúdo	
- areia natural fina (kg)	123
- areia natural grossa (kg)	287
- areia artificial (kg)	270
Cimento CP 2F-32 (kg)	415
Aditivo retardador de pega (litros)	2,4
Água (litros)	190

3.4.2 – Armadura de flexão

A armadura de flexão da face tracionada da laje foi composta por uma malha ortogonal com barras de 12,5 mm de diâmetro (CA 50) espaçadas de 94 mm, com cobrimento aproximado de 23 mm. A ancoragem foi feita por grampos de 6,3 mm de diâmetro, posicionados em todas as extremidades das barras.

A armadura da face comprimida foi composta por malha constituída por barras de 6,3 mm de diâmetro (CA-50) em cada direção, espaçadas de 163 mm. Todas as lajes tiveram a mesma armadura de flexão. A Figura 3.5 apresenta o detalhamento da armadura de flexão utilizada nas lajes.

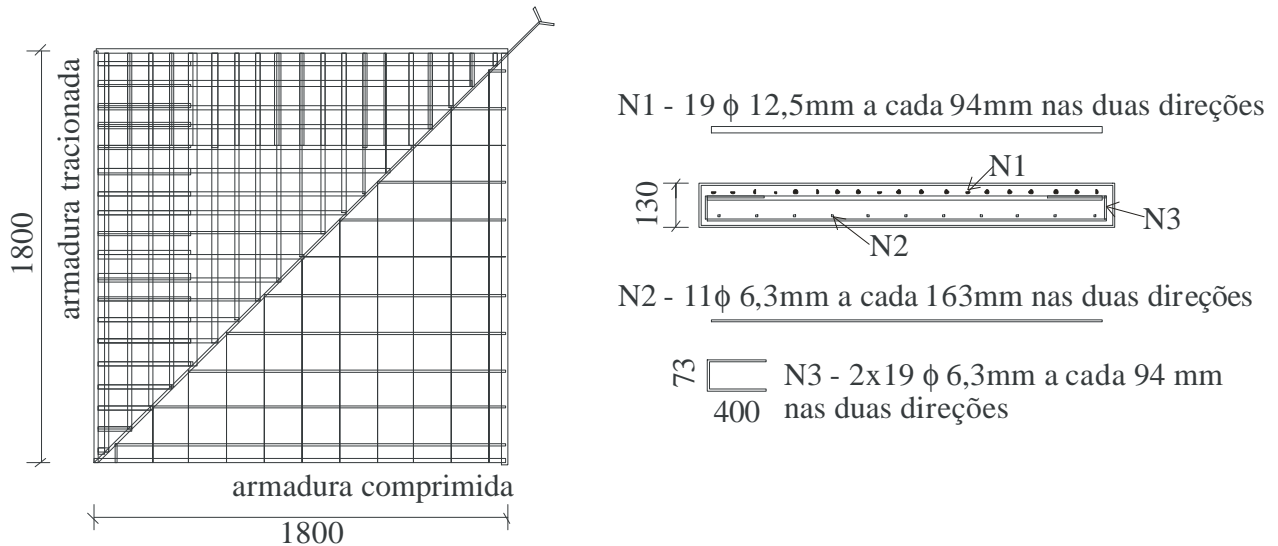


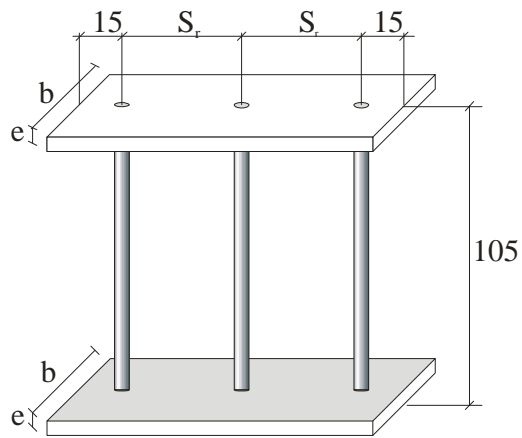
Figura 3.5 – Detalhamento da armadura de flexão

3.4.3 – Armadura de cisalhamento

A armadura de cisalhamento utilizada nas lajes foi do tipo *stud*, fabricada com barras de aço CA 60 de diâmetro 5,0 mm para o Grupo 1 e de 4,2 mm para as lajes do Grupo 2. Os pinos tinham comprimento igual a 105 mm e foram soldados nas duas extremidades em chapas de aço. Esses *studs* foram confeccionados no laboratório de engenharia por meio de um processo manual de solda com eletrodo revestido do tipo “OK 48.04” de 3.5mm da marca ESAB. A Figura 3.6 apresenta as dimensões dos elementos de armadura de cisalhamento e na Figura 3.7 pode-se ver uma fotografia da armadura de punção de dois e de três elementos.

As dimensões da chapa de aço utilizada na confecção dos *studs* foram escolhidas visando garantir a ancoragem da armadura de cisalhamento no decorrer do ensaio. Para as lajes do Grupo 1, as chapas tiveram largura igual a 31mm, espessura de 5,0 mm e o comprimento variou conforme o número de pinos. As chapas das lajes do Grupo 2 tiveram dimensões menores, sendo a largura igual a 25 mm, espessura de 4,2 mm e comprimento

também variável, conforme o número de elementos. A armadura construtiva (ver figura 3.10), utilizada para garantir o ângulo entre os *studs* no Grupo 2, teve diâmetro igual a 4,2 mm.



S_r – variável:

67 mm – lajes L6, L8 e L9;
42 mm – demais lajes.

Chapas:

Grupo 1 – $b = 31$ mm, $e = 5,0$ mm

Grupo 2 – $b = 25$ mm, $e = 4,2$ mm

(dimensões em mm)

Figura 3.6 – Dimensões dos elementos de armadura de cisalhamento

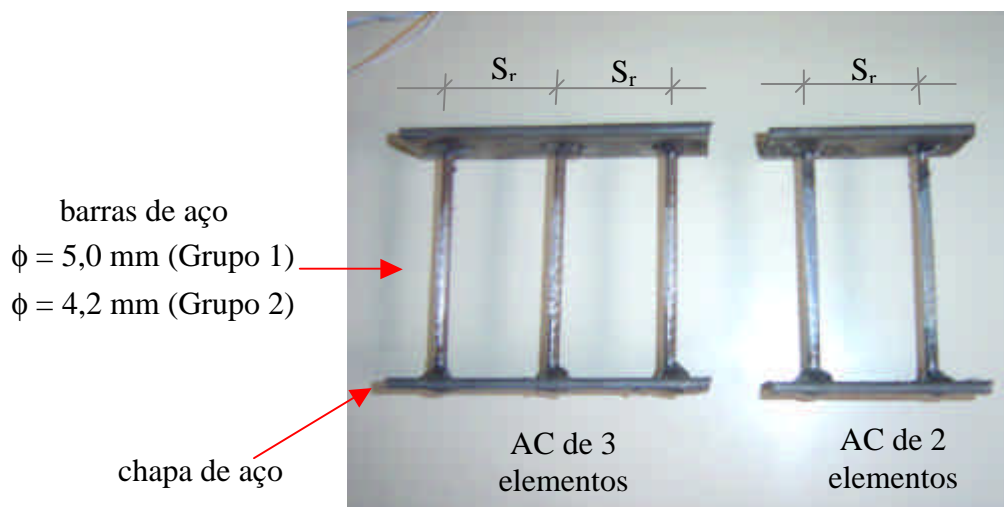


Figura 3.7 – Armadura de cisalhamento do tipo *stud*

A armadura de cisalhamento foi posicionada de maneira que envolvesse a armadura de flexão. Na Figura 3.8 apresenta-se o posicionamento dos *studs*. A distância do primeiro elemento à face do pilar (S_0) foi de 42mm ($\sim 0,5d$), e a distância entre elementos (S_r) foi igual a 67 mm ($\sim 0,75d$) para as lajes L6, L8 e L9 e 42mm ($\sim 0,5d$) para as demais lajes, espaçamentos que correspondem a cerca de 50 % e 75% da altura efetiva das lajes.

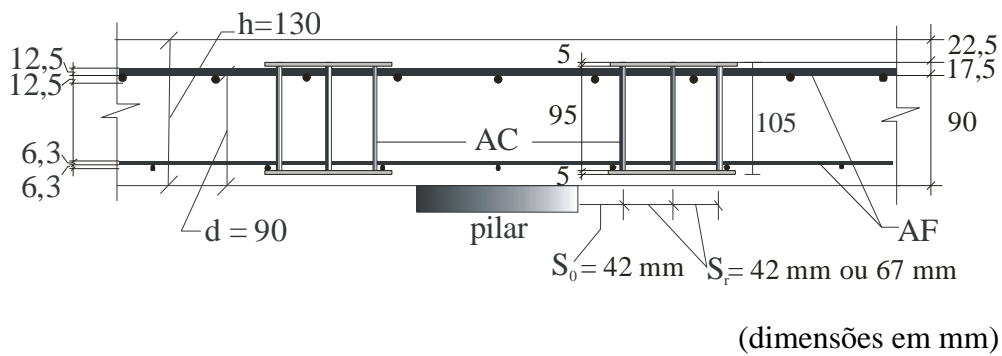
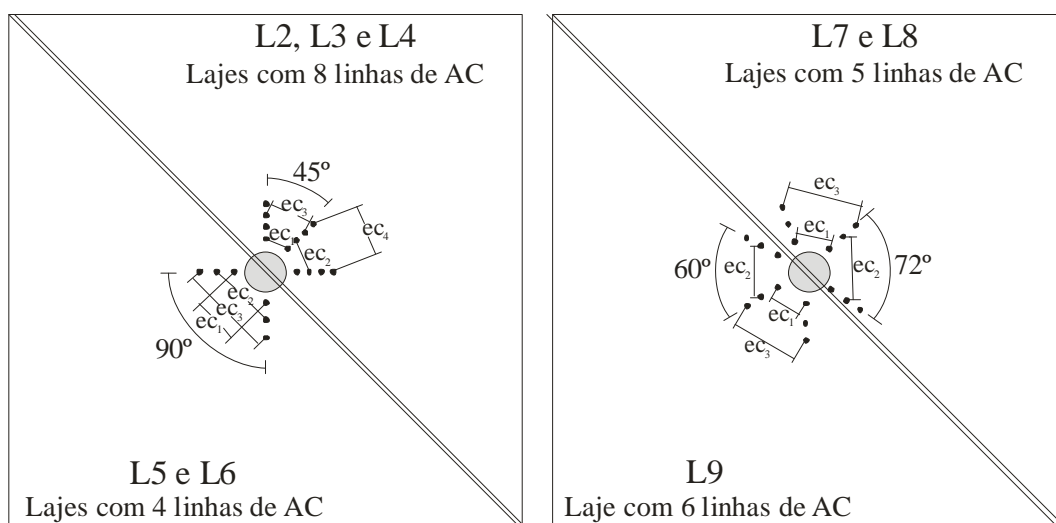


Figura 3.8 – Dimensões adotadas no posicionamento dos *studs*

A distribuição da armadura de punção nas lajes foi radial, com linhas de armadura de cisalhamento posicionadas radialmente em relação ao pilar, com o ângulo entre as linhas variando entre 45° e 90°. As lajes L2, L3 e L4 tiveram distribuição com o número de linhas igual a oito, enquanto nas lajes L7 e L8 esse número foi igual a cinco, e na laje L9 igual a seis. Duas camadas de *studs* foram utilizadas na L2, três nas lajes L3, L7, L8 e L9, e quatro na L4. O maior espaçamento entre linhas usado foi na laje L8, igual a 295mm (~3,3d).

A distribuição utilizada nas lajes L5 e L6, com três camadas de *studs*, teve ângulo de 90° entre as linhas (arranjo em cruz), e espaçamento de 42 mm na laje L5 e de 67 mm na laje L6. A laje L6 teve a maior distância entre as linhas de todas as lajes, igual a 355 mm (~3,9d). A distribuição da armadura de cisalhamento utilizada em todas as lajes é apresentada na Figura 3.9 e na Tabela 3.3.



Obs: Espaçamento circunferencial – “ec₁”, “ec₂”, “ec₃” e “ec₄”, conforme Tabela 3.3

Figura 3.9 – Distribuição da armadura de cisalhamento de todas as lajes

Tabela 3.3 – Detalhes da distribuição da armadura de cisalhamento

		LAJES							
		L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
f_y (MPa)		624	624	624	708	708	708	708	708
nº de linhas de AC		8	8	8	4	4	5	5	6
nº de studs por linha		2	3	4	3	3	3	3	3
diâmetro (mm)		5,0	5,0	5,0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
área (mm ²)		19,6	19,6	19,6	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9
$A_s f_y$ por camada (kN)		98,0	98,0	98,0	39,2	39,2	49,0	49,0	58,9
espaçamento radial (S_r) - mm		42	42	42	42	67	42	67	67
espaçamento circunferencial - mm	ec ₁	90	90	90	165	165	138	138	117
	ec ₂	122	122	122	225	260	187	216	184
	ec ₃		154	154	284	355	236	295	251
	ec ₄			186					

A Figura 3.10 mostra fotografia da distribuição da armadura de cisalhamento na laje L8. Nessa figura, pode-se visualizar a armadura construtiva utilizada nas lajes.

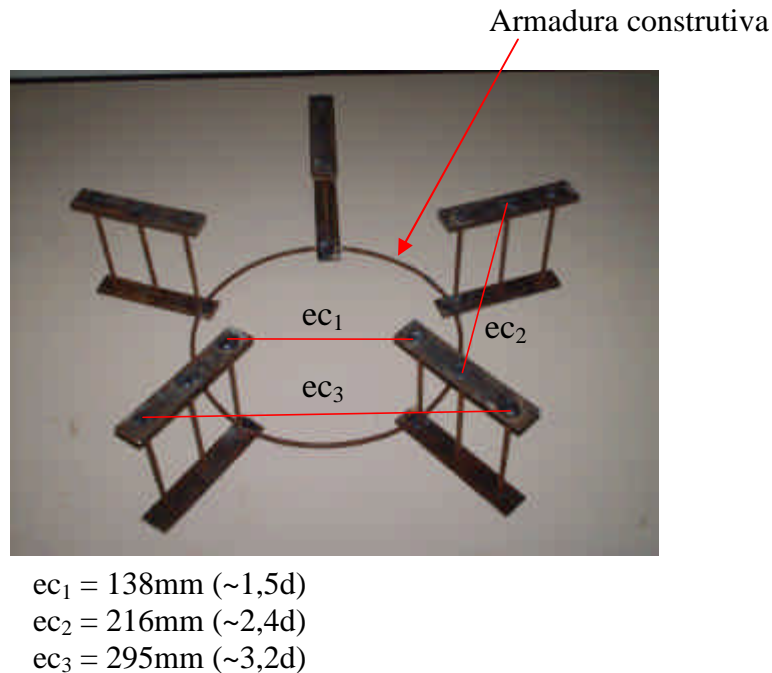


Figura 3.10 – Fotografia da distribuição da armadura de cisalhamento na laje L8.

3.5 – INSTRUMENTAÇÃO

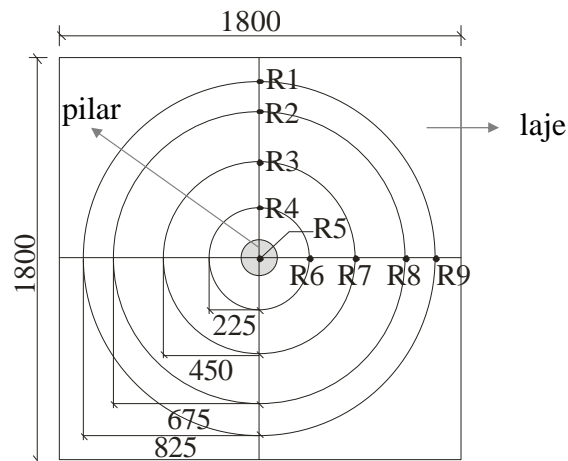
Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) para a medição das deformações feitas nas armaduras de flexão e cisalhamento e também no concreto, na região próxima à aplicação de carga. Relógios comparadores e potenciômetros foram usados para medir os deslocamentos verticais das lajes. Todas as lajes foram testadas até a ruptura e os valores das cargas, flechas e deformações foram coletados até, no mínimo, 85% da carga máxima suportada pela laje.

3.5.1 – Deslocamento vertical da laje

Para determinação do deslocamento dos pontos na face superior da laje, foram utilizados relógios comparadores digitais da marca MITUTOYO, com precisão de 0,01mm e curso de 14 mm, e transdutores de deslocamentos (potenciômetros lineares) LP100 F-C com curso de 100 mm. Os relógios comparadores e os potenciômetros foram posicionados por meio de uma estrutura metálica composta por um perfil em “U”, conforme ilustrado na Figura 3.11. O posicionamento dos medidores está indicado na Figura 3.12.



Figura 3.11 – Fixação dos relógios comparadores e potenciômetros



(dimensões em mm)

Figura 3.12 - Posição dos medidores de deslocamentos verticais ao longo da laje

Nos ensaios das lajes do Grupo 1, somente foram usados relógios comparadores para a medição dos deslocamentos verticais; nos do Grupo 2, foram utilizados três potenciômetros e seis relógios comparadores. Os potenciômetros foram localizados nos pontos R4, R5 e R7, e os relógios nos demais pontos de medição de flechas.

3.5.2 – Deformações específicas

Para medir as deformações foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER), marca EXCEL ENGENHARIA DE SENSORES LTDA, do tipo PA-06-250BA-120-L, nas armaduras de flexão e cisalhamento, e do tipo PA-06-201BA-120-L, no concreto. O comprimento da base de medição dos extensômetros utilizados nas barras de aço era 6,35 mm e do concreto era 51,10 mm.

Os EER foram ligados em dois sistemas de leitura. Um sistema foi uma caixa de aquisição de dados com 15 canais, ligada a um terminal da NATIONAL INSTRUMENTS modelo SCXI-1001 e controlada pelo software computacional LABVIEW 6.0, e o outro foi um sistema de aquisição de dados com 60 canais, ligado a um terminal da AGILENT TECHNOLOGIES modelo 34970A.

Para a preparação da superfície nos pontos de medição de deformação com EER, foram seguidas as seguintes etapas: a) remoção das mossas com polícor e rebolo de

desgaste; b) lixamento da superfície com lixas nº 80 e nº150, nesta ordem, para diminuir a rugosidade, e c) limpeza da superfície com álcool isopropílico, condicionador e neutralizador, para eliminar qualquer tipo de sujeira eventualmente existente. Após a seqüência da preparação da superfície, colou-se o EER com adesivo de éster de cianoacrilato (superbonder) da marca LOCTITE.

A ligação do EER à caixa de aquisição de dados foi feita por meio de um fio de cabo telefônico soldado ao extensômetro. O EER e a ligação foram protegidos com o uso de uma fita de alta fusão.

a) Armadura de flexão

A deformação da armadura de flexão tracionada foi monitorada por oito extensômetros, quatro na superfície superior e quatro na superfície inferior oposta de uma barra situada no centro da laje. O posicionamento e a numeração dos extensômetros na armadura de flexão são apresentados na Figura 3.13.

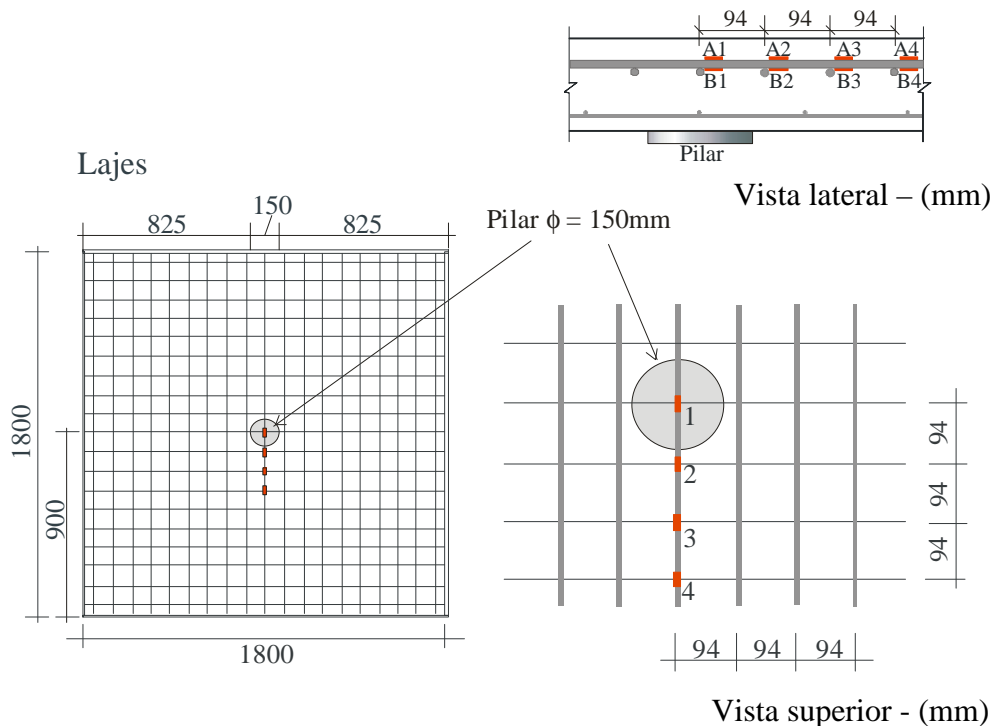


Figura 3.13 – Posicionamento e numeração dos extensômetros na armadura de flexão

b) Armadura de cisalhamento

As deformações da armadura de cisalhamento foram monitoradas nos elementos de três linhas da armadura para as lajes do Grupo 1, por meio de dois extensômetros fixados a meia altura e em faces opostas dos pinos (direita e esquerda). A Figura 3.14 apresenta a localização dos pontos monitorados nas armaduras de punção das lajes do Grupo 1.

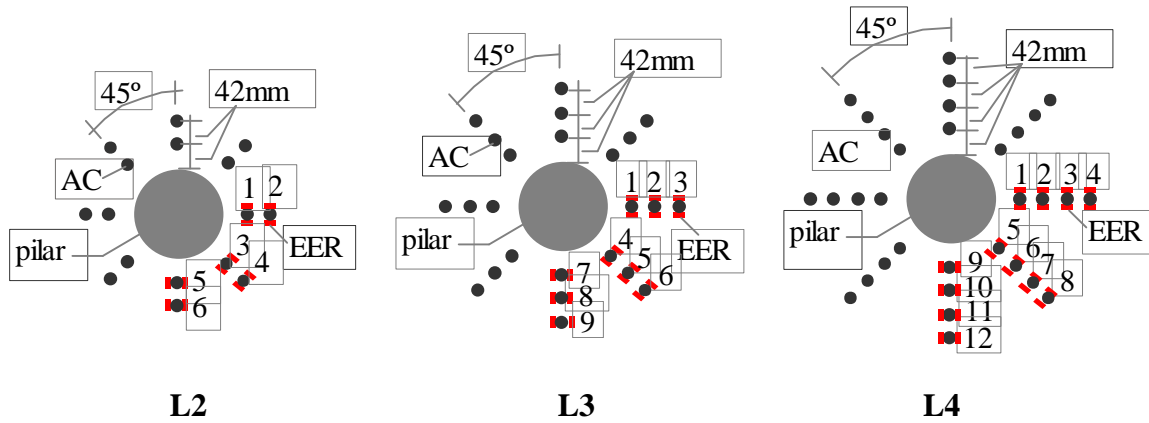


Figura 3.14 – Posição e numeração dos EER nas armaduras de punção das lajes do Grupo 1

Nas lajes do Grupo 2, foram monitorados os pinos de duas linhas de armadura por meio de apenas um extensômetro por elemento, devido ao pequeno diâmetro dos conectores. Os elementos com extensômetros a meia altura estão indicados na Figura 3.15.

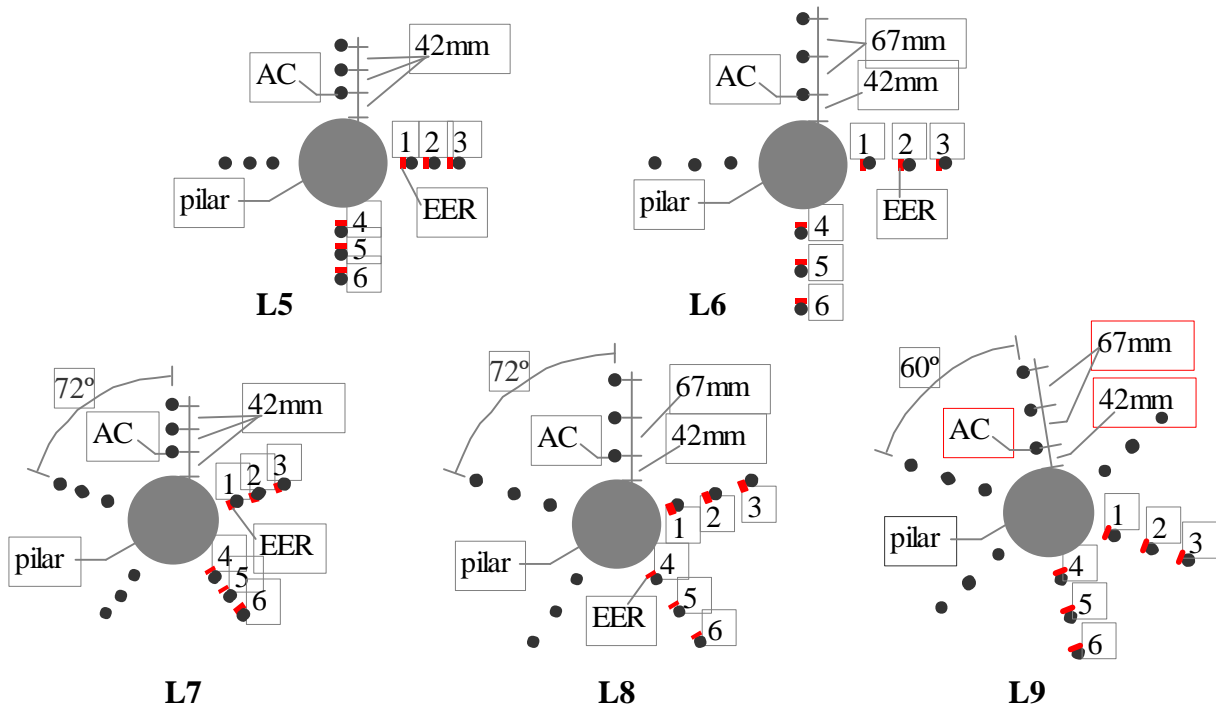


Figura 3.15 – Posição e numeração dos EER nas armaduras de punção das lajes do Grupo 2

c) Concreto

Extensômetros elétricos do tipo PA-06-201BA-120-L foram colados na face comprimida das lajes, nas direções radial e tangencial em relação ao pilar. As posições dos pontos monitorados estão mostradas na Figura 3.16.

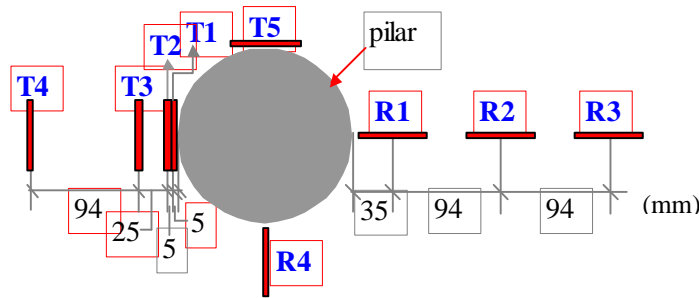


Figura 3.16 – Posições dos EER na face comprimida da laje

3.6 – PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

A preparação para a realização dos ensaios seguiu as seguintes etapas principais:

- Posicionamento da laje no local apoiando-a sobre os blocos;
- Marcação dos oito pontos de reação ao carregamento centrado e fixação das placas de apoio, niveladas entre si, com gesso;
- Marcação da projeção da área de carregamento e dos pontos de medição dos deslocamentos verticais;
- Colagem dos extensômetros na face inferior da laje;
- Montagem do sistema de reação, posicionando as vigas sobre as placas de apoio;
- Fixação, na face inferior e central da laje, da placa circular de aplicação de carga, com gesso.
- Fixação, com gesso, das placas de alumínio nos pontos marcados para medição de deslocamento vertical e posicionamento dos relógios comparadores e potenciômetros;
- Conexão da célula de carga e dos fios dos extensômetros aos sistemas de aquisição de dados;
- Ligação dos sistemas de aquisição de dados;
- Suspensão da laje, fazendo bombeamento com o atuador hidráulico, para que ela ficasse suspensa apenas pelo centro;

- k) Verificação da leitura da célula de carga, que deveria ser equivalente ao peso próprio da laje juntamente com o peso do sistema de reação;
- l) Ajuste dos tirantes para que houvesse sistema de ação e reação;
- m) Regulagem dos relógios comparadores e início do ensaio.

Como parte integrante do procedimento de ensaio, para todas as lajes foram realizados, antes de se iniciar o carregamento do ensaio, um pré-carregamento de 50kN em duas etapas de 25kN com a finalidade de acomodar o sistema e verificar o funcionamento dos instrumentos. Após este procedimento, o pré-carregamento foi retirado e iniciou-se o ensaio.

O ensaio foi feito com incrementos de carregamento próximos de 10kN, 20kN ou 25kN, até que fosse alcançada a ruptura. Em cada etapa de carga, que durou de 5 a 10 minutos, foram feitas as leituras dos deflectômetros e dos extensômetros elétricos e realizou-se a marcação das fissuras. Cada ensaio teve duração aproximada de duas horas.

4 – RESULTADOS

4.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização dos materiais (propriedades mecânicas do concreto e do aço) utilizados nos modelos e os resultados dos experimentos, tais como cargas e modos de ruptura, deslocamentos verticais, deformações das armaduras de flexão e de cisalhamento, deformações do concreto e mapa de fissuras das lajes.

4.2 – MATERIAIS

4.2.1 – Concreto

Durante a concretagem de cada grupo de lajes foram moldados 60 corpos de prova para realização dos ensaios de resistência à compressão (f_c), resistência à tração por compressão diametral (f_t) e módulo de elasticidade tangente inicial (E_c), para as idades de 3, 7, 14, 21, 28 e 60 dias.

Os resultados das propriedades mecânicas do concreto estão na Tabela 4.1 (médias de ensaios de três corpos-de-prova). Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os gráficos de resistência à compressão do concreto ao longo do tempo e de resistência à tração por compressão diametral do concreto ao longo do tempo, respectivamente.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto

Idade (dias)	L1, L2, L3 e L4						L5, L6, L7, L8 e L9					
	3	7	14	21	28	60	3	7	14	21	28	60
f_c (MPa)	14,2	-	32,0	36,6	38,0	-	10,0	20,2	31,4	36,6	38,5	40,0
f_t (MPa)	0,96	-	2,78	3,20	3,28	-	-	2,05	3,00	3,45	3,56	3,60
E_c (GPa)	16,1	-	19,0	22,3	21,6	-	-	19,5	21,5	22,5	25,3	26,5

- Ensaios não realizados

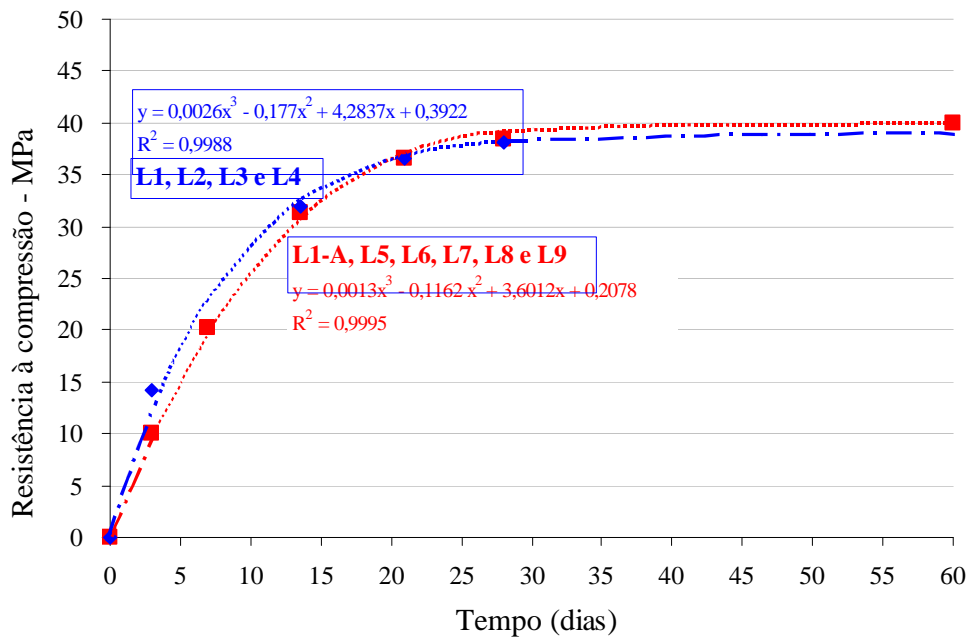


Figura 4.1 – Resistência à compressão do concreto ao longo do tempo

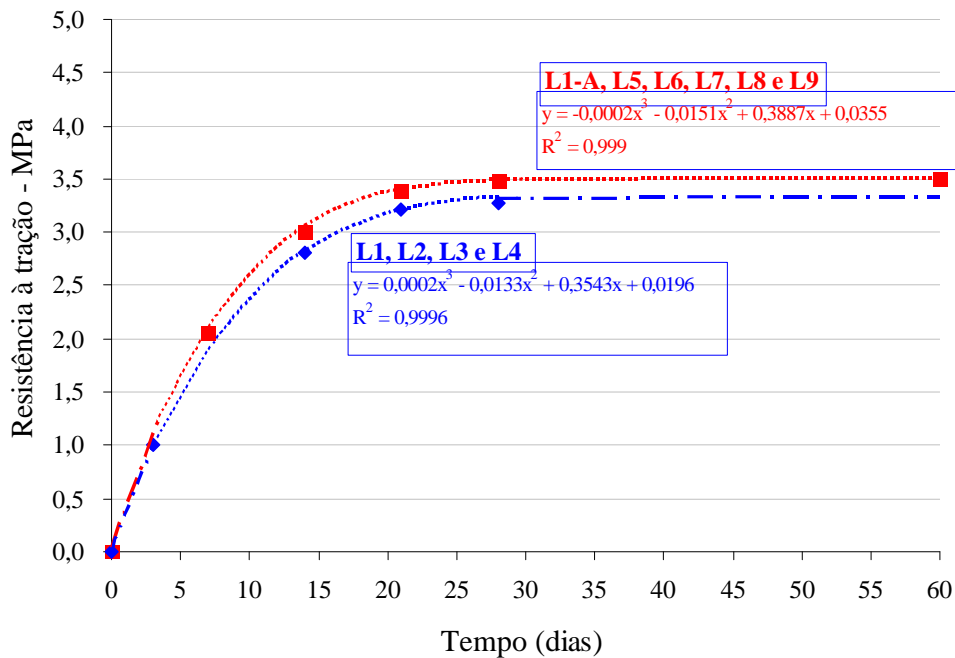


Figura 4.2 – Resistência à tração por compressão diametral do concreto ao longo do tempo

A Tabela 4.2 apresenta as idades e resistências à compressão do concreto no dia do ensaio das lajes, sendo as resistências obtidas do gráfico da Figura 4.1.

Tabela 4.2 – Idades e resistências à compressão das lajes no dia do ensaio

	L1	L2	L3	L4	L1-A	L5	L6	L7	L8	L9
Idade (dias)	182	183	184	185	30	31	31	32	33	34
f_c (MPa)	39,0	39,0	39,0	39,0	38,7	38,9	38,9	39,1	39,2	39,4

4.2.2 – Aço

Para obtenção das propriedades mecânicas do aço utilizado, foram ensaiadas quatro amostras de cada tipo de barra. As propriedades mecânicas obtidas foram: tensão de escoamento (f_y), tensão de ruptura (f_u), módulo de elasticidade (E_s), e deformação correspondente ao escoamento (ϵ_y). Na Tabela 4.3 é apresentado resumo das propriedades mecânicas das barras de aço utilizadas nas armaduras longitudinais e transversais.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do aço e local de utilização

Diâmetro (mm)	Local de utilização	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (MPa)	ϵ_y (mm/m)
4,2	Armadura de cisalhamento	708	725	189	3,86
5,0	Armadura de cisalhamento	624	757	187	3,41
6,3	Armadura de flexão inferior	594	714	182	3,26
12,5	Armadura de flexão superior	555	673	190	2,95

Pela NBR 7480, a relação f_u/f_y deve ser pelo menos igual a 1,05 e os resultados dos ensaios da barra de diâmetro de 4,2 mm, diferentemente do especificado na norma, apresentaram essa relação igual a 1,02.

A medição de deformação da barra de aço, no decorrer do ensaio, foi feita por meio de extensômetro mecânico. Com a finalidade de evitar possíveis danos ao extensômetro mecânico, ele foi retirado da barra antes do carregamento correspondente à ruptura. Com os dados obtidos no ensaio foram determinadas as tensões de escoamento e de ruptura, além da deformação de escoamento. A Figura 4.3 apresenta o gráfico de tensão - deformação das amostras de aço ensaiadas.

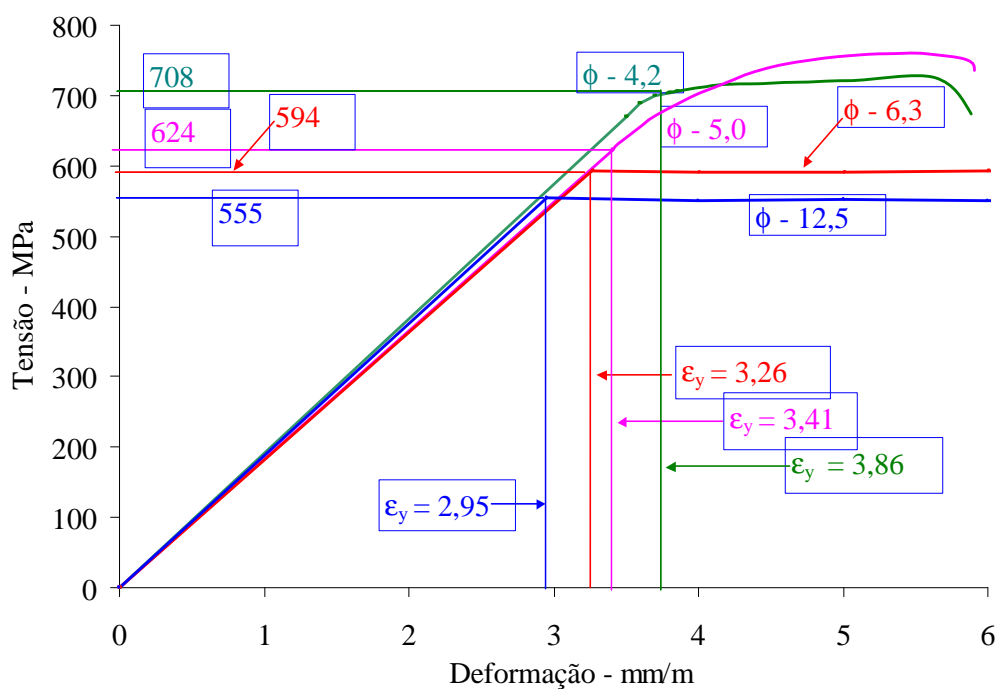


Figura 4.3 – Diagramas tensão - deformação das amostras de aço ensaiadas

Foram ensaiadas, até a ruptura, duas amostras dos *studs* de cada diâmetro utilizados nas lajes. As amostras ensaiadas apresentaram ruptura na solda e suas resistências à tração média foram menores que as obtidas nos ensaios das barras de aço. A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração da armadura de cisalhamento.

Tabela 4.4 – Resistência à tração dos *studs*

Diâmetro (mm)	Amostra nº	Resistência à tração (MPa)	Resistência à tração média (MPa)
4,2	1	631	613
	2	595	
5,0	1	574	580
	2	586	

4.3 – CARGA E MODO DE RUPTURA

As lajes foram ensaiadas incrementando-se o carregamento até que elas atingissem a ruptura. A carga de ruptura das lajes adotada foi a máxima registrada na célula de carga. A altura efetiva (d) foi obtida subtraindo da altura total da laje, igual a 130 mm, o

cobrimento, que foi determinado fazendo-se medições em pedaços de concreto extraídos de várias partes da face superior da laje, ao longo da superfície de ruptura, com uma tolerância de ± 2 mm.

As lajes L1 e L1-A tiveram ruptura por punção e romperam com cargas iguais a 203 kN e 286 kN, respectivamente. A altura útil da laje L1 foi igual a 83 mm, a menor de todas as lajes, e a L1-A teve o maior valor, 92 mm. Essa diferença acarretou menor resistência da laje L1, já que as resistências à compressão dos concretos dessas duas lajes foram praticamente iguais (39,0 MPa, L1, e 38,7 MPa, L1-A). Como a resistência da laje L1-A ficou mais próxima dos resultados das lajes similares de trabalhos anteriores (SILVA (2003) e MUSSE (2004)), e sua altura efetiva foi mais parecida com as das demais lajes ensaiadas nesta pesquisa, ela será utilizada como referência.

As lajes com armadura de cisalhamento do Grupo 1, L2, L3 e L4, tiveram a superfície de ruptura externa à região armada à punção e romperam com cargas de 321 kN, 325 kN e 357 kN, respectivamente. A altura útil das lajes L2 e L4 foi igual a 89 mm e a da laje L3 foi igual a 87 mm. A resistência à compressão do concreto para essa série de lajes foi igual a 39 MPa.

Do grupo 2, as lajes L5 e L6, com ângulo de 90° entre as linhas de armadura de cisalhamento e espaçamento entre seus conectores de 42 mm (L5) e 67 mm (L6), romperam com cargas de 200 kN e 300 kN, respectivamente, com superfície de ruptura cruzando as camadas de *studs*. A altura útil da laje L5 era 89 mm e a da L6 igual a 91mm. A resistência à compressão do concreto dessas lajes era 38,9 MPa.

As cargas de ruptura das lajes L7 e L8, com cinco linhas de armadura de cisalhamento e distanciamento radial entre os *studs* de 42 mm (L7) e 67 mm (L8), foram iguais a 303 kN e 309 kN, respectivamente, e suas superfícies de ruptura cruzaram a região armada à punção. A altura útil da laje L7 era igual a 89mm e da L8 igual a 90 mm. A resistência à compressão do concreto foi igual a 39,1 MPa para a L7 e 39,2 MPa para a laje L8.

A laje L9, com seis linhas de armadura de cisalhamento e distância radial entre os *studs* de 67 mm, apresentou carga de ruptura de 315 kN e a superfície de ruptura cruzou as camadas de armadura transversal. A altura útil da L9 foi igual a 91 mm e a resistência à compressão do concreto foi de 39,4 MPa.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as principais características das lajes e respectivos modos e cargas de ruptura por punção.

Tabela 4.5 – Características das lajes, cargas e modos de ruptura por punção.

Lajes	f_c (MPa)	d (± 2 mm)	Armadura de cisalhamento (stud, $S_0=42$ mm)							P_u (kN)	Modo de ruptura	
			ϕ (mm)	f_y (MPa)	nº de linhas	âng.entre linhas	nº de camadas	S_r (mm)	$A_s f_y$ por cam.(kN)			
Grupo 1	L1	39,0	83	-	-	-	-	-	-	203	(1)	
	L2	39,0	89	5,0	624	8	45°	2	42	98	321	(2)
	L3	39,0	87	5,0	624	8	45°	3	42	98	325	(2)
	L4	39,0	89	5,0	624	8	45°	4	42	98	357	(2)
Grupo 2	L1-A	38,7	92	-	-	-	-	-	-	286	(1)	
	L5	38,9	89	4,2	708	4	90°	3	42	39	200	(3)
	L6	38,9	91	4,2	708	4	90°	3	67	39	300	(3)
	L7	39,1	89	4,2	708	5	72°	3	42	49	303	(3)
	L8	39,2	90	4,2	708	5	72°	3	67	49	309	(3)
L9	39,4	91	4,2	708	6	60°	3	67	59	315	(3)	

(1) - Punção em laje sem armadura de cisalhamento

(2) - Punção, com superfície de ruptura externa à região de armadura de cisalhamento

(3) - Punção, com superfície de ruptura cruzando as camadas de armadura de cisalhamento

A Figura 4.4 apresenta o esquema da superfície de ruptura das lajes do Grupo 1 e as fotografias dessas lajes após a ruptura podem ser vistas na Figura 4.5.

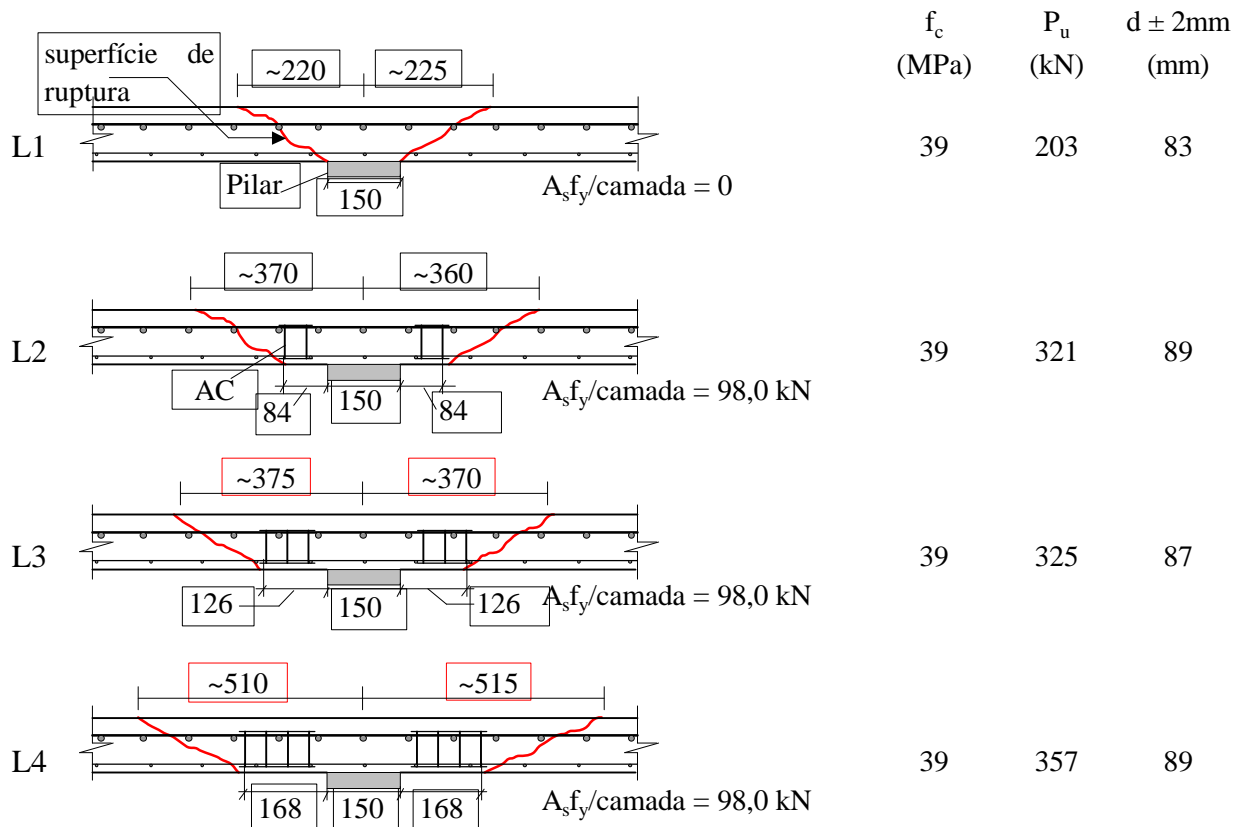


Figura 4.4 – Esquema da superfície de ruptura das lajes do Grupo 1 (dimensões em mm)

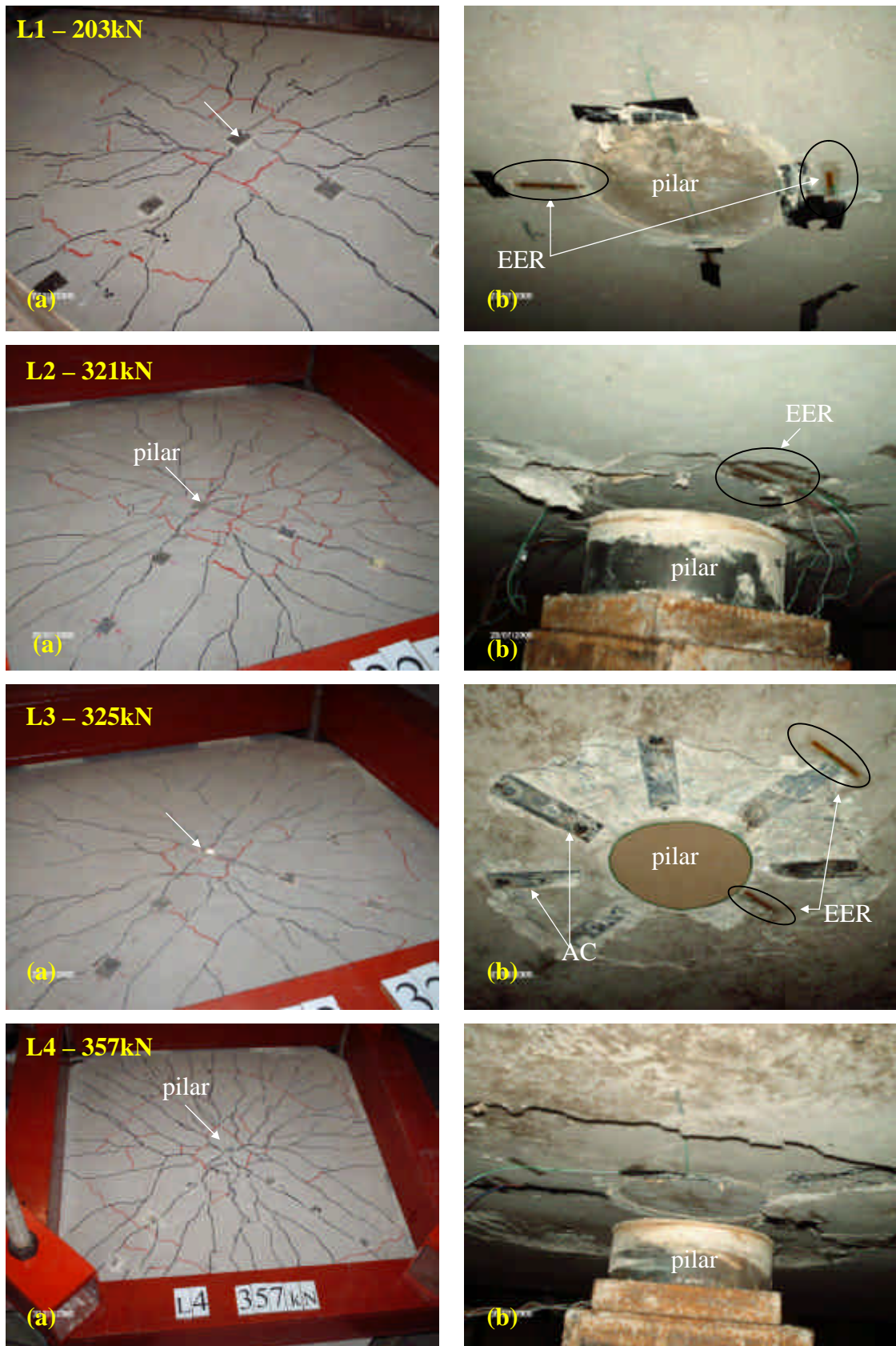


Figura 4.5 – Fotografias das lajes do Grupo 1 após a ruptura – (a) Vista superior;
(b) Vista inferior

As superfícies de ruptura das lajes do Grupo 2 estão na Figura 4.6 e as fotografias dessas lajes após a ruptura podem ser visualizadas nas Figuras 4.7 e 4.8.

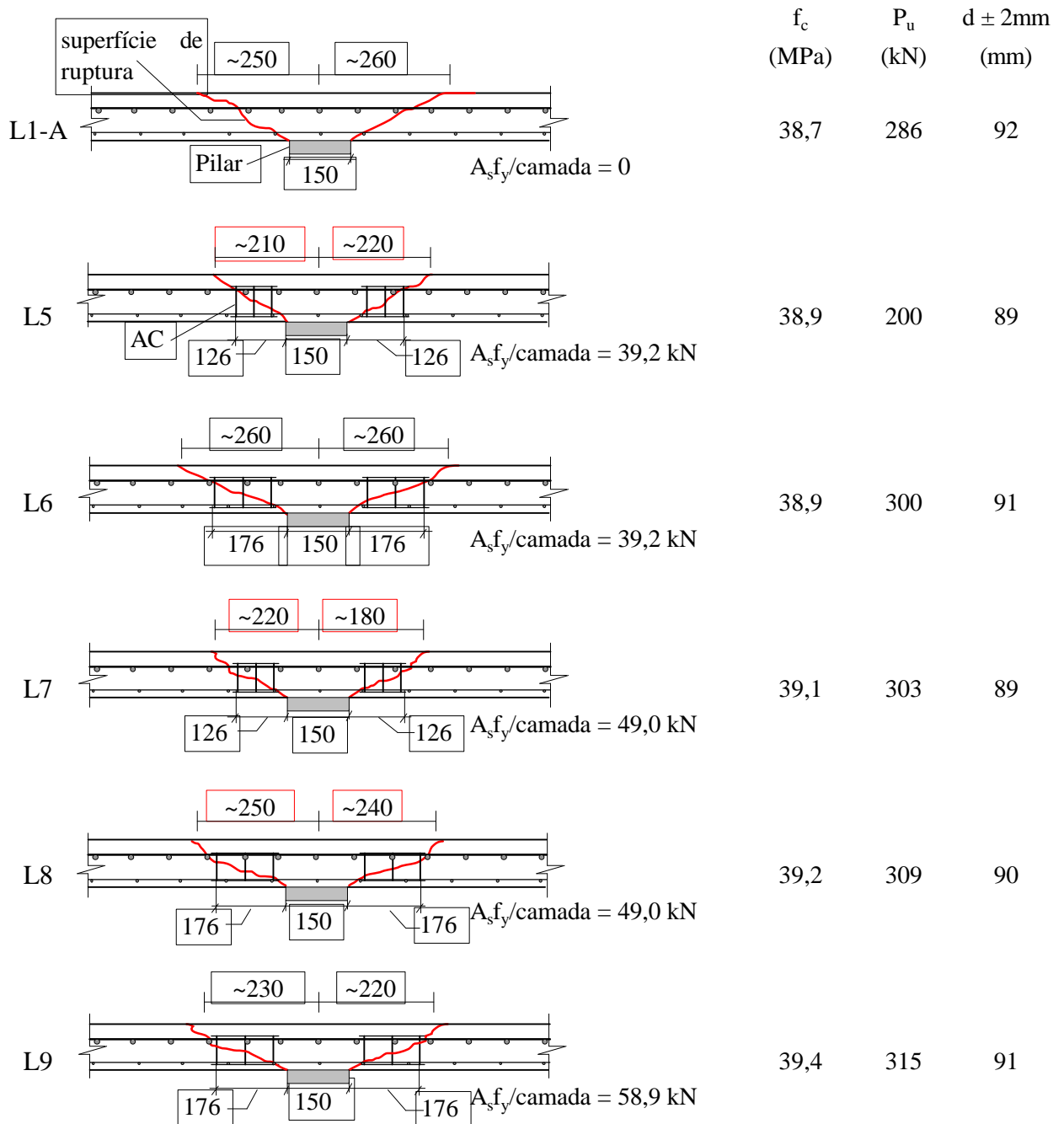


Figura 4.6 – Superfícies de ruptura das lajes do Grupo 2 (dimensões em mm)

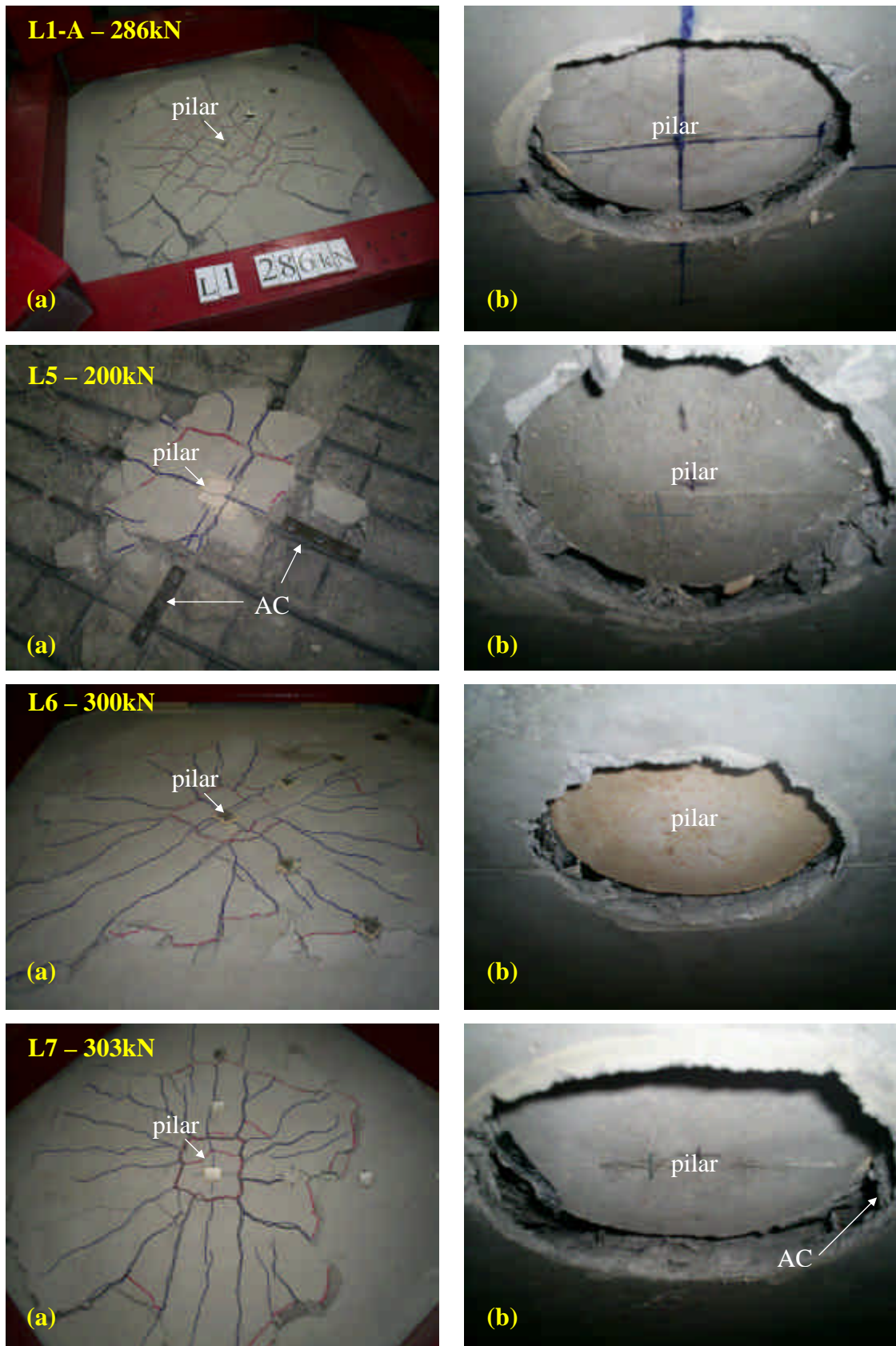


Figura 4.7 – Fotografias das lajes L1-A, L5, L6 e L7 após a ruptura – (a) Vista superior;
(b) Vista inferior

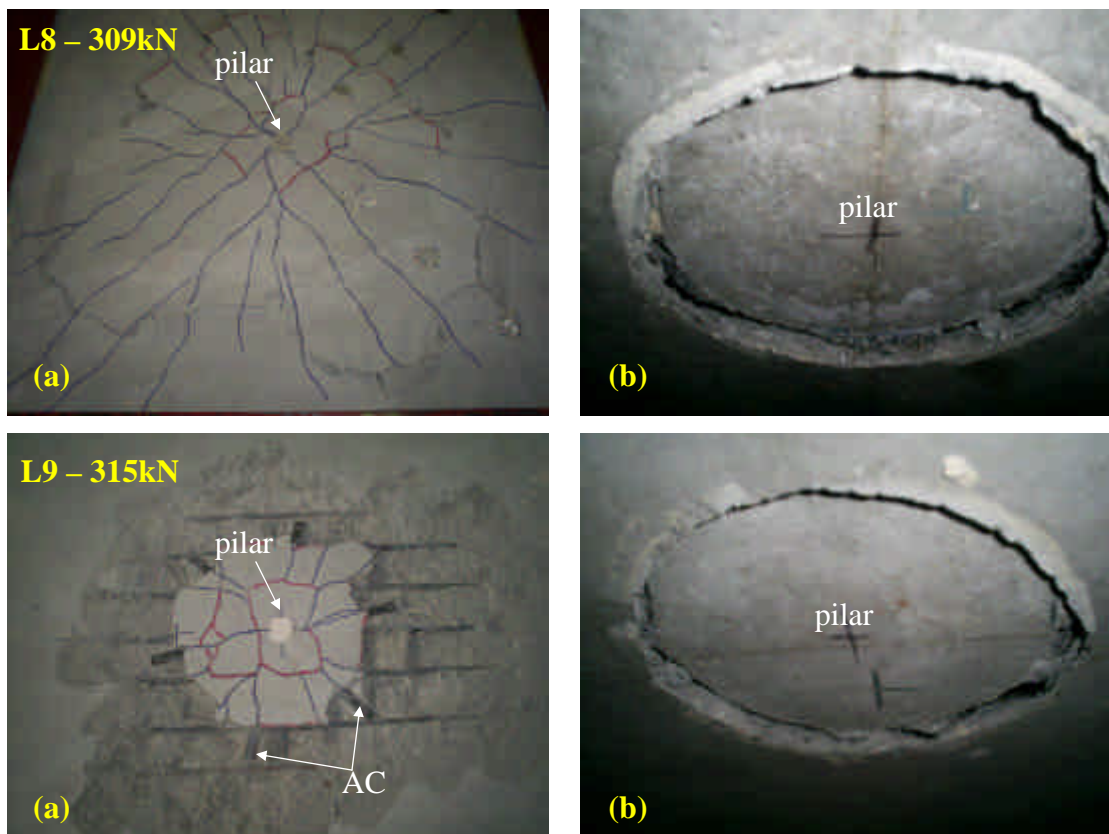


Figura 4.8 – Fotografias das lajes L8 e L9 após a ruptura – (a) Vista superior;
(b) Vista inferior

A Laje L5 apresentou carga de ruptura inferior à da laje de referência devido a fissuras apresentadas antes da realização dos ensaios, não sendo, portanto, considerada na análise dos resultados. O motivo da fissuração dessa laje pode ser sido a sua preparação para o ensaio com um dia de antecedência e aperto excessivo dos tirantes, provocando um acréscimo indevido de carga.

4.4 – DESLOCAMENTO VERTICAL

Os pontos de medição foram distribuídos sobre as lajes em linha reta, nas direções x e y, e, para monitoramento de deslocamento de corpo rígido, foram colocados os relógios R1 e R9, distantes a 825 mm do centro da laje. Para maiores valores de carga, os deslocamentos verticais variaram quase que linearmente com a distância ao ponto médio da laje e os maiores valores foram medidos na região central, onde foi aplicada a carga. Os gráficos de deslocamento vertical em função da distância ao centro para diferentes valores de carga, das lajes L1-A, L4, L6 e L9, são apresentados nas Figuras 4.9 a 4.12.

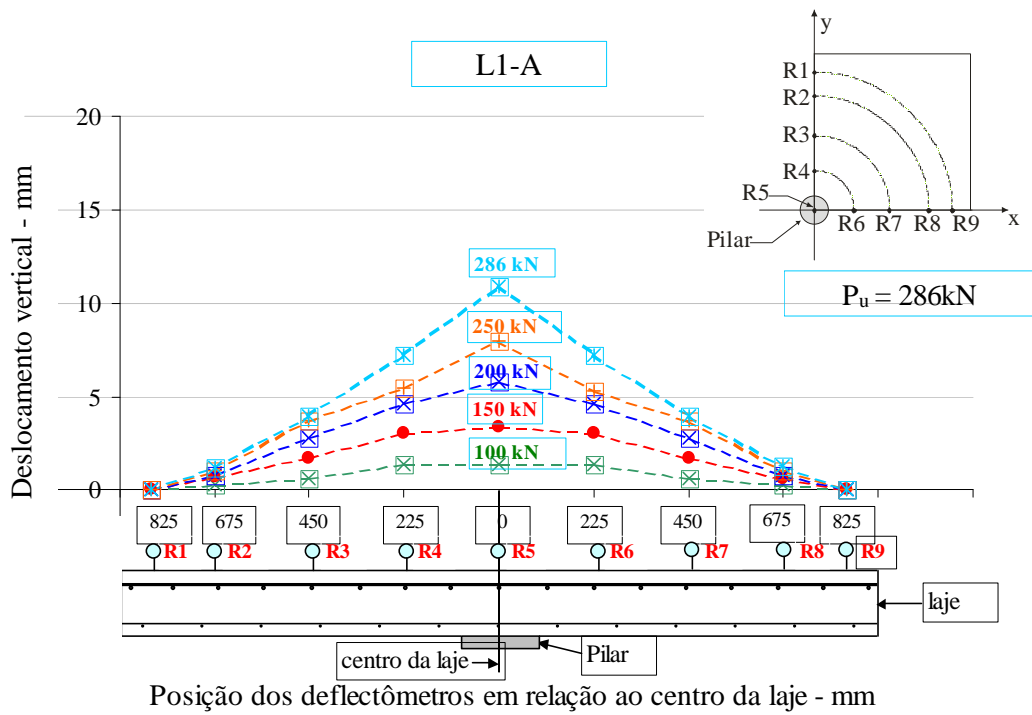


Figura 4.9 – Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L1-A

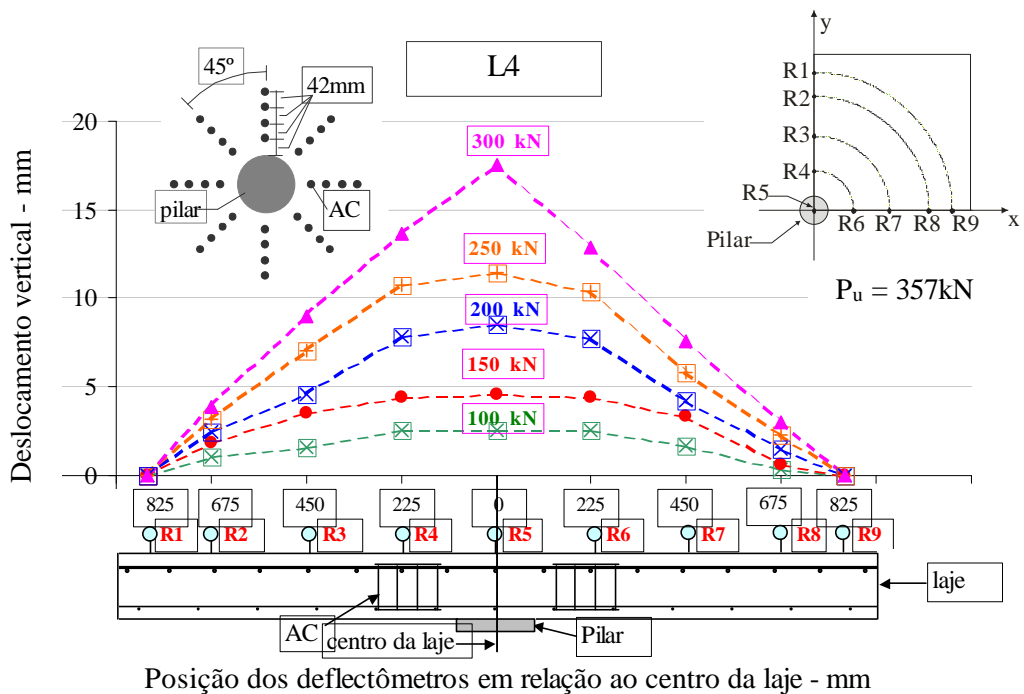


Figura 4.10 – Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L4

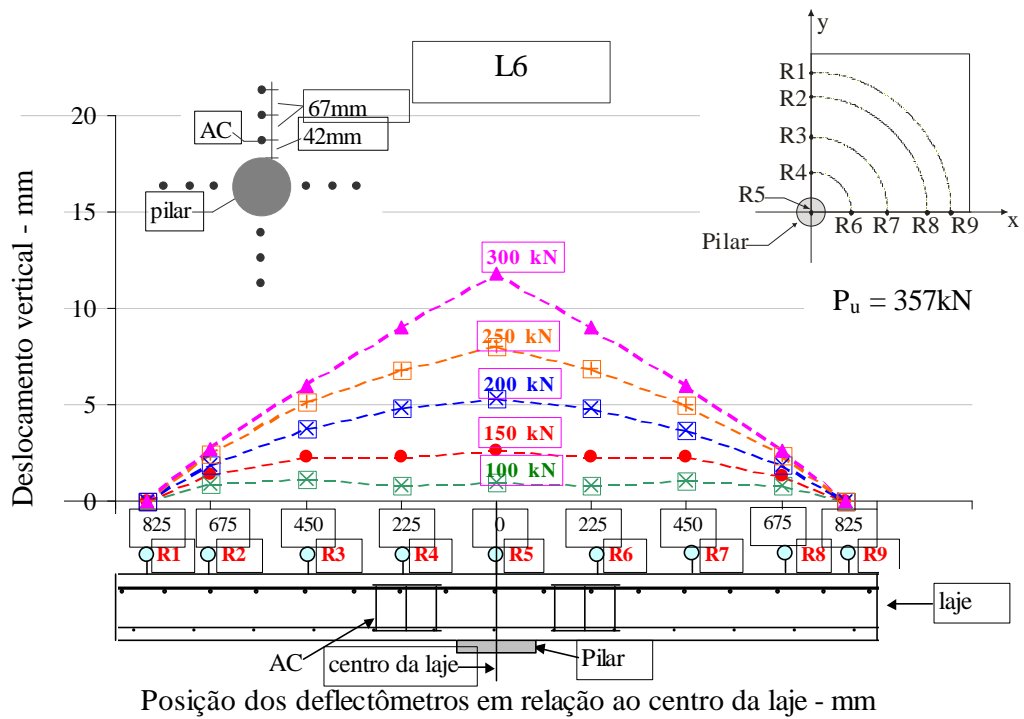


Figura 4.11 – Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L6

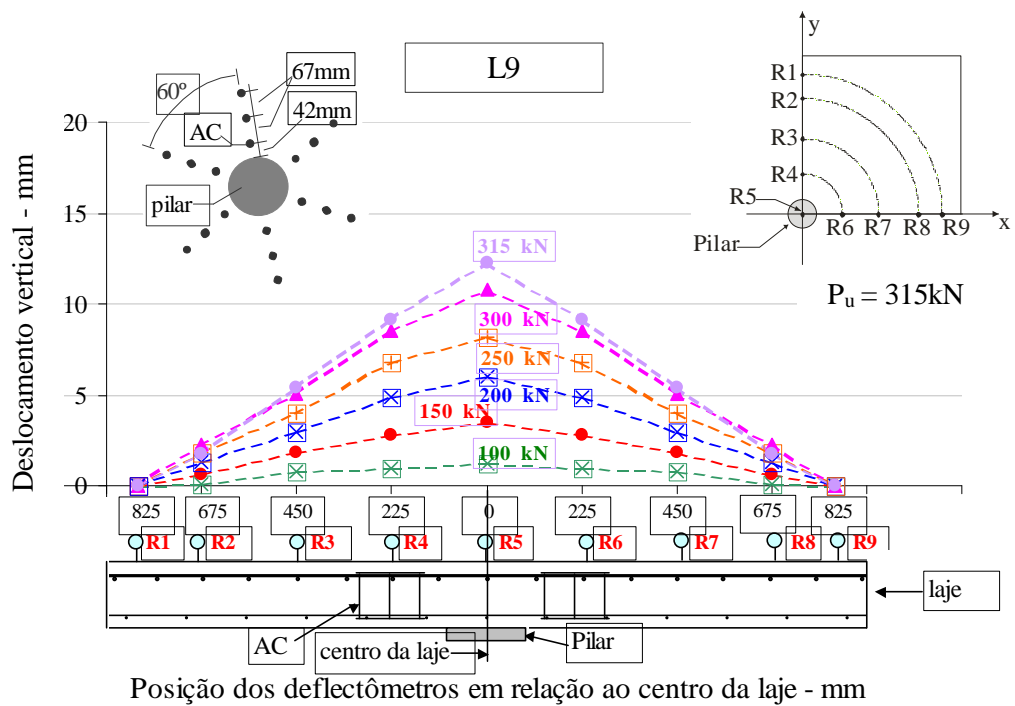


Figura 4.12 – Deslocamento vertical em função da distância ao centro da laje L9

4.5 – DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA

4.5.1 – Armadura de flexão

A armadura de flexão das lajes do Grupo 1 atingiu o escoamento com carga próxima de 200 kN e, com exceção da L1, o raio de escoamento, que é a distância entre o ponto onde foi constatado o escoamento da armadura de flexão ao centro da laje, abrangeu região fora daquela onde havia armadura de cisalhamento. O escoamento da armadura longitudinal não ocorreu em todas as lajes do Grupo 2, com superfície de ruptura cruzando a armadura de punção, mas, nas lajes em que houve escoamento, isto se deu na região do pilar e para carga em torno de 250 kN.

A relação entre a deformação média das leituras obtidas nas faces superior e inferior das armaduras de flexão (posições 1, 2, 3 e 4) e a deformação de escoamento (ϵ/ϵ_y) e a distância dos extensômetros ao centro da laje, para as lajes L1, de referência, L2, com superfície de ruptura externa à região de *studs*, e L8, com superfície cruzando a região armada à punção, é apresentada nas Figuras 4.13 a 4.15.

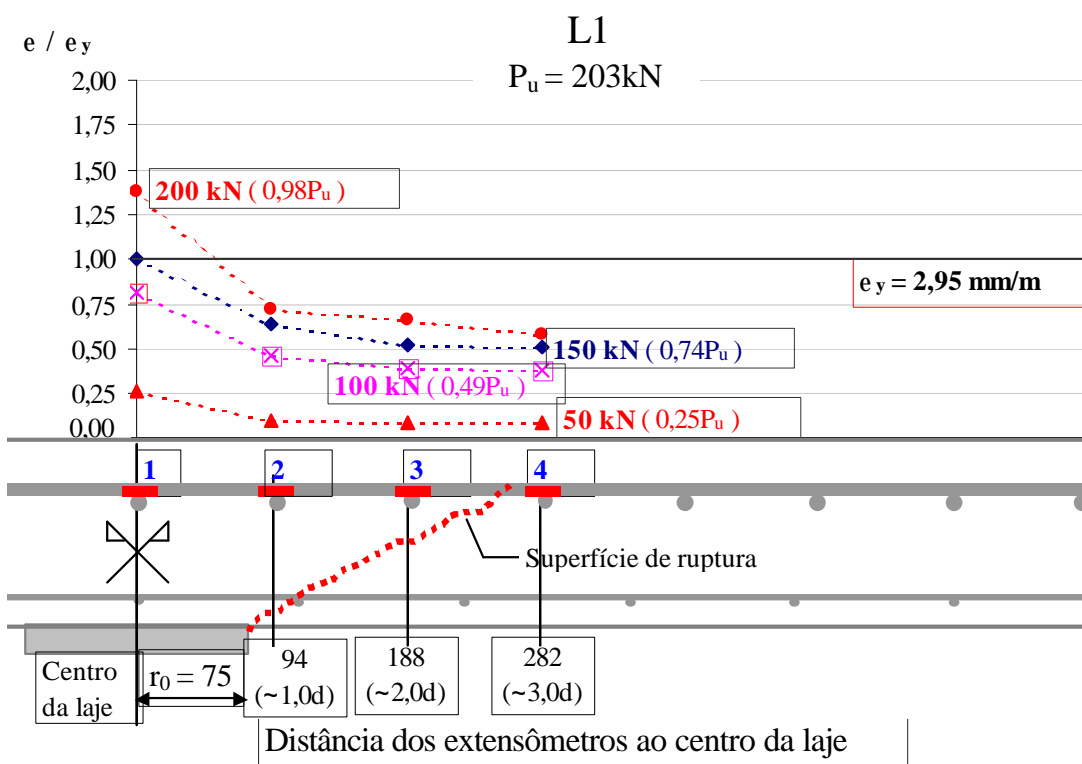


Figura 4.13 – (ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L1

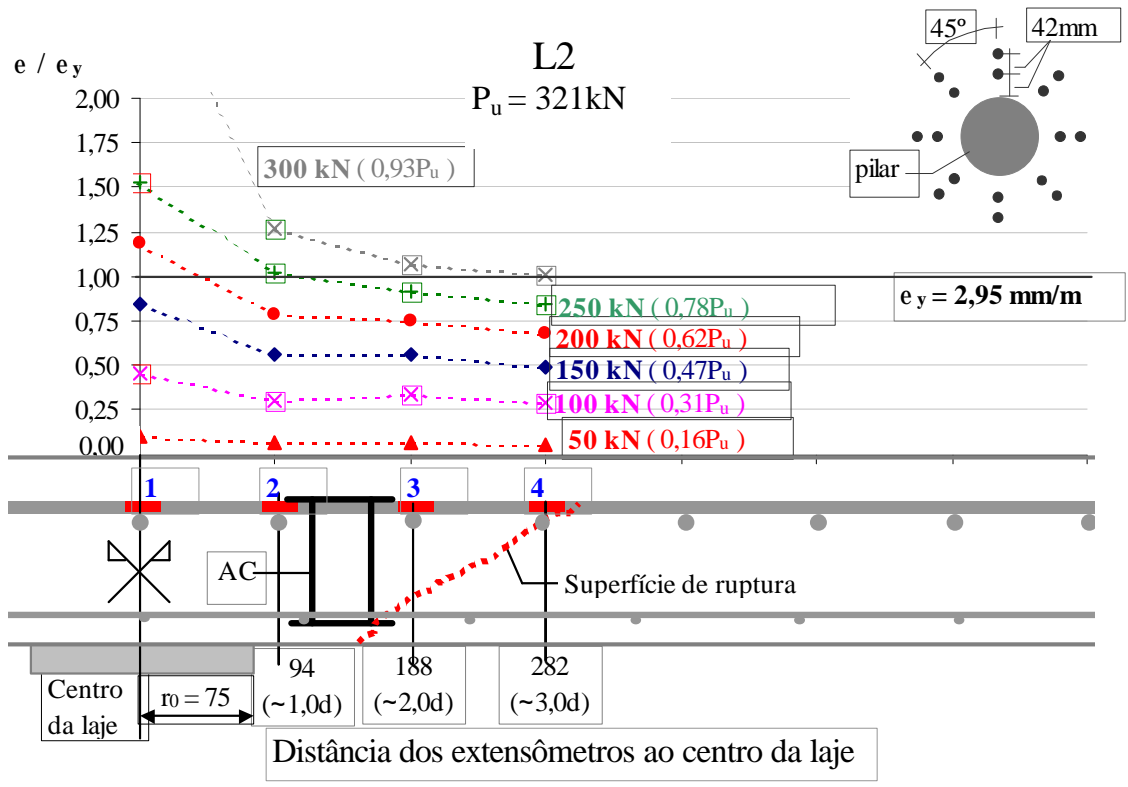


Figura 4.14 – (ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L2

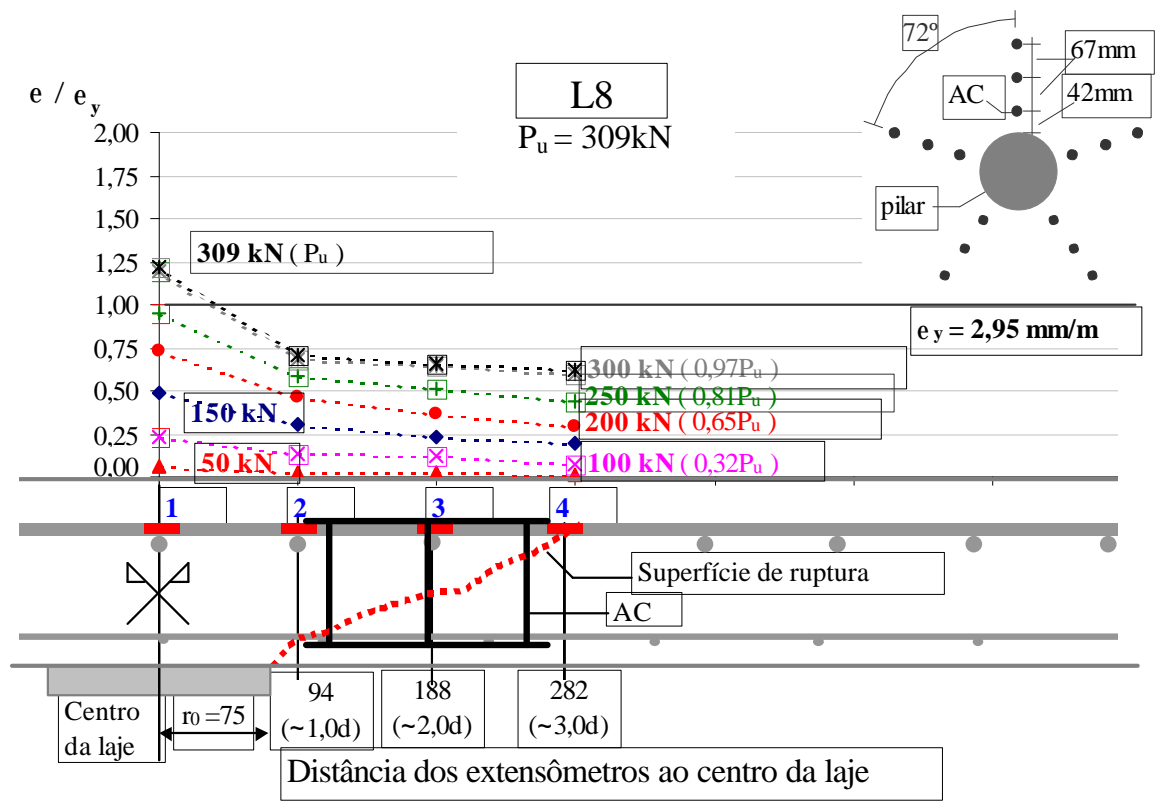


Figura 4.15 – (ϵ/ϵ_y) em função da distância ao centro da laje L8

A Figura 4.16 apresenta o gráfico da relação carga-deformação da armadura de flexão da laje L7. Esta armadura, nas posições onde sua deformação foi medida, não chegou a atingir a deformação de escoamento.

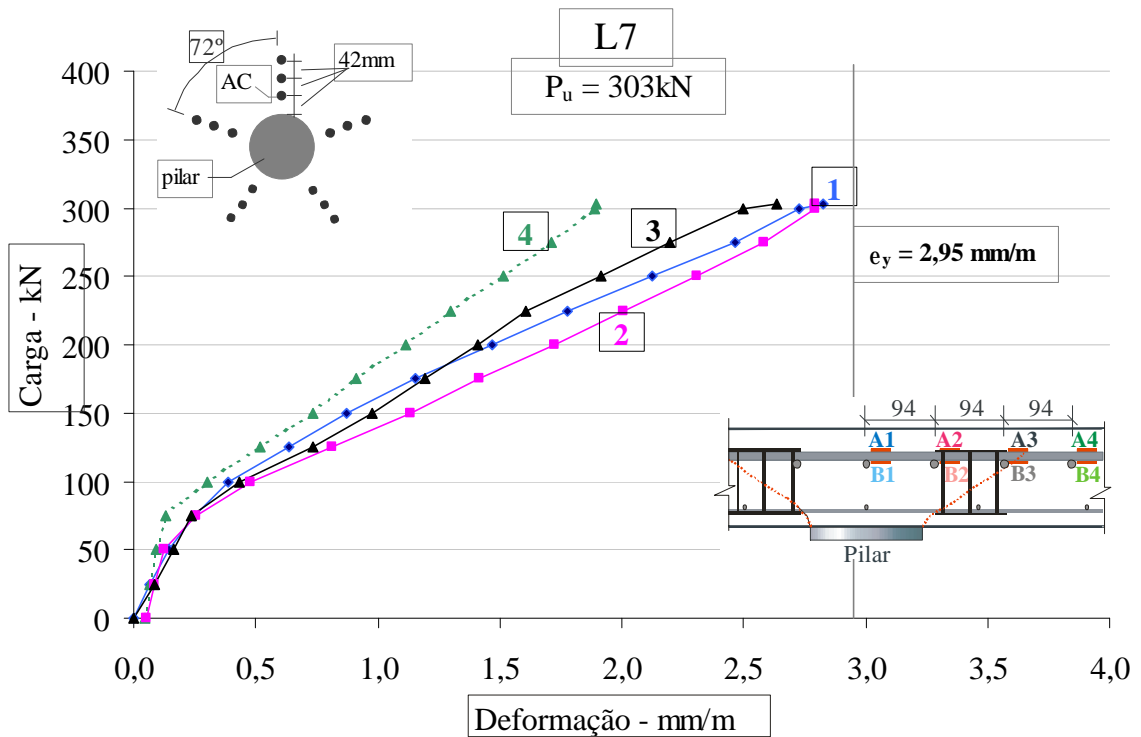


Figura 4.16 – Relação carga-deformação da armadura de flexão da laje L7

4.5.2 – Armadura de cisalhamento

Havia dois extensômetros em cada local de medição nos studs das lajes do Grupo 1, e os valores das deformações aqui apresentados são a média dos medidos com os dois extensômetros. Nas lajes do Grupo 2 havia apenas um extensômetro por posição.

As deformações da armadura de cisalhamento das lajes que tiveram superfície de ruptura cruzando as camadas de *studs* foram maiores que as das lajes com superfície de ruptura externa a essas camadas, atingindo a deformação de escoamento. Os maiores valores de deformação das armaduras de cisalhamento foram medidos nas regiões mais próximas ao pilar. Face ao aspecto dos diagramas e a possibilidade da superfície de ruptura não ter cruzado a região central do *stud*, o maior valor da deformação medido pode não ser o máximo ocorrido.

As Figuras 4.17 a 4.20 apresentam gráficos de carga – deformação da armadura de cisalhamento das lajes L2, L5, L8 e L9.

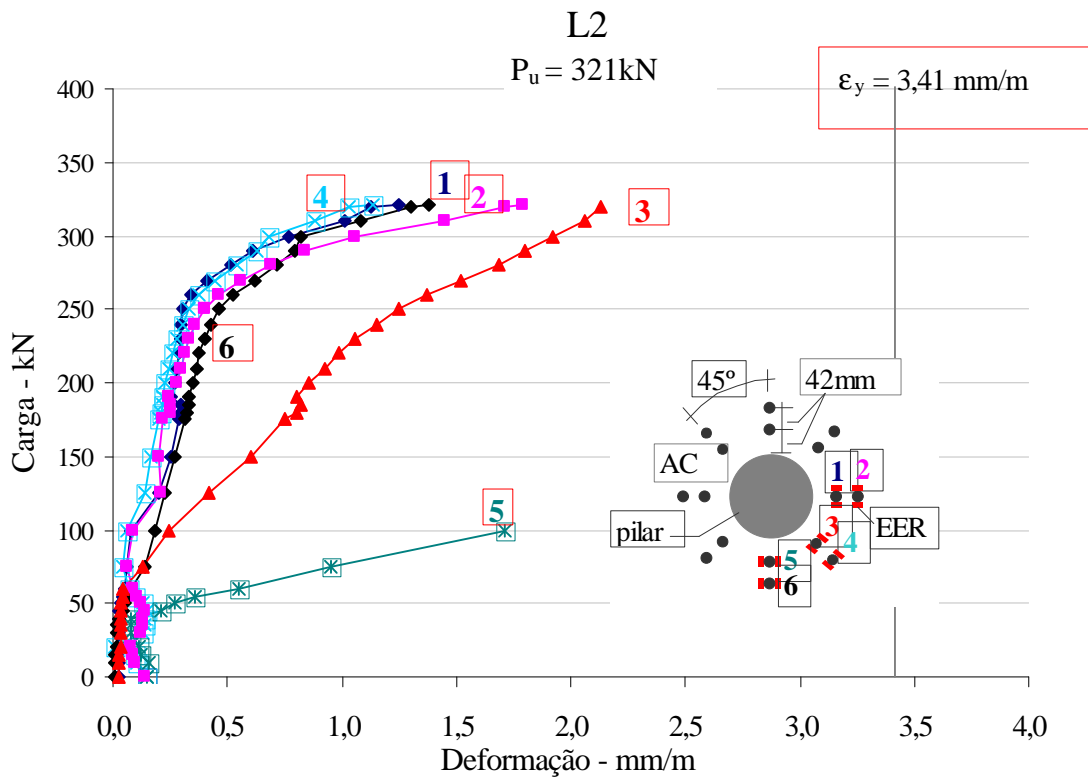


Figura 4.17 – Relação carga-deformação da armadura de cisalhamento da L2

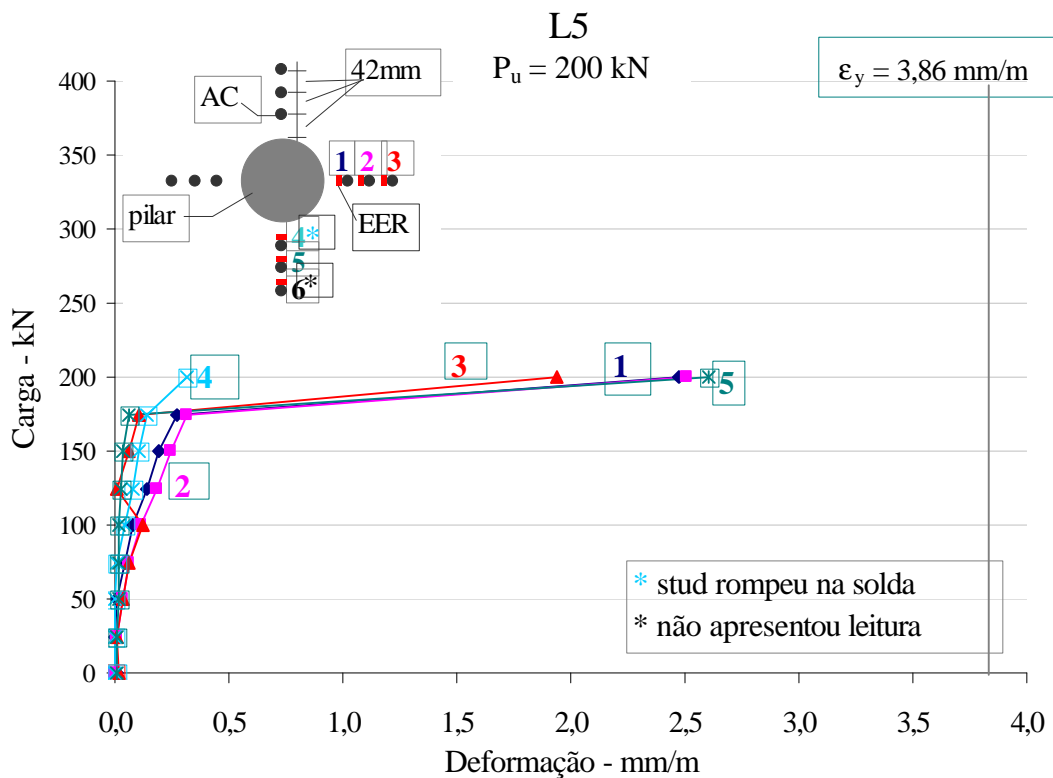


Figura 4.18 – Relação carga-deformação da armadura de cisalhamento da L5

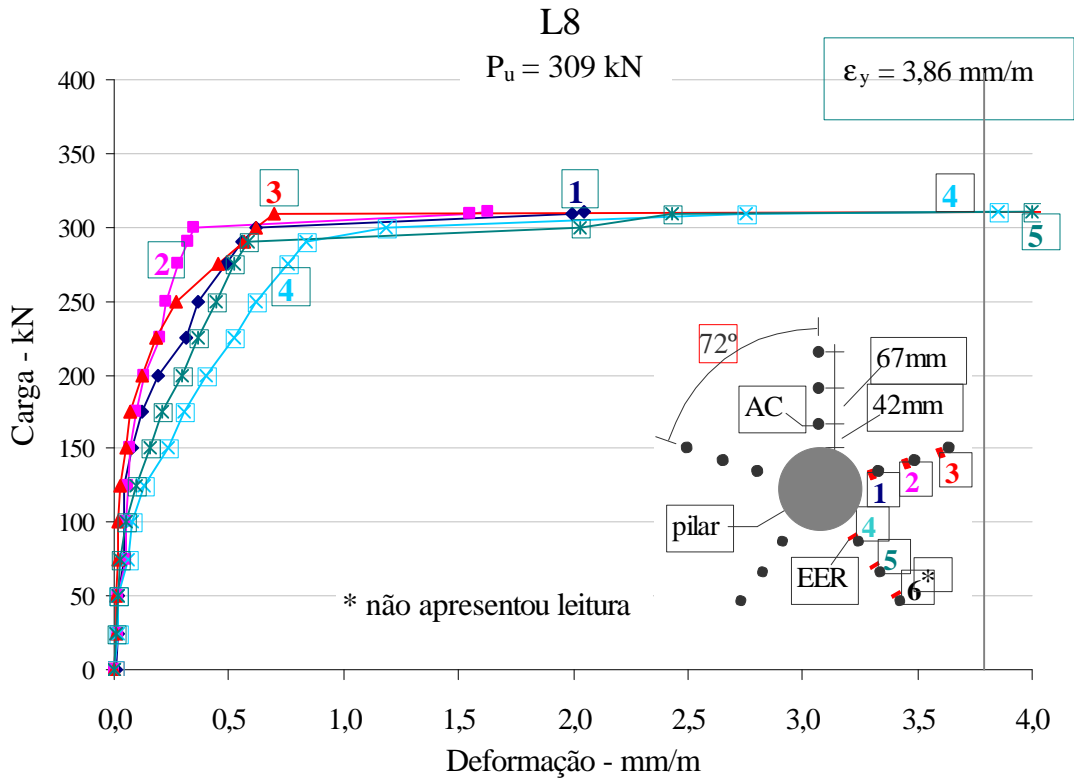


Figura 4.19 – Relação carga-deformação da armadura de cisalhamento da L8

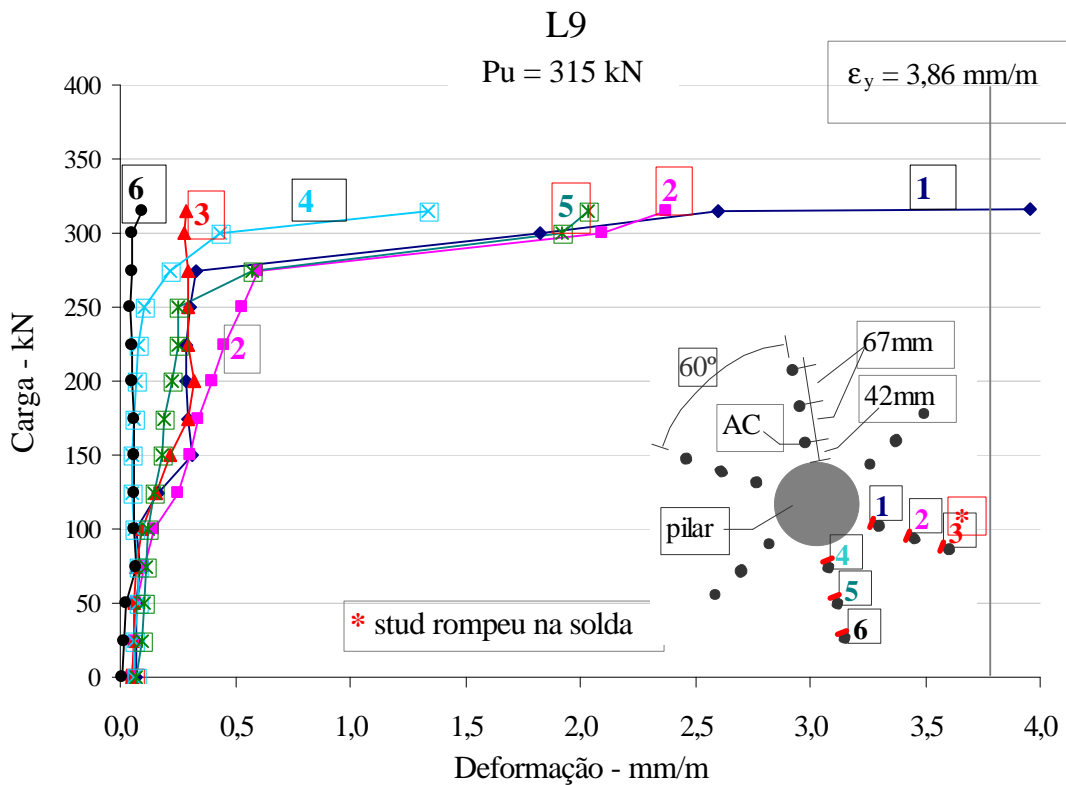


Figura 4.20 – Relação carga-deformação da armadura de cisalhamento da L9

4.5.3 – Concreto

As deformações do concreto foram medidas na face inferior das lajes, nas direções tangenciais e radiais. Na direção tangencial, as medições foram feitas em pontos a, aproximadamente, 0,05d, 0,11d, 0,35d e 1,43d da face do pilar, enquanto, na direção radial, os pontos de medição ficaram a aproximadamente 0,38d, 1,43d e 2,47d da face do pilar.

As deformações de compressão radial e tangencial na superfície inferior foram mais elevadas perto da área carregada e diminuíram com o aumento da distância ao pilar. As deformações na direção tangencial foram maiores que na direção radial, tendo valores de aproximadamente 9 % da deformação última do concreto ($\epsilon_u = 0,0035$), para uma carga próxima de 95 % da carga de ruptura das lajes. Esses resultados comprovam que o concreto, nessa região, estava com deformação muito inferior à de esmagamento, independentemente da superfície de ruptura.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam a relação, em porcentagem, entre a deformação medida no concreto e a deformação de esmagamento (ϵ/ϵ_u) das lajes L2 e L9, com superfícies de ruptura externa e cruzando as camadas de *studs*, respectivamente, em função das distâncias à face do pilar.

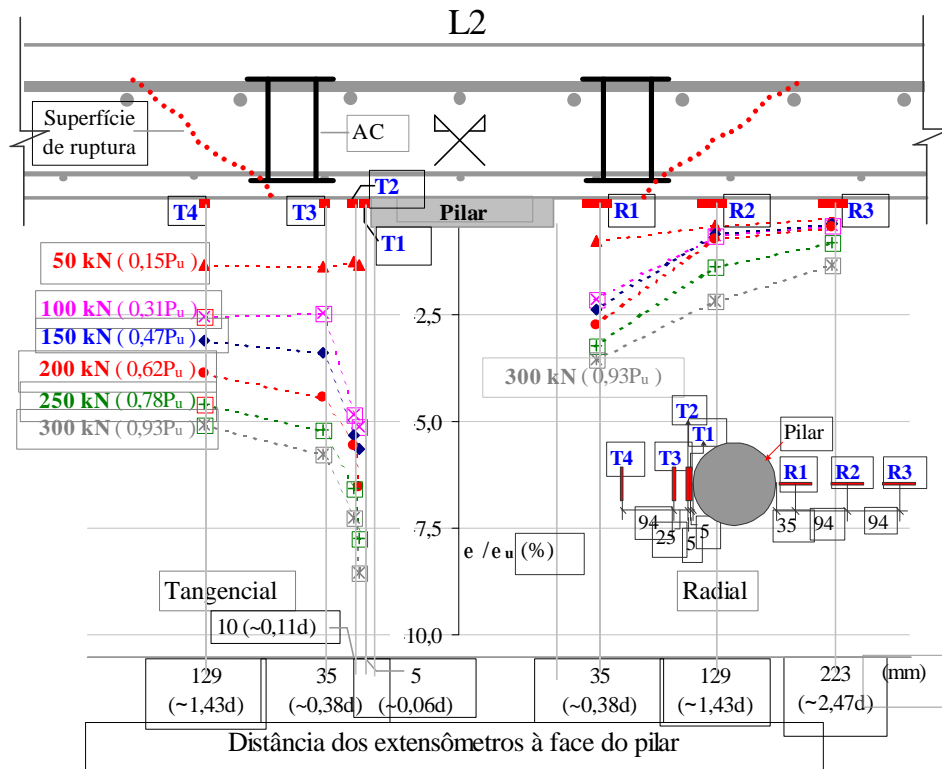


Figura 4.21 – Relação ϵ/ϵ_u em função das distâncias à face do pilar da L2

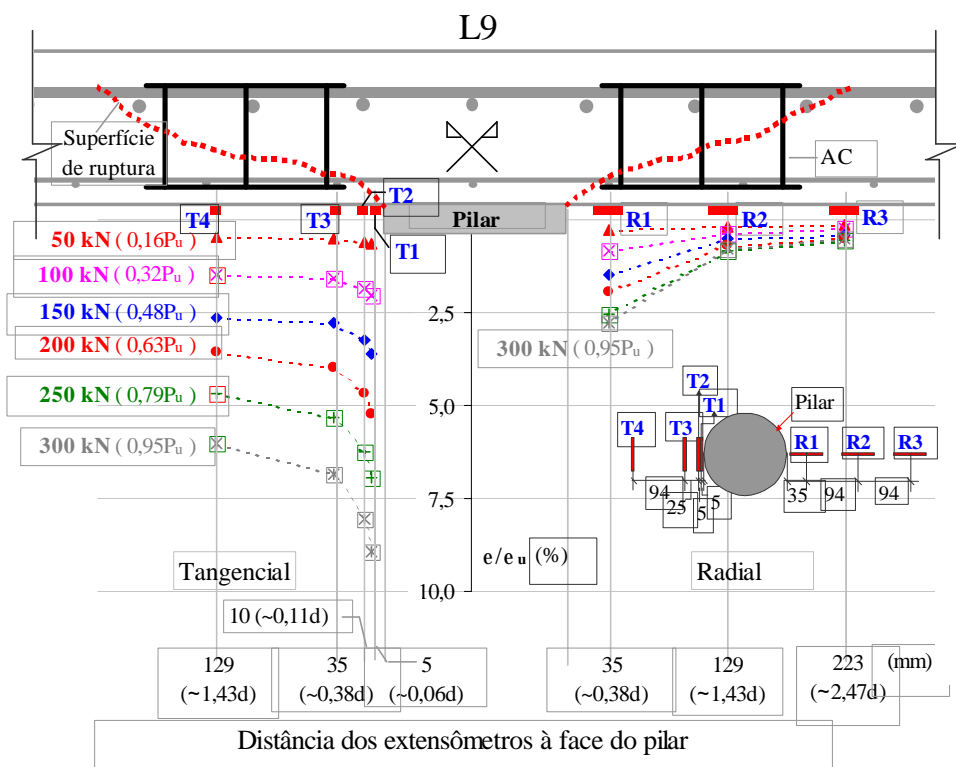


Figura 4.22 – Relação ϵ/ϵ_u em função das distâncias à face do pilar da L9

4.6 – FISSURAS

Fissuras radiais no centro da laje e circunferenciais contornando a área de carregamento foram os tipos principais que apareceram nas lajes. Em todas as lajes, as primeiras fissuras visíveis, radiais, apareceram com carga em torno de 50 kN. Com o incremento de carga, as fissuras radiais progrediram em direção às bordas enquanto as circunferenciais foram aparecendo, do centro para a parte periférica.

A Figura 4.23 apresenta fotografias de fissuração das lajes com armadura de cisalhamento, no estado descarregado após a ruptura. Pode-se observar que a forma da superfície de ruptura na face superior das lajes L2, L3 e L4 foi circular e distante da região de aplicação de carga, e das demais lajes houve maior irregularidade na forma da superfície de ruptura.

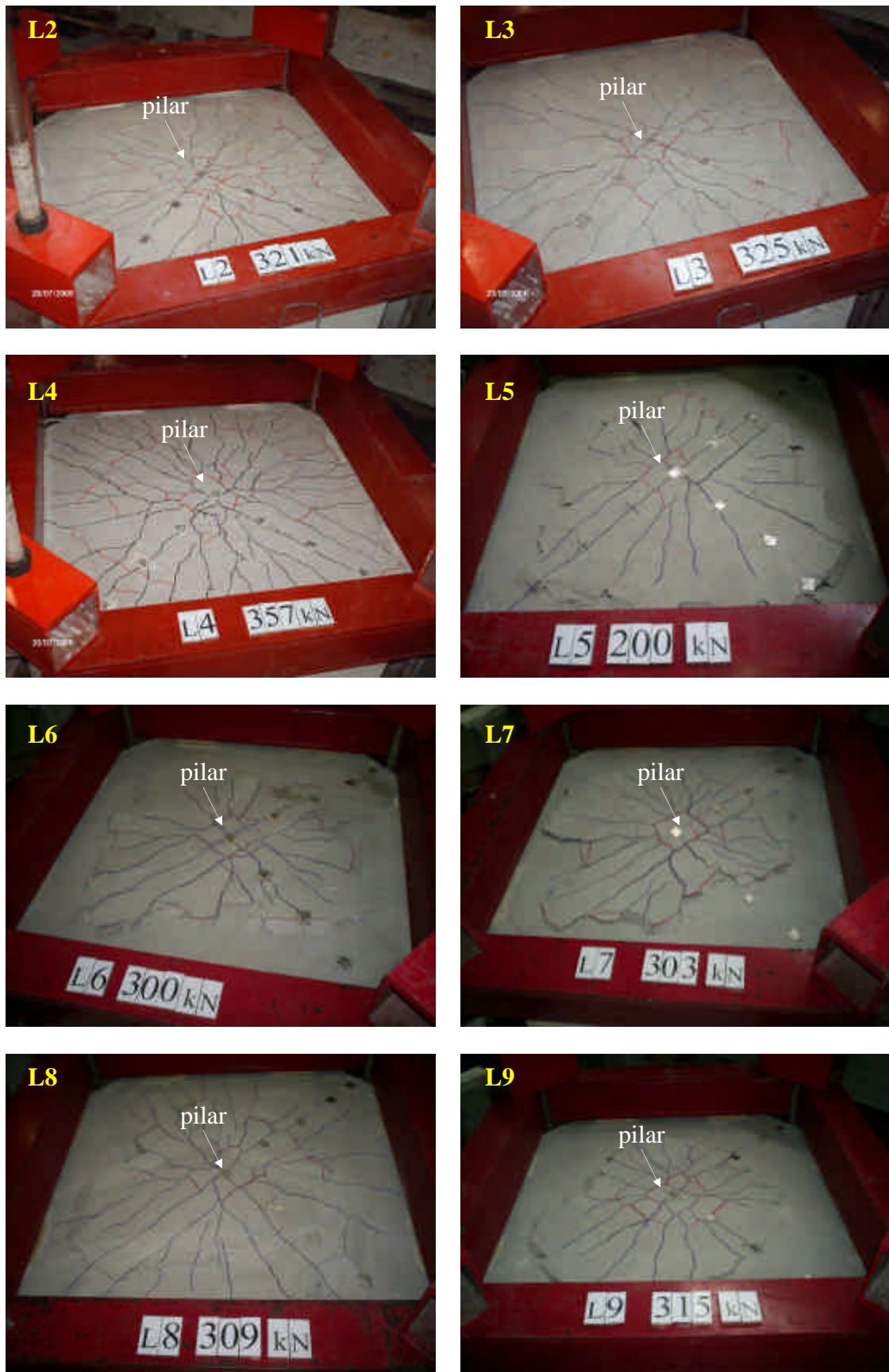


Figura 4.23 – Fissuração, após a ruptura, das lajes com armadura de cisalhamento

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas análises dos resultados experimentais obtidos, comparando-os entre si e com os dos trabalhos experimentais descritos no capítulo 2. As resistências à punção experimentais são também comparadas com as estimadas a partir das expressões que constam em normas de cálculo. Define-se armadura transversal mínima aquela que acarreta superfície de ruptura interna e grau de rotação maior que a da laje de referência.

5.1 – CARGA E MODO DE RUPTURA

Na Tabela 5.1 são apresentadas as principais características das lajes e comparações das cargas de ruptura. Nessa Tabela, κ é o índice de armadura de cisalhamento situada dentro do tronco de cone de ruptura, delimitado pela fissura de cisalhamento, igual à força total nessa armadura, $(A_{sw}f_{yw})_{ef}$ dividida pela carga de ruptura da laje de referência. Essa armadura foi considerada como sendo aquela situada a uma distância não maior que $(d-x)\cot\theta$ (ver croquis abaixo) da face do pilar (~ 150 a 160 mm).

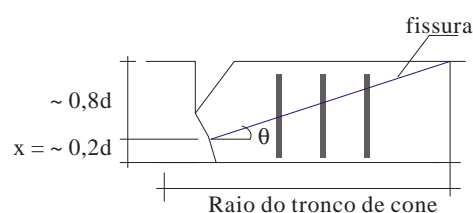
Tabela 5.1 – Principais características das lajes e comparações das cargas de ruptura

Lajes		f_c MPa	d ± 2 mm	nº de linhas	nº de camadas	Armadura de cisalhamento		S_r mm	κ	P_u kN	$\frac{P_{uLi}}{P_{uL1-A}}$	Sup.de ruptura
						$A_{sw}f_{yw}$ kN	$(A_{sw}f_{yw})_{tot}$ kN					
Grupo 1	L2	39,0	89	8	2	98	196	42	0,69	321	1,12	E
	L3	39,0	87	8	3	98	294	42	1,03	325	1,14	E
	L4	39,0	89	8	4	98	392	42	1,03	357	1,25	E
Grupo 2	L1-A	38,7	92	-	-	-	-	-	-	286	1,00	P
	L6	38,9	91	4	3	39	117	67	0,27	300	1,05	I
	L7	39,1	89	5	3	49	147	42	0,51	303	1,06	I
	L8	39,2	90	5	3	49	147	67	0,34	309	1,08	I
	L9	39,4	91	6	3	59	177	67	0,41	315	1,10	I

P - Ruptura por punção

E - Ruptura por punção com superfície de ruptura externa à região de AC

I - Ruptura por punção com superfície de ruptura cruzando as camadas de AC



$$\text{Raio do tronco de cone} = \frac{\text{lado do pilar}}{2} + (d-x)\cot\theta$$

$$\theta \sim 25^\circ$$

$$\kappa = (A_{sw}f_{yw})_{ef} / P_{L1-A}$$

Na Tabela 5.1, a comparação das cargas de ruptura das lajes com a carga de ruptura da laje de referência (P_{uLi}/P_{uL1-A}) mostra que utilização da armadura de cisalhamento provocou um acréscimo da resistência nas lajes ensaiadas e o aumento do número de linhas da armadura de punção proporcionou ganhos de resistência e superfícies de ruptura diferenciados no Grupo 1 e no Grupo 2.

No Grupo 1, com oito linhas de *studs* e o número de camadas variando de duas a quatro, a superfície de ruptura das lajes foi externa à região de armadura de cisalhamento e os acréscimos de carga, em relação à laje L1-A, variaram de 12% a 25%. No Grupo 2, com o número das linhas de armadura de cisalhamento variando de quatro a seis, a superfície de ruptura foi interna à região de armadura de punção, e o acréscimo na carga de ruptura variou de 5% a 10%.

A redução do número de linhas e a diminuição da área de armadura de cisalhamento por camada, das lajes do Grupo 2 em relação às do Grupo 1, conduziram a uma diminuição no ganho de resistência e à mudança na superfície de ruptura das lajes.

A Figura 5.1 apresenta gráfico de (P_{uLi}/P_{uRef}) em função do índice de armadura de cisalhamento situada dentro do raio do tronco de cone de ruptura (κ) das lajes ensaiadas neste e em outros trabalhos. P_{uRef} é a carga de ruptura da laje de referência de cada trabalho realizado. Os dados utilizados nessa figura encontram-se no Anexo 2 desta pesquisa.

As lajes ensaiadas por Silva (2003) e Musse (2004) tiveram o mesmo comprimento e altura das lajes desta pesquisa ($L = 1800$ mm e $h = 130$ mm), e as lajes de Gomes (1991), Andrade (1999), Trautwein (2001), Borges (2004), Gomes e Andrade (1993) e Trautwein (2006) tinham comprimento de 3000mm e altura igual a 200 mm.

No gráfico da Figura 5.1, nota-se que os índices de armadura de cisalhamento “ κ ” relativos a lajes com ruptura interna à região de *studs* são menores que cerca de 0,7, valor correspondente às lajes L2, deste estudo, com superfície de ruptura externa, e L11 de Gomes (1991), com superfície de ruptura interna. Para valores de κ maiores que 0,7, as lajes passaram a ter rupturas externas à região de armadura de punção.

Os pontos da Figura 5.1 relativos a ruptura interna às camadas de *studs* indicam que o aumento do índice de armadura de cisalhamento proporciona acréscimo na carga de ruptura, até um determinado valor, a partir do qual tem-se superfície de ruptura externa.

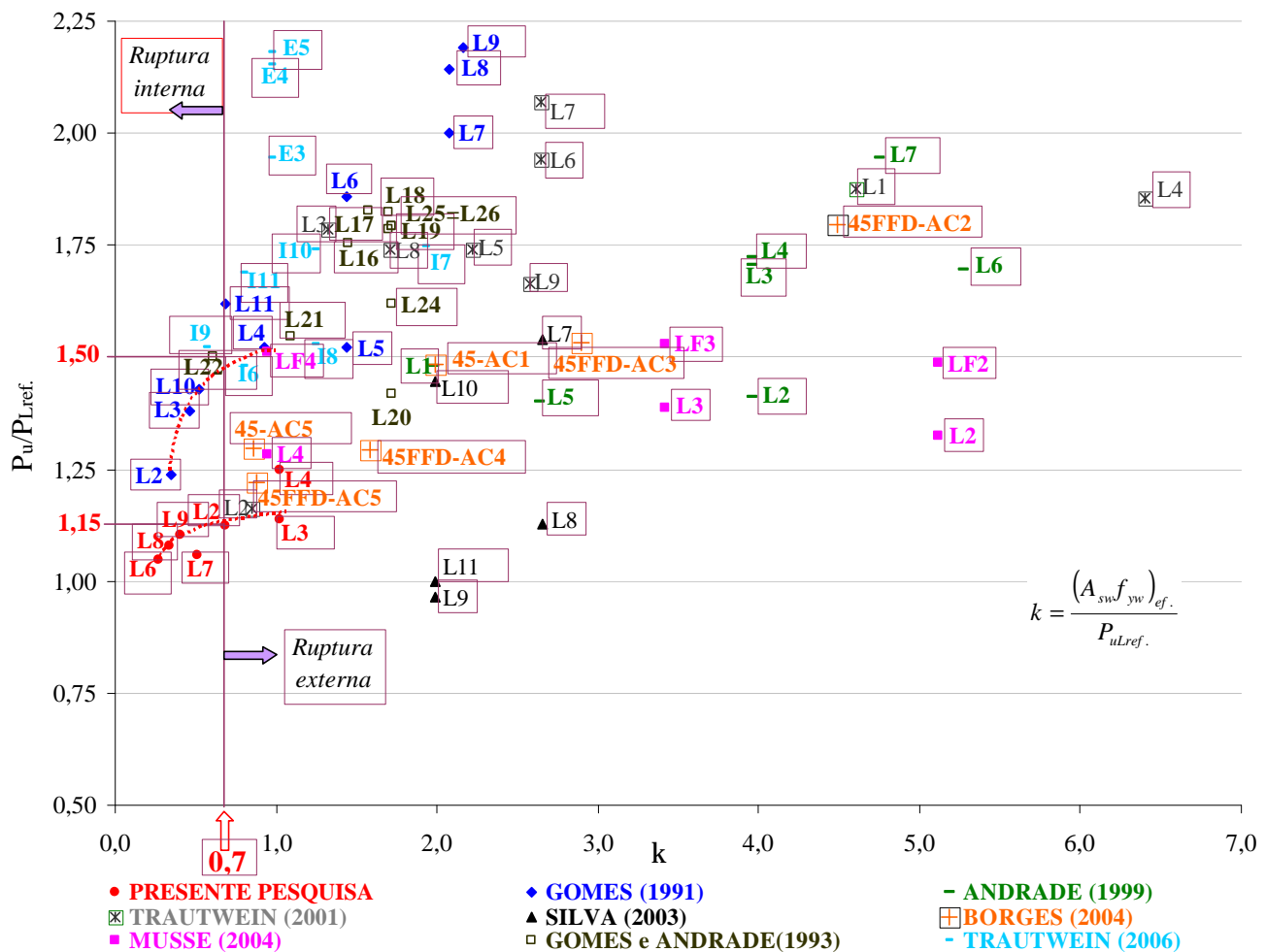


Figura 5.1 – Gráfico $P_u/P_{u,ref}$ em função de κ para as lajes deste e de outros trabalhos

Observando no gráfico da Figura 5.1 o aspecto da curva formada pelos pontos referentes às lajes L6, L8 e L9 deste estudo, percebe-se que o ganho máximo de carga é cerca de 15%. Da mesma forma, nota-se nas lajes de Gomes (1991) o acréscimo máximo próximo de 50%.

Vale ressaltar que a delimitação do índice de armadura de punção (κ) para superfícies de ruptura interna e externa às camadas de armadura de cisalhamento indicada na Figura 5.1 deve ser aplicada para lajes com características semelhantes às desta pesquisa e de Gomes (1991) quanto ao tipo e posicionamento de armadura de punção. É possível obter superfícies de ruptura cruzando as camadas de armadura transversal em lajes com um índice κ maior que 0,7 se for utilizada outra variável que interfira na localização da superfície de

ruptura, como adição de fibras ao concreto, presença de furos, posicionamento da armadura de punção, entre outras.

As lajes I6 a I11 de Trautwein (2006), exceto I9, foram exemplos de lajes com índice de armadura de punção maior que 0,8 e a ruptura foi interna às camadas de *studs*. O posicionamento da superfície de ruptura dessas lajes ocorreu provavelmente devido à distribuição da armadura transversal, que incluía linhas intermediárias a partir da sexta camada de *studs*, e ao fato dessa armadura não envolver a armadura de flexão. Um número elevado de camadas de *studs* também pode causar superfícies internas, conforme as lajes L1, L4 e L9 de Trautwein (2001), com oito linhas e onze camadas de *studs* e sete camadas intermediárias a partir da quarta camada.

As superfícies de ruptura das lajes de Andrade (1999), consideradas internas pelo autor, ocorreram entre a armadura de cisalhamento e a armadura de flexão e houve também o esmagamento do concreto na região de aplicação de carga. O uso da armadura transversal sem envolver a armadura de flexão pode ter influenciado a superfície de ruptura dessas lajes.

A delimitação entre casos de superfícies de ruptura interna e externa e os acréscimos de carga para as lajes sem furos, com armadura transversal do tipo *stud* envolvendo a armadura de flexão e concreto sem fibras são apresentados na Figura 5.2.

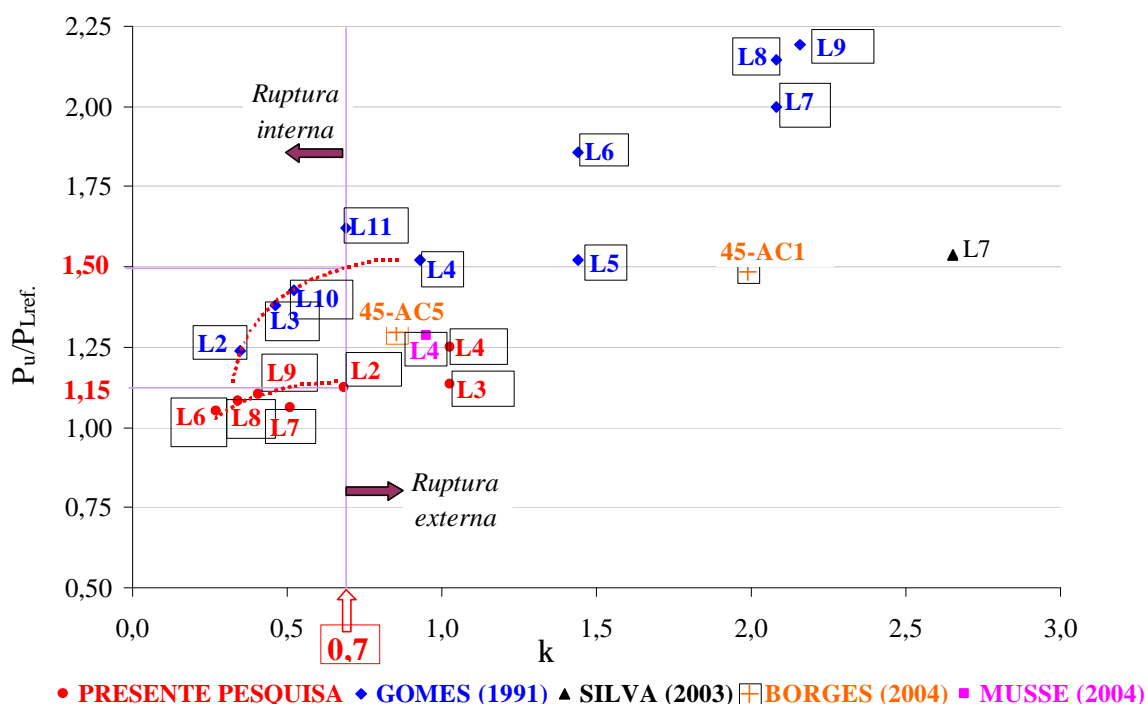


Figura 5.2 – P_u/P_{Lref} em função de κ –lajes sem furos, sem fibras e com armadura de punção do tipo *stud*

5.2 – ROTAÇÕES

A Figura 5.3 apresenta o gráfico de carga de ruptura – rotação ($P_u - \psi$) das lajes ensaiadas nesta pesquisa. As rotações máximas ψ , em radianos, foram determinadas com as flechas centrais em relação ao ponto de inflexão a 825mm.

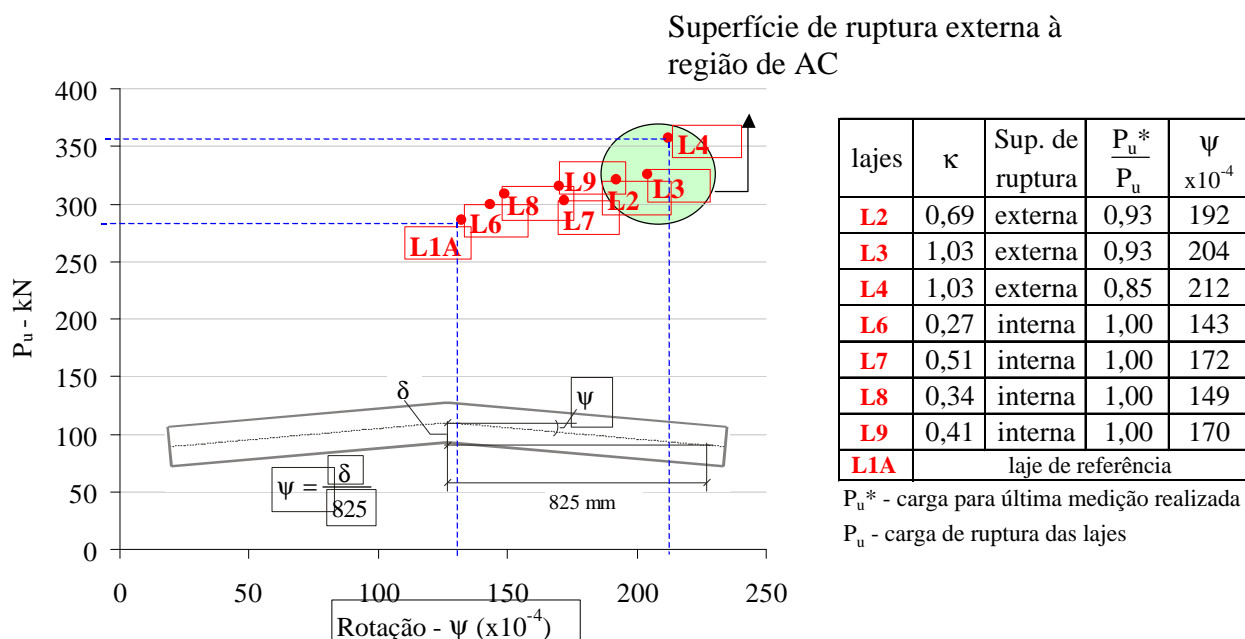


Figura 5.3 – Carga - rotação ($P_u - \psi$) das lajes ensaiadas

As menores rotações máximas foram as das lajes com menores índices de armadura de cisalhamento (κ) e superfícies de ruptura internas à região de *studs*. A laje L6, com κ igual a 0,27, foi a laje com menor rotação ($\psi=143 \times 10^{-4}$), seguida pela L8 ($\kappa=0,34$ e $\psi = 149 \times 10^{-4}$), L9 ($\kappa=0,41$ e $\psi = 170 \times 10^{-4}$) e L7 ($\kappa=0,51$ e $\psi = 172 \times 10^{-4}$), do Grupo 2, e pelas lajes L2 ($\kappa=0,69$ e $\psi = 192 \times 10^{-4}$), L3 ($\kappa=1,03$ e $\psi = 204 \times 10^{-4}$) e L4 ($\kappa=1,03$ e $\psi = 212 \times 10^{-4}$), do Grupo 1.

A maior rotação das lajes com superfície de ruptura interna, cruzando as camadas de *studs*, foi a da L7 ($\psi = 172 \times 10^{-4}$), com cinco linhas de armadura de cisalhamento e espaçamento entre os *studs* de aproximadamente $0,5d$. A laje L9, com seis linhas de armadura de cisalhamento, apesar de ter tido o maior resistência dessa série de lajes, apresentou rotação máxima praticamente igual à da L7.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados experimentais e principais características das lajes ensaiadas por Gomes (1991) e das lajes desta pesquisa. As lajes com distribuição em

cruz, testadas por Gomes (1991), apresentaram rotações experimentais com valores próximos dos obtidos neste trabalho, de 119×10^{-4} a 163×10^{-4} , e, para a laje L6, com distribuição radial, oito linhas e quatro camadas de *studs*, a rotação foi igual a 194×10^{-4} , 95% da rotação da laje L3 desta pesquisa, com três camadas, e 92% da rotação da laje L4, com quatro camadas.

Tabela 5.2 – Resultados experimentais e principais características das lajes de Gomes (1991) e desta pesquisa.

Laje		A _s flexão	Armadura de cisalhamento					pilar (mm)	perím pilar	P _u (kN)	MR	ψ (x10 ⁻⁴)	Pu*/Pu
n ^o	d (mm)	ρ (%)	tipo	φ (mm)	n ^o de linhas	n ^o de camadas	distrib.						
GOMES (1991)													
Lajes com altura h=200 mm													
L1	159	1,20	-	-	-	-	-	200	800	560	P	67	0,95
L1-A	159	1,20	-	-	-	-	-	200	800	587	P	67	0,90
L2	153	1,20	stud	6,0	8	2	Cruz	200	800	693	I	119	0,96
L3	158	1,20	stud	6,9	8	2	Cruz	200	800	773	I/E	130	0,96
L4	159	1,20	stud	8,0	8	3	Cruz	200	800	853	E	156	0,96
L5	159	1,20	stud	10,0	8	4	Cruz	200	800	853	E	163	0,96
L6	159	1,20	stud	10,0	8	4	Radial	200	800	1040	E	194	0,97
L7	159	1,20	stud	12,0	8	5	Radial	200	800	1120	E	230	0,97
L8	159	1,20	stud	12,0	8	6	Radial	200	800	1200	E	237	0,97
L9	159	1,20	stud	12,2/10,0	8	9 / 5 / 4	Radial	200	800	1227	E	278	0,95
L10	154	1,20	stud	6,0	8	5	Radial	200	800	800	I	133	0,96
L11	154	1,20	stud	6,9	8	5	Radial	200	800	907	I	141	0,94
VAZ													
Lajes com altura h=130 mm													
L1-A	92	1,38	-	-	-	-	-	φ=150	471	286	P	132	1,00
L2	89	1,38	stud	5,0	8	2	Radial	φ=150	471	321	E	192	0,93
L3	87	1,38	stud	5,0	8	3	Radial	φ=150	471	325	E	204	0,93
L4	89	1,38	stud	5,0	8	4	Radial	φ=150	471	357	E	212	0,85
L6	91	1,38	stud	4,2	4	3	Cruz	φ=150	471	300	I	143	1,00
L7	89	1,38	stud	4,2	5	3	Radial	φ=150	471	303	I	172	1,00
L8	90	1,38	stud	4,2	5	3	Radial	φ=150	471	309	I	149	1,00
L9	91	1,38	stud	4,2	6	3	Radial	φ=150	471	315	I	170	1,00

MR - Modo de ruptura
P - Ruptura por punção

I - Ruptura por punção com superfície de ruptura cruzando as camadas de AC
E - Ruptura por punção com superfície de ruptura externa à região de AC

As rotações das lajes com superfícies de ruptura internas à região de *studs* ensaiadas por Gomes (1991) variaram de 119×10^{-4} (L2) a 141×10^{-4} (L11), correspondendo a acréscimos de 77% (L2) a 110% (L11) em relação à laje de referência do autor, e as rotações das lajes do Grupo 2 deste estudo variaram de 143×10^{-4} (L6) a 170×10^{-4} (L9), iguais a 1,08 (L6) e 1,28 (L9) vezes a obtida na L1-A.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados experimentais e as principais características das lajes ensaiadas por Silva (2003) e Musse (2004). Comparando-se os valores das cargas de ruptura e rotações das lajes de referência de Silva (2003), Musse (2004) e desta pesquisa, pode-se verificar que a laje L1 de Silva (2003) teve carga menor que a da L1-A (cerca de 5%) e a de Musse (2004) 8% maior. Quanto às rotações, a laje L1-A apresentou valor 30% maior

que o da L1 de Silva (2003) e 55% maior que a da L1 de Musse (2004)), mas deve-se considerar que a utilização dos potenciômetros foi feita somente neste estudo e as leituras das flechas nos demais trabalhos foram realizadas com cargas inferiores às de ruptura das lajes.

Tabela 5.3 – Resultados experimentais e principais características das lajes ensaiadas por Silva (2003) e Musse (2004)

Laje		A _s flexão	Armadura de cisalhamento					pilar (mm)	perím pilar	P _u (kN)	MR	ψ (x10 ⁻⁴)	P _u * Pu
n ^o	d (mm)	ρ (%)	tipo	φ (mm)	n ^o de linhas	n ^o de camadas	distrib.						
SILVA (2003) Lajes com altura h=130 mm L4, L5, L6, L10 e L11 com furos													
L1	90	1,45	-	-	-	-	-	150	600	273	P	101	0,92
L2	90	1,45	-	-	-	-	-	150x300	900	401	P	123	0,69
L3	90	1,45	-	-	-	-	-	150x450	1200	469	*	180	0,85
L4	90	1,57	-	-	-	-	-	150	600	225	P	109	1,00
L5	90	1,57	-	-	-	-	-	150x300	900	350	*	195	0,71
L6	90	1,57	-	-	-	-	-	150x450	1200	375	*	230	0,80
L7	90	1,45	stud	8,0	8	3	Radial	150	600	420	E	199	0,83
L8	90	1,45	stud	8,0	8	3	Radial	150x300	900	452	E	241	0,77
L9	90	1,45	stud	8,0	6	3	Radial	150x450	1200	452	E	195	0,88
L10	90	1,57	stud	8,0	6	3	Radial	150	600	325	E	196	0,62
L11	90	1,57	stud	8,0	6	3	Radial	150x300	900	350	E	180	1,00
L12	90	1,45	-	-	-	-	-	φ=402	1263	525	P	190	0,86
MUSSE (2004) Lajes com altura h=130 mm LF1, LF2, LF3 e LF4 com fibras													
L1	91	1,38	-	-	-	-	-	150	600	309	P	85	0,81
L2	89	1,38	stud	10,0	8	3	Radial	150	600	460	E	191	0,87
L3	88	1,38	stud	10,0	8	5	Radial	150	600	472	E	226	0,85
L4	93	1,38	stud	5,0	8	7	Radial	150	600	467	E	204	0,86
LF1	90	1,38	-	-	-	-	-	150	600	390	P	113	0,77
LF2	86	1,38	stud	10,0	8	3	Radial	150	600	517	E	224	0,87
LF3	91	1,38	stud	10,0	8	5	Radial	150	600	541	E	295	0,92
LF4	88	1,38	stud	5,0	8	7	Radial	150	600	501	I	350	1,00

MR - Modo de ruptura

I - Ruptura por punção com superfície de ruptura cruzando as camadas de AC

P - Ruptura por punção

E - Ruptura por punção com superfície de ruptura externa à região de AC

* Superfície de ruptura adjacente ao lado maior do pilar e afastado do lado menor do pilar

P_u* - Carga correspondente à última leitura de flecha na região central da laje

As rotações experimentais das lajes L7 de Silva (2003) e L2 de Musse (2004), com oito linhas e três camadas de armadura de cisalhamento, foram iguais a 199×10^{-4} e 191×10^{-4} , respectivamente, e corresponderam a 97% (L7) e 93% (L2) da rotação da laje L3 ($\psi = 204 \times 10^{-4}$) desta pesquisa, também com oito linhas e três camadas de *studs*.

A Tabela 5.4 apresenta as principais características e resultados das lajes ensaiadas por Andrade (1999), Trautwein (2001), Borges (2004) e Trautwein (2006). Os resultados experimentais das rotações das lajes ensaiadas por Andrade (1999) tiveram valores diferentes aos encontrados neste trabalho, provavelmente devido ao número mais elevado de camadas de *studs* e à variação de seu posicionamento em relação à armadura de flexão. Das

lajes que não tiveram camadas intermediárias de *studs*, somente a L1, com oito linhas e seis camadas, apresentou um valor de rotação próximo ao da laje L6 desta pesquisa.

Tabela 5.4 – Principais características e resultados das lajes testadas por Andrade (1999), Trautwein (2001), Borges (2004) e Trautwein (2006).

Laje		A _s flexão ρ (%)	Armadura de cisalhamento					pilar (mm)	perím pilar	P _u (kN)	MR	ψ (x10 ⁻⁴)	P _u * P _u
n ^o	d (mm)		tipo	φ (mm)	n ^o de linhas	n ^o de camadas	distrib.						
ANDRADE (1999)													
Lajes com altura h=200 mm													
L1	164	1,20	stud	10,0	8	6	Radial	200	800	830	I	147	0,96
L2	164	1,20	stud	10,0	8	12	Radial	200	800	790	I	127	0,89
L3	154	1,20	stud	10,0	8 / 8	18 / 9	Radial	200	800	966	E	260	0,98
L4	164	1,20	stud	10,0	8 / 8	20 / 10	Radial	200	800	956	I	284	0,94
L5	154	1,20	stud	10,0	8	8	Radial	200	800	785	I	129	0,89
L6	164	1,20	stud	10,0	8 / 16	14 / 7	Radial	200	800	950	I	154	0,89
L7	164	1,20	stud	12,5	8 / 8	8 / 4	Radial	200	800	1090	E	232	0,92
L8	154	1,20	stud	12,5	8 / 8	8 / 4	Radial	200	800	1020	I	232	0,98
TRAUTWEIN (2001)													
Lajes com altura h=200 mm													
L1	159	1,20	stud	12,5	8 / 8	11 / 7	Radial	200	800	1050	I	164	0,86
L4	164	1,20	stud	16,0	8 / 8	11 / 7	Radial	200	800	1038	I	173	0,87
L9	154	1,20	stud	10,0	8 / 8	11 / 7	Radial	200	800	933	I	195	0,96
L2	139	1,20	estribo	6,3	8	3	Cruz	200	800	650	I	148	1,00
L3	164	1,20	estribo	8,0	8	3	Cruz	200	800	999	I	147	0,80
L5	159	1,20	estribo	6,3/8,0	16	4	Radial	200	800	975	E	219	0,92
L6	159	1,20	estribo	8,0	16	7	Radial	200	800	1087	E	218	0,83
L7	159	1,20	estribo	8,0	16	9	Radial	200	800	1160	E	280	0,86
L8	154	1,20	estribo	5,0	16	7	Radial	200	800	975	I	227	0,92
BORGES (2004)													
Lajes com altura h=200 mm													
Todas com furos, exceto L45_AC1 e L45_AC5													
L45FS_CG	154	1,14	-	-	-	-	-	200x600	1600	792	P	133	0,76
L45FD_CG	154	1,38	-	-	-	-	-	200x600	1600	750	P	126	0,87
L45FD	154	1,38	-	-	-	-	-	200x600	1600	776	P	119	0,77
L45FFS_CG	154	1,00	-	-	-	-	-	200x600	1600	750	P	156	0,87
L45FFD_CG	164	1,24	-	-	-	-	-	200x600	1600	850	P	126	0,76
L45FFD	144	1,55	-	-	-	-	-	200x600	1600	685	P	126	0,88
L45FFD_AC2	154	1,38	stud	10,0	22	4	Radial	200x600	1600	1230	E	296	0,89
L45FFD_AC3	154	1,38	stud	8,0	22	3	Radial	200x600	1600	1050	E	170	0,90
L45FFD_AC4	154	1,38	stud	8,0	12	3	Cruz	200x600	1600	885	E	148	0,79
L45FFD_AC5	154	1,38	stud	8,0	10	2	Radial	200x600	1600	837	E	126	0,90
L45_AC1	154	1,38	stud	10,0	12	4	Radial	200x600	1600	1250	E	252	0,92
L45_AC5	154	1,38	stud	8,0	12	2	Radial	200x600	1600	1092	E	200	0,92
TRAUTWEIN (2006)													
Lajes com altura h=200 mm													
E1	159	1,20	stud	10,0	12	11	Radial	200	800	1100	E	183	0,86
E2	159	1,20	stud	10,0	12 / 12	3 / 8 / 5	Par./Rad	200	800	990	E	191	0,96
E3	159	1,20	stud	10,0	12	11	Radial	200	800	1090	E	154	0,83
E4	154	1,20	stud	10,0	12	11	Radial	200	800	1205	E	170	0,79
E5	154	1,20	stud	10,0	12	11	Radial	200	800	1222	E	184	0,82
I6	159	1,20	stud	6,3	8 / 8	11	Radial	200	800	830	I	131	0,90
I7	159	1,20	stud	10,0	8 / 8	11	Radial	200	800	978	I	118	0,82
I8	159	1,20	stud	8,0	8 / 8	11	Radial	200	800	856	I	107	0,82
I9	161	1,20	stud	5,0	8	5	Radial	200	800	853	I	125	0,94
I10	161	1,20	stud	8,0	8	5	Radial	200	800	975	I	149	0,90
I11	161	1,20	stud	6,3	8	5	Radial	200	800	945	I	150	0,90

MR - Modo de ruptura
P - Ruptura por punção

I - Ruptura por punção com superfície de ruptura cruzando as camadas de AC
E - Ruptura por punção com superfície de ruptura externa à região de AC

As lajes L2 e L3 de Trautwein (2001) tiveram praticamente a mesma rotação, 148×10^{-4} , 3% maior que a rotação da laje L6 deste estudo, 143×10^{-4} . As superfícies de ruptura das lajes, que foram consideradas internas por Trautwein (2001), ocorreram entre a armadura de cisalhamento e a armadura de flexão e houve também o esmagamento do concreto na região de aplicação de carga. O tipo e o posicionamento da armadura transversal influenciaram a superfície de ruptura das lajes.

Das lajes de Borges (2004), as que tinham furos apresentaram rotações com valores próximos dos obtidos neste trabalho, de 126×10^{-4} a 170×10^{-4} , provavelmente devido ao fato da retangularidade de pilares também ser uma variável nas lajes da autora.

Observa-se que as lajes L45FFD_AC2 e L45_AC1 ensaiadas por Borges (2004) apresentaram cargas de ruptura parecidas entre si, 1230 kN e 1250 kN, respectivamente, apesar da presença de furos na L45FFD_AC2. O aumento do número de linhas de armadura de cisalhamento fez uma compensação no acréscimo de carga de ruptura e também na rotação da laje, 17% maior que da laje sem furos (L45_AC1).

A Figura 5.4 apresenta gráfico de rotação relativa em função do índice de armadura de cisalhamento ($\psi_u/\psi_{uLref} - \kappa$) das lajes ensaiadas nesta pesquisa e por Gomes (1991), Andrade (1999), Trautwein (2001), Silva (2003), Musse (2004), Borges (2004), Gomes e Andrade (1993) e Trautwein (2006). Nessa figura, ψ_{Lref} é a rotação da laje de referência de cada trabalho realizado.

Para um índice de armadura de cisalhamento (κ) até 0,7, onde a superfície de ruptura é interna à região de *studs*, verifica-se um aumento de ψ_u/ψ_{uLref} até o valor de aproximadamente 1,50 (lajes desta pesquisa), ou 2,20 (lajes ensaiadas por Gomes (1991), a partir do qual nota-se tendência de menor acréscimo de ψ_u/ψ_{uLref} . O aumento da altura efetiva das lajes influencia a rotação, como se pode observar ao comparar os resultados experimentais de Gomes (1991) com os das lajes deste trabalho.

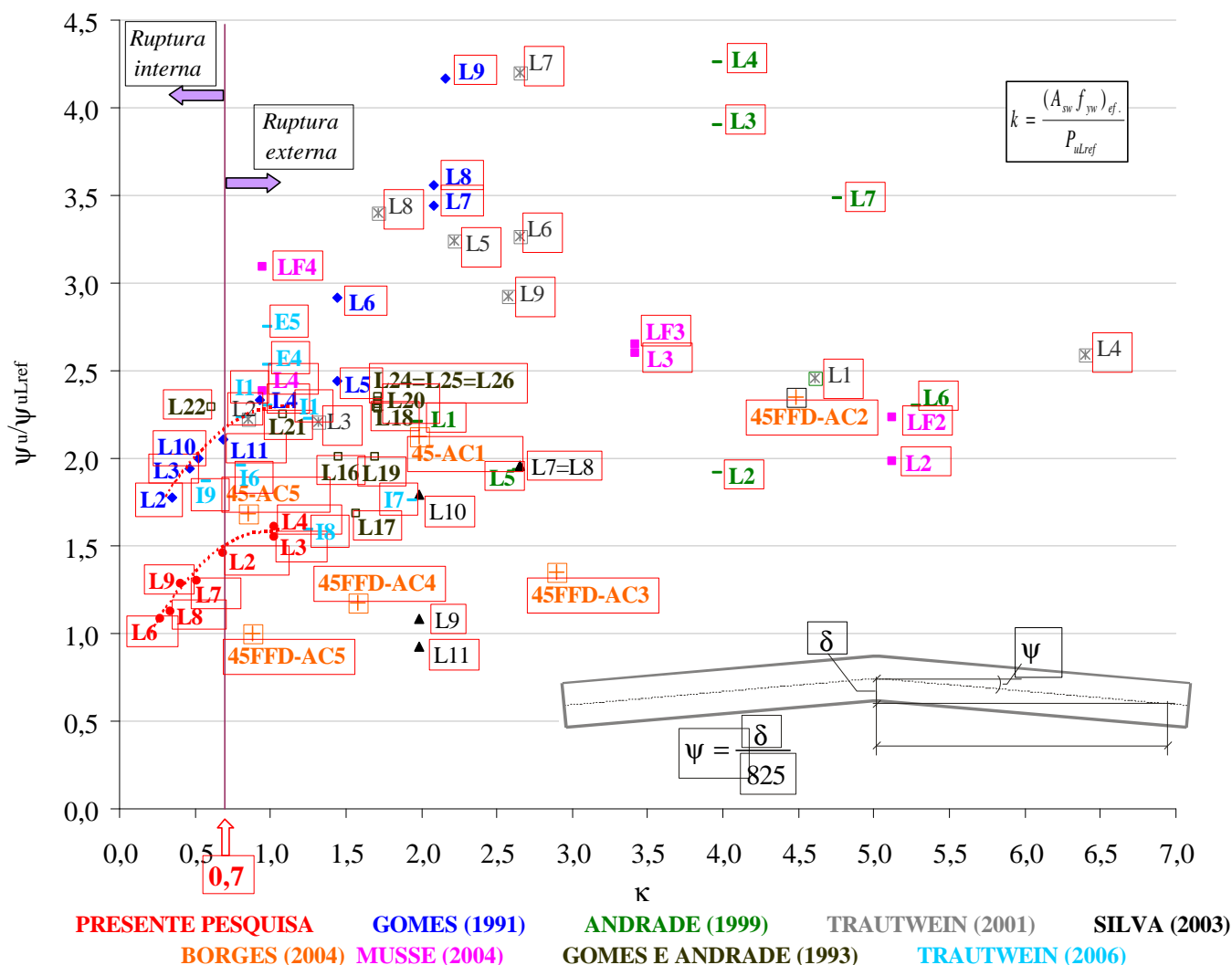


Figura 5.4 – Rotação relativa em função de κ para as lajes desta e de outras pesquisas

5.3 - DESLOCAMENTO VERTICAL

Na Figura 5.5 são apresentados os deslocamentos verticais centrais das lajes desta pesquisa, em função dos carregamentos.

Até o aparecimento das primeiras fissuras, com carga próxima de 50 kN, nota-se relação aproximadamente linear entre carga e deslocamento. Após o início da fissuração, essa relação continua podendo ser representada aproximadamente por uma reta, mas com inclinação maior com relação ao eixo das cargas. Nas lajes L7, L8 e L9, a partir de carga próxima de 300 kN, pode-se observar o início da fase plástica da estrutura.

As flechas centrais máximas das lajes com superfície de ruptura cruzando as camadas de armadura de cisalhamento foram menores que as das com superfície de ruptura externa às camadas de armadura de punção.

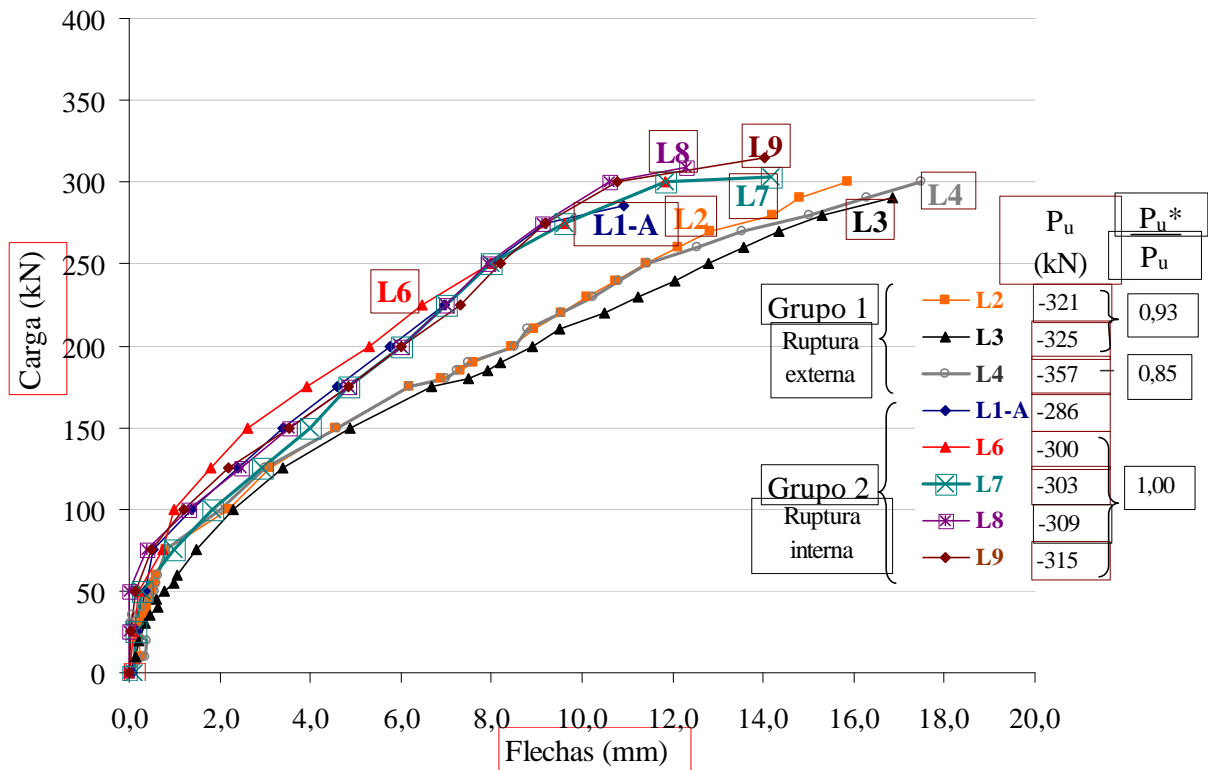


Figura 5.5 – Deslocamentos verticais centrais das lajes em função dos carregamentos

5.4 – CARGAS DE FISSURAÇÃO

A Tabela 5.5 apresenta valores de carga, deslocamento e deformação da armadura de flexão, quando do surgimento da primeira fissura radial (definida a partir do diagrama carga-flecha).

Em todas as lajes, 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 (P_f/P_u) 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. As deformações obtidas nos pontos monitorados da armadura de flexão (ϵ_{AF}) foram inferiores a 0,35 mm/m no Grupo 1 e 0,20 mm/m no Grupo 2, quando do surgimento das primeiras fissuras radiais.

Tabela 5.5 – Valores de carga, deslocamento e deformação da armadura de flexão relativos ao surgimento da primeira fissura radial.

Grupo	Laje	P_u (kN)	P_r (kN)	δ_r (mm)	δ_u (mm)	ϵ_{AF} (mm/m)	P_r/P_u (%)	P_u^*/P_u (%)
1	L2	321	45	0,60	15,9	< 0,30	14,0	93
	L3	325	45	0,40	16,9	< 0,30	13,8	93
	L4	357	45	0,31	17,5	< 0,35	12,6	85
2	L1-A	286	55	0,35	10,9	< 0,10	19,2	100
	L6	300	50	0,20	11,8	< 0,20	16,7	100
	L7	303	50	0,30	14,2	< 0,20	16,5	100
	L8	309	50	0,35	12,3	< 0,20	16,2	100
	L9	315	50	0,15	14,0	< 0,20	15,9	100

P_r - carga no instante da primeira fissura radial;

δ_r - deslocamento central na carga da 1ª fissura radial;

δ_u - deslocamento central máximo medido

ϵ_{AF} - deformações da barra de armadura de flexão na carga da 1ª fissura radial.

P_u^* - carga para a última medição realizada

Para um carregamento entre 75kN e 100 kN surgiram, em todas as lajes, as fissuras circunferenciais e, a partir daí, os elementos da armadura de cisalhamento passaram a apresentar maiores valores de 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.

Pode-se verificar na Tabela 5.6 que, no momento do aparecimento da primeira fissura circunferencial, as lajes apresentaram um deslocamento vertical central menor que 1,50 mm para o Grupo 1, e menor que 2,5 mm para o Grupo 2. Em relação à deformação na armadura de flexão, a laje de referência (L1-A) teve valor menor que 0,3 mm/m, as lajes com armadura de cisalhamento do Grupo 1 valores menores que 1,75 mm/m, e as lajes do Grupo 2 valores menores que 1,05 mm/m.

As deformações na armadura de cisalhamento, quando do aparecimento da primeira fissura circunferencial, variaram de 0,15 mm/m a 1,33 mm/m nas lajes do Grupo 1, e de 0,25 mm/m a 0,39 mm/m nas lajes do Grupo 2.

Tabela 5.6 – Comparações de carga, deslocamento e deformação das armaduras de flexão e cisalhamento, quando do surgimento da primeira fissura circunferencial.

Grupo	Laje	P_u (kN)	P_c (kN)	δ_c (mm)	δ_u (mm)	ϵ_{AF} (mm/m)	ϵ_{AC} (mm/m)	P_c/P_u (%)	P_u^*/P_u (%)
1	L2	321	75	0,82	15,9	< 1,35	< 0,15	23,4	93
	L3	325	75	1,50	16,9	< 0,30	< 0,25	23,1	93
	L4	357	75	0,80	17,5	< 1,75	< 1,33	21,0	85
2	L1-A	286	75	1,36	10,9	< 0,30	-	26,2	100
	L6	300	100	1,00	11,8	< 0,60	< 0,28	33,3	100
	L7	303	100	1,85	14,2	< 0,60	< 0,39	33,0	100
	L8	309	125	2,49	12,3	< 1,05	< 0,35	40,5	100
	L9	315	125	2,20	14,0	< 0,95	< 0,25	39,7	100

P_c - carga no instante da primeira fissura circunferencial visual;

δ_c - deslocamento central na carga da 1ª fissura circunferencial;

δ_u - deslocamento central máximo medido

ϵ_{AF} - deformações da barra de armadura de flexão na carga da 1ª fissura circunferencial

ϵ_{AC} - deformações da armadura de cisalhamento na carga da 1ª fissura circunferencial

P_u^* - carga para a última medição realizada

5.5 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA

a) Armadura de flexão

Considerando as médias dos valores de deformações na superfície superior e inferior das seções monitoradas nas barras de aço da armadura de flexão, observou-se que as maiores deformações foram na região de aplicação do carregamento.

Tomando-se as lajes L2 e L8, que exemplificam as lajes com armadura de cisalhamento de cada grupo, na Figura 4.14, onde se tem ϵ/ϵ_y em relação ao centro da laje L2, nota-se que o escoamento da armadura longitudinal se iniciou com carga próxima de 200 kN e que, para a carga de 300 kN ($0,93P_u$), o raio de escoamento abrangeu a região de *studs*, tendo valor aproximado de 3,0d. Quanto à deformação da armadura de flexão da laje L8 (Figura 4.15), verifica-se que o escoamento aconteceu com carga próxima de 250 kN ($0,81P_u$) e, com carga de 300 kN ($0,97P_u$) o raio de escoamento não ultrapassou a região do pilar. A posição da superfície de ruptura das lajes influenciou a deformação da armadura de flexão e o raio de escoamento.

b) Armadura de cisalhamento

As armaduras de cisalhamento monitoradas nas lajes L2, L3 e L4, com superfície de ruptura externa à região de *studs*, sofreram deformações que alcançaram no máximo 83% daquela correspondente ao escoamento ($\epsilon_y = 3,41$ mm/m), e aproximadamente 80% dos pontos monitorados tiveram deformação máxima menor que 50% de ϵ_y . As deformações últimas nos elementos da armadura de cisalhamento das lajes do Grupo 1 foram inferiores às do Grupo 2, provavelmente pelo fato de terem superfície de ruptura iniciando após a última camada de *studs*.

Na Figura 5.6 é mostrado gráfico de carga - deformação da armadura de cisalhamento da laje L6, que teve superfície de ruptura cruzando as camadas de *studs*.

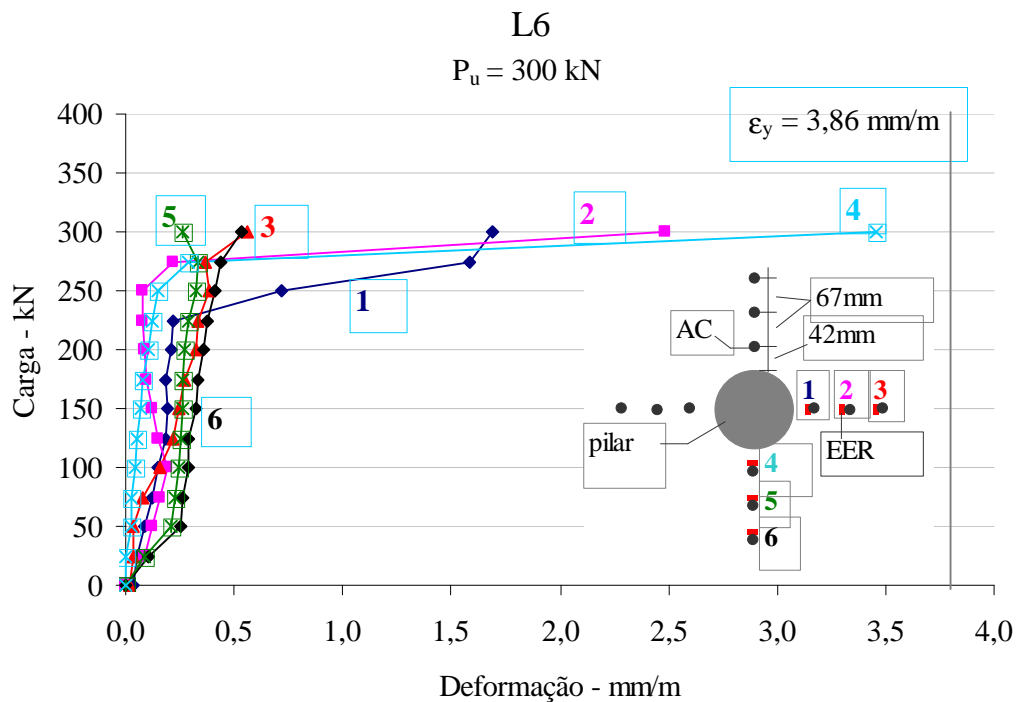


Figura 5.6 – Gráfico de Carga – deformação da armadura de cisalhamento da laje L6

No Grupo 2, os *studs* situados mais próximos ao pilar escoaram ou atingiram deformação próxima à de escoamento. Apesar de nos ensaios das amostras dos conectores a ruptura ter ocorrido na região da solda, nos testes das lajes isso não aconteceu. As superfícies de ruptura não mostraram sinal de deslizamento ou de ruptura nos conectores.

Apesar do gráfico da Figura 5.6 indicar deformações menores que a de escoamento (3,86 mm/m), os trechos com inclinações praticamente horizontais sugerem que em outros pontos da armadura ocorreu escoamento. A armadura transversal das lajes do Grupo 2 atingiu deformações próximas ou iguais ao valor correspondente ao escoamento, caracterizando a superfície de ruptura interna à região armada à punção.

c) Concreto

As deformações do concreto nas direções radial e tangencial monitoradas nas superfícies inferiores das lajes foram mais elevadas perto da área carregada e menores nos pontos mais afastados do pilar. Conforme o item 4.5.3, as deformações na direção tangencial foram maiores que na direção radial, com valores cerca de 9% da deformação última do concreto ($\epsilon_u = 0,0035$), para uma carga próxima de 95% da carga de ruptura das lajes.

Os resultados mostraram que o concreto, na região próxima ao pilar, teve deformação muito inferior à de esmagamento, independentemente do tipo de superfície de ruptura das lajes testadas.

As lajes testadas por outros autores que apresentaram indícios de esmagamento foram a LF4 de Musse (2004) e a L9 de Gomes (1991). No gráfico da Figura 5.4, verifica-se que a rotação da laje LF4 foi aproximadamente três vezes a da laje de referência da autora e a da laje L9 de Gomes (1991) cerca de quatro vezes a rotação da laje sem studs.

5.6 - COMPARAÇÕES ENTRE RESISTÊNCIAS À PUNÇÃO EXPERIMENTAIS E AVALIADAS

Na Tabela 5.7 são apresentadas as características das lajes ensaiadas nesta pesquisa (altura útil, resistência à compressão do concreto e armaduras longitudinal e de cisalhamento) necessárias para estimar as resistências à punção usando expressões de normas (ACI 318: 2005, CEB-FIP MC90, EC2:2004, NBR 6118:2003). No cálculo dessas resistências, adotou-se $\gamma = \gamma_c = \gamma_s = 1$ e o valor real de f_{yw} , desconsiderando-se o limite superior de f_{yw} indicado nas normas.

É importante ressaltar que as lajes não foram dimensionadas de acordo com as prescrições das normas, principalmente quanto ao espaçamento circunferencial entre as linhas de studs. Quanto às características geométricas das lajes, na ACI 318:2005, as lajes com

armadura de punção devem ter altura maior ou igual a 150 mm e as lajes ensaiadas tinham altura igual a 130 mm.

Em relação ao carregamento aplicado, as normas têm o compromisso de prever muitas outras condições não incluídas nos ensaios e que ocorrem numa laje real de vãos e pilares múltiplos, tais como: a existência eventual de cargas concentradas e assimétricas nas proximidades do pilar, forças horizontais, transferências de momentos, acréscimo de flechas devido à manutenção de cargas por um longo período, entre outros.

Tabela 5.7 – Características das lajes ensaiadas nesta pesquisa

Lajes		f_c MPa	d ±2mm	ρ %	$A_{sw}f_{yw}$ kN	S_0 mm	S_r mm	ângulo entre linhas	distrib. AC
Grupo 1	L1	39,0	83	1,38	-	-	-	-	-
	L2	39,0	89	1,38	98	42	42	45°	radial
	L3	39,0	87	1,38	98	42	42	45°	radial
	L4	39,0	89	1,38	98	42	42	45°	radial
Grupo 2	L1-A	38,7	92	1,38	-	-	-	-	-
	L5	38,9	89	1,38	39	42	42	90°	cruz
	L6	38,9	91	1,38	39	42	67	90°	cruz
	L7	39,1	89	1,38	49	42	42	72°	radial
	L8	39,2	90	1,38	49	42	67	72°	radial
	L9	39,4	91	1,38	59	42	67	60°	radial

S_0 - distância radial entre a primeira camada de armadura de cisalhamento e a face do pilar

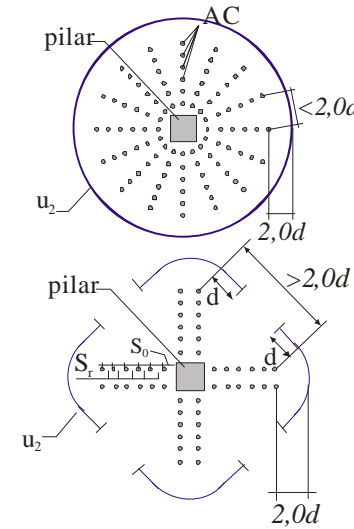
S_r - distância radial entre os *studs*

A Tabela 5.8 apresenta comparações entre as resistências experimentais e as estimadas segundo expressões das normas NBR 6118:2003 e da ACI 318:2005.

Tabela 5.8 – Comparações da carga experimental com a estimada pelas normas NBR 6118:2003 e ACI 318:2005.

NBR 6118/2003													
Lajes		u ₀ (mm)	u ₁ (mm)	u ₂ (mm)	V _{Rd} ⁽¹⁾ (kN)	V _{Rd} ⁽²⁾ (kN)	V _{Rd} ⁽³⁾ (kN)	V _{Rd,c} ⁽⁴⁾ (kN)	V _{calc} (kN)	P _u (kN)	P _u V _{calc}	Modo de ruptura	
												previsto	real
Grupo 1	L1	471	1514	-	-	-	-	218	218	203	0,93	punção	punção
	L2	471	1590	2117	373	492	320	240	320	321	1,00	externo	externo
	L3	471	1565	2356	364	479	351	233	351	325	0,93	externo	externo
	L4	471	1590	2542	373	492	384	240	373	357	0,96	adjacente	externo
Grupo 2	L1-A	471	1627	-	-	-	-	251	251	286	1,14	punção	punção
	L5	471	1590	1830	372	305	276	240	276	200	0,72	externo	interno
	L6	471	1615	1872	380	266	287	248	266	300	1,13	interno	interno
	L7	471	1590	2008	374	336	304	240	304	303	1,00	externo	interno
	L8	471	1602	2031	378	282	310	245	282	309	1,10	interno	interno
	L9	471	1615	2236	384	306	344	249	306	315	1,03	interno	interno

V_{calc} = menor valor entre (V_{Rd}⁽¹⁾, V_{Rd}⁽²⁾ e V_{Rd}⁽³⁾) e V_{calc} = V_{Rd,c}⁽⁴⁾



- (1) Zona Adjacente à face do pilar

$$V_{Rd} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \frac{f_{cks}}{g_c} u_0 d$$
- (2) Zona com armadura de punção

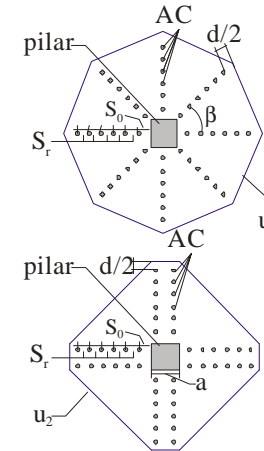
$$V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 \frac{d}{S_r} A_{sw} \frac{f_{yw}}{g_s} \text{sen } \alpha$$
- (3) Zona externa à região de AC

$$V_{Rd} = v_{Rd,c} u_2 d$$
- (4)
$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} u_1 d$$

u₀ = (pa); u₁ = p(a+4d); u₂ = perímetro a 2d da última camada de AC

ACI 318 / 2005												
Lajes		u ₀ (mm)	u ₁ (mm)	u ₂ (mm)	V _{Rd} ⁽²⁾ (kN)	V _{Rd} ⁽³⁾ (kN)	V _{Rd,c} ⁽⁴⁾ (kN)	V _{calc} (kN)	P _u (kN)	P _u V _{calc}	Modo de ruptura	
											previsto	real
Grupo 1	L1	471	732	-	-	-	126	126	203	1,61	punção	punção
	L2	471	751	1253	209	118	139	139	321	2,31	punção	externo
	L3	471	745	1504	202	139	135	139	325	2,34	externo	externo
	L4	471	751	1767	209	167	139	167	357	2,14	externo	externo
Grupo 2	L1-A	471	760	-	-	-	145	145	286	1,97	punção	punção
	L5	471	751	1417	154	134	139	139	200	1,44	punção	interno
	L6	471	757	1706	126	165	143	143	300	2,10	punção	interno
	L7	471	751	1461	175	138	139	139	303	2,18	punção	interno
	L8	471	754	1758	138	168	141	141	309	2,18	punção	interno
	L9	471	757	1792	153	174	144	153	315	2,05	interno	interno

V_{calc} = menor valor entre (V_{Rd}⁽²⁾ e V_{Rd}⁽³⁾) e V_{calc} = V_{Rd,c}⁽⁴⁾



- (2) Zona com Armadura de punção

$$V_{Rd} = \frac{1}{\gamma_c} \left[0,17 \sqrt{f_c} u_1 d + \frac{A_{sw} f_{yw} d}{S_r} \right] \leq \frac{1}{\gamma_c} (0,5 \sqrt{f_c} u_1 d)$$
- (3) Zona externa à região de AC

$$V_{Rd} = \frac{1}{\gamma_c} [0,17 (\sqrt{f_c} u_2 d)]$$

$$(4) \quad V_{Rd,c} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_c} (0,5 \sqrt{f_c} u_1 d) \\ \frac{1}{\gamma_c} \left[0,0833 \left(\frac{40d}{u_1} + 2 \right) \sqrt{f_c} u_1 d \right] \\ \frac{1}{\gamma_c} [0,333 \sqrt{f_c} u_1 d] \end{cases}$$

u₀ = (pa); u₁ = p(a+d); u₂ = perímetro a 0,5d da última camada de AC

Com exceção das lajes L3, L4, L5 e L7, as resistências experimentais (P_u) são maiores que as estimadas usando as expressões da NBR 6118:2003 (V_{calc}) e a relação P_u/V_{calc} varia de 0,93 (L3) a 1,13 (L6) para as lajes com armadura de cisalhamento. A laje L5 apresentou a relação P_u/V_{calc} igual a 0,72. As superfícies de ruptura previstas são iguais às obtidas nos resultados experimentais, exceto para as lajes L4, L5 e L7.

Os resultados da coluna de $V_{Rd}^{(1)}$ correspondem às estimativas de resistência à punção da NBR 6118:2003 na região adjacente ao pilar. Todos os valores calculados são superiores aos encontrados experimentalmente e, segundo essa norma, a superfície de ruptura nesse local ocorreria somente para a laje L4.

Os valores de $V_{Rd}^{(2)}$ referem-se a ruptura prevista para a região com armadura de cisalhamento. No Grupo 1, todos os valores de resistência experimentais são menores que os calculados segundo a NBR 6118:2003, não se prevendo superfície de ruptura cruzando as camadas de *studs*, que realmente não ocorreu. No Grupo 2, com exceção das lajes L5 e L7, as resistências estimadas segundo a norma foram inferiores às experimentais e a previsão da posição da superfície de ruptura está de acordo com o que ocorreu em todas as lajes.

Os $V_{Rd}^{(3)}$ expressam os resultados para superfície de ruptura externa à região de armadura de cisalhamento. No Grupo 1, os valores experimentais são superiores aos previstos para a laje L2 e inferiores para as lajes L3 e L4, e efetivamente houve superfície de ruptura externa, discordando somente na laje L4.

No Grupo 2, os valores estimados segundo a norma para a região externa à região armada à punção ($V_{Rd}^{(3)}$) foram superiores aos reais, com exceção da L6, e as estimativas de superfície de ruptura nessa região discordam dos resultados experimentais para as lajes L5 e L7.

Os valores de resistências obtidos nos testes de todas as lajes foram superiores aos encontrados pelas expressões da ACI 318:2005. Quanto às modalidades de rupturas previstas, observa-se que, nas lajes com armadura de cisalhamento do Grupo 1, a laje L2 teve superfície de ruptura externa à região de *studs* e, segundo as expressões da norma, a carga de ruptura seria igual à da laje sem armadura de cisalhamento. Para as lajes do Grupo 2, a localização das superfícies de ruptura prevista coincidiu com a experimental somente para a laje L9 e, para as demais lajes, a resistência a considerar segundo a norma é para lajes sem armadura de cisalhamento $V_{Rd,c}^{(4)}$.

Os valores de $V_{Rd}^{(2)}$ segundo a ACI 318:2005 são inferiores aos reais para todas as lajes testadas e o menor valor estimado foi para a L6 ($V_{Rd}^{(2)} = 124$ kN e $P_u = 300$ kN). O limite máximo de $1/2\sqrt{f_c}u_1d$ limita o cálculo da capacidade resistente.

Observando-se os valores de $V_{Rd}^{(3)}$, relativos a superfície de ruptura externa à região de armadura de punção, nota-se que os valores previstos segundo a ACI 318:2005 são inferiores aos encontrados nos testes e, no caso das lajes L2, L5 e L7, são também inferiores aos calculados para lajes sem armadura de punção $V_{Rd,c}^{(4)}$.

A Tabela 5.9 apresenta comparações entre as cargas experimentais e as estimadas usando as expressões do CEB-FIP MC 90 e EC 2:2004.

Para o CEB-FIP MC 90, tem-se valor da relação P_u/V_{calc} variando de 0,93 (L1 e L4) a 1,02 (L2) nas lajes do Grupo 1 e de 0,72 (L5) a 1,14(L1-A) nas lajes do Grupo 2. As resistências obtidas experimentalmente para as lajes com armadura de cisalhamento dos dois grupos estão próximas das estimadas.

Todos os valores de $V_{Rd}^{(1)}$, segundo o CEB-FIP MC 90, correspondentes a ruptura na zona adjacente ao pilar, foram superiores aos experimentais, e não foram previstas superfície de ruptura nessa região.

Os valores experimentais de todas as lajes do Grupo 1 foram inferiores aos de $V_{Rd}^{(2)}$, relativos à superfície de ruptura na região com armadura de cisalhamento. Para o Grupo 2, com exceção das lajes L5 e L7, os resultados dos testes concordam com as estimativas de modo de ruptura e os resultados experimentais foram superiores aos estimados.

Os valores calculados usando as expressões do CEB-FIP MC 90 para a região externa à armadura de cisalhamento $V_{Rd}^{(3)}$, para o Grupo 1, são superiores aos experimentais, exceto para a L2, e variaram de 316 kN (L2, $P_u = 321$ kN) a 384 kN (L4, $P_u = 357$ kN). A localização da superfície de ruptura prevista para essas lajes coincide com a experimental. Para o Grupo 2, os valores de resistência previstos estão próximos aos obtidos nos testes, variando de 276 kN (L5, $P_u = 300$ kN) a 344 kN (L9, $P_u = 315$ kN). Segundo a norma, ter-se-ia superfície de ruptura nessa região para as lajes L5 e L7, e isso não aconteceu nos testes destas lajes.

Das expressões do EC2:2004, a referente a $V_{Rd}^{(3)}$ é diferente das do CEB-FIP MC 90, devido à diferença nas definições do perímetro externo às camadas de armadura de cisalhamento (u_2).

A Figura 5.7 apresenta a comparação gráfica de carga de ruptura experimental com as estimadas pelas expressões das normas NBR 6118:2003, ACI 318:2005, CEB-FIP MC 90 e EC2:2004.

Na Figura 5.7 e nas tabelas 5.8 e 5.9 nota-se que as expressões da ACI 318:2005 geraram os maiores valores da relação P_u/V_{calc} . As expressões do CEB-FIP MC 90 e do EC2:2004 forneceram resistências mais próximas das experimentais para o Grupo 2 e os menores valores da relação P_u/V_{calc} para as lajes primeiro grupo.

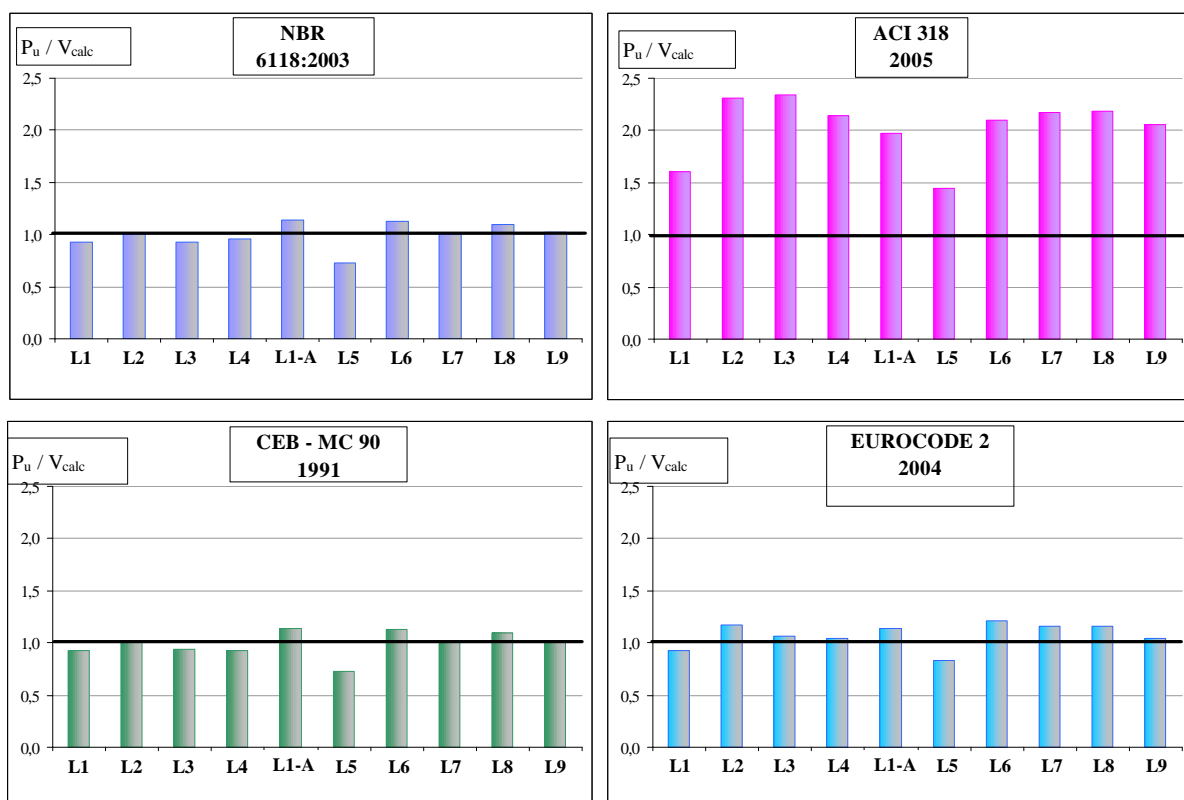


Figura 5.7 – Comparação de carga experimental com a estimada pelas expressões da NBR 6118:2003, ACI 318:2005, CEB - FIP MC 90 e EC 2:2004.

A laje L5, devido aos problemas anteriormente citados, foi a laje que teve menores valores de P_u/V_{calc} .

5.7 – AVALIAÇÃO DE ARMADURA MÍNIMA DE CISALHAMENTO PARA LAJES COM SUPERFÍCIES DE RUPTURA CRUZANDO AS CAMADAS DE *STUDS*.

Diversas variáveis podem influenciar a carga de ruptura e a rotação de lajes-cogumelo de concreto armado, tais como a taxa de armadura de flexão, altura efetiva, resistência do concreto, perímetro da área carregada, existência de furos, excentricidade, entre outras.

Foram avaliados neste trabalho os acréscimos de carga e rotação das lajes com armadura de punção em relação à laje de referência, e é feita uma proposta inicial de índice de armadura mínima de cisalhamento, que deverá servir de ponto de partida para estudos posteriores. Na Tabela 5.10 é apresentada uma relação entre a rotação última de cada laje com a rotação última da laje de referência, L1A, (ψ_u/ψ_{L1-A}) . Também é feita uma comparação entre as resistências últimas das lajes ensaiadas com a da laje de referência (P_u/P_{uL1-A}) .

Tabela 5.10– Relações (ψ_u/ψ_{L1-A}) e (P_u/P_{uL1-A}) das lajes desta pesquisa

Lajes		$\frac{\psi_u}{\psi_{uL1-A}}$	$\frac{P_u}{P_{uL1-A}}$	$A_{sw}f_{yw}$ kN	$(A_{sw}f_{yw})_{ef.}$ kN	κ	Superfície de ruptura
Grupo 1	L2	1,46	1,12	98	196	0,69	externa
	L3	1,55	1,14	98	294	1,03	externa
	L4	1,61	1,25	98	294	1,03	externa
Grupo 2	L6	1,08	1,05	39	78	0,27	interna
	L7	1,30	1,06	49	147	0,51	interna
	L8	1,13	1,08	49	98	0,34	interna
	L9	1,29	1,10	59	118	0,41	interna

$$\kappa = (A_{sw}f_{yw})_{ef.} / P_{L1-A}$$

Observa-se que as lajes do Grupo 1, com superfície de ruptura externa às camadas de armadura de cisalhamento, apresentaram valores de acréscimos de rotações (ψ_u/ψ_{L1-A}) , no mínimo, maiores que 46%, e acréscimo mínimo de carga (P_u/P_{uL1-A}) igual a 12%, ambos acréscimos substancialmente maiores que os das lajes do Grupo 2, com superfícies de ruptura interna.

Nas lajes do Grupo 2, verifica-se que o valor de κ igual a 0,27 (L6) proporcionou os menores acréscimos de carga última e de rotação, se comparados com os resultados de todas as demais lajes ensaiadas. Nas lajes L7 e L8, com valores de κ iguais a 0,51 e 0,34, respectivamente, pode-se observar que o acréscimo de rotação da laje L8 (13%) foi

significativamente menor que da laje L7 (30%) e, embora o valor de κ da laje L8 tenha sido menor que o da laje L7, os aumentos nas cargas dessas duas lajes foram praticamente iguais, 6% (L7) e 8% (L8).

Apesar das lajes L7 e L8 terem tido cinco linhas e três camadas de armadura de cisalhamento, o espaçamento circunferencial utilizado entre os *studs* para a laje L8 foi de 295 mm entre os elementos das camadas mais externas, maior que o permitido nas normas ($2d \approx 180$ mm). Esse distanciamento circunferencial pode ter sido o fator que interferiu na rotação dessa laje. O valor do índice de armadura de cisalhamento da laje L8 foi inferior ao da laje L7 possivelmente devido à superfície de ruptura não ter, eventualmente, cruzado todos os elementos da terceira camada de *studs*.

A laje L9, com o índice κ igual a 0,41, apresentou acréscimo de rotação de 29%, praticamente o mesmo da L7, e um aumento de carga igual a 10%. A distância radial utilizada entre os *studs* na laje L9 foi igual à da laje L8 ($\sim 0,75d$), mas devido ao seu número de linhas ter sido igual a seis, maior que das demais lajes desse grupo, o espaçamento circunferencial entre os elementos mais externos da laje L9 foi igual a 251 mm, menor que o da laje L8, e não interferiu significativamente no acréscimo de rotação.

A Figura 5.8 apresenta gráfico do índice de armadura transversal (κ) em função da altura efetiva (d) das lajes deste trabalho e das lajes ensaiadas por Gomes (1991) com superfície de ruptura atravessando a armadura transversal.

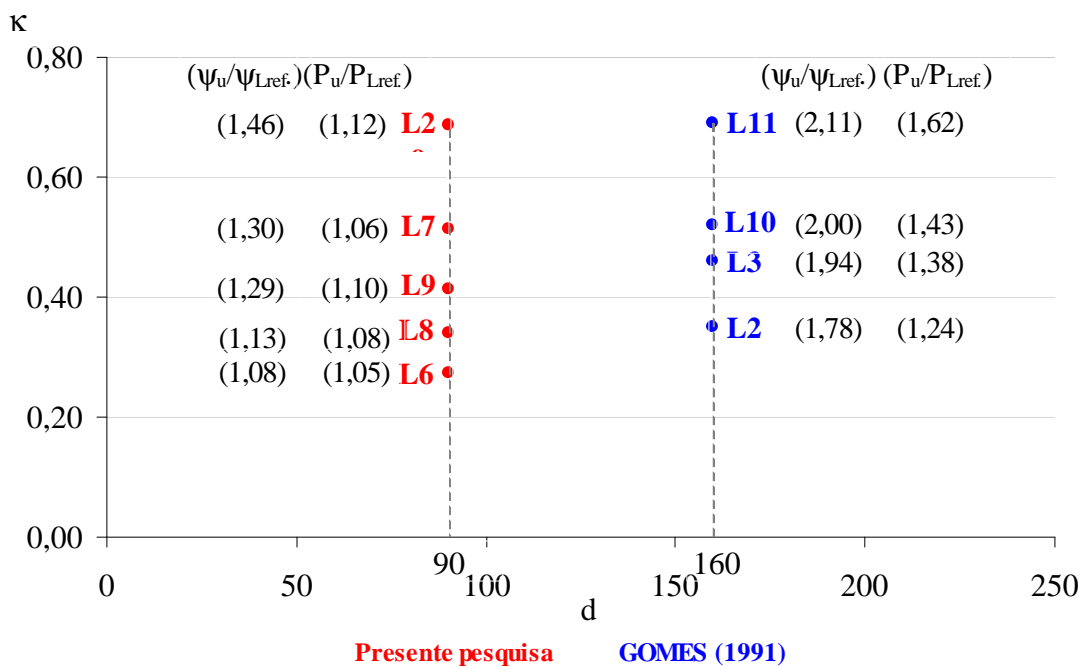


Figura 5.8 – Gráfico de κ em relação à altura efetiva das lajes

Observa-se na Figura 5.8 que nas lajes com alturas efetivas em torno de 90 mm os acréscimos máximos de rotação para as lajes com superfície de ruptura interna (lajes L6, L7, L8 e L9) ficaram entre 8% de 30% e os de carga variaram entre 5% e 10%. Como a laje L2 teve superfície de ruptura externa e a laje L7 superfície interna, mas com pequeno acréscimo de carga (6%), foi considerado que o valor de κ referente à armadura mínima dessas lajes deve ficar entre os das lajes L7 e L2 desta pesquisa, deve ser em torno de 0,60. Os valores indicados para o índice κ devem ser considerados tão somente para lajes com as características desta pesquisa e das de Gomes (1991) quanto ao tipo e posicionamento da armadura transversal.

6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões baseadas nas análises dos dez ensaios realizados, simulando lajes-cogumelo de concreto armado. As principais variáveis estudadas foram o número de camadas de armadura de cisalhamento, a área de armadura de cisalhamento em cada camada circunferencial e diâmetro dos *studs*.

As dimensões das lajes e as variáveis utilizadas na pesquisa foram definidas em função da utilização prática, de pesquisas anteriores e das condições disponíveis no laboratório.

6.1 - CONCLUSÕES

Os deslocamentos verticais das lajes, para níveis de carga maiores que 100kN, variaram linearmente com a distância ao centro das lajes, aumentaram com o incremento de carga e os valores máximos foram registrados nos pontos mais próximos da área carregada.

Nas lajes com superfície de ruptura cruzando as camadas de armadura de cisalhamento, as flechas centrais foram menores que as das lajes com superfície de ruptura externa às camadas de *studs*.

As armaduras de cisalhamento monitoradas nas lajes com superfície de ruptura externa à região de *studs*, tiveram deformações que alcançaram no máximo 83% daquela correspondente ao escoamento ($\epsilon_y = 3,41\text{mm/m}$).

A armadura de cisalhamento das lajes do Grupo 2 atingiu maiores deformações, próximas ou iguais à correspondente ao escoamento, caracterizando a superfície de ruptura interna à região armada à punção.

As leituras dos extensômetros colados no concreto na direção tangencial foram maiores que na radial e apresentaram valores de aproximadamente 9% da deformação última do concreto ($\epsilon_u = 0,0035$), para uma carga próxima de 95% da carga de ruptura das lajes.

As primeiras fissuras observadas visualmente foram as radiais e surgiram com 14% da carga de ruptura para as lajes com superfície de ruptura externa à armadura de cisalhamento e com 15% a 17% da carga de ruptura para as lajes com superfície cruzando as camadas de *studs*.

As fissuras circunferenciais surgiram com 21% (L4) a aproximadamente 23% (L2 e L3) da carga de ruptura para as lajes com superfície externa à região de *studs* e com 33% (L7) a 40% (L8) da carga de ruptura para as lajes com superfície interna à armadura de cisalhamento.

A utilização da armadura de cisalhamento provocou um acréscimo da resistência última nas lajes ensaiadas e a variação do índice de da armadura de punção proporcionou ganhos de resistência e superfícies de ruptura diferenciados no Grupo 1 e no Grupo 2.

No Grupo 1, com índice de armadura de cisalhamento maior que 0,7, a superfície de ruptura foi externa à região de *studs* e os acréscimos de carga, em relação à laje L1-A, foram entre 12% e 25%. No Grupo 2, cujo índice de *studs* foi menor que 0,7, a superfície de ruptura foi interna à região de armadura de punção, e o acréscimo de carga ficou entre 5% e 10%.

O índice κ de 0,6 foi definido como sendo o mínimo para lajes com altura efetiva igual a 90 mm, proporcionou acréscimos de carga última e rotações iguais a, respectivamente, 6% e 30%.

6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar um estudo de lajes-cogumelo com dimensões iguais às utilizadas nesta pesquisa e índices de armadura de cisalhamento entre 0,5 e 0,7 com variação da taxa de armadura de flexão (r), objetivando a verificação do comportamento das lajes quanto às superfícies de ruptura.

Fazer ensaios de lajes com diferentes alturas e comprimentos e mesmos índices de armadura de cisalhamento para verificação da influência dessas variáveis (L e h) no acréscimo de carga e na rotação das lajes.

Ensaier lajes semelhantes à L9 desta pesquisa, com seis linhas e três camadas de armadura de cisalhamento, fazendo variações da distância e do diâmetro dos *studs*. As possíveis variáveis para esse estudo encontram-se no Anexo 4.

Utilizar camadas adicionais de armadura de cisalhamento em lajes com oito linhas e número de camadas igual a dois e três, de forma que o índice de *studs* fique maior que 0,7, com espaçamento diferenciado e valor máximo de 1,0d em relação à última camada, para verificar a carga residual pós-ruptura das lajes. Espera-se nesse tipo de distribuição uma

superfície de ruptura externa às primeiras camadas de *studs*, como nos ensaios realizados nas lajes L2 e L3 desta pesquisa, e interna às camadas adicionais, garantindo uma carga residual pós-ruptura. O Anexo 4 apresenta o detalhe dessa distribuição de armadura de cisalhamento sugerida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 318 (2005). Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318 –02) and Commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005, 391 p.

ANDRADE, M.A.S. “Punção em lajes cogumelo – Estudo do posicionamento da armadura de cisalhamento em relação à armadura de flexão”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999, 176 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - Projeto de Obras de Concreto Armado – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-8522/84 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-6152/92 – Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –NBR 7480/96 - Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, 1996.

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

BORGES, L. L. J. “Comportamento ao Puncionamento de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares e Furos de Grandes Dimensões”. Tese de Doutorado, Publicação E. TD-002A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004, 367 p.

BRAESTRUP, M. W. REGAN, P.E. “Punching shear in reinforced concrete: a state of the art report”. CEB Bulletin d’Information, n°168. 1985.

CEB-FIP MC90 (1991). “CEB-FIP Model Code 1990: Final Draft ”. Bulletin D’Information 204, Committe Euro-International du Beton, Lousanne, July 1991.

EUROCODE 2 (2004). “Design of concrete structures – Part1: General Rules and Rules for Buildings”. European Prestandard EN 1992-1-1:2004. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2004, 253 p.

GOMES, R. B. “Punching Resistance of Reinforced Concrete Flat Slabs With Shear Reinforcement”. London, October, 1991, 185 p. PhD Thesis. The Polytechnic of Central London, 1991.

GOMES, R. B.; ANDRADE, M.A.S. de. “Punching in Reinforced Concrete Flat Slabs with Holes. In: Proceedings of Developments in Computer Aided Design and Modeling for Structural Engineering”. Edinburgh-UK, 1995, p.185-193.

KINNUNEN, S. “Punching of Concrete Slabs with Two-Way Reinforcement With Special Reference to Dowel Effect and Deviation of Reinforcement from Polar Symmetry”. Meddelande NR 41. Institutionen for Byggnadsstatik, Kungliga Tecniska Högskolan, Stockholm, 1963.

KINNUNEN, S., NYLANDER, H. “Punching of concrete slabs without shear reinforcement”. Stockholm, Sweden. Meddelander nr. 38 fran. Inst. för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolands Handligar, Nr.158, 112p, 1960.

MacGREGOR. J. G. “Reinforced Concrete Mechanics and Design”, Editora Prentice-Hall, 1988.

MUSSE, T. H. “Punção em Lajes Cogumelo – Fibras de Aço e Armaduras de Cisalhamento”. Dissertação de Mestrado em engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.

SHEHATA, I. A. E. M. “Theory of Punching in Concrete Slabs”. London, October, 1985. PhD Thesis. The Polytechnic of Central London, 1985.

SHEHATA, I. A. E. M. “Rational Method for Designing RC Slabs to Resist Punching”. *ASCE Journal of Structural Engineering*. v. 116(7), Jul.1990, p.2055-2060.

SILVA, J. A. “Punção em Lajes Cogumelo: Pilares Retangulares, Furos e Armadura de Cisalhamento”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Julho 2003, 171 p.

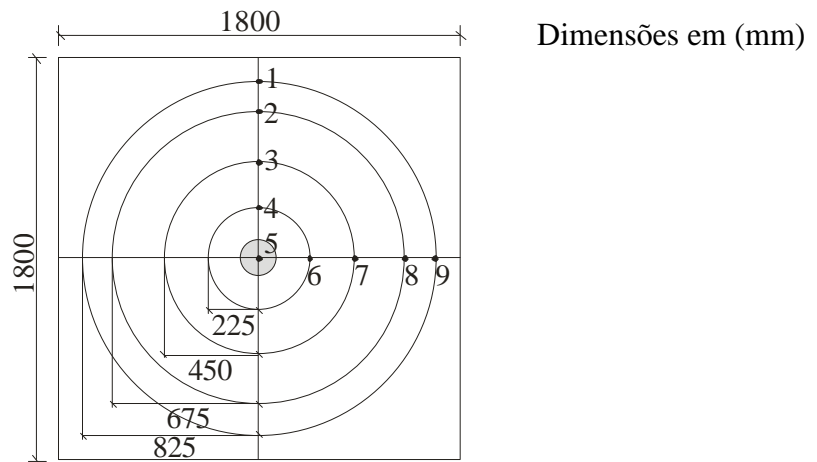
TRAUTWEIN, L. M. “Punção em lajes cogumelo de concreto armado com armadura de cisalhamento tipo “stud” interno e tipo “estribo inclinado”. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2001, 168 p.

TRAUTWEIN, L. M. “Punção em lajes cogumelo de concreto armado: Análise experimental e numérica”. Tese de Doutorado em Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006, 350 p.

ANEXO 1

RESULTADOS DOS ENSAIOS – FLECHAS E DEFORMAÇÕES

1 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS



L1									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,05	0,02	0,12	0,39	0,08	0,21	0,15	0,00
50	0,00	0,07	0,33	0,71	1,41	0,66	0,22	0,07	0,00
75	0,00	0,24	1,30	2,19	2,25	2,46	1,71	0,15	0,00
100	0,00	0,57	2,10	3,47	3,34	3,75	2,59	0,28	0,00
125	0,00	0,92	3,00	4,94	5,08	5,19	3,49	0,80	0,00
150	0,00	1,23	3,74	6,11	7,09	6,40	4,16	1,10	0,00
175	0,00	1,54	4,48	7,38	8,65	7,59	5,00	1,32	0,00
200	0,00	1,87	5,25	8,41	11,33	8,97	6,00	1,87	0,00
203									

L2									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,25	0,27	-0,06	0,20	0,26	0,01	-0,14	0,00
50	0,00	0,18	0,39	0,70	0,50	0,65	0,60	0,13	0,00
75	0,00	0,50	1,35	2,07	0,82	2,39	1,35	0,39	0,00
100	0,00	0,93	1,80	2,00	2,20	1,90	1,80	0,23	0,00
125	0,00	1,20	3,13	4,00	3,12	3,90	3,30	0,33	0,00
150	0,00	1,63	3,50	4,20	4,55	4,00	3,50	0,46	0,00
175	0,00	1,67	4,53	7,28	6,19	7,42	4,37	0,22	0,00
200	0,00	1,81	5,04	8,17	8,45	8,24	4,89	0,76	0,00
250	0,00	2,35	6,43	10,57	11,42	10,62	6,43	2,09	0,00
300	0,00	3,02	8,21	13,88	15,86	13,69	8,27	3,08	0,00
321									

L3									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	-0,42	-0,31	-0,31	0,23	-0,30	-0,26	-0,27	0,00
50	0,00	0,10	0,18	0,35	0,79	0,30	0,06	0,10	0,00
75	0,00	0,26	1,22	2,15	1,50	2,10	1,30	0,33	0,00
100	0,00	0,46	1,87	2,20	2,30	2,20	2,12	0,75	0,00
125	0,00	0,71	2,18	4,69	3,39	4,66	3,05	1,16	0,00
150	0,00	0,87	3,39	4,70	4,86	4,70	3,97	1,62	0,00
175	0,00	1,10	4,07	7,13	6,68	7,14	4,10	1,88	0,00
200	0,00	1,31	4,71	8,26	8,90	8,28	4,85	2,19	0,00
250	0,00	1,63	6,20	10,67	12,80	10,58	6,42	2,91	0,00
290	0,00	2,50	7,17	13,30	16,86	13,21	7,53	2,85	0,00
325									

L4									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	-0,03	0,17	0,12	0,38	0,05	-0,01	-0,25	0,00
50	0,00	0,32	0,45	0,42	0,55	0,42	0,35	0,30	0,00
75	0,00	0,83	1,44	2,03	0,80	1,58	0,85	0,02	0,00
100	0,00	1,00	1,60	2,50	2,50	2,50	1,68	0,35	0,00
125	0,00	1,46	3,01	4,55	3,00	4,11	2,40	0,81	0,00
150	0,00	1,86	3,50	4,40	4,60	4,40	3,31	0,63	0,00
175	0,00	2,18	4,55	5,80	6,17	5,87	3,61	0,56	0,00
200	0,00	2,47	4,58	7,80	8,50	7,73	4,23	1,45	0,00
250	0,00	3,11	7,00	10,77	11,46	10,38	5,83	2,30	0,00
300	0,00	3,82	9,00	13,62	17,50	12,86	7,55	2,96	0,00
357									

L1-A									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,62	0,96	0,77	0,18	0,77	0,96	0,65	0,00
50	0,00	-0,72	-0,03	0,53	0,34	0,53	-0,03	-0,69	0,00
75	0,00	-0,66	0,29	0,78	0,54	0,78	0,29	-0,93	0,00
100	0,00	0,28	0,59	1,34	1,36	1,34	0,59	0,30	0,00
125	0,00	0,44	1,15	2,15	2,41	2,15	1,15	0,45	0,00
150	0,00	0,66	1,68	3,02	3,39	3,02	1,68	0,65	0,00
175	0,00	0,68	2,24	3,88	4,60	3,88	2,24	0,68	0,00
200	0,00	0,80	2,76	4,61	5,78	4,61	2,76	0,82	0,00
225	0,00	0,90	3,43	4,92	6,98	4,92	3,43	0,92	0,00
250	0,00	1,00	3,71	5,50	7,99	5,30	3,71	1,05	0,00
275	0,00	1,20	3,80	7,00	9,18	6,00	3,80	1,20	0,00
286	0,00	1,22	3,95	7,20	10,91	7,20	3,95	1,25	0,00

L5									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	-0,55	-0,41	-0,20	0,16	-0,18	-0,41	-0,55	0,00
50	0,00	-0,19	0,14	0,65	0,62	0,62	0,14	-0,19	0,00
75	0,00	0,27	0,91	1,72	1,71	1,65	0,91	0,27	0,00
100	0,00	0,65	1,57	2,75	2,49	2,56	1,57	0,65	0,00
125	0,00	1,11	2,39	4,01	3,55	3,65	2,39	1,11	0,00
150	0,00	1,52	3,11	5,09	5,13	4,90	3,11	1,52	0,00
175	0,00	1,86	3,74	6,08	6,71	5,52	3,74	1,86	0,00
200	0,00	1,90	4,11	6,69	9,48	6,62	4,11	1,90	0,00

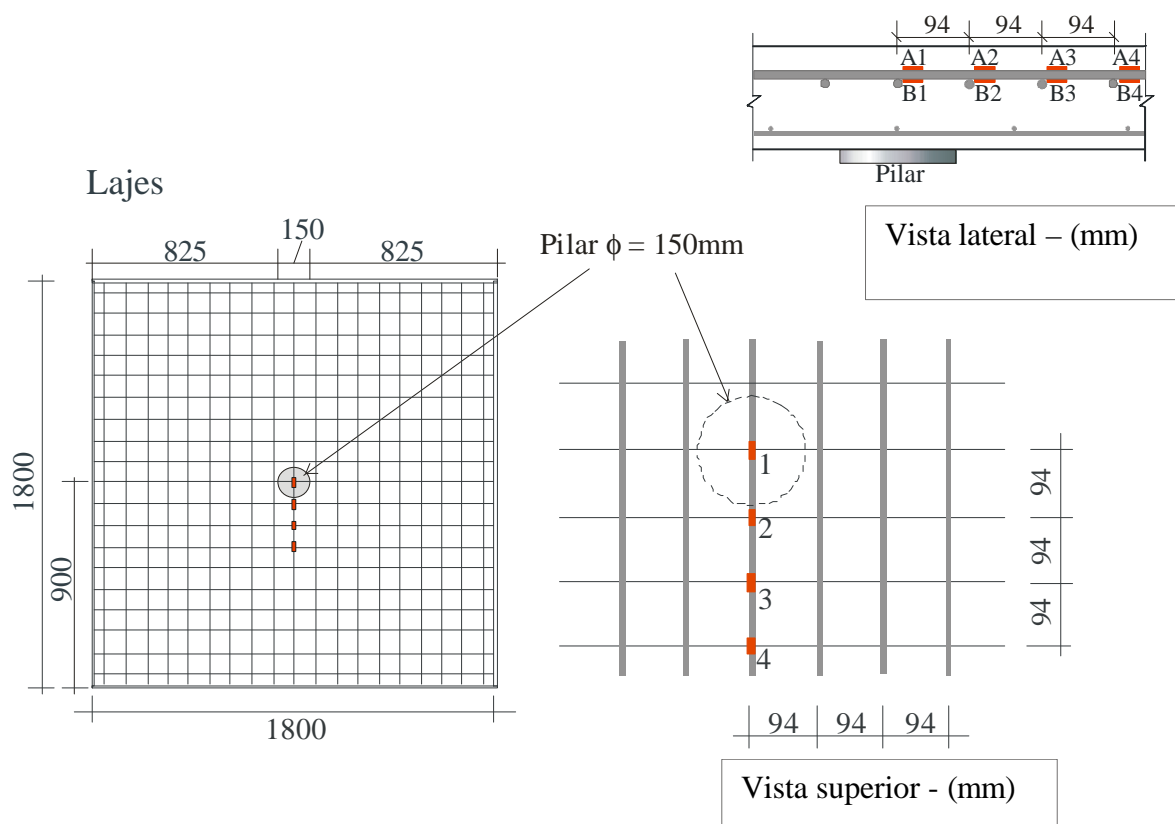
L6									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,28	0,38	0,60	0,10	0,60	0,35	0,20	0,00
50	0,00	0,48	0,52	0,82	0,20	0,82	0,50	0,45	0,00
75	0,00	0,52	0,60	0,64	0,74	0,66	0,56	0,50	0,00
100	0,00	0,88	1,12	0,85	1,00	0,86	1,10	0,79	0,00
125	0,00	1,14	1,73	1,75	1,80	1,68	1,60	1,00	0,00
150	0,00	1,39	2,32	2,33	2,62	2,34	2,30	1,28	0,00
175	0,00	1,67	3,11	3,34	3,91	3,37	3,10	1,50	0,00
200	0,00	1,90	3,77	4,80	5,30	4,85	3,70	1,85	0,00
225	0,00	2,11	4,32	5,18	6,47	5,26	4,30	2,00	0,00
250	0,00	2,45	5,18	6,80	8,00	6,85	5,00	2,35	0,00
275	0,00	2,65	5,87	7,35	9,60	7,37	5,80	2,60	0,00
300	0,00	2,68	6,00	9,00	11,82	9,02	6,01	2,65	0,00

L7									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos defletores em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,05	0,10	0,11	0,14	0,11	0,10	0,05	0,00
50	0,00	0,10	0,15	0,20	0,30	0,18	0,15	0,10	0,00
75	0,00	0,43	0,37	0,80	1,00	0,80	0,37	0,43	0,00
100	0,00	0,51	0,85	1,25	1,85	1,25	0,85	0,51	0,00
125	0,00	0,67	1,40	2,87	2,95	2,87	1,40	0,67	0,00
150	0,00	0,81	1,96	3,72	4,00	3,72	1,96	0,81	0,00
175	0,00	0,78	2,45	4,40	4,85	4,40	2,45	0,78	0,00
200	0,00	0,84	3,03	5,26	6,00	5,26	3,03	0,84	0,00
225	0,00	0,98	3,58	6,16	7,00	6,16	3,58	0,98	0,00
250	0,00	1,13	4,22	7,06	8,00	7,06	4,22	1,13	0,00
275	0,00	1,34	4,76	8,04	9,60	8,04	4,76	1,34	0,00
300	0,00	1,56	5,25	9,01	11,82	9,01	5,25	1,56	0,00
303	0,00	1,79	6,03	10,36	14,18	10,36	6,03	1,79	0,00

L8									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos defletores em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	-0,18	0,32	0,20	0,00	0,20	0,32	-0,18	0,00
50	0,00	-0,11	0,40	0,37	0,01	0,37	0,40	-0,11	0,00
75	0,00	-0,04	0,59	0,69	0,40	0,69	0,59	-0,04	0,00
100	0,00	0,13	0,95	1,27	1,30	1,27	0,95	0,13	0,00
125	0,00	0,36	1,52	2,16	2,49	2,16	1,52	0,36	0,00
150	0,00	0,53	2,03	2,95	3,52	2,95	2,03	0,53	0,00
175	0,00	0,75	2,58	3,81	4,85	3,81	2,58	0,75	0,00
200	0,00	0,98	3,13	4,69	6,00	4,69	3,13	0,98	0,00
225	0,00	1,14	3,67	5,56	7,00	5,56	3,67	1,14	0,00
250	0,00	1,34	4,22	6,46	7,90	6,46	4,22	1,34	0,00
275	0,00	1,55	4,75	7,18	9,10	7,18	4,75	1,55	0,00
300	0,00	1,67	5,14	7,66	10,60	7,66	5,14	1,67	0,00
309	0,00	1,74	5,39	9,13	12,30	9,13	5,39	1,74	0,00

L9									
CARGA	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
kN	Posição dos deflectômetros em relação ao centro da laje (mm)								
	825	675	450	225	0,0	225	450	675	825
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00
50	0,00	0,02	0,12	0,13	0,15	0,13	0,12	0,02	0,00
75	0,00	0,04	0,35	0,44	0,50	0,44	0,35	0,04	0,00
100	0,00	0,10	0,76	0,92	1,20	0,92	0,76	0,10	0,00
125	0,00	0,36	1,26	1,79	2,20	1,79	1,26	0,36	0,00
150	0,00	0,62	1,84	2,78	3,52	2,78	1,84	0,62	0,00
175	0,00	0,93	2,35	3,74	4,85	3,74	2,35	0,93	0,00
200	0,00	1,30	2,94	4,84	6,00	4,84	2,94	1,30	0,00
225	0,00	1,58	3,52	5,98	7,30	5,98	3,52	1,58	0,00
250	0,00	1,80	4,01	6,81	8,20	6,81	4,01	1,80	0,00
275	0,00	2,04	4,53	7,70	9,20	7,70	4,53	2,04	0,00
300	0,00	2,26	5,06	8,57	10,76	8,57	5,06	2,26	0,00
315	0,00	1,74	5,39	10,92	14,02	10,92	5,39	1,74	0,00

2 – DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO



OBS: Cada ponto de leitura possuía dois extensômetros. Para as tabelas a seguir: A – leitura na superfície superior da barra; B – leitura na superfície inferior da barra.

L1								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,1685	0,0460	0,0315	0,0190	0,0340	-	0,0423	0,0425
20	0,2359	0,0771	0,0469	0,0371	0,0579	-	0,0580	0,0451
50	0,7780	0,3069	0,2728	0,2444	0,2108	-	0,2725	0,2577
75	1,8604	0,9984	0,8700	0,8086	0,5926	-	0,8304	0,9075
100	2,3987	1,3591	1,1519	1,1051	0,7994	-	1,1420	1,2126
125	2,6454	1,6162	1,3381	1,2901	0,9266	-	1,3362	1,4224
150	2,9594	1,8915	1,5330	1,4948	1,0749	-	1,5784	1,6707
175	3,0000	1,9764	1,5939	1,5569	1,1267	-	1,6431	1,7455
200	4,1000	2,1202	1,9698	1,2788	3,9500	-	0,7575	2,1826
55 (pós rupt.)	4,2500	2,3322	2,5607	1,3000	4,7400	-	-	-

L2								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0908	0,0605	0,0628	0,0617	0,0637	0,0604	0,0603	0,6194
20	0,2216	0,1477	0,1450	0,1447	0,1511	0,1331	0,1398	0,9132
50	0,2920	0,1947	0,1897	0,1670	0,1910	0,2055	0,1700	0,9460
75	0,8407	0,5605	0,6493	0,5452	0,4763	0,6203	0,5332	1,3903
100	1,3508	0,9005	1,0120	0,8408	0,7029	0,9510	0,8476	1,7037
125	1,9563	1,3042	1,3650	1,1586	0,9394	1,2260	1,1968	2,0125
150	2,4741	1,6494	1,6551	1,4528	1,1478	1,4682	1,5246	2,2914
175	2,9936	1,9958	1,9419	1,7309	1,3215	1,6866	1,8435	2,5254
200	3,4842	2,3228	2,2047	2,0046	1,4532	1,8948	2,1728	2,7988
250	4,5223	3,0149	2,6862	2,5065	1,7516	2,2775	2,8069	3,2659
270	4,9319	3,2880	2,8714	2,7054	1,8191	2,4275	3,0615	3,5164
280	5,1407	3,4271	2,9851	2,8282	1,9622	2,5400	3,1978	3,6762
290	5,3316	3,5544	3,0816	2,9032	2,1009	2,6271	3,2854	3,8000
300	8,4545	3,7399	3,1574	2,9822	2,5884	2,7207	3,3619	3,9647
310	13,7691	4,2283	3,2325	3,1046	6,4758	2,8200	3,4161	4,1555
320	15,1867	4,9037	3,2890	3,1229	12,0414	2,8221	3,4104	4,2631
321	15,4479	5,2270	3,3541	3,5411	12,2504	2,8546	3,6621	4,5267
75 (pós rupt.)	13,5200	5,1873	2,1558	2,1743	11,5292	1,6479	1,8665	32,5349

L3								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0200	0,0350	0,0190	1,5344	-3,0880	0,0210	0,0177	0,0154
20	0,0779	0,0833	0,0033	0,1137	-0,0027	0,0757	0,0404	0,0351
50	0,1319	0,2045	0,0719	-	0,0637	0,0381	0,1756	0,1527
75	0,1828	0,2515	0,1048	-	0,1227	0,0452	0,1829	0,1590
100	0,1933	0,2654	0,1115	-	0,1261	0,1933	0,1856	0,1614
125	0,2182	0,2965	0,1771	-	0,1565	0,2182	0,1838	0,1598
150	0,3453	0,3325	0,2555	-	0,2699	0,3453	0,1972	0,1715
175	0,4429	0,4234	0,3116	-	0,3307	0,4429	0,2183	0,1899
200	1,6483	1,5459	0,5542	-	1,0293	0,9254	0,3042	0,2645
220	2,5019	2,2154	0,8215	-	1,4687	1,3545	0,4088	0,3555
250	2,7469	2,3645	1,2659	-	1,5653	1,4985	0,7565	0,6578
260	2,8935	2,5844	1,5625	-	1,6109	1,5449	0,8652	0,7524
270	3,0341	2,7843	1,5753	-	1,6552	1,5554	0,9490	0,8252
280	3,1718	2,7651	1,5924	-	1,6843	1,6460	1,0953	0,9524
290	3,3331	2,7762	1,6485	-	1,7295	1,8184	1,1329	0,9851
300	3,5078	3,0114	1,6587	-	1,7577	1,8775	1,4442	1,2558
325	3,6409	2,3011	1,7527	-	1,7746	1,9181	1,5577	1,3545
77 (pós rupt.)	3,3787	2,1226	1,6344	-	2,0155	1,9712	1,5660	1,4231

L4								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0277	0,0177	0,0020	0,0927	0,0193	0,0051	0,0135	0,0162
20	0,0938	0,0678	0,0259	0,1254	0,0311	0,0083	0,0104	0,0471
50	0,3379	0,2014	0,1182	0,2690	0,1250	0,1922	0,0498	0,1924
75	1,3344	0,9809	0,7107	0,7364	0,6656	0,7526	0,2231	0,3332
100	1,7454	1,4177	0,9963	0,9843	0,9365	0,8429	0,2560	0,3596
125	2,1186	1,7943	1,2347	1,2042	1,1520	1,0368	0,2316	0,3461
150	2,4705	2,1582	1,4700	1,4026	1,3594	1,2235	0,2610	0,3734
175	2,5722	2,2429	1,5283	1,4296	1,4153	1,2738	0,2635	0,3720
200	2,9555	2,6184	1,7901	1,6175	1,6215	1,4594	0,2889	0,3982
250	3,6253	3,3114	2,2134	1,8109	1,9049	1,7144	0,3629	0,4028
270	4,3441	3,5742	2,3865	1,7987	2,0438	1,8394	0,4211	0,4437
280	4,9147	3,6620	2,4653	1,7091	2,1339	1,9205	0,4462	0,5538
290	5,5763	3,7515	-	1,7050	2,2375	2,0138	0,4860	0,7239
300	7,6501	3,7738	-	1,8243	2,3517	2,1166	0,4843	0,8992
310	10,1675	3,9538	-	2,4338	2,5067	2,2561	0,5341	1,2088
320	12,6507	4,1713	-	3,5348	2,6399	2,3759	0,5559	1,6043
330	14,0707	4,3221	-	7,1164	2,7982	2,5184	0,6037	2,0931
340	15,4682	4,4094	-	10,5047	2,8895	2,5680	0,6795	2,4571
350	1,5464	0,4373	-	1,1019	0,2537	0,2658	0,0796	0,2758
77 (pós rupt.)	1,5013	0,4308	-	-	0,1254	-	-	-

L1-A								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0034	0,0405	0,0324	0,0378	0,0341	0,0375	-	0,0021
25	0,0044	0,0663	0,0584	0,0497	0,0611	0,0482	-	0,0033
50	-	0,0956	0,0643	0,0730	0,1053	0,0880	-	0,0250
75	-	0,1591	0,0842	0,0856	0,1850	0,1665	-	0,0397
100	-	0,3191	0,2323	0,1300	0,3733	0,3886	-	0,0778
125	-	0,5406	0,3861	0,2124	0,5365	0,5847	-	0,1636
150	-	0,8133	0,5637	0,3762	0,7065	0,7789	-	0,2751
175	-	1,0953	0,7696	0,5658	0,8918	0,9649	-	0,3994
200	-	1,3329	0,9336	0,7273	1,0323	1,1456	-	0,5219
225	-	1,7730	1,0934	0,9361	1,1594	1,2010	-	0,6544
250	-	2,0512	1,2128	1,1265	1,2711	1,2558	-	0,7623
275	-	2,3180	1,3411	1,3024	1,3917	1,3493	-	0,8663
280	-	2,3728	1,3687	1,3433	1,3986	1,3445	-	0,8902
285	-	2,4188	1,3861	1,3762	1,4244	1,3606	-	0,9097
286	-	2,4631	1,4044	1,3999	1,4261	1,3523	-	0,9281
63 (pós rupt.)	-	3,0949	3,0356	0,2186	0,1362	2,2673	-	2,6995

L5								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0056	0,0226	0,0301	0,0456	0,0012	0,0415	-	-
25	0,1830	0,0690	0,0401	0,0954	0,0496	0,0321	-	-
50	0,4297	0,2218	0,1516	0,1843	0,1537	0,1337	-	-
75	0,7858	0,4782	0,3461	0,3334	0,3163	0,3069	-	-
100	1,0326	0,6962	0,5208	0,4632	0,4465	0,4509	-	-
125	1,3722	0,9519	0,7646	0,6617	0,5758	0,6143	-	-
150	1,6540	1,1775	0,9408	0,8598	0,6826	0,7396	-	-
175	1,8781	1,4226	1,0781	1,0724	0,8106	0,8356	-	-
200	2,0300	1,6254	1,1250	1,4609	1,0554	1,1022	-	-

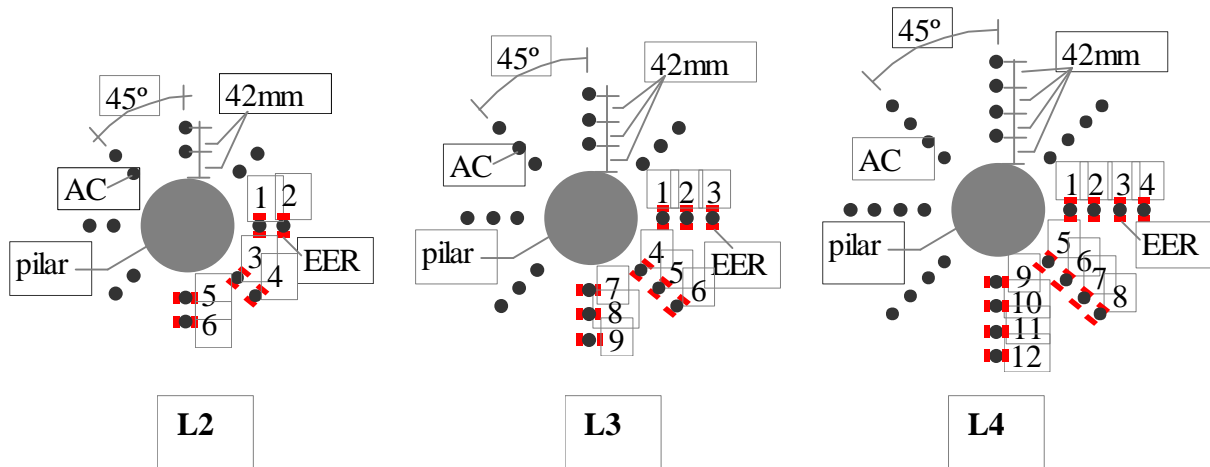
L6								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0448	-	0,0456	-	-	0,0199	-	-
25	0,1211	-	0,0926	-	-	0,0569	-	-
50	0,1913	-	0,1166	-	-	0,0983	-	-
75	0,3581	-	0,2258	-	-	0,2281	-	-
100	0,5931	-	0,3611	-	-	0,3972	-	-
125	0,9701	-	0,5551	-	-	0,5905	-	-
150	1,3243	-	0,7749	-	-	0,7811	-	-
175	1,6246	-	0,9826	-	-	0,9477	-	-
200	1,9248	-	1,2362	-	-	1,1035	-	-
225	2,1696	-	1,4439	-	-	1,2330	-	-
250	2,4783	-	1,6856	-	-	1,3621	-	-
275	2,7531	-	1,9052	-	-	1,4782	-	-
300	3,0523	-	2,1494	-	-	1,5530	-	-
99 (pós rupt.)	2,3225	-	2,1969	-	-	2,2231	-	-

L7								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0000	0,0511	0,0487	0,0310	0,0726	0,0145	0,0000	0,0150
25	0,0626	0,0833	0,0656	0,0723	0,0475	0,0350	0,0881	0,0361
50	0,1442	0,1263	0,0890	0,0907	0,0765	0,0703	0,1616	0,0726
75	0,2465	0,2529	0,1281	0,1306	0,1461	0,1495	0,2372	0,1543
100	0,3876	0,4797	0,3003	0,3063	0,3001	0,2984	0,4356	0,3080
125	0,6365	0,8118	0,5153	0,5256	0,5291	0,4791	0,7342	0,4946
150	0,8719	1,1317	0,7347	0,7494	0,7028	0,6773	0,9742	0,6993
175	1,1527	1,4159	0,9131	0,9313	0,8577	0,8689	1,1902	0,8971
200	1,4669	1,7266	1,1148	1,1371	1,0239	1,0724	1,4095	1,1071
225	1,7764	2,0035	1,3016	1,3277	1,1126	1,2705	1,6044	1,3117
250	2,1220	2,3065	1,5118	1,5421	1,2146	1,4591	1,9151	1,5063
275	2,4670	2,5839	1,7093	1,7435	1,2236	1,6609	2,1982	1,7147
300	2,7292	2,7959	1,8868	1,9246	1,2358	1,8517	2,5013	1,9117
303	2,8241	2,7960	1,8930	1,9309	1,2450	1,8625	2,6357	1,9228
113 (pós rupt.)	3,4736	2,8855	2,5084	1,0312	1,2616	2,2536	2,6700	2,3074

L8								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0134	-	0,0157	0,0262	0,0006	0,0026	0,0150	0,0229
25	0,0782	-	0,0420	0,0398	0,0040	0,0260	0,0391	0,0347
50	0,1704	-	0,0667	0,0465	0,0080	0,0659	0,0622	0,0406
75	0,4400	-	0,1721	0,0745	0,4087	0,1777	0,1605	0,0651
100	0,6787	-	0,3493	0,2081	2,6173	0,4000	0,3257	0,1817
125	1,0668	-	0,5255	0,4121	-	0,6844	0,4900	0,3598
150	1,4400	-	0,6848	0,5693	-	0,9100	0,6386	0,4972
175	1,8164	-	0,8690	0,7270	-	1,1399	0,8103	0,6348
200	2,1505	-	1,0670	0,8807	-	1,3646	0,9950	0,7690
225	2,5056	-	1,3193	1,1064	-	1,5562	1,2302	0,9662
250	2,7993	-	1,5010	1,2950	-	1,7374	1,3997	1,1309
275	3,0922	-	1,7015	1,5189	-	1,8884	1,5866	1,3263
290	3,2388	-	1,8176	1,6603	-	1,9668	1,6949	1,4499
300	3,5347	-	1,9043	1,7597	-	2,0182	1,7757	1,5367
309	3,6000	-	1,9523	1,8230	-	2,1020	1,8205	1,5919
108 (pós rupt.)	4,2514	-	2,3623	2,2806	-	2,5434	2,0062	1,5719

L9								
CARGA (kN)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
0	0,0325	-	0,0497	0,0463	0,0030	0,0073	0,0045	-
25	0,0532	-	0,1000	0,0932	0,0049	0,0251	0,0260	-
50	0,0679	-	0,1132	0,1055	0,0063	0,0500	0,0593	-
75	0,1480	-	0,1550	0,1445	0,0137	0,1347	0,0988	-
100	0,4282	-	0,3547	0,3306	0,0396	0,3401	0,3425	-
125	0,9085	-	0,5901	0,5500	0,0841	0,5701	0,6244	-
150	1,3550	-	0,8069	0,7522	0,1254	0,8135	0,8750	-
175	1,7165	-	1,0045	0,9363	0,1588	1,0265	1,1061	-
200	2,0980	-	1,2566	-	0,1941	1,2382	1,3854	-
225	2,3347	-	1,4757	-	0,2160	1,3790	1,6238	-
250	2,5545	-	1,6474	-	0,2364	1,5117	1,8250	-
275	2,7491	-	1,8074	-	0,2544	1,6340	2,0238	-
300	2,9032	-	1,9775	-	0,2686	1,7452	2,1674	-
315	3,2146	-	2,1104	-	0,2974	1,7189	2,2365	-
111 (pós rupt.)	3,9025	-	2,6466	-	0,3867	2,2713	2,7182	-

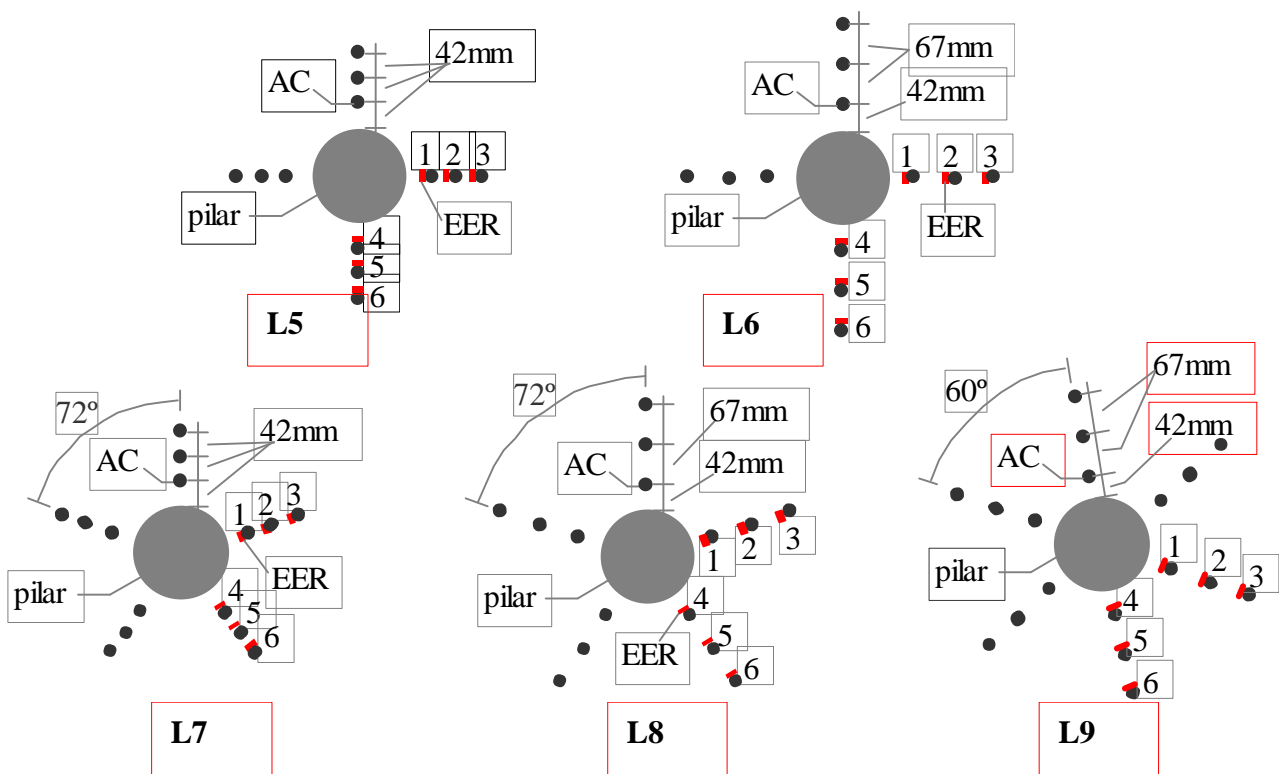
3 – DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE CISCALHAMENTO



L2						
CARGA kN	Nomenclatura dos extensômetros					
	1	2	3	4	5	6
0	0,0260	0,1404	0,0258	0,1476	0,0146	0,0082
50	0,0307	0,1249	0,0382	0,1280	0,0269	0,0540
75	0,0578	0,0593	0,1339	0,0475	0,0956	0,1385
100	0,0824	0,0890	0,2415	0,0609	0,1715	0,1859
125	0,1987	0,2139	0,4196	0,1376	0,3156	0,2290
150	0,2542	0,1985	0,5998	0,1672	0,4045	0,2688
175	0,2852	0,2159	0,7479	0,1988	0,4659	0,3121
200	0,2687	0,2794	0,8576	0,2313	0,4903	0,3450
250	0,3037	0,3996	1,2465	0,3319	0,6332	0,4647
260	0,3412	0,4608	1,3674	0,3777	0,7245	0,5220
270	0,4117	0,5621	1,5207	0,4496	0,9140	0,6193
280	0,5163	0,6894	1,6836	0,5372	1,1502	0,7152
290	0,6093	0,8353	1,7959	0,6316	1,3230	0,7952
300	0,7680	1,0556	1,9190	0,6854	1,5732	0,8224
310	1,0148	1,4525	2,0645	0,8784	2,0882	1,0820
320	1,1236	1,7145	2,1323	1,0288	2,3096	1,3017
321	1,2527	1,7885	1,4710	1,1389	1,9137	1,3811
75	0,4749	14,2533	1,0035	0,0409	1,0899	1,1767

L3									
CARGA kN	Nomenclatura dos extensômetros								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0011	0,0012	0,0014	0,0013	15,0709	0,0011	0,0009	0,0010	0,0002
20	0,0254	0,0238	0,0420	0,0243	0,0141	0,0349	0,0220	0,0059	0,0024
50	0,0380	0,0310	0,0339	0,0316	0,0184	0,0275	0,0329	0,0172	0,0015
75	0,0472	0,0270	0,0230	0,0275	0,0160	0,0187	0,0409	0,0277	0,0008
100	0,0708	0,0299	0,0262	0,0305	0,0177	0,0212	0,0614	0,0241	0,0015
125	0,1076	0,0280	0,0204	0,0285	0,0166	0,0165	0,0932	0,1120	0,0012
150	0,2011	0,0709	0,0836	0,0724	0,0420	0,0678	0,1743	0,6070	0,0030
175	0,2541	0,0588	0,0797	0,0600	0,0348	0,0646	0,2202	0,6126	0,0028
200	0,3697	0,4102	0,3640	0,4187	0,2430	0,3027	0,3204	0,4491	0,0197
210	0,4173	0,4478	0,3945	0,4571	0,2653	0,3145	0,3616	0,6388	0,0205
220	0,4721	0,5053	0,4299	0,5158	0,2994	0,3427	0,4091	0,7989	0,0225
250	0,4977	0,5414	0,4554	0,5527	0,3208	0,3630	0,4313	0,7603	0,0239
260	0,5174	0,5645	0,4693	0,5763	0,3345	0,3741	0,4484	0,7740	0,0247
270	0,5351	0,5872	0,4862	0,5994	0,3479	0,3876	0,4637	0,8060	0,0257
280	0,5593	0,6181	0,5012	0,6309	0,3662	0,3995	0,4847	0,8324	0,0265
290	0,5850	0,6518	0,5265	0,6653	0,3862	0,4197	0,5069	0,8253	0,0280
300	0,6800	0,7069	0,5629	0,7216	0,4188	0,4487	0,5893	0,8909	0,0300
325	0,8477	0,7766	0,6090	0,7928	0,4601	0,4855	0,7346	0,8871	0,0326
77	0,8562	0,6633	0,5633	0,9624	0,4514	0,4769	0,6798	0,8712	0,0330

L4												
CARGA kN	Nomenclatura dos extensômetros											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,0055	0,0087	0,0075	0,0081	0,0113	0,0019	0,0032	0,0055	0,0030	0,0019	0,0031	0,0083
20	0,0208	0,0034	0,0029	0,0198	0,0557	0,0338	0,0273	0,0509	0,0183	0,0273	0,0260	0,0649
50	0,1515	0,1508	0,1290	0,1664	0,1410	0,1503	0,1333	0,1628	0,0908	0,1593	0,1269	0,1574
75	0,3085	0,2402	0,2055	0,3040	0,2116	0,1993	0,2523	0,2573	0,1773	0,2946	0,2402	0,2287
100	0,3480	0,2915	0,2494	0,3548	0,2492	0,2353	0,3127	0,2915	0,1855	0,3641	0,2976	0,2539
125	0,3721	0,3316	0,2837	0,3758	0,2848	0,2748	0,3485	0,3111	0,2154	0,4069	0,3318	0,2724
150	0,4088	0,3882	0,3321	0,4214	0,3207	0,3173	0,4124	0,3412	0,2597	0,4808	0,3926	0,2942
175	0,4188	0,4086	0,3496	0,4401	0,3291	0,3318	0,4363	0,3534	0,2751	0,5083	0,4153	0,3030
200	0,4401	0,4358	0,3728	0,4612	0,3732	0,3706	0,4487	0,3858	0,3267	0,5252	0,4272	0,3402
250	0,4849	0,4968	0,4250	0,5379	0,4759	0,4509	0,4833	0,4810	0,4592	0,5699	0,4600	0,4423
270	0,5030	0,5188	0,4438	0,5804	0,5545	0,5058	0,4699	0,5567	0,5833	0,5597	0,4473	0,5325
280	0,5225	0,4579	0,3917	0,5851	0,6952	0,5173	0,3444	0,6365	0,6491	0,4222	0,3278	0,6473
290	0,5389	0,3909	0,3345	0,5910	0,8617	0,5302	0,2060	0,7253	0,7188	0,2707	0,1961	0,7746
300	0,5247	0,2625	0,2246	0,5458	1,1073	0,5557	-0,0601	0,8400	0,8390	-0,0206	-0,0572	0,9648
310	0,4694	0,0837	0,0716	0,4968	1,4462	0,5991	-0,4383	1,0215	0,9832	-0,4340	-0,4172	1,2548
320	0,4403	-0,0542	-0,0463	0,4719	1,8761	0,6916	-0,7888	1,2348	1,2002	-0,8128	-0,7508	1,5797
330	0,5091	-0,0086	-0,0074	0,5747	2,3276	0,8572	-0,8680	1,4593	1,4792	-0,8865	-0,8262	1,8586
340	1,0703	0,6551	0,5605	1,1616	2,6728	1,2556	-0,0194	1,7616	1,8070	0,0817	-0,0185	2,0151
350	2,3683	2,4627	2,1069	2,4401	2,8240	2,0383	2,5913	1,9568	1,8274	3,0245	2,4667	1,6764



L5						
CARGA	Nomenclatura dos extensômetros					
kN	1	2	3	4	5	6
0	0,0050	0,0038	0,0218	0,0001	0,0053	-
25	0,0014	0,0056	0,0062	0,0011	0,0096	-
50	0,0101	0,0315	0,0347	0,0010	0,0152	-
75	0,0432	0,0596	0,0655	0,0054	0,0133	-
100	0,0813	0,1105	0,1216	0,0416	0,0201	-
125	0,1430	0,1809	0,0082	0,0764	0,0286	-
150	0,1971	0,2438	0,0579	0,1016	0,0393	-
175	0,2737	0,3160	0,1052	0,1414	0,0600	-
200	2,4752	2,5105	1,9360	0,3175	2,6095	-

L6						
CARGA kN	Nomenclatura dos extensômetros					
	1	2	3	4	5	6
0	0,0354	0,0034	0,0203	0,0033	0,0023	0,0033
25	0,0558	0,0904	0,0381	0,1076	0,0862	0,0039
50	0,0903	0,1254	0,0365	0,2562	0,2063	0,0269
75	0,1224	0,1565	0,0776	0,2665	0,2235	0,0292
100	0,1501	0,1905	0,1543	0,2887	0,2448	0,0426
125	0,1836	0,1496	0,2163	0,2930	0,2572	0,0517
150	0,1965	0,1206	0,2441	0,3276	0,2584	0,0666
175	0,1874	0,0941	0,2707	0,3315	0,2653	0,0823
200	0,2100	0,0833	0,3221	0,3619	0,2741	0,1039
225	0,2188	0,0785	0,3350	0,3772	0,2887	0,1207
250	0,7215	0,0815	0,3818	0,4155	0,3235	0,1452
275	1,5847	0,2159	0,3709	0,4360	0,3351	0,2862
300	1,6873	2,4821	0,5636	0,5374	0,2606	3,4562

L7						
CARGA kN	Nomenclatura dos extensômetros					
	1	2	3	4	5	6
0	0,0235	-	-	0,0576	0,0560	0,0039
25	0,0253	-	-	0,0634	0,0565	0,0048
50	0,0525	-	-	0,0850	0,0723	0,0011
75	0,1669	-	-	0,1789	0,0932	-0,0002
100	0,2558	-	-	0,2174	0,1237	0,0053
125	0,3710	-	-	0,3317	0,1814	-0,0048
150	0,4438	-	-	0,4322	0,2593	-0,0021
175	0,4420	-	-	0,5390	0,3522	0,0181
200	0,5022	-	-	0,6864	0,4489	0,0562
225	0,5782	-	-	0,8006	0,5189	0,1233
250	0,6891	-	-	1,3250	0,6036	0,2395
275	0,8049	-	-	1,8246	0,6836	0,3830
300	0,9950	-	-	2,5144	0,8428	1,2544
303	1,2350	-	-	2,5246	2,4388	2,5705

L8						
CARGA kN	Nomenclatura dos extensômetros					
	1	2	3	4	5	6
0	0,0111	0,0041	0,0000	0,0019	0,0002	-
25	0,0169	0,0208	0,0054	0,0190	0,0076	-
50	0,0169	0,0177	0,0126	0,0178	0,0163	-
75	0,0435	0,0553	0,0153	0,0652	0,0219	-
100	0,0449	0,0480	0,0196	0,0825	0,0533	-
125	0,0418	0,0640	0,0235	0,1288	0,0986	-
150	0,0743	0,0655	0,0551	0,2345	0,1600	-
175	0,1182	0,0944	0,0727	0,3020	0,2081	-
200	0,1939	0,1302	0,1177	0,3986	0,2941	-
225	0,3121	0,2006	0,1792	0,5264	0,3657	-
250	0,3690	0,2268	0,2736	0,6188	0,4467	-
275	0,4875	0,2806	0,4563	0,7552	0,5251	-
290	0,5561	0,3245	0,5691	0,8363	0,5805	-
300	0,6159	0,3527	0,6215	1,1825	2,0315	-
309	1,9993	1,5540	0,6981	2,7523	3,8520	-

L9						
CARGA kN	Nomenclatura dos extensômetros					
	1	2	3	4	5	6
0	0,0680	0,0504	0,0481	0,0567	0,0702	0,0092
25	0,0719	0,0603	0,0598	0,0645	0,0976	0,0146
50	0,0723	0,0672	0,0615	0,0826	0,1044	0,0230
75	0,0830	0,1002	0,0716	0,0769	0,1159	0,0695
100	0,0717	0,1517	0,0937	0,0617	0,1226	0,0572
125	0,1636	0,2525	0,1523	0,0555	0,1488	0,0576
150	0,3171	0,3060	0,2163	0,0559	0,1841	0,0607
175	0,2957	0,3397	0,2986	0,0571	0,1901	0,0589
200	0,2895	0,3971	0,3214	0,0679	0,2238	0,0482
225	0,2862	0,4545	0,2943	0,0813	0,2499	0,0488
250	0,3079	0,5289	0,2923	0,1057	0,2550	0,0466
275	0,3321	0,5999	0,2935	0,2173	0,5766	0,0501
300	2,5123	2,0967	0,2749	0,4320	1,9254	0,0499
315	3,7235	2,3700	0,2867	1,3396	2,0310	0,0949

ANEXO 2

VALORES UTILIZADOS NOS GRÁFICOS DAS FIGURAS 5.1 E 5.4

VAZ (2007)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	Ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{uRef.}$	$\Psi/\Psi_{Lref.}$
L1	-	-	286	132,12	1,00	1,00
L2	196,03	0,69	321	192,24	1,12	1,46
L3	294,03	1,03	325	204,36	1,14	1,55
L4	294,03	1,03	357	212,12	1,25	1,61
L5	117,7	-	200	114,91	0,70	0,87
L6	78,46	0,24	300	143,27	1,05	1,08
L7	147,08	0,51	303	171,88	1,06	1,30
L8	98,06	0,34	309	149,09	1,08	1,13
L9	117,67	0,41	315	169,94	1,10	1,29

GOMES (1991)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	Ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{uRef.}$	$\Psi/\Psi_{Lref.}$
L1	-	-	560	66,60	1,00	1,00
L2	194,50	0,35	693	118,52	1,24	1,78
L3	258,68	0,46	773	129,63	1,38	1,94
L4	518,70	0,93	853	155,18	1,52	2,33
L5	810,53	1,45	853	162,79	1,52	2,44
L6	810,53	1,45	1040	194,24	1,86	2,92
L7	1167,19	2,08	1120	229,39	2,00	3,44
L8	1167,19	2,08	1200	236,79	2,14	3,56
L9	1212,60	2,17	1227	277,49	2,19	4,17
L10	291,90	0,52	800	133,19	1,43	2,00
L11	387,90	0,69	907	140,59	1,62	2,11

GOMES E ANDRADE (1993)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	Ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{uRef.}$	$\Psi/\Psi_{Lref.}$
L12	-	-	650	75,6	1,00	1,00
L13	-	-	600	83,7	1,00	1,00
L14	-	-	556	72,6	1,00	1,00
L15	-	-	554	76,3	1,00	1,00
L16	942,6	1,45	1140	151,9	1,75	2,01
L17	942,6	1,57	1096	140,7	1,83	1,68
L18	942,6	1,70	992	145,9	1,78	2,01
L19	942,6	1,70	1010	174,8	1,82	2,29
L21	603,3	1,09	856	171,9	1,55	2,25
L22	339,3	0,61	832	174,8	1,50	2,29
L20	942,6	1,714	780	210,0	1,42	2,28
L24	942,6	1,714	890	212,2	1,62	2,31
L25	942,6	1,714	985	214,3	1,79	2,33
L26	942,6	1,714	985	216,0	1,79	2,35

ANDRADE (1999)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{u,ref.}$	$\psi/\psi_{Lref.}$
L1	1108	1,98	830	147,33	1,48	2,21
L2	2216,00	3,96	790	127,55	1,41	1,91
L3	2216,00	3,96	966	260,00	1,73	3,90
L4	2216,00	3,96	956	284,00	1,71	4,26
L5	1477,00	2,64	785	128,96	1,40	1,93
L6	1108,00	1,98	950	153,48	1,70	2,30
L7	2662,00	4,75	1090	232,22	1,95	3,48

TRAUTWEIN (2001)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{u,ref.}$	$\psi/\psi_{Lref.}$
L1	2584,00	4,61	1050	163,70	1,88	2,46
L4	3602,90	6,43	1038	172,59	1,85	2,59
L9	1448,00	2,59	933	194,81	1,67	2,92
L2	475,00	0,85	650	148,15	1,16	2,22
L3	743,00	1,33	999	147,41	1,78	2,21
L5	1242,00	2,22	975	216,26	1,74	3,24
L6	1485,00	2,65	1087	217,78	1,94	3,27
L7	1485,00	2,65	1160	280,00	2,07	4,20
L8	957,00	1,71	975	226,67	1,74	3,40

SILVA (2003)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{u,ref.}$	$\psi/\psi_{Lref.}$
L1	-	-	273	101,36	1,00	1,00
L2	-	-	401	123,39	1,00	1,00
L3	-	-	469	180,00	1,00	1,00
L4	-	-	225	109,45	1,00	1,00
L5	-	-	350	195,27	1,00	1,00
L7	723,80	2,65	420	198,66	1,54	1,96
L8	723,80	2,65	452	241,33	1,13	1,96
L9	542,85	1,99	452	194,67	0,96	1,08
L10	542,85	1,99	325	195,88	1,44	1,79
L11	542,85	1,99	350	180,36	1,00	0,92

BORGES (2004)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{u,ref.}$	$\psi/\psi_{Lref.}$
LREF1	-	-	685	125,93	1,00	1,00
LREF2	-	-	843	118,52	1,00	1,00
45FFD_AC2	3073	4,49	1230	296,30	1,80	2,35
45FFD_AC3	1985	2,90	1050	170,37	1,53	1,35
45FFC_AC4	1082	1,58	885	148,15	1,29	1,18
45FFD_AC5	601	0,88	837	125,93	1,22	1,00
45_AC1	1676	1,99	1250	251,85	1,48	2,12
45_AC5	721	0,86	1092	200,00	1,30	1,69

MUSSE (2004)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{u,ref.}$	$\psi/\psi_{Lref.}$
L1	-	-	309	85,45	1,00	1,00
L2	1581,43	5,12	460	190,67	1,49	2,23
L3	1054,28	3,41	472	226,18	1,53	2,65
L4	294,04	0,95	467	204,00	1,51	2,39
LF1	-	-	390	113,33	1,00	1,00
LF2	1581,43	5,12	517	224,36	1,33	1,98
LF3	1054,28	3,41	541	294,78	1,39	2,60
LF4	294,04	0,95	501	350,03	1,28	3,09

TRAUTWEIN (2006)						
lajes	$A_s f_y$ (AC) - (kN)	κ	P_u (kN)	ψ ($\times 10^{-4}$)	$P_u/P_{u,ref.}$	$\psi/\psi_{Lref.}$
E3	546	0,98	1090	154	1,95	2,30
E4	546	0,98	1205	170	2,15	2,54
E5	546	0,98	1222	184	2,18	2,75
I6	150	0,80	830	131	1,48	1,96
I7	361	1,93	978	118	1,75	1,76
I8	233	1,25	856	107	1,53	1,59
I9	106	0,57	853	125	1,52	1,87
I10	233	1,25	975	149	1,74	2,22
I11	150	0,80	945	150	1,69	2,23

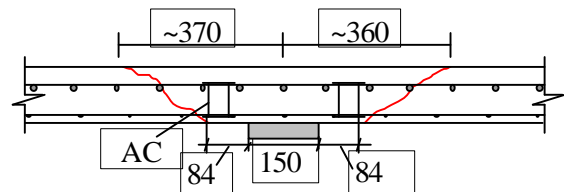
ANEXO 3

CÁLCULOS

1 - CARGAS DE RUPTURA ESTIMADAS PARA A LAJE L2 DESTA PESQUISA, SEGUNDO OS METODOS APRESENTADOS.

$d = 89 \text{ mm}$, $f_c = 39 \text{ MPa}$, $S_0 = S_r = 42 \text{ mm}$, 8 linhas e 2 camadas de AC, $\phi = 5,0$, $f_y = 624 \text{ MPa}$
 $a = 150 \text{ mm}$ (pilar circular)

1.1- NBR 6118:2003



$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} u_1 d$$

$$\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) = 2,49$$

$$u_1 = p(a + 4d) = 1589,65 \text{ mm}$$

$$V_{Rd,c} = 0,18 \times 2,49 \times (100 \times 0,0138 \times 39)^{1/3} \times 1589,65 \times 89 = 240,28 \text{ kN}$$

Zona Adjacente à face do pilar

$$V_{Rd} = 0,27 f_c \left(1 - \frac{f_c}{250} \right) u_0 d$$

$$u_0 = p a = 471,24 \text{ mm}$$

$$V_{Rd} = 0,27 \times 39 \times \left(1 - \frac{39}{250} \right) \times 471,24 \times 89 = 372,74 \text{ kN}$$

Zona com armadura de punção

$$V_{Rd} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 \frac{d}{S_r} A_{sw} \frac{f_{yw}}{1,15} \text{ sen } \alpha$$

$$V_{Rd} = 0,75 \times 240,28 + 1,5 \times \frac{89}{42} \times (8 \times 2 \times 19,63 \times 624) \frac{\text{sen } 90^\circ}{1,15} = 491,69 \text{ kN}$$

Zona externa à região de AC

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$$

$$u_2 = 2p \left(\frac{a}{2} + S_0 + nS_r + 2d \right) = 2117,44 \text{ mm}$$

$$V_{Rd} = 240,28 \div 1589,65 \times 2117,44 = 320,06 \text{ kN}$$

1.2- ACI-318 / 2005

$$u_1 = 4(a+d) = 750,84 \text{ mm}$$

$$u_2 = 8x(2x(dx \tan 22,5 \div 2) + 2 \text{sen} 22,5x(S_0 + (n-1)S_r + a/2))$$

$$u_2 = 1253,15 \text{ mm}$$

$$V_{Rd,c} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma} (0,5 \sqrt{f_c'} u_1 d) \\ \frac{1}{\gamma} \left[0,0833 \left(\frac{40d}{u_1} + 2 \right) \sqrt{f_c'} u_1 d \right] \\ \frac{1}{\gamma} [0,333 \sqrt{f_c'} u_1 d] \end{cases}$$

Zona com Armadura de punção

$$V_{Rd} = \frac{1}{\gamma} \left[0,17 \sqrt{f_c'} u_1 d + \frac{A_{sw} f_{yw} d}{S_r} \right] \leq \frac{1}{\gamma} (0,5 \sqrt{f_c'} u_1 d)$$

$$V_{Rd} = 0,17 \sqrt{39} \times 750,84 \times 89 + \frac{8 \times 19,63 \times 624 \times 89}{42} = 278,60 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 0,333 \sqrt{39} \times 750,84 \times 89 = 138,97 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 0,0833 \times \left(\frac{40 \times 89}{750,84} + 2 \right) \times \sqrt{39} \times 750,84 \times 89 = 234,35 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 0,5 \sqrt{39} \times 750,84 \times 89 = 208,66 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \text{Menor valor calculado} = 208,66 \text{ kN}$$

Zona externa à região de AC

$$V_{Rd} = \frac{1}{\gamma} [0,17 (\sqrt{f_c'} u_2 d)]$$

$$V_{Rd} = 0,17x(\sqrt{39}x1253,15x89 = 118,41kN$$

1.3– CEB / MC90 (1991)

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \gamma_c f_{ck})^{1/3} u_1 d$$

$$u_1 = p (a+4d) = 1589,60mm$$

$$V_{Rd,c} = 240,28 \text{ kN}$$

Zona Adjacente à face do pilar

$$V_{Rd} = 0,3 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \frac{f_{ck}}{\gamma_c} u_0 d$$

$$u_0 = p a = 471,24mm$$

$$V_{Rd} = 0,3 \left[1 - \frac{39}{250} \right] x 39 x 471,24 x 89 = 414,15kN$$

Zona com armadura de punção

$$V_{Rd} = 0,75V_{Rd,c} + 1,5d \frac{A_{sw}}{S_r} \frac{f_{yw}}{\gamma_s} \text{sen } \alpha$$

onde :

$$1,5d \frac{A_{sw}}{S} f_{ywd} \text{sen } \alpha \geq 0,03(100 \gamma_c f_{ck})^{1/3} u_1 d$$

$$V_{Rd} = 0,75x240,28 + 1,5x89x \frac{8x19,63x624}{42} \text{sen } 90^\circ = 491,69kN$$

Zona Externa à região de AC

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} u_2 d$$

$$u_2 = 8(4d \tan 22,5 + 2 \text{sen } 22,5(S_0 + (n-1)S_r + \frac{a}{2})) = 2091,96mm$$

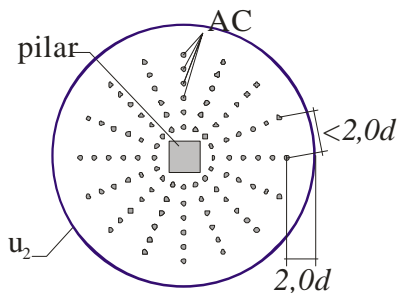
$$V_{Rd} = 240,28 \div 1589,60 \times 2091,96 = 316,22kN$$

1.4– EUROCODE 2 / 2004

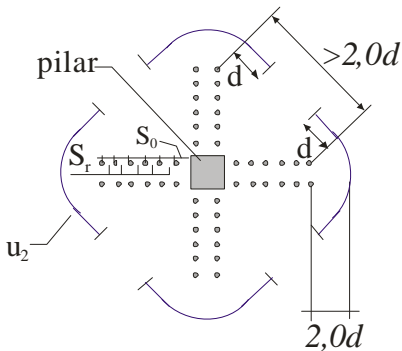
As expressões do Eurocode 2 / 2004 são iguais às do CEB-MC90, havendo mudança somente no perímetro externo às camadas de armadura de cisalhamento, que é igual a $1,5d$ da última camada e não existe a condição de armadura mínima.

2 - EQUAÇÕES UTILIZADAS NA DETERMINAÇÃO DOS PERÍMETROS DE CONTROLE EXTERNOS (u_2), SEGUNDO AS NORMAS:

2.1 – NBR 6118 / 2003



$$u_2 = 2p \left(\frac{\text{lado do pilar}}{2} + S_0 + (n-1)S_r + 2d \right)$$

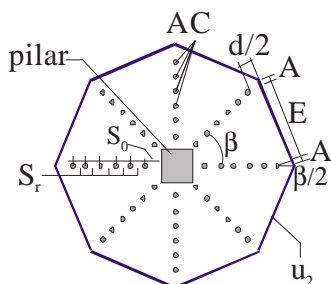


$$u_2 = (pd + 2d)4 \quad \text{Para 4 linhas de AC}$$

$$u_2 = \left(\frac{4pd}{n} + 2d \right) n \quad \text{Para mais de 4 linhas de AC}$$

(n é o número de linhas)

2.2 – ACI 318 / 2005

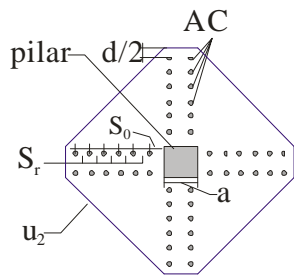


$$u_2 = \text{número de linhas} (A + E)$$

$$A = (p \times d) \div \text{número de linhas}$$

$$E = 2 \text{sen } b / 2 \left[S_0 + (\text{número de camadas} - 1)S_r + \frac{\text{ladodopilar}}{2} \right]$$

$$b = \frac{360^\circ}{\text{(número de linhas)}}$$



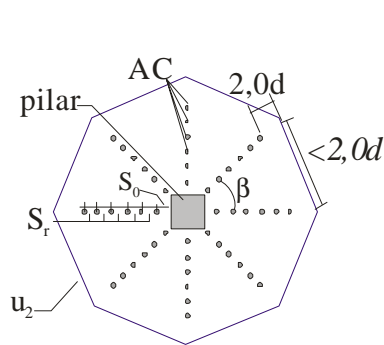
$u_2 =$ número de linhas ($A + E$)

$A = (p \times d) \div$ número de linhas

$$E = 2 \operatorname{sen} \mathbf{b} / 2 \left[S_0 + (\text{número de camadas} - 1) S_r + \frac{\text{lado do pilar}}{2} \right]$$

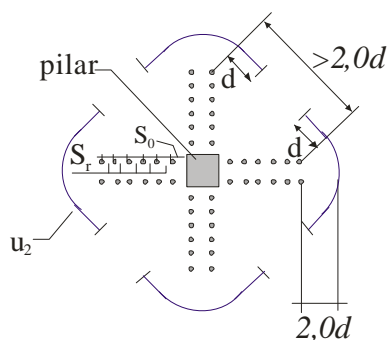
$$\mathbf{b} = \frac{360^\circ}{(\text{número de linhas})}$$

2.3 – CEB – MC 90 (1991)



$$u_2 = \text{número de linhas} \times \left(\frac{((2p \times 2d) / \text{número de linhas}) + 2 \operatorname{sen} \mathbf{b} / 2 \times \left(S_0 + (\text{número de camadas} - 1) \times S_r + \text{lado do pilar} / 2 \right)}{1} \right)$$

$$\mathbf{b} = \frac{360^\circ}{(\text{número de linhas})}$$

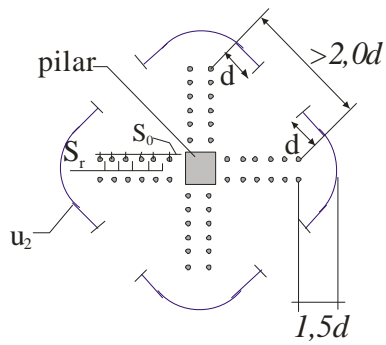
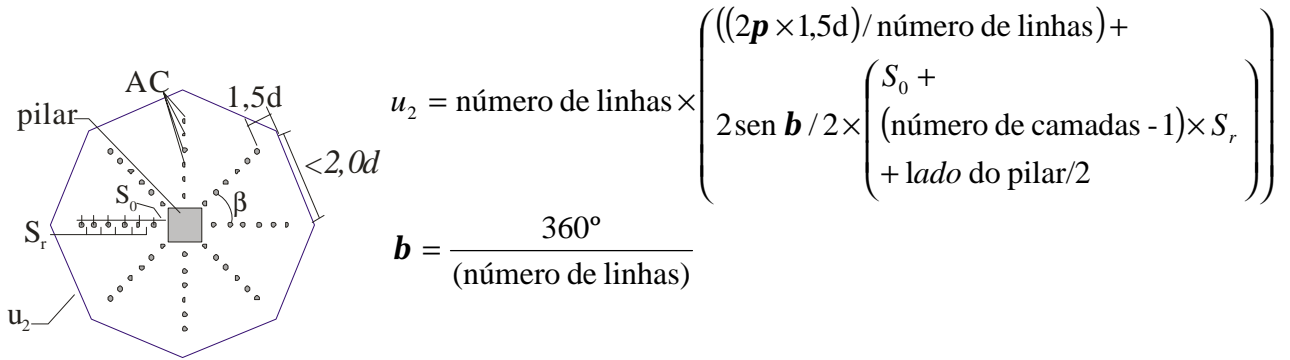


$$u_2 = (pd + 2d)4 \quad \text{Para 4 linhas de AC}$$

$$u_2 = \left(\frac{4pd}{n} + 2d \right) n \quad \text{Para mais de 4 linhas de AC}$$

(n é o número de linhas)

2.4 – EUROCODE 2 / 2004



$$u_2 = \left(\frac{1,5pd}{2} + 2d \right) 4 \quad \text{Para 4 linhas de AC}$$

$$u_2 = \left(\frac{3pd}{n} + 2d \right) n \quad \text{Para mais de 4 linhas de AC}$$

(n é o número de linhas)

3 - CÁLCULO DA CARGA DE RUPTURA POR FLEXÃO (V_{fl}) DA LAJE L1-A, UTILIZANDO O MÉTODO DAS LINHAS DE RUPTURA

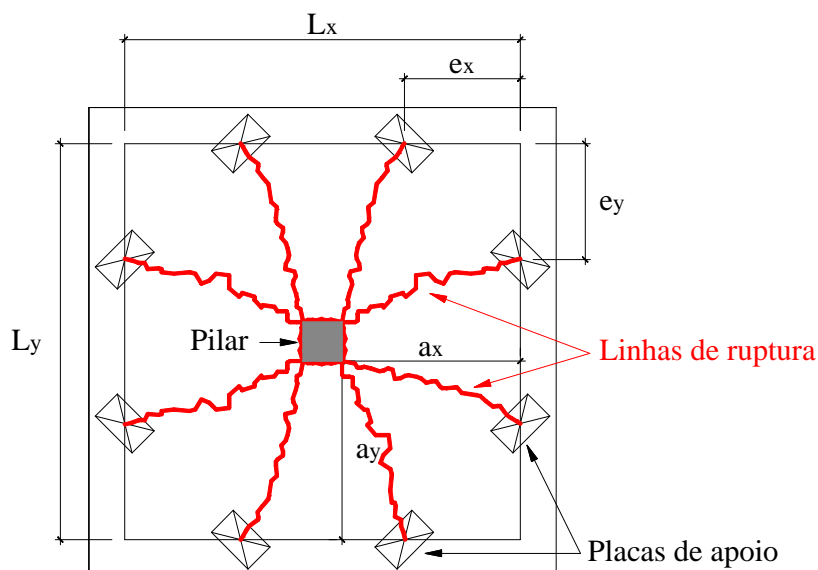


Figura A-01 – Modelo de ruptura por flexão, desenvolvido por OLIVEIRA (2003)

$$e_x = e_y = 447\text{mm}$$

$$a_x = a_y = 687\text{mm}$$

$$L_x = L_y = 1524\text{mm}$$

Expressões utilizadas para o cálculo da carga de ruptura por flexão (V_{fl}):

$$V_{flex} = 2xm_p x \left[\frac{L_x}{a_y} + \frac{L_y}{a_x} - 2x \left(\frac{a_y}{a_x} x w_x + \frac{a_x}{a_y} x w_y \right) \right], \text{ onde:}$$

$$w_x = \frac{e_y}{a_y} x \frac{\frac{e_x}{a_x} x \left(\frac{a_y}{e_y} - 1 \right)}{1 + \frac{e_x}{a_x} x \left(\frac{a_y}{e_y} - 1 \right)} ; \quad w_y = \frac{e_x}{a_x} x \frac{\frac{e_y}{a_y} x \left(\frac{a_x}{e_x} - 1 \right)}{1 + \frac{e_y}{a_y} x \left(\frac{a_x}{e_x} - 1 \right)}$$

$$m_p = \alpha f_{ys} x d^2 x \left(1 - \frac{0,5x \alpha f_{ys}}{f_{ck}} \right) \text{ (momento de plastificação)}$$

- Cálculo de w_x e w_y :

Como $e_x = e_y$ e $a_x = a_y$, então $w_x = w_y$:

$$w_x = w_y = \frac{447}{687} x \frac{\frac{447}{687} x \left(\frac{687}{447} - 1 \right)}{1 + \frac{447}{687} x \left(\frac{687}{447} - 1 \right)}$$

$$w_x = w_y = 0,169 \text{ m}^{-1}$$

- então V_{fl} :

$$V_{fl} = 7,529 \cdot m^{-1} \cdot x m_p$$

- Cálculo de m_p :

$$m_p = \left(\frac{1,38}{100} \right) x 92^2 x 555 x \left(1 - \frac{0,5 x \left(\frac{1,38}{100} \right) x 555}{38,7} \right)$$

$$m_p = 58,41 \text{ kN.m}$$

- Cálculo de V_{fl} :

$$V_{fl} = 7,529 x 58,41$$

$$V_{fl} = 439,77 \text{ kN}$$

ANEXO 4

DETALHAMENTOS DE LAJES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Variação da armadura de flexão (r) para as lajes dessa pesquisa que tiveram o índice de armadura de cisalhamento menor que 0,70.

A sugestão é que sejam repetidas as lajes do Grupo 2, dessa pesquisa, trabalhando com taxas de armadura de flexão diferentes de 1,38%, que foi a utilizada, para verificar se essa variação de r irá interferir no comportamento dessas lajes. O detalhe dessa sugestão encontra-se na Tabela A-1.

Tabela A-1 – Variação de ρ para as lajes dessa pesquisa com κ menor que 0,70

Lajes	Armadura de cisalhamento						A_s flexão
	nº de linhas	nº de camadas	ϕ (mm)	S_r (mm)	$A_s f_y$ no cone	κ	ρ (%)
L1	laje de referência						1,45
L2	4	3	4,2	$0,50d$	118	0,41	1,45
L3	4	3	4,2	$0,75d$	118	0,41	1,45
L4	5	3	4,2	$0,50d$	147	0,51	1,45
L5	5	3	4,2	$0,75d$	147	0,51	1,45
L6	6	3	4,2	$0,75d$	177	0,62	1,45
L7	6	3	4,2	$0,50d$	177	0,62	1,45
L8	6	3	4,2	$1,00d$	118	0,41	1,45

Cálculo de κ considerando a carga de ruptura da laje de referência (L1) igual a 285 kN
 $S_0 = 0,5d$

- Variação das alturas e comprimentos (h e L) das lajes dessa pesquisa, que tiveram o índice κ menor que 0,70.

A sugestão é que sejam feitas lajes com comprimentos e alturas diferentes das realizadas nessa pesquisa, mas mantendo a mesma armadura de cisalhamento utilizada no Grupo 2, para verificar se essas variáveis irão influenciar nos resultados das lajes. Uma opção para essa sugestão encontra-se na Tabela A-2.

Tabela A-2 – Variação da altura e comprimento das lajes dessa pesquisa com κ menor que 0,70

Lajes	dimensões		Armadura de cisalhamento						A_s flexão
	L (mm)	h (mm)	nº de linhas	nº de camadas	ϕ (mm)	S_r (mm)	$A_s f_y$ no cone	κ	ρ (%)
L1	2000	150	laje de referência						1,38
L2	2000	150	4	3	4,2	0,50d	118	0,41	1,38
L3	2000	150	4	3	4,2	0,75d	118	0,41	1,38
L4	2000	150	5	3	4,2	0,50d	147	0,51	1,38
L5	2000	150	5	3	4,2	0,75d	147	0,51	1,38
L6	2000	150	6	3	4,2	0,50d	177	0,62	1,38
L7	2000	150	6	3	4,2	0,75d	177	0,62	1,38
L8	2000	150	6	3	4,2	1,00d	118	0,41	1,38

Cálculo de κ considerando a carga de ruptura da laje de referência (L1) igual a 285 kN
 $S_0 = 0,50d$

- Ensaios de lajes similares à L9 dessa pesquisa, variando as distâncias radiais entre os *studs*.

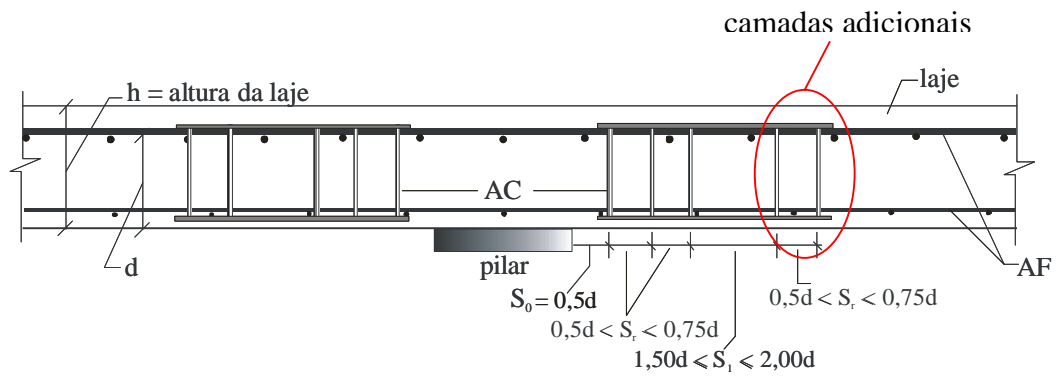
Na tabela A-3 encontram-se as sugestões das possíveis variações.

Tabela A-3 – Sugestões de possíveis variações para lajes com 6 linhas e 3 camadas de AC

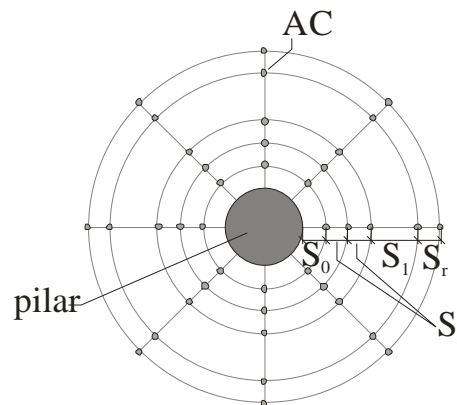
Lajes	Armadura de cisalhamento					
	nº de linhas	nº de camadas	ϕ (mm)	S_r (mm)	$A_s f_y$ no cone	κ
L1	laje de referência					
L2	6	3	4,2	0,50d	175	0,61
L3	6	3	4,2	0,60d	175	0,61
L4	6	3	4,2	0,75d	175	0,61
L5	6	3	4,2	1,00d	117	0,41
L6	6	3	5,0	0,50d	212	0,74
L7	6	3	5,0	0,75d	212	0,74
L8	6	3	5,0	1,00d	141	0,50

Cálculo de κ considerando a carga de ruptura da laje de referência (L1) igual a 285 kN
 $S_0 = 0,50d$

- Lajes com camadas adicionais



VISTA EM CORTE



VISTA EM PLANTA

Figura A-02 – Detalhe de camadas adicionais de armadura de cisalhamento para resistência pós-punção

A distância sugerida entre a primeira camada adicional de armadura de cisalhamento e a última camada (S_1) é maior que a estipulada pela norma NBR 6118:2003 para que se obtenha uma superfície de ruptura nessa região, e essa distância não deverá ultrapassar o dobro do valor da altura efetiva da laje para que a superfície de ruptura cruze as camadas adicionais.

A Tabela A-4 apresenta sugestões para a armadura de cisalhamento com camadas adicionais e os resultados de cálculos de ruptura dessas lajes, segundo a NBR 6118/2003.

Tabela A-4 – Sugestões para armadura de cisalhamento com camadas adicionais e resultados de cálculos de ruptura, segundo a NBR 6118 / 2003.

Lajes	AC - para ruptura externa					AC - camadas adicionais						Total
	nº de linhas	nº de camadas	ϕ (mm)	S_r (mm)	$V_{calc (ext)}$ (kN)	nº de linhas	nº de camadas	ϕ (mm)	S_r (mm)	S_1 (mm)	$V_{calc (int)}$ (kN)	$V_{ext} + V_{int}$ (kN)
L1	8	2	5,0	$0,50d$	324,489	8	2	4,2	$0,75d$	$1,50d$	261,51	586,00
L2	8	2	5,0	$0,75d$	348,419	8	2	4,2	$0,75d$	$1,50d$	261,51	609,93
L3	8	3	5,0	$0,50d$	364,691	8	2	4,2	$0,75d$	$1,50d$	261,51	626,20
L4	8	3	5,0	$0,75d$	412,551	8	2	4,2	$0,75d$	$1,50d$	261,51	674,06
L5	6	3	5,0	$0,50d$	336,825	6	2	4,2	$0,75d$	$1,50d$	241,90	578,72
L6	6	3	5,0	$0,75d$	336,825	6	2	4,2	$0,50d$	$2,00d$	227,19	564,01
L7	6	3	5,0	$0,50d$	336,825	6	2	5,0	$0,50d$	$2,00d$	238,18	575,01
L8	6	3	5,0	$0,75d$	336,825	6	2	5,0	$0,75d$	$2,00d$	238,18	575,01

- Pilares quadrados

Para essa pesquisa, como foram utilizados números de linhas inferiores a oito e devido à dificuldade da distribuição da armadura de cisalhamento em relação ao pilar, trabalhou-se com uma área carregada circular de diâmetro igual a 150 mm.

Em termos de pilar quadrado, para um índice κ próximo de 0,6, a proposta é que sejam utilizadas quatro linhas e duas camadas de *studs* de diâmetro 5,0 mm, e, para a redução da distância circunferencial entre as camadas mais externas, colocar um conector adicional entre essas camadas. A Figura A-03 apresenta essa distribuição de armadura de cisalhamento para laje com pilar quadrado.

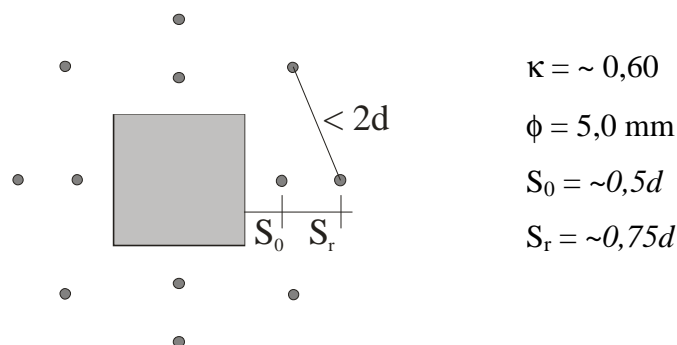
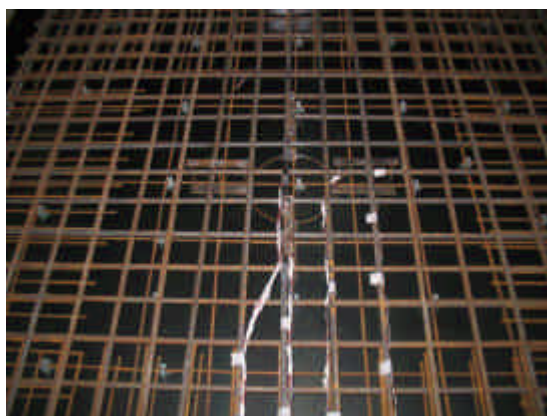


Figura A-03 – Distribuição da armadura de cisalhamento para laje com pilar quadrado

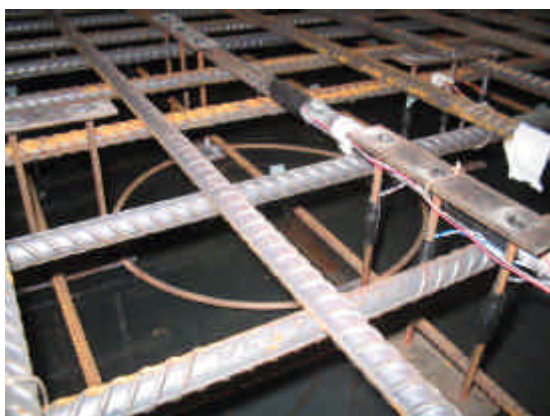
ANEXO 5

FOTOGRAFIAS

Armações das lajes – Pré-concretagem



Armações das lajes / Preparação para a concretagem



Durante e após a concretagem



Armadura de cisalhamento instrumentada / Ensaio dos *studs*



Pós - ruptura das lajes do Grupo 2



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)