

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**COMPORTAMENTO AO PUNÇONAMENTO DE LAJES COGUMELO
DE CONCRETO ARMADO COM PILARES RETANGULARES E
FUROS DE GRANDES DIMENSÕES**

LIANA DE LUCCA JARDIM BORGES

**ORIENTADORES: GUILHERME SALES S. DE A. MELO
RONALDO BARROS GOMES**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS
PUBLICAÇÃO: E.TD. – 002A/2004**

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO/2004

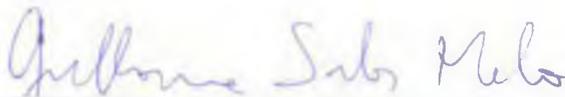
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**COMPORTAMENTO AO PUNÇIONAMENTO DE LAJES COGUMELO
DE CONCRETO ARMADO COM PILARES RETANGULARES E FUROS
DE GRANDES DIMENSÕES**

LIANA DE LUCCA JARDIM BORGES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:



GUILHERME SALES SOARES DE AZEVEDO MELO, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)



RONALDO BARRÓS GOMES, Ph.D. (UFG)
(ORIENTADOR)



JOÃO CARLOS TEATINI DE SOUZA CLIMACO, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



YOSIAKI NAGATO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



IBRAHIM ABD EL MALIK SHEHATA, Ph.D. (COPPE/UFRJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)



GIUSEPPE BARBOSA GUIMARÃES, Ph.D. (PUC/RJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília/DF, 12 de Fevereiro de 2004.

FICHA CATALOGRÁFICA

BORGES, LIANA DE LUCCA JARDIM

Comportamento ao Puncionamento de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares e Furos de Grandes Dimensões [Distrito Federal] 2004.

xxv, 367 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2004)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Laje Cogumelo

2. Puncionamento

3. Pilar Retangular

4. Furos em Lajes

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BORGES, L.L.J. (2004). 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, 367 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Liana de Lucca Jardim Borges

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Comportamento ao Puncionamento de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares e Furos de Grandes Dimensões

GRAU / ANO: Doutor / 2004

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


Liana de Lucca Jardim Borges

Rua Cel. Serafim Agapito Quadra 6 Lote 7 n° 190 Apt° 102

Vila Maria José - Goiânia/GO - Brasil - CEP: 74815-470

e-mail: lianajardim@ig.com.br

A
meu filho, Luís Guilherme,
meu marido, Renato,
meus pais, Sylvio e Leda (in memorian),
meus irmãos, Fabrício e Rodrigo,
e meus avós, Oscar (in memorian) e Alzira (in memorian).

AGRADECIMENTOS

O meu sincero agradecimento aos professores Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo e Ronaldo Barros Gomes pela paciência e competente orientação durante os anos de doutorado.

Ao professor Paul E. Regan, da Universidade de Westminster (UK), pelas valiosas sugestões e esclarecimentos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília, pelas disciplinas ministradas e informações valiosas.

Aos colegas do PECC e CMEC/UFG (Curso de Mestrado em Engenharia Civil/Universidade Federal de Goiás) pela colaboração e apoio na execução dos ensaios, em especial, a Alessandra Luciano Carvalho, Ana Lúcia Carrijo Adorno, Jales Almeida Silva, Leandro Mouta Trautwein e Tais Helena Musse.

Aos engenheiros, técnicos e demais funcionários dos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., situado em Aparecida de Goiânia/GO, pelo apoio técnico e financeiro para a realização de todo o programa experimental desta tese de doutorado, em especial, aos eng^{os} Walton Pacelli de Andrade, Moacir Alexandre Souza de Andrade, Rubens Machado Bittencourt, Reynaldo Machado Bittencourt e Albéria Cavalcante, pela contribuição eficaz e contínua na realização desta pesquisa.

À CAPES e CNPq, pela bolsa de estudos.

Ao Renato e Luis Guilherme, pelo incansável e imensurável apoio, incentivo, paciência, admiração e amor.

Ao meu pai, Sylvio, e irmãos, Fabrício e Rodrigo, pelo grande apoio, solidariedade, incentivo, e amor.

A DEUS, minha razão de existir, pela ajuda espiritual e infinito amor.

RESUMO

São analisadas experimentalmente 20 (vinte) lajes cogumelo de concreto armado de dimensões 3000 mm x 3000 mm x 200 mm, e resistência à compressão em torno de 40 MPa e altura útil de aproximadamente 164 mm, submetidas à punção simétrica. As principais variáveis da pesquisa foram: a relação entre as dimensões da seção transversal retangular do pilar (c_{max}/c_{min} entre 1 e 4, com c_{min} constante); o número de furos na região do pilar, e o detalhamento da armadura de cisalhamento.

É apresentada uma proposta de inclusão do parâmetro $c_{max}d$ (c_{max} é a maior dimensão da seção transversal do pilar e d é a altura útil da laje) nas expressões de cálculo da resistência à punção do CEB-FIP (1991) e do ACI (2002). Para a norma brasileira NBR-6118 (2003) é sugerida uma forma de cálculo do perímetro efetivo de controle de lajes com furos próximos ao pilar.

Os resultados mostraram uma redução na taxa de crescimento da resistência à punção das lajes quando se aumenta a relação c_{max}/c_{min} , mantendo-se c_{min} (menor dimensão da seção transversal do pilar) constante, com as forças cortantes concentrando-se nas extremidades do pilar, principalmente com o aumento da relação c_{max}/c_{min} .

Com relação à presença de furos adjacentes ao pilar, observou-se uma redução de rigidez e de resistência em até 23% para as dimensões de furos utilizadas. A utilização de armadura de cisalhamento, como disposta na pesquisa, restabeleceu e até superou a resistência à punção da laje monolítica de referência.

As normas de projeto que apresentam no cálculo da resistência a punção prescrições para a consideração da geometria do pilar (ACI (2002), EC-2 (1992) e a NBR-6118 (1978)), e para a consideração de furos próximos ou adjacentes ao pilar (ACI (2002), BS8110 (1997), EC-2 (1992), EC-2 (2001) e a NBR-6118 (2003)), mostraram-se conservadoras (V_{Exp}/V_{calc} entre 1,21 e 1,50) nas estimativas das cargas de ruptura das lajes com pilares retangulares sem furos e sem armadura de cisalhamento (série I). As normas do CEB-FIP (1991) e NBR-6118

(2003) forneceram estimativas praticamente iguais às cargas obtidas experimentalmente ($V_{Exp} V_{calc} = 0,99$) para essas lajes.

A proposta de inclusão do parâmetro $c_{max} d$ no cálculo da resistência à punção nas expressões do ACI (2002) e CEB-FIP (1991) conduziu a estimativas mais próximas das cargas obtidas experimentalmente e a favor da segurança para as lajes com pilares retangulares e furos (série 2), e para as lajes com pilares retangulares, furos e armadura de cisalhamento (série 3). A proposta de cálculo do perímetro efetivo de controle para a norma NBR-6118 (2003), utilizando o método do Handbook to BS8110 (1987), também forneceu estimativas mais próximas dos resultados experimentais para as lajes com pilares retangulares e furos (série 2), e para as lajes com pilares retangulares, furos e armadura de cisalhamento (série 3).

ABSTRACT

Twenty reinforced concrete flat slabs (3000 mm x 3000 mm x 200 mm) with concrete resistance around 40 MPa and effective height between 139 and 164 mm are tested, submitted the symmetrical punching. The principal variables of the research were: relationship between the dimensions of the rectangular dimension of the column (c_{max}/c_{min} between 1 and 4), the number of holes at the columns region, and the shear reinforcement detailing.

A proposal for inclusion of the parameter $c_{max} d$ (c_{max} being the largest dimension of the column and d the effective height of the slab) in the expressions of the punching shear resistance of CEB-FIP (1991) and ACI (2002) is presented. For the code NBR-6118 (2003) it is suggested a way to calculate the effective control perimeter of flat slabs with holes close to the column.

The results showed a reduction in the growth rate of the punching shear resistance of the slabs when the relation $c_{max} c_{min}$ is increased, maintaining c_{min} (smaller dimension of the column) constant, with the shear forces concentrating on the extremities of the column, mainly with the increase of the relation $c_{max} c_{min}$.

With relation to the presence of holes adjacent to the column it was observed a reduction in rigidity and in resistance up to 23% for the dimensions of holes used. The use of shear reinforcement, as disposed in the research, reestablished and even overcame the punching shear resistance of the monolithic reference slab.

The design codes that for the calculation of punching shear resistance considers the column geometry (ACI (2002), EC-2 (1992)), and considers holes close or adjacent to the column (ACI (2002), BS8110 (1997), EC-2 (1992), EC-2 (2001) and NBR-6118 (2003)), were conservatives (V_{Exp}/V_{calc} between 1,21 and 1,50) in estimating the rupture loads of the slabs with rectangular columns without holes nor shear reinforcement (series 1). CEB-FIP (1991) and NBR-6118 (2003) presented estimates practically equal to the experimentally obtained ($V_{Exp}/V_{calc} = 0,99$) for these slabs.

The proposal of the inclusion of the c_{max}/d parameter for the calculation of the punching shear resistance in the expressions of ACI (2002) and CEB-FIP (1991) led to closer estimates for the slabs with rectangular columns and holes (series 2) and for the slabs with rectangular columns, holes and shear reinforcement (series 3). The proposal of effective control perimeter calculation for the NBR-6118 (2003) code, using the BS8110 handbook method (1987) also led to closer estimates for the slabs with rectangular columns and holes (series 2) and for the slabs with rectangular columns, holes and shear reinforcement (series 3).

SUMÁRIO

CAPÍTULO	PÁG.
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 - OBJETIVOS	2
1.3 - APRESENTAÇÃO DA PESQUISA	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - INTRODUÇÃO	5
2.2 - NORMAS DE PROJETO	5
2.2.1 - ACI 318 (2002)	6
2.2.2 - BS8110 (1997)	10
2.2.3 - CEB-FIP MC 90 (1991)	13
2.2.4 - EUROCODE 2 (1992)	17
2.2.5 - EUROCODE 2 (2001)	20
2.2.6 - HANDBOOK TO BS8110/85 (1987)	23
2.2.7 - NBR-6118 (1978)	24
2.2.8 - NBR-6118 (2003)	26
2.3 - LAJES COM PILARES RETANGULARES	30
2.3.1 - PESQUISAS REALIZADAS	30
2.3.2 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA LITERATURA COM NORMAS DE PROJETO	54
2.3.2.1 - COMENTÁRIOS FINAIS	66
2.4 - LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO	66
2.4.1 - PESQUISAS REALIZADAS	66
2.4.2 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA LITERATURA COM NORMAS DE PROJETO - LAJES SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO	102
2.4.2.1 - COMENTÁRIOS FINAIS	110
2.4.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA LITERATURA COM NORMAS DE PROJETO - LAJES COM ARMADURA DE CISALHAMENTO	111
2.4.3.1 - COMENTÁRIOS FINAIS	115
3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	117
3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	117
3.2 - MODELOS EXPERIMENTAIS	117
3.2.1 - DESCRIÇÃO DAS LAJES COM PILARES RETANGULARES (SÉRIE 1)	118
3.2.1.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	118
3.2.1.2 - ARMADURA DE FLEXÃO	119
3.2.1.3 - CONCRETO	121
3.2.2 - DESCRIÇÃO DAS LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO (SÉRIES 2 E 3)	121
3.2.2.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	121
3.2.2.2 - ARMADURA DE FLEXÃO	123
3.2.2.3 - CONCRETO	127
3.2.2.4 - ARMADURA DE CISALHAMENTO	127

3.3 - MOLDAGEM E CURA	131
3.4 - SISTEMA DE ENSAIO	134
3.5 – INSTRUMENTAÇÃO	136
3.5.1 - LAJES COM PILARES RETANGULARES (SÉRIE 1)	137
3.5.1.1 – DEFLETÔMETROS	137
3.5.1.2 – EXTENSÔMETROS	138
3.5.2 - LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO (SÉRIES 2 E 3)	139
3.5.2.1 - DEFLETÔMETROS	139
3.5.2.2 - EXTENSÔMETROS	141
3.6 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO	143
4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES COM PILARES RETANGULARES (SÉRIE 1)	145
4.1 – INTRODUÇÃO	145
4.2 – MATERIAIS	145
4.2.1 – CONCRETO	145
4.2.2 – AÇO	148
4.3 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS	148
4.4 - DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO	155
4.5 – FISSURAÇÃO	168
4.6 – RESISTÊNCIA	173
4.6.1 – FLEXÃO	173
4.6.2 – CISALHAMENTO	175
4.6.3 - PÓS-PUNCIONAMENTO	179
4.6.4 - ANÁLISE DAS LAJES COM PILARES RETANGULARES	180
4.6.4.1 – INTRODUÇÃO	180
4.6.4.2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	180
4.6.4.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM RESULTADOS DA LITERATURA	183
5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO (SÉRIE 2 E 3)	185
5.1 – INTRODUÇÃO	185
5.2 – MATERIAIS	185
5.2.1 – CONCRETO	185
5.2.2 – AÇO	187
5.3 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS	190
5.4 - DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO	203
5.5 - DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE CISALHAMENTO	210
5.6 – FISSURAÇÃO	217
5.7 – RESISTÊNCIA	224
5.7.1 – FLEXÃO	224
5.7.2 – CISALHAMENTO	225
5.7.3 - PÓS-PUNCIONAMENTO	242
5.7.4 - ANÁLISE LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA CISALHAMENTO	243
5.7.4.1 – INTRODUÇÃO	243
5.7.4.2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	244
5.7.4.3 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM	

RESULTADOS DA LITERATURA	248
6 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS ESTIMADOS PELAS NORMAS DE PROJETO E POR PESQUISADORES	257
6.1 - INTRODUÇÃO	257
6.2 - LAJES COM PILARES RETANGULARES	257
6.2.1 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA	257
6.2.2 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA	261
6.2.3 - PROPOSTA DE CONSIDERAÇÃO DA RELAÇÃO $c_{máx} d$ NAS EXPRESSÕES DAS NORMAS DE PROJETO DO ACI (2002) E CEB (1991)	269
6.2.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ESTIMADOS PELAS NORMAS DE PROJETO DO ACI (2002) E CEB-FIP (1991) COM OS ESTIMADOS PELA PROPOSTAS PARA AS LAJES DA SÉRIE 1 E DA LITERATURA	270
6.3 - LAJES COM FUIROS	274
6.3.1 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA	274
6.3.2 - ANÁLISE DO MÉTODO DE ROLL <i>et al.</i> (1971)	278
6.3.2.1 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA	278
6.3.2.2 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA	280
6.3.2.3 - PROPOSTA PARA A MODIFICAÇÃO DO LIMITE INFERIOR DA EXPRESSÃO DE ROLL <i>et al.</i> (1971)	284
6.3.3 - PROPOSTA DE CÁLCULO DO PERÍMETRO EFETIVO DE CONTROLE PARA A NBR-6118 (2003) UTILIZANDO O MÉTODO DO HANDBOOK TO BS8110/85 (1987)	289
6.3.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ESTIMADOS PELAS NORMAS DE PROJETO E POR PESQUISADORES COM OS ESTIMADOS PELA PROPOSTA PARA A NBR-6118 (2003)	289
6.4 - LAJES COM ARMADURA DE CISALHAMENTO	297
6.4.1 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA	297
6.4.2 - ANÁLISE DO MÉTODO DE ROLL <i>et al.</i> (1971)	308
6.4.2.1 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA	308
6.4.2.2 - LAJES DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA	310
6.4.2.3 - DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PARCELA DE ARMADURA DE CISALHAMENTO NO CÁLCULO DA RESISTÊNCIA A PUNÇÃO UTILIZANDO A EXPRESSÃO DE ROLL <i>et al.</i> (1971)	312
6.4.3 - COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DA NBR-6118 (2003) COM AS DA PROPOSTA PARA A NORMA BRASILEIRA	314
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	321
7.1 - CONCLUSÕES	321
7.1.1 - LAJES COM PILARES RETANGULARES (SÉRIE 1)	322
7.1.1.1 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS	322
7.1.1.2 - DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO	322
7.1.1.3 - FISSURAÇÃO	322
7.1.1.4 - MODOS, CARGAS E SUPERFÍCIES DE RUPTURA	322
7.1.1.5 - NORMAS DE PROJETO E MÉTODOS DE CÁLCULO DE PESQUISADORES	323
7.1.1.6 - PROPOSTA DE CONSIDERAÇÃO DO PARÂMETRO $c_{máx} d$	323
7.1.2 - LAJES COM FUIROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO (SÉRIES 2 E 3)	324
7.1.2.1 - ARMADURA DE FLEXÃO	324

7.1.2.2 - ARMADURA DE CISALHAMENTO	324
7.1.2.3 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS	324
7.1.2.4 - DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO	325
7.1.2.5 - DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE CISALHAMENTO	325
7.1.2.6 - FISSURAÇÃO	326
7.1.2.7 - MODOS, CARGAS E SUPERFÍCIES DE RUPTURA	326
7.1.2.8 - NORMAS DE PROJETO E MÉTODOS DE CÁLCULO DE PESQUISADORES	327
7.1.2.9- PROPOSTA DE CALCULO DO PERIMETRO EFETIVO DE CONTROLE PARA A NB1 (2003)	327
7.2 - SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS	328
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	329
A - RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETO	335
B - LEITURAS DOS DEFLETÔMETROS E EXTENSÔMETROS	341
C - CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES UTILIZANDO A TEORIA DAS LINHAS DE RUPTURA	353
D - CÁLCULO DAS FORÇAS NOS TIRANTES DO SISTEMA DE ENSAIO	356

LISTA DE TABELAS

Tabela	PÁG.
2.1 - Características das lajes 10, 11 e 12 de FORSSEL & HOLMBERG (1946)	31
2.2 - Características das lajes testadas por HAWKINS et al. (1971)	33
2.3 - Resultados dos ensaios realizados por HAWKINS et al. (1971)	34
2.4 - Lajes de REGAN & REZAI-JORABI (1988) com ruptura por punção	41
2.5 - Características das lajes monolíticas ensaiadas por TENG et al. (1999)	44
2.6 - Características das lajes ensaiadas por AL-YOUSIF & REGAN (2003)	46
2.7 - Características das lajes monolíticas ensaiadas por SILVA (2003)	50
2.8 - Características, cargas e modos de ruptura das lajes de OLIVEIRA (2003)	51
2.9 - Fatores de flexão propostos por OLIVEIRA (2003)	54
2.10 - Estimativas dos métodos de cálculo para as lajes da literatura carregadas/apoiadas nos quatro bordos	59
2.11 - Características e cargas de ruptura das lajes de MOWRER & VANDERBILT (1967)	69
2.12 - Parâmetros dos furos nas lajes ensaiadas por ROLL et al. (1971)	71
2.13 - “Layout” dos furos	71
2.14 - Características das lajes de GOMES e ANDRADE (1995)	77
2.15 - Resultados dos ensaios das lajes de GOMES e ANDRADE (1995)	78
2.16 - Características das lajes de TENG et al. (1999)	81
2.17 - Comparação entre as recomendações propostas por TENG et al. (1999) e algumas normas de projeto	84
2.18 - Características e resultados das lajes de EL-SALAKAWY et al. (1999)	86
2.19 - Características e resultados das lajes de REGAN (1999)	90
2.20 - Características e resultados das lajes de IOANNOU (2001)	94
2.21 - Comparação entre cargas experimentais e teóricas das lajes de IOANNOU (2001)	97
2.22 - Características das lajes ensaiadas por SILVA (2003)	98
2.23 - Resultados dos ensaios das lajes de SILVA (2003)	101
2.24 - Estimativas das normas e métodos de cálculo para as lajes com furos	105
2.25 - Estimativas normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento	112
3.1 – Características geométricas das lajes da Série 1	119
3.2 – Composição do concreto	121
3.3 – Características geométricas das lajes das séries 2 e 3	122
4.1 – Propriedades do concreto no dia do ensaio das lajes da Série 1	147
4.2 – Propriedades dos aços utilizados nas lajes da Série 1	148
4.3 – Deslocamentos centrais máximos medidos nas lajes da Série 1	153
4.4 – Deformações máximas registradas nas barras da armadura de flexão das lajes da Série 1	156
4.5 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 1	169
4.6 – Cargas de ruptura por flexão das lajes da Série 1	174
4.7 – Cargas e modos de ruptura observados nas lajes da Série 1	179
4.8 – Cargas de pós-puncionamento das lajes da Série 1	179

4.9 – Influência da variação do perímetro do pilar na variação da carga de ruptura experimental das lajes da Série 1	181
4.10 – Influência da relação entre lados do pilar na carga de ruptura experimental das lajes da Série 1	183
4.11 – Comparação dos resultados experimentais das lajes da Série 1 com os de TENG <i>et al.</i> (1999), SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003)	184
5.1 – Propriedades do concreto no dia do ensaio das lajes das séries 2 e 3	186
5.2 – Propriedades dos aços utilizados nas lajes das séries 2 e 3	187
5.3 – Cargas de fissuração visual das lajes das séries 2 e 3	218
5.4 – Cargas de ruptura por flexão das lajes das séries 2 e 3	225
5.5 – Cargas e modos de ruptura das lajes das séries 2 e 3	242
5.6 – Cargas de pós-puncionamento das lajes das séries 2 e 3	243
5.7 – Influência da presença do furo na carga de ruptura experimental	244
5.8 – Contribuição da armadura de cisalhamento na carga de ruptura experimental	247
5.9 – Comparação dos resultados experimentais das lajes com furos da literatura com os da presente pesquisa	250
5.10 – Comparação dos resultados experimentais das lajes com armadura de cisalhamento da literatura com os da presente pesquisa	255
6.1 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados por normas de projeto e por pesquisadores para as lajes da Série 1	259
6.2 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados por normas de projeto e por pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura	262
6.3 – Estimativa média, desvio padrão e coeficiente de variação das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura	263
6.4 – Comparação das estimativas do ACI/02 e CEB/91 com as respectivas propostas	271
6.5 – Comparação das estimativas do CEB/91 e do método de OLIVEIRA/03 com as estimativas da proposta para o CEB/91	272
6.6 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados pelas normas de projeto e por pesquisadores para as lajes da Série 2	277
6.7 – Estimativas do método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 2	278
6.8 – Estimativas do método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura	281
6.9 – Estimativas da proposta para o método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura	286
6.10 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos da literatura, incluindo a proposta para a NB1 (2003)	291
6.11 – Estimativas da norma do ACI (2002) para as lajes da Série 3	299
6.12 – Estimativas da norma do BS8110 (1987) para as lajes da Série 3	300
6.13 – Estimativas da norma do HANDBOOK TO BS8110 (1987) para as lajes da Série 3	301
6.14 – Estimativas da norma do EC2 (1992) para as lajes da Série 3	302
6.15 – Estimativas da norma do EC2 (2001) para as lajes da Série 3	303
6.16 – Estimativas da norma da NB1 (2003) para as lajes da Série 3	304
6.17 – Estimativas da proposta para a NB1 (2003) para as lajes da Série 3	305
6.18 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados por normas de projeto para as lajes da Série 3	307
6.19 – Estimativas do método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 3	308

6.20 – Estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3 e da literatura	310
6.21 – Resultados das estimativas para armadura e concreto das lajes com armadura de cisalhamento, utilizando a equação de ROLL et al. (1971)	313
6.22 – Comparação das estimativas das normas de projeto com as da proposta para a NB1 (2003) para as lajes da Série 3 e da literatura	316
A.1 - Resultados individuais dos ensaios em corpos de prova cilíndricos de concreto de dimensões 150 mm x 300 mm	335
A.2 - Resultados individuais dos ensaios de tração axial em amostras de aço de vários diâmetros utilizados nas lajes da Série 1	340
A.3 - Resultados individuais dos ensaios de tração axial em amostras de aço de vários diâmetros utilizados nas lajes das séries 2 e 3	340
B.1 – Deslocamentos da laje L41	341
B.2 – Deslocamentos da laje L41A	341
B.3 – Deslocamentos da laje L42	342
B.4 – Deslocamentos da laje L42A	342
B.5 – Deslocamentos da laje L43A	342
B.6 – Deslocamentos da laje L44	343
B.7 – Deslocamentos da laje L45	343
B.8 – Deslocamentos da laje L46	344
B.9 – Deslocamentos da laje L45FS_CG	344
B.10 – Deslocamentos da laje L45FD_CG	345
B.11 – Deslocamentos da laje L45FD – Direção x	345
B.12 – Deslocamentos da laje L45FD – Direção y	345
B.13 – Deslocamentos da laje L45FFS_CG	346
B.14 – Deslocamentos da laje L45FFD_CG	346
B.15 – Deslocamentos da laje L45FFD – Direção x	346
B.16 – Deslocamentos da laje L45FFD – Direção y	347
B.17 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC2 – Direção x	347
B.18 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC2 – Direção y	348
B.19 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC3 – Direção x	348
B.20 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC3 – Direção y	349
B.21 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC4 – Direção x	349
B.22 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC4 – Direção y	349
B.23 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC5 – Direção x	350
B.24 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC5 – Direção y	350
B.25 – Deslocamentos da laje L45_AC1 – Direção x	351
B.26 – Deslocamentos da laje L45_AC1 – Direção y	351
B.27 – Deslocamentos da laje L45_AC5 – Direção x	352
B.28 – Deslocamentos da laje L45_AC5 – Direção y	352
C.1 – Cargas previstas para ruptura por flexão das lajes da Série 1	355
C.2 – Cargas previstas para ruptura por flexão das lajes das séries 2 e 3	355
D.1 – Características mecânicas dos tirantes	356
D.2 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45FD	358
D.3 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FD	358
D.4 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45FFD	358

D.5 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FFD	359
D.6 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45FFD_AC2	359
D.7 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FFD_AC2	360
D.8 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45FFD_AC3	360
D.9 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FFD_AC3	361
D.10 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45_AC1	361
D.11 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45_AC1	362

LISTA DE FIGURAS

Figura	PÁG.
2.1 – Perímetro de controle situado a $0,5d$ do pilar, de acordo com ACI (2002)	7
2.2 – Perímetro de controle situado a $0,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com ACI (2002)	10
2.3 – Perímetro de controle para lajes com furos, de acordo com ACI (2002)	10
2.4 – Perímetro de controle situado a $1,5d$ do pilar, de acordo com BS8110 (1997)	11
2.5 – Perímetro de controle para lajes com furos, de acordo com BS8110 (1997)	13
2.6 – Perímetro de controle a $2d$ do pilar, de acordo com CEB-FIP (1991)	14
2.7 – Perímetro de controle situado a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com CEB-FIP (1991)	17
2.8 – Perímetro de controle situado a $1,5d$ do pilar, de acordo com EUROCODE 2 (1992)	17
2.9 – Perímetro de controle de lajes com furos, de acordo com EUROCODE 2 (1992)	20
2.10 – Perímetros de controle a $2d$ do pilar em lajes (a) sem furos e (b) com furos, de acordo com EUROCODE 2 (2001)	20
2.11 – Perímetro de controle situado a $1,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com o EUROCODE 2 (2001)	23
2.12 – Considerações para o tratamento de furos em lajes sob punção, de acordo com o Handbook to BS8110 (1987)	23
2.13 – Perímetro de controle para (a) $c_{m\acute{a}x} / c_{m\acute{i}n} \leq 3$ e (b) $c_{m\acute{a}x} / c_{m\acute{i}n} > 3$, de acordo com NBR-6118 (1978)	26
2.14 – Perímetro de controle de lajes com furos, de acordo com NBR-6118 (2003)	26
2.15 – Perímetro de controle situado a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com a NBR-6118 (2003)	29
2.16 - Ancoragem para armadura de punção constituída por conectores do tipo pino, de acordo com a NBR-6118 (2003)	29
2.17 – Disposição da armadura de punção, de acordo com a NBR-6118 (2003)	29
2.18 – Detalhes das lajes 10, 11 e 12 de FORSSEL & HOLMBERG (1946) – unidades em mm	31
2.19 – Características das lajes e esquema de ensaio de HAWKINS et al. (1971) – unidades em mm	32
2.20 – Comparação entre os resultados experimentais de HAWKINS et al.(1971) e as expressões de MOE(1961) e ACI-ASCE Committee 326 (1962).	37
2.21 – Comparação entre resultados de HAWKINS et al. (1971) e a norma do ACI (1963)	38
2.22 – Modelo de laje ensaiada por VANDERBILT (1972) e instrumentação dos pilares – unidades em mm	40
2.23 – Modelo das lajes ensaiadas por REGAN & REZAI-JORABI (1988) – unidades em mm	40
2.24 – Modelos empregados na proposta de REGAN & REZAI-JORABI (1988)	42
2.25 – Características das lajes ensaiadas por TENG et al. (1999) – unidades em mm	43
2.26 – Perímetro de controle proposto por TENG et al. (1999) para lajes com pilares retangulares	45

2.27 – Lajes ensaiadas por AL-YOUSIF & REGAN (2003) – unidades em mm	46
2.28 – Características das lajes L1, L2, L3 e L12 ensaiadas por SILVA (2003) – unidades em mm	49
2.29 – Esquema de ensaio de SILVA (2003) – unidades em mm	49
2.30 – Armadura de flexão das lajes L1, L2, L3 e L12 de SILVA (2003) – unidades em mm	50
2.31 – Disposição do carregamento nas lajes de OLIVEIRA (2003) – unidades em mm	52
2.32 – Tipos de lajes classificadas por OLIVEIRA (2003)	54
2.33 – Comparação entre alguns métodos e normas de projeto para lajes monolíticas	56
2.34 – Estimativas das lajes ensaiadas por FORSSEL & HOLMBERG (1946)	60
2.35 – Estimativas das lajes ensaiadas por HAWKINS <i>et al.</i> (1971)	61
2.36 – Estimativas das lajes ensaiadas por TENG <i>et al.</i> (1999)	62
2.37 – Estimativas das lajes ensaiadas por AL-YOUSIF & REGAN (2003)	63
2.38 – Estimativas das lajes ensaiadas por SILVA (2003)	64
2.39 – Estimativas das lajes ensaiadas por OLIVEIRA (2003)	65
2.40 – Armadura de cisalhamento utilizada por GOMES e ANDRADE (1995) – unidades em mm	76
2.41 – Disposição dos furos em relação ao pilar nas lajes de GOMES & ANDRADE (1995) – unidades em mm	76
2.42 – Lajes ensaiadas por GOMES e ANDRADE (1995)	80
2.43 – Perímetro crítico efetivo recomendado por TENG <i>et al.</i> (1999) para lajes com furos	83
2.44 – Lajes ensaiadas por EL-SALAKAWY <i>et al.</i> (1999) – unidades em mm	85
2.45 – Detalhamento da armadura principal de flexão da laje SEO testada por EL-SALAKAWY <i>et al.</i> (1999)	86
2.46 – Locais onde armadura de punção é inefetiva, segundo a BS8110 (1997)	88
2.47 – Perímetro crítico proposto por REGAN (1974) para o Handbook to BS8110/85 (1987)	88
2.48 – Lajes ensaiadas por REGAN (1999) – unidades em mm	89
2.49 – Distribuição da armadura de cisalhamento utilizada por REGAN (1999)	91
2.50 – Detalhamento da armadura negativa de flexão utilizada por REGAN (1999) – unidades em mm	92
2.51 – Distribuição da armadura de cisalhamento utilizada por IOANNOU (2001)	95
2.52 – Detalhe dos “shearbands” utilizados por IOANNOU (2001)	95
2.53 – Tratamento alternativo de furos proposto por IOANNOU (2001)	96
2.54 – Perímetros de controle para as lajes ensaiadas por IOANNOU (2001)	96
2.55 – Tratamento da laje PSSCH1 como laje com pilar de borda	97
2.56 – Características das lajes com furos e/ou armadura de cisalhamento de SILVA (2003) – unidades em mm	99
2.57 – Armadura de cisalhamento das lajes L7 a L11 – unidades em mm	99
2.58 – Estimativas das normas e métodos de cálculo para as lajes com furos de MOWRER & VANDERBILT (1967)	107
2.59 – Estimativas normas e métodos de cálculo para as lajes com furos de ROLL, ZAIDI, SABNIS & CHUANG (1971)	107
2.60 – Estimativas normas e métodos de cálculo para as lajes com furos de GOMES & ANDRADE (1995)	108
2.61 – Estimativas normas e métodos de cálculo para as lajes com furos de TENG <i>et al.</i> (1999)	108

2.62 – Estimativas normas e métodos de cálculo para as lajes com furos de EL-SALAKAWY et al (1999)	109
2.63 – Estimativas normas e métodos de cálculo para as lajes com furos de REGAN (1999) e IOANNOU (2001)	109
2.64 – Estimativas normas e métodos de cálculo para as lajes com furos de SILVA (2003)	110
2.65 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de GOMES & ANDRADE (1995)	113
2.66 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de REGAN (1999)	114
2.67 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de IOANNOU (2001)	114
2.68 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de SILVA (2003)	115
3.1 – Características geométricas das lajes da Série 1 (unidade em mm)	118
3.2 – Armadura de flexão das lajes da Série 1 (unidade em mm)	120
3.3 – Características geométricas das lajes das Séries 2 e 3 (unidades em mm)	122
3.4 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 2	123
3.5 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 3	126
3.6 – Detalhe dos “studs” utilizados nas lajes da Série 3 – unidades em mm	128
3.7 – Detalhamento da armadura de cisalhamento das lajes da Série 3 - unidades em mm	129
3.8 – Fotografias da armadura de cisalhamento na armação de flexão das lajes	130
3.9 – Fotografia da laje com furo e pronta para a moldagem	132
3.10 – Detalhe do estribo e alça, e posicionamento das alças nas lajes (em mm)	133
3.11 – Sistema de ensaio (unidades em mm)	135
3.12 – Posicionamento dos defletômetros nas lajes da Série 1 (unidades em mm)	137
3.13 – Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão das lajes da Série 1 (unidades em mm)	138
3.14 – Definição de deformações radiais e tangenciais	139
3.15 - Posicionamento dos defletômetros nas lajes das Séries 2 e 3	140
3.16– Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão das lajes da Série 2	141
3.17 – Posicionamento dos extensômetros na armadura de cisalhamento das lajes da Série 3	142
4.1 – Deslocamentos verticais da laje L41	149
4.2 – Deslocamentos verticais da laje L42	149
4.3 – Deslocamentos verticais da laje L41A	150
4.4 – Deslocamentos verticais da laje L42A	150
4.5 – Deslocamentos verticais da laje L43A	151
4.6 – Deslocamentos verticais da laje L44	151
4.7 – Deslocamentos verticais da laje L45	152
4.8 – Deslocamentos verticais da laje L46	152
4.9 – Deslocamentos centrais das lajes com pilar $150 \times c_{m\grave{a}x}$	154
4.10 – Deslocamentos centrais das lajes com pilar $200 \times c_{m\grave{a}x}$	154
4.11 – Deformações da armadura de flexão da laje L41	156
4.12 – Deformações da armadura de flexão da laje L41A	158
4.13 – Deformações da armadura de flexão da laje L42	159
4.14 – Deformações da armadura de flexão da laje L42A	161

4.15 – Deformações da armadura de flexão da laje L43A	162
4.16 – Deformações da armadura de flexão da laje L44	164
4.17 – Deformações da armadura de flexão da laje L45	165
4.18 – Deformações da armadura de flexão da laje L46	167
4.19 – Fissuração na laje L41	169
4.20 – Fissuração na laje L41A	170
4.21 – Fissuração na laje L42	170
4.22 – Fissuração na laje L42A	171
4.23 – Fissuração na laje L43A	171
4.24 – Fissuração na laje L44	172
4.25 – Fissuração na laje L45	172
4.26 – Fissuração na laje L46	173
4.27 – Superfícies de ruptura das lajes com pilar retangular – unidades em mm	176
4.28 – Influência da variação do perímetro do pilar na variação da carga de ruptura experimental das lajes da Série 1	182
4.29 – Comparação entre cargas de ruptura das lajes da presente pesquisa, TENG et al. (1999), SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003)	184
5.1 – Curvas “Tensão x Deformação” do concreto utilizado nas lajes	187
5.2 – Curvas “Tensão x Deformação” dos aços utilizados nas lajes das Séries 2 e 3	188
5.3 – Deslocamentos das lajes L45FS_CG e L45FD_CG	191
5.4 – Deslocamentos da laje L45FD	192
5.5 – Deslocamentos das lajes L45FFS_CG e L45FFD_CG	193
5.6 – Deslocamentos da laje L45FFD	194
5.7 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC2	195
5.8 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC3	196
5.9 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC4	197
5.10 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC5	198
5.11 – Deslocamentos da laje L45_AC1	199
5.12 – Deslocamentos da laje L45_AC5	200
5.13 – Deslocamentos centrais das lajes da Série 2	202
5.14 – Deslocamentos centrais das lajes da Série 3	202
5.15 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FS_CG	204
5.16 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FD_CG	205
5.17 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FD	206
5.18 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FFS_CG	207
5.19 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FFD_CG	208
5.20 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FFD	209
5.21 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC2	211
5.22 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC3	213
5.23 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC4	214
5.24 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC5	215
5.25 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45_AC1	215
5.26 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45_AC5	216
5.27 – Fissuração na laje L45FS_CG	218
5.28 – Fissuração na laje L45FD_CG	219
5.29 – Fissuração na laje L45FD	219
5.30 – Fissuração na laje L45FFS_CG	220
5.31 – Fissuração na laje L45FFD_CG	220
5.32 – Fissuração na laje L45FFD	221

5.33 – Fissuração na laje L45FFD_AC2	221
5.34 – Fissuração na laje L45FFD_AC4	222
5.35 – Fissuração na laje L45FFD_AC5	222
5.36 – Fissuração na laje L45_AC1	223
5.37 – Fissuração na laje L45_AC5	223
5.38 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (dimensões em mm)	227
5.39 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 2	228
5.40 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 3 (dimensões em mm)	234
5.41 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 3	235
6.1 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1	260
6.2 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura	264
6.3 – Tendência das estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura	268
6.4 – Tendência das estimativas das normas de projeto do ACI (2002), CEB (1991) e das propostas para as normas	272
6.5 – Tendência das estimativas da norma de projeto do CEB (1991), do método de OLIVEIRA/03 e da proposta para o CEB (1991)	274
6.6 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 2	278
6.7 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 – Curvas $V / bd\sqrt{f'_c} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	279
6.8 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 – Curvas $V/V_{flex} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	279
6.9 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas $V / bd\sqrt{f'_c} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	283
6.10 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas $V/V_{flex} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	283
6.11 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) e da proposta para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas $V / bd\sqrt{f'_c} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	288
6.12 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) e da proposta para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas $V/V_{flex} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	288
6.13 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de MOWRER & VANDERBILT (1967)	293
6.14 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de ROLL et al. (1971)	293
6.15 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de GOMES & ANDRADE (1995)	294

6.16 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de TENG <i>et al.</i> (1999)	294
6.17 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de REGAN (1999) e IOANNOU (2001)	295
6.18 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de EL-SALAKAWY <i>et al.</i> (1999)	295
6.19 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de SILVA (2003)	296
6.20 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes da Série 2	296
6.21 – Estimativas das normas de projeto para as lajes da Série 3	307
6.22 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 3 – Curvas $V / bd\sqrt{f'_c} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	309
6.23 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 3 – Curvas $V/V_{flex} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	309
6.24 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 3 e da literatura – Curvas $V / bd\sqrt{f'_c} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	311
6.25 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL <i>et al.</i> (1971) para as lajes da Série 3 e da literatura – Curvas $V/V_{flex} \times V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$	312
6.26 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de GOMES & ANDRADE (1995)	317
6.27 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de REGAN (1999)	317
6.28 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de IOANNOU (2001)	318
6.29 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de SILVA (2003)	318
6.30 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes da Série 3	319
7.1 – Perímetro efetivo de controle proposto para a NB1 (2003)	328
C.1 – Linhas de ruptura para as lajes das séries 1, 2 e 3	353
D.1 – Posição e identificação dos tirantes nas lajes	356
D.2 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FD	363
D.3 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FFD	364
D.4 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FFD_AC2	365
D.5 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FFD_AC3	366
D.6 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45_AC1	367

LISTA DE SÍMBOLOS

a	vão de cisalhamento
b	largura da laje, perímetro do pilar
b_0	perímetro de controle
c_{min}	menor dimensão da seção transversal do pilar
c_{max}	maior dimensão da seção transversal do pilar
d	altura útil da laje
d_x	altura útil da laje medida na direção x
d_y	altura útil da laje medida na direção y
e	excentricidade do furo em relação ao pilar
f'_c	resistência à compressão do concreto medida em corpos de prova cilíndricos
f_{c2}	resistência à compressão para concreto fissurado medido em corpos de prova cilíndricos
f_{cj}	resistência à compressão do concreto aos j dias
f_{ck}	resistência característica à compressão concreto medida em corpos de prova cilíndricos
f_{ckj}	resistência característica à compressão concreto medida em corpos de prova cilíndricos aos j dias
f_{cu}	resistência à compressão do concreto medida em corpos de prova cúbicos
f_u	resistência última do aço da armadura de flexão
f_{us}	resistência última do aço da armadura de cisalhamento
f_y	resistência ao escoamento do aço da armadura de flexão
f_{yv}, f_{ys}	resistência ao escoamento do aço da armadura de cisalhamento
f_{ywd}, f_{yd}	resistência ao escoamento de projeto do aço da armadura de cisalhamento
$f_{ywd,ef}$	resistência efetiva ao escoamento de projeto do aço da armadura de cisalhamento
h	altura total da laje
k	coeficiente de efeito de tamanho
l	comprimento da laje
r	um quarto do perímetro do pilar
s	espaçamento da armadura principal de flexão
s_0	distância radial entre a face do pilar e o primeiro elemento da armadura de cisalhamento
s_r	distância radial entre elementos da armadura de cisalhamento
u, u_1	perímetro de controle
u_0	perímetro do pilar
u_{ext}, u_{out}	perímetro de controle afastado da última camada de armadura de cisalhamento
$u_{n,ef}$	perímetro efetivo de controle situado afastado da última camada de armadura de cisalhamento
v	tensão de cisalhamento atuante
v_c, v_{R1}	resistência ao cisalhamento oferecida pelo concreto
v_{max}	resistência máxima ao cisalhamento na face do pilar
v_n	resistência nominal ao cisalhamento
v_s	resistência ao cisalhamento oferecida pela armadura de cisalhamento
v_{R2}	resistência ao cisalhamento de cálculo máxima
v_{R3}	resistência ao cisalhamento oferecida pelo concreto e armadura de cisalhamento

$V_{Rd,c}$	resistência ao cisalhamento de projeto fornecida pelo concreto
A_v, A_{sv}, A_{se}	área da armadura de cisalhamento dentro do perímetro de controle
A_{sw}	área da armadura de cisalhamento em uma camada ao redor do pilar
A_s	área da armadura de flexão
K	coeficiente de normalização da altura útil
V	força nominal atuante
V_c	força nominal resistente oferecida pelo concreto
V_{Exp}	carga de ruptura experimental
V_f	carga de fissuração visual
V_{flex}	carga de ruptura por flexão
V_n	força nominal resistente
V_{pp}	carga de pós-puncionamento
V_{ref}	força nominal resistente de referência para lajes com pilares quadrados de lado igual $2d$
$V_{Rd,c}$	força nominal resistente de projeto oferecida pelo concreto
V_s	força nominal resistente oferecida pela armadura
α	ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano médio da laje
α_s	coeficiente relacionado ao posicionamento do pilar em relação à laje
β	coeficiente relacionado à excentricidade da carga do pilar
β_c	relação entre maior e menor dimensão da seção transversal do pilar
ϵ_t	deformação tangencial
ϵ_r	deformação radial
γ_c	coeficiente de redução da resistência do concreto
ρ, ρ_l	taxa geométrica de armadura de flexão
ρ_x	taxa geométrica da armadura de flexão medida na direção x
ρ_y	taxa geométrica da armadura de flexão medida na direção y
τ_{r1}	tensão de cisalhamento resistente fornecida pelo concreto
τ_{r2}	tensão de cisalhamento resistente no perímetro do pilar
τ_{r3}	tensão de cisalhamento resistente fornecida pelo concreto e armadura de cisalhamento
τ_s	tensão de cisalhamento atuante uniformemente distribuída
τ_{wd}	tensão tangencial de cálculo atuante uniformemente distribuída
τ_{wu}	tensão tangencial última
U	resistência à compressão para concreto fissurado medido em corpos de prova cilíndricos
ξ	coeficiente de efeito de tamanho

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

As lajes cogumelo são estruturas laminares planas horizontais (placas) que se apóiam diretamente em pilares, sem vigas para a transferência das cargas. Estas placas estão sujeitas, então, à ruptura por punção na ligação laje-pilar, que se manifesta frágil e repentinamente.

A punção é um fenômeno caracterizado pela atuação de forças concentradas na superfície da laje, que causam um deslocamento vertical ao longo de uma superfície tronco-cônica ou tronco-piramidal (PARK & GAMBLE, 1980). A superfície de ruptura, segundo REGAN & BRAESTRUP (1985), percorre a espessura da laje com uma inclinação média entre, aproximadamente, 25 a 30 graus, em relação ao seu plano médio.

A literatura apresenta diversos trabalhos teórico-experimentais e teórico-computacionais que estudam o comportamento da ligação laje-pilar de lajes cogumelo com pilares de seção transversal quadrada, sob a influência de variáveis distintas (resistência à compressão do concreto, taxa de armadura de flexão, adição ao concreto de fibras de aço, disposição e taxa de armadura de cisalhamento, furos, etc.).

No entanto, apesar da utilização prática mais freqüente dos pilares de seção retangular, em relação aos de seção quadrada, as pesquisas com pilares retangulares são em menor número, dos quais, podem-se citar HAWKINS *et al.* (1971), REGAN & REZAI-JORABI (1988), TENG *et al.* (1999), REGAN (1999), AL-YOUSIF & REGAN (2003), SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003).

Outro aspecto de utilização bastante comum é a existência de furos relativamente grandes (mesma ordem de grandeza das dimensões do pilar) em lajes que estejam posicionados adjacentes aos pilares, especialmente em edifícios de vários andares, nos quais tubulações de

condutos elétricos, mecânicos e hidráulicos percorrem vários andares e estão localizados próximos aos pilares por conveniência funcional.

Dentre as pesquisas que estudam o efeito de furos próximos ao pilar na resistência de lajes cogumelo de concreto armado, pode-se citar MOE (1961), HOGNESTAD *et al.* (1964), MOWRER & VANDERBILT (1967), ROLL *et al.* (1971), GOMES & ANDRADE (1995), REGAN (1999), EL-SALAKAWY *et al.* (1999), TENG *et al.* (1999) e SILVA (2003). Furos em lajes cogumelo reduzem a resistência à punção das lajes, tornando a ruptura ainda mais frágil.

1.2 – OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o efeito da relação entre as dimensões da seção transversal retangular de pilares internos (c_{max}/c_{min}) no comportamento ao puncionamento de lajes cogumelo de concreto armado, com valores variando entre 1 e 4, para as situações de perímetro constante e perímetro variável (c_{min} constante). Assim, contribuir com subsídios, a partir de dados experimentais, para o cálculo da resistência à punção destas estruturas, levando em consideração a geometria do pilar relativa à altura útil da laje (c_{max}/d).

Outro objetivo da pesquisa é investigar a influência de furos de grandes dimensões (dimensões equivalentes à de um pilar), simétricos e não-simétricos, posicionados adjacentes ao pilar, na resistência à punção. Através desta investigação, sugerir uma proposta para a norma brasileira NBR-6118 (2003) para o cálculo do perímetro efetivo de controle, considerando a redução deste devido à influência da proximidade do furo.

Finalmente, avaliar a contribuição da armadura de cisalhamento na resistência e ductilidade de lajes cogumelo apoiadas em pilares internos de seção transversal retangular com dois furos simétricos adjacentes a estes.

1.3 – APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

No CAPITULO 2 apresenta-se a revisão bibliográfica da pesquisa, contendo as prescrições de algumas normas de projeto para o tratamento da geometria do pilar, da presença de furos e armadura de cisalhamento. São mostrados e discutidos os resultados de pesquisas da literatura que estudaram os assuntos abordados nesta, além de comparações desses resultados com os estimados pelas normas de projeto

O programa experimental da pesquisa é apresentado no CAPITULO 3, que contém a descrição das lajes ensaiadas, dos materiais utilizados, do processo executivo de confecção e ensaio das lajes, e das medições realizadas.

O CAPITULO 4 apresenta e discute os resultados experimentais de ensaios mecânicos dos materiais das lajes, deslocamentos verticais, deformações da armadura de flexão, fissuras, e resistência das lajes com pilares de seção transversal retangular (Série 1), além de comparar o comportamento das lajes da presente pesquisa com o das lajes da literatura.

O CAPITULO 5 apresenta e discute os resultados experimentais das lajes com furos e/ou cisalhamento (Séries 2 e 3), acrescido de resultados de deformações das armaduras de cisalhamento.

O CAPITULO 6 compara os resultados experimentais obtidos para todas as lajes ensaiadas na presente pesquisa com os estimados por diversas normas de projeto e por pesquisadores, e apresenta algumas propostas para consideração da geometria do pilar na resistência à punção de lajes para as normas ACI (2002) e CEB-FIP (1991), e para cálculo do perímetro efetivo de controle para a norma brasileira NBR-6118 (2003).

O CAPITULO 7 apresenta as conclusões obtidas da pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – INTRODUÇÃO

São abordadas, nesta pesquisa, algumas normas de projeto que tratam do puncionamento em lajes cogumelo, tais como, ACI 318 (2002), BS8110 (1985), CEB-FIP Model Code 90 (1991), EUROCODE 2 (1992), EUROCODE 2 (2001), Handbook to BS8110/85 (1987), NBR-6118 (1978) e NBR-6118 (2003).

São apresentados, também, resultados e métodos de cálculo propostos por alguns pesquisadores, que trataram do estudo do puncionamento em lajes cogumelo de concreto armado, simultaneamente, com pilares de seção retangular, furos e armadura de cisalhamento

Finalmente, comparações entre os resultados experimentais, obtidos da literatura, e os previstos pelas normas de projeto e métodos de cálculo são realizadas para uma melhor compreensão das normas.

Apesar da existência de poucas pesquisas experimentais sobre o que trata a presente pesquisa, as normas de projeto que apresentam recomendações sobre estes assuntos, não demonstram um consenso no tratamento da influência da relação entre lados do pilar, da presença de furos e da contribuição da armadura de cisalhamento na resistência ao puncionamento de lajes.

2.2 – NORMAS DE PROJETO

As normas de projeto fornecem uma previsão da carga de ruptura de lajes cogumelo sujeitas à punção, através de um modelo empírico de cálculo que relaciona a tensão nominal de cisalhamento, atuante em uma determinada superfície de controle, com a resistência nominal

ao cisalhamento. Este modelo de cálculo é básico para todas as normas, diferenciando-se quanto à superfície de controle a ser considerada e à resistência ao cisalhamento. O Committee 426 do ACI-ASCE (1973) indica que a seção de controle para o cisalhamento, em lajes armadas bidireccionalmente à flexão, é definida pelo perímetro da área carregada ou da reação.

Cabe ressaltar que algumas normas como BS8110 (1985), Handbook to BS8110/85 (1987), CEB-FIP MC90 (1991), EUROCODE 2 (2001) e NBR-6118 (2003) não tratam especificamente a questão da geometria dos pilares na resistência ao punçõamento de lajes cogumelo. As normas ACI (2002), EUROCODE 2 (1992) e a NBR-6118 (1978), entretanto, consideram o efeito da relação entre lados do pilar na resistência à punção de lajes, quando esta relação é superior a 2, 2 e 3, respectivamente

As normas citadas apresentam recomendações especiais quanto à consideração do perímetro crítico a ser empregado no cálculo da resistência à punção de lajes apoiadas em pilares quadrados. Entretanto, não existe um consenso na adoção de um único perímetro crítico para lajes com pilares quadrados, e também de fatores específicos (f'_c , $f_{ct,sp}$, d , entre outros) que realmente contribuem para a resistência à punção. Sabe-se que as expressões empíricas propostas pelas normas de projeto são baseadas, essencialmente, em pesquisas experimentais realizados por pesquisadores que analisaram diversas variáveis que pudessem influenciar na resistência da laje cogumelo com pilares quadrados.

As prescrições das normas abordadas são apresentadas a seguir, e os coeficientes de segurança de projeto são adotados iguais a 1,0, para representar as condições de laboratório.

2.2.1 – ACI 318 (2002)

A norma do ACI (2002) considera que a seção crítica, ou de controle, de lajes sujeitas à punção, está localizada a uma distância de $0,5d$ medida a partir da face do pilar ou da área carregada. Para uma laje cogumelo com altura efetiva d apoiada em pilar de seção retangular com dimensões c_{min} (menor dimensão) e c_{max} (maior dimensão), o perímetro de controle é obtido conforme mostra a Fig. 2.1.

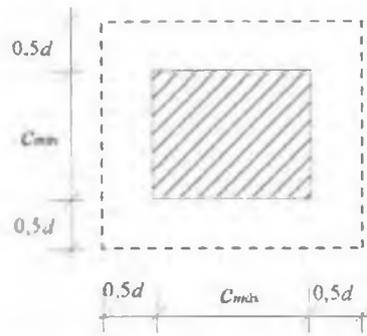


Figura 2.1 – Perímetro de controle situado a $0,5d$ do pilar, de acordo com ACI (2002)

A verificação da punção em lajes cogumelo, segundo ACI (2002) é realizado através da comparação entre a força nominal atuante V e a força nominal resistente V_n . Para uma laje sem armadura de cisalhamento, a força nominal resistente é oferecida apenas pelo concreto V_c , dada pela Eq. 2.1.

$$V \leq V_c \quad (\text{kN}) \quad (2.1)$$

onde V_c é o menor valor obtido através das Eqs. 2.2, 2.3 e 2.4:

$$\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{1}{6} \sqrt{f_c} b_0 d \quad (\text{kN}) \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{a_s d}{b_0} + 2\right) \frac{1}{12} \sqrt{f_c} b_0 d \quad (\text{kN}) \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{f_c} b_0 d \quad (\text{kN}) \quad (2.4)$$

sendo

β_c = relação entre o lado maior e o lado menor do pilar.

f_c = resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos, em MPa.

b_0 = perímetro de controle localizado a $0,5d$ do pilar, mm.

d = altura efetiva da laje, em mm.

$\alpha_s = 40$ (pilares internos), 30 (pilares de borda) e 20 (pilares de canto)

Para uma laje com armadura de cisalhamento, a força nominal atuante V na seção de controle, perpendicular ao plano da laje, não deve exceder a força nominal resistente fornecida pelo concreto (V_c) e pela armadura de cisalhamento (V_s), de acordo com a Eq. 2.5:

$$V \leq V_n = (V_c + V_s) \quad (\text{kN}) \quad (2.5)$$

Para uma laje com armadura de cisalhamento, a contribuição do concreto, dado pela Eq. 2.6, não deve exceder:

$$V_c \leq \frac{1}{6} \sqrt{f_c'} b_o d \quad (\text{kN}) \quad (2.6)$$

A contribuição da armadura de cisalhamento é fornecida pela Eq. 2.7:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s_r} \quad (\text{kN}) \quad (2.7)$$

onde

A_v = Área da armadura de cisalhamento dentro da distância s , em mm^2

s_r = Espaçamento entre elementos da armadura de cisalhamento, em mm

f_y = Tensão específica de escoamento do aço, em MPa (≤ 420 MPa)

A soma das contribuições do concreto e da armadura de cisalhamento, dada pela Eq. 2.8, não deve exceder:

$$V_c + V_s \leq \frac{1}{2} \sqrt{f_c'} b_o d \quad (\text{kN}) \quad (2.8)$$

O valor obtido da Eq. 2.4 se torna não conservativo quando se tem relações entre os lados do pilar com valores maiores que 2, tratando-se, neste caso, de pilares retangulares alongados. Para estes pilares, a tensão real de cisalhamento na seção de controle, atinge o valor máximo dado pela Eq. 2.4 apenas na região dos cantos do pilar, diminuindo este valor em direção à região central do lado do pilar.

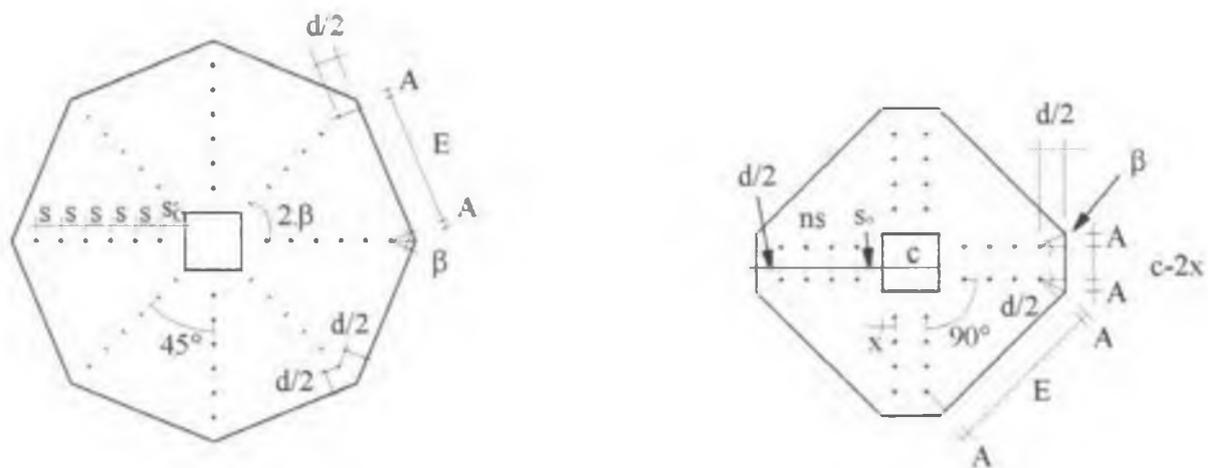
Ensaio realizados constataram ainda que, na medida em que o valor da razão b_0/d aumentava, nos casos de pilares de grandes dimensões, o valor de $v_c (= V_c/b_0d)$ diminuía. Baseados nestes aspectos é que foram desenvolvidas as Eqs. 2.2 e 2.3, de forma a se levar em consideração os fatores mencionados no cálculo de v_c .

As Eqs. 2.2 e 2.3 mostram que o método de cálculo do ACI (2002) trata o caso de pilar retangular através da redução das tensões nominais cisalhantes, e desconsidera a influência da armadura de flexão e o efeito de tamanho na resistência ao puncionamento.

A região externa à armadura de cisalhamento deve ser verificada em uma seção situada a $0,5d$ da última camada da armadura, utilizando uma das Eqs. 2.2 a 2.4, com o perímetro calculado de acordo com a distribuição da armadura utilizada. O ACI (2002) define que o espaçamento radial dos elementos da armadura de cisalhamento não deve ser maior que $d/2$.

A Fig. 2.2 mostra os perímetros apropriados para uma distribuição em cruz e radial dos elementos da armadura, para o caso de um pilar quadrado de lado c , e o cálculo do perímetro na seção de controle na região externa à armadura de cisalhamento.

Com relação à presença de furos nas imediações dos pilares, localizados até uma distância de $10h$ a partir do centro do pilar ou área carregada, o ACI (2002) recomenda a redução no perímetro de controle. Esta redução é dada pelo comprimento do perímetro compreendido entre as linhas radiais que partem do centro do pilar e tangenciam os vértices do furo. A Fig. 2.3 ilustra o cálculo do perímetro de controle de lajes com furos.



$$U = 8 \{ 2A + E \}$$

$$A = d (\tan \beta) / 2$$

$$E = 2 \sin \beta \{ s_0 + (n-1) s + c/2 \}$$

$$\beta = 22.5^\circ$$

$$U = (4 A + E + c - 2x) 4$$

$$A = d (\tan \beta) / 2$$

$$E = \sqrt{2} (ns + s_0 + x)$$

$$\beta = 22.5^\circ$$

Figura 2.2 – Perímetro de controle situado a $0,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com ACI (2002)

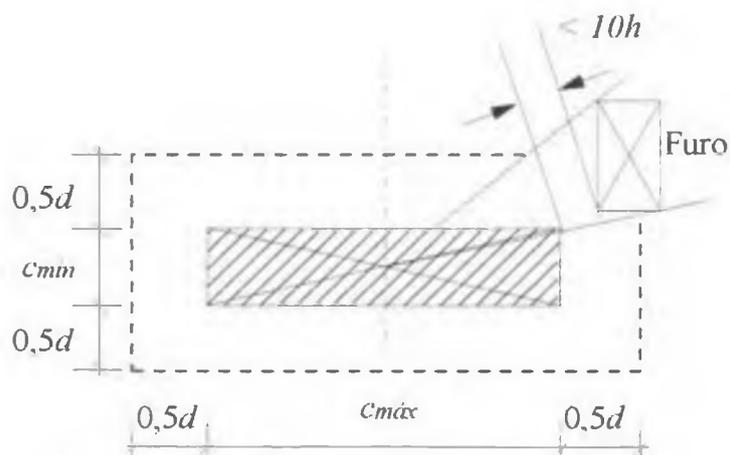


Figura 2.3 – Perímetro de controle para lajes com furos, de acordo com ACI (2002)

2.2.2 – BS8110 (1997)

A norma BS8110 (1997) considera o perímetro de controle localizado a $1,5d$ da face do pilar com cantos quadrados, independentemente da forma do pilar, como mostra a Fig. 2.4. Entretanto, a norma é omissa no caso de lajes com pilares retangulares.

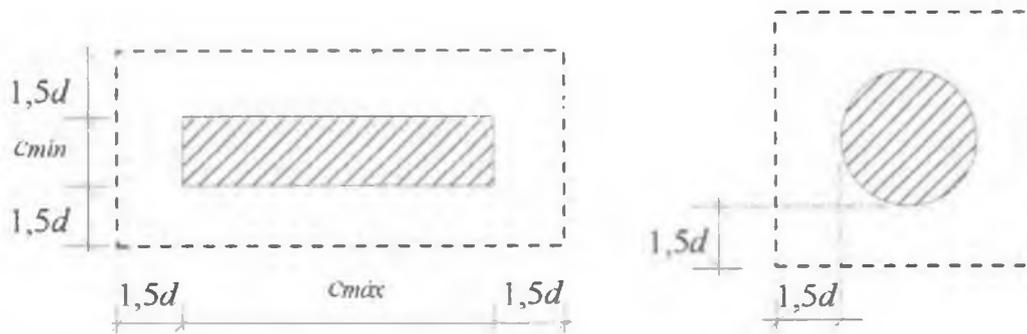


Figura 2.4 – Perímetro de controle situado a $1,5d$ do pilar, de acordo com BS8110 (1997)

A tensão de cisalhamento em lajes sob punção é definida pela BS8110 (1997) de acordo com a Eq. 2.9:

$$v_c = 0,27 \sqrt[3]{100 \rho f_{cu}} \sqrt[4]{400/d} \quad (\text{MPa}) \quad (2.9)$$

onde

ρ é a taxa geométrica de armadura de flexão, em % ($\leq 3\%$)

$400/d$ é o fator de efeito de tamanho (≥ 1)

f_{cu} é a resistência à compressão do concreto em corpos de prova cúbicos, em MPa ($f_{cu} \leq 40$ MPa)

d é altura útil da laje, em mm.

A BS8110 (1997) recomenda que a resistência à punção de lajes deve ser verificada em três seções de controle: na face do pilar, na seção crítica situada a $1,5d$ da face do pilar, e na seção externa à região com armadura de cisalhamento situada a $1,5d$ da penúltima camada da armadura.

Na face do pilar, a força nominal atuante, V , deve ser inferior ao limite definido na Eq. 2.10.

$$V \leq \sqrt{f_{cu}} u_0 d \quad (\text{kN}) \quad (2.10)$$

onde u_0 é o perímetro do pilar

Na seção situada a $1,5d$ da face do pilar, a punção deve ser verificada através da Eq. 2.11. Caso seja satisfeita, não é necessária a utilização de armadura de cisalhamento, sendo que apenas o concreto resiste à força atuante. Caso contrário, a contribuição da armadura de cisalhamento é dada pela Eq. 2.12.

$$V \leq v_c u d \quad (\text{kN}) \quad (2.11)$$

$$V_s \leq 0,87 f_{yv} A_{sv} \text{sen} \alpha \quad (\text{kN}) \quad (2.12)$$

onde

u é o perímetro de controle situado a $1,5d$ da face do pilar, em mm

f_{yv} é a resistência ao escoamento da armadura de cisalhamento, em MPa

A_{sv} é a área da armadura de cisalhamento dentro do perímetro u , em mm^2

α é o ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje, em graus

Quando da utilização de armadura de cisalhamento, e, para $V_s \leq 0,6 v_c u d$, a resistência ao cisalhamento é dada pela contribuição do concreto e do aço, sendo expressa pela Eq. 2.13. Caso contrário, V_n é dada pela Eq. 2.14.

$$V_n = v_c u d + V_s \quad (\text{kN}) \quad (2.13)$$

$$V_n = \frac{I}{7} (10 v_c u d + 2 V_s) \quad (\text{kN}) \quad (2.14)$$

Em lajes com armadura de cisalhamento, a seção de controle situada a $1,5d$ da penúltima camada de armadura deve ser verificada através da Eq. 2.11 substituindo o perímetro u por u_2 , sendo este último definido para cada caso de distribuição.

A armadura de cisalhamento deve ser distribuída em, no mínimo, duas camadas dentro de um espaço de $1,5d$ a partir do pilar, e distância circunferencial entre elementos da armadura é limitada a $1,5d$.

Para lajes com uma abertura localizada dentro de uma distancia de $6d$ até o pilar, a norma BS8110 (1997) introduz uma redução no perímetro de controle, sendo esta redução semelhante à recomendada pelo método de cálculo do ACI (2002). A Fig. 2.5 apresenta o perímetro de controle para o caso de lajes com furos.

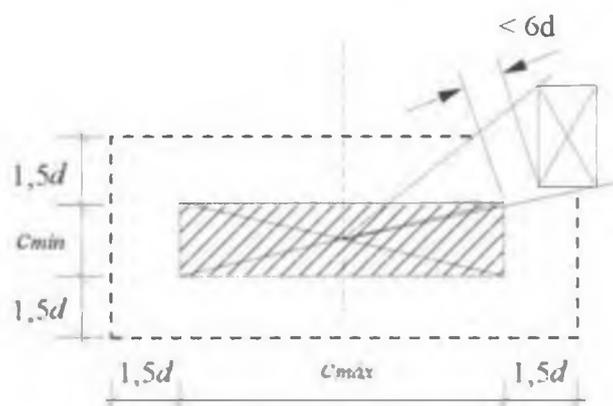


Figura 2.5 – Perímetro de controle para lajes com furos, de acordo com BS8110 (1997)

2.2.3 – CEB-FIP MC90 (1991)

O CEB-FIP (1991) não apresenta recomendações com relação à presença de furos em lajes sob punção. Além disso, nenhum tratamento especial é dado quando os pilares ou áreas carregadas apresentam, para relações entre lado maior e lado menor, valores superiores a 2.

A norma do CEB-FIP (1991) considera para as ligações laje-pilar que não possuem armadura de punção, que sejam feitas duas verificações:

- Verificação da compressão do concreto, através da comparação das tensões atuantes na seção de controle definida pelo pilar e a tensão resistente ($=0,5 f_{c2}$);
- Comparação entre a tensão nominal atuante no perímetro de controle localizado a $2d$ do contorno do pilar (Fig. 2.6), com uma tensão nominal resistente.

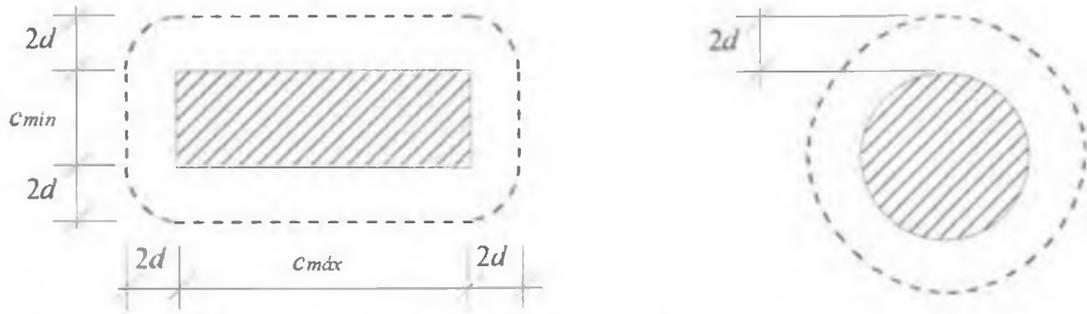


Figura 2.6 – Perímetro de controle a $2d$ do pilar, de acordo com CEB-FIP (1991)

A altura efetiva d é calculada pela média aritmética das alturas efetivas nas direções ortogonais x e y :

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} \quad (\text{mm}) \quad (2.15)$$

A taxa geométrica de armadura principal de flexão ρ é obtida pela média geométrica das taxas de armadura ρ_x e ρ_y nas direções ortogonais x e y , respectivamente, em uma região com largura igual ao lado do pilar mais $3d$ para cada lado, sendo dada por:

$$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \quad (\%) \quad (2.16)$$

Para ligações laje-pilar com armadura de punção, as verificações a serem feitas são semelhantes às realizadas com lajes sem armadura, porém, é adicionada uma verificação da tensão de cisalhamento na seção de controle localizada a $2d$ da última camada de armadura.

A verificação da compressão no concreto é feita através da comparação entre a tensão de cisalhamento atuante no perímetro do pilar e a tensão resistente do concreto. A tensão atuante nas faces do pilar é dada por v , sendo definida pela relação entre a força atuante (V) e a superfície $u_0 d$, dada pela Eq. 2.17.

$$v = \frac{V}{u_0 d} \leq 0,5 f_{c2} \quad (\text{MPa}) \quad (2.17)$$

e

$$f_{c2} = 0,6 \left[1 - \left(\frac{f_{ck}}{250} \right) \right] f_{ck} \quad (\text{MPa}) \quad (2.18)$$

onde

u_0 é o perímetro do pilar, em mm

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto medida em corpos de prova cilíndricos, em MPa

f_{c2} é a resistência à compressão para um concreto fissurado, em MPa

Na verificação da seção de controle localizada a $2d$ do pilar, a tensão de cisalhamento atuante na seção de controle v é comparada com a tensão de cisalhamento resistente v_n na Eq. 2.19:

$$v \leq v_n \quad (\text{MPa}) \quad (2.19)$$

A tensão de cisalhamento resistente de lajes sem armadura de cisalhamento, em condições de projeto, dada apenas pela contribuição do concreto v_c , é obtida pela Eq. 2.20:

$$v_c = \frac{V_c}{u d} \leq 0,12 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho f_{ck})^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2.20)$$

onde

u é o perímetro de controle situado a $2d$ do pilar, em mm

ρ é a taxa geométrica da armadura principal de flexão, em %;

Em lajes com armadura de cisalhamento, a tensão de cisalhamento resistente é calculada através da contribuição do concreto v_c e da armadura de cisalhamento v_s , sendo dada pelas Eqs. 2.21 a 2.23.

$$V \leq V_c + V_s \quad (\text{kN}) \quad (2.21)$$

$$V_c = 0,09 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u d \quad (\text{kN}) \quad (2.22)$$

$$V_s = 1,5 \left(\frac{d}{s_r}\right) A_{sw} f_{ywd} \sin\alpha \geq 0,03 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u d \quad (\text{kN}) \quad (2.23)$$

onde

$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$ é o coeficiente de efeito de tamanho, d em mm

A_{sw} é a área da armadura de cisalhamento em uma camada ao redor do pilar, em mm^2 ;

s_r é o espaçamento radial entre as camadas da armadura de cisalhamento, em mm ($< 0,75d$);

α é o ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje, em graus;

f_{ywd} é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento de projeto, em MPa (≤ 300 MPa).

Na verificação da seção de controle localizada a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, a tensão de cisalhamento atuante é comparada com a resistente, e, neste caso, apenas a parcela da resistência do concreto é considerada, como mostra a Eq. 2.24.

$$V \leq 0,12 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u_{n,ef} d \quad (\text{kN}) \quad (2.24)$$

Onde $u_{n,ef}$ é o comprimento efetivo do perímetro de controle situado a $2d$ da última camada da armadura de cisalhamento.

A Fig. 2.7 apresenta as configurações para o cálculo do perímetro de controle na seção situada a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, para distribuição radial e em cruz da armadura de cisalhamento.

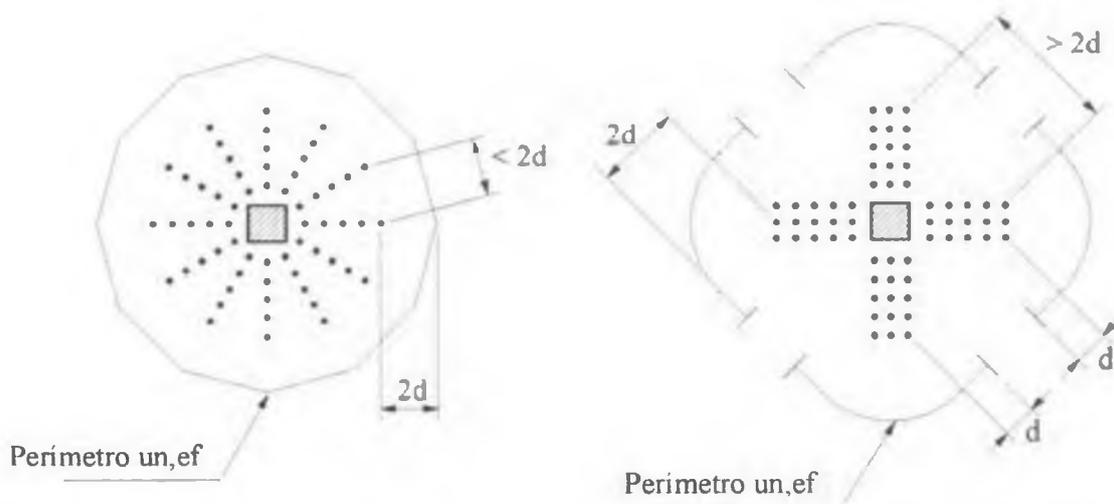


Figura 2.7 – Perímetro de controle situado a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com CEB-FIP (1991)

2.2.4 – EUROCODE 2 (1992)

O EUROCODE 2 (1992) recomenda que o perímetro de controle u seja obtido a uma distância de $1,5d$ a partir da face do pilar. Para o caso de pilar com seção retangular, o perímetro do pilar deve ser, no máximo, igual a $11d$. Para relações entre lados superior a 2, o EUROCODE 2 (1992) recomenda que se considere apenas certos trechos do perímetro de controle, uma vez que, para estes casos, o esforço cortante se concentra nos cantos dos apoios e parte do trecho central do lado maior do pilar é considerado inefetiva. A Fig. 2.8 ilustra esta recomendação.

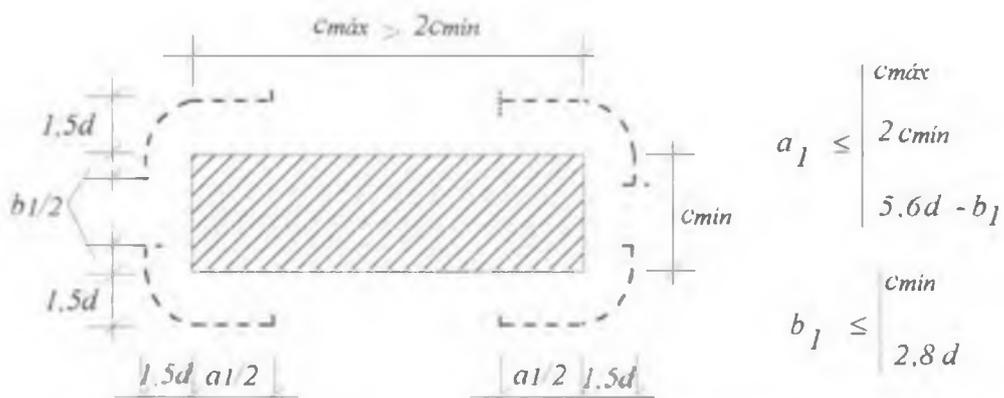


Figura 2.8 – Perímetro de controle situado a $1,5d$ do pilar, de acordo com EUROCODE 2 (1992)

Nos casos de lajes sem armadura de cisalhamento, a tensão nominal atuante v é comparada com a tensão nominal resistente v_{R1} , sendo esta fornecida apenas pelo concreto, de acordo com as Eqs. 2.25 a 2.28:

$$v \leq v_{R1} \quad (\text{MPa}) \quad (2.25)$$

sendo

$$v = \beta \frac{V}{u d} \quad (\text{MPa}) \quad (2.26)$$

$$v_{R1} = \tau_R k (1,2 + 40 \rho_1) \quad (\text{MPa}) \quad (2.27)$$

$$\tau_R = 0,25 (0,21 f_{ck}^{2/3}) \quad (\text{MPa}) \quad (2.28)$$

onde

β é o coeficiente que leva em conta os efeitos da excentricidade da carga, e, salvo cálculo mais rigoroso, pode ser tomado igual a um ($\beta = 1,00$) para casos onde não houver excentricidade; caso contrário, $\beta = 1,15$ para pilares internos;

k é coeficiente de efeito de tamanho, que também depende da porcentagem de armadura ($k = 1,6 - 0,1d$, $d \geq 1$, d em metros)

ρ_1 é a taxa de armadura de flexão ($\leq 1,5\%$), em %;

u é o perímetro de controle localizado a $1,5d$ da face do pilar, em mm

No caso de lajes com armadura de cisalhamento, a norma recomenda que sejam feitas duas verificações: na seção de controle localizada a $1,5d$ da face do pilar, e na seção de controle situada a $1,5d$ última camada de armadura de cisalhamento. A resistência ao cisalhamento, verificada na seção de controle, é dada pela contribuição do concreto e da armadura de cisalhamento, sendo adotado para esta, o menor dos valores calculados para v_{R2} e v_{R3}

$$v \leq \begin{cases} v_{R2} \\ v_{R3} \end{cases} \quad (\text{MPa}) \quad (2.29)$$

onde

$$v_{R2} = 1,6 v_{R1} \quad (\text{MPa}) \quad (2.30)$$

$$v_{R3} = v_{R1} + \sum A_{Sw} f_{yd} \text{sen}\alpha \quad (\text{MPa}) \quad (2.31)$$

sendo

v_{R2} a resistência de cálculo máxima (MPa);

v_{R3} a resistência de cálculo para lajes com armadura de punção (MPa);

$\sum A_{Sw} f_{yd} \text{sen}\alpha$ a soma das projeções dos esforços de cálculo da armadura de punção na direção da aplicação da reação da laje, e α o ângulo entre a armadura e o plano da laje.

Na verificação da seção de controle situada a $1,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento, deve-se calcular um novo perímetro de controle. A nova tensão atuante neste novo perímetro deve ser então comparada com a tensão resistente para ligações sem armadura de punção v_{R1} , utilizando o perímetro de controle apropriado.

Para lajes cogumelo com furos localizados a uma distância menor que $6d$ a partir do pilar, o perímetro de controle é reduzido de maneira similar àquela da norma BS8110 (1985) e ACI (2002), ou seja, o comprimento do perímetro compreendido entre as linhas radiais que partem do centro do pilar até o furo é considerado inefetivo (Fig.2.9).

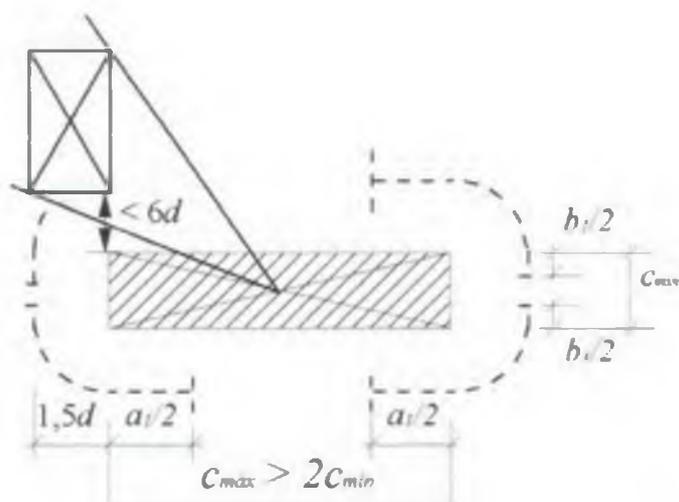


Figura 2.9 – Perímetro de controle de lajes com furos, de acordo com EUROCODE 2 (1992)

2.2.5 – EUROCODE 2 (2001)

A norma do EUROCODE 2 (2001) define que a seção de controle está localizada a uma distância de $2d$ do pilar e possui cantos arredondados, assim como o CEB-FIP (1991). Na presença de furos distantes até $6d$ do pilar, a norma recomenda que seja desprezado o comprimento de perímetro delimitado por linhas radiais que se originam do centro do pilar (ou área carregada) e tangenciam os vértices do furo. A Fig. 2.10 apresenta os perímetros críticos recomendados pela norma.

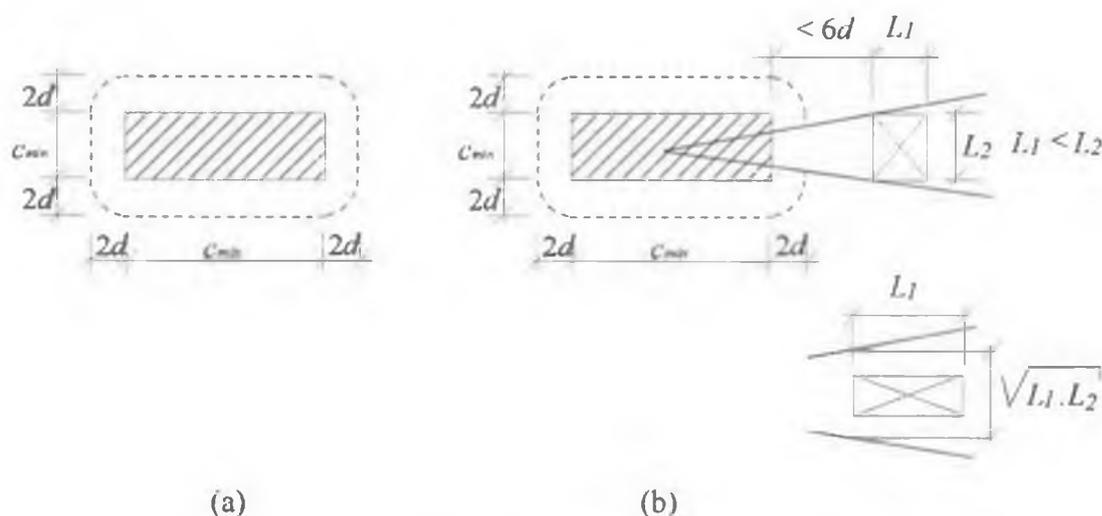


Figura 2.10 – Perímetros de controle a $2d$ do pilar em lajes (a) sem furos e (b) com furos, de acordo com EUROCODE 2 (2001)

O EUROCODE 2 (2001) apresenta recomendações muito semelhantes ao do CEB-FIP MC90 (1991), com relação às verificações da seção de controle: verificação da tensão máxima de cisalhamento no perímetro do pilar (v_{max}), da tensão de cisalhamento atuante na seção de controle a $2d$ do pilar (v), e da tensão de cisalhamento atuante na seção de controle a $1,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento, se houver.

A tensão de cisalhamento atuante v é dada pela Eq. (2.32):

$$v = \frac{V}{u_1 d} \quad (\text{MPa}) \quad (2.32)$$

onde u_1 é o perímetro de controle a $2d$ do pilar.

Para lajes sem armadura de cisalhamento, são feitas duas verificações: na face do pilar, através da Eq. 2.33, e na seção de controle a $2d$ do pilar, através da Eq. 2.34.

$$v = \frac{V}{u_0 d} \leq v_{mix} = 0,5v f_{ck} \quad (\text{MPa}) \quad (2.33)$$

onde

u_0 é o perímetro do pilar ou da área carregada, em mm;

v_{mix} é a tensão máxima de cisalhamento atuante na face do pilar, em MPa;

v é a resistência à compressão para um concreto fissurado, dada por $0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$, em MPa.

$$v = \frac{V}{u_1 d} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2.34)$$

Onde $\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \rho_{ly}} \leq 0,02$ é a taxa de armadura de flexão.

Para lajes com armadura de cisalhamento, a tensão de cisalhamento atuante na seção de controle a $2d$ do pilar é determinada considerando a contribuição do concreto e da armadura de punção, de acordo com a Eq.(2.35).

$$v = 0,75 v_c + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw} f_{ywd,ef} \left(\frac{l}{u_j d} \right) \text{sen } \alpha \quad (\text{MPa}) \quad (2.35)$$

onde

A_{sw} é a área de armadura de cisalhamento situada em uma camada, em mm^2

$f_{ywd,ef}$ é a resistência efetiva de projeto de escoamento da armadura de cisalhamento ($= 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$), dada em MPa.

Na seção de controle situada a $1,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento, a tensão de cisalhamento é obtida pela Eq. 2.36, considerando a contribuição apenas do concreto, levando em consideração o perímetro de controle externo u_{out} .

$$v_{Rd,c} = \frac{V_{Rd,c}}{u_{out} d} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2.36)$$

onde

$v_{Rd,c}$ é a tensão de cisalhamento de projeto resistida pelo concreto, em MPa.

$V_{Rd,c}$ é a força nominal resistente de projeto dado pelo concreto, em kN.

A Fig. 2.11 apresenta o perímetro de controle situado a $1,5d$ da última camada de armadura, recomendado pela norma do EUROCODE 2 (2001).

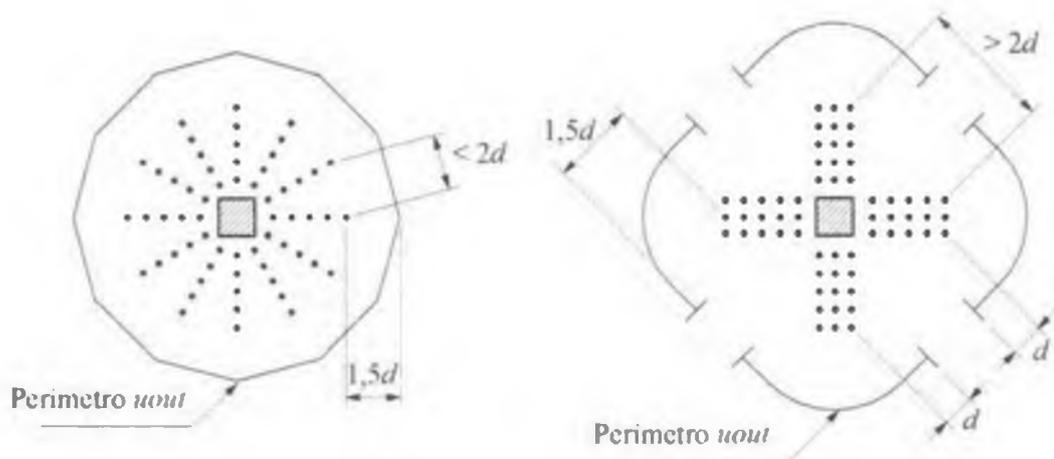


Figura 2.11 – Perímetro de controle situado a $1,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com o EUROCODE 2 (2001)

2.2.6 – HANDBOOK TO BS8110/85 (1987)

O Handbook to BS8110/85 (1987) apresenta considerações no tratamento de furos em lajes sob punção sugeridas por REGAN (1974), que se diferem das apresentadas pela própria norma BS8110 (1985). O Handbook recomenda utilizar, ao invés de projeções radiais que partem do centro do pilar, projeções paralelas às faces do furo, para casos onde o furo se localiza dentro da região de perímetro de controle, e também, projeções que partem dos vértices ou do centro da área carregada/pilar, para casos específicos. A Fig. 2.12 mostra alguns casos de furos próximos ao pilar.

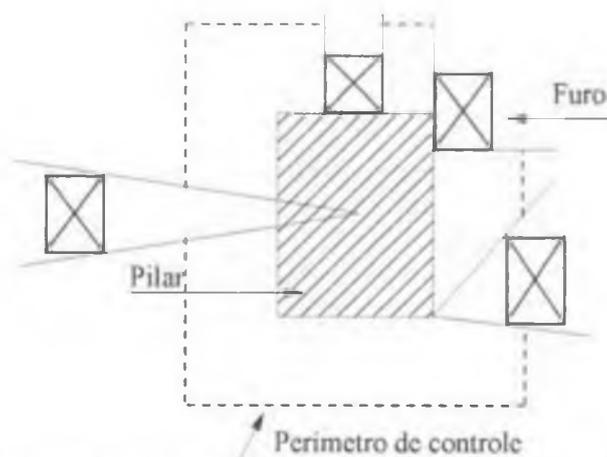


Figura 2.12 – Considerações para o tratamento de furos em lajes sob punção, de acordo com o Handbook to BS8110 (1987)

Para casos onde o furo apresenta dimensões consideráveis, a resistência deve ser limitada pelas tensões de cisalhamento atuantes na face do pilar, de acordo com as equações propostas pela norma BS8110 (1985).

2.2.7 – NBR-6118 (1978)

A Norma Brasileira NBR-6118 (1978) recomenda que as lajes submetidas à punção devem ser verificadas através da comparação entre a tensão tangencial distribuída uniformemente (τ_{wd}) na área “ $u d$ ”, determinada a uma distância de $0,5d$ da face do pilar, com a valor último da tensão tangencial de cálculo (τ_{wu}), independente da utilização de armadura de cisalhamento.

Para lajes sem armadura de cisalhamento, a comparação é feita através da Eq. (2.37):

$$\tau_{wd} \leq 0,5 \tau_{wu} \quad (\text{MPa}) \quad (2.37)$$

Para lajes com armadura de cisalhamento a comparação é feita utilizando a Eq. (2.38):

$$\tau_{wd} \leq \tau_{wu} \quad (\text{MPa}) \quad (2.38)$$

sendo

$$\tau_{wd} = \frac{V}{u.d} \quad (\text{MPa}) \quad (2.39)$$

$$\tau_{wu} = 0,63 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_s} \quad (\text{MPa}) \quad (2.40)$$

onde

V é a força nominal atuante, em kN;

d é a altura efetiva da laje, em mm;

u é o perímetro de controle situado a $0,5d$ do pilar, em mm;

Deverá ser calculada e colocada na face tracionada uma armadura de flexão que atravesse a projeção da área em que se aplica a carga e que seja suficientemente ancorada além do perímetro u . Sempre que a tensão atuante no concreto, τ_{wd} , for igual ou inferior ao valor último dado por τ_{wk} , mas superior à metade deste valor, dever-se-á dispor de uma armadura transversal, tal que a componente dos esforços que ela absorve, perpendicular a laje, corresponda a no mínimo a 75% do valor de cálculo da força concentrada aplicada à laje, de acordo com a Eq. (2.41), e distribuída dentro da faixa delimitada pelos perímetros u e o perímetro situado a $1,5d$ da face do pilar.

$$A_{sw} = 0,75 \frac{V}{f_{yd}} \quad (\text{mm}^2) \quad (2.41)$$

onde

A_{sw} é a área de armadura de cisalhamento, em mm^2

f_{yd} é a tensão de projeto de escoamento do aço (< 300 MPa).

Para lajes apoiadas em pilares ou sob áreas carregadas com a relação entre o lado maior e o lado menor inferior a 3 ($c_{max} c_{min} \leq 3$), o perímetro de controle é dado de acordo com a Fig.2.13a. Quando o pilar ou a área carregada apresenta relação entre lados superior a 3, a NBR-6118 (1978) recomenda que o perímetro de controle seja definido de acordo com a Fig.2.13b.

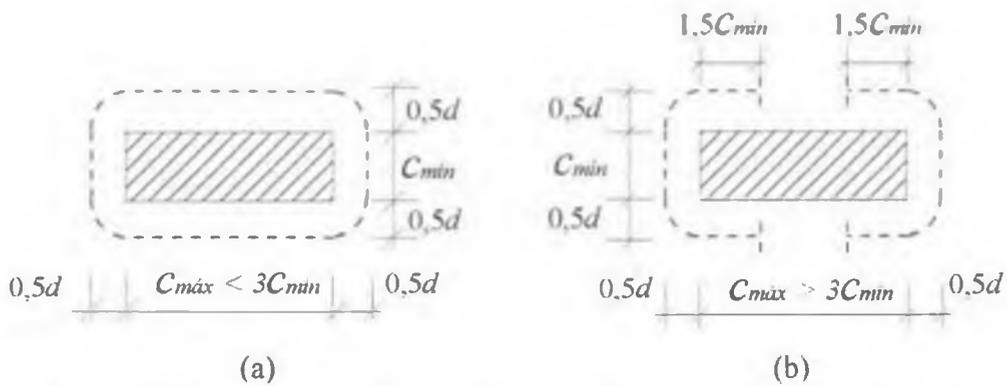


Figura 2.13 – Perímetro de controle para (a) $c_{m\acute{a}x} / c_{m\acute{i}n} \leq 3$ e (b) $c_{m\acute{a}x} / c_{m\acute{i}n} > 3$, de acordo com NBR-6118 (1978)

2.2.7 – NBR-6118 (2003)

A NBR-6118 (2003) apresenta semelhanças em alguns conceitos com o CEB-FIP (1991), como por exemplo, na forma e definição dos perímetros de controle e no cálculo das forças resistentes, variando apenas alguns coeficientes. O perímetro de controle a ser utilizado no cálculo da resistência à punção de lajes cogumelo é mostrado na Fig. 2.14.

Para lajes com furos situados a menos de $8d$ do pilar, não deve ser considerado o trecho do perímetro crítico compreendido entre as linhas que se originam do centro do pilar (ou área carregada) e tangenciam os furos. A Fig. 2.14 apresenta a seção de controle de uma laje com furos próximos ao pilar.

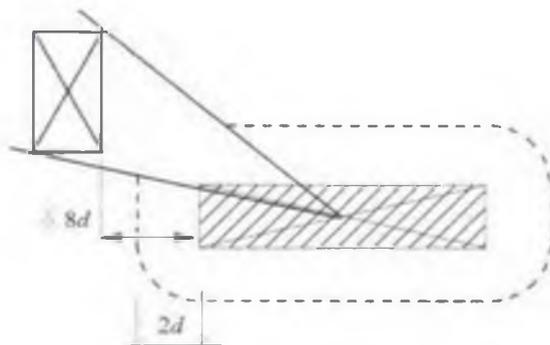


Figura 2.14 – Perímetro de controle de lajes com furos, de acordo com NBR-6118 (2003)

Em lajes sem armadura de punção, deve ser verificada a compressão diagonal do concreto na zona adjacente ao pilar, e a punção na superfície de controle distante $2d$ da face do pilar. Nas lajes com armadura de punção, a verificação deve ser feita da mesma forma como se não houvesse armadura, e, adicionalmente, na seção situada a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento.

A verificação da compressão do concreto na seção do pilar é feita através da comparação entre a tensão atuante no perímetro do pilar τ_s , e a tensão resistente $\tau_{r,2}$:

$$\tau_s \leq \tau_{r,2} \quad (\text{MPa}) \quad (2.42)$$

sendo

$$\tau_s = \frac{V}{u_o d} \quad (\text{MPa}) \quad (2.43)$$

$$\tau_{r,2} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{ck} \quad (\text{MPa}) \quad (2.44)$$

A verificação da punção na seção de controle situada a $2d$ do pilar em lajes sem armadura de cisalhamento é feita com a comparação entre a tensão de cisalhamento atuante na seção de controle u_l , τ_s , e a tensão de cisalhamento resistente fornecida apenas pelo concreto $\tau_{r,1}$, através da Eq. 2.45:

$$\tau_s \leq \tau_{r,1} \quad (\text{MPa}) \quad (2.45)$$

onde

$$\tau_s = \frac{V}{u_l d} \quad (\text{MPa}) \quad (2.46)$$

$$\tau_{r,1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho f_{ck})^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2.47)$$

Em lajes com armadura de cisalhamento, a verificação da punção na seção de controle situada a $2d$ do pilar é feita comparando a tensão de cisalhamento τ_c com a resistente fornecida pelo concreto e armadura τ_{r3} , através da Eq. 2.48

$$\tau_{r3} = 0,10 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho f_{cd})^{1/3} + \left(1,5 \frac{d}{s_r} \frac{A_{sw} f_{ywd}}{u_1 d} \operatorname{sen} \alpha \right) \text{ (MPa)} \quad (2.48)$$

onde

A_{sw} é a área da armadura de punção em uma camada, em mm^2 ,

f_{ywd} é a resistência ao escoamento de cálculo da armadura de punção, deve ser menor que 300 MPa para conectores ou 250 MPa para estribos (CA-50 ou CA-60), em MPa;

E, finalmente, a verificação da seção de controles localizada a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, é feita comparando a tensão de cisalhamento atuante com a resistente fornecida apenas pelo concreto, considerando o perímetro de controle u_{ext} apropriado.

$$\tau_{r1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho f_{cd})^{1/3} u_{ext} d \quad \text{ (MPa)} \quad (2.49)$$

onde u_{ext} é o perímetro de controle localizado a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com a Fig. 2.15.

De acordo com a norma brasileira, a armadura de combate à punção deve ser preferencialmente constituída por três ou mais camadas de conectores tipo pino com extremidades alargadas, e, cada uma dessas extremidades deve estar ancorada fora do plano da armadura de flexão correspondente, como mostra a Fig. 2.16. O espaçamento entre camadas deve ser limitado a $0,75d$ e a distância entre a face do pilar e a primeira camada de armadura deve ser limitada a $0,5d$, como mostra a Fig. 2.17.

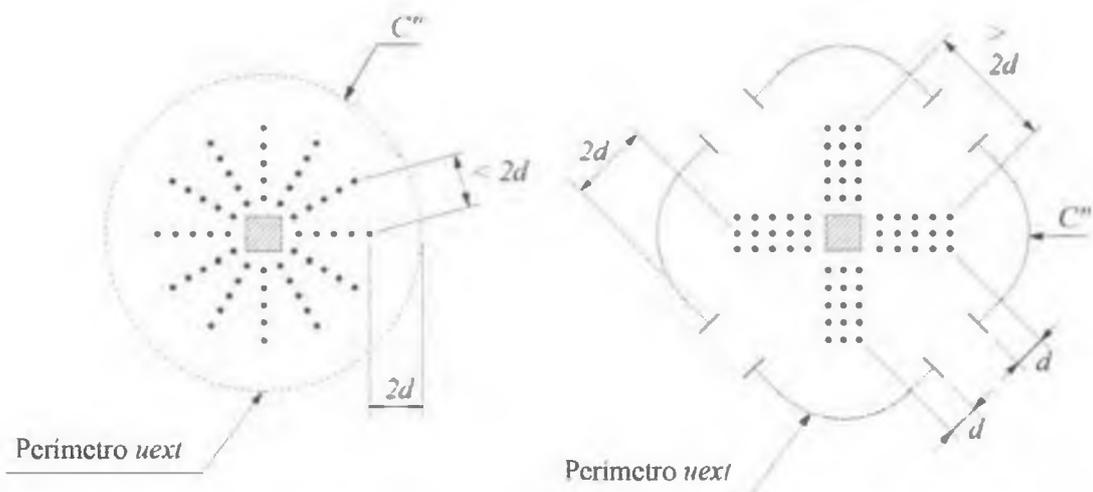


Figura 2.15 – Perímetro de controle situado a $2d$ da última camada de armadura de cisalhamento, de acordo com a NBR-6118 (2003)

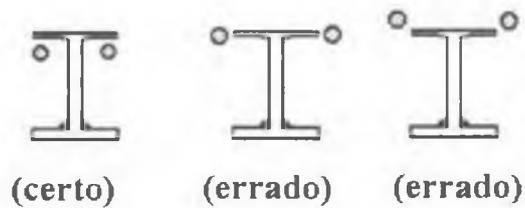


Figura 2.16 - Ancoragem para armadura de punção constituída por conectores do tipo pino, de acordo com a NBR-6118 (2003)

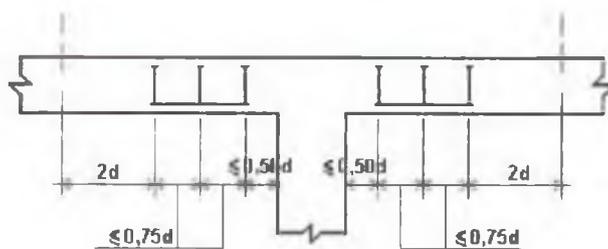


Figura 2.17 – Disposição da armadura de punção, de acordo com a NBR-6118 (2003)

2.3 – LAJES COM PILARES RETANGULARES

2.3.1 – PESQUISAS REALIZADAS

FORSSEL & HOLMBERG (1946) ensaiaram 10 (dez) lajes cogumelo quadradas de 1200 mm de lado e 127 mm de espessura, e resistência à compressão (f'_c) de 18 MPa. O sistema de ensaio consistiu no apoio dos quatro bordos e aplicação vertical descendente do carregamento.

Sete lajes foram ensaiadas simulando os dois tipos mais conhecidos de puncionamento: simétrico e não-simétrico, com o carregamento sendo aplicado através de uma seção circular de 140 mm de diâmetro (lajes 1 a 7)

As lajes 10 e 13 tiveram o carregamento aplicado centralmente através de uma seção retangular de dimensões 25 mm x 300 mm, porém a laje 13 foi apoiada em apenas duas bordas opostas e rompeu por flexão sob carga de 176 kN.

As lajes 11 e 12 utilizaram, cada qual, um par de seções circulares de 140 mm de diâmetro separadas, respectivamente, de 400 mm e 200 mm, de centro a centro.

A posição do carregamento nas lajes 10, 11 e 12 e a superfície de ruptura da laje 11 são apresentadas na Fig. 2.18. A Tab. 2.1 apresenta as cargas de ruptura das lajes ensaiadas por FORSSEL & HOLMBERG (1946).

Os pesquisadores observaram que as superfícies de ruptura das lajes 10 e 11 foram semelhantes, porém apresentaram cargas de ruptura diferenciadas em 33%, sendo que a laje 11 rompeu com a maior carga. A laje 12 apresentou uma superfície de ruptura com uma configuração entre a que caracterizou a laje 11 e uma circular típica.

Observa-se na configuração das superfícies de ruptura das lajes 11 e 12 que, apesar das áreas carregadas não representarem pilares retangulares, ocorreu uma concentração de esforços cortantes nas extremidades das áreas carregadas, pois não ocorreram superfícies localizadas, e sim envolvendo as duas áreas carregadas

Tabela 2.1 – Características das lajes 10, 11 e 12 de FORSSEL & HOLMBERG (1946)

Laje	c_{min} (mm)	c_{max} (mm)	d (mm)	c_{max}/d	ρ (%)	f'_c (MPa)	V_{Exp} (kN)
10	25	300	104	2,88	0,68	18	186
11	140	400	112	3,57	0,63	18	279
12	140	200	108	1,85	0,65	18	265

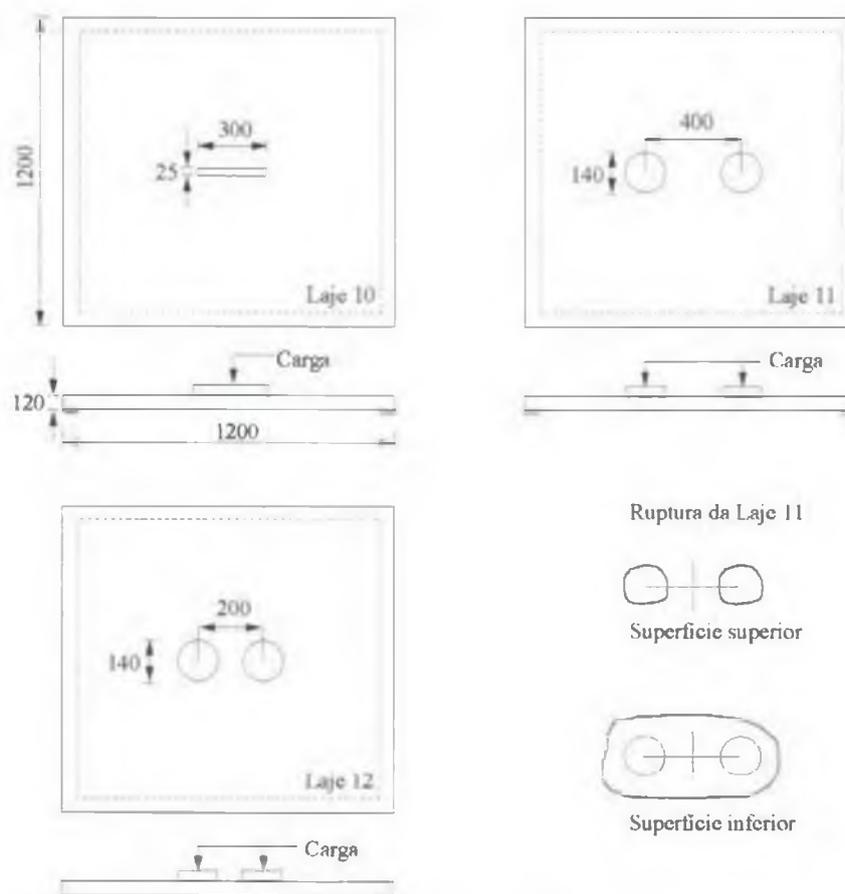


Figura 2.18 – Detalhes das lajes 10, 11 e 12 de FORSSEL & HOLMBERG (1946) – unidades em mm

HAWKINS et al. (1971) desenvolveram um trabalho experimental que teve como objetivo estudar a influência da relação entre as dimensões da seção transversal do pilar retangular, com perímetro constante, no comportamento de lajes cogumelo de concreto armado submetidas a carregamento centrado. Foram ensaiadas até a ruptura 9 (nove) lajes quadradas de dimensões 2100 mm x 2100 mm x 152 mm apoiadas em pilares internos de seção

transversal retangular, com variação de $c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$ entre 1 e 4,3, na posição do carregamento e na taxa de armadura de flexão. O perimetro dos pilares se manteve constante e igual a 1219 mm para todas as lajes, exceto para a laje 9, cujo pilar teve perimetro igual a 914 mm.

Foram usadas duas formas de carregamento (vide Fig. 2.19 e Tab. 2.2): para as lajes 1 a 5, foram aplicadas apenas cargas concentradas P_1 espaçadas de 600 mm, ao longo de duas bordas opostas da laje, e paralelas às faces menores do pilar, enquanto que para a laje 6, as cargas concentradas P_1 foram aplicadas nas bordas da laje paralelas às faces maiores do pilar, para as lajes 7, 8 e 9, foram aplicadas cargas P_1 da mesma forma que nas lajes 1 a 5, porém, com cargas adicionais P_2 ao longo das outras bordas, que foram paralelas às faces maiores do pilar, sendo que o valor de P_2 correspondeu a 65% do valor de P_1 .

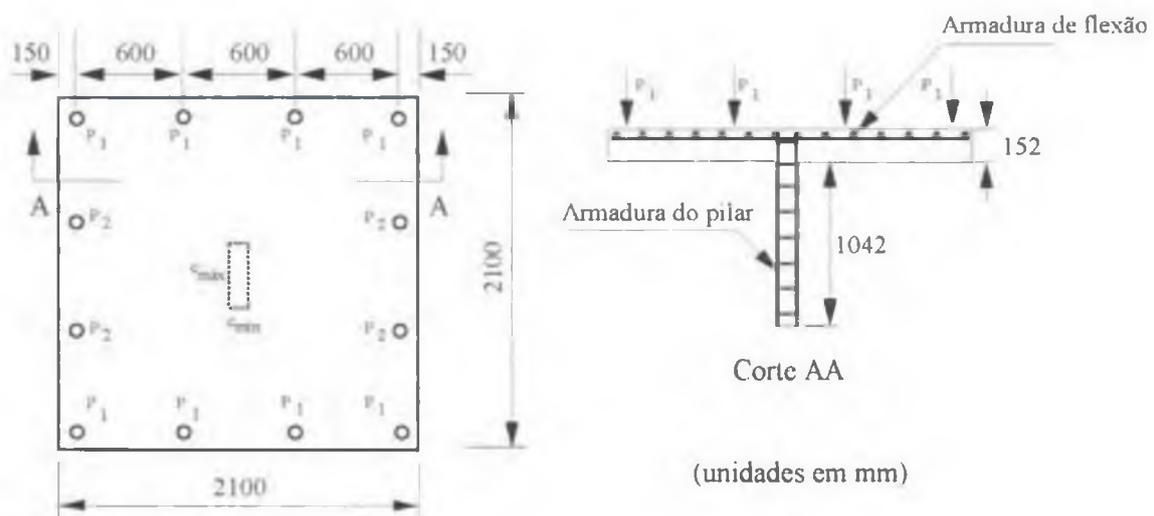


Figura 2.19 – Características das lajes e esquema de ensaio de HAWKINS et al. (1971) – unidades em mm

Com relação à taxa de armadura de flexão, as lajes 1 a 6 tiveram taxa de armadura de flexão constante e igual a 1,12%, porém, foram adicionadas quatro barras de aço na camada superior externa da armadura de flexão da laje 5, dentro de uma faixa central de 457 mm, reduzindo, desta forma, o espaçamento nesta região. As lajes 7, 8 e 9 sofreram reduções diferenciadas na taxa de armadura em relação às anteriores. A Fig. 2.19 mostra as características das lajes e o detalhe do sistema de ensaio, e a Tab. 2.2, as características principais das lajes de HAWKINS *et al.* (1971).

As lajes foram projetadas e confeccionadas para representar a região de momento negativo em torno de um pilar interno de uma laje cogumelo com vãos de 4500 mm e sobrecarga de aproximadamente 5 KPa. A resistência à compressão do concreto e a tensão de escoamento da armadura principal de flexão foram, aproximadamente, 30 MPa e 420 MPa, respectivamente.

Tabela 2.2 – Características das lajes testadas por HAWKINS *et al.* (1971).

Laje	Pilar		Concreto		Armadura de flexão principal				
	c_{min} (mm)	$c_{m\acute{a}x}$ (mm)	$c_{m\acute{a}x}$ / c_{min}	f'_c (MPa)	d (mm)	s (mm)	A_s (mm ²)	f_{ys} (MPa)	ρ (%)
1	305	305	1	31,9	117	152	2800	419,0	1,12
2	203	406	2	26,9	117	152	2800	419,0	1,12
3	152	457	3	30,5	117	152	2800	419,0	1,12
4	114	495	4,3	31,6	117	152	2800	419,0	1,12
5	152	457	3	28,0	117	65 e 152	3600	419,0	1,12
6	457	152	3*	25,3	117	152	2800	419,0	1,12
7	152	457	3	26,6	117	197	2142	419,0	0,87
8	114	495	4,3	26,6	121	133	2065	422,0	0,81
9	152	305	2	30,1	121	140	1948	422,0	0,77

* carregamento P1 aplicado paralelamente aos maiores lados do pilar

As lajes romperam por punção na região em torno da ligação laje-pilar, exceto as lajes 1 e 6 que romperam por flexão. Com o aumento da relação entre os lados do pilar, a resistência ao

puncionamento reduziu, a ruptura se tornou mais abrupta, e o tamanho do cone de ruptura diminuiu, à exceção das lajes 1 e 6 que romperam essencialmente por flexão. A Tab.2.3 apresenta os tipos de carregamentos aplicados, as cargas e os modos de ruptura das lajes testadas por HAWKINS et al. (1971).

Apesar das lajes 3, 5, 6 e 7 apresentarem pilares com as mesmas dimensões, a laje 7 carregada nas quatro bordas rompeu por punção de maneira similar às lajes 3 e 5, porém, com uma carga inferior. Entretanto, a laje 6, carregada ao longo das bordas paralelas ao lado maior do pilar, rompeu por flexão, sendo que o modelo de carregamento proposto permitiu que esta laje se comportasse como se a relação entre os lados do pilar fosse igual a 1,0. Para as lajes similares 3 e 5, a maior quantidade de armadura na laje resultou em um aumento de 35% na rigidez e apenas um pequeno aumento na resistência à punção.

Tabela 2.3 – Resultados dos ensaios realizados por HAWKINS et al. (1971)

Laje	c_{max}/c_{min}	Carregamento	V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura	Superfície de ruptura
1	1	P1	393	Flexão	-
2	2	P1	358	Punção	A partir do pilar
3	3	P1	340	Punção	"
4	4,3	P1	337	Punção	"
5	3	P1	362	Punção	"
6	3	*P1	343	Flexão	-
7	3	P1 e P2	326	Punção	A partir do pilar
8	4,3	P1 e P2	321	Punção	"
9	2	P1 e P2	322	Punção	"

*P1 - este carregamento foi aplicado paralelamente ao lado c_{max}

HAWKINS et al (1971) realizaram comparações entre os resultados experimentais das lajes testadas e os obtidos pelas expressões propostas por MOE (1961) e pelo ACI-ASCE Committee 326 (1962), com a finalidade de propor uma expressão para o cálculo da resistência à punção de lajes cogumelo com pilares retangulares com relação entre lados superior a 2,0.

O trabalho dos autores foi desenvolvido de forma a analisar a prescrição normativa do ACI (1963), onde a tensão de cisalhamento máxima permitida a uma distância $0,5d$ da face da área carregada deveria ser $0,335 \sqrt{f'_c}$ (MPa). Pelos ensaios, perceberam que, de acordo com esta norma, a tensão de cisalhamento era independente da forma dos pilares, e que a origem deste limite estaria baseada em equações pouco precisas (OLIVEIRA, 2003).

O limite da resistência ao puncionamento de lajes cogumelo correspondente a $0,335 \sqrt{f'_c}$ (MPa) foi proposto pelo ACI-ASCE Committee 326 (1962), e está presente na atual versão desta norma (ACI, 2002). O Committee 326 constatou que para grandes relações r/d ($r = b_0/4$), onde b_0 é o perímetro do pilar, a resistência última ao puncionamento v_u para lajes armadas nas duas direções era maior que a resistência ao cisalhamento em uma diagonal comprimida, no caso de uma viga. A partir disto, obtiveram a Eq. 2.50, que por sua vez, fornecia resultados conservadores quando comparados com os resultados experimentais.

Entretanto, o ACI-ASCE Committee 326 (1962) recomendou a expressão $0,335 \sqrt{f'_c}$ (MPa) no procedimento de projeto da norma do ACI 318 (1963), pois, para uma área carregada diferente da quadrada, poderia existir questionamento com relação ao valor correto para r . Esta equação tornou-se inadequada para pilares retangulares uma vez que esta penalizava a capacidade resistente das lajes à medida que o maior lado do pilar aumentava e, além disso, considerava a seção crítica na face do pilar.

$$v_u = 0,335 \left(\frac{d}{r} + 1 \right) \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2.50)$$

onde

v_u é tensão de cisalhamento calculada na face do pilar, em MPa;

r o valor correspondente a um quarto do perímetro do pilar quadrado, em mm,

f'_c a resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos, em MPa.

O ACI-ASCE Committee 326 (1962) usou os dados relatados por DIAZ DE COSSIO (1962), sobre cisalhamento e tração diagonal em lajes e sapatas, para sustentar a escolha da expressão

$0,335 \sqrt{f'_c}$ como a resistência ao cisalhamento. Os resultados realizados em vigas mostraram que a tensão de cisalhamento na diagonal aumentou com o acréscimo da relação largura / altura. Desta forma, o ACI-ASCE Committee 326 (1962) propôs o uso de um fator multiplicador na tensão de cisalhamento que é função daquela relação. Como conseqüência, o multiplicador forneceu uma tensão de cisalhamento de $0,260 \sqrt{f'_c}$ (MPa) para grandes relações largura / altura e pequenas taxas de armadura.

DIAZ DE COSSIO (1962) também testou lajes armadas em uma direção, carregadas através de áreas retangulares com as maiores dimensões paralelas aos apoios. Em todos os casos, as tensões de cisalhamento na seção crítica localizada a $0,5d$ a partir da área carregada excedeu o valor de $0,260 \sqrt{f'_c}$ (MPa) na ruptura. A necessidade de ajustes na Eq. 2.50 foi reforçada pois, para um pilar com relação entre lados igual a 3, a resistência última ao cisalhamento em uma seção localizada a $0,5d$ da face do pilar é $0,297 \sqrt{f'_c}$ (MPa).

HAWKINS et al. (1971) analisaram os resultados fornecidos por MOE (1961), que dentre eles, constou o teste de uma laje com uma relação entre lados do pilar igual a 3,0, e a proposição da Eq. 2.51 para o cálculo da resistência última ao cisalhamento de lajes cogumelo apoiadas em pilares retangulares

$$v = \frac{V_u}{bd} = \left[1,26 \left(1 - 0,075 \frac{r}{d} \right) - 0,44 \left(\frac{V_u}{V_{flex}} \right) \right] \sqrt{f'_c} \quad (MPa) \quad (2.51)$$

onde

r é o comprimento do lado maior do pilar, em mm;

V_u é a carga última calculada por cisalhamento, em kN;

V_{flex} é a carga última calculada por flexão, em kN.

A Fig. 2.20 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os fornecidos pelas Eqs. 2.50 e 2.51. Na preparação da figura, adotou-se que r tem o mesmo

valor de l , o maior lado do pilar, pois se tentou estabelecer valores ideais para r igualando-se o valor de V_u ao valor de V_{Exp} . Os valores fornecidos foram maiores que 1, o que não faz sentido fisicamente.

Os dados experimentais de HAWKINS et al. (1971) são representados pelos pontos circulares, sendo que o ponto sem preenchimento corresponde à laje 6. Observa-se que a expressão de cálculo proposta por MOE (1961) superestima as resistências últimas das lajes, sendo que o valor médio encontrado para a relação V_{Exp}/V_{calc} foi de 0,94. A equação proposta pelo ACI-ASCE Committee 326 (1962) fornece resultados mais próximos dos reais, porém, um pouco mais conservadores.

Como esperado, ocorreu certa coerência entre os resultados estimados pelas duas expressões e os experimentais, pois, a resistência última das lajes decresce com o aumento da relação r/d , mantendo o perímetro constante (r corresponde a $1/4$ do perímetro do pilar quadrado utilizado por DIAZ DE COSSIO (1962) em seus testes). Até então, a utilização de pilares retangulares, de acordo com as equações vigentes, favorecia certa perda na capacidade resistente ao puncionamento das lajes.

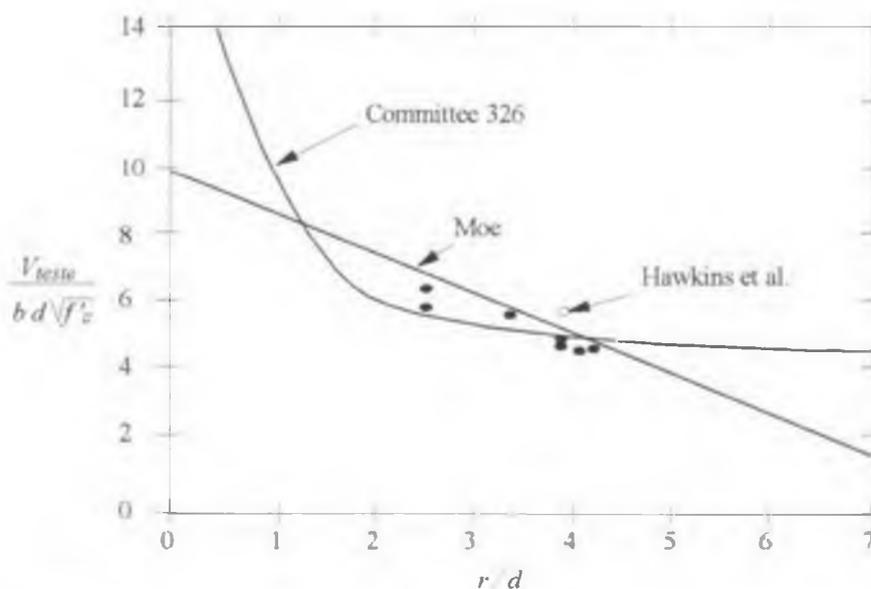


Figura 2.20 – Comparação entre os resultados experimentais de HAWKINS et al.(1971) e as expressões de MOE(1961) e ACI-ASCE Committee 326 (1962).

Considerando graficamente apenas os dados experimentais e a curva que representa a expressão da norma do ACI (1963), na Fig. 2.21, verifica-se que para relações s/l (s e l são os lados menor e maior do pilar, respectivamente) superiores a 0,5, não há necessidade de modificar a expressão de cálculo proposta pela norma. Entretanto, para relações s/l inferior a 0,5, algumas modificações são essenciais. Desta forma, os autores verificaram a necessidade de modificar as provisões existentes para aqueles casos onde o alongamento do pilar afeta a resistência ao cisalhamento.

A partir de análises obtidas dos resultados experimentais, os autores propuseram a Eq. 2.52 para o cálculo da resistência ao cisalhamento de lajes cogumelo com pilares retangulares para relação entre os lados maior e menor do pilar superior a 2,0.

$$\frac{V_{Exp}}{b d \sqrt{f_c}} = \left(0,21 + 0,25 \frac{s}{l} \right) \leq 0,335 \quad (\text{MPa}) \quad (2.52)$$

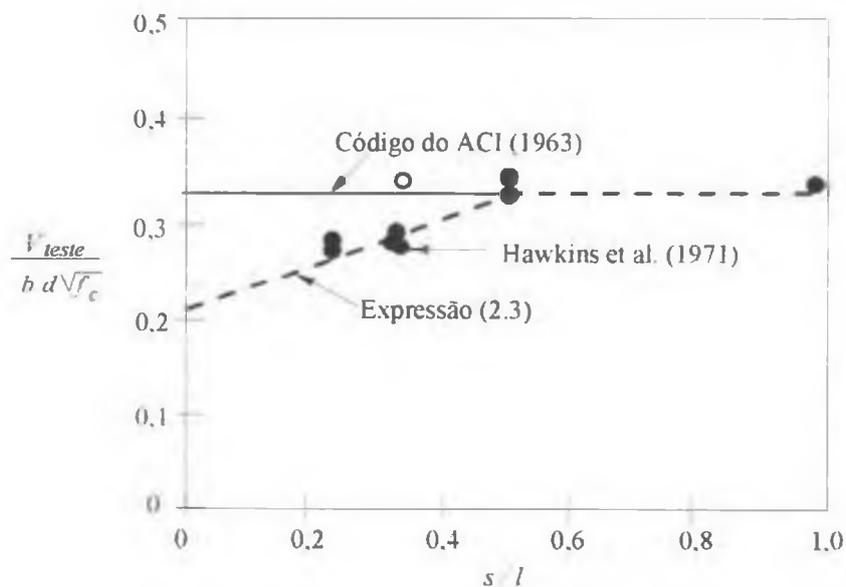


Figura 2.21 – Comparação entre resultados de HAWKINS *et al.* (1971) e a norma do ACI (1963)

HAWKINS *et al.* (1971) observaram a coerência da expressão proposta pelo ACI (1963) e por MOE (1961), e adotaram o limite de $0,335 \sqrt{f_c}$ (MPa) para a resistência ao cisalhamento

das lajes. A partir deste limite e dos dados experimentais disponíveis, os autores construíram um gráfico, que é mostrado na Fig. 2.21, que permite a comparação entre os resultados experimentais e a expressão proposta pelo ACI (1963), e também, a obtenção de uma expressão que forneça a resistência ao cisalhamento de lajes com pilares retangulares. Este gráfico relaciona os valores $V_{Exp} / d\sqrt{f_c}$ x comprimento da seção de controle localizada a $0,5d$ da face do pilar, com a relação entre lados menor e maior do pilar.

A linha tracejada representa a variação da resistência em função da variação da relação entre os lados, sendo que a reta inicia-se no valor de $0,210\sqrt{f_c}$ para a relação $s/l = 0$, e se estende até o valor de $0,335\sqrt{f_c}$ para a relação $s/l = 0,5$. A partir desta relação entre lados do pilar, a tensão de cisalhamento assume o valor de $0,335\sqrt{f_c}$ (MPa).

A laje 6 representada na Fig.2.21, por um ponto circular vazio, apresentou comportamento análogo ao dos resultados de DIAZ DE COSSIO (1962) para testes em lajes armadas em uma direção. Aparentemente, a limitação para s/l na Eq. 2.52 não se mostra necessária para a laje que estiver apoiada ao longo de dois lados apenas e a maior dimensão da carga concentrada ou da área de reação for paralela a estes lados.

VANDERBILT (1972) apud OLIVEIRA (2003) realizou ensaios com lajes cogumelo com pilares quadrados e circulares. O sistema de ensaio consistiu no apoio da laje em um pilar central e a utilização de vigas periféricas de rigidez nos quatro bordos, para impedir os esforços de torção provenientes das cargas aplicadas nas lajes. O carregamento aplicado na laje foi distribuído através de “air bags”, após o posicionamento e acomodação da laje sobre um pórtico de reação.

Durante os ensaios, os pilares foram monitorados com extensômetros elétricos de resistência em regiões imediatamente abaixo da superfície inferior das lajes, na posição vertical. Os resultados destas medições mostraram que, nos pilares quadrados ocorrem concentrações de tensões consideráveis em regiões próximas dos cantos, similares àquelas observadas por MOE (1961) e HAWKINS et al. (1971), enquanto que as distribuições de tensões em torno dos pilares circulares foram praticamente uniformes.

A Fig. 2.22 mostra algumas características das lajes de VANDERBILT (1972), e também, o posicionamento dos medidores de deformações em torno dos pilares de reação.

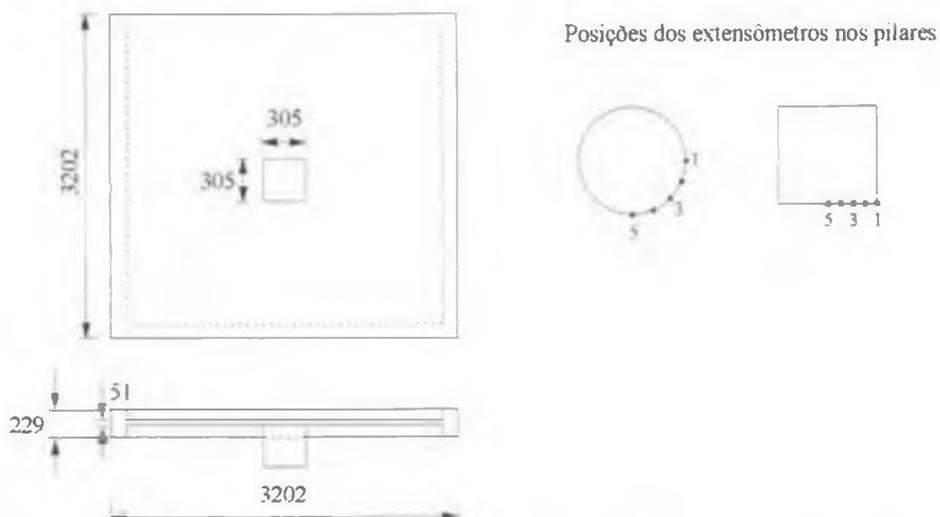


Figura 2.22 – Modelo de laje ensaiada por VANDERBILT (1972) e instrumentação dos pilares – unidades em mm

REGAN e REZAI-JORABI (1988) ensaiaram 23 (vinte e três) lajes de concreto armado de 100 mm de espessura e comprimento total de 1600 mm, sujeitas tanto a carregamento centrado como a duas cargas iguais simétricas em relação a um dos eixos da laje, como mostrado na Fig. 2.23.

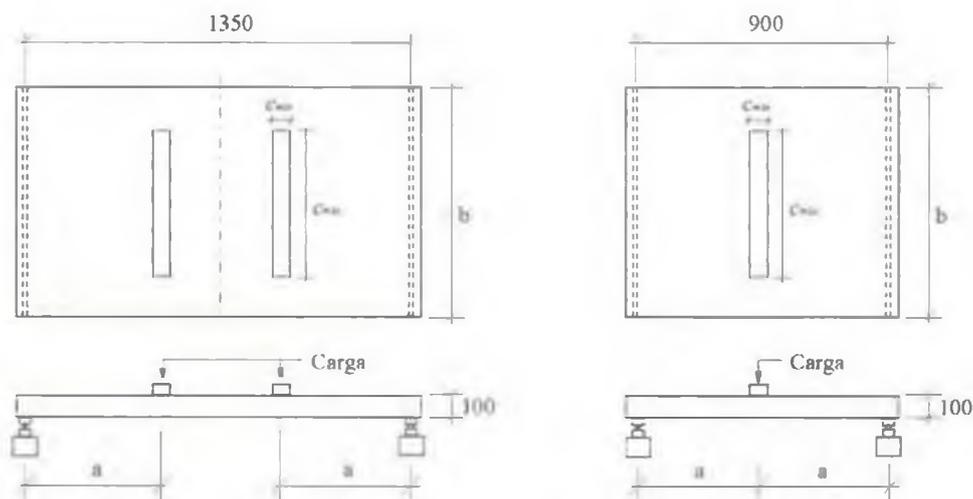


Figura 2.23 – Modelo das lajes ensaiadas por REGAN & REZAI-JORABI (1988) – unidades em mm

As principais variáveis nos ensaios foram: as dimensões das placas de carregamento, a largura das lajes e o comprimento dos vãos de cisalhamento. Após a ruptura inicial em um vão de cisalhamento, seis lajes foram retestadas com um dos apoios movidos internamente e o vão foi reduzido a uma única carga central. Todas as lajes romperam por cisalhamento, sendo que apenas quatro lajes com cargas centradas e duas lajes com cargas simétricas romperam por puncionamento, e a demais lajes romperam como viga chata. A Tab.2.4 apresenta as características principais e resultados das lajes que apresentaram ruptura por puncionamento.

Tabela 2.4 – Lajes ensaiadas por REGAN & REZAI-JORABI (1988) com ruptura por punção

Laje	f_c (MPa)	ρ (%)	a (mm)	h (mm)	$c_{mín}$ (mm)	$c_{máx}$ (mm)	V_{Exp} (kN)	Superfície de ruptura
21	38,2	1,64	450	1200	100	70*	118	A partir do pilar
25	30,3	1,64	550	1200	100	150	106	"
14R	31,0	1,54	450	800	100	75*	77	"
15R	30,8	1,54	450	800	100	150	86	"
19R	29,0	1,51	450	1000	100	150	85	"
20R	30,8	1,51	450	1000	100	300	132	"

* correspondente à menor dimensão do pilar

Os autores propuseram um método para o cálculo de lajes armadas unidirecionalmente e sujeitas a cargas concentradas. O método consiste em calcular a resistência ao cisalhamento utilizando o perímetro de controle recomendado pela norma BS8110 (1985) em duas etapas: a força concentrada é resistida por uma pressão uniforme ascendente atuando em uma zona de distribuição definida, e em seguida, a pressão é tratada como carregamento descendente, transmitido aos apoios.

O somatório das forças cortantes resulta na tensão aplicada, que por sua vez, é comparada com a resistência limite determinada de acordo com a BS8110 (1985), tanto para punção quanto para viga chata. A Fig. 2.24 apresenta alguns modelos de configuração utilizados na proposta de REGAN & JORABI (1988).

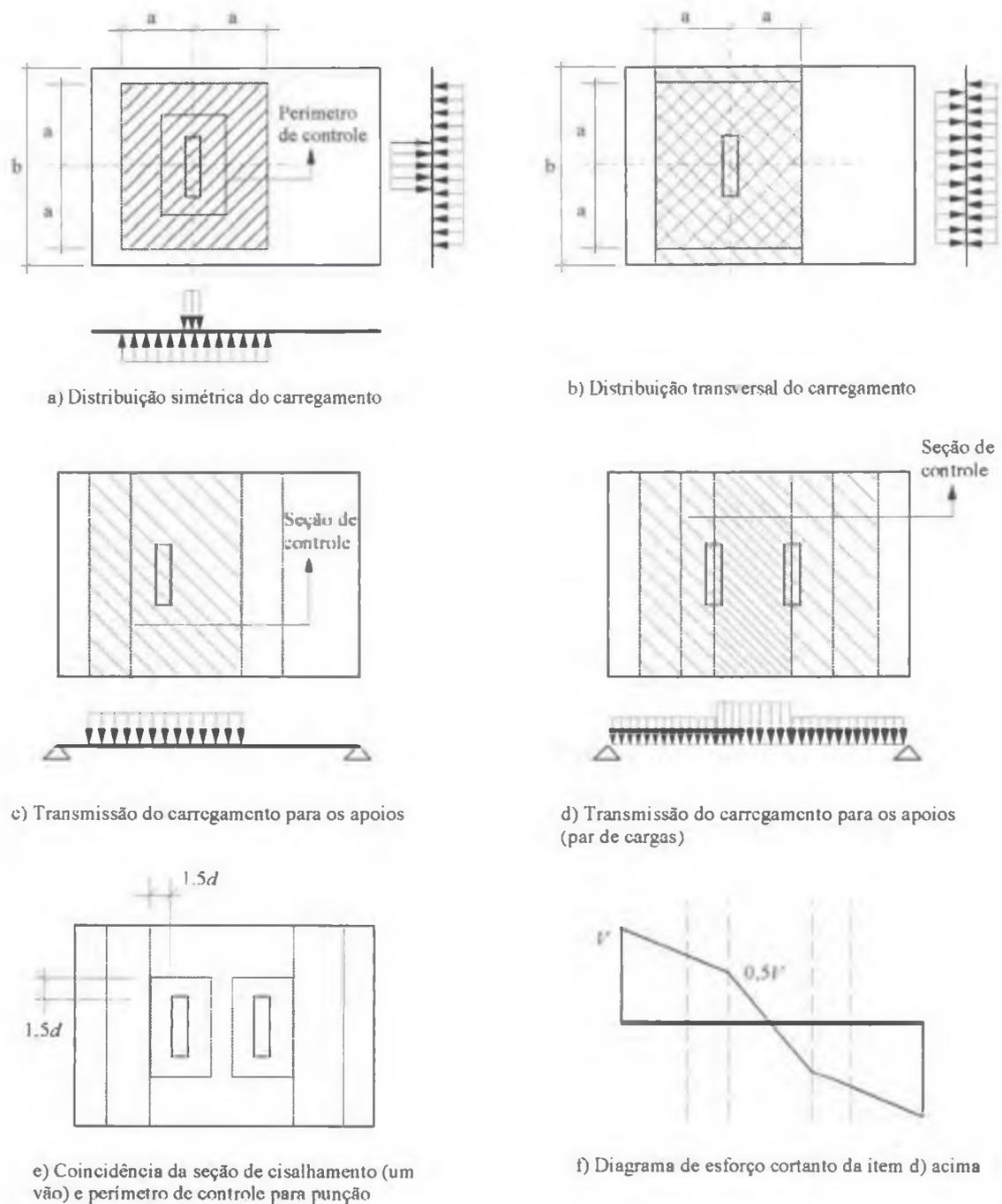


Figura 2.24 – Modelos empregados na proposta de REGAN & REZAI-JORABI (1988)

TENG et al. (1999) analisaram experimentalmente 5 (cinco) lajes quadradas de concreto armado de dimensões 2200 mm x 2200 mm x 150 mm sob influência da variação da relação entre lados do pilar, mantendo constante a menor dimensão, e da relação entre os momentos fletores nas direções x e y .

Para este estudo, realizou-se a variação da relação entre lados do pilar para valores iguais a 1, 3 e 5, e diferentes taxas de carregamento nas direções x e y . Os pilares foram moldados juntamente com as lajes e apresentaram dimensões de 200 mm x 200 mm, 200 mm x 600 mm e 200 mm x 1000 mm, e altura total de 200 mm.

Os valores médios para a resistência à compressão cilíndrica do concreto e tensão de escoamento das barras de aço deformadas foram, respectivamente, 40 MPa e 460 MPa. A Fig. 2.25 mostra detalhes de uma das lajes ensaiadas pelos pesquisadores, e a Tab. 2.5, as características das lajes monolíticas testadas por TENG et al. (1999).

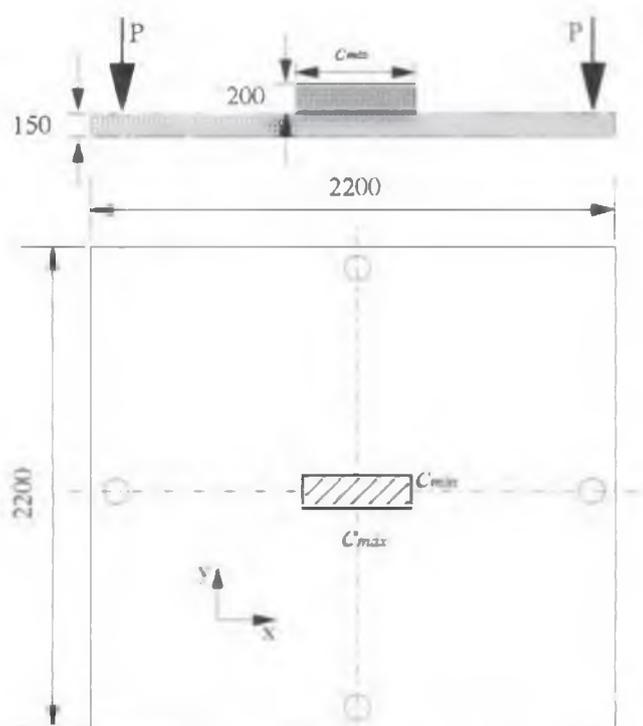


Figura 2.25 – Características das lajes ensaiadas por TENG et al. (1999) – unidades em mm

O sistema de ensaio consistiu na aplicação de oito pontos de carga de igual magnitude no bordo superior da laje. Nas lajes das séries OC13- α e OC13- β , houve diferenciação nas cargas aplicadas, com diferentes taxas de carregamento, sendo que na série α , o carregamento na direção y foi igual a 1,6 vezes o na direção x , e na outra série, o carregamento na direção y foi equivalente a 0,63 vezes o na direção x .

Tabela 2.5 – Características das lajes monolíticas ensaiadas por TENG *et al.* (1999)

Laje	Pilar		Concreto	Armadura de flexão			V_{Exp} (kN)
	c_{min} (mm)	c_{max} (mm)	f'_c (MPa)	d (mm)	ρ (%)	f_{ys} (MPa)	
OC11	200	200	36,0	105	1,81	453	423
OC13	200	600	35,8	107	1,71	453	568
OC13- $\alpha=1,6$	200	600	33,0	110	1,67	470	508
OC13- $\beta=0,63$	200	600	39,7	111	1,65	470	455
OC15	200	1000	40,2	103	1,76	453	649

Os pesquisadores observaram durante os ensaios que a primeira fissura se formou no bordo superior da laje ao longo do lado do pilar sob carga de aproximadamente 10% a 20% da carga última. Com o aumento da carga, surgiram outras fissuras radiais que se iniciaram no pilar e seguiram em direção às bordas da laje, e, em seguida, apareceram as fissuras circunferenciais em torno do pilar. Quando a carga atingiu valor próximo da carga última, os deslocamentos aumentaram repentinamente indicando, assim, a incidência de uma ruptura abrupta. As superfícies de ruptura apresentadas pelas lajes ensaiadas mostraram inclinações entre 30 e 40 graus em relação ao plano da laje.

TENG *et al.* (1999) constataram que todas as lajes testadas tiveram ruptura frágil e repentina por punção, e, as lajes OC11, OC13 e OC15 romperam com cargas iguais a 423 kN, 568 kN e 649 kN, obtendo-se um aumento de até 53% na carga de ruptura, quando se triplicou o perímetro do pilar (vide Tab. 2.5). Observou-se que grande parte da tensão de cisalhamento está concentrada nas extremidades do pilar alongado, subentendendo que a resistência à punção da laje é determinada pela resistência da laje em torno da região extrema do pilar retangular.

Com relação às taxas de carregamento, observou-se que a variação no tipo de carregamento influenciou a resistência à punção, sendo que esta influência foi limitada nos casos onde o carregamento maior foi aplicado no lado menor do pilar. Neste caso, onde a força aplicada no lado menor do pilar foi 1,6 vezes aquela aplicada no lado maior, a resistência à punção

diminui aproximadamente 10%. No caso da força aplicada no lado maior ser de valor superior, nenhuma redução na resistência última foi observada.

TENG et al (1999) apresentaram as recomendações das normas do ACI 318 (1995), BS8110 (1985) e EUROCODE 2 (1992) para o cálculo de lajes cogumelo sem armadura de cisalhamento. Todas as normas, exceto BS8110 (1985), tratam o efeito da relação entre lados do pilar na resistência à punção de lajes cogumelo de formas diferenciadas. O ACI (1995) trata a geometria do pilar através da redução das tensões nominais de cisalhamento, enquanto o EC2 (1992) reduz o perímetro de controle.

Devido à limitação de informações e resultados experimentais sobre o comportamento de lajes cogumelo com pilares retangulares, os pesquisadores propuseram recomendações especiais para o cálculo destas estruturas. As recomendações de projeto propostas são, essencialmente, uma complementação para a norma da BS8110 (1985), para o cálculo de lajes cogumelo apoiadas em pilares retangulares.

Para o tratamento da geometria do pilar, uma redução no perímetro de controle foi introduzida, de maneira similar à do EUROCODE 2 (1992), entretanto, resultando em um perímetro maior, comparado com a norma, como mostra a Fig. 2.26.

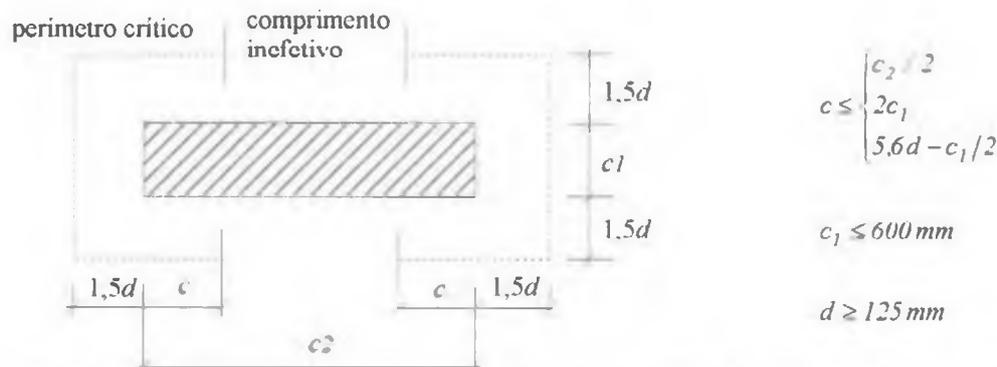


Figura 2.26 – Perímetro de controle proposto por TENG et al. (1999) para lajes com pilares retangulares

AL-YOUSIF e REGAN (2003) ensaiaram 4 (quatro) lajes quadradas de 2000 mm de lado e 100 mm de espessura, e as principais variáveis dos ensaios foram as relações entre os lados do pilar (1 e 5) e as condições de apoio em relação à flexão (dois e quatro bordos apoiados).

Todas as lajes ensaiadas romperam por punção. As maiores cargas foram observadas nas lajes com os quatro bordos apoiados, enquanto as menores foram obtidas pelas lajes apoiadas em dois bordos apenas (opostos). Neste último caso, a menor carga última foi registrada na laje com os bordos apoiados paralelos à menor dimensão do pilar, como mostra a Tab. 2.6 e Fig.2.27.

Tabela 2.6 – Características das lajes ensaiadas por AL-YOUSIF & REGAN (2003)

Laje	c_{min} (mm)	$c_{máx}$ (mm)	f_c (MPa)	Apoios	V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura	Superfície de ruptura
1	100	500	23,6	2 bordos paralelos aos menores lados do pilar	103	Punção	A partir do pilar
2	100	500	23,2	4 bordos	209	"	"
3	100	500	21,2	2 bordos paralelos aos maiores lados do pilar	189	"	"
4	300	300	22,0	4 bordos	242	"	"

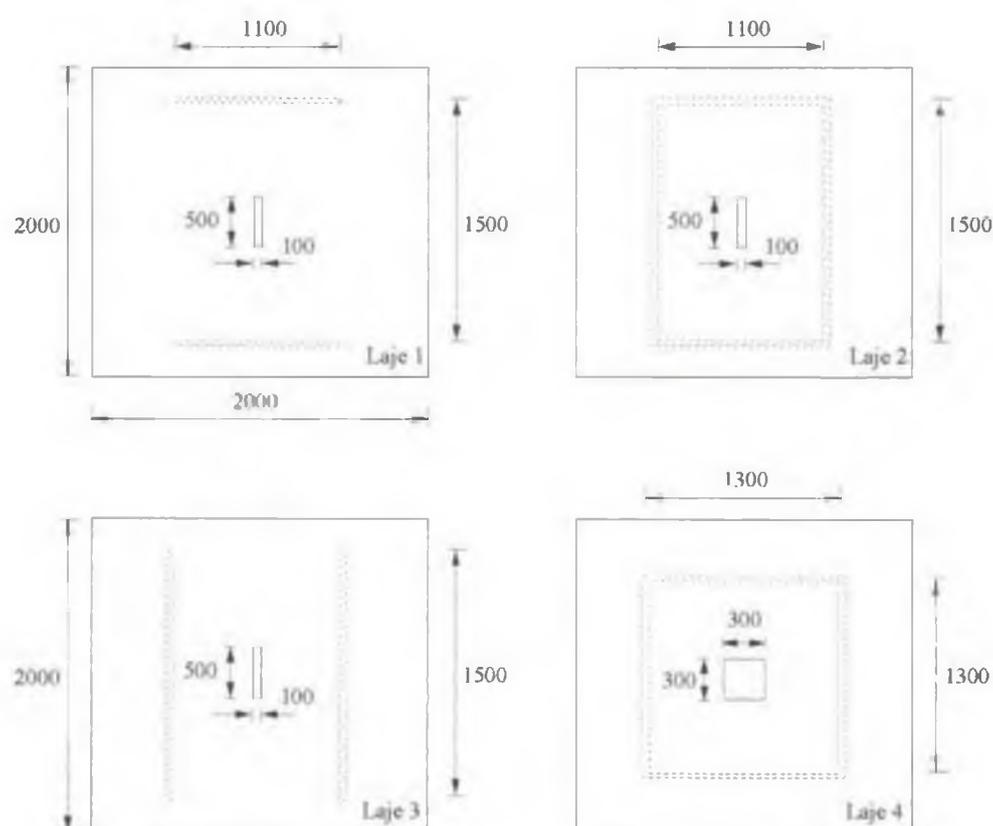


Figura 2.27 – Lajes ensaiadas por AL-YOUSIF & REGAN (2003) – unidades em mm

Os pesquisadores observaram que os resultados teóricos obtidos dos métodos da BS8110 (1985), ACI (2002) e EC2 (1992) apresentaram discrepâncias com relação aos resultados experimentais. Especificamente no caso da norma britânica, para a laje com pilar quadrado (Laje 4) a norma está a favor da segurança ($V_{Exp} V_{calc} = 1,16$), porém a relação é reduzida significativamente nas demais lajes com pilar retangular, atingindo $V_{Exp} V_{calc} = 0,76$ no caso do apoio nos lados paralelos a menor dimensão do pilar (Laje 1).

Diante dos resultados insatisfatórios apresentados pelas normas analisadas, e com base em diversos resultados da literatura, uma proposta é apresentada por AL-YOUSIF & REGAN (2003) para melhorar o método de cálculo sobre punção da BS8110 (1985), especificamente no cálculo do perímetro de controle de lajes com pilares de seção retangular carregadas em dois ou quatro bordos. A expressão proposta pelos pesquisadores para o cálculo do perímetro de controle efetivo u_{eff} é apresentada na Eq. 2.53.

$$u_{eff} = 2 \left[\lambda_x (c_x + 3d) + \lambda_y (c_y + 3d) \right] \quad (\text{mm}) \quad (2.53)$$

onde

$$\lambda_x = \left(1,09 - 0,03 \frac{c_x}{d} \right) \leq 1, \text{ para lajes calculadas em uma ou duas direções;}$$

$$\lambda_y = \left(1,09 - 0,09 \frac{c_y}{d} \right) \leq 1, \text{ para lajes calculadas em uma direção, ou}$$

$$\left(1,09 - 0,03 \frac{c_y}{d} \right) \leq 1, \text{ para lajes calculadas em duas direções.}$$

Sendo c_y a dimensão do pilar paralela ao vão da laje, e c_x a outra dimensão, no caso da laje ser armada em apenas uma direção

Observa-se nos dados anteriores que o menor valor de c_x em λ_x e de c_y em λ_y (segundo caso) é $3d$. Isto indica que os valores previstos pela BS8110 para este tipo de laje (com $c/d < 3$), são

considerados satisfatórios pelos pesquisadores. É importante ressaltar que a limitação do método proposto é $c_{x,y}/d \leq 4,55$, ou seja, $\lambda_{x,y} = 0,954$.

SILVA (2003) investigou o comportamento de 4 (quatro) lajes quadradas de concreto armado sob influência da variação da relação entre lados do pilar. As lajes apresentaram 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.

Dentre as lajes ensaiadas, três apresentaram pilar com seção transversal retangular (150 mm x 150 mm, 150 mm x 300 mm e 150 mm x 450mm) e a outra laje teve pilar com seção circular de 402 mm de diâmetro, como mostra a Fig. 2.28.

O carregamento foi aplicado nas lajes, através de chapas metálicas e executado de baixo para cima. Foi utilizado um atuador hidráulico alimentado por uma bomba manual para aplicar a carga. A reação ao carregamento centrado foi feita por um conjunto de vigas metálicas atirantadas em uma laje de reação. A reação ao carregamento aplicado foi realizada através de placas de apoio (120mm x 200mm) posicionadas em oito pontos equidistantes, dentro de uma circunferência de raio igual a 825mm. O esquema de ensaio pode ser visualizado na Fig.2.29.

A armadura principal de flexão foi composta por uma malha ortogonal de 19 barras de 12,5 mm de diâmetro ($f_y = 538$ MPa) no bordo superior, em cada direção, e no bordo inferior, foi posicionada a armadura secundária de flexão, composta de uma malha ortogonal de 11 barras de 6,3mm de diâmetro ($f_y = 594$ MPa) em cada direção (Fig.2.30). Foi acrescentada uma ancoragem nas extremidades da armadura principal, composta de 19 barras de 6,3mm de diâmetro ($f_y = 594\text{MPa}$), na forma de grampo em “U”, em ambas direções.

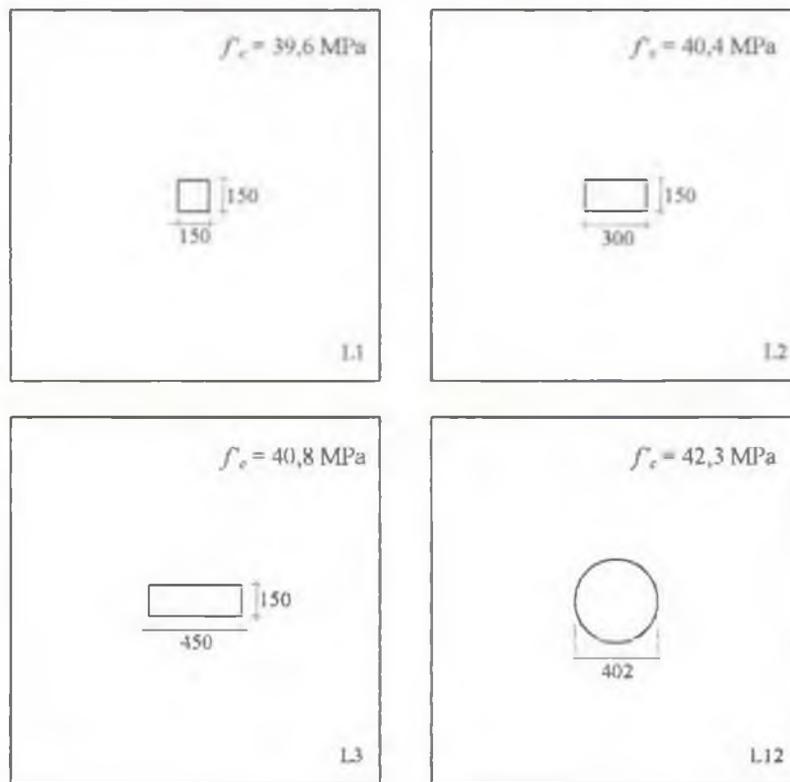


Figura 2.28 – Características das lajes L1, L2, L3 e L12 ensaiadas por SILVA (2003) – unidades em mm

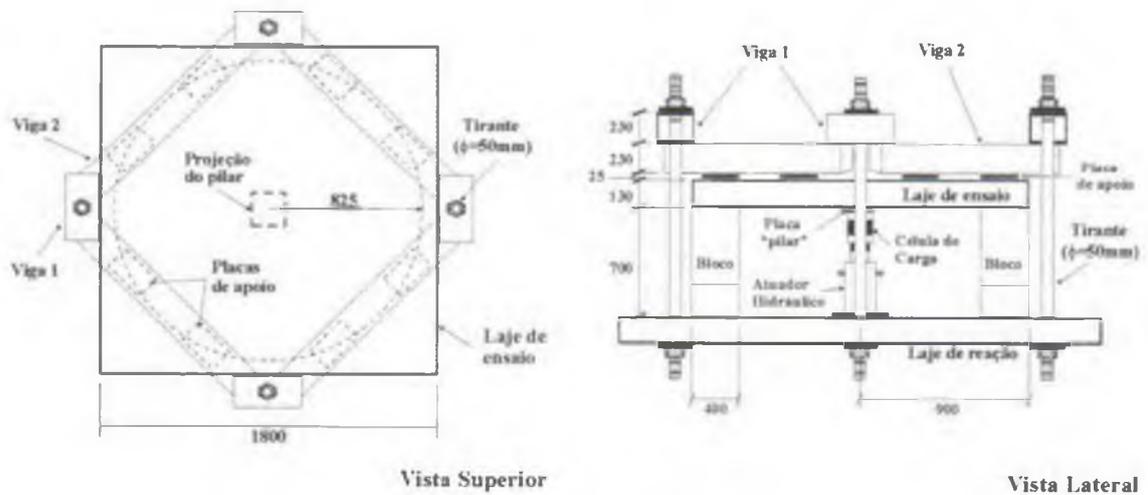


Figura 2.29 – Esquema de ensaio de SILVA (2003) – unidades em mm

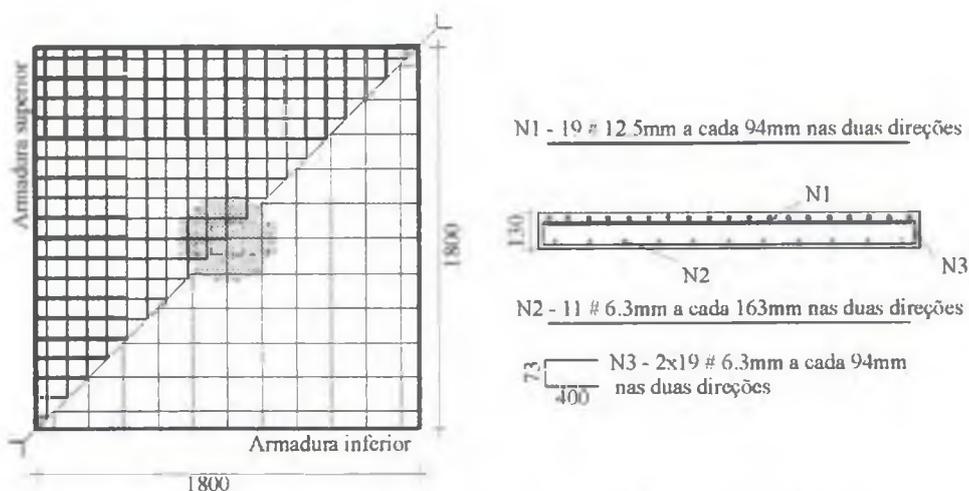


Figura 2.30 – Armadura de flexão das lajes L1, L2, L3 e L12 de SILVA (2003) – unidades em mm

As lajes L1, L2, L3 e L12 romperam por puncionamento com cargas iguais a 273 kN, 401 kN, 469 kN e 525 kN, respectivamente, como pode ser visto na Tab.2.7. O aumento da relação $c_{m\acute{a}x} c_{m\acute{i}n}$ do pilar de 1 para 3, mantendo uma das dimensões constante, conduziu ao acréscimo de aproximadamente, 72% da carga de ruptura. Apesar das lajes L3 e L12 terem perímetros de controle aproximadamente iguais (situado a $2d$ da face do pilar) as cargas de ruptura se diferenciaram em 12%.

Tabela 2.7 – Características das lajes monolíticas ensaiadas por SILVA (2003)

Laje	Pilar (mm x mm)	f_c (MPa)	ρ (%)	V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura	Superfície de ruptura
L1	150 x 150	39,6	1,45	273	Punção	A partir do pilar
L2	150 x 300	40,4	1,45	401	"	"
L3	150 x 450	40,8	1,45	469	"	A partir do pilar, na direção do lado maior, e, afastado do pilar, na outra direção
L12	$\phi = 402$ mm	42,3	1,45	525	"	A partir do pilar

O comportamento à flexão de lajes cogumelo e a influência da relação entre lados do pilar ($c_{m\acute{a}x} c_{m\acute{i}n}$) na resistência ao puncionamento foi investigado por OLIVEIRA (2003). O

programa experimental do autor consistiu no ensaio até a ruptura de 15 (quinze) lajes retangulares (1680 mm x 2280 mm x 130 mm) de concreto armado de alta resistência ($54 \text{ MPa} < f'_c < 67 \text{ MPa}$), apoiadas em pilares com seção transversal variável, fornecendo valores para a relação c_{max}/c_{min} entre 1 e 5. Para cada relação c_{max}/c_{min} , as lajes foram carregadas de três formas diferentes: lajes carregadas nos dois bordos menores, nos dois bordos maiores, e nos quatro bordos.

A Tab.2.8 e Fig.2.31 apresentam, respectivamente, as características, cargas e modos de ruptura, e, a disposição do carregamento das lajes ensaiadas por OLIVEIRA (2003).

Tabela 2.8 – Características, cargas e modos de ruptura das lajes de OLIVEIRA (2003)

Laje	d (mm)	ρ (%)	f'_c (MPa)	Pilar		Carga aplicada	V_{Exp} (kN)	$V_{Exp}/$ V_{Flex}	Modo de ruptura
				c_{min} (mm)	c_{max} (mm)				
L1a	107	1,09	57	120	120	P1	234	0,97	FP
L1b	108	1,08	59	120	120	P2	322	0,49	P
L1c	107	1,09	59	120	120	P1 e P2	318	0,45	P
L2a	109	1,07	58	120	240	P1	246	0,94	FP
L2b	106	1,10	58	120	240	P2	361	0,56	P
L2c	107	1,09	57	120	240	P1 e P2	331	0,45	P
L3a	108	1,08	56	120	360	P1	241	0,87	FP
L3b	107	1,09	60	120	360	P2	400	0,62	P
L3c	106	1,10	54	120	360	P1 e P2	358	0,48	P
L4a	108	1,08	56	120	480	P1	251	0,85	FP
L4b	106	1,10	54	120	480	P2	395	0,62	P
L4c	107	1,09	56	120	480	P1 e P2	404	0,51	P
L5a	108	1,08	57	120	600	P1	287	0,90	FP
L5b	108	1,08	67	120	600	P2	426	0,65	P
L5c	109	1,07	63	120	600	P1 e P2	446	0,52	P

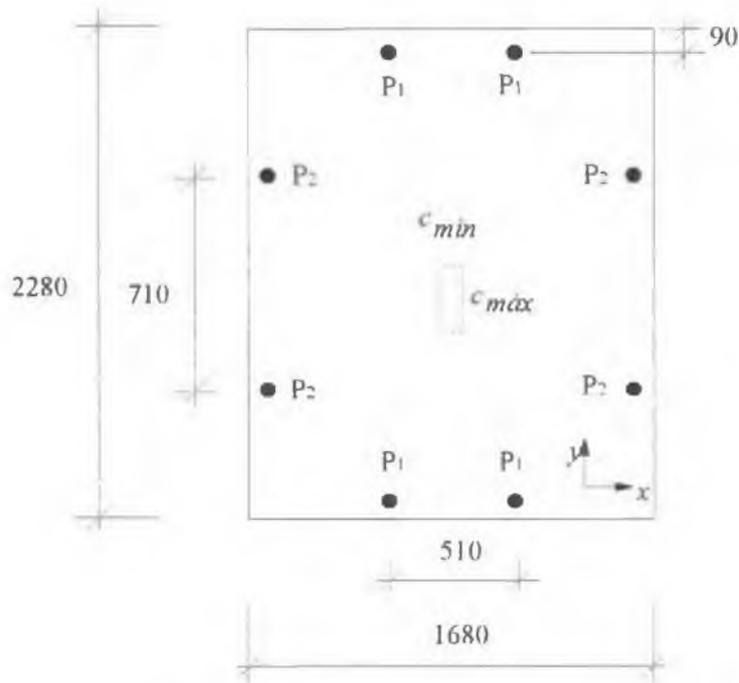


Figura 2.31 – Disposição do carregamento nas lajes de OLIVEIRA (2003) – unidades em mm

As cargas P1 e P2 tiveram a mesma intensidade e foram aplicadas paralelamente ao menor e maior lado do pilar, respectivamente. Isto possibilitou a análise do comportamento das lajes com a variação da posição do carregamento, em relação às faces dos pilares, e a observação da variação da resistência ao punçonnemento com a resistência à flexão, sob carregamento P1.

A armadura de flexão foi constante para todas as lajes e constituiu-se de barras de aço de 12,5mm de diâmetro, com 23 e 15 barras posicionadas ao longo da direção y e x , respectivamente, dispostas ortogonalmente. O espaçamento nas direções x e y foram, respectivamente, 102 mm e 117 mm. A ancoragem de todas as barras da armadura principal de flexão consistiu de grampos de diâmetro 6,3 mm dobrados em forma de “U”. A armadura inferior de flexão teve barras de 6,3 mm de diâmetro espaçadas de 204 mm (x) e 236 mm (y).

As lajes carregadas nos dois bordos menores romperam por flexo-punçonnemento (predominância das fissuras de flexão, deformações da armadura de flexão superior à determinada para o escoamento, e cargas últimas próximas das estimadas para ruptura por flexão), enquanto as demais lajes romperam por punção.

Os resultados mostram que as cargas de ruptura tenderam a aumentar com o acréscimo da relação c_{max}/c_{min} do pilar, atingindo um aumento de 23% para as lajes carregadas nos bordos menores, 32%, nos maiores, e 40%, nos quatro bordos.

Observa-se que as lajes carregadas no bordo menor apresentaram as menores cargas de ruptura, em relação às carregadas de outras formas. O autor atribui este fato à baixa capacidade resistente destas lajes à flexão. À medida que a relação c_{max}/c_{min} aumenta, no caso destas lajes, também ocorre um acréscimo nas estimativas para a resistência à flexão, de forma a confirmar o inter-relacionamento da relação c_{max}/c_{min} e da resistência à flexão no crescimento das cargas de punção das lajes.

Com relação às lajes carregadas nos dois bordos maiores e nos quatro bordos, as cargas de ruptura apresentaram-se próximas, com uma diferença máxima de 12%, no caso das lajes L3b e L3c.

OLIVEIRA (2003) propõe fatores de flexão λ para serem incorporados à equação do CEB-FIP (1991), derivados de ensaios realizados e de resultados da literatura, que levam em consideração as principais condições que podem ocorrer relacionando o comportamento à flexão das lajes e a orientação dos lados de apoios. Estes fatores foram determinados, segundo o autor, para levar em consideração o fenômeno da polarização das forças cortantes, nos casos de puncionamento simétrico, para lajes monolíticas sem armadura de cisalhamento e solicitadas em uma ou duas direções, de acordo com a Eq. 2.54.

$$V = \frac{0,18}{\lambda} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho f'_c} d u \quad (\text{kN}) \quad (2.54)$$

sendo d a altura útil da laje, ρ a taxa geométrica de armadura de flexão, f'_c a resistência à compressão do concreto medida em corpos de prova cilíndricos, e u o perímetro de controle recomendado pela norma do CEB-FIP MC90.

Desta forma, a Tab. 2.9 e Fig. 2.32 mostram, respectivamente, os fatores de flexão e os três tipos distintos de laje (classificada de acordo com o carregamento aplicado), sendo que o autor propôs para cada tipo de laje, um fator de flexão para correção.

Tabela 2.9 – Fatores de flexão propostos por OLIVEIRA (2003)

Tipo de laje	λ
1	$\left(\frac{c_{\max}}{d}\right)^{0,17}$
2	$0,93 \left(\frac{c_{\max}}{d}\right)^{0,14}$
3	$1,03 \left(\frac{c_{\max}}{d}\right)^{0,02}$

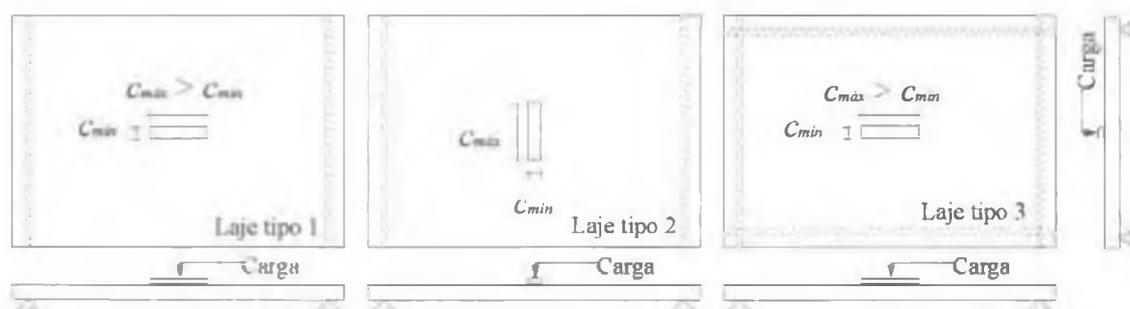


Figura 2.32 – Tipos de lajes classificadas por OLIVEIRA (2003)

2.3.2 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA LITERATURA COM NORMAS DE PROJETO

Para a avaliação dos métodos de cálculo apresentados, foi realizada, graficamente, uma relação entre as resistências estimadas e uma resistência de referência V_{ref} , igual à resistência estimada para uma laje calculada bidirecionalmente e com um pilar quadrado de lado $c_{\max} = 2d$, de forma semelhante à utilizada por OLIVEIRA (2003).

A Fig. 2.33 apresenta a tendência das estimativas das normas e de outros métodos para áreas carregadas quadradas ($c_{\max}/c_{\min}=1$) e retangulares ($c_{\max}/c_{\min}=4$). A utilização do parâmetro c_{\max}/d nas comparações entre as normas, e em demais análises, se deve à necessidade de se levar em conta o efeito do acréscimo das dimensões do pilar, quadrado ou retangular, no cálculo da resistência estimada pelas normas.

Para áreas carregadas quadradas, as estimativas do CEB (1991), NB1 (2003), EC2 (2001), ACI (2002), BS8110 (1997) e OLIVEIRA (2003), se apresentaram com uma variação de até 10% de um em relação ao outro. As estimativas da NB1 (1978) foram consideravelmente superiores às demais normas, para áreas quadradas relativamente grandes, confirmando o fato de que a norma não impõe limitações para as dimensões das áreas carregadas no cálculo da resistência à punção.

O EC2 (1992) foi o método que apresentou as menores estimativas para as cargas de ruptura para valores de $c_{max}d$ superiores a 3, que permaneceram iguais e constantes. Para as estimativas do método de TENG et al.(1999), a carga de ruptura de uma laje carregada com área quadrada, estabiliza em um determinado valor, a partir de $c_{max}d = 5$.

O método de AL-YOUSIF & REGAN (2003) apresenta estimativas semelhantes às da norma BS8110 (1997), até relações $c_{max}d = 3$. A partir daí, a resistência da laje estimada pelos autores, tende a aumentar com o acréscimo da relação $c_{max}d$, com estimativas entre valores obtidos pelo método de TENG et al (1999) e da BS8110 (1997).

Para as áreas retangulares ($c_{max}c_{min} = 4$), o ACI (2002) estimou as mais baixas resistências para valores de $c_{max}d$ relativamente pequenos, enquanto o EC2 (1992) forneceu os mais baixos valores para $c_{max}d$ elevados. A NB1 (1978) também apresentou uma das mais baixas resistências para pequenos valores de $c_{max}d$, chegando a atingir as maiores estimativas, dentre as normas analisadas.

Assim como para áreas quadradas carregadas, as normas CEB/91, NB1/03, EC2/01, BS/97 e OLIVEIRA/03, com exceção do ACI/02, apresentaram estimativas bastante próximas tanto para áreas carregadas pequenas quanto de maiores dimensões, com uma variação de até 5%, de um em relação ao outro.

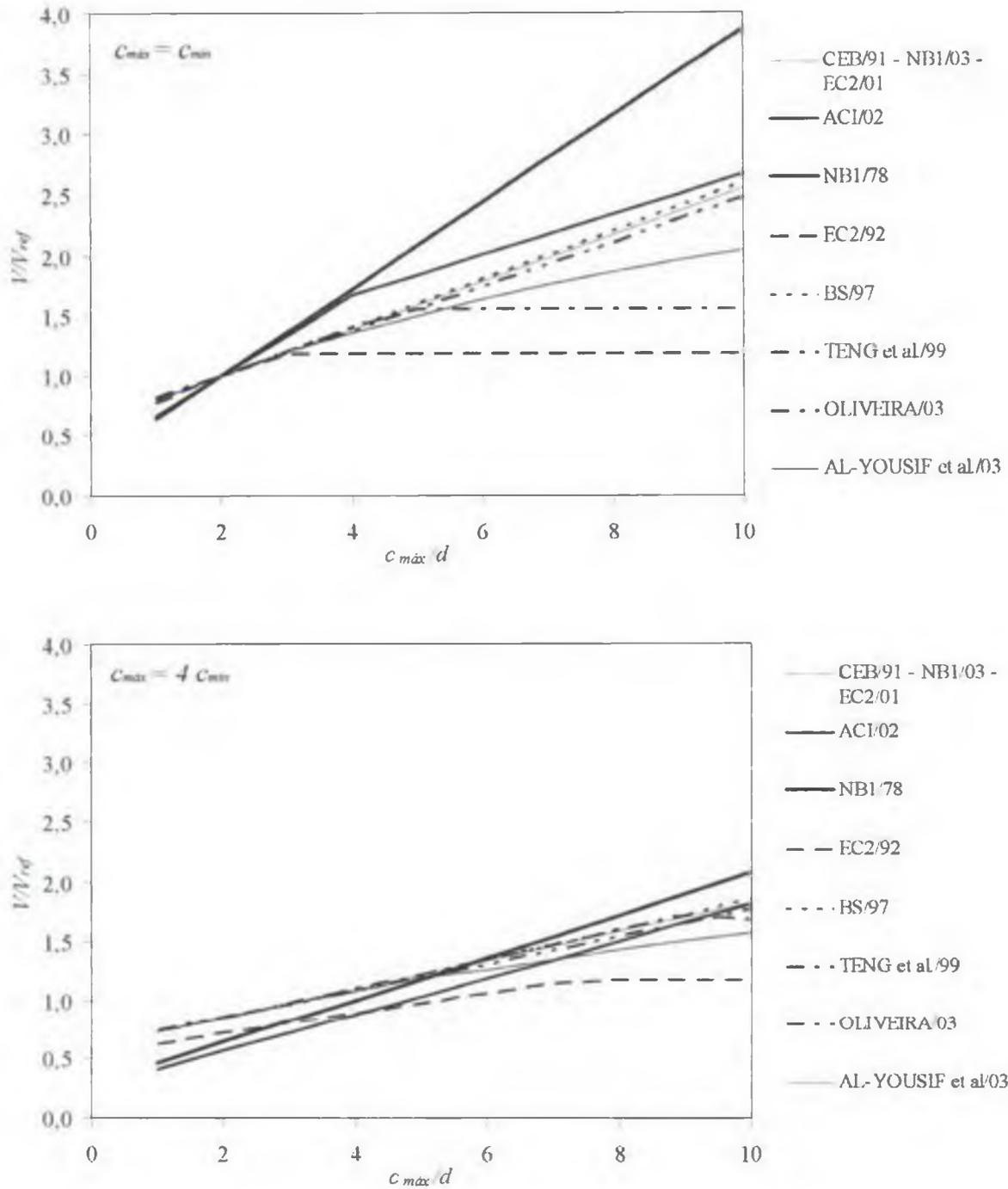


Figura 2.33 - Comparação entre alguns métodos e normas de projeto para lajes monolíticas

A Tab. 2.10 apresenta as estimativas dos métodos e normas de projeto apresentadas para as lajes com pilares retangulares, e submetidas a carregamento nos quatro bordos, ensaiadas por FORSSEL & HOLMBERG (1946), HAWKINS et al. (1971), TENG et al. (1999), AL-YOUSIF & REGAN (2003), SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003). As Figs. 2.34 a 2.39 ilustram a tendência das estimativas das normas de projeto e de pesquisadores. As linhas de

tendência utilizadas foram do tipo potência, pois, procurou-se utilizar funções matemáticas semelhantes às empregadas nas expressões das normas de projeto, e foram determinadas utilizando o software “EXCEL” da “Microsoft”. Linhas de tendência são curvas ajustadas aos dados disponíveis que relacionam grandezas conhecidas com as que devam ser determinadas, utilizando o “Método dos Mínimos Quadrados”.

Observa-se na Tab. 2.10 e Fig. 2.34 que as normas NB1/03 e CEB/91 superestimaram os resultados das lajes de FORSSEL & HOLMBERG (1946) em até 7%. A proposta de OLIVEIRA (2003) conduziu a resultados mais próximos dos reais, com a relação V_{exp}/V_{calc} variando entre 0,98 e 1,16, tendendo a superestimar a resistência da laje com o aumento da relação c_{max}/d .

As demais normas subestimaram as cargas de ruptura das lajes de FORSSEL & HOLMBERG (1946), especialmente a NB1/78, EC2/92 e ACI/02, sendo que os resultados estimados tenderam a se aproximar dos experimentais com o aumento de c_{max}/d . A norma BS8110/97 forneceu estimativas mais satisfatórias, para qualquer valor de c_{max}/d , em relação aos métodos de TENG et al. (1999) e de AL-YOUSIF & REGAN (2003).

Para as lajes de HAWKINS et al. (1971) observa-se na Tab. 2.10 e Fig. 2.35 que o ACI/02, EC2/92 e NB1/78 tendem a apresentar, em geral, os resultados mais conservadores, em relação aos demais métodos de cálculo. Para relações c_{max}/d relativamente baixos, a NB1/78 apresenta-se mais conservadora, enquanto que o ACI/02 e EC2/92 apresentam valores mais conservadores para relações c_{max}/d relativamente altas.

As estimativas da BS8110 (1997) e dos métodos de TENG et al. (1999) e AL-YOUSIF & REGAN (2003), para as lajes de HAWKINS et al. (1971), se apresentaram bem próximas, como esperado. A proposta de TENG et al. de reduzir o perímetro de controle de pilares retangulares com c_{max}/d relativamente elevados, melhorou os resultados das lajes com $c_{max}/d > 3$. A proposta de cálculo de AL-YOUSIF & REGAN conduziu a melhores estimativas para lajes com pilar com $c_{max}/d > 3$, quando comparadas com as da BS/97.

As normas CEB/91, NB1/03, EC2/01 e o método de OLIVEIRA/03 tendem a superestimar a resistência das lajes de HAWKINS et al. (1971), especialmente, aquelas com $c_{max}/d > 3$, entretanto, a utilização do fator de flexão proposto por OLIVEIRA/03 permitiu aproximar os

resultados teóricos dos experimentais, em relação à norma do CEB/91. Cabe ressaltar que o método de cálculo conservador que estimou resistências mais próximas das experimentais, em todos os casos, foi o EC2/01, independente do valor da relação c_{max}/d , provavelmente devido às limitações da norma com relação ao coeficiente de tamanho. A Fig.2.35 mostra a tendência dos resultados de HAWKINS et al. (1971) devido à influência da relação c_{max}/d .

As previsões da norma ACI/02, EC2/92 e NB1/78 se apresentaram as mais conservadoras, em relação aos demais métodos de cálculo, para as lajes ensaiadas por TENG et al. (1999), independente da relação c_{max}/d , como mostram a Tab.2.10 e Fig.2.36. Os métodos da BS/97 e TENG et al./99 forneceram estimativas praticamente iguais até relações $c_{max}/d < 6$. Para valores superiores a $c_{max}/d = 6$, o método de TENG et al. se apresentou mais conservador. O método de AL-YOUSIF & REGAN forneceu estimativas mais conservadoras que o de TENG et al., a partir de relações $c_{max}/d > 1,91$.

Para as lajes de TENG et al. (1999), as normas do CEB/91 e NB1/03, seguidas do método de OLIVEIRA/03, apresentaram as estimativas mais próximas das experimentais, com uma variação de até 15% entre carga teórica e experimental, ao passo que o EC2/01 apresentou resultados mais conservadores que estes, como mostra a Fig.2.36. As normas BS/97, CEB/91, NB1/03, EC2/01, NB1/78 e o método de OLIVEIRA/03 tendem a superestimar as resistências das lajes de TENG et al. (1999) à medida que se aumenta a relação c_{max}/d .

Para as lajes de AL-YOUSIF & REGAN (2003), todas as normas, exceto a NB1/03 e CEB/91, subestimaram as cargas de ruptura, entre 12% e 87% (Fig.2.37). Com relação às lajes ensaiadas por SILVA (2003), observa-se na Tab.2.10 e Fig.2.38 que todos os métodos de cálculo utilizados se apresentaram conservadores, especialmente com o aumento da relação c_{max}/d . Dos métodos utilizados, os que se apresentaram menos conservadores foram o CEB/91 e NB1/03, com relação V_{Exp}/V de até 1,28.

As estimativas da norma do ACI/02 e NB1/78 se mostraram as mais conservadoras em relação às demais normas e métodos utilizados para as lajes ensaiadas por OLIVEIRA/03, independente da relação c_{max}/d , como mostram a Tab.2.10 e Fig.2.39. As demais normas e métodos tenderam a superestimar as resistências das lajes de OLIVEIRA/03, especialmente a norma NB1/03 e CEB/91, com o aumento da relação c_{max}/d . Observa-se na Tabela 2.10 que a proposta do autor propiciou uma melhoria nas estimativas do CEB/91.

Tabela 2.10 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da literatura carregadas/apoiadas nos quatro bordos

Autor	Laje	c_{max}/c_{min}	d (mm)	c_{max}/d	V_{Exp}/V_{calc}											
					AC1/02	BS/97	CEB/91 ($\gamma=1,33$)	CEB/91 ($\gamma=1,50$)	EC2/92	EC2/01	NB1/78	NB1/03 ($\gamma=1,33$)	NB1/03 ($\gamma=1,40$)	OLIVEIRA/03	TENG et al./99	AL-YOUSIF et al./03
FORSSEL et al./46	10	12	104	2,88	2,06	1,01	1,05	0,93	2,02	1,11	2,53	1,05	0,93	0,98	1,30	1,35
	11	3,9	112	4,82	1,30	1,03	1,08	0,96	1,71	1,28	1,26	1,08	0,96	1,02	1,03	1,10
	12	2,4	108	3,15	1,38	1,19	1,24	1,10	1,71	1,30	1,41	1,24	1,10	1,16	1,19	1,19
FLAWKINS et al./71	7	3	117	3,91	1,16	0,94	0,99	0,88	1,29	1,01	1,07	0,93	0,88	0,93	0,94	0,96
	8	4,3	121	4,09	1,28	0,93	0,97	0,86	1,43	0,99	1,19	0,91	0,86	0,91	1,16	0,95
	9	2	121	2,52	1,09	1,04	1,08	0,96	1,21	1,10	1,23	1,02	0,96	1,01	1,04	1,04
TENG et al./99	OC11	1	105	1,90	1,65	1,20	1,24	1,10	1,37	1,31	1,86	1,17	1,10	1,15	1,20	1,20
	OC13	3	107	5,61	1,57	1,15	1,21	1,07	1,49	1,27	1,43	1,14	1,07	1,14	1,15	1,22
	OC15	5	103	9,71	1,52	1,03	1,08	0,96	1,66	1,15	1,55	1,01	0,96	1,03	1,15	1,20
AL-YOUSIF et al./03	2	5	80	6,25	1,53	0,98	1,01	0,90	1,87	1,16	1,61	1,01	0,90	0,96	1,19	1,24
	4	1	80	3,75	1,27	1,16	1,19	1,06	1,55	1,36	1,39	1,19	1,06	1,12	1,16	1,21
SILVA/03	L1	1	90	1,67	1,51	1,11	1,14	1,01	1,28	1,26	1,71	1,07	1,01	1,05	1,11	1,11
	L2	2	90	3,33	1,67	1,37	1,42	1,26	1,53	1,57	1,85	1,33	1,26	1,33	1,37	1,38
	L3	3	90	5,00	1,88	1,39	1,44	1,28	1,78	1,59	1,72	1,36	1,28	1,36	1,39	1,44
OLIVEIRA/03	L1C	1	107	1,12	1,28	1,04	1,07	0,95	1,03	1,13	1,48	1,01	0,95	0,99	1,04	1,04
	L2C	2	107	2,24	1,07	0,96	1,00	0,89	0,94	1,05	1,21	0,94	0,89	0,93	0,96	0,96
	L3C	3	106	3,40	1,20	0,96	0,99	0,88	1,07	1,05	1,11	0,94	0,88	0,93	0,96	0,96
	L4C	4	107	4,49	1,24	0,95	1,00	0,88	1,16	1,05	1,14	0,94	0,88	0,94	0,95	0,98
	L5C	5	109	5,50	1,18	0,91	0,95	0,85	1,16	1,00	1,16	0,90	0,85	0,90	1,00	0,96
Média					1,41	1,07	1,11	0,99	1,44	1,20	1,47	1,06	0,99	1,04	1,12	1,13
Desvio padrão					0,27	0,14	0,14	0,13	0,30	0,18	0,36	0,14	0,13	0,13	0,14	0,16
Coefficiente de variação (%)					19,1	13,1	12,9	12,9	21,2	14,9	24,5	13,1	12,9	12,9	12,2	13,7

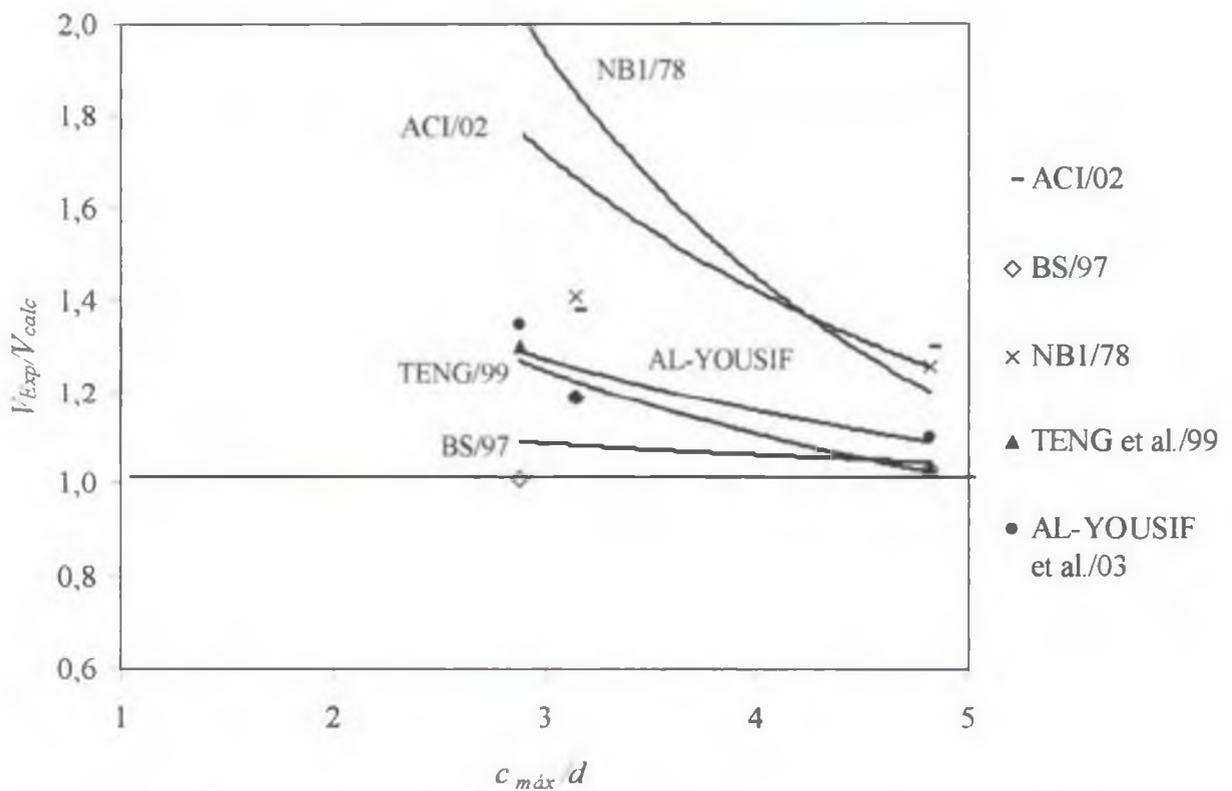
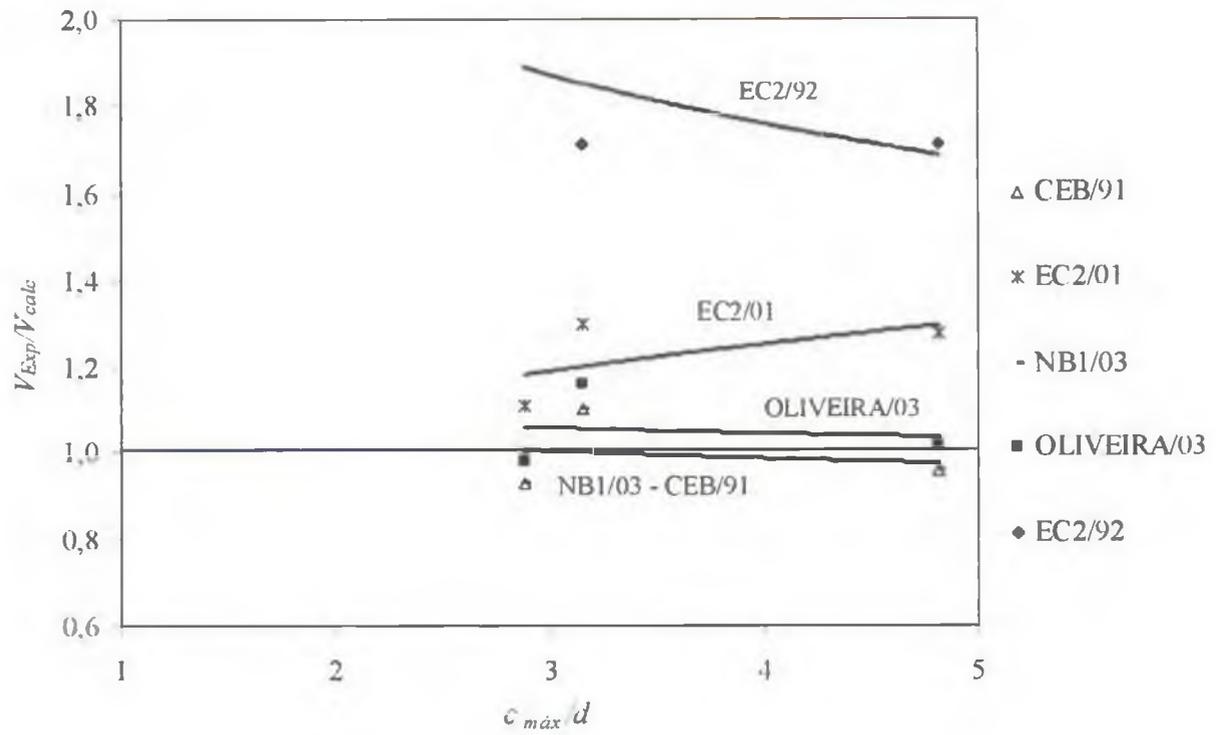


Figura 2.34 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes de FORSSEL & HOLMBERG (1946)

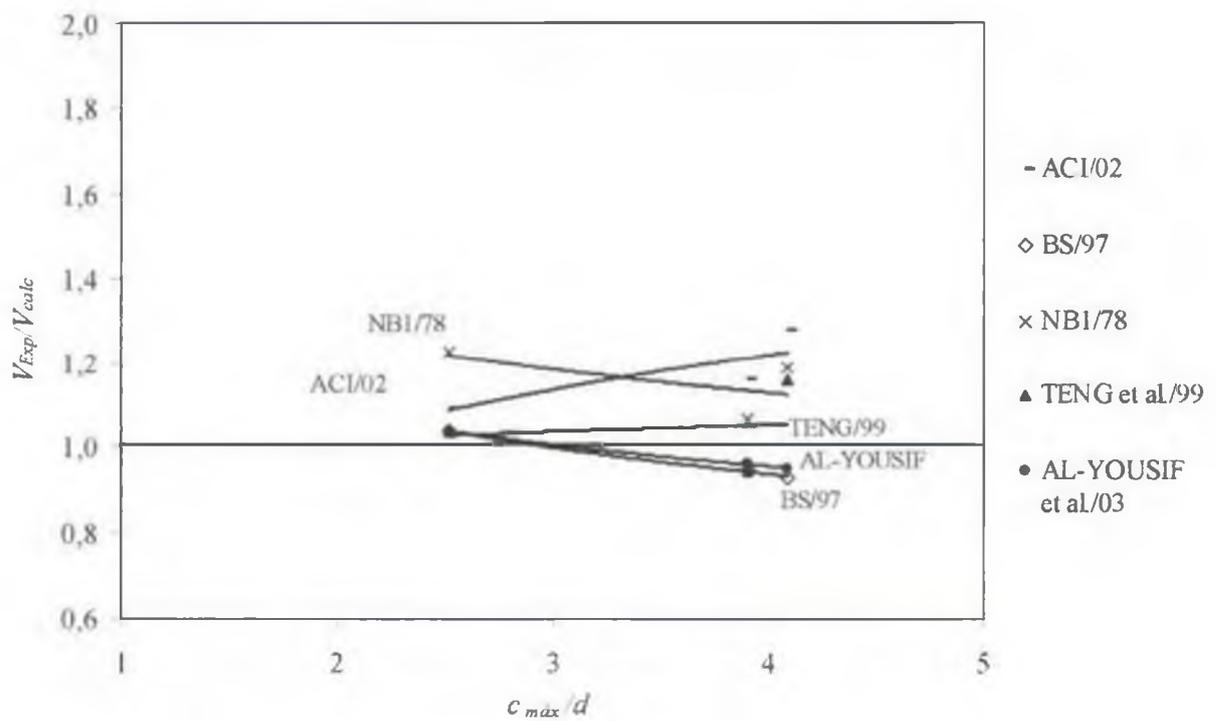
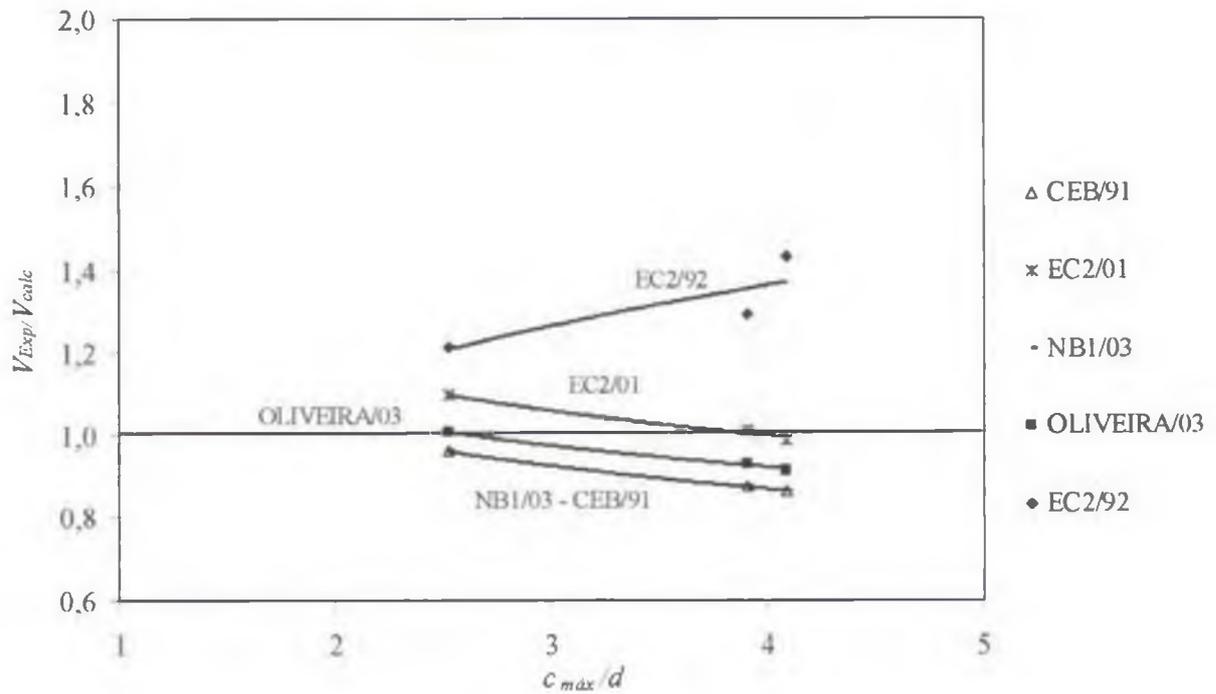


Figura 2.35 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes de HAWKINS et al. (1971)

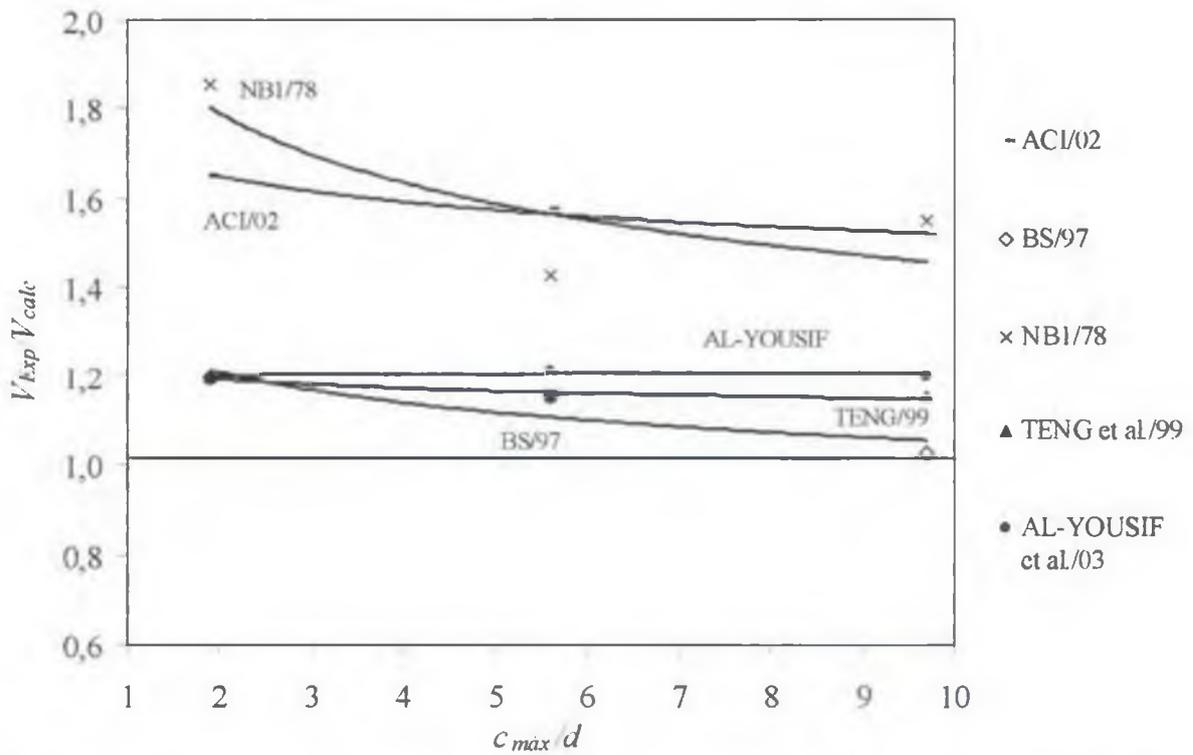
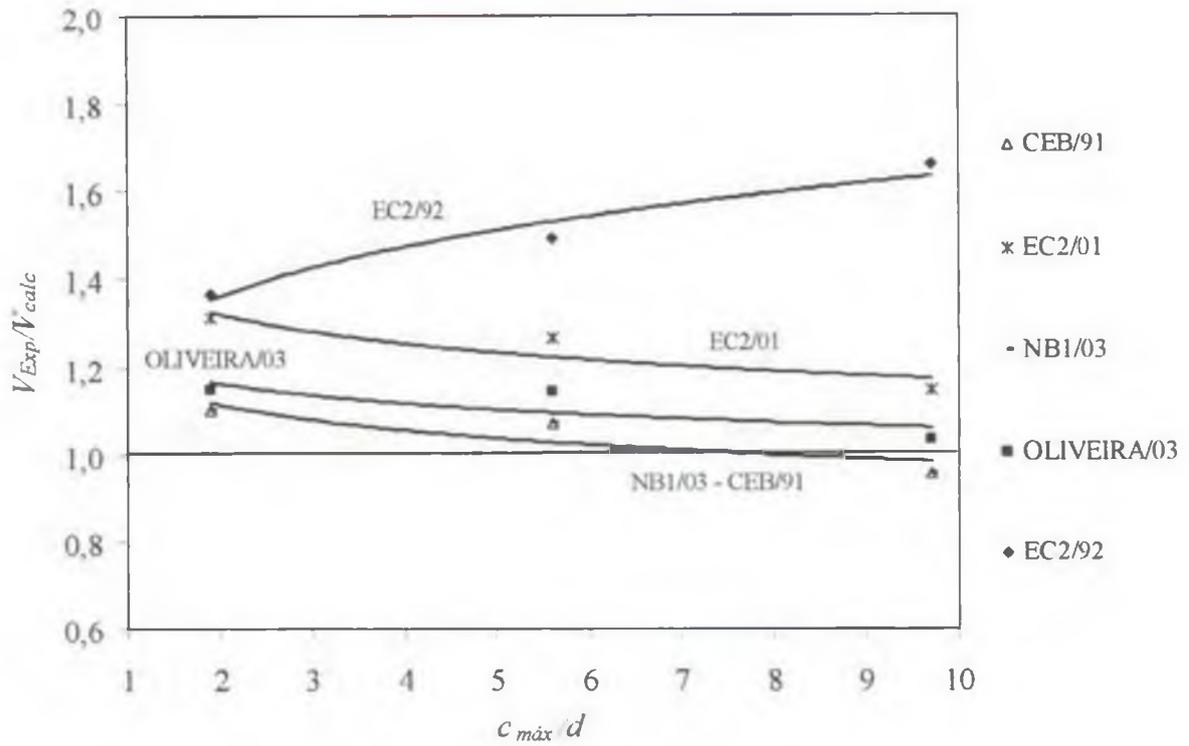


Figura 2.36 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes de TENG et al. (1999)

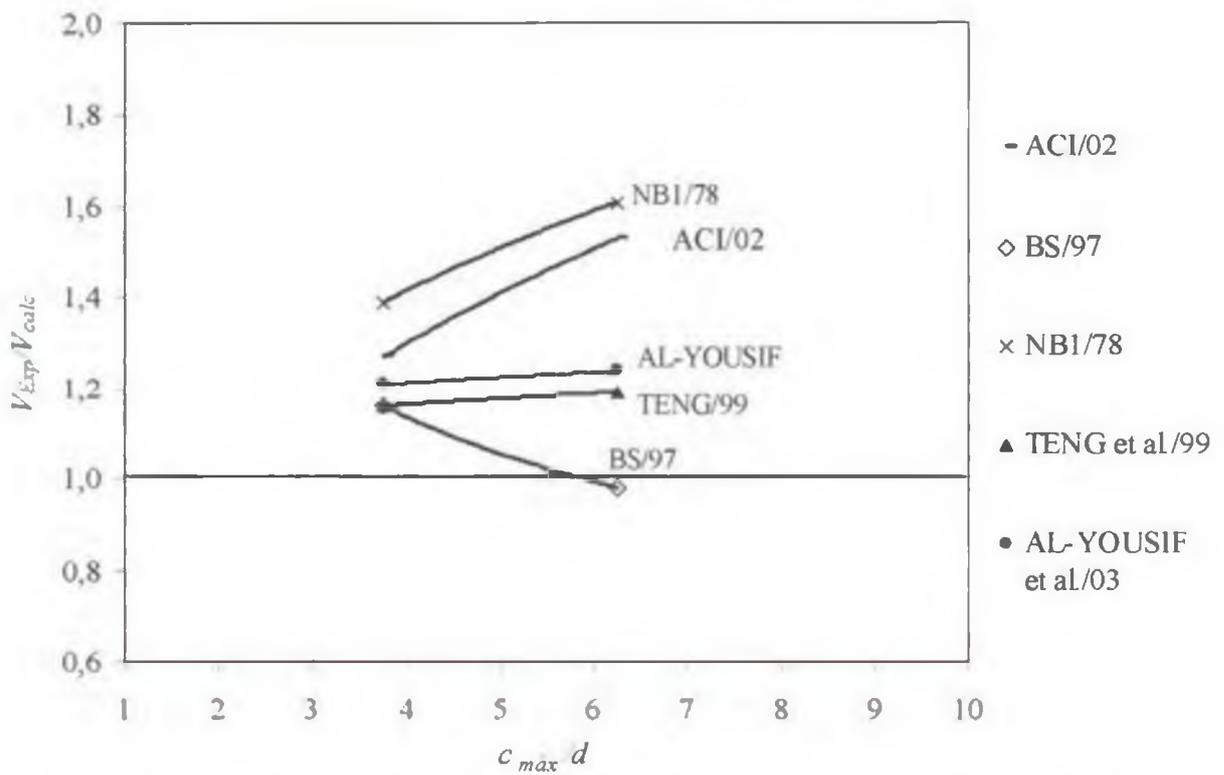
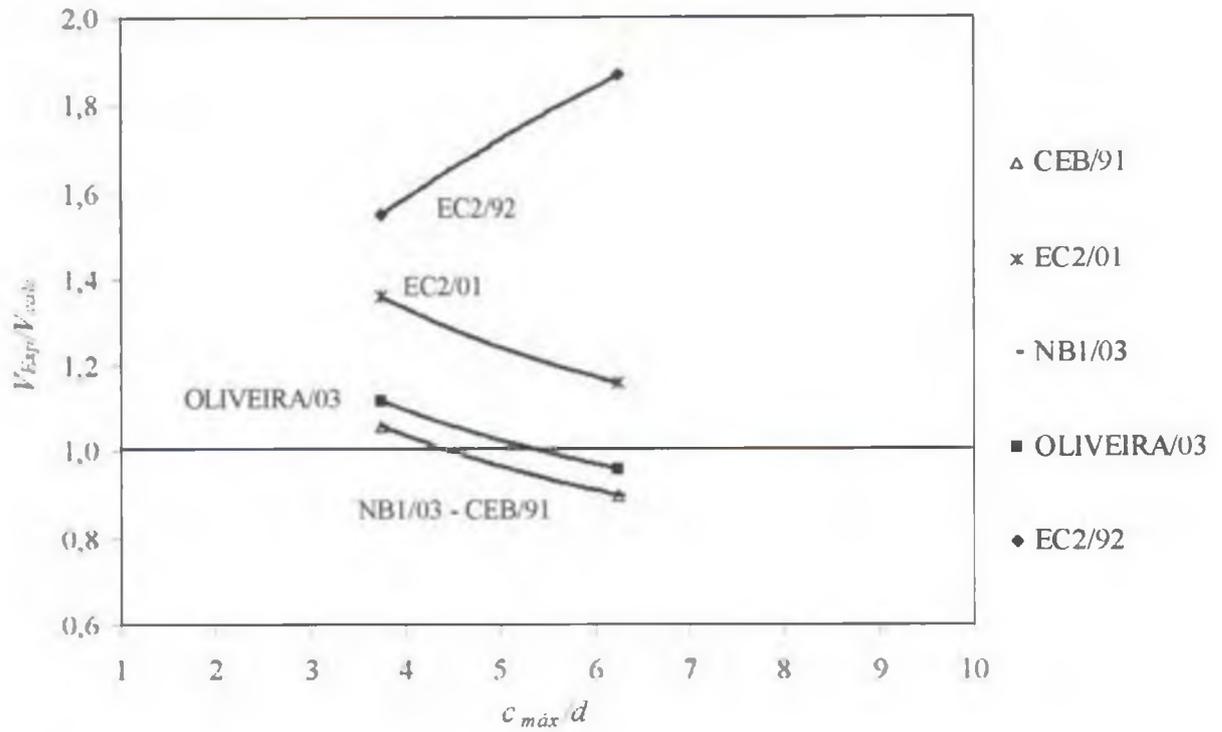


Figura 2.37 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes de AL-YOUSIF & REGAN (2003)

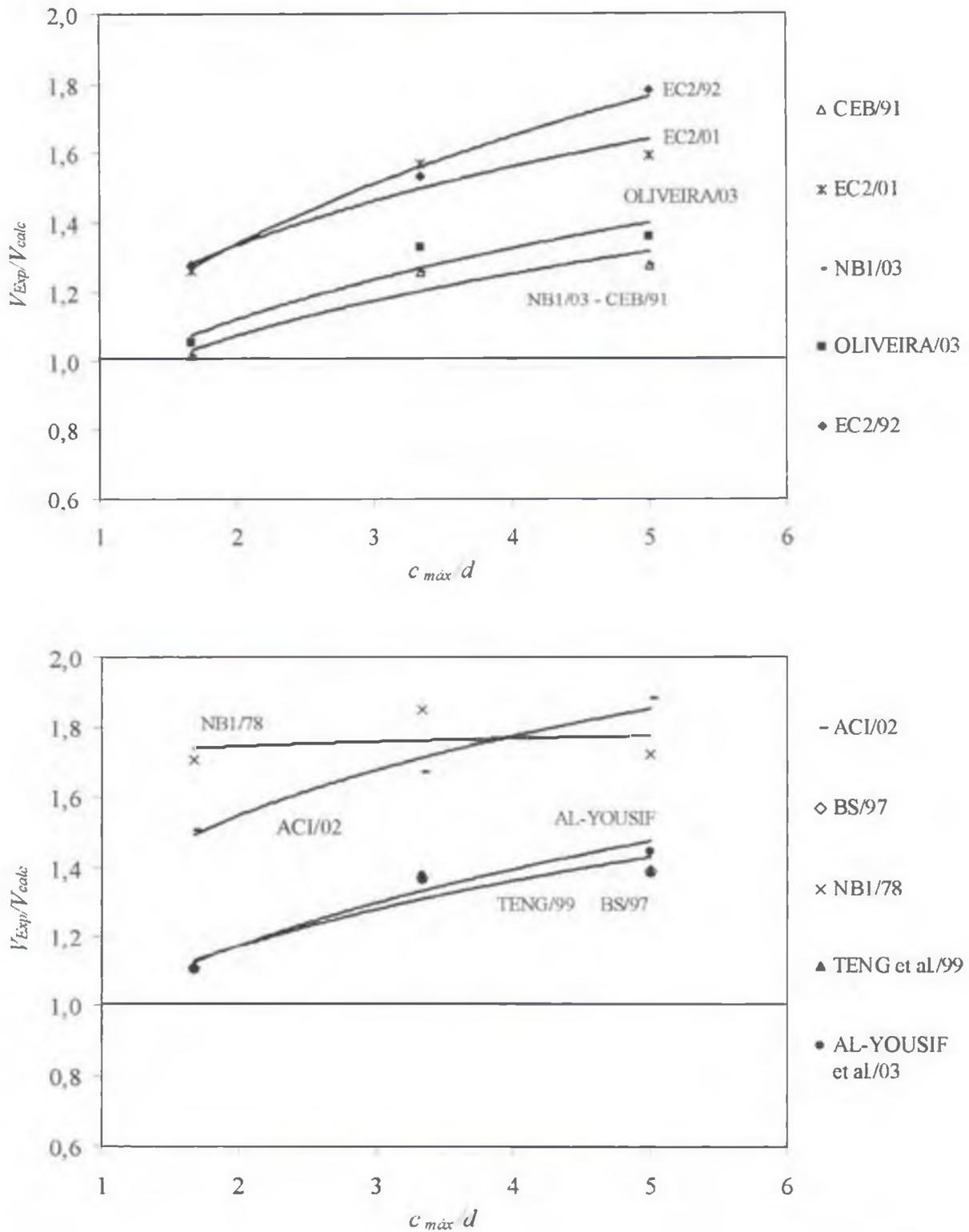


Figura 2.38 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes de SILVA (2003)

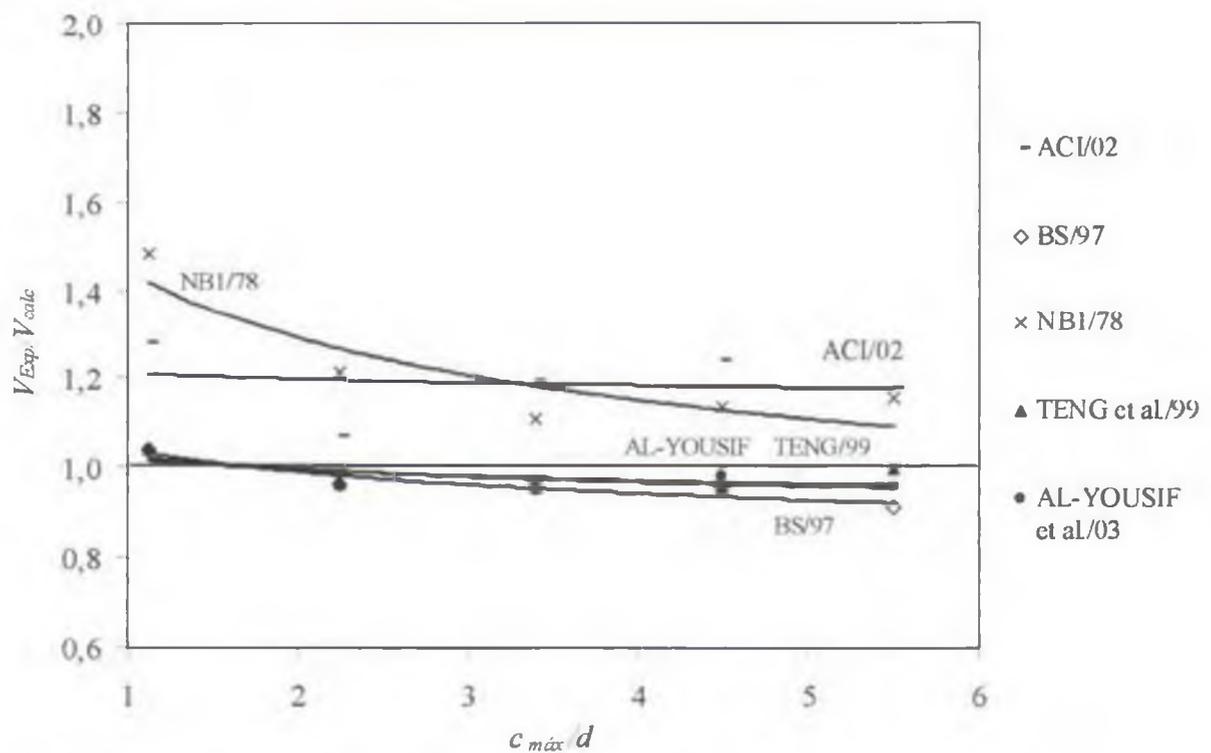
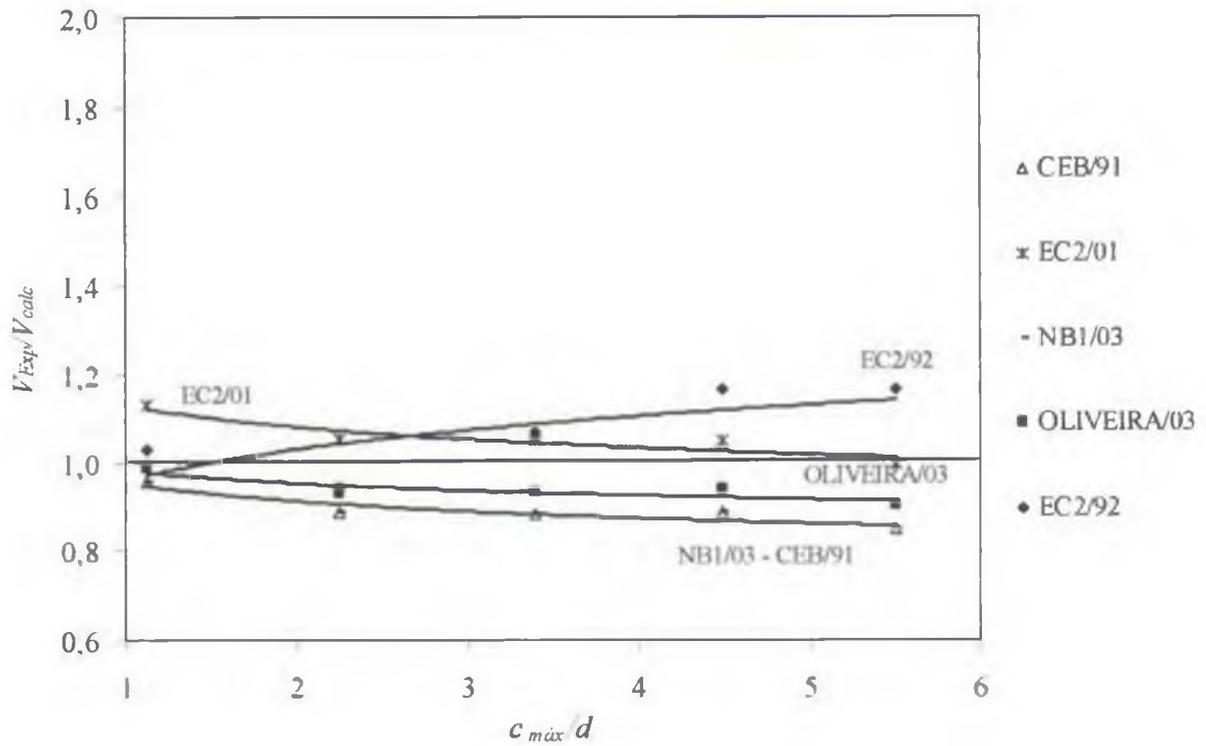


Figura 2.39 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes de OLIVEIRA (2003)

2.3.2.1 – COMENTÁRIOS FINAIS

Apesar de algumas normas e métodos de cálculo levarem em consideração a geometria do pilar no cálculo da resistência à punção de lajes, os resultados estimados por estes, na maioria dos casos analisados, subestimaram a contribuição do perímetro do pilar ou da resistência básica ao cisalhamento nos cálculos, estimando resultados consideravelmente inferiores aos experimentais.

Por outro lado, outros métodos de cálculo, tais como, o CEB-FIP (1991) e NBR-6118 (2003), apesar de não apresentarem prescrições com relação à contribuição da geometria do pilar na resistência à punção, apresentou, para a grande maioria das lajes da literatura, estimativas teóricas contra a segurança.

Dados experimentais adicionais são necessários para o conhecimento do comportamento de lajes sob punção sob influência da variação da seção transversal do pilar. A inclusão do parâmetro $c_{max}d$, que relaciona o comprimento da maior dimensão do pilar com a altura útil da laje, no cálculo da resistência à punção de lajes, têm sua importância, pois, conforme observado nos resultados da literatura, a geometria do pilar (seção quadrada ou retangular) influencia na carga resistente da laje.

2.4 – LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO

2.4.1 – PESQUISAS REALIZADAS

Um dos trabalhos experimentais pioneiros na investigação da influência de furos em lajes de concreto armado sujeitas ao puncionamento foi desenvolvido por MOE (1961). MOE (1961) apud ROLL et al. (1971) desenvolveu uma equação de projeto (Eq. 2.55) para prever a resistência de lajes quadradas monolíticas carregadas através de pilares quadrados.

$$V = \frac{(15bd\sqrt{f'_c})(1-0,0075r/d)}{1+(5,25bd\sqrt{f'_c})/V_{Flex}} \quad (1b) \quad (2.55)$$

onde

V é a carga de ruptura por cisalhamento, em lb;

b é o perímetro efetivo em torno da área carregada, em in;

d é a altura efetiva da laje, em in;

f'_c é a resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos, em psi;

r é o comprimento do lado da área quadrada carregada, em in;

V_{Flex} é a carga correspondente à ruptura por flexão de uma laje monolítica, em lb

O termo V_{Flex} é calculado de acordo com a Eq. 2.56 obtida por ELSTNER & HOGNESTAD (1956) usando a teoria das linhas de escoamento.

$$V_{Flex} = 8m \left(\frac{l}{1-r/a} - 3 + 2\sqrt{2} \right) \quad (\text{N}) \quad (2.56)$$

$$m = \rho f_y d^2 \left(1 - 0,5 \rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (\text{N.mm/mm}) \quad (2.57)$$

onde m é o momento fletor último por unidade de largura da laje monolítica, e a é o comprimento da laje quadrada, em mm.

MOE (1961) apud ROLL et al. (1971) testou 15 (quinze) lajes com furos e observou que a Eq 2.55 previa a carga última de punção da maioria das lajes quase com exatidão, desde que o comprimento do perímetro efetivo b da seção crítica fosse reduzido devido à presença dos furos. Foi com base no extenso trabalho de MOE (1961) que o ACI-ASCE Committee 326 (1962) recomendou um método simplificado para o cálculo de lajes com e sem furos, propondo a Eq. 2.58.

$$V = \frac{1}{3} b d \frac{r+d}{r} \sqrt{f'_c} \quad (\text{N}) \quad (2.58)$$

onde b é o perímetro da área carregada, levando em consideração a presença de furos (caso houver), sendo igual a $4r$ para um pilar quadrado

O mesmo valor de V pode ser obtido pela Eq. 2.59:

$$V = \frac{1}{3} b_0 d \sqrt{f'_c} \quad (\text{N}) \quad (2.59)$$

onde b_0 é o perímetro efetivo de uma seção pseudocrítica a uma distância de $d/2$ a partir do perímetro da área carregada, em mm. Na presença de furos, o perímetro seria reduzido adequadamente.

MOWRER & VANDERBILT (1967) conduziram duas séries de testes em lajes com furos, na maioria dos casos, duplicando os testes de MOE (1961). Uma das séries compreendeu 17 (dezessete) lajes com agregado de peso leve, e 8 (oito) lajes com agregados de peso normal, apoiadas nos quatro bordos.

As lajes com dimensões quadradas de 915 mm de lado e 76 mm de espessura, foram ensaiadas simplesmente apoiadas nos quatro bordos e moldadas monoliticamente com o pilar quadrado de 152 mm de lado, localizado na superfície superior da laje. As principais variáveis dos ensaios desta série foram a forma dos furos, a quantidade de armadura de flexão, e a resistência do concreto.

A Tab.2.11 apresenta as principais características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por MOWRER & VANDERBILT (1967).

Baseando-se em seus ensaios, os autores propuseram uma modificação da expressão de MOE (1961) dada pela Eq. 2.60, que forneceu resultados satisfatórios tanto para concreto de peso leve quanto de peso normal.

$$V = \frac{9,7 (1 + d/r) b d \sqrt{f'_c}}{1 + (5,25 b d \sqrt{f'_c}) / V_{Flex}} \quad (\text{lb}) \quad (2.60)$$

onde o perímetro efetivo b foi definido da mesma forma que na expressão proposta por MOE (1961), e similarmente reduzido na presença de furos

Tabela 2.11 – Características e cargas de ruptura das lajes de MOWRER & VANDERBILT
(1967)

Laje	$c_{min} = c_{máx}$ (mm)	f'_c (MPa)	ρ (%)	Furo		V_{Exp} (kN)
				Forma	Tamanho (mm)	
JN-1-1,7	152	16,5	1,67		13 x 152	83
JN-2-1,7	152	16,0	1,67		13 x 152	86
JN-3-1,7	152	14,6	1,67		38 x 38	106
JN-1-2,2	152	14,0	2,20		13 x 152	77
JN-2-2,2	152	10,4	2,20		13 x 152	73
JN-3-2,2	152	14,6	2,20		38 x 38	113

ROLL, ZAIDI, SABNIS & CHUANG (1971) realizaram uma investigação experimental com 158 (cento e cinquenta e oito) lajes quadradas de concreto armado, monolíticas e com furos, simplesmente apoiadas nos quatro bordos e carregadas através de um pilar quadrado central. O objetivo dos pesquisadores foi propor uma expressão para a previsão da resistência ao cisalhamento de lajes com furos, considerando a influência da resistência à flexão da laje. Para este estudo, foram analisadas combinações de tamanho, forma, número e localização do furo.

As lajes ensaiadas foram divididas em 3 séries (séries A, B e H), utilizando modelos em escala média, ao invés de escala normal de tamanho. Os testes iniciais (série A-1) foram planejados para simular as lajes originais testadas por MOE (1961) e ELSTNER & HOGNESTAD (1956), com um fator de escala de 2.5, porém, com uma variação na taxa de armadura de flexão.

Todos os parâmetros da série A-2 foram os mesmos da série A-1, exceto a altura efetiva, taxa de armadura e relação r/d . As lajes da série B foram praticamente semelhantes às da série A, com exceção da utilização de barras de armadura de diâmetros diferentes. Na série H, houve mudança na taxa de armadura de flexão, em relação às outras séries, e no tamanho dos furos, resultando em modelos que representaram duas vigas se cruzando.

As dimensões dos pilares quadrados foram mantidas constantes e iguais a 102 mm de lado e 152 mm de altura. Todas as lajes ensaiadas apresentaram dimensões constantes e iguais a 737 mm x 737 mm x 61 mm, com variação na altura efetiva (45,7 mm na série A-1, 39,4 mm na série A-2, 45,7 mm nas séries B e H), no diâmetro das barras da armadura de flexão (6,35 mm nas séries A-1 e A-2, 9,52 mm na série B e ambos diâmetros na série H), na taxa de armadura de flexão (1,15% na série A-1, 1,34% na série A-2, 2,53% na série B e 1,15 e 2,53% na série H), e na relação r/d (2,22 para série A-1, 2,58 para série A-2, 2,22 para série B e 2,22 para série H).

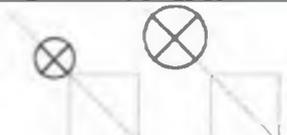
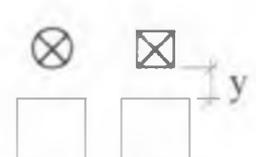
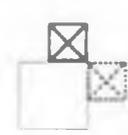
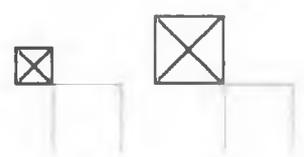
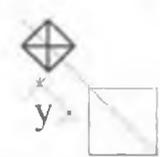
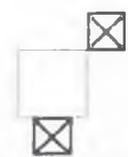
A taxa de armadura de flexão das lajes foi determinada considerando apenas as barras contínuas (12 barras). As Tabs. 2.12 e 2.13 apresentam, respectivamente, os parâmetros dos furos e o 'layout' destes furos nas lajes ensaiadas por ROLL *et al.* (1971).

Tabela 2.12 – Parâmetros dos furos nas lajes ensaiadas por ROLL et al. (1971)

Série	Tipo do furo (Tab.2.13)	Forma do furo	Tamanho (mm)	Nº de furos	Distância do pilar
A	O		Laje sem furo		
	1	S	50,8	1 a 4	variável
		C	50,8		
	2	S	50,8 102,0	1 a 4	0
	3	S	50,8	1 a 4	variável
	4	C	50,8 102,0	1 a 4	0 variável
	5	S	50,8	1 ou 2	0
B	6	L	50,8 x 102,0	1	0
	7	S	50,8	2	0
H	2	S	25,4 76,2 127,0 152,0 318,0	4	0

S – quadrado; C- circular; L – forma de L

Tabela 2.13 – “Layout” dos furos

Tipo	Forma e posição	Tipo	Forma e posição
O	Laje monolítica	4	
1		5	
2		6	
3		7	

De acordo com os pesquisadores, o termo $V_{Flex} / bd\sqrt{f'_c}$, considerado um parâmetro importante no cálculo da resistência ao cisalhamento das lajes, atingiu o valor máximo de 23 para os testes das lajes da série A (séries A-1 e A-2).

Para aumentar o termo citado, uma das formas seria o aumento de V_{flex} através do acréscimo da taxa de armadura de flexão ou da tensão de escoamento do aço. Desta forma, ROLL et al (1971) aumentaram a taxa de armadura de flexão da série A para a série B, sendo que a resistência do aço ao escoamento f_y aumentou em alguns casos. Conseqüentemente, para a série B, o parâmetro $V_{Flex} / bd\sqrt{f'_c}$ atingiu valor máximo de 50, valor este consideravelmente maior que aqueles normalmente encontrados em projeto, segundo os pesquisadores.

A partir de uma análise estatística de todas as 124 lajes das séries A-1 e A-2, os pesquisadores chegaram a uma equação exponencial complexa que pode ser simplificada na forma das Eqs. 2.61 e 2.62.

$$\frac{V}{bd\sqrt{f'_c}} = \frac{14(1 + 0,15r/d - 0,425e/d)}{1 + (10bd\sqrt{f'_c})V_{Flex}} \quad (2.61)$$

$$\frac{V}{V_{Flex}} = \frac{14(1 + 0,15r/d - 0,425e/d)}{V_{Flex} / (bd\sqrt{f'_c}) + 10} \quad (2.62)$$

onde

V_{Flex} é a força nominal resistente para uma ruptura por flexão de uma laje monolítica, em lb

V é a força nominal atuante, em lb

b é o perímetro efetivo em torno da área carregada, em in;

d é a altura efetiva da laje, em in;

f'_c é a resistência à compressão do concreto em corpos de prova cilíndricos, em psi;

r é o comprimento do lado da área quadrada carregada, em in;

e excentricidade do furo em relação ao centro do pilar, em in;

Constatou-se que as Eqs. 2.61 e 2.62 mostraram-se conservadoras para o caso das lajes da série A com quatro furos de canto, fornecendo um coeficiente de correlação de 0,905, contra 0,950 quando estes dados foram eliminados da análise estatística. As Eqs. 2.61 e 2.62 apresentaram bom desempenho na avaliação da resistência a punção das lajes com furos, fornecendo para a relação V_{Exp}/V valores entre 0,82 e 1,09.

Para as lajes da série B, as Eqs. 2.61 e 2.62 previram cargas de ruptura razoáveis com o parâmetro $V_{Flex}/bd\sqrt{f'_c}$ até valores aproximados de 27, mostrando-se levemente conservadora dentro do intervalo entre 28 e 35, e completamente conservadora para $V_{Flex}/bd\sqrt{f'_c}$ entre 46 e 50, nos casos de lajes com quatro grandes furos de canto.

Foram realizados, então, ensaios com a série H com a finalidade de investigar os efeitos do tamanho dos furos quando quatro furos de canto (tipo 2 – Tab.2.13) são usados, pois, os pesquisadores observaram que as equações então propostas com base nos testes da série A se apresentaram conservadoras para os casos de furos quadrados de 102 mm de lado, porém, excelentes para furos de 50,8 mm. A série H também mostrou os efeitos de uma grande redução do perímetro efetivo b resultando em altos valores do parâmetro $V_{Flex}/bd\sqrt{f'_c}$ que teve um valor máximo de 72 para os furos de 152 mm. Alguns ensaios foram realizados com lajes com quatro furos de canto de 318 mm de lado, resultando em modelos caracterizados por duas vigas cruzadas.

Com base em seus resultados experimentais e de MOE (1961), ROLL et al. (1971) propuseram expressões para previsão da resistência à punção das lajes em função de parâmetros importantes, tais como, relação dimensão do pilar/altura efetiva (r/d), relação excentricidade do furo/altura efetiva (e/d), perímetro efetivo b , resistência à compressão do concreto f'_c e carga de ruptura estimada para flexão V_{Flex} . O perímetro efetivo b é o perímetro reduzido em torno do pilar excluindo as partes compreendidas entre projeções radiais do centro do pilar até os furos, e a excentricidade e é a distância entre o centro da área carregada e o centróide da área efetiva bd .

Para as lajes da série H, que foram ensaiadas com o objetivo de investigar o efeito do tamanho do furo, quando quatro furos de canto estão presentes, foram definidos os casos limites: laje

monolítica, para a qual o perímetro efetivo b corresponde ao perímetro do pilar, e, duas vigas cruzadas, para as quais o perímetro efetivo b é assumido como igual a zero, resultando em $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$ tendendo ao infinito. Observou-se que as expressões forneceram resultados satisfatórios para as lajes da série H, para valores de $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$ até 30. Com o aumento de $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$ além de 30, as expressões tenderam a ser mais conservadoras.

Ao analisar a relação V_{Exp} / V , a Eq. 2.61 foi usada para avaliar a carga de ruptura prevista V de lajes com furos de dimensões até 152 mm, e a teoria da flexão foi usada, entretanto, para avaliar V das duas vigas cruzadas (furos de 318 mm de lado). Observou-se que as vigas com barras de diâmetro 6,35 mm romperam por escoamento da armadura na flexão, enquanto que as vigas com barras de diâmetro 9,52 mm romperam por compressão na flexão, tal que a relação V_{Exp} / V_{Flex} de 0,23 para a “laje” com barras de 9,52 mm de diâmetro (série H e $b = 0$) representa o limite inferior da resistência das lajes com furos de canto infinitamente grandes ($b = 0$ e $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c} = \infty$).

A partir das análises anteriores utilizando o parâmetro $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$, entre outros, na determinação da resistência ao cisalhamento, e dentro de um intervalo normal de parâmetros da laje com $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c} < 30$, as Eqs. 2.61 e 2.62 podem ser usadas para previsão aproximada da resistência à punção de lajes com furos.

Para grandes valores para a relação $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$, tal como ocorre quando quatro grandes furos de canto são usados, a expressão se apresenta conservadora. Na Eq. 2.61, se $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$ tende ao infinito, a relação $V_{Exp} / bd \sqrt{f'_c}$ se aproxima do valor limite igual ao numerador, e conseqüentemente V_{Exp} / V_{Flex} se aproxima de zero, conduzindo a uma resistência ao puncionamento igual a zero.

Sabe-se, entretanto, que a “laje” com furos de canto de tamanho infinito teria um valor limite de V_{Exp} / V_{Flex} igual à relação de V_{Exp} das vigas cruzadas com a carga de flexão da laje monolítica V_{Flex} . Esta relação foi encontrada como sendo igual a 0,23 para o caso de ruptura por flexão devido à compressão das vigas da série H. Considerando que os termos e/d e r/d nas Eqs. 2.61 e 2.62 tendem a se anular um com o outro para o intervalo das variáveis

estudadas, e conseqüentemente, causam pouco efeito na resistência à punção das lajes, estes foram negligenciados na proposta de uma nova expressão de cálculo.

A forma final das equações propostas por ROLL *et al.* (1971), dadas pela Eqs. 2.63 e 2.64, contém apenas o parâmetro $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$, e o limite de V_{Exp} / V_{Flex} igual a 0,23, quando $V_{Flex} / bd \sqrt{f'_c}$ se aproximar do infinito.

$$\frac{V}{V_{Flex}} = \frac{6,1}{5,2 + \frac{V_{Flex}}{bd \sqrt{f'_c}}} + 0,23 \quad (2.63)$$

$$\frac{V}{bd \sqrt{f'_c}} = \frac{6,1}{1 + 5,2 \frac{V_{Flex}}{bd \sqrt{f'_c}}} + 0,23 \frac{V_{Flex}}{bd \sqrt{f'_c}} \quad (2.64)$$

GOMES e ANDRADE (1995) analisaram a contribuição da armadura de cisalhamento, na forma de “studs”, na resistência última de 16 (dezesseis) lajes cogumelo de concreto armado com dimensões 3000 mm x 3000 mm x 200 mm, quando furos circulares (com diâmetro variável) estão próximos do pilar (seção quadrada de 200 mm de lado). As principais variáveis dos ensaios foram a presença e tamanho dos furos, e, o detalhamento da armadura de cisalhamento.

A Fig. 2.40 mostra o detalhe dos “studs” utilizados nas lajes de GOMES e ANDRADE (1995), e que, inclusive, foi empregado no presente trabalho, porém, utilizando outras dimensões e espaçamentos. A configuração da disposição dos furos circulares em torno do pilar é apresentada na Fig. 2.41.

As lajes foram divididas em dois grupos: Grupo 1 (L12A (monolítica), L13, L14, L15 e L23 – sem armadura de cisalhamento) e Grupo 2 (L16 (monolítica), L17, L18, L19, L20, L21, L22, L24, L25, L26 e L27 – com armadura de cisalhamento). A Tab. 2.14 apresenta as características das lajes ensaiadas por GOMES e ANDRADE (1995).

Todas as lajes, exceto L12A e L16, tiveram furos posicionados próximo ao pilar central. As lajes L13 ($\phi = 90$ mm), L14 ($\phi = 151$ mm), L17 ($\phi = 90$ mm) e L18 ($\phi = 166$ mm) foram moldadas com apenas um furo cada, enquanto as lajes L15, L19, L21 e L22 tiveram dois furos com diâmetro de 166 mm. As demais lajes tiveram quatro furos, de 166 mm de diâmetro cada um. Nas lajes L26 e L27 foram usados quatro tubos de aço, de 202 mm de diâmetro e 190 mm de altura, dentro da laje e em torno dos furos.

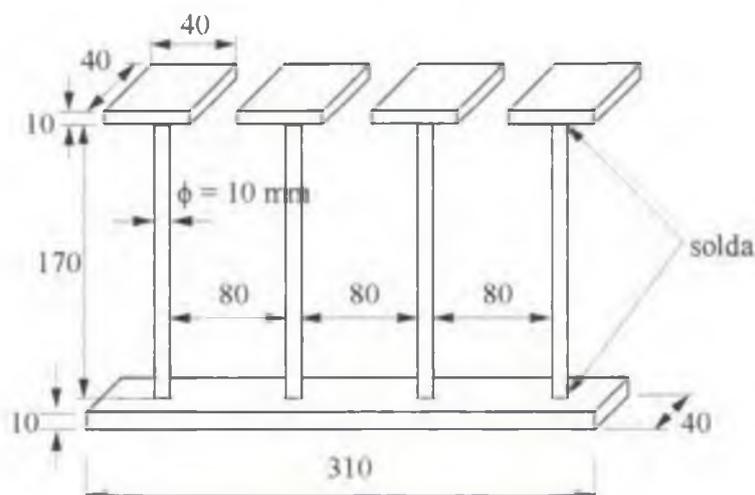


Figura 2.40 – Armadura de cisalhamento utilizada por GOMES e ANDRADE (1995) – em mm

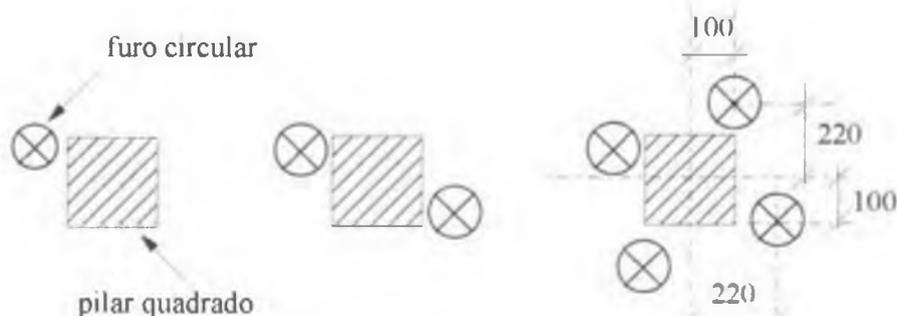


Figura 2.41 – Disposição dos furos em relação ao pilar nas lajes de GOMES & ANDRADE (1995) – unidades em mm

As lajes L16 a L20 e L24 apresentaram oito linhas de “studs” contendo quatro camadas de elementos de armadura de 10 mm de diâmetro, enquanto as lajes L21 e L22 tiveram oito linhas e seis camadas de 8 mm e 6 mm de diâmetro para os “studs”, respectivamente. Nas lajes L25, L26 e L27, a armadura compôs-se de oito linhas de armadura distribuída radialmente a partir do pilar, mas oito linhas radiais intermediárias foram adicionadas a partir da quarta camada.

Tabela 2.14 – Características das lajes ensaiadas por GOMES e ANDRADE (1995)

Laje	Furo		Armadura de cisalhamento					f_c MPa	d (mm)
	Nº	tamanho (mm)	Linha	Camada	s_θ (mm)	s_r (mm)	ϕ (mm)		
L12A	0	-	-	-	-	-	-	36,5	163
L13	1	$\phi = 90$	-	-	-	-	-	31,4	153
L14	1	$\phi = 151$	-	-	-	-	-	31,4	155
L15	2	$\phi = 166$	-	-	-	-	-	27,8	148
L23	4	$\phi = 166$	-	-	-	-	-	36,4	160
L16	-	-	8	4	80	80	10,0	34,6	156
L17	1	$\phi = 90$	8	4	80	80	10,0	34,1	166
L18	1	$\phi = 166$	8	4	80	80	10,0	36,8	165
L19	2	$\phi = 166$	8	4	80	80	10,0	36,6	165
L20	4	$\phi = 166$	8	4	80	80	10,0	33,8	159
L24	4	$\phi = 166$	8	4	40	80	10,0	35,0	161
L25	4	$\phi = 166$	8/8	6/3	80	80	10,0	34,2	160
L26	4	$\phi = 166$	8/8	6/3	80	80	10,0	36,7	169
L27	4	$\phi = 166$	8/8	10/5	80	80	10,0	30,7	169
L21	2	$\phi = 166$	8	6	80	80	8,0	36,3	165
L22	2	$\phi = 166$	8	6	80	80	6,0	34,5	164

A laje L12A sem furos e sem armadura de cisalhamento rompeu por punção com carga de 650 kN, e as lajes L13, L14, L15 e L23, sem armadura de cisalhamento, mas com furos, romperam com, respectivamente, 600 kN, 556 kN, 554 kN e 550 kN, como mostra a Tab.2.15.

As cargas de ruptura das lajes L16 a L19, todas com armadura de cisalhamento e, exceto a laje L16, com um ou dois furos, foram 1140 kN, 1096 kN, 992 kN e 1010 kN, respectivamente. A laje L20, com quatro furos, rompeu sob carga de 780 kN, enquanto as lajes L21 e L22, com dois furos, romperam por punção com cargas iguais a 896 kN e 832 kN, respectivamente. A laje L24, similar à laje L20, mas com um espaçamento menor entre a primeira camada de armadura e a face do pilar, rompeu sob carga de 890 kN. As lajes L25, L26 e L27 romperam com cargas iguais a, respectivamente, 900 kN, 985 kN e 985 kN, sendo que a laje L27 rompeu por flexão.

Tabela 2.15 – Resultados dos ensaios das lajes de GOMES e ANDRADE (1995)

Laje	f_c (MPa)	d (mm)	V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura	Superfície de ruptura
L12A	36,5	163	650	Punção	A partir do pilar
L13	31,4	153	600	"	"
L14	31,4	155	556	"	"
L15	27,8	148	554	"	"
L16	34,6	156	1140	"	Externa à armadura de cisalhamento
L17	34,1	166	1096	"	"
L18	36,8	165	992	"	"
L19	36,6	165	1010	"	"
L20	33,8	159	780	"	Adjacente ao pilar (interna à armadura de cisalhamento)
L21	36,3	165	896	"	Cruzando a armadura de cisalhamento
L22	34,5	164	832	"	"
L23	36,4	160	550	"	A partir do pilar
L24	35,0	161	890	"	Externa à armadura de cisalhamento
L25	34,2	160	900	"	Cruzando a armadura de cisalhamento
L26	36,7	169	985	"	Externa à armadura de cisalhamento
L27	30,7	169	985	Flexão	-

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram que a existência de furos reduziu a resistência à punção de uma laje cogumelo de concreto armado. Entretanto, o uso de armadura de cisalhamento, em laje com furo, permitiu a recuperação de tal perda, e além disto, possibilitou o alcance de resistências à punção mais elevadas quando comparadas com lajes sem furos e sem armadura de cisalhamento.

Observou-se nos resultados que a utilização de armadura de cisalhamento em lajes com furos permitiu a mudança no mecanismo de ruptura das lajes, como foi o caso da L19 e L20. Os autores relataram que, por outro lado, os resultados sugeriram que deve existir um limite de correlação entre a perda de resistência devido à existência de furos e a capacidade para redução da perda de resistência com o uso de armadura de cisalhamento na região em torno do pilar. Duas lajes testadas pelos autores mostraram que pode ser possível aumentar tal limite com o uso de tubos em torno dos furos (Lajes L26 e L27).

A Fig.2.42 apresenta a seção transversal das lajes mostrando a disposição da armadura de cisalhamento e a configuração das superfícies de ruptura das lajes ensaiadas por GOMES & ANDRADE (1995).

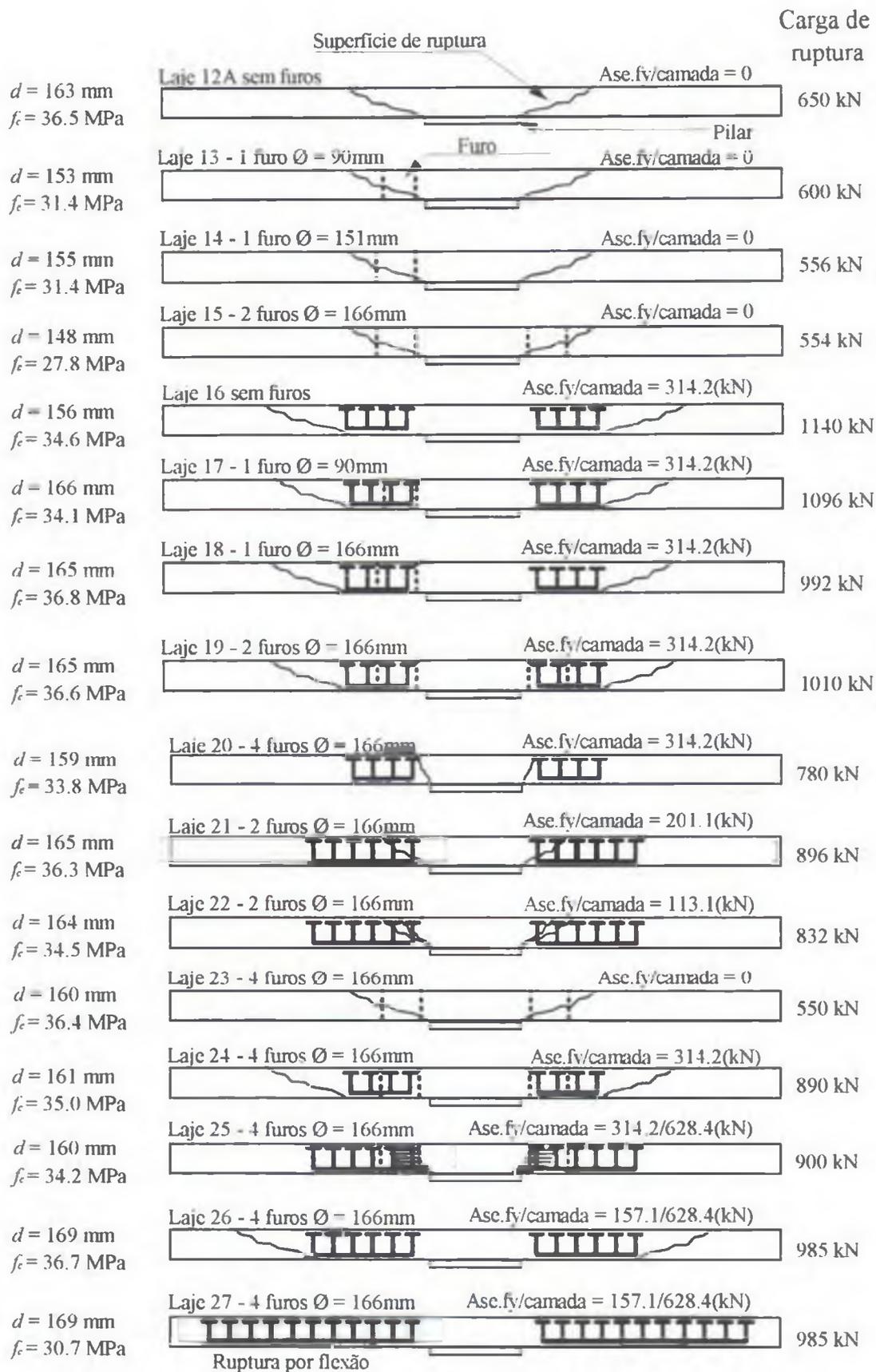


Figura 2.42 – Lajes ensaiadas por GOMES e ANDRADE (1995)

TENG et al. (1999) analisaram a influência de furos adjacentes ao pilar na resistência ao puncionamento de lajes cogumelo de concreto armado. Para isso, além das 5 (cinco) lajes monolíticas mencionadas anteriormente, os autores ensaiaram, adicionalmente, 15 (quinze) lajes quadradas de dimensões 2200 mm x 2200 mm x 150 mm, apoiadas em pilares com relação entre lados iguais a 1, 3 e 5. Foram analisadas diversas posições para os furos (200 mm x 400 mm) e diferentes taxas de carregamento nas direções x e y. A Tab.2.16 apresenta as características de todas as lajes de TENG et al. (1999).

Tabela 2.16 – Características das lajes ensaiadas por TENG et al. (1999)

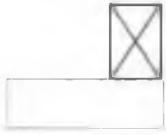
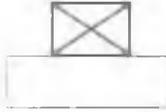
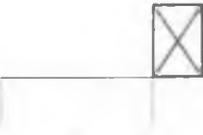
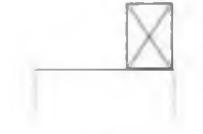
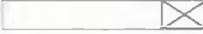
Laje	Pilar		Concreto f'_c (MPa)	Posição do furo	Armadura de flexão		V_{Exp} (kN)
	c_{min} (mm)	c_{max} (mm)			d (mm)	ρ (%)	
OC11	200	200	36,0	-	105	1,81	423
OC11H30	200	200	33,9		108	1,70	349
OC11V23	200	200	34,1		109	1,69	373
OC11V20	200	200	38,6		105	1,74	207
OC13	200	600	35,8	-	107	1,71	568
OC13H50	200	600	36,3		110	1,67	443
OC13V43	200	600	36,6		114	1,61	467
OC13V23	200	600	36,9		108	1,70	484
OC13V40	200	600	43,0		109	1,69	340
OC13H02	200	600	43,1		112	1,64	512

Tabela 2.16 – Características das lajes ensaiadas por TENG et al. (1999) (continuação)

Laje	Pilar		Concreto f'_c (MPa)	Posição do furo	Armadura de flexão		V_{Exp} (kN)
	c_{min}	c_{max}			d	ρ	
	(mm)	(mm)	(mm)		(%)		
OC13- $\alpha=1,6$	200	600	33,0	-	110	1,67	508
OC13H50- $\alpha=1,6$	200	600	33,1		115	1,60	428
OC13V43- $\alpha=1,6$	200	600	33,2		111	1,65	383
OC13H02- $\alpha=1,6$	200	600	37,5		114	1,61	420
OC13- $\beta=0,63$	200	600	39,7	-	111	1,65	455
OC13H50- $\beta=0,63$	200	600	39,8		110	1,67	511
OC13V23- $\beta=0,63$	200	600	35,7		110	1,67	488
OC15	200	1000	40,2	-	103	1,76	649
OC15H70	200	1000	37,9		108	1,67	529
OC15V43	200	1000	36,0		109	1,66	612

As lajes testadas tiveram ruptura frágil e repentina por punção, e, as lajes sem furos apresentaram as maiores cargas de ruptura, em relação às outras lajes de sua série.

Como mencionado anteriormente, no item “PILARES RETANGULARES”, os autores constataram que grande parte da tensão de cisalhamento está concentrada nas extremidades do pilar retangular, sugerindo que a resistência à punção da laje é determinada pela resistência da laje em torno da região extrema do pilar retangular. Tal fato pode ser constatado através das cargas de ruptura das lajes OC11V20 e OC13V40, com o furo

localizado na região extrema do pilar, que tiveram as menores cargas de ruptura por punção correspondentes a 207 kN e 340 kN, respectivamente.

A presença de furos adjacentes ao pilar provocou redução da resistência última de, no mínimo, 6%, no caso das lajes com pilar de seção 200 mm x 1000 mm, e de, no máximo, 51%, no caso das lajes com pilar de menor seção transversal.

Para lajes com furos, os pesquisadores propuseram algumas mudanças na BS8110 (1985) com relação ao perímetro crítico. Na presença de furos, as linhas radiais se originam do centro da parte extrema da área carregada ou pilar, e não do centro da área carregada, como recomendado pelo ACI (1995) e BS8110 (1985). Quando o furo estiver localizado a uma distância menor que $6d$ a partir do pilar, o trecho do perímetro, compreendido pelas linhas radiais que partem da parte extrema do pilar até o furo, é considerada inefetiva, como pode ser visto na Fig. 2.43.

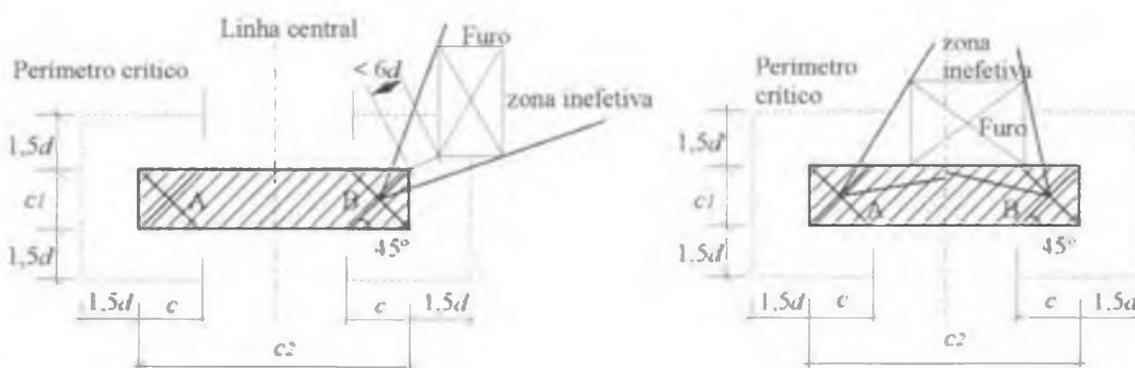


Figura 2.43– Perímetro crítico efetivo recomendado por TENG et al. (1999) para lajes com furos

Uma análise, em separado, dos resultados experimentais das 20 (vinte) lajes, e também, juntamente com outras 114 (cento e quatorze) lajes ensaiadas por MOE (1961) e ROLL et al. (1971), mediante a comparação com os resultados obtidos das normas, é mostrada na Tab.2.17. São comparados os resultados médios das relações V_{calc} / V_{Exp} , desvio padrão e coeficiente de variação.

Observa-se na Tab.2.17 que o cálculo do perímetro crítico de uma laje com pilar retangular e furos, segundo ACI (1995) e EUROCODE 2 (1992), com as linhas radiais partindo do centro do pilar não fornece resultados satisfatórios. A utilização do perímetro crítico calculado de acordo com as recomendações sugeridas pelos pesquisadores, como uma extensão para a BS8110 (1985), fornece resultados mais satisfatórios.

Os coeficientes estudados, considerando o total de 134 lajes, apresentaram valores menos satisfatórios que os obtidos da análise feita para as 20 lajes apenas. Isto mostra que a aplicação das recomendações normativas para lajes com pilares retangulares e furos, propostas pelas normas de projeto comentados, não se mostra eficaz nas lajes com furos e pilares quadrados, especialmente as normas do ACI (1995) e do EUROCODE 2 (1992).

TENG et al. (1999) apresentaram as recomendações das normas do ACI 318 (1995), BS8110 (1985) e EUROCODE 2 (1992) para o cálculo de lajes cogumelo sem armadura de cisalhamento. Na presença de furos nas lajes, o BS8110 (1985) e o EUROCODE 2 (1992) negligenciam o efeito do furo se ele estiver localizado além da distância de $6d$ a partir do pilar, enquanto que o ACI (1995) despreza o efeito do furo se estiver situado além de $10h$ a partir do pilar.

Tabela 2.17 – Comparação entre as recomendações propostas por TENG et al. (1999) e algumas normas de projeto

Método	Coeficiente	20 lajes BCA-NTU	134 lajes
BS8110 (1985) com recomendações dos pesquisadores	V_{calc} / V_{Exp}	0,891	0,881
	Desvio padrão	0,114	0,192
	Coeficiente de variação	0,128	0,218
ACI (1995)	V_{calc} / V_{Exp}	0,685	0,622
	Desvio padrão	0,111	0,181
	Coeficiente de variação	0,162	0,291
EUROCODE 2 (1992)	V_{calc} / V_{Exp}	0,697	0,616
	Desvio padrão	0,112	0,164
	Coeficiente de variação	0,161	0,266

EL-SALAKAWY et al. (1999) investigaram o efeito de furos no comportamento ao funcionamento de ligações laje-pilar de borda de lajes cogumelo de concreto armado, através de testes em 6 (seis) lajes retangulares de dimensões 1540 mm x 1020 mm x 120 mm, apoiadas em pilares quadrados com lados iguais a 250 mm e comprimento total de 1520 mm, das quais apenas uma laje não possuiu furo.

Os principais parâmetros estudados foram a localização e o tamanho do furo (250 mm x 250 mm e 150 mm x 150 mm). A Fig. 2.44 apresenta os modelos das lajes e a Tab.2.18 apresenta as características principais e os resultados de cargas de ruptura experimentais e estimadas pela norma do ACI 318 (1995).

Devido à existência de furo adjacente ao pilar, a quantidade de armadura de flexão equivalente àquela interrompida pelo mesmo foi adicionada nos lados do furo, com base nas prescrições do ACI (1995), como mostra a Fig. 2.45.

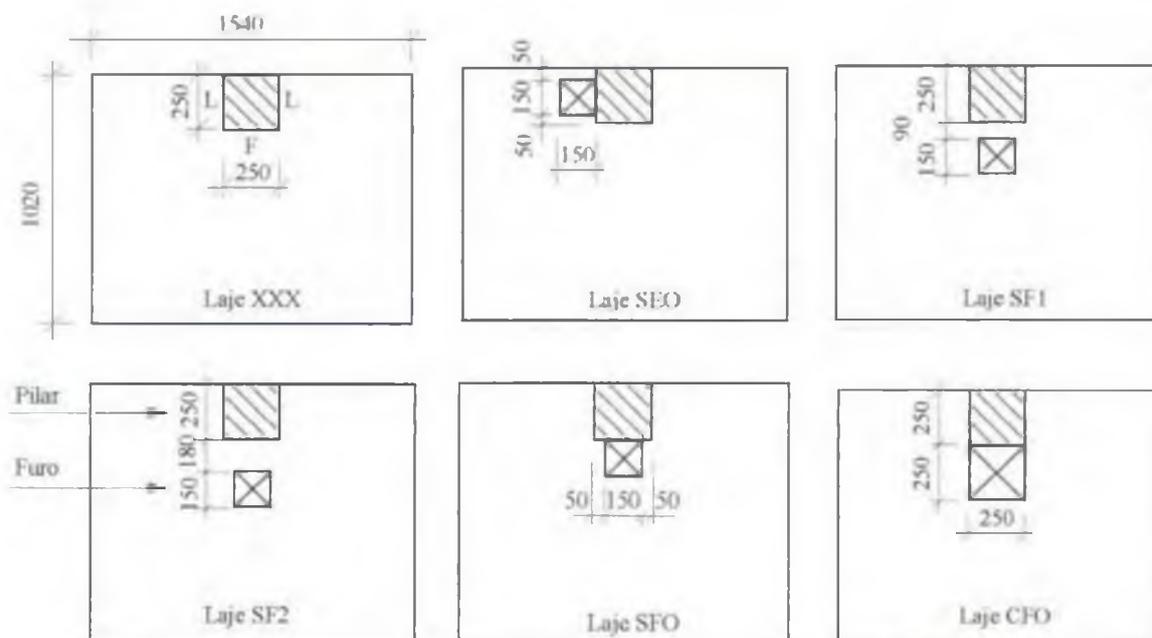


Figura 2.44 – Lajes ensaiadas por EL-SALAKAWY et al. (1999) – unidades em mm

Tabela 2.18 – Características principais e resultados das lajes ensaiadas por EL-SALAKAWY et al. (1999)

Laje	d (mm)	f_c (MPa)	Furo (mm)			V_{Exp} (kN)	V_{ACI} (kN)	V_{Exp}/V_{ACI}	Superfície de ruptura
			$c_{min} = c_{max}$	Lf*	Df*				
XXX	90	33,0	150	-	-	125	90	1,39	A partir do pilar
SEO	90	31,5	150	L	0	120	75	1,60	"
SFO	90	32,5	150	F	0	110	55	2,00	"
SFO	90	33,0	150	F	90	115	72	1,60	"
SFO	90	30,0	150	F	180	114	73	1,56	"
CFO	90	30,5	250	F	0	87	36	2,42	"

Lf* - Localização do furo em relação ao pilar, como mostra a Fig. 2.44

F - em frente ao pilar

L - ao lado do pilar

Df* - Distância do furo em relação ao pilar (face a face)

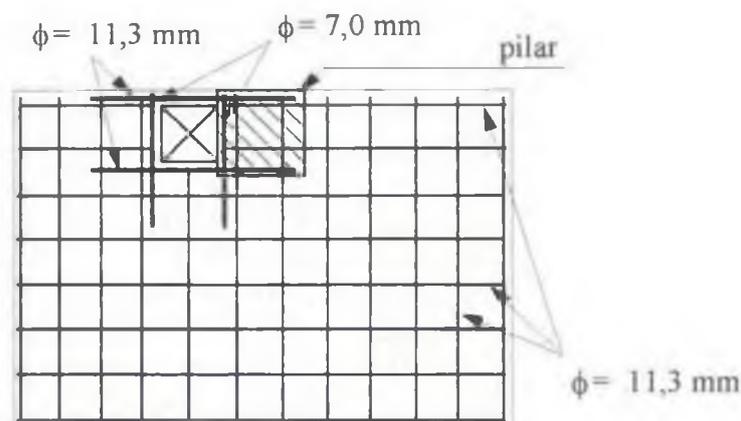


Figura 2.45 – Detalhamento da armadura principal de flexão da laje SEO testada por EL-SALAKAWY et al. (1999)

A laje CFO, com o furo de dimensões 250 mm x 250 mm e adjacente ao pilar, apresentou os deslocamentos verticais superiores em até 143% àquelas da laje XXX, sem furo, para níveis de carga correspondentes, enquanto que os deslocamentos máximos das lajes com furos de dimensões 150 mm x 150 mm foram superiores em até 32% àquelas medidas na laje XXX. Isto mostra que a redução da rigidez da laje devido à presença de furos foi mais significativa na laje com furo de maior dimensão.

O tamanho do furo também influenciou a resistência da laje, pois, a resistência última daquela com furo de maior dimensão, sofreu redução de 30% em relação à da laje sem furo, enquanto que, a redução na resistência da laje com furo de menor dimensão, foi de até 12%.

Observou-se também, que a distância entre a face do pilar e o furo influenciou a capacidade das ligações entre laje e pilar, pois nas lajes que tiveram os furos posicionados a uma distância igual a d e $2d$ (d é a altura útil da laje) da face do pilar, a resistência à punção diminuiu, em média, 8,5%, em relação à laje sem furo, enquanto que na laje com o furo adjacente ao pilar, a redução da resistência foi de 12%.

Conforme constatado pelos pesquisadores, para as lajes retangulares com furos localizados na vizinhança do pilar de borda, a norma do ACI 318 (1995) forneceu valores conservadores para a resistência da ligação laje-pilar de borda, especialmente para aquelas com furos de dimensões 250 mm x 250 mm.

REGAN (1999) realizou testes em 8 (oito) lajes cogumelo de concreto armado, com furos e armadura de cisalhamento, apoiadas em pilares retangulares. O objetivo do estudo foi analisar o efeito de furos adjacentes a pilares na resistência última dessas lajes e a minimização da perda de resistência devido ao uso da armadura de punção.

Como mencionado pelo autor, as normas de projeto que tratam o assunto de punção, não apresentam recomendações específicas quando se utiliza armadura de cisalhamento em lajes com furos, embora recomendem uma armadura mínima quando esses estão presentes. Adicionalmente, certas normas de projeto consideram de formas diferentes a redução do perímetro de controle do pilar devido aos furos no cálculo da resistência à punção.

Conforme comentado pelo autor, as sugestões propostas pela norma BS8110 (1985), para o cálculo do perímetro efetivo de controle de lajes com furos adjacentes ao pilares, se apresentam conservadoras e até mesmo incoerentes, pois, prevêem que um furo adjacente ao lado menor de um pilar retangular é menos prejudicial que ao lado maior, ao contrário do que mostram análises elásticas utilizando o “Método dos Elementos Finitos” apresentadas por alguns pesquisadores. Além disso, a norma ignora uma eventual excentricidade do perímetro reduzido, e prevê que a armadura de punção colocada nos locais indicados na Fig.2.46 é inefetiva.

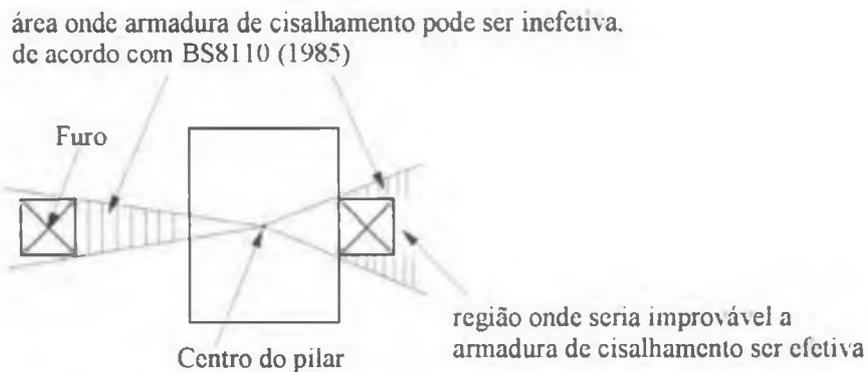


Figura 2.46 – Locais onde armadura de punção é inefetiva, segundo a BS8110 (1985)

Como proposta para o cálculo do perímetro efetivo de controle de lajes com furos e sujeitas à punção, para o Handbook to BS8110/85 (1987), REGAN (1974) propôs um método de cálculo para estimar a influência do furo na resistência da laje. Este método consiste em deduzir do perímetro crítico total o trecho compreendido entre linhas paralelas que tangenciam os vértices do furo (Fig.2.47), ao contrário do método da BS8110/85, onde as linhas são projeções radiais.

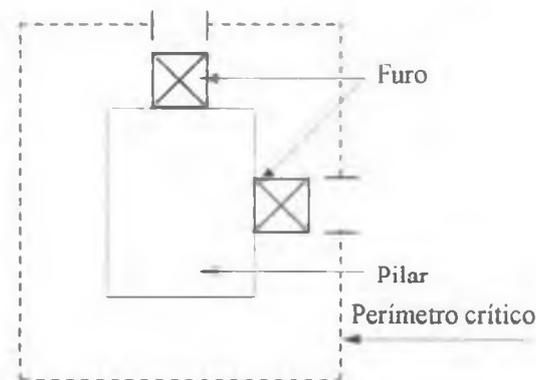


Figura 2.47 – Perímetro de controle proposto por REGAN (1974) para o Handbook to BS8110/85 (1987)

As oito lajes testadas por REGAN (1999) foram projetadas para avaliar as prescrições da norma BS8110 (1985) e do Handbook to BS8110 (1987) no tratamento de furos e para explorar o uso de armadura de cisalhamento, destinada a diminuir a perda de resistência resultante dos furos.

As lajes com dimensões 2000 mm x 2000 mm x 160 mm se apoiaram centralmente em pilares de 150 mm x 250 mm e foram submetidas a oito pontos de carga iguais, como pode ser visto na Fig 2.48. A Tab.2.19 apresenta as características básicas, as cargas e modos de ruptura, bem como a posição dos furos em relação ao pilar, das lajes ensaiadas por REGAN (1999). A Fig. 2.49 apresenta a distribuição da armadura de cisalhamento das lajes de REGAN (1999).

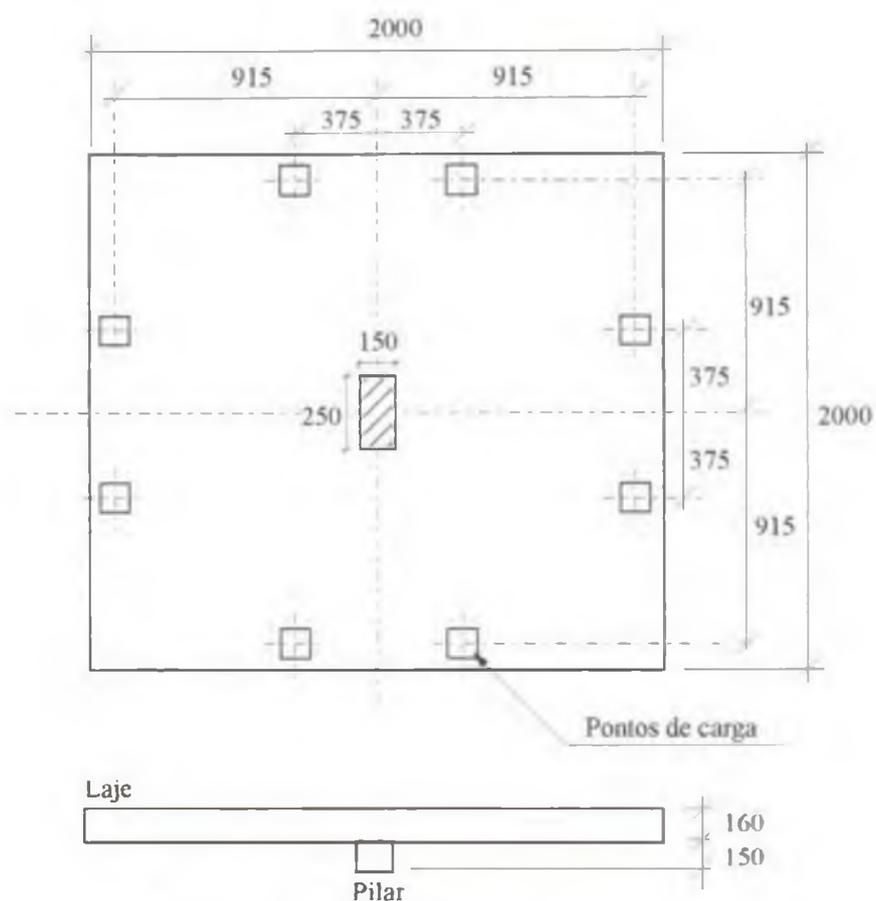
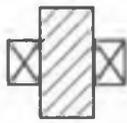
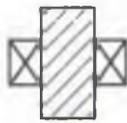
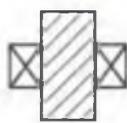
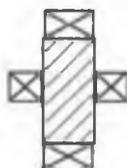
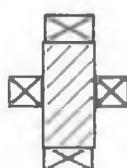
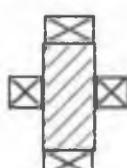


Figura 2.48 – Lajes ensaiadas por REGAN (1999) – unidades em mm

A laje 1, sem furos, e a laje 2, com furos nos dois lados do pilar, não tiveram armadura de cisalhamento. As lajes 3 e 4, semelhantes às lajes 1 e 2, respectivamente, em termos de furos, tiveram armadura de cisalhamento mínima calculada conforme as exigências do BS8110 (1985). Essa armadura foi colocada em duas camadas em torno do pilar, com o detalhamento levemente modificado para se adequar aos furos.

Tabela 2.19 – Características, cargas e modos de ruptura das lajes de REGAN (1999)

Laje	Furos		Armadura de cisalhamento		V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura	Superfície de ruptura
	Posição	Tamanho (mm)	Tipo	$\sum A_{sv} f_y senna$ (kN)			
1	-	-	-	-	456	Punção	A partir do pilar
2		100 x 150	-	-	396	*	*
3	-	-	Tiras de perfil I	201	516	*	Cruzando a armadura de cisalhamento
4		100 x 150	Tiras de perfil I	201 ⁽¹⁾	476	*	*
5		100 x 150	Tiras de perfil I	80	496	*	*
6		100 x 100 100 x 150	-	-	296	*	A partir do pilar
7		100 x 100 100 x 150	-	-	296	*	*
8		100 x 100 100 x 150	Barra dobrada	-	336	*	Cruzando a armadura de cisalhamento

⁽¹⁾ excluindo os dois elementos imediatamente externos aos furos; $d=124$ mm e $\rho=1,30\%$

A laje 5 teve a disposição dos furos semelhante à da laje 4, porém, apresentou a armadura de cisalhamento apenas adjacente aos furos e com uma resistência ao escoamento suficiente para suprir a perda de resistência ao cisalhamento fornecida pelo concreto devido aos furos.

A laje 6, com quatro furos adjacentes ao pilar, não possuiu armadura de cisalhamento. As lajes 7 e 8, também com quatro furos, tiveram a armadura de cisalhamento constituída de barras dobradas posicionadas em baixo e em cima do pilar, respectivamente, e colocadas ao lado dos furos e adjacentes às maiores faces do pilar.

Na laje 7, pretendeu-se confeccionar a armadura de cisalhamento da atual laje 8, porém foi moldada com as barras dobradas colocadas em posição invertida. Desta forma, o autor tratou a laje 7 como se não tivesse armadura de cisalhamento.

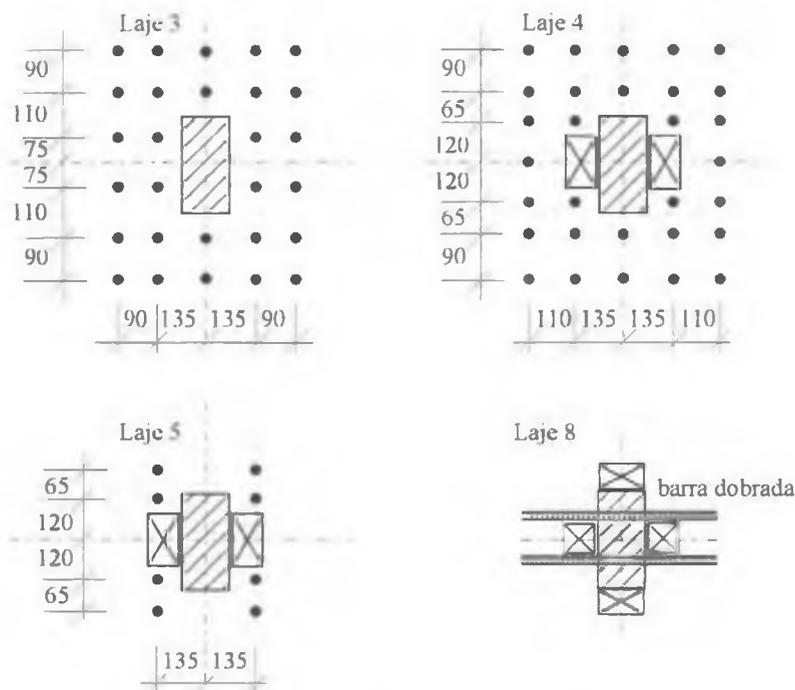


Figura 2.49 – Distribuição da armadura de cisalhamento utilizada por REGAN (1999) – em mm

A armadura de flexão negativa utilizada nas lajes de REGAN (1999) consistiu de barras de 16 mm a cada 120 mm, dispostas na direção paralela ao lado maior do pilar, e de barras de 16 mm a cada 130 mm, na outra direção, de forma que as armaduras tivessem resistências à flexão iguais. Nas extremidades das barras foram adicionadas barras em “U” de 12 mm para fornecer a ancoragem necessária. A armadura de flexão positiva foi constituída de barras de 8

mm espaçadas igualmente à armadura de flexão negativa. A Fig.2.50 mostra o detalhamento da armadura negativa de flexão utilizada pelo autor.

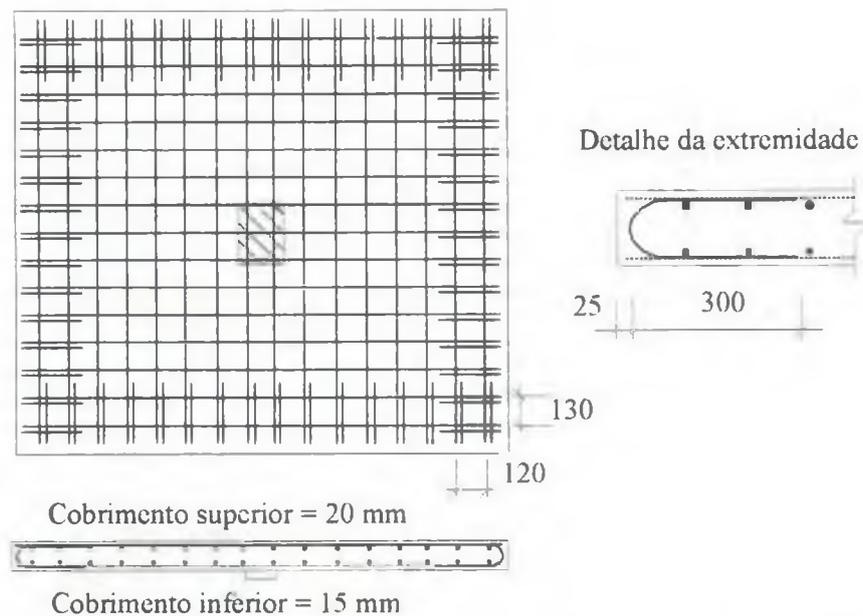


Figura 2.50 – Detalhamento da armadura negativa de flexão utilizada por REGAN (1999) – unidades em mm

Todas as lajes romperam por punção. Os resultados dos testes de REGAN (1999) mostraram que o tratamento dado pelo BS8110 (1985) para a presença de furos na resistência à punção foi bastante conservador, enquanto que a proposta recomendada pelo Handbook to BS8110/85 (1987) forneceu bons resultados.

A armadura de cisalhamento local, colocada nos lados dos furos, pode ser altamente efetiva no restabelecimento da resistência perdida devido ao furo e, que, para furos com largura total igual a $3/8$ do perímetro do pilar, a armadura de cisalhamento local somada à armadura mínima prescrita pela norma, resultou em resistências levemente acima daquelas de uma laje sem furo e sem armadura de cisalhamento.

Em geral, a armadura de cisalhamento foi mais efetiva quando colocada próxima ao furo. O uso de barras dobradas como armadura de cisalhamento aumentou a resistência da laje com furo, o qual removeu $5/8$ da interface laje-pilar, e para o caso onde a resistência foi governada

pelas condições locais na face do pilar. O autor sugere que o limite superior para a resistência à punção poderia ser modificado para permitir um aumento quando uma parte da carga é transmitida diretamente ao pilar através da barra inclinada.

IOANNOU (2001) ensaiou 5 (cinco) lajes circulares de 2000 mm de diâmetro (vão efetivo de 1700 mm) e 170 mm de espessura ($d = 134$ mm), resistência à compressão entre 40 e 60 MPa, apoiadas em pilares quadrados de 200 mm de lado.

As variáveis estudadas foram o tamanho e posicionamento dos furos e o detalhamento da armadura de cisalhamento (Tab.2.20 e Fig. 2.51). As lajes foram apoiadas centralmente no pilar e submetidas a carregamento através de oito pontos próximos às bordas da laje.

A armadura de cisalhamento foi constituída por “shearbands” de 25,4 mm de largura e 1,2 mm de espessura ($f_{ys} = 550$ MPa e $f_{us} = 600$ MPa). Um detalhe típico da armadura de cisalhamento utilizada é apresentado na Fig. 2.52.

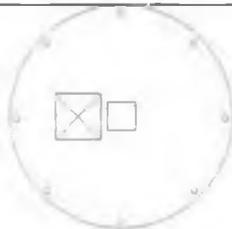
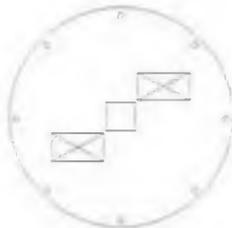
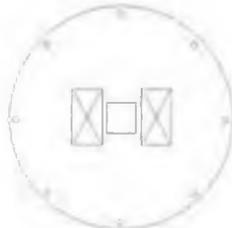
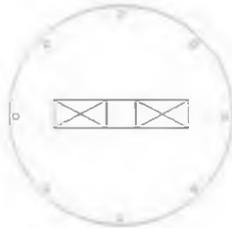
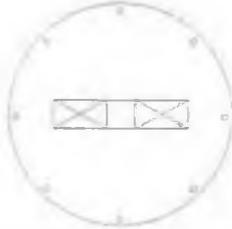
Observa-se na Tab. 2.20 que a laje PSSCH1, com um modelo de furo altamente excêntrico, apresentou a maior carga de ruptura, e, fazendo uma ponderação na resistência do concreto entre as lajes PSSCH4a e PSSCH4b, a armadura de cisalhamento da laje PSSCH4a produziu um aumento na resistência à punção de aproximadamente 22%, quando comparada com a laje PSSCH4b, que não teve armadura de cisalhamento.

IOANNOU (2001) analisou os resultados experimentais baseando-se nas prescrições da norma do CEB-FIP MC90 (1991) para lajes com armadura de cisalhamento, mas usando uma aproximação diferente da norma com relação à presença de furos. Entretanto, a autora utiliza na expressão da norma a quantidade de armadura de cisalhamento dentro do espaçamento de $1,5d$ da face do pilar com números desiguais de elementos em sucessivas camadas, ao invés de utilizar a quantidade de armadura recomendada pelo CEB-FIP MC90 (1991) ($1,5 \frac{d}{s_r} A_{sw}$).

Outro procedimento utilizado por IOANNOU (2001) foi utilização de perímetro crítico efetivo (u_l) devido à presença de furo. Para furos dispostos simetricamente em relação ao pilar, o perímetro foi determinado de acordo com o Handbook to BS8110 (1987), com exceção daquela laje onde o furo percorre todo o lado do pilar, sendo que neste caso, uma

dedução do perímetro foi feita com trechos compreendidos dentro de um ângulo de 22,5 graus (Fig 2.53).

Tabela 2.20 – Características, cargas e modos de ruptura das lajes de IOANNOU (2001)

Laje	A/C	f'_c (MPa)	Furos		V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura
			Dimensões (mm x mm)	Detalhe		
PSSCH1	Sim	48,0	400 x 400		492	Punção após esmagamento do concreto em torno do pilar
PSSCH2	Sim	39,2	200 x 400		433	Flexo- puncionamento
PSSCH3	Sim	41,6	200 x 400		386	Punção (cruzando a armadura de cisalhamento)
PSSCH4a	Sim	41,6	200 x 400		415	Punção após esmagamento do concreto em torno do pilar
PSSCH4b	Não	32,8	200 x 400		313	Punção (cruzando a armadura de cisalhamento)

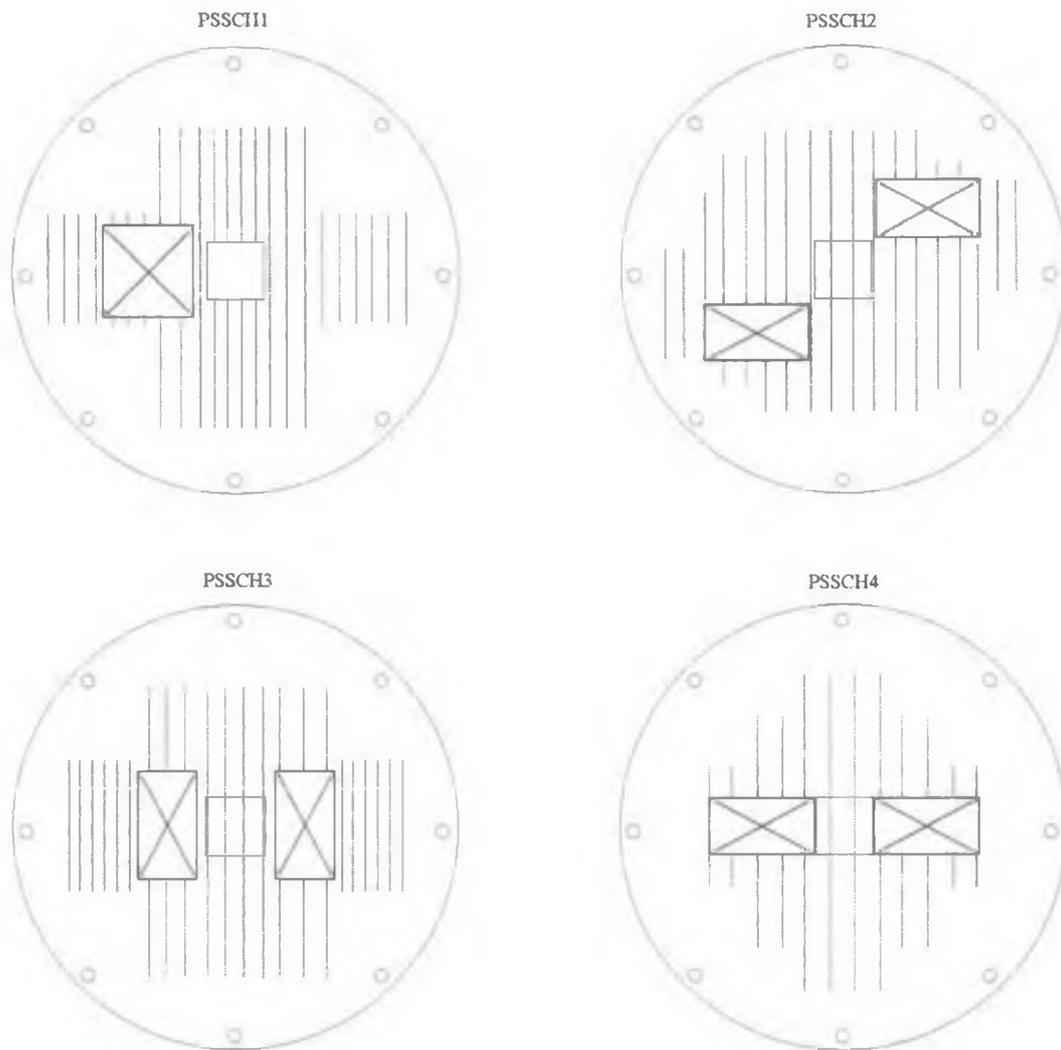


Figura 2.51 – Distribuição da armadura de cisalhamento utilizada por IOANNOU (2001)

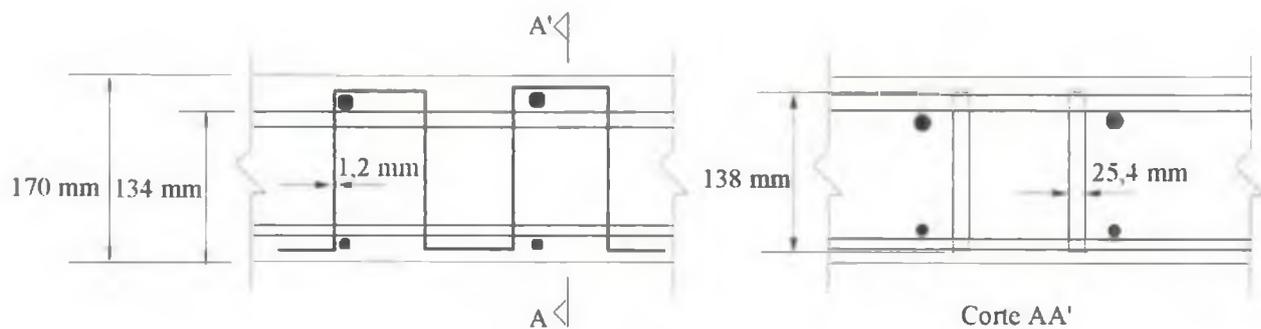


Figura 2.52 – Detalhe dos “shearbands” utilizados por IOANNOU (2001)

Para a laje PSSCH1, foram utilizadas duas aproximações para o cálculo do perímetro crítico. Uma delas é levar em conta a excentricidade do furo com a redução do perímetro, considerando o furo real e um furo fictício, restabelecendo a simetria, como mostra a Fig. 2.54. A outra aproximação é considerar o pilar como sendo de borda, como mostra a Fig. 2.55.

A Tab. 2.21 apresenta os resultados dos cálculos segundo o CEB-FIP MC90 (1991), e uma comparação entre as cargas experimentais e teóricas.

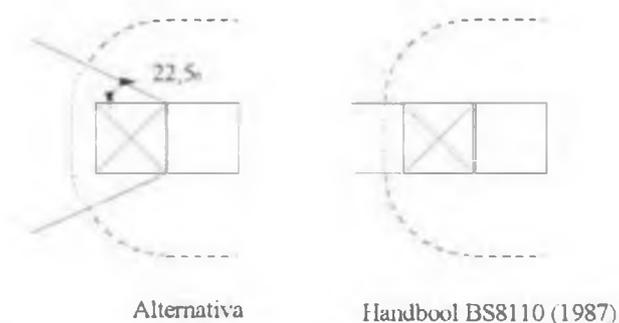


Figura 2.53 – Tratamento alternativo de furos proposto por IOANNOU (2001)

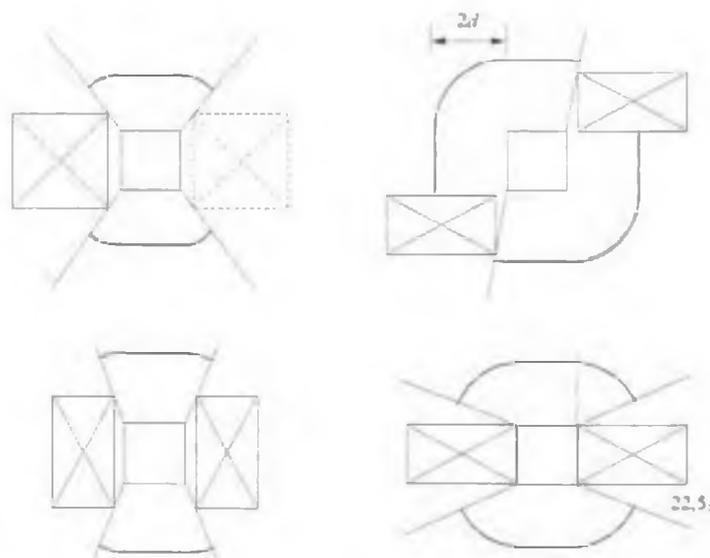


Figura 2.54 – Perímetros de controle para as lajes ensaiadas por IOANNOU (2001)



Figura 2.55 – Tratamento da laje PSSCH1 como laje com pilar de borda

Tabela 2.21 – Comparação entre cargas experimentais e teóricas das lajes de IOANNOU (2001)

Laje	n	V_c (kN)	V_s (kN)	V_{c+s} (kN)	V_{Exp} (kN)	V_{Exp}/V_{c+s} (kN)	Obs.
PSSCH1	22	158	231	350	492	1,41	Fig. 2.54
	26	229	273	445	492	1,11	Fig. 2.55
PSSCH2	26	289	273	490	433	0,88	
PSSCH3	20	151	210	323	386	1,20	
PSSCH4a	20	281	210	421	415	0,99	
PSSCH4b	-	259	-	259	313	1,21	

n – número de elementos efetivos da armadura de cisalhamento (10,5 kN, cada um)

Com relação à laje PSSCH1, o tratamento como pilar de borda (Fig.2.55) é claramente preferível em relação à adição de um furo fictício para restabelecer a simetria, embora a aproximação do furo fictício forneça bons resultados para furos menores.

As previsões para as lajes PSSCH3, PSSCH4a e PSSCH4b são razoavelmente boas considerando as dificuldades em estimar o total de armadura que contribui para ΣA_{se} (área da armadura de cisalhamento), o que não ocorreria se a armadura de cisalhamento estivesse melhor posicionada. A resistência à punção calculada para a laje PSSCH2 foi superestimada pelo CEB-FIP (1991), mas isto pode ser calculado bem pela teoria das linhas de escoamento.

SILVA (2003), além de analisar a influência da relação c_{max}/c_{min} do pilar na resistência das lajes, investigou o comportamento de lajes cogumelo de concreto armado sob influência da presença de furos quadrados (150 mm x 150 mm) e de armadura de cisalhamento. Foram

ensaiadas até a ruptura 8 (oito) lajes quadradas de 1800 mm de lado e 130 mm de espessura ($d = 90\text{mm}$), sob carregamento concêntrico.

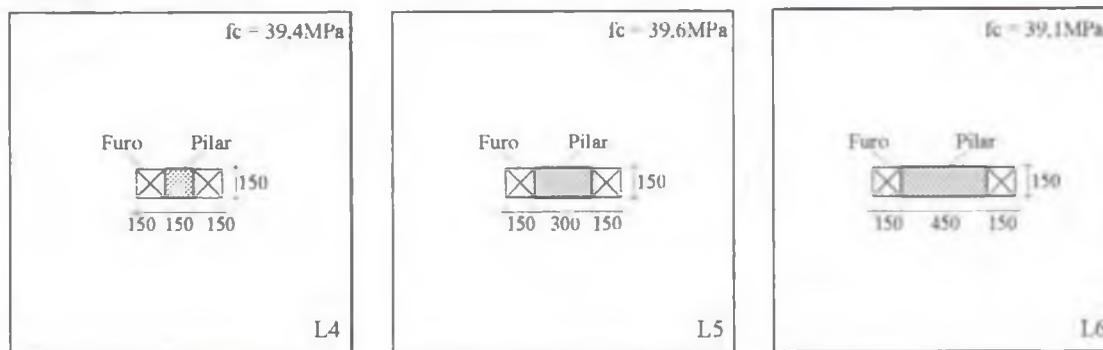
As lajes ensaiadas foram divididas em quatro grupos, sendo a principal variável de cada grupo, a relação entre lados do pilar: Grupo 1 (lajes monolíticas, apresentadas anteriormente), Grupo 2 (L4, L5 e L6 – lajes com furos), Grupo 3 (L7, L8 e L9 – lajes com armadura de cisalhamento) e Grupo 4 (L10 e L11 – lajes com furos e armadura de cisalhamento). A Tab.2.22 e Fig.2.56 apresentam as características das lajes com furos e/ou armadura de cisalhamento ensaiadas.

A armadura de cisalhamento utilizada nas lajes L7, L8, L9, L10 e L11 foi composta de elementos de aço interconectados por chapas, também de aço, nas suas extremidades (“stud”). Os “studs” foram compostos por vergalhões de aço CA-50 ($\phi = 8\text{mm}$ e comprimento de 105 mm) soldados, em suas extremidades, a chapas de aço de 30mm de largura e 10mm de espessura. A Fig. 2.57 mostra o detalhe do “stud” utilizado por SILVA (2003).

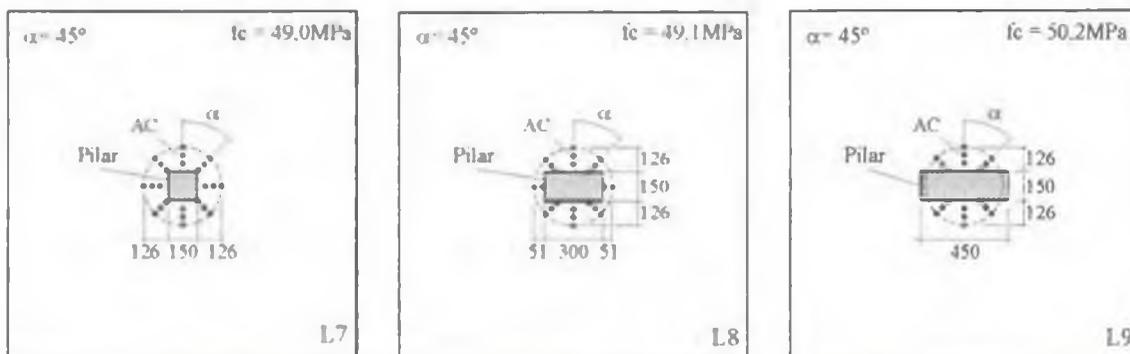
Tabela 2.22 – Características das lajes ensaiadas por SILVA (2003)

Grupo	Laje	Pilar (mm x mm)	f'_c (MPa)	ρ (%)	Furo	Armadura de cisalhamento			
						Nº cam.	ϕ (mm)	A_{se}/cam (mm ²)	$s_\theta = s_r$ (mm)
2	L4	150 x 150	39,4	1,57	sim	-	-	-	-
	L5	150 x 300	39,6	1,57	sim	-	-	-	-
	L6	150 x 450	39,1	1,57	sim	-	-	-	-
3	L7	150 x 150	49,0	1,45	não	3	8,0	402	42
	L8	150 x 300	49,4	1,45	não	2 e 3	8,0	302 e 402	42
	L9	150 x 450	50,2	1,45	não	3	8,0	302	42
4	L10	150 x 150	40,0	1,57	sim	3	8,0	302	42
	L11	150 x 300	40,8	1,57	sim	3	8,0	302	42

Grupo 2



Grupo 3



Grupo 4

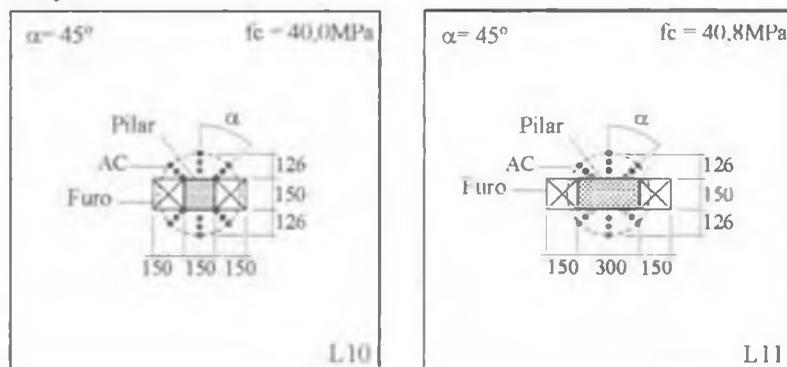


Figura 2.56 – Características das lajes com furos e/ou armadura de cisalhamento de SILVA (2003) – unidades em mm

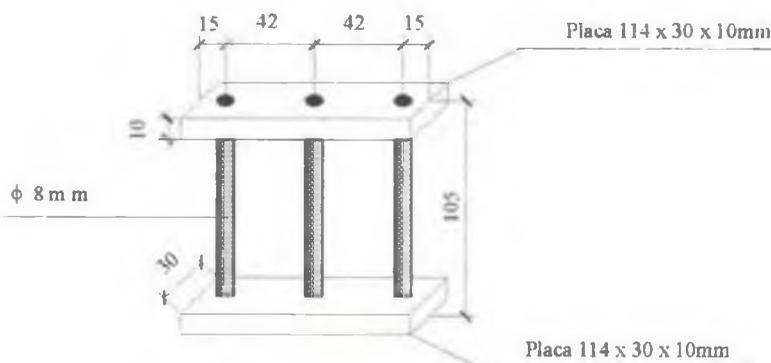


Figura 2.57 – Armadura de cisalhamento das lajes L7 a L11 – unidades em mm

As lajes L4, L5 e L6 similares às lajes monolíticas L1, L2 e L3, respectivamente, porém com dois furos adjacentes ao pilar, romperam sob carga equivalente a 225, 350 e 375 kN. Observa-se na Tab. 2.23, que a presença de furos reduziu entre 13% e 20% a carga de ruptura das lajes.

As lajes L7, L8 e L9, também similares, respectivamente, a L1, L2 e L3, mas com armadura de cisalhamento (distribuídas para obter perímetros de controle semelhantes), apresentaram cargas de ruptura iguais a 420 kN, 452 kN e 452 kN, respectivamente. Na laje com pilar de seção transversal quadrada, observa-se que houve aumento da resistência última (em torno de 54%) com a utilização de armadura de cisalhamento disposta radialmente.

O ganho de resistência com a utilização da armadura de cisalhamento na laje 2, resultando na laje L8, foi de aproximadamente 13%. Entretanto, a disposição utilizada para a armadura de cisalhamento na laje com pilar de maior seção transversal (150 mm x 450 mm), praticamente não alterou a carga de ruptura da laje, como pode ser visto quando se comparam as lajes L3 e L9. O aumento da carga de ruptura, devido à contribuição da armadura de cisalhamento, apresentou uma tendência em diminuir com o acréscimo da relação entre lados do pilar, para o caso específico do detalhamento utilizado nesta pesquisa.

As lajes L10 e L11, com pilares de seção retangular (relações c_{max}/c_{min} iguais a 1 e 2), furos e armadura de cisalhamento, romperam com cargas iguais a, respectivamente, 325 kN e 350 kN. Verifica-se com os resultados que a armadura de cisalhamento utilizada na laje com pilar de seção quadrada e com furos, possibilitou que a laje alcançasse uma resistência última superior à de uma laje monolítica sem tal armadura, e superasse em 19%. O mesmo fato não foi observado na laje com pilar de seção retangular com $c_{max}/c_{min} = 2$, pois a laje L11 rompeu sob carga equivalente a 87% da carga de ruptura da laje monolítica (L2).

A Tab.2.23 apresenta os resultados de cargas e modos de ruptura das lajes ensaiadas por SILVA (2003). Todas as lajes com armadura de cisalhamento (L7, L8, L9, L10 e L11) apresentaram ruptura por punção com a superfície de ruptura localizada externamente à zona armada com os “studs”. Na laje L10, apesar da existência de dois furos, o uso da armadura de cisalhamento proporcionou um aumento da carga de ruptura de 19% em relação à laje similar sem furos (L1). Entretanto, a ruptura da laje L10 ocorreu com uma carga igual a 77% da carga de ruptura da laje similar L7, porém, sem furos. Quando comparadas as cargas de

ruptura das lajes L11 (com dois furos e armadura de cisalhamento) e L5 (com dois furos e sem armadura de cisalhamento) verifica-se que a armadura de cisalhamento adotada foi ineficaz, pois não contribuiu com acréscimo no carregamento último.

Tabela 2.23 – Resultados dos ensaios das lajes ensaiadas por SILVA (2003)

Laje	Pilar (mm)	f_c (MPa)	Furo	Armadura de cisalhamento			V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura	Superfície de ruptura
				Nº cam.	ϕ (mm)	A_{se}/cam (mm ²)			
L1	150 x 150	39,6	não	-	-	-	273	Punção	A partir do pilar
L2	150 x 300	40,4	não	-	-	-	401	"	"
L3	150 x 450	40,8	não	-	-	-	469	"	A partir do pilar (direção do maior lado) Afastado do pilar (direção do menor lado)
L12	$\phi = 402$	42,3	não	-	-	-	525	"	A partir do pilar
L4	150 x 150	39,4	sim	-	-	-	225	"	A partir do pilar
L5	150 x 300	39,6	sim	-	-	-	350	"	A partir do pilar (direção do maior lado) Afastado do pilar (direção do menor lado)
L6	150 x 450	39,1	sim	-	-	-	375	"	A partir do pilar (direção do maior lado) Afastado do pilar (direção do menor lado)
L7	150 x 150	49,0	não	3	8,0	402	420	"	Externa à armadura de cisalhamento
L8	150 x 300	49,4	não	2 e 3	8,0	302 e 402	452	"	"
L9	150 x 450	50,2	não	3	8,0	302	452	"	"
L10	150 x 150	40,0	sim	3	8,0	302	325	"	"
L11	150 x 300	40,8	sim	3	8,0	302	350	"	"

$s_o = s_r = 42$ mm (lajes L7 a L11)

2.4.2 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA LITERATURA COM NORMAS DE PROJETO – LAJES SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO

A Tab.2.24 apresenta uma comparação entre as estimativas dos métodos de projeto analisados para algumas lajes da literatura com furos próximos ao pilar e sem armadura de cisalhamento.

As Figs. 2.58 a 2.64 apresentam as estimativas das normas de projeto e métodos de cálculo (ACI/02, BS/97, HB/87, EC/92, EC/01, NB1/03, TENG/99, IOANNOU/01 e ROLL/71) para as lajes com furos, ensaiadas por MOWRER & VANDERBILT (1967), ROLL et al. (1971), GOMES e ANDRADE (1995), TENG et al. (1999), EL-SALAKAWY et al. (1999), REGAN (1999), IOANNOU (2001) e SILVA (2003).

Todos os métodos de cálculo analisados forneceram estimativas conservadoras para as lajes ensaiadas por MOWRER & VANDERBILT (1967), principalmente com o aumento do número de furos. As normas do ACI/02 e EC/92 foram as mais conservadoras, pois estimaram relações V_{Exp}/V_{calc} até valores superiores a 5,0 (Tab. 2.24 e Fig. 2.58).

Para as lajes de ROLL et al. (1971) (Tab 2.24 e Fig. 2.59) os métodos do ACI/02, EC/92 e EC/01 foram os que se apresentaram mais conservadores. O maior valor para a relação V_{Exp}/V_{calc} (3,71) foi fornecido pelo ACI/02 para a laje S-244-9-0-1 com quatro furos de dimensões iguais ao do pilar, e com vértices coincidentes (caso de duas vigas se cruzando), pois a norma superestimou a influência do furo no cálculo do perímetro efetivo.

Observando as estimativas dos demais métodos de cálculo para as lajes de ROLL et al. (1971), verifica-se que, para o grupo de lajes com furos e pilares apresentando apenas um dos vértices coincidentes, o aumento do número de furos tornou os métodos mais conservadores, enquanto que, no grupo de lajes com furos adjacentes ao pilar, este aumento forneceu, na maioria dos métodos, resultados contra a segurança.

Percebe-se, então, que, para as lajes de ROLL et al. (1971), as normas de projeto tendem a superestimar a influência do furo quando este se posiciona com um dos vértices coincidentes com o do pilar, em relação à posição adjacente do furo em relação ao pilar.

Para as lajes ensaiadas por GOMES & ANDRADE (1995), todos os métodos de cálculo apresentaram resultados conservadores, especialmente com o aumento do diâmetro e do número de furos.

Os maiores valores para a relação V_{Exp}/V_{calc} foram fornecidos pela norma do ACI (2002), que variou entre 1,50 e 2,05, enquanto que, melhores estimativas foram obtidas através do método de ROLL et al. (1971), para lajes com dois e quatro furos, que variou entre 1,35 e 1,43, e da norma NB1 (2003), para lajes com um furo apenas, que variou entre 1,14 e 1,18. (Tab.2.24 e Fig. 2.60).

No caso das lajes ensaiadas por TENG et al. (1999), observa-se na Tab. 2.24 e Fig. 2.61 que as normas ACI/02, EC/92 e EC/01, novamente se apresentaram, em ordem decrescente, como as mais conservadoras nas estimativas das cargas de ruptura.

Comparando os métodos da BS/97 e de TENG et al. (1999) verifica-se que a proposta dos pesquisadores para o cálculo do perímetro efetivo de controle de lajes com pilares de seção retangular e com furos forneceu resultados mais satisfatórios em relação à norma.

Com base nos resultados apresentados pelas normas HB/87, IOANNOU/01 e ROLL/71, para as lajes de TENG et al. (1999), verifica-se que o posicionamento do furo em relação ao pilar, com apenas um de seus vértices coincidentes (por exemplo, OC11V23) é mais prejudicial à resistência da laje que a situação onde o furo se posiciona adjacente ao pilar (por exemplo, OC11H30).

A utilização de um furo fictício na laje SEO ensaiada por EL-SALAKAWY et al. (1999), como recomendado por IOANNOU (2001), reduziu a carga de ruptura de forma que forneceu o valor de 1,40 para a relação V_{Exp}/V_{calc} (Tab. 2.24 e Fig.2.62).

Para as demais lajes, onde não foi possível utilizar o artifício da simetria, devido ao posicionamento do furo em relação ao pilar, as estimativas ficaram contra a segurança.

De maneira geral, para as lajes com pilar de borda e furos posicionados em diversas localizações, todos os métodos de cálculo, com exceção do EC/92, EC/01, BS/97 e TENG et

al. (1999), apresentaram estimativas contra a segurança. A BS/97 e TENG *et al.* forneceram estimativas iguais e valores para $V_{Exp} V_{calc}$ entre 0,91 e 1,05.

Para as lajes de REGAN (1999) e IOANNOU (2001), além do ACI/02, EC/92 e EC/01, os métodos de cálculo da BS/97, NB1/03 e TENG *et al.* se apresentaram bastante conservadores, fornecendo valores para a relação $V_{Exp} V_{calc}$ entre 1,56 e 2,41 (Tab. 2.24 e Fig. 2.63).

Assim como observado por REGAN (1999), as sugestões propostas pelo mesmo para o Handbook to BS/85 (1987) melhorou os seus resultados, em relação ao BS/97, e os de IOANNOU (2001), fornecendo estimativas para $V_{Exp} V_{calc}$ entre 0,93 e 1,10.

A proposta de IOANNOU (2001) para o CEB-FIP (1991), no tratamento de furos em lajes, estimou resistências próximas das experimentais, para as lajes de REGAN (1999), em relação às demais normas

O método de ROLL *et al.* (1971) forneceu resultados conservadores para as lajes de IOANNOU (2001) e de REGAN (1999), com $V_{Exp} V_{calc}$ variando entre 1,19 e 1,40, porém, melhores que as estimativas do ACI/02, BS/97, EC/92, EC/01, NB1/03 e TENG *et al.* (1999).

Com relação às lajes ensaiadas por SILVA (2003), todos os métodos de cálculo se apresentaram conservadores, como mostra a Tab. 2.24 e Fig. 2.64. O aumento das dimensões do pilar reduziu a tendência dos métodos de estimar resultados conservadores.

Tabela 2.24 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos da literatura

Autor	Laje	V_{Exp} / V_{calc}								
		ACI/02	BS/97	HB/87	EC2/92	EC2/01	NBI/03	TENG/99	IOANNOU/01	ROLL/71
MOWER & VANDERBILT (1967)	JN-1-1.7	2,44	1,39	1,16	2,36	1,83	1,22	1,39	1,42	1,83
	JN-2-1.7	5,00	2,54	1,52	4,48	3,33	2,23	2,54	1,67	2,68
	JN-3-1.7	2,30	1,35	1,30	2,55	1,89	1,26	1,35	1,19	2,02
	JN-1-2.2	2,46	1,24	1,04	2,19	1,63	1,09	1,24	1,27	1,60
	JN-2-2.2	5,26	2,27	1,36	4,55	2,98	2,00	2,27	1,49	2,43
	JN-3-2.2	2,45	1,31	1,27	2,45	1,83	1,23	1,31	1,16	1,92
ROLL, ZAIDI, SABNIS & CIUANG (1971)	S-121-0-0-1	1,52	1,04	0,96	1,49	1,37	0,89	1,04	0,89	1,14
	S-122-0-0-1	1,63	1,12	0,94	1,60	1,43	0,93	1,12	0,82	1,18
	S-123-0-0-1	1,50	1,03	0,76	1,46	1,26	0,81	1,03	0,71	1,31
	S-124-0-0-1	1,67	1,14	0,72	1,60	1,31	0,85	1,14	0,63	1,31
	S-221-0-0-1	1,90	1,04	1,06	1,35	1,38	0,89	1,04	1,13	1,21
	S-222-0-0-1	2,12	1,13	1,19	1,49	1,46	0,95	1,13	1,05	1,21
	S-223-0-0-1	2,48	1,33	1,46	1,69	1,95	1,26	1,33	1,75	1,28
	S-224-0-0-1	2,67	1,45	1,71	1,71	1,73	1,12	1,45	1,54	1,21
	S-241-9-0-1	1,71	0,91	0,89	1,25	1,21	0,78	0,91	0,94	1,23
	S-242-9-0-1	1,89	1,02	0,96	1,33	1,33	0,86	1,02	0,84	1,22
	S-243-9-0-1	2,46	1,28	1,12	1,76	1,59	1,03	1,28	1,35	1,09
S-244-9-0-1	3,71	1,94	1,52	2,51	2,24	1,46	1,94	1,37	1,39	
GOMES & ANDRADE (1995)	13	1,57	1,27	1,28	1,47	1,27	1,18	1,27	1,33	1,32
	14	1,50	1,22	1,22	1,40	1,21	1,14	1,22	1,38	1,22
	15	1,92	1,50	1,59	1,85	1,57	1,46	1,50	1,57	1,43
	23	2,05	1,81	1,92	1,93	1,77	1,67	1,81	1,98	1,35
TENG et al. (1999)	OC11H30	1,80	1,32	1,09	1,54	1,44	1,22	1,32	1,30	1,27
	OC11V23	1,74	1,28	1,24	1,47	1,37	1,17	1,28	1,41	1,30
	OC11V20	1,25	0,93	0,97	1,01	0,99	0,83	0,93	0,96	0,81
	OC13H50	1,33	0,98	0,94	1,30	1,08	0,92	1,07	1,08	1,09
	OC13V43	1,43	1,07	1,01	1,39	1,14	0,98	1,03	1,09	1,14
	OC13V23	1,59	1,18	1,04	1,51	1,28	1,08	1,18	1,04	1,23
	OC13V40	1,15	0,83	0,90	0,96	0,90	0,76	0,88	1,19	0,89
	OC13H02	1,76	1,43	1,09	1,61	1,49	1,28	1,09	1,19	1,26
	OC15H70	1,31	0,89	0,98	1,52	0,98	0,83	1,10	0,96	1,10
OC15V43	1,72	1,16	1,15	1,96	1,26	1,07	1,28	1,01	1,32	

Tabela 2.24 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos da literatura (continuação)

Autor	Laje	V_{Exp}/V_{calc}								
		ACI/02	BS/97	HB/87	EC2/92	EC2/01	NB1/03	TENG/99	IOANNOU/01	ROLLI/71
REGAN (1999)	2	2,01	1,75	1,10	1,95	1,91	1,68	1,75	1,01	1,29
	6	2,41	1,98	0,94	2,08	1,77	1,56	1,98	1,09	1,19
	7	2,39	1,97	0,93	2,06	1,77	1,56	1,97	1,08	1,19
IOANNOU (2002)	PSSCH4b	1,83	1,74	1,05	1,91	1,80	1,62	1,74	1,21	1,40
EL-SALAKAWY et al. (1999)	SE0	0,97	1,05	0,96	1,19	1,20	0,96	1,05	1,40	0,79
	CF0	0,89	1,05	0,78	1,17	1,21	0,97	1,05	0,82	0,62
	SF0	0,90	1,03	0,88	1,32	1,36	1,09	1,03	0,81	0,70
	SF1	0,82	0,94	0,91	1,05	1,10	0,89	0,94	0,84	0,72
	SF2	0,82	0,91	0,93	1,05	1,07	0,86	0,91	0,86	0,72
SILVA (2003)	L4	2,49	1,78	1,08	2,06	2,03	1,63	1,78	1,23	1,33
	L5	2,13	1,65	1,38	1,92	1,95	1,56	2,04	1,51	1,56
	L6	1,67	1,54	1,26	1,95	1,63	1,31	1,74	1,35	1,42
MEDIA		1,97	1,34	1,13	1,78	1,55	1,19	1,35	1,18	1,29
DESVIO PADRÃO		0,91	0,39	0,26	0,73	0,48	0,34	0,40	0,29	0,40
COEF. VARIAÇÃO (%)		46,1	29,5	22,8	40,7	30,8	28,6	29,8	24,7	31,2

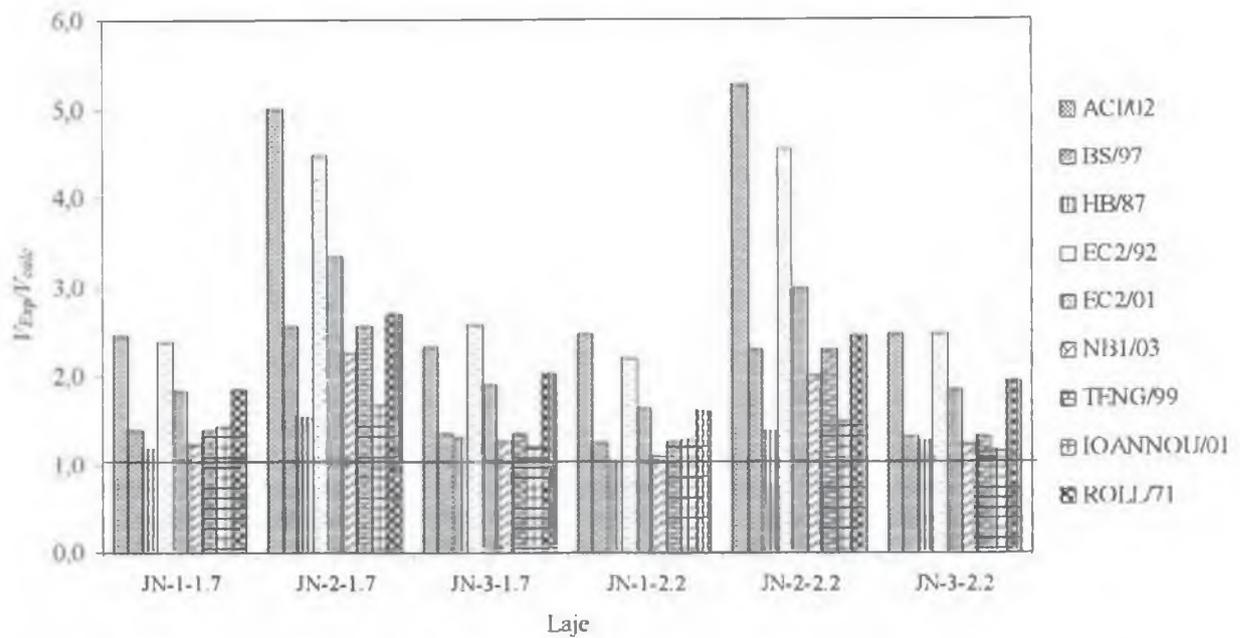


Figura 2.58 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos de MOWRER & VANDERBILT (1967)

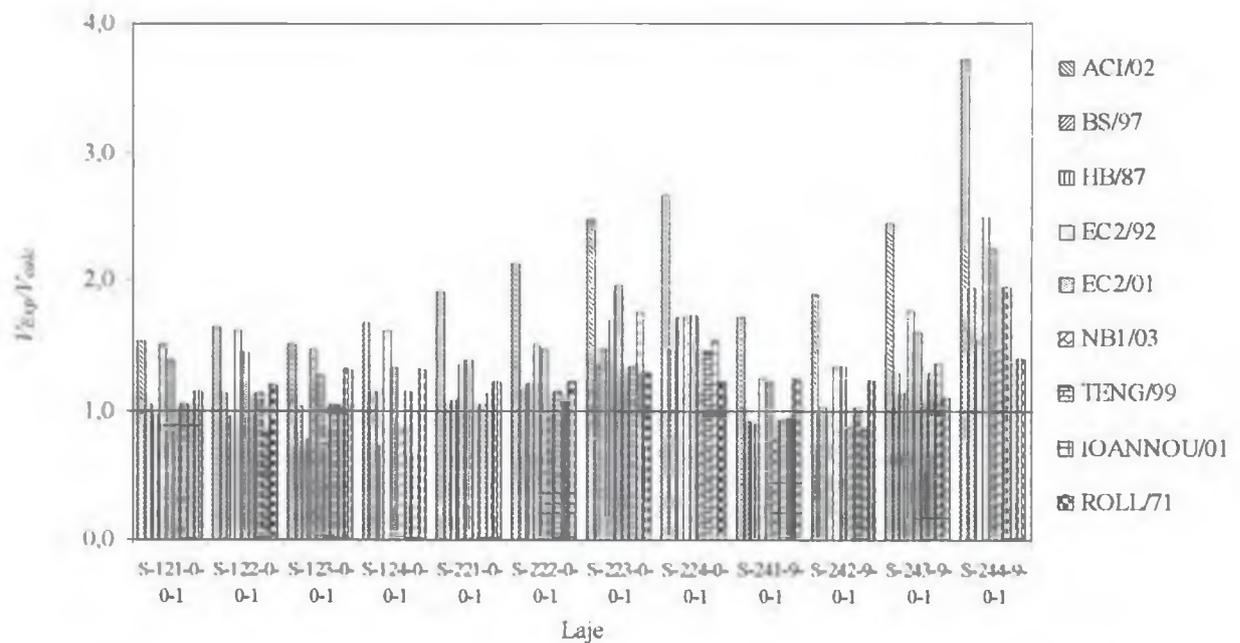


Figura 2.59 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos de ROLL, ZAIDI, SABNIS & CHUANG (1971)

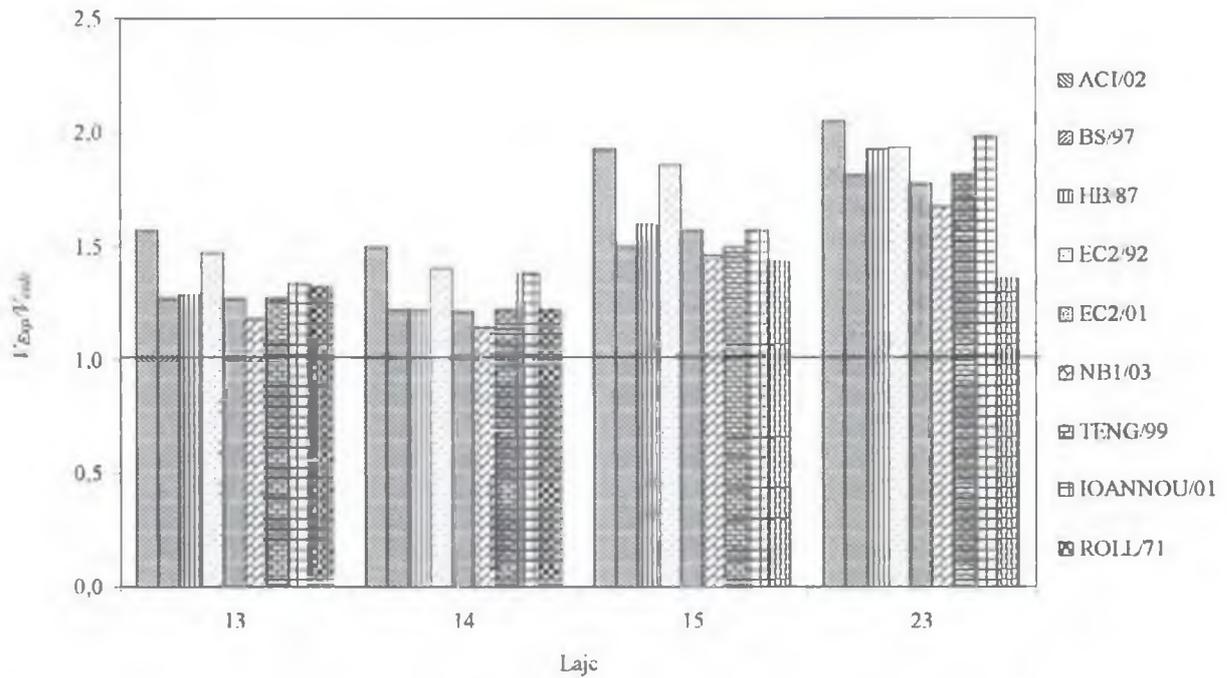


Figura 2.60 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos de GOMES & ANDRADE (1995)

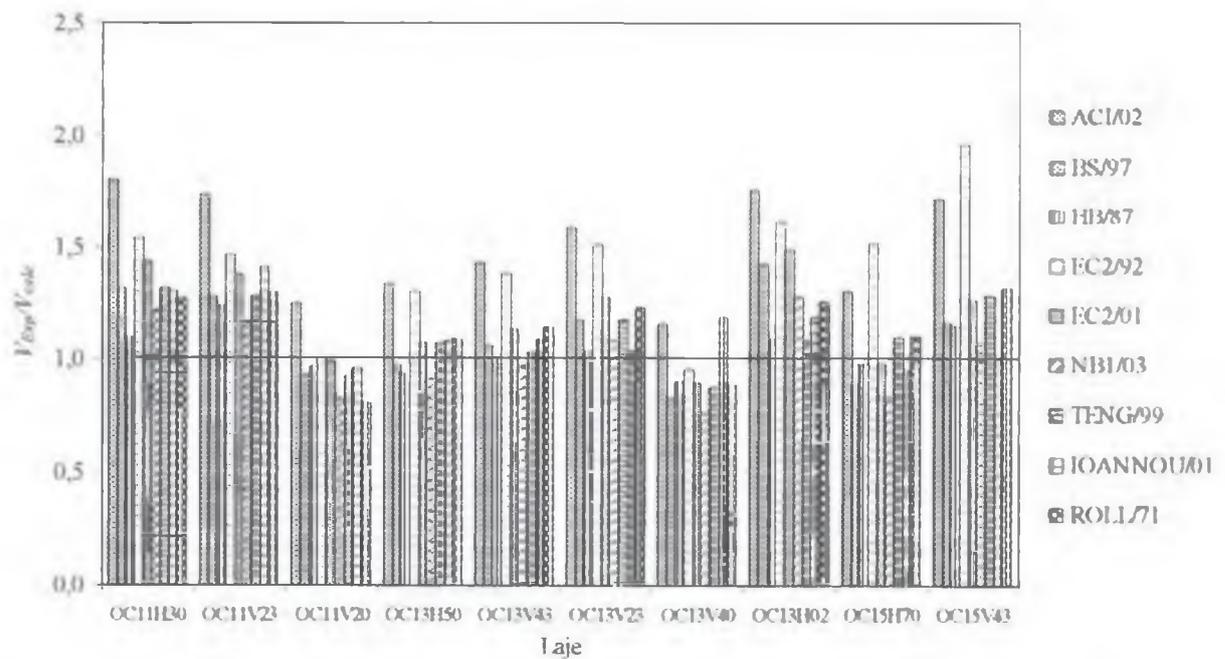


Figura 2.61 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos de TENG et al. (1999)

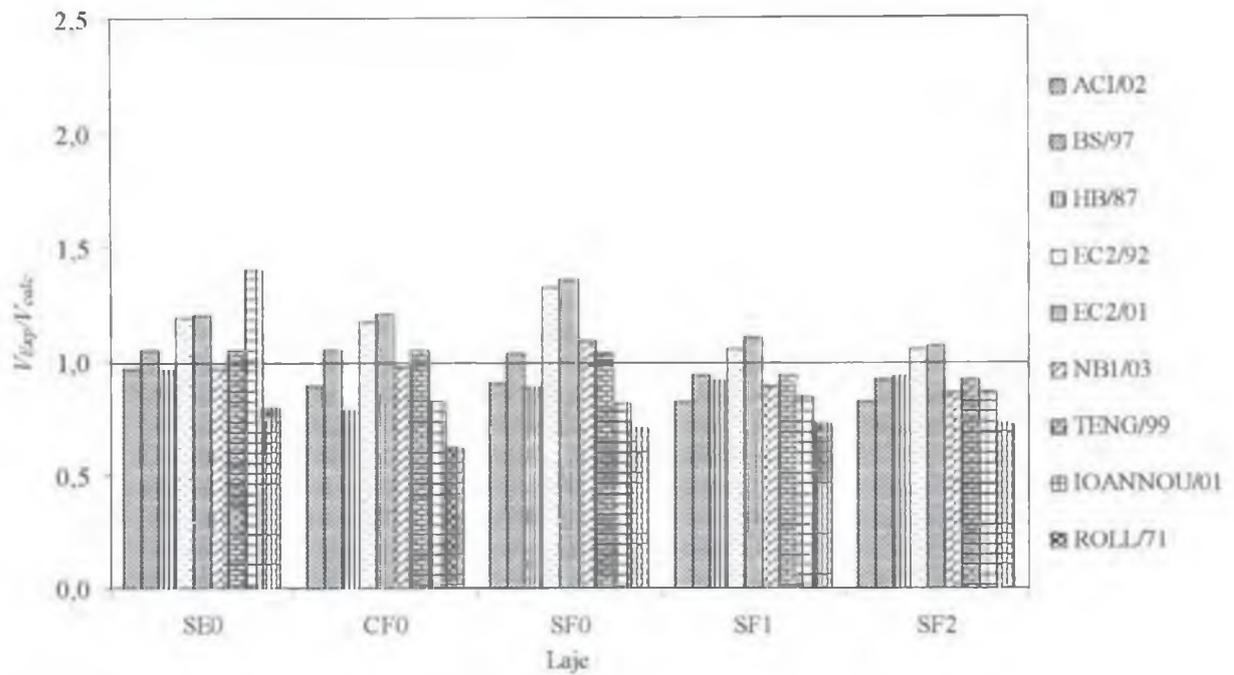


Figura 2.62 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos de EL-SALAKAWY et al (1999)

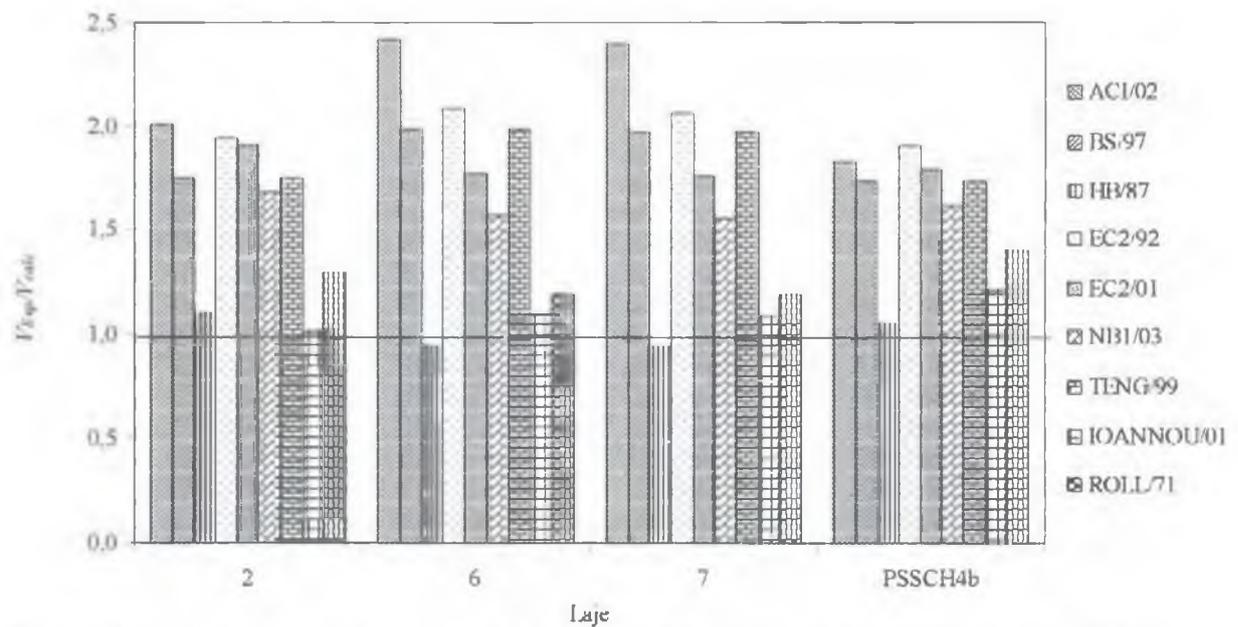


Figura 2.63 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos de REGAN (1999) e IOANNOU (2001)

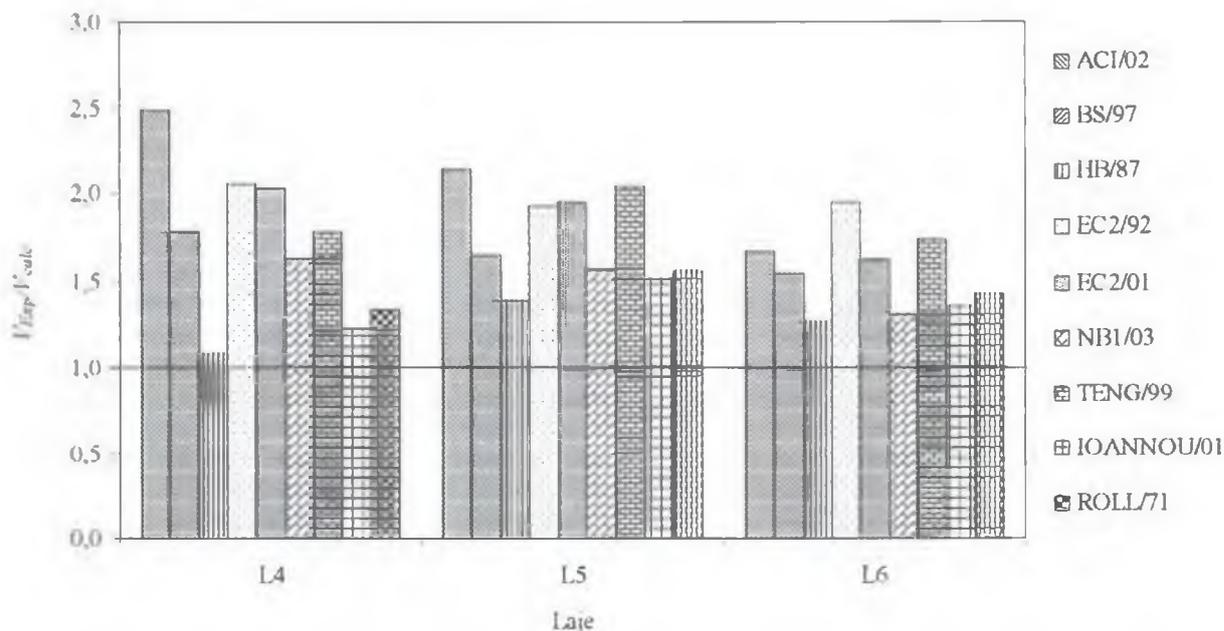


Figura 2.64 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos de SILVA (2003)

2.4.2.1 – COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados das estimativas, para as lajes da literatura analisadas, mostraram que ocorre uma tendência dos métodos de cálculo de fornecerem resultados conservadores, para algumas lajes com furos, e, contra segurança, para outras. Observou-se que o método proposto para o Handbook to BS8110 (1987), IOANNOU (2001) e a norma NBI (2003) forneceram, de maneira geral, os melhores resultados, em relação aos outros métodos de cálculo (Tab. 2.24).

A literatura apresenta algumas pesquisas relacionadas com a investigação da influência de furos próximos ao pilar na resistência à punção de lajes cogumelo. Com o objetivo de contribuir com dados experimentais adicionais para a melhor compreensão dos métodos de projeto, incluindo resultados de lajes com furos de grandes dimensões, a presente pesquisa propõe estudar alguns modelos de furos, de forma que sugestões e complementações possam ser apresentadas para a norma brasileira.

2.4.3 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA LITERATURA COM NORMAS DE PROJETO – LAJES COM ARMADURA DE CISALHAMENTO

A Tab. 2.25 apresenta as estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento da literatura, com e sem furos. As Figs. 2.65 a 2.68 ilustram graficamente as estimativas das normas para as lajes ensaiadas por, respectivamente, GOMES & ANDRADE (1995), REGAN (1999), IOANNOU (2001) e SILVA (2003).

Todas as normas de projeto forneceram estimativas conservadoras para as lajes de GOMES & ANDRADE (1995) e de REGAN (1999), especialmente o ACI (2002), com relação V_{Exp}/V_{ACI} , variando entre 1,19 e 2,39, e, 2,04 e 2,97, respectivamente.

As normas BS8110 (1997), NB1 (2003) e Handbook to BS (1987) estimaram, de modo geral, os resultados menos conservadores para as lajes de GOMES & ANDRADE (1995), enquanto que, para as lajes de REGAN (1999), o Handbook to BS (1987) foi o método que se mostrou menos conservador ($V_{Exp}/V_{HB 87}$ entre 0,94 e 1,14).

Para as lajes de IOANNOU (2001), exceto a laje PSSCH2, que rompeu por flexão, todas as normas forneceram estimativas conservadoras, especialmente o ACI (2002). A laje PSSCH2 apresentou os menores valores para a relação V_{Exp}/V_{calc} , em relação às demais lajes.

A norma mais conservadora na estimativa das cargas de ruptura das lajes de SILVA (2003) foi, assim como para as demais lajes da literatura, o ACI (2002), com V_{Exp}/V_{ACI} entre 2,21 e 2,77.

O EC2/01 foi, em seguida, a norma mais conservadora ($V_{Exp}/V_{EC2/01}$ variando entre 1,19 e 1,59). A BS8110 (1997), NB1 (2003) e HB (1987) foram as normas que forneceram os resultados mais satisfatórios, em relação às demais normas, com V_{Exp}/V_{calc} variando entre 1,00 e 1,13, com exceção da estimativa do Handbook para a laje L10 (0,90).

Observa-se na Tab. 2.25 que o ACI (2002) foi a norma que forneceu os resultados mais conservadores para as cargas de ruptura das lajes com armadura de cisalhamento apresentadas, sendo o valor médio da relação V_{Exp}/V_{ACI} igual a 2,02, e com os maiores valores para o desvio padrão (0,54) e coeficiente de variação (26,7).

Tabela 2.25 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento da literatura

Autor	Laje	V_{Exp} / V_{calc}					
		ACI/02	BS/97	EC2/92	EC2/01	HB/87	NB1/03
GOMES & ANDRADE (1995)	16	2,38	1,10	1,31	1,43	1,10	1,20
	17	2,14	1,04	1,18	1,27	1,07	1,07
	18	1,88	1,04	1,02	1,13	1,08	1,06
	19	1,92	1,04	1,04	1,15	1,07	1,08
	20	1,19	1,25	1,34	0,99	1,29	0,97
	21	1,60	1,32	1,42	1,24	1,37	1,22
	22	2,08	1,44	1,29	1,52	1,51	1,47
	24	1,93	1,05	1,04	1,13	1,09	1,06
	25	1,37	1,43	1,53	1,13	1,48	1,11
	26	1,47	1,04	1,20	1,13	1,07	1,05
REGAN (1999)	3	2,04	1,00	1,00	1,34	1,00	1,22
	4	2,64	1,42	1,53	1,97	1,02	1,81
	5	2,53	1,68	1,40	1,92	1,14	1,77
	8	2,97	1,82	1,38	1,86	0,94	1,70
IOANNOU (2001)	PSSCH1	1,34	1,23	0,98	1,12	1,00	1,06
	PSSCH2	1,23	0,93	1,06	0,96	0,90	0,92
	PSSCH3	1,60	1,16	1,26	1,17	1,22	1,12
	PSSCH4	1,54	1,09	1,35	1,26	0,83	1,21
SILVA (2003)	L7	2,59	1,00	1,17	1,48	1,00	1,05
	L8	2,77	1,07	1,25	1,59	1,07	1,13
	L9	2,76	1,06	1,24	1,58	1,06	1,12
	L10	2,21	1,07	1,01	1,19	0,90	1,07
	L11	2,36	1,15	1,07	1,28	0,97	1,14
MEDIA		2,02	1,19	1,22	1,34	1,09	1,20
DESVIO PADRÃO		0,54	0,23	0,17	0,28	0,17	0,25
COEF.VARIAÇÃO (%)		26,7	19,2	13,9	21,2	15,8	20,4

Seguido do ACI (2002), o EC2 (2001) apresentou as estimativas mais conservadoras (Média = 1,34, DP = 0,28 e CV = 21,2), uma vez que apresenta algumas limitações nas expressões de cálculo, e isto reduz a carga estimada.

As normas BS8110 (1997) e NB1 (2003) apresentaram resultados levemente conservadores para todas as lajes da literatura, com V_{Exp}/V_{calc} aproximadamente iguais, embora a BS8110 (1997) tenha fornecido para o desvio padrão e coeficiente de variação valores levemente inferiores (DP = 0,23 e CV = 18,9).

O Handbook to BS8110 (1987) forneceu um valor médio para a estimativa de V_{Exp}/V_{calc} mais próximo da unidade (1,09), em relação às demais normas, com desvio padrão e coeficiente de variação iguais a, respectivamente, 0,17 e 15,8%.

O EC2 (1992), apesar de ter apresentado uma relação média $V_{Exp}/V_{EC2/92}$ um pouco superior à das normas BS8110 (1997) e NB1 (2003), apresentou os menores valores para o desvio padrão (0,17) e coeficiente de variação (13,9%).

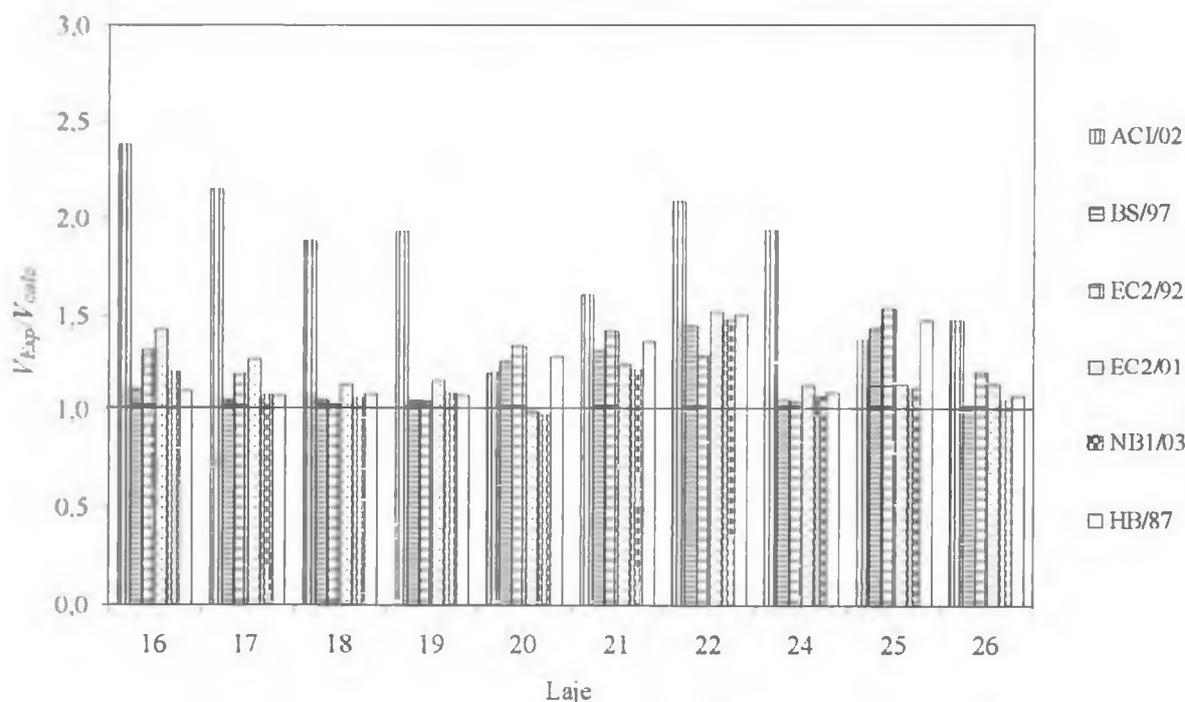


Figura 2.65 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de GOMES & ANDRADE (1995)

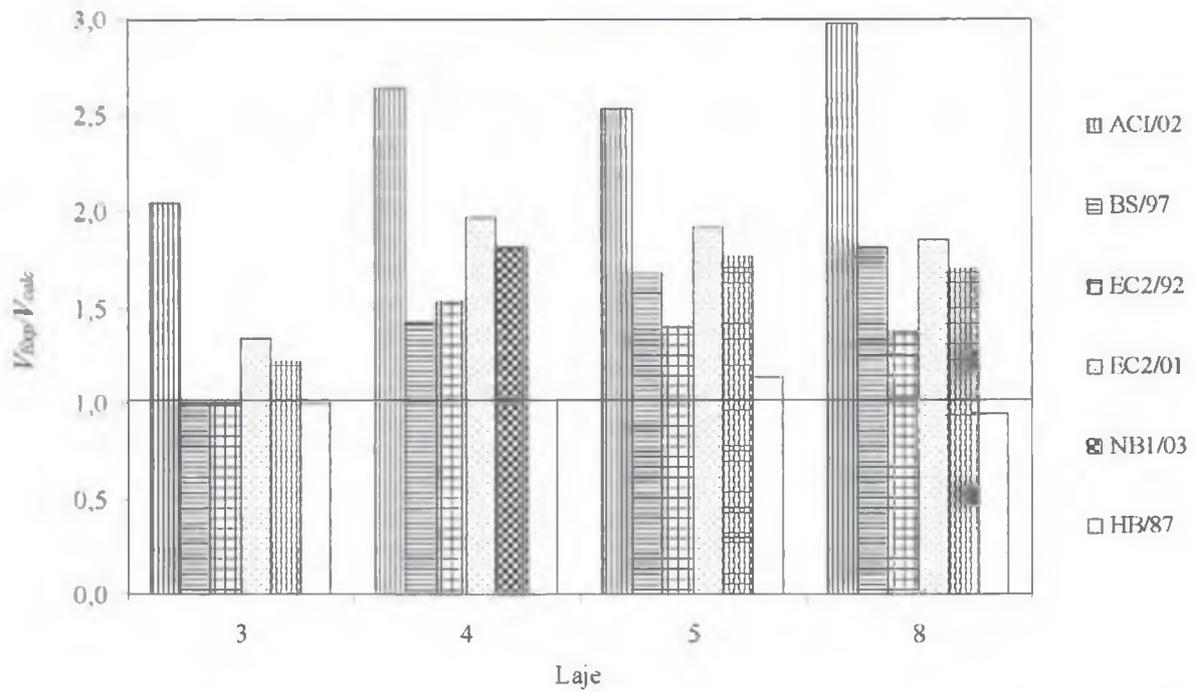


Figura 2.66 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de REGAN (1999)

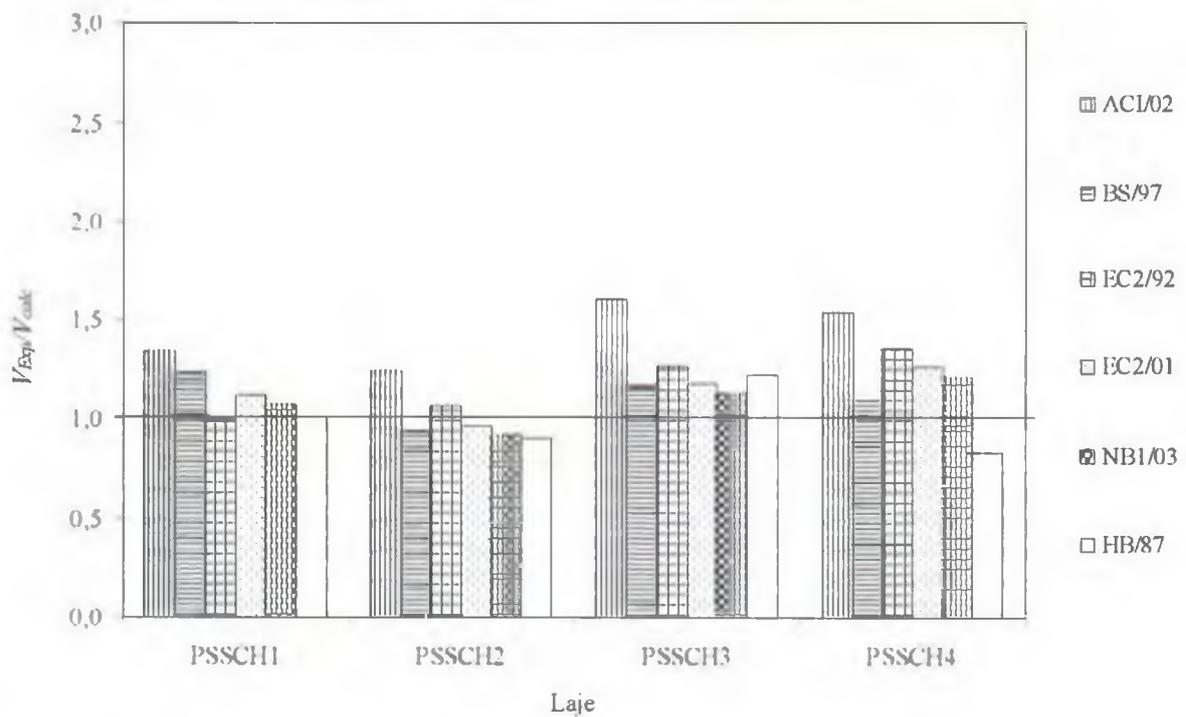


Figura 2.67 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de IOANNOU (2001)

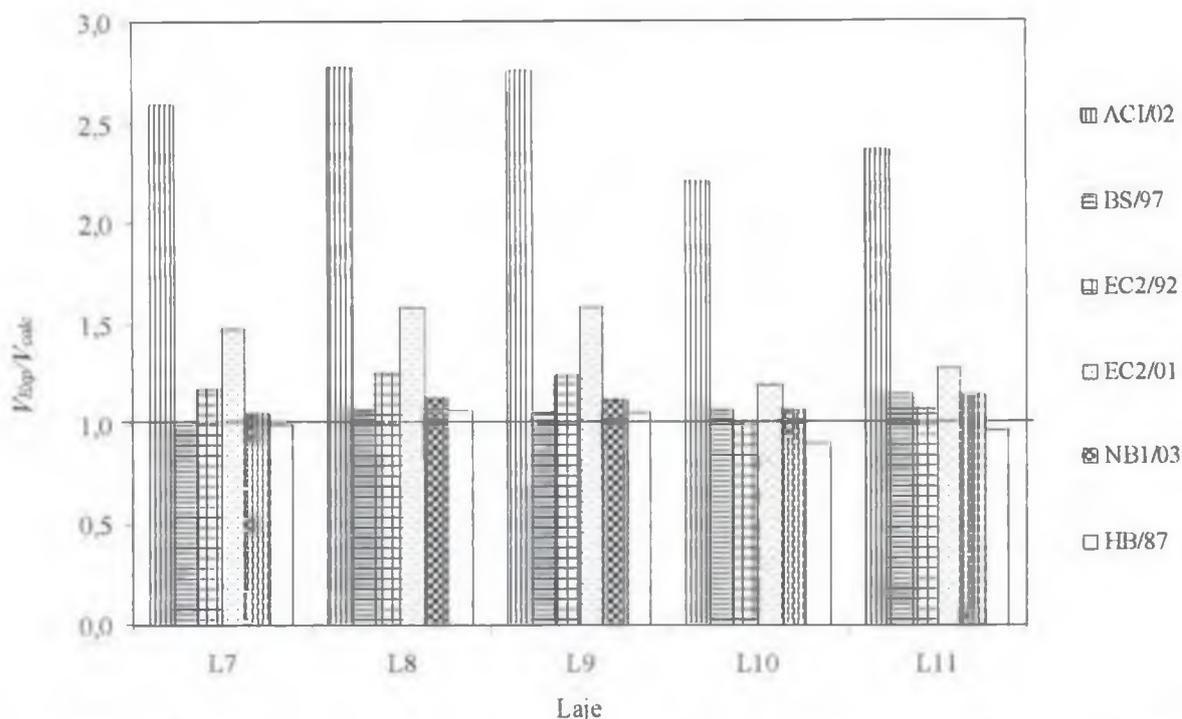


Figura 2.68 – Estimativas das normas de projeto para as lajes com armadura de cisalhamento de SILVA (2003)

2.4.3.1 – COMENTÁRIOS FINAIS

A armadura de cisalhamento, utilizada em lajes com furos próximos ao pilar, permitiu restabelecer a resistência perdida devido ao furo, sendo que, em alguns ensaios da literatura, ocorreram mudanças nos mecanismos de ruptura (superfícies de ruptura modificadas) e nos modos de ruptura, de cisalhamento para flexão. Cabe ressaltar que foram analisados, na literatura, diversos detalhamentos para a distribuição da armadura de cisalhamento, sendo especialmente elementos de armadura uniformemente distribuídos.

Com a ausência do concreto devido ao furo, a região próxima a este se encontra sujeita a um nível mais elevado de tensões, em relação à situação sem furos. Teoricamente, a utilização de uma concentração maior de armadura de cisalhamento próxima à região do furo tenderia a proporcionar um acréscimo de resistência à punção da laje. Estudos que investigam a eficiência deste tipo de detalhamento são importantes, pois, é racional que todos os elementos da armadura de cisalhamento trabalhem eficientemente à tração.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O programa experimental deste trabalho compreendeu ensaios, até a ruptura, de 20 (vinte) lajes cogumelo quadradas de concreto armado de 3000 mm de lado e 200 mm de espessura, apoiadas em pilares internos.

As lajes testadas foram divididas em 3 (três) séries, em função das variáveis analisadas: Série 1 (oito lajes com pilares retangulares), Série 2 (seis lajes com furos e sem armadura de cisalhamento) e Série 3 (seis lajes com armadura de cisalhamento).

A seção transversal dos pilares das lajes da Série 1 foram definidas de forma a apresentarem dimensões práticas e usuais, tendo como referência principal, um pilar quadrado de 200 mm de lado, utilizado por GOMES (1991).

As dimensões das lajes foram adotadas baseando-se em trabalhos anteriormente desenvolvidos (GOMES, 1991; ANDRADE, 1999; TRAUTWEIN, 2001), de forma a representar uma região de momento negativo em torno de pilares, ou região com momento positivo em torno de cargas concentradas. As linhas definidas pelos pontos de fixação da laje, na estrutura física do ensaio (laje de reação), representaram linhas de inflexão de momentos fletores em lajes contínuas, com vãos de comprimento médio de 6,8 metros.

3.2 – MODELOS EXPERIMENTAIS

As lajes apresentaram dimensões constantes e iguais a 3000 mm x 3000 mm x 200 mm. Os materiais constituintes do concreto das lajes foram dosados de forma a obter uma resistência à compressão do concreto (f'_c) em torno de 40 MPa, aos 14 dias, entretanto, na prática, a

resistência à compressão do concreto variou entre 36,2 e 44,7 MPa. Da mesma forma, a altura útil das lajes foi definida para 164 mm, porém, ocorreram algumas alterações devido ao processo executivo da concretagem, e variou entre 139 e 164 mm. A taxa geométrica de armadura de flexão variou entre 1,00 e 1,55%, calculada de acordo com o CEB-FIP MC90 (1991).

3.2.1 – DESCRIÇÃO DAS LAJES COM PILARES RETANGULARES

3.2.1.1 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

As lajes da Série 1 apresentaram as seguintes dimensões, em mm, para a seção transversal dos pilares: 150 x 250, 150 x 450, 150 x 600, 200 x 400, 200 x 600 e 200 x 800. A Fig.3.1 e a Tab.3.1 apresentam as características geométricas das lajes da Série 1.

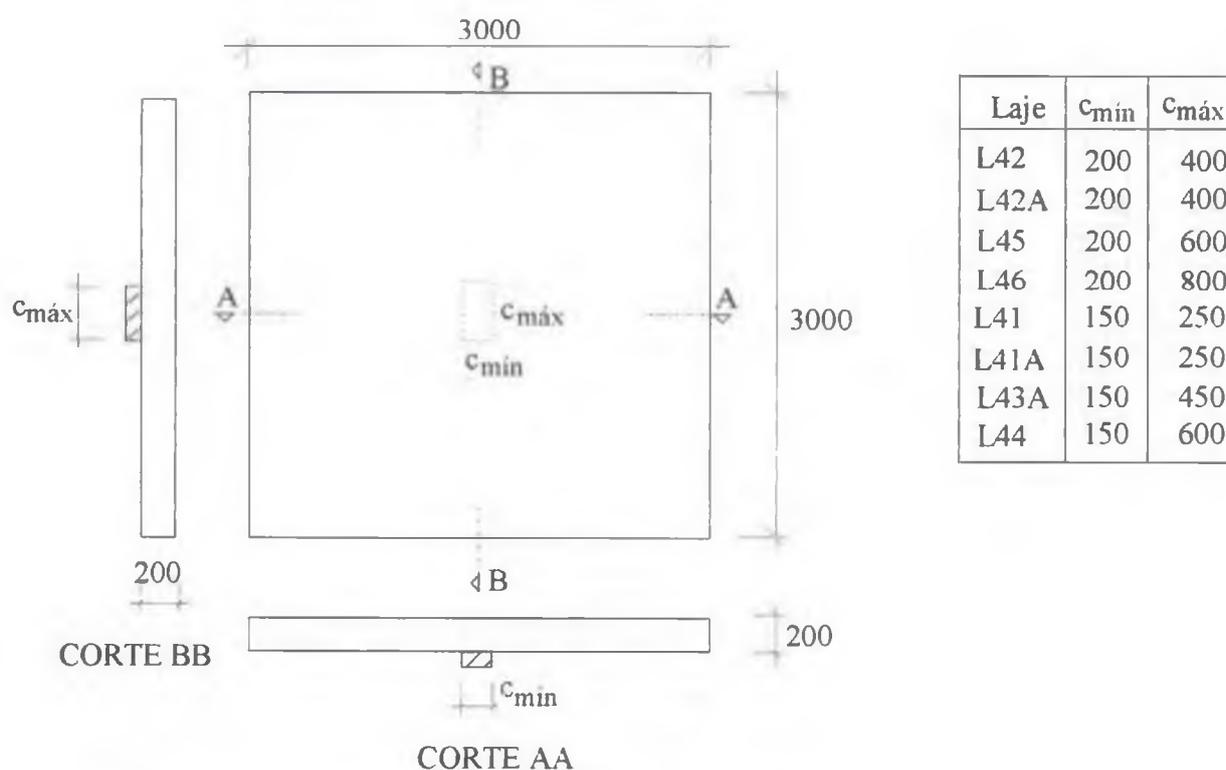


Figura 3.1 – Características geométricas das lajes da Série 1 (unidades em mm)

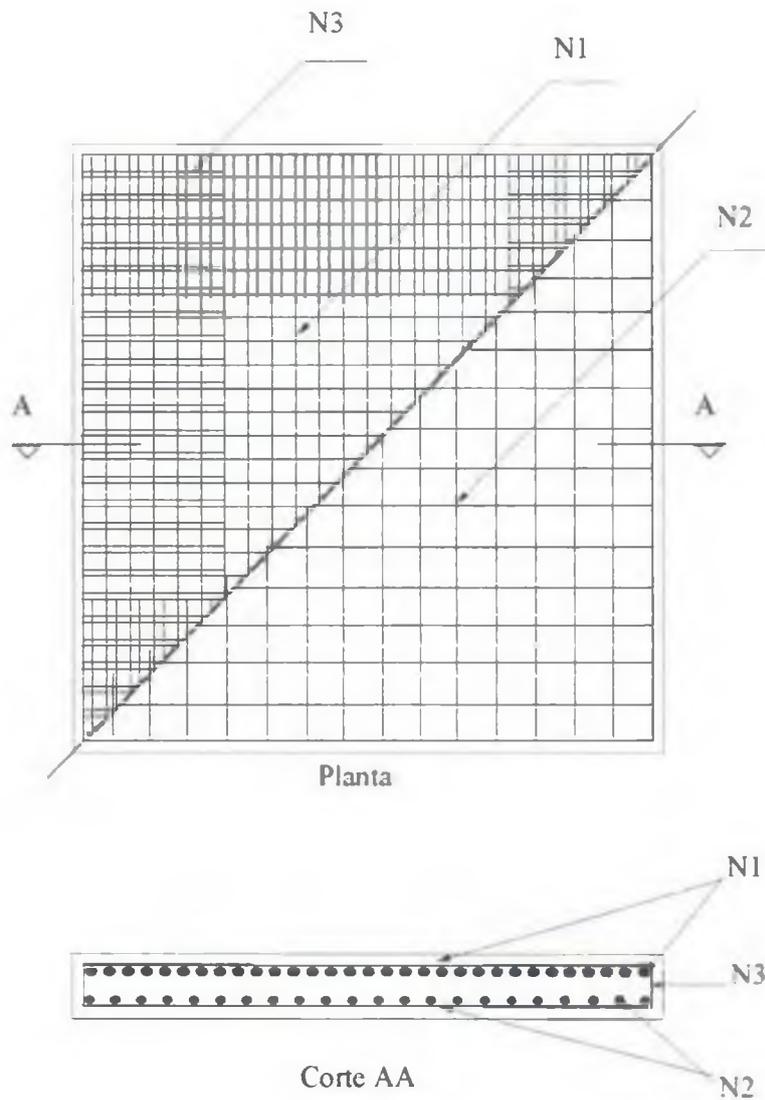
Tabela 3.1 – Características geométricas das lajes da Série 1

Laje	Pilar (mm)		$c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$	Perímetro do pilar (mm)	f'_c (MPa)	ρ (%)	d (mm)
	$c_{m\acute{i}n}$	$c_{m\acute{a}x}$					
L42	200	400	2	1200	43,2	1,53	139
L42A	200	400	2	1200	36,2	1,15	164
L45	200	600	3	1600	42,0	1,37	154
L46	200	800	4	2000	39,3	1,15	164
L41	150	250	1,67	800	44,7	1,39	139
L41A	150	250	1,67	800	38,9	1,24	164
L43A	150	450	3	1200	38,7	1,24	164
L44	150	600	4	1500	40,0	1,18	164

3.2.1.2 – ARMADURA DE FLEXÃO

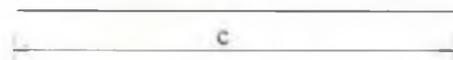
A armadura de flexão se manteve constante para todas as lajes, e foi determinada para prevenir a ruptura por flexão. A armadura de flexão negativa, posicionada no bordo superior da laje, foi composta por uma malha ortogonal de 31 barras de 16 mm de diâmetro (aço CA50), em cada direção e espaçadas a cada 100 mm. A armadura de flexão positiva, colocada no bordo inferior da laje, compôs-se de uma malha ortogonal de 21 barras de 8 mm de diâmetro (aço CA50), em cada direção e espaçadas a cada 150 mm. O cobrimento das barras das armaduras superior e inferior de flexão foram de 20 mm.

Com a finalidade de proporcionar uma adequada ancoragem para a armadura de flexão negativa, foram adicionadas 31 barras de 12,5 mm de diâmetro (aço CA50) na forma de grampo, em cada extremidade da armação e em cada direção. A Fig.3.2 mostra o detalhamento da armadura de flexão das lajes com pilares retangulares.



N1 - 31 \varnothing 16mm c/ 100 mm (cada direção) - c: 2960 mm

N2 - 21 \varnothing 8mm c/ 150 mm (cada direção) - c: 2960 mm



N3 - 2 x 31 \varnothing 12,5mm c/ 100 mm (cada direção) - c: 1500 mm



Figura 3.2 – Armadura de flexão das lajes da Série 1 (unidades em mm)

3.2.1.3 – CONCRETO

Para a confecção das lajes e corpos de prova, utilizou-se o cimento CII-F32, o granito com dimensão máxima de 19 mm, como agregado graúdo, e a arcia artificial de granito, como agregado miúdo. Foram utilizados aditivos no concreto com a finalidade de melhorar a resistência à compressão (sílica ativa) e a trabalhabilidade (aditivo superplastificante). O concreto foi fabricado no local da moldagem das lajes, e a quantidade de material utilizado é apresentada na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Composição do concreto

Material	Peso em kg / 1,05 m ³
Agregado graúdo	992
Agregado miúdo	847
Cimento	400
Sílica ativa	24,8
Superplastificante	2,709
Água	197
Relação a/c _{eq}	0,45

3.2.2 – DESCRIÇÃO DAS LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO

3.2.2.1 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

As séries 2 e 3 apresentaram os pilares com seção transversal de 200 mm x 600 mm e os furos, 200 mm x 300 mm. A área formada pelo furo representa 50% da seção do pilar, sendo, considerado um furo de grandes dimensões. Os furos retangulares foram posicionados com um dos menores lados adjacente à menor dimensão do pilar, pois, se trata de uma das situações mais críticas, como mostram os resultados apresentados no CAPÍTULO 2.

Na Série 2, as principais variáveis estudadas foram: quantidade de furos e detalhamento da armadura de flexão na região do furo, enquanto que, na Série 3, a distribuição da armadura de cisalhamento. A Tab.3.3 e a Fig.3.3 apresentam as características geométricas das lajes da Série 2 e da Série 3.

Tabela 3.3 – Características geométricas das lajes das séries 2 e 3

Série	Laje	$c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$	d (mm)	f'_c (MPa)	ρ (%)	Nº de furos	Grampo ancoragem	Armadura de cisalhamento	
								Nº camadas	ϕ (mm)
2	L45FS_CG	3	154	40,5	1,14	1	sim	-	-
	L45FD_CG	3	154	39,0	1,38	1	sim	-	-
	L45FD	3	154	41,4	1,38	1	não	-	-
	L45FFS_CG	3	154	41,6	1,00	2	sim	-	-
	L45FFD_CG	3	164	40,6	1,24	2	sim	-	-
	L45FFD	3	144	37,0	1,55	2	não	-	-
3	L45FFD_AC2	3	154	44,5	1,38	2	não	4	10,0
	L45FFD_AC3	3	154	39,6	1,38	2	não	3	8,0
	L45FFD_AC4	3	154	43,2	1,38	2	não	3	8,0
	L45FFD_AC5	3	154	40,7	1,38	2	não	2	8,0
	L45_AC1	3	154	39,0	1,38	0	-	4	10,0
	L45_AC5	3	154	41,1	1,38	0	-	2	8,0

F–um furo; FF–dois furos; S–sem acréscimo de armadura de flexão, D–com acréscimo de armadura de flexão; CG–com grampo de ancoragem; ACi–armadura de cisalhamento do tipo 'i'

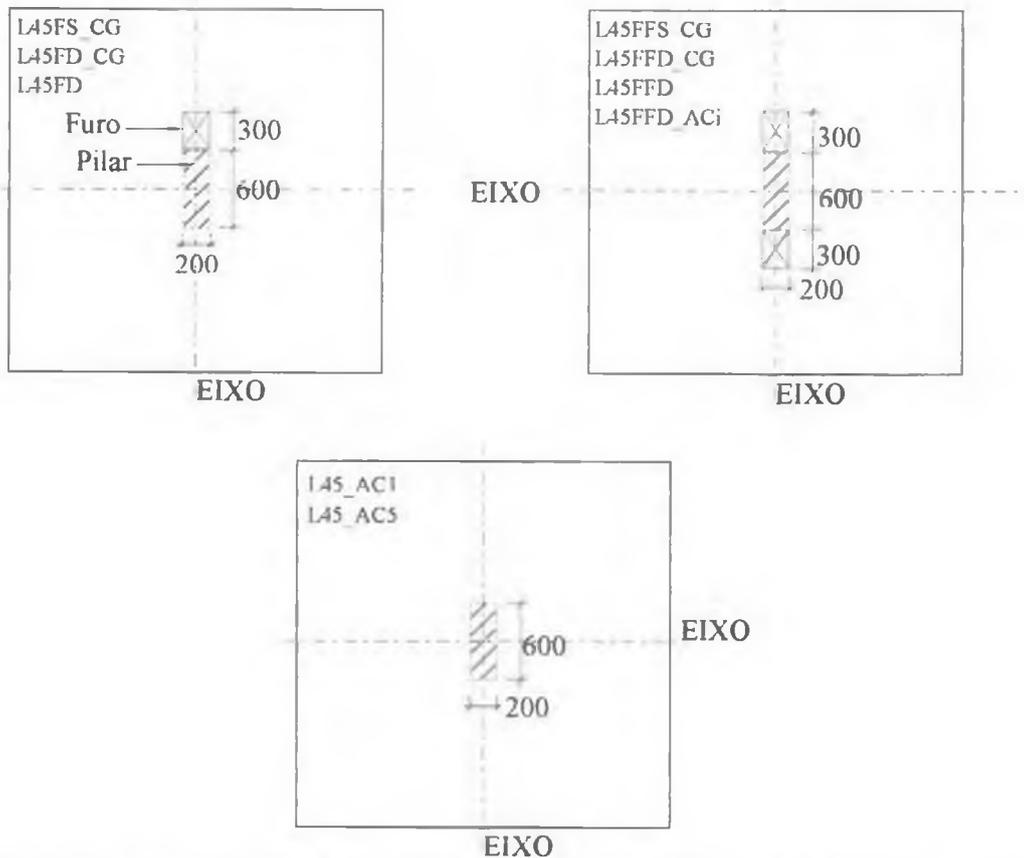


Figura 3.3 – Características geométricas das lajes das Séries 2 e 3 (unidades em mm)

3.2.2.2 – ARMADURA DE FLEXÃO

Nas lajes da Série 2, variou-se a taxa de armadura de flexão, de uma laje para outra, da seguinte forma: fez-se o acréscimo de barras na região adjacente às faces do furo, cujo número de barras correspondeu àquele das barras interrompidas devido à presença dos furos (L45FD, L45FFD, L45FD_CG e L45FFD_CG), e, também, adicionou-se grampos de ancoragem nas barras citadas (L45FD_CG e L45FFD_CG), como mostra a Fig .3.4.

O detalhamento da armadura de flexão das lajes da Série 3 seguiu a disposição utilizada na laje L45FFD, como mostra a Fig.3.5. Quanto às lajes monolíticas da Série 3, a armadura de flexão foi composta da mesma quantidade de barras contínuas da laje L45FFD. O cobrimento das barras das armaduras de flexão superior e inferior das lajes das séries 2 e 3 foram, respectivamente, 30 mm e 25 mm.

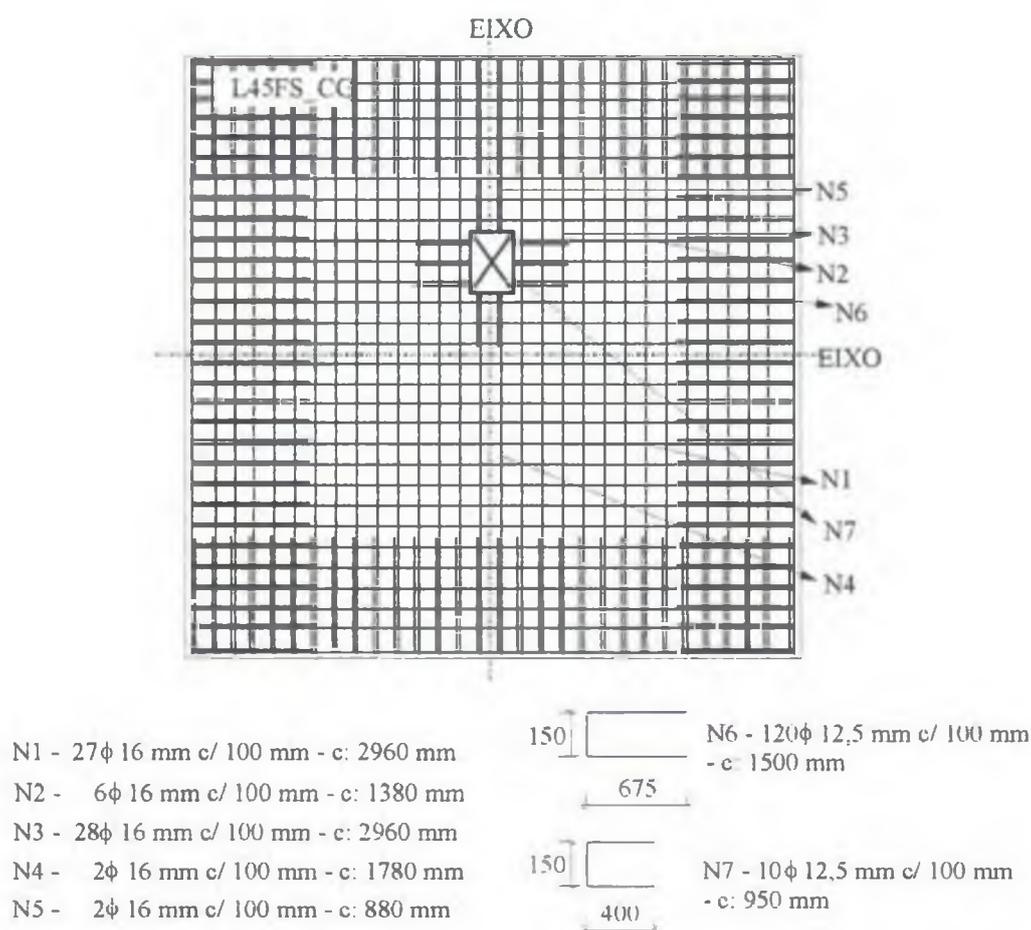


Figura 3.4 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 2

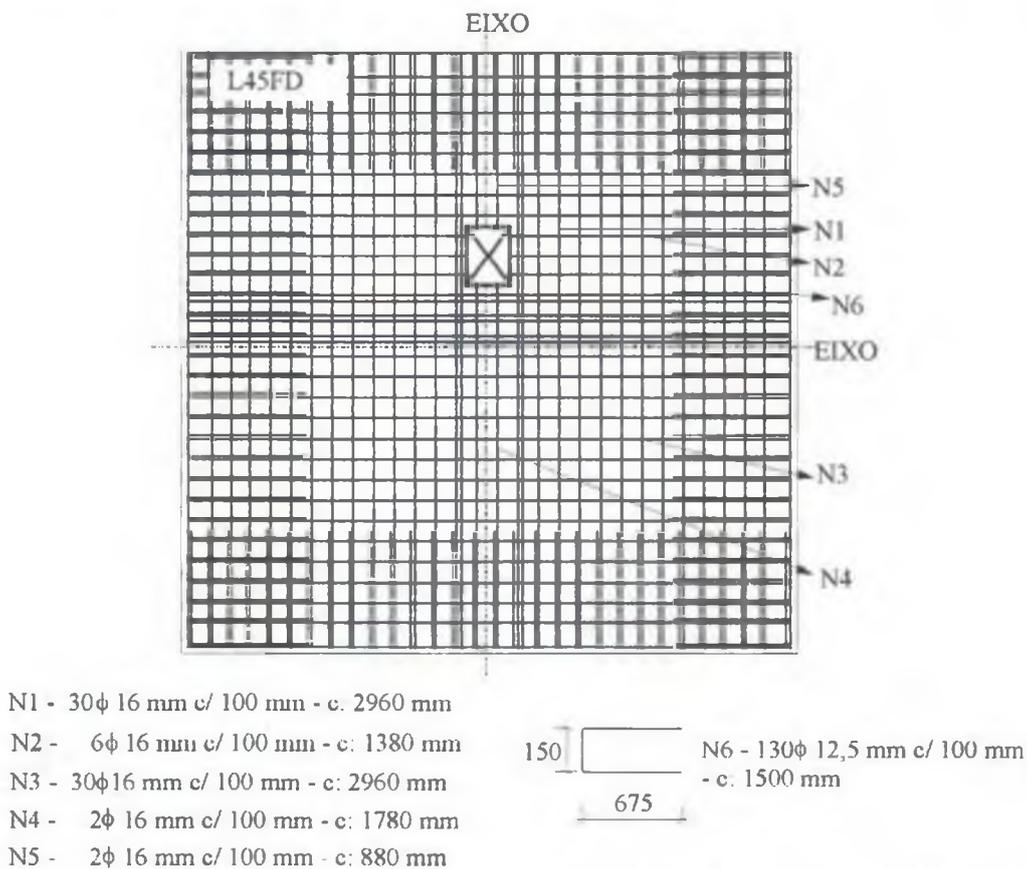
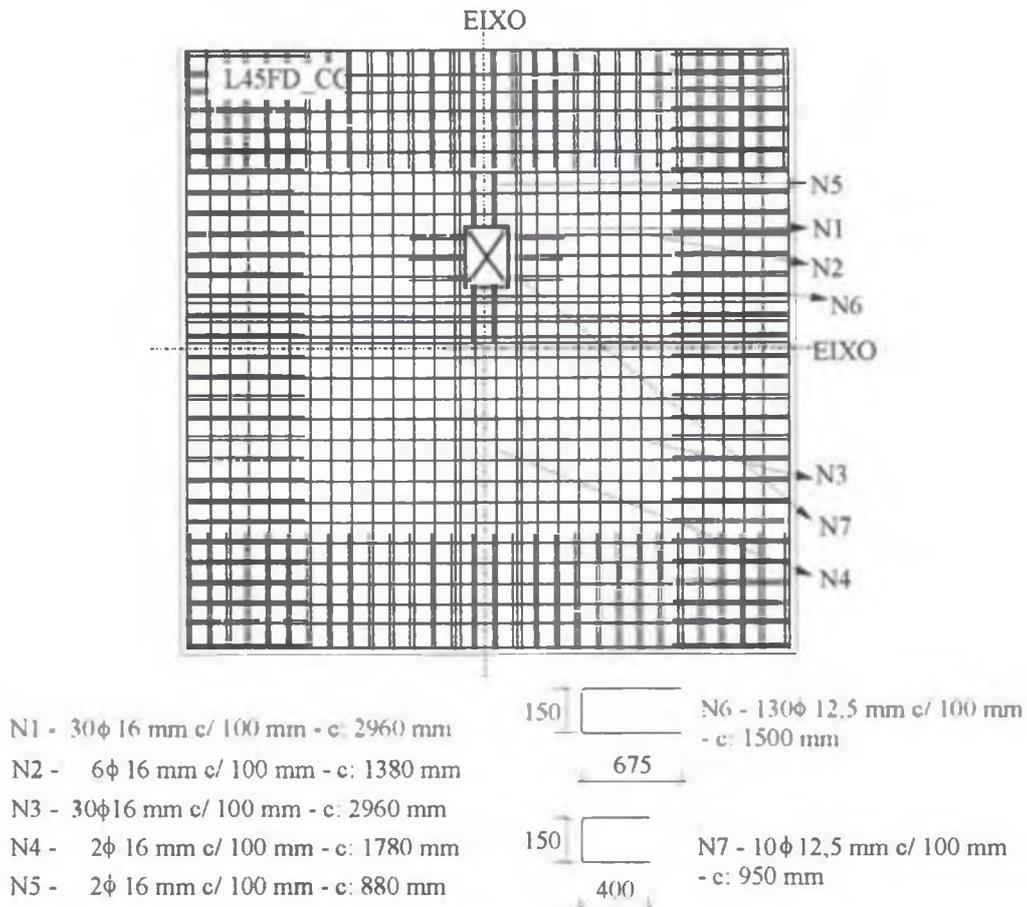
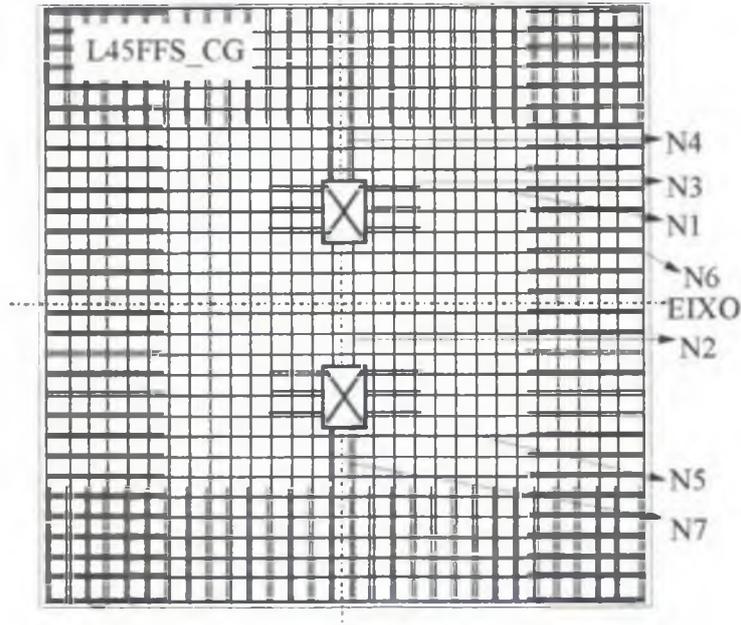
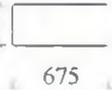


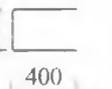
Figura 3.4 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 2 (continuação)

EIXO

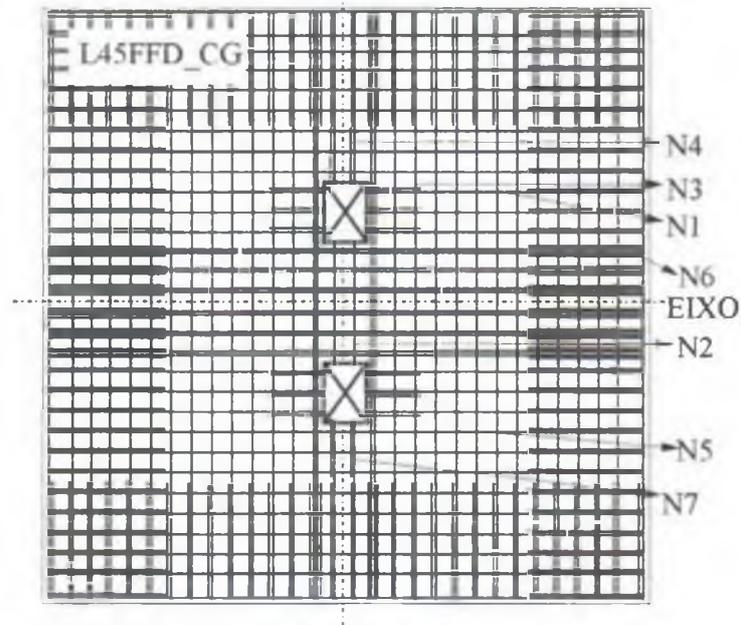


- N1 - 12 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 1380 mm
- N2 - 2 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 600 mm
- N3 - 28 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm
- N4 - 4 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 880 mm
- N5 - 24 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm

150  N6 - 120 ϕ 12,5 mm c/ 100 mm
- c: 1500 mm

150  N7 - 16 ϕ 12,5 mm c/ 100 mm
- c: 950 mm

EIXO

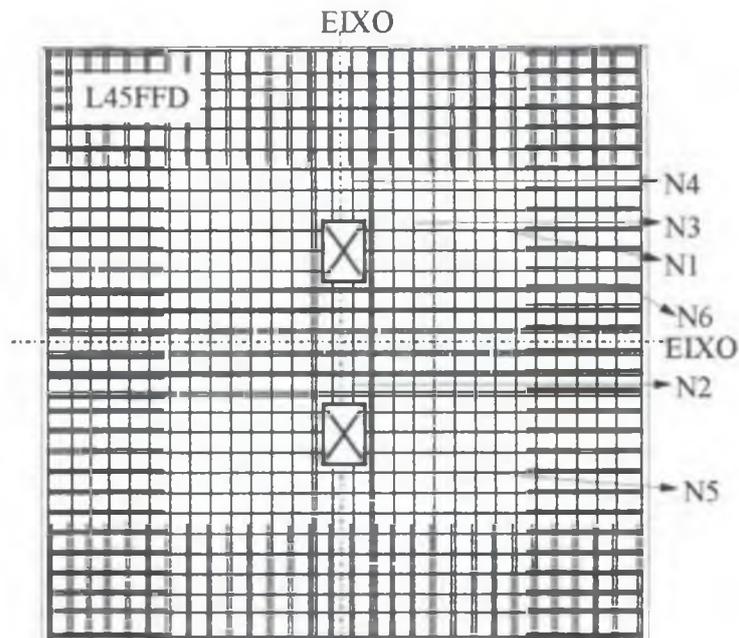


- N1 - 12 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 1380 mm
- N2 - 2 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 600 mm
- N3 - 30 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm
- N4 - 4 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 880 mm
- N5 - 30 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm

150  N6 - 136 ϕ 12,5 mm c/ 100 mm
- c: 1500 mm

150  N7 - 16 ϕ 12,5 mm c/ 100 mm
- c: 950 mm

Figura 3.4 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 2 (continuação)



N1 - 12 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 1380 mm

N2 - 2 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 600 mm

N3 - 30 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm

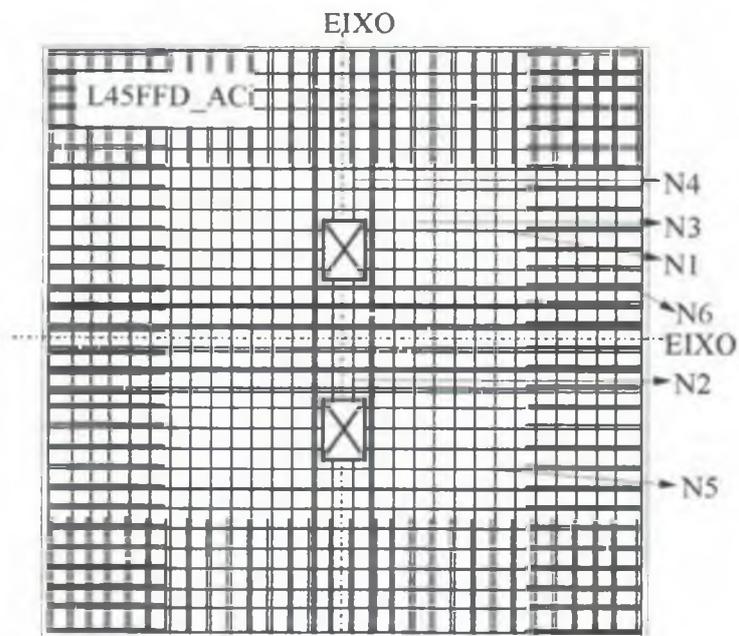
N4 - 4 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 880 mm

N5 - 30 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm



N6 - 136 ϕ 12,5 mm c/ 100 mm
- c: 1500 mm

Figura 3.4 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 2 (continuação)



N1 - 12 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 1380 mm

N2 - 2 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 600 mm

N3 - 30 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm

N4 - 4 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 880 mm

N5 - 30 ϕ 16 mm c/ 100 mm - c: 2960 mm



N6 - 136 ϕ 12,5 mm c/ 100 mm
- c: 1500 mm

Figura 3.5 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 3

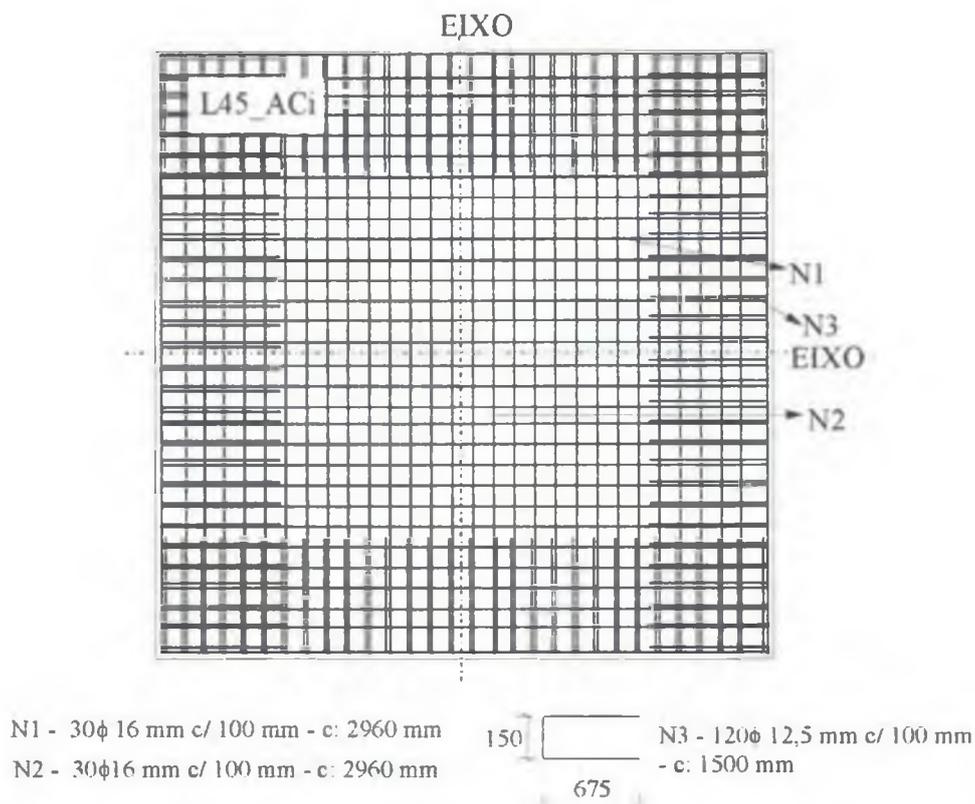


Figura 3.5 – Detalhamento da armadura superior flexão das lajes da Série 3 (continuação)

3.2.2.3 – CONCRETO

O concreto utilizado nas lajes das séries 2 e 3 foi semelhante ao das lajes da Série 1.

3.2.2.4 - ARMADURA DE CISALHAMENTO

A armadura de cisalhamento utilizada nas lajes deste grupo foram os “studs”. Este tipo de armadura de cisalhamento é constituída por vergalhões, posicionados verticalmente na laje, e interconectados por barras chatas de aço soldadas nas duas extremidades do vergalhão.

Os “studs” foram ancorados externamente às barras da armadura de flexão superior e inferior, envolvendo-as e conduzindo, assim, a uma ancoragem mais efetiva da armadura de cisalhamento. Diversos trabalhos realizados com a utilização deste tipo de armadura de cisalhamento, no combate à punção (ELGABRY & GHALI (1990); GHALI & DILGER (1991), GOMES (1991); ANDRADE (1999); TRAUTWEIN (2001), entre outros) têm

mostrado a sua eficiência, quando disposta de forma a envolver a armadura de flexão, além da NBR-6118 (2003) recomendar a sua utilização.

A Fig.3.6 mostra o detalhe dos “studs” utilizados nas lajes, e a Fig.3.7, o detalhamento da armadura de cisalhamento na laje. A Fig.3.8 apresenta fotografias das armaduras de cisalhamento posicionadas nas lajes prontas para a moldagem.

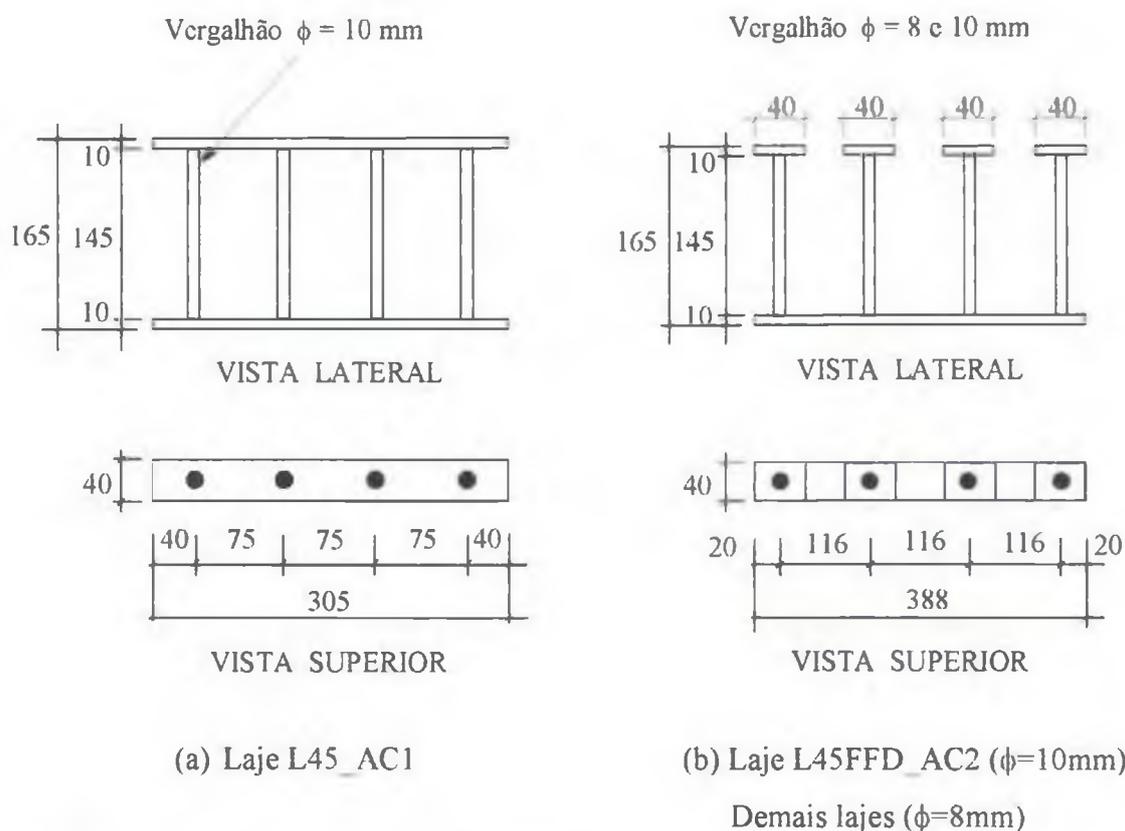
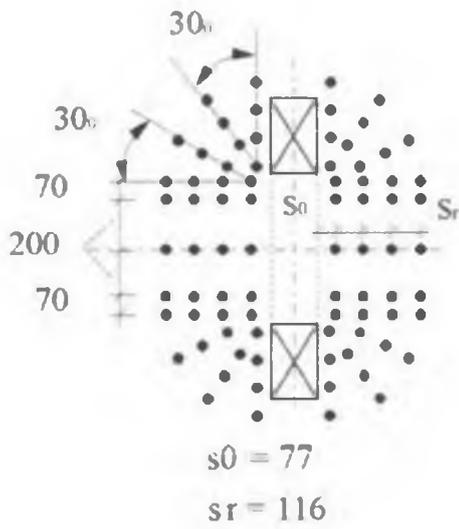
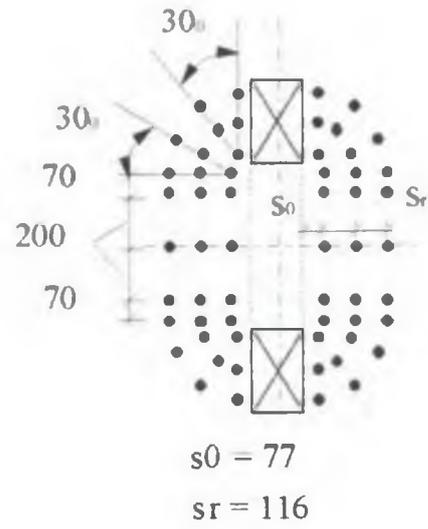


Figura 3.6 - Detalhe dos “studs” utilizados nas lajes da Série 3 – unidades em mm

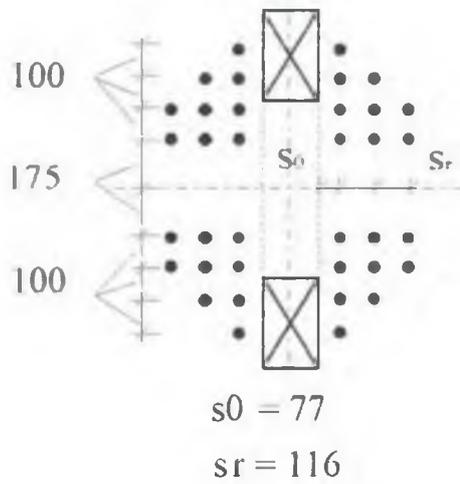
L45FFD_AC2



L45FFD_AC3



L45FFD_AC4



L45FFD_AC5

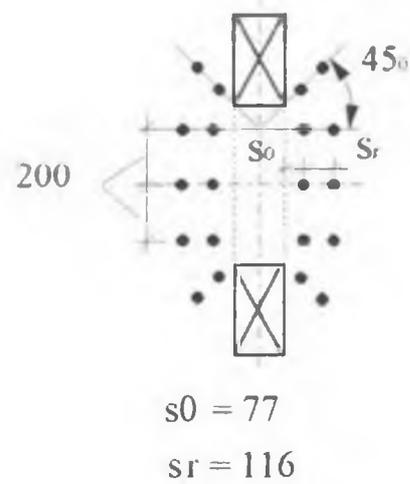


Figura 3.7 – Detalhamento da armadura de cisalhamento das lajes da Série 3 - unidades em mm

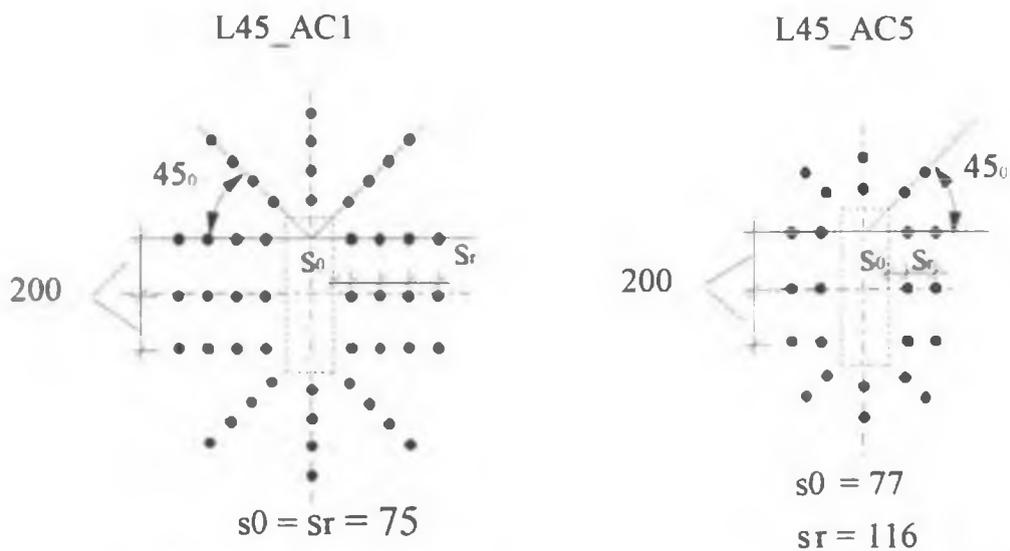


Figura 3.7 – Detalhamento da armadura de cisalhamento das lajes da Série 3 - unidades em mm (continuação)



Figura 3.8 – Fotografias da armadura de cisalhamento na armação de flexão das lajes



Figura 3.8 – Fotografias da armadura de cisalhamento na armação de flexão das lajes
(continuação)

3.3 – MOLDAGEM E CURA

As lajes foram moldadas em uma forma metálica composta por uma base e laterais, formadas por chapas de aço devidamente ligadas por parafusos e enrijecedores.

Foram encaixados 4 tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, em cada lado da forma, e mantidos verticalmente através de tábuas de compensado ligadas entre si nas extremidades. Isto foi feito com a finalidade de deixar furos na laje para posterior passagem dos tirantes de fixação durante a montagem do sistema de ensaio. A Fig.3.9 mostra uma fotografia com a forma metálica juntamente com a armação, pronta para a moldagem da laje.



Figura 3.9 – Fotografia da laje com furo e pronta para a moldagem

Antes da moldagem de cada laje, foram colocados 2 a 3 estribos de 10 mm de diâmetro na região central da laje onde estaria posicionado o pilar, entre a malha superior e inferior da armadura de flexão, para manter as malhas na posição correta.

Para a moldagem das lajes com furos, foram confeccionados caixotes de madeirite, de dimensões 200 mm x 300 mm x 200 mm (largura x comprimento x altura), que foram colocados no local do furo, deixado na armação da laje. A altura do caixote correspondeu à altura total da laje, com a finalidade de facilitar o processo de desempenamento do concreto da laje.

Adicionalmente, foram colocadas e amarradas com arame recozido, 3 (três) alças de aço diâmetro 16 mm na ferragem superior da laje, com a finalidade de facilitar o transporte da

laje moldada para o local de ensaio. A Fig. 3.10 mostra o detalhe e a posição das alças e estribos nas lajes.

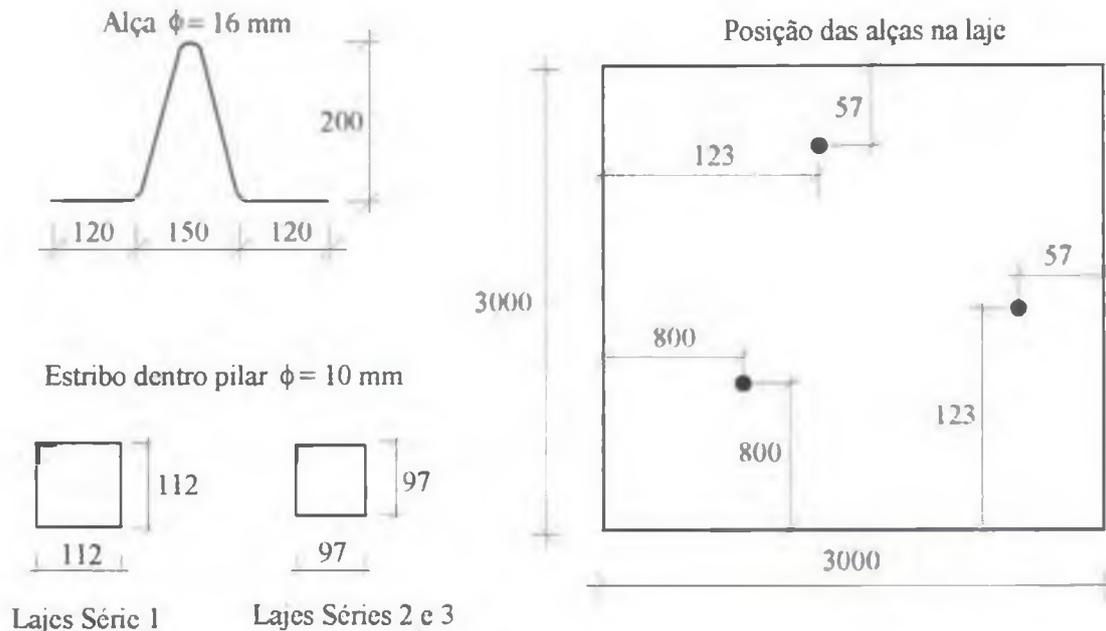


Figura 3.10 – Detalhe dos estribos e das alças, e posicionamento das alças nas lajes (unidades em mm)

Durante a concretagem de cada laje, foram moldados 20 (vinte) corpos de prova cilíndricos de dimensões 150 mm x 300 mm, para a realização do controle de qualidade do concreto com a obtenção das características de resistência à compressão simples (NBR-5739/94), resistência à tração por compressão diametral (NBR-7222/94) e o módulo de elasticidade longitudinal (NBR-8522/84).

Após o início de pega do concreto, foram feitas ensecadeiras de argamassa percorrendo as laterais da laje permitindo a formação de um reservatório de água. A cura da laje foi feita ao ar livre durante, aproximadamente, 14 (quatorze) dias, sob o reservatório de água, enquanto os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida (temperatura ambiente e 100% de umidade). Após este período, a laje foi transportada para o local de ensaio através de um caminhão “munck”, e mantida sob temperatura e umidade ambiente.

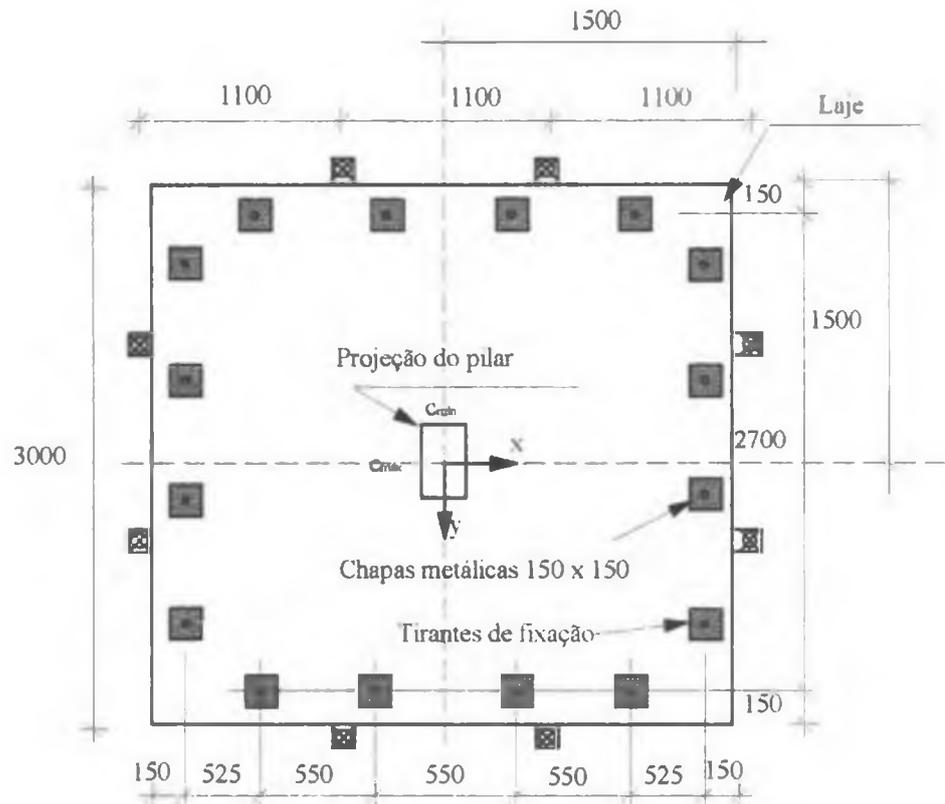
3.4 – SISTEMA DE ENSAIO

O sistema de ensaio das lajes consistiu na fixação das bordas das lajes à laje de reação, através de 16 (dezesseis) tirantes de aço, com diâmetro de 25 mm, sendo 4 (quatro) tirantes em cada borda, e de um sistema constituído de vigas metálicas.

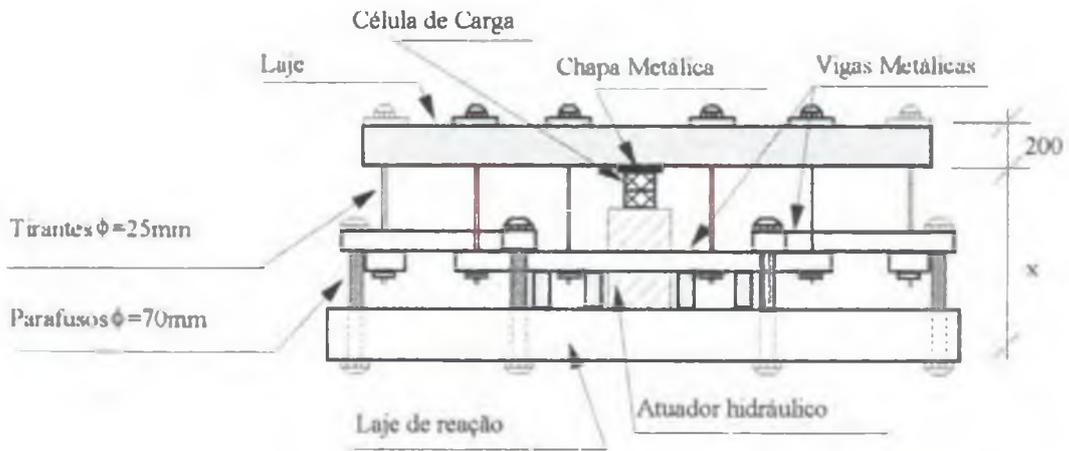
A carga foi aplicada no centro da face inferior da laje através de um atuador hidráulico (Difasa - modelo R2006), com capacidade para aplicação de carga de 2000 kN, alimentado por uma bomba manual. A carga aplicada foi representada por um pilar interno com as dimensões citadas nas Tabs. 3.1 e 3.3.

O controle de aplicação das cargas foi realizado através de uma célula de carga (Transdutec), com capacidade de 2000 kN, acoplada a um sistema de aquisição de dados (marca Transdutec). O sistema de ensaio, juntamente com os detalhes da transmissão da força aplicada na laje para a laje de reação, é mostrado na Fig.3.11.

Devido algumas lajes ensaiadas não apresentarem, nas direções x e y, eixos de simetria iguais (caso das lajes da Série 2 com apenas um furo), os tirantes de fixação das lajes, que atuaram na transmissão à laje de reação da carga aplicada, foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência. Os extensômetros foram posicionados a meia altura e nas faces interna e externa de cada tirante para medição das deformações ocorridas devido à carga P aplicada, e para, conseqüentemente, determinação das forças atuantes em cada tirante. O ANEXO D apresenta as leituras das deformações registradas durante os ensaios e as respectivas forças.



PLANTA



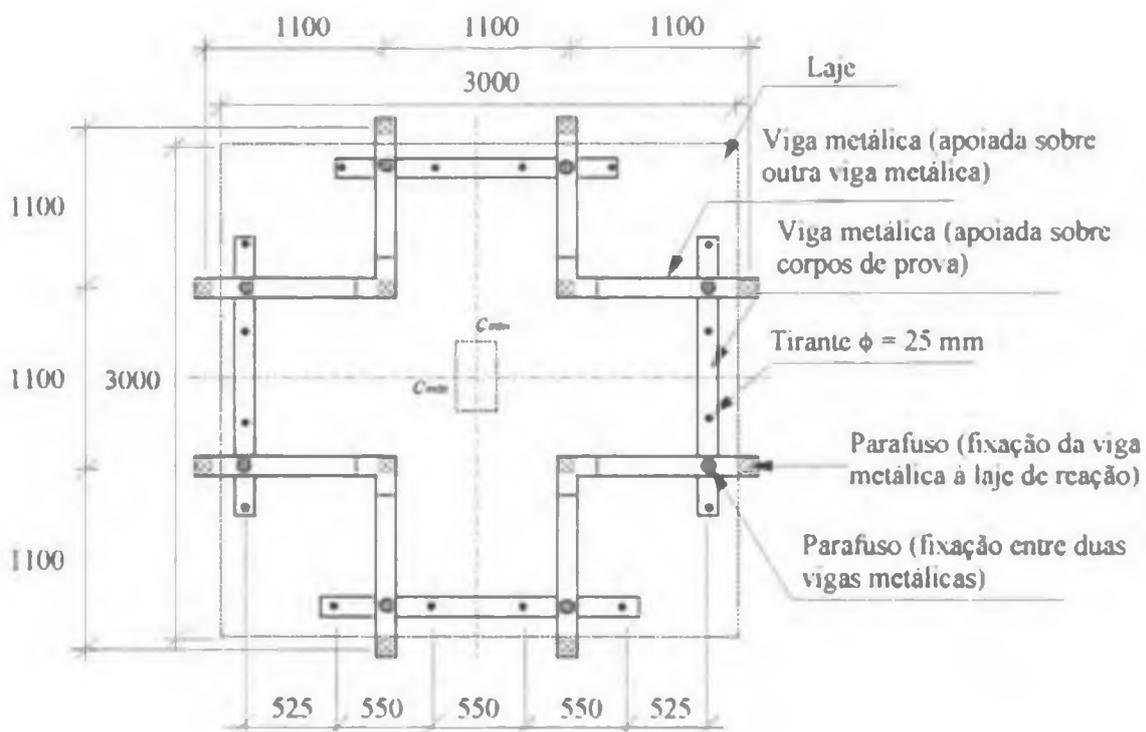
VISTA

x variável em função das dimensões do pilar

Figura 3.11 – Sistema de ensaio - unidades em mm



DETALHE



DETALHE - SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA CARGA

Figura 3.11 – Sistema de ensaio - unidades em mm (continuação)

3.5 – INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação das lajes compreendeu o monitoramento das cargas aplicadas, dos deslocamentos verticais das lajes e das deformações na armadura superior de flexão e da armadura de cisalhamento. A formação e desenvolvimento das fissuras foram registrados com marcação à tinta de seus traçados feitos no bordo superior da laje.

3.5.1 – LAJES COM PILARES RETANGULARES (SÉRIE 1)

3.5.1.1 – DEFLETÔMETROS

Para medir os deslocamentos verticais de vários pontos da laje em relação aos pontos de fixação, foram utilizados no bordo superior da laje, 9 (nove) defletômetros analógicos, com curso de 50 mm e resolução de 0,01 mm. Para medir o deslocamento da laje como corpo rígido em relação à laje de reação, foram utilizados nos pontos de fixação, nas duas direções perpendiculares, 2 (dois) defletômetros digitais com curso de 10 mm e resolução de 0,001 mm. As leituras dos deslocamentos foram efetuadas em duas direções perpendiculares (direção x e y), com a origem do sistema de coordenadas sendo representada pelo centro da laje, como mostra a Fig.3.12.

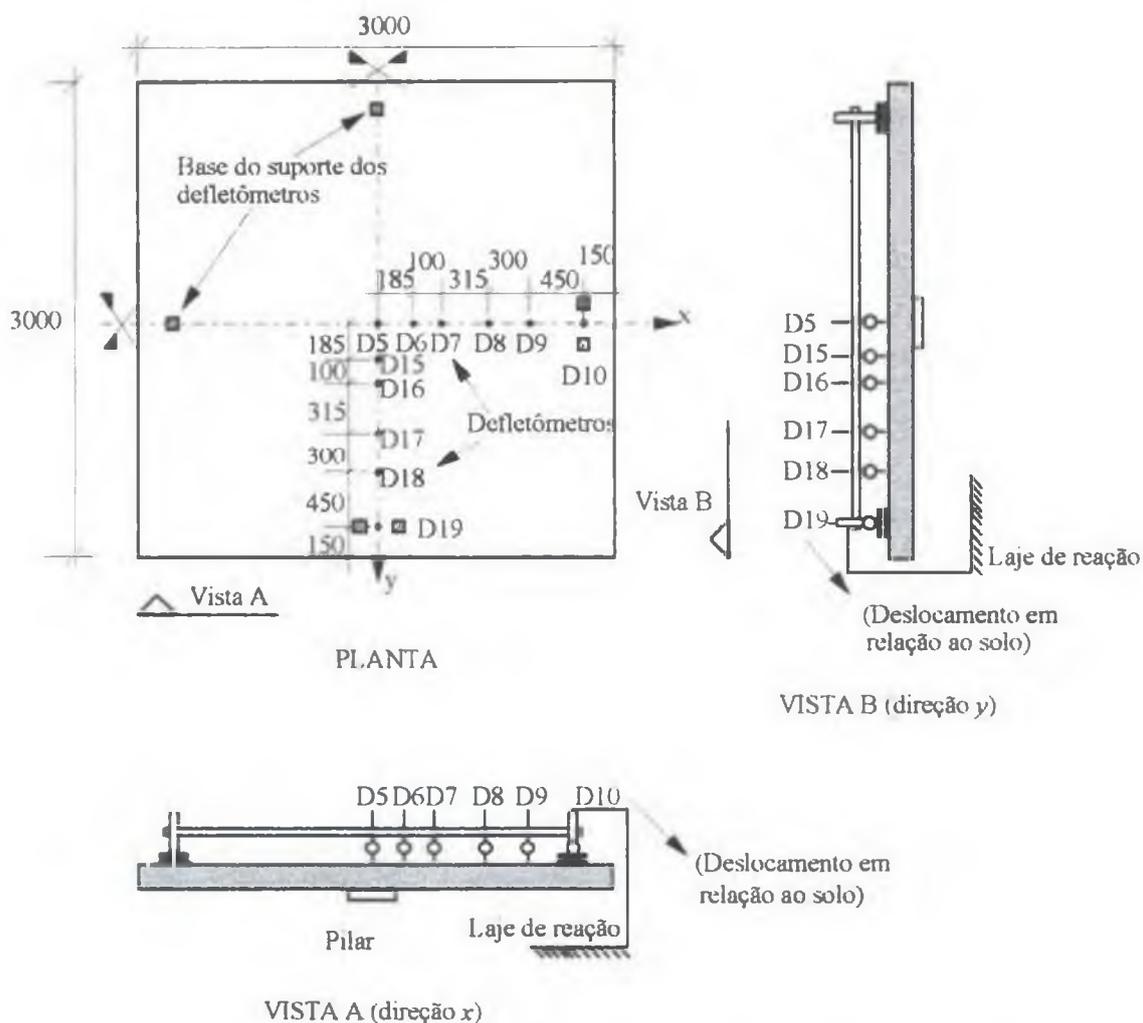


Figura 3.12 – Posicionamento dos defletômetros nas lajes da Série 1 (unidades em mm)

3.5.1.2 – EXTENSÔMETROS

A armadura superior de flexão das lajes foi instrumentada com extensômetros elétricos de resistência (marca KYOWA do tipo KFG-5-120-C1-11) com a finalidade de medir diretamente deformações específicas. Para a leitura dos extensômetros durante os ensaios das lajes, foram utilizadas duas pontes digitais Tokyo Sokki Kenkyujo modelo TDS 601/TDS 302. Em cada posição definida na armadura, foram colados 1 (um) par de extensômetros, em lados diametralmente opostos da barra, para se obter um valor médio para as deformações medidas.

A Fig.3.13 mostra o posicionamento dos extensômetros nas barras da armadura superior de flexão das lajes da Série 1. Foram medidas deformações nas barras da armadura nas direções radiais e tangenciais (Fig.3.14), e em pontos localizados próximos e ao longo do lado maior do pilar.

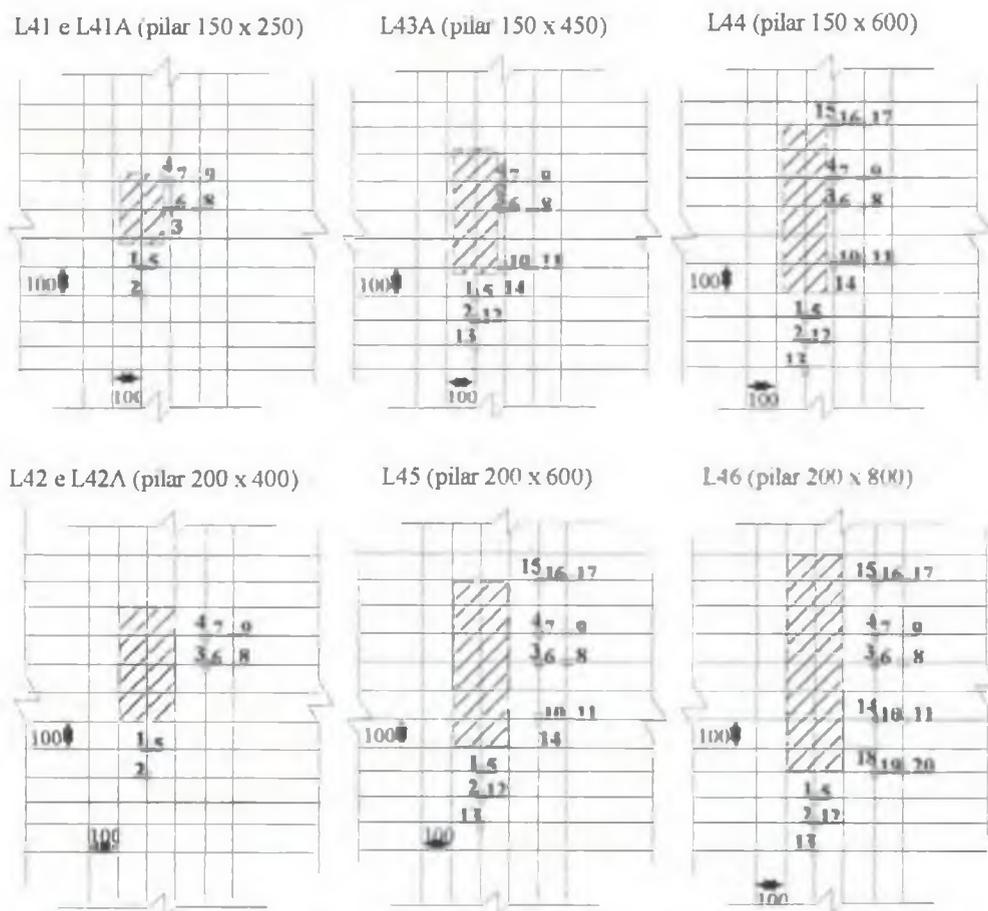


Figura 3.13 – Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão das lajes da Série 1 (unidades em mm)

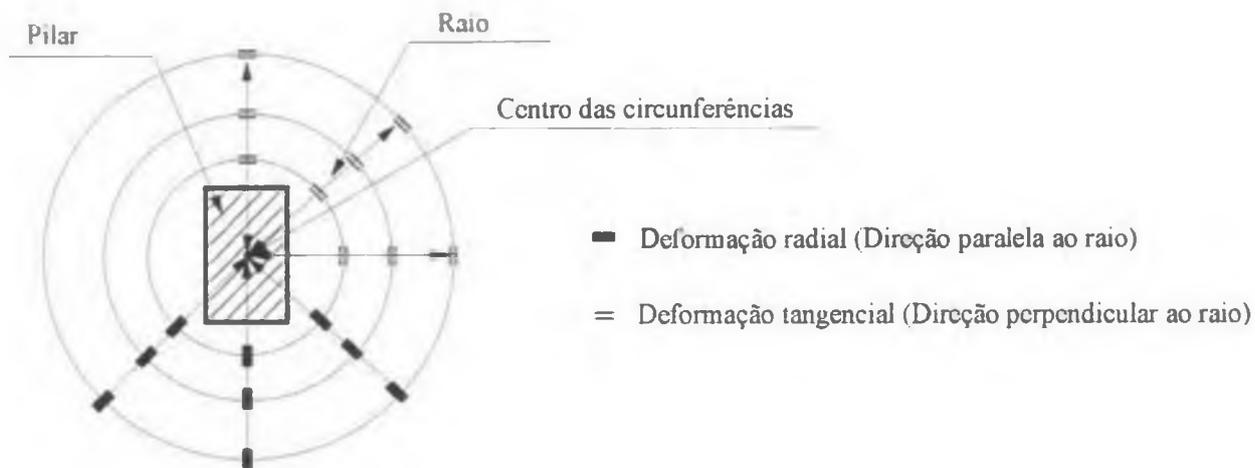


Figura 3.14 – Definição de deformações radiais e tangenciais

3.5.2 – LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO (SÉRIES 2 E 3)

3.5.2.1 – DEFLETÔMETROS

Nas lajes L45FS_CG, L45FD_CG, L45FFS_CG e L45FFD_CG, da Série 2, a quantidade e a distribuição dos defletômetros sobre a laje foi semelhante à utilizada nas lajes da Série 1. Após a confecção de novo sistema de suporte para os defletômetros, foi possível realizar medições mais completas. Nas demais lajes, os deslocamentos verticais foram medidos ao longo do comprimento da laje, nas duas direções perpendiculares x e y , com a origem do sistema de coordenadas coincidente com o centro da laje, como mostra a Fig.3.15.

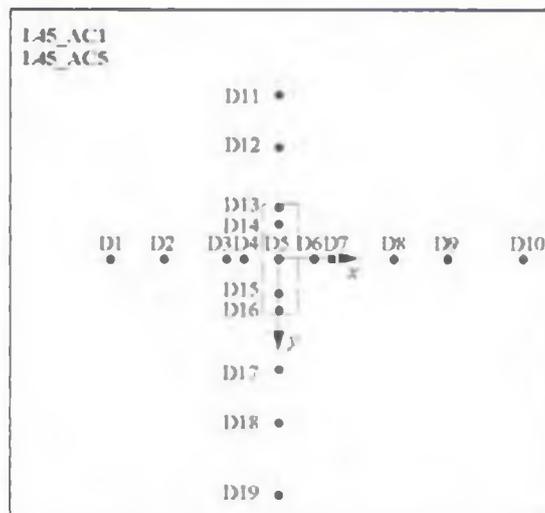
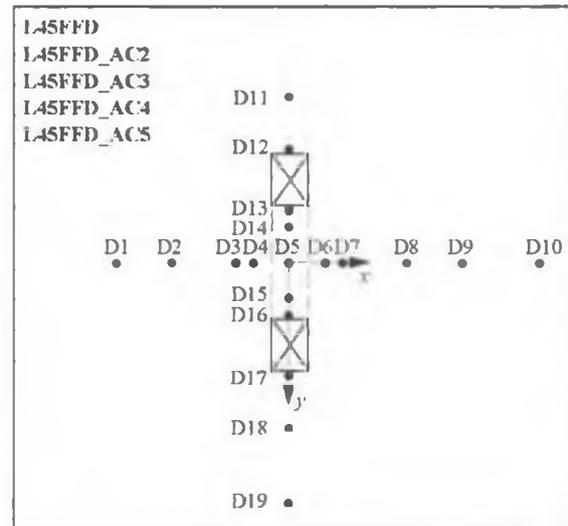
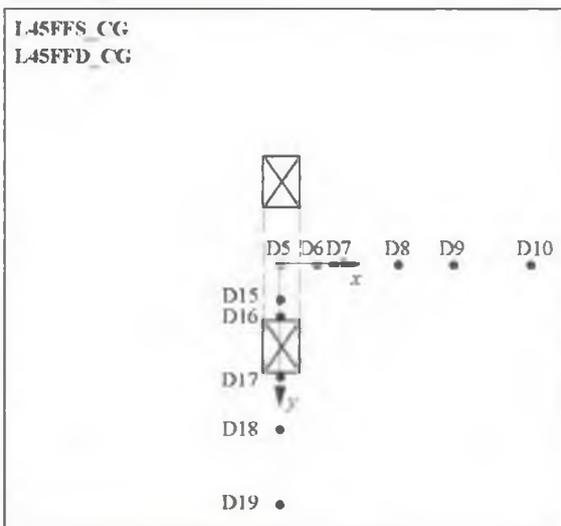
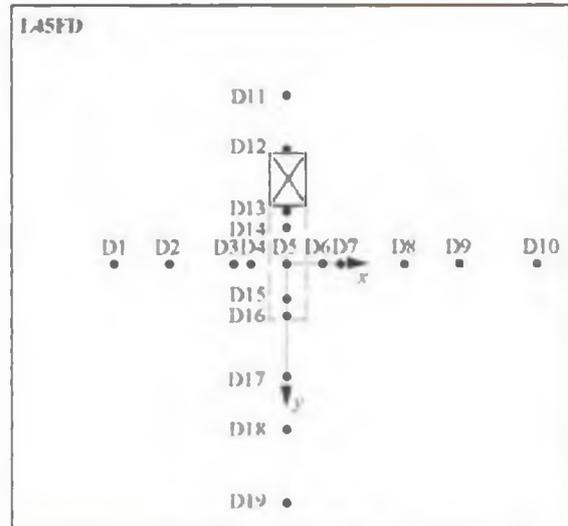
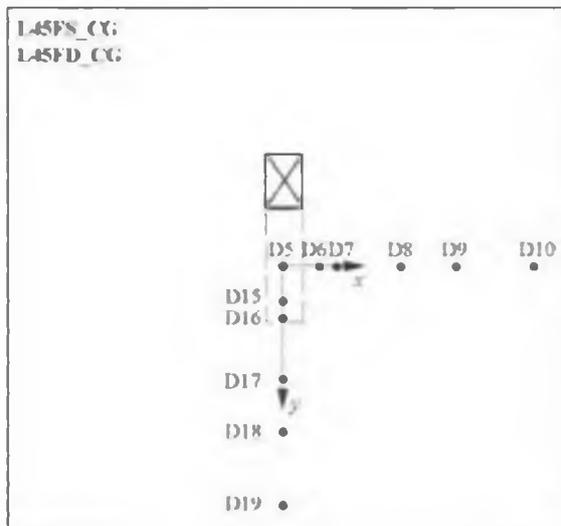


Figura 3.15 – Posicionamento dos defletômetros nas lajes das Séries 2 e 3

3.5.2.2 – EXTENSÔMETROS

O posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão das lajes da Série 2 é apresentado na Fig.3.16. A Fig.3.17 apresenta o posicionamento dos extensômetros nas barras da armadura de cisalhamento das lajes da Série 3.

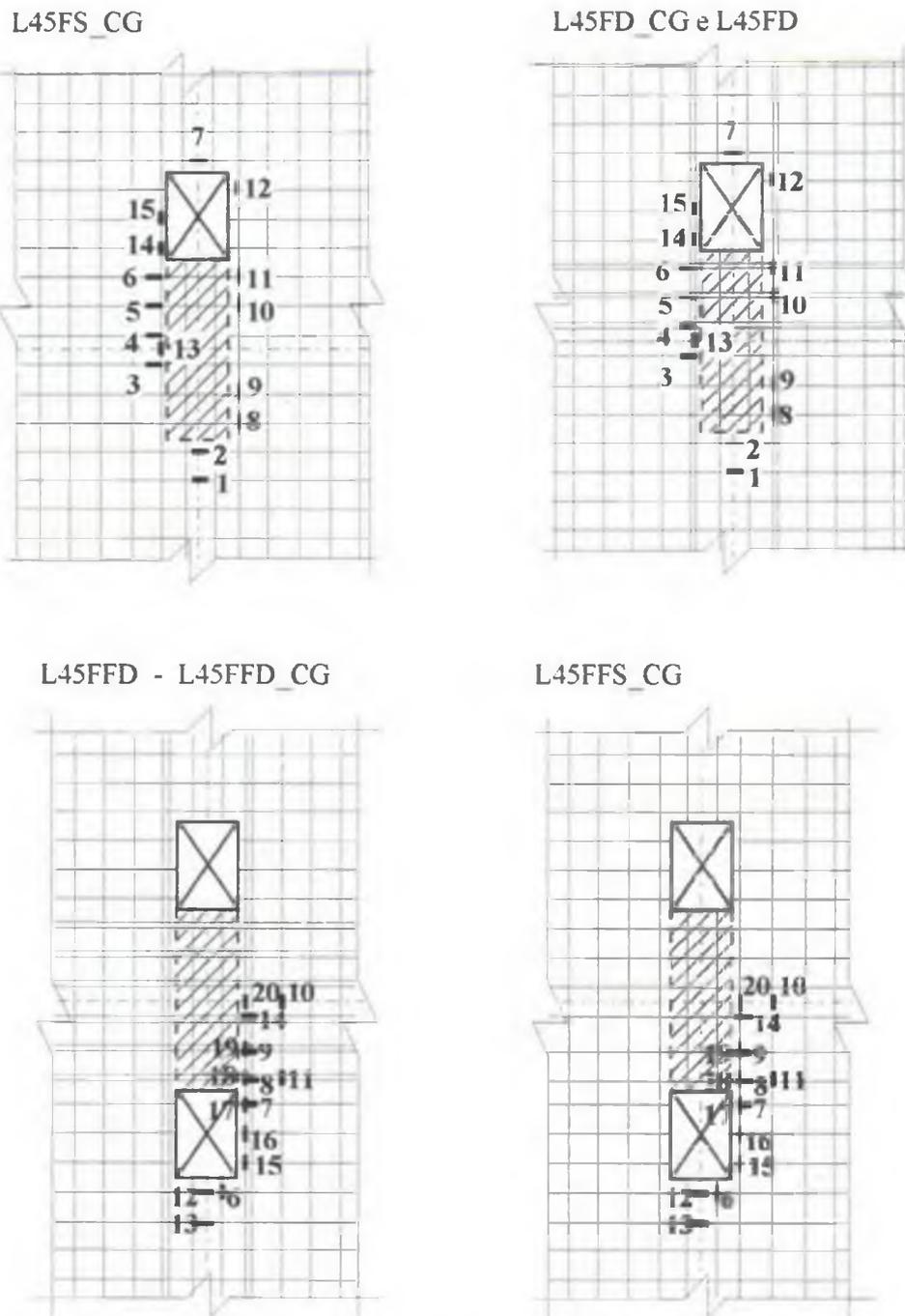


Figura 3.16 – Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão das lajes da Série 2

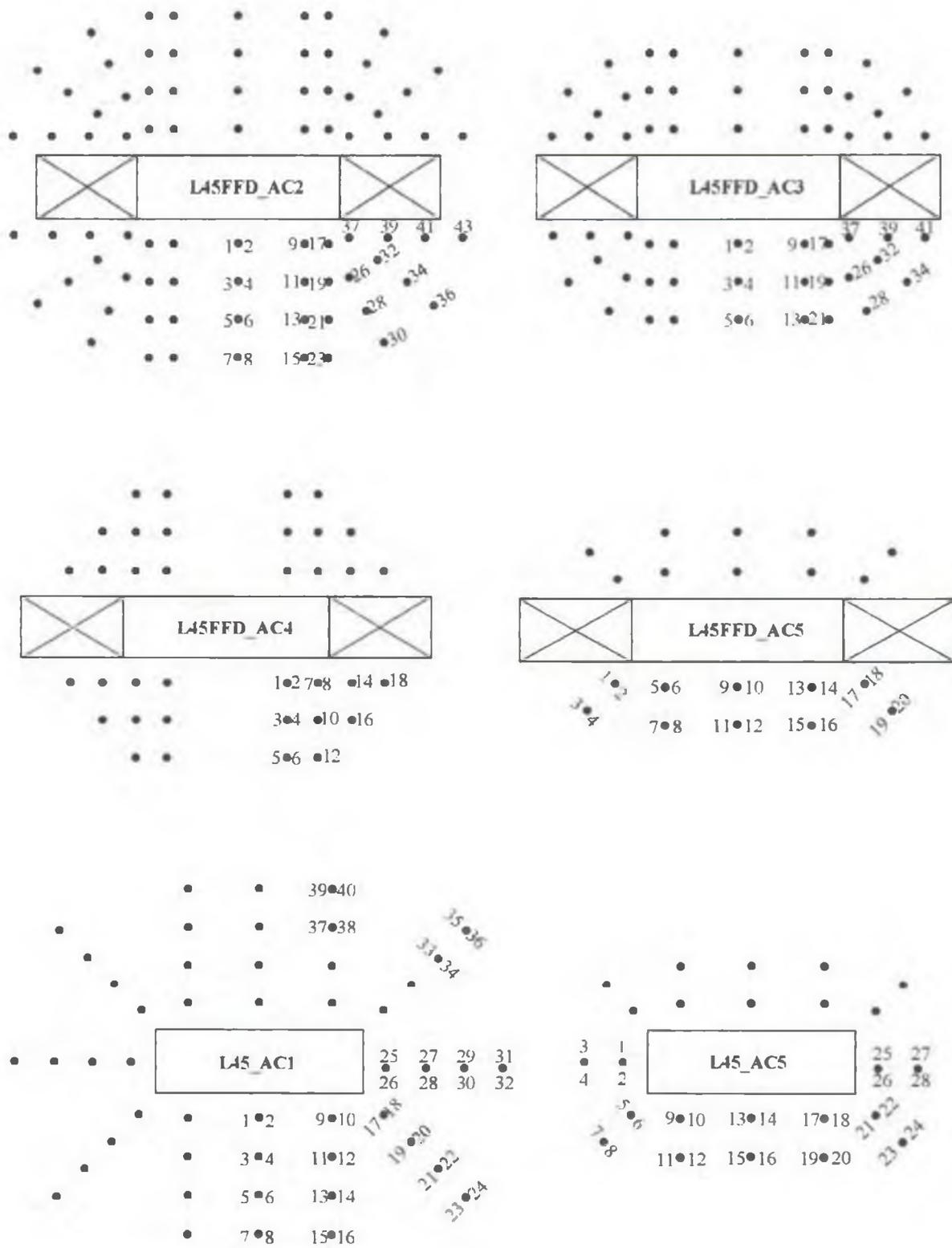


Figura 3.17 – Posicionamento dos extensômetros na armadura de cisalhamento das lajes da Série 3

3.6 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Anteriormente à colocação da laje sobre quatro apoios (corpos de prova cilíndricos de dimensões 300 mm x 600 mm), o macaco e a célula de carga foram devidamente centralizados na laje de reação, em relação ao sistema de ensaio, e, as chapas de aço, para a simulação do pilar, foram colocadas sobre a célula de carga, de acordo com a Fig.3.11.

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, que se fixaram no centro da face inferior das lajes. O sistema de simulação do pilar consistiu na disposição das chapas de aço, de forma que a carga a ser aplicada fosse correta e integralmente transmitida. Para isso, proporcionou-se o espalhamento da carga, diferentemente para cada seção de pilar, com ângulo de aproximadamente 45 graus, como pode ser visto no detalhe da Fig.3.11.

Em seguida, a laje foi fixada à laje de reação utilizando 16 (dezesesseis) tirantes e chapas de aço (150 mm x 150 mm x 10 mm) chumbadas na laje com argamassa para a distribuição da carga. Procurou-se manter o nivelamento da laje em relação ao solo.

O ensaio teve duração média de duas horas, sendo que aplicação da carga foi feita em incrementos de carga de 50 kN. Inicialmente, realizou-se um pré-carregamento de 0 kN até 100 kN, em incrementos de 50 kN, com a finalidade de acomodar a estrutura e verificar o funcionamento dos instrumentos de medição. Após esta verificação, retirou-se o carregamento, e então, iniciou-se a aplicação da carga até a ruptura da laje. A cada incremento de carga, foram registradas as leituras dos extensômetros e defletômetros, feitas as marcações das fissuras na face superior da laje e os registros com fotografias.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES COM PILARES RETANGULARES

4.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios das lajes com pilares retangulares (Série 1), e uma discussão a respeito. São apresentados e discutidos resultados de propriedades dos materiais constituintes das lajes, deslocamentos verticais, deformações das armaduras de flexão, fissuração, modos e superfícies de ruptura, e resistências das lajes.

Comparações entre os resultados experimentais da presente pesquisa e os obtidos da literatura são realizadas, para a verificação do comportamento e resistência das lajes devido à influência da geometria do pilar.

4.2 – MATERIAIS

4.2.1 – CONCRETO

As características mecânicas do concreto, utilizado na confecção das lajes, foram obtidas através de ensaios específicos, para obtenção da resistência à compressão simples (NBR-5739/94), resistência à tração por compressão diametral (NBR-7222/94), e módulo de elasticidade longitudinal (NBR-8522/84).

O controle de qualidade do concreto foi realizado, através dos ensaios citados em corpos de prova cilíndricos, de dimensões 150 mm x 300 mm, aos 7, 14, 28, 90 dias, e especialmente, no dia do ensaio da laje, para o acompanhamento do crescimento da resistência do concreto com a idade.

Em cada idade, foram ensaiados 4 (quatro) corpos de prova, sendo dois para a obtenção da resistência do concreto à compressão simples, e dois para o ensaio de módulo de elasticidade, que foram reaproveitados para o ensaio de tração por compressão diametral.

O ensaio dos corpos de prova para obtenção do módulo de elasticidade tangente foi realizado com a utilização de um “compressômetro” acoplado ao corpo de prova, e leituras da variação do deslocamento, em relação ao comprimento inicial do trecho definido pelo “compressômetro”, foram registradas como função das forças aplicadas (tensão de compressão variando do valor inicial de 0,5 MPa ao valor final, equivalente a 40% da resistência à compressão do concreto).

A Tab.4.1 apresenta os valores médios dos resultados individuais, obtidos nos ensaios realizados nos corpos de prova. Os resultados individuais dos ensaios constam no ANEXO A.

É apresentada uma discussão a respeito dos resultados de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade longitudinal do concreto, estimados pela norma brasileira correspondente, com a finalidade de observar a coerência dos resultados experimentais. A NBR-6118 (2003) recomenda que, na falta de resultados experimentais de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e módulo de elasticidade longitudinal inicial (E_c), sejam utilizadas, respectivamente, as Eqs. 4.1 e 4.2.

$$f_{ct,sp} = \frac{f_{ct}}{0,9} \quad (\text{MPa}) \quad \text{Eq. 4.1}$$

com

$$\begin{aligned} f_{ct,inf} &= 0,7 f_{ctm} \\ f_{ct,sup} &= 1,3 f_{ctm} \end{aligned} \quad \text{e} \quad f_{ctm} = 0,3 f_{ckj}^{2/3}$$

onde

f_{ckj} é a resistência característica à compressão do concreto aos j dias, em MPa

f_{ctm} é a resistência média à tração direta do concreto, em MPa,

$f_{ct,inf}$ é a resistência inferior à tração direta do concreto, em MPa;

$f_{ct,sup}$ é a resistência superior à tração direta do concreto, em MPa

$$E_c = 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (\text{GPa}) \quad \text{Eq. 4.2}$$

onde E_c é o módulo de elasticidade inicial, em MPa.

Os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral se apresentaram dentro do intervalo de valores estipulado pela NBR-6118 (2003). Entretanto, os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto, apresentaram-se com valores inferiores aos fornecidos pela expressão da norma brasileira entre 22% e 40%, como mostra a Tab.4.1.

No entanto, a expressão proposta pela NBR-6118 (2003), para o cálculo do módulo de elasticidade inicial, é recomendada para a estimativa aos vinte e oito dias de idade. Além disso, a norma não fixa limites para a resistência à compressão para a obtenção do módulo de elasticidade, o que pode conduzir a situações contra a segurança, à medida que a resistência do concreto é aumentada. A Tab. 4.1 apresenta os resultados estimados pela NB1 (2003) e os experimentais do módulo de elasticidade longitudinal do concreto (E_c).

Tabela 4.1 – Propriedades do concreto no dia do ensaio das lajes da Série 1

Laje	Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ct,sp}$ (NB1/03) (MPa)	E_c (GPa)	E_c (NB1/03) (GPa)	$E_c / E_{c(NB1/03)}$
L42	16	43,2	4,0	$2,9 < f_{ct,sp} < 5,3$	25,1	36,8	0,68
L42A	17	36,2	3,6	$2,5 < f_{ct,sp} < 4,7$	22,2	33,7	0,66
L45	19	42,0	4,3	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,2$	*	36,3	*
L46	14	39,3	4,4	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,0$	27,5	35,1	0,78
L41	37	44,7	4,3	$2,9 < f_{ct,sp} < 5,5$	23,6	37,4	0,63
L41A	17	38,9	3,4	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,0$	20,9	34,9	0,60
L43A	18	38,7	3,3	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,0$	22,4	34,8	0,64
L44	19	40,1	3,7	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,1$	*	35,5	*
MÉDIA		40,4	3,9	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,1$	23,6	35,6	0,67
D.P.		2,75	0,43	-	2,37	1,20	0,06
C.V. (%)		6,8	11,0	-	10,0	3,4	9,0

* ensaio não realizado, D.P. – desvio padrão, C.V. (%) – coeficiente de variação

4.2.2 – AÇO

As características mecânicas dos aços utilizados na confecção da armadura de flexão foram obtidas através de ensaios de tração axial realizados em amostras, de acordo com a NBR-6152 (1992). Os valores médios das tensões de escoamento e ruptura, das deformações de escoamento e dos módulos de elasticidade das amostras, são apresentados nas Tab.4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades dos aços utilizados nas lajes da Série 1

ϕ (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_s (mm/m)	E_s (GPa)	Utilização das Barras
8,0	674	814	4,7	215	Armadura inferior de flexão
12,5	617	748	4,0	214	Ancoragem armadura superior de flexão
16,0	604	757	4,6	229	Armadura superior de flexão

4.3 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS

As Figs. 4.1 a 4.8 apresentam os deslocamentos verticais das lajes da Série 1, nas direções ortogonais x e y , do início do carregamento até leituras próximas à ruptura. O ANEXO B apresenta tabelas com as leituras dos deslocamentos das lajes da Série 1.

Em níveis baixos de carregamento (aproximadamente 300 kN), os perfis de deslocamentos verticais nas direções x e y apresentaram-se bastante simétricos, em todas as lajes ensaiadas. A partir deste nível de carga, os perfis de deslocamentos não se mostraram simétricos, especialmente, com o aumento da relação c_{max}/c_{min} do pilar.

Os deslocamentos verticais das lajes, na direção y (direção paralela à maior dimensão da seção transversal do pilar), foram superiores aos deslocamentos equidistantes do centro da laje, na direção x , devido à restrição imposta pelo pilar. Os deslocamentos maiores fora do centro da laje representam menores deformações da laje, em relação aos pontos fora da região do pilar.

A distribuição de deslocamentos ao longo da laje, a partir da face do pilar, apresentou-se aproximadamente linear, até cargas próximas à ruptura, sugerindo que a porção de laje

externa ao pilar sofreu rotação como corpo rígido, e não apenas na parte externa à fissura de cisalhamento, como observado por KINNUNEN & NYLANDER (1960).

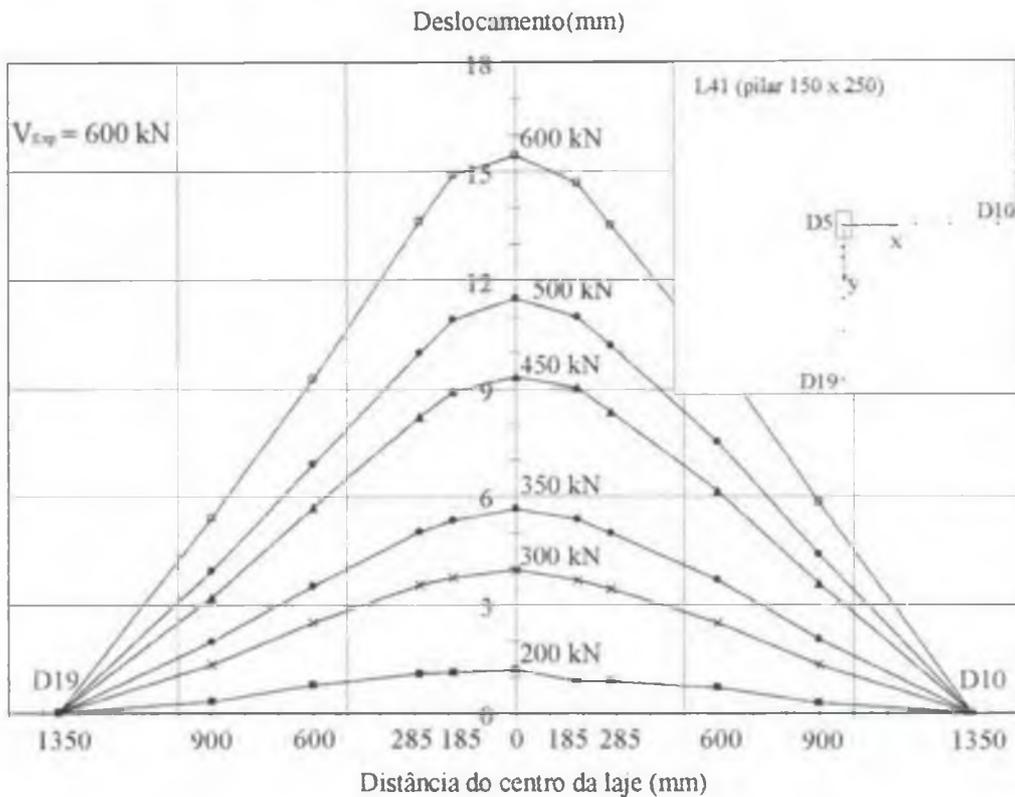


Figura 4.1 – Deslocamentos verticais da laje L41

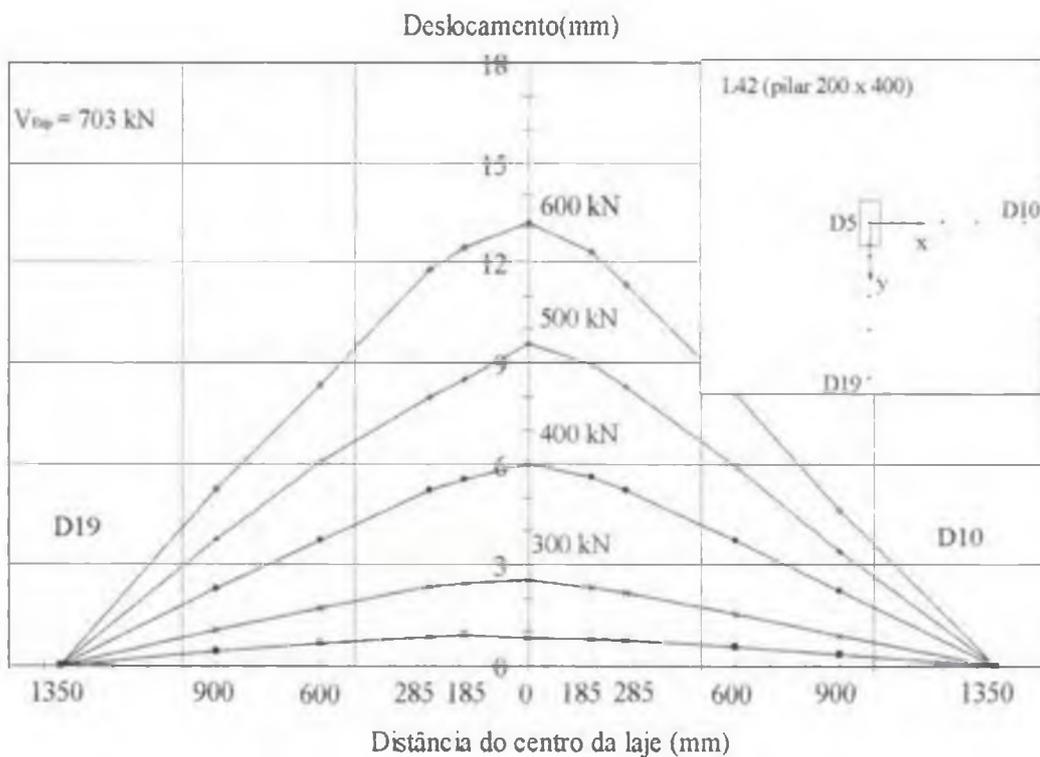


Figura 4.2 – Deslocamentos verticais da laje L42

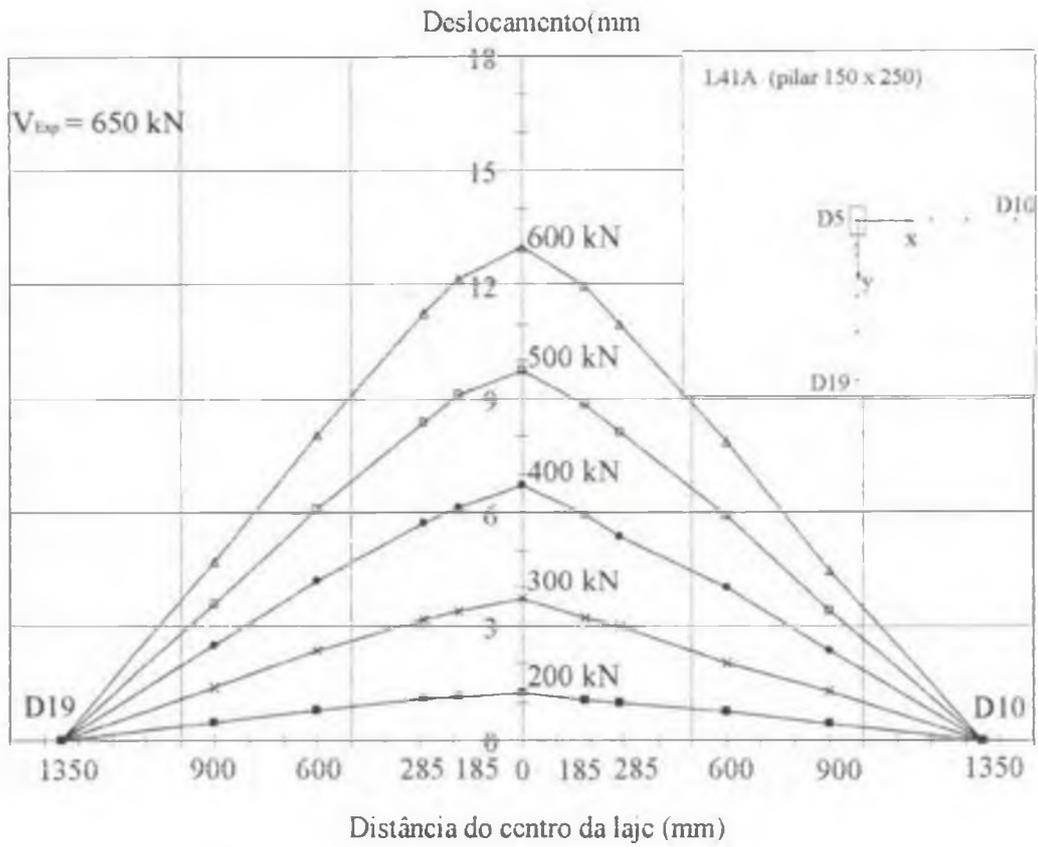


Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da laje L41A

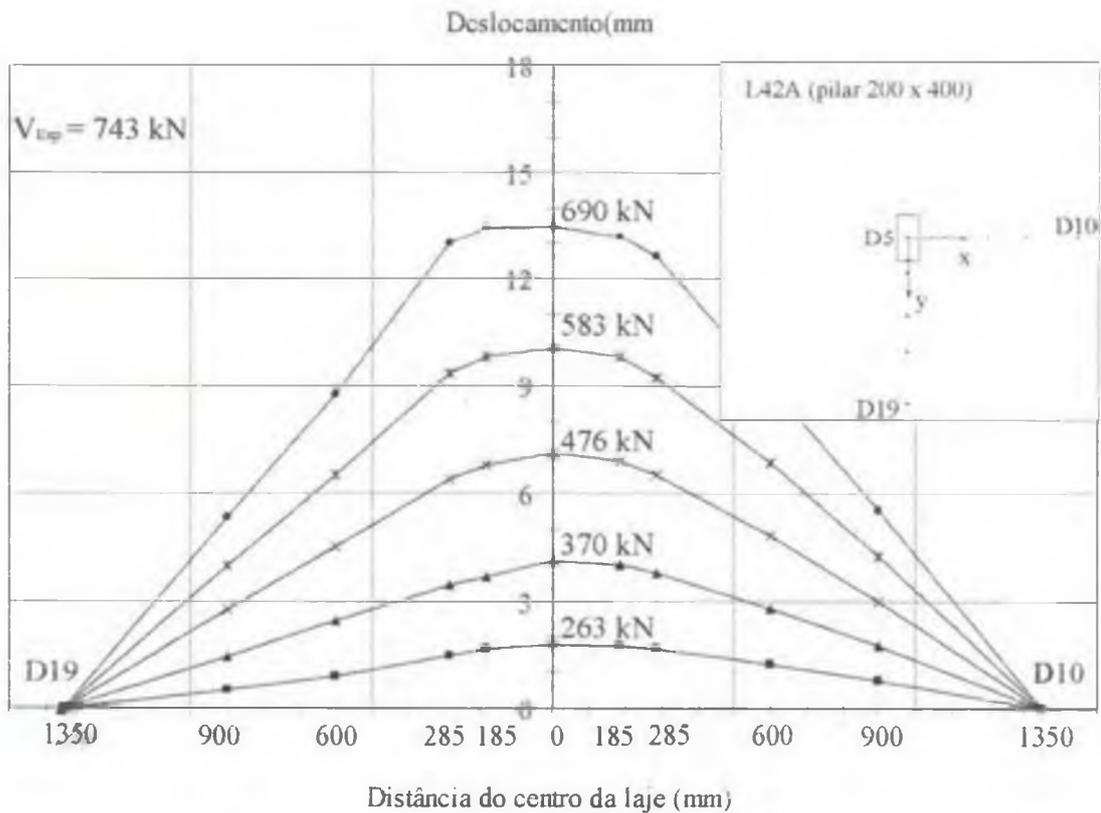


Figura 4.4 – Deslocamentos verticais da laje L42A

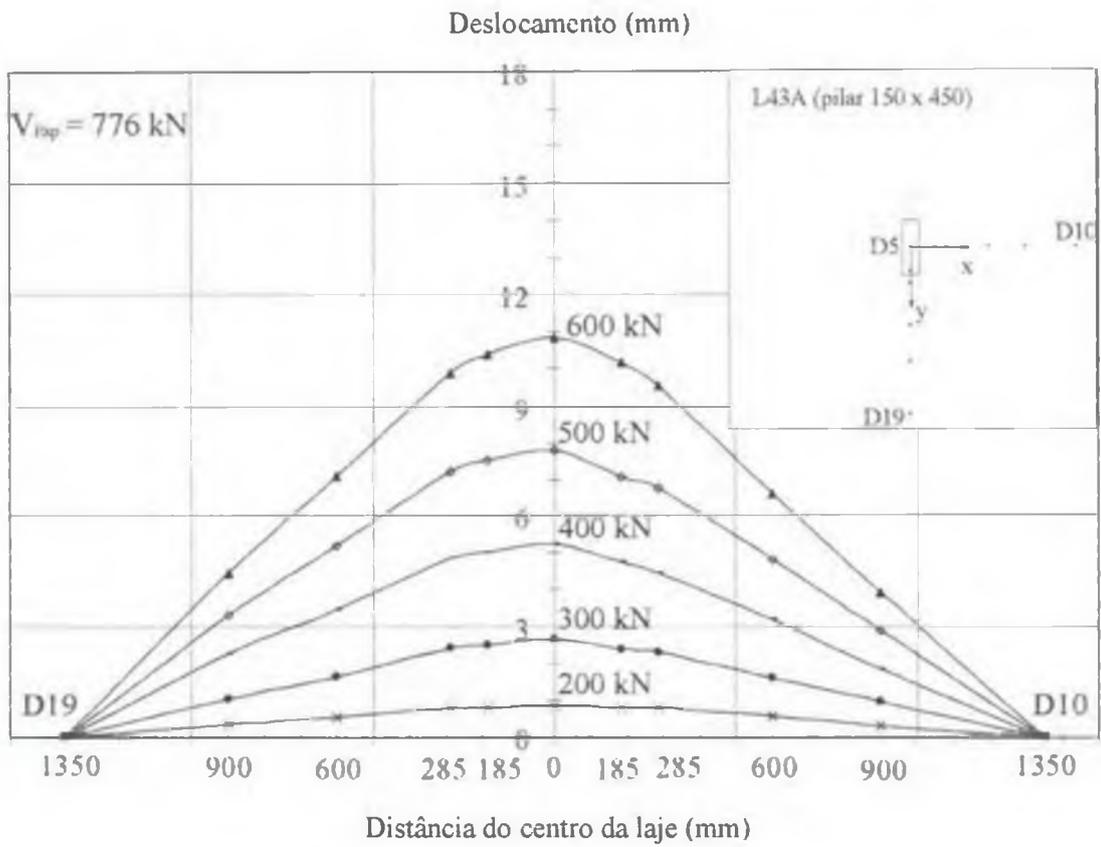


Figura 4.5 – Deslocamentos verticais da laje L43A

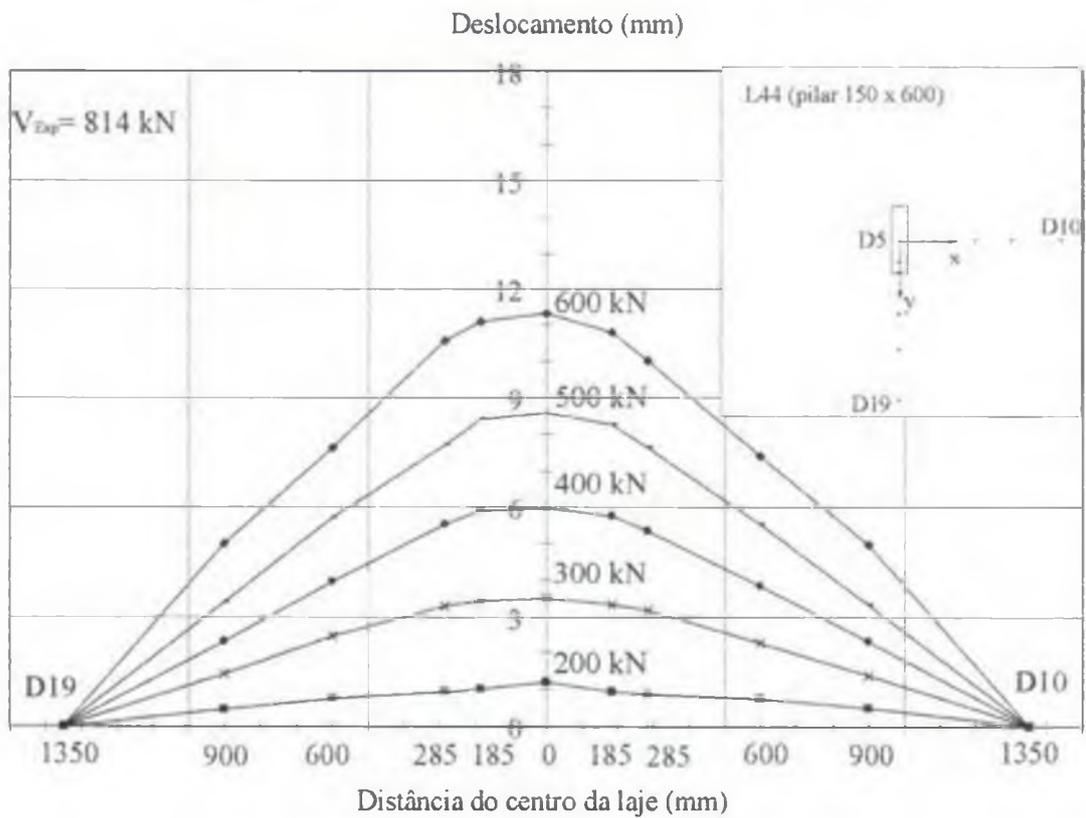


Figura 4.6 – Deslocamentos verticais da laje L44

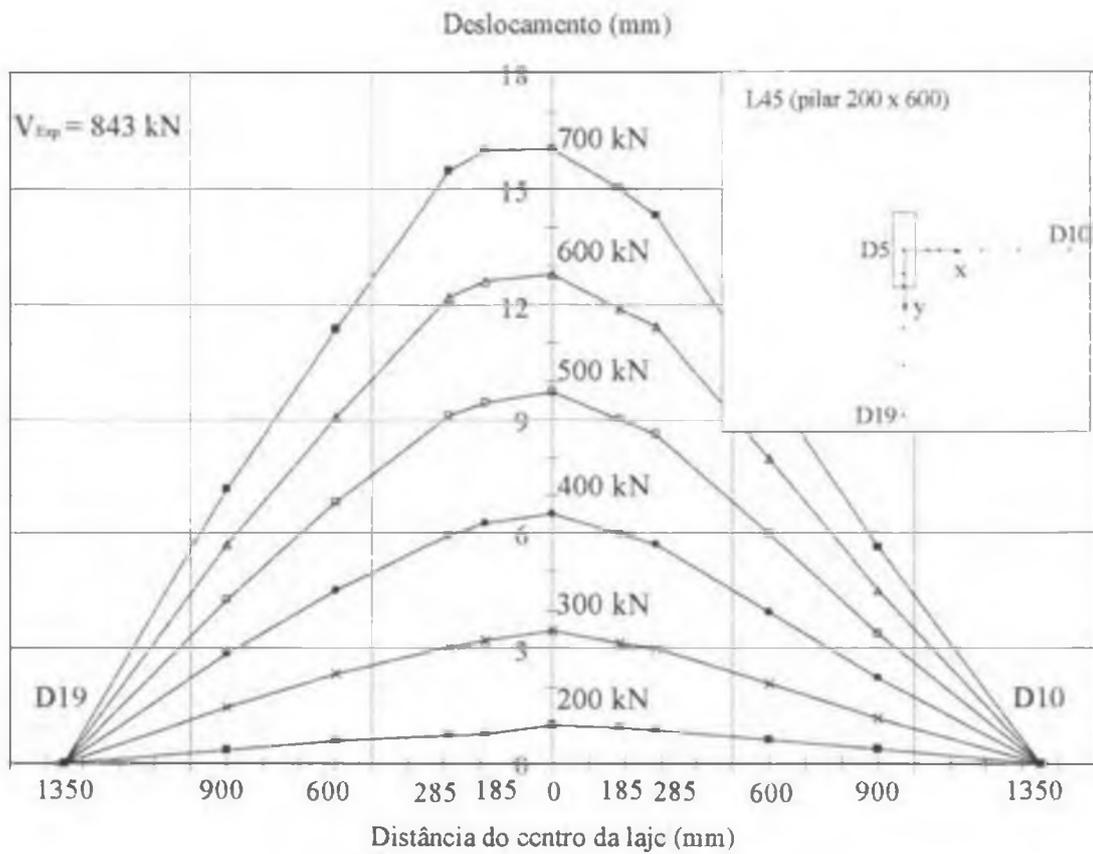


Figura 4.7 – Deslocamentos verticais da laje L45

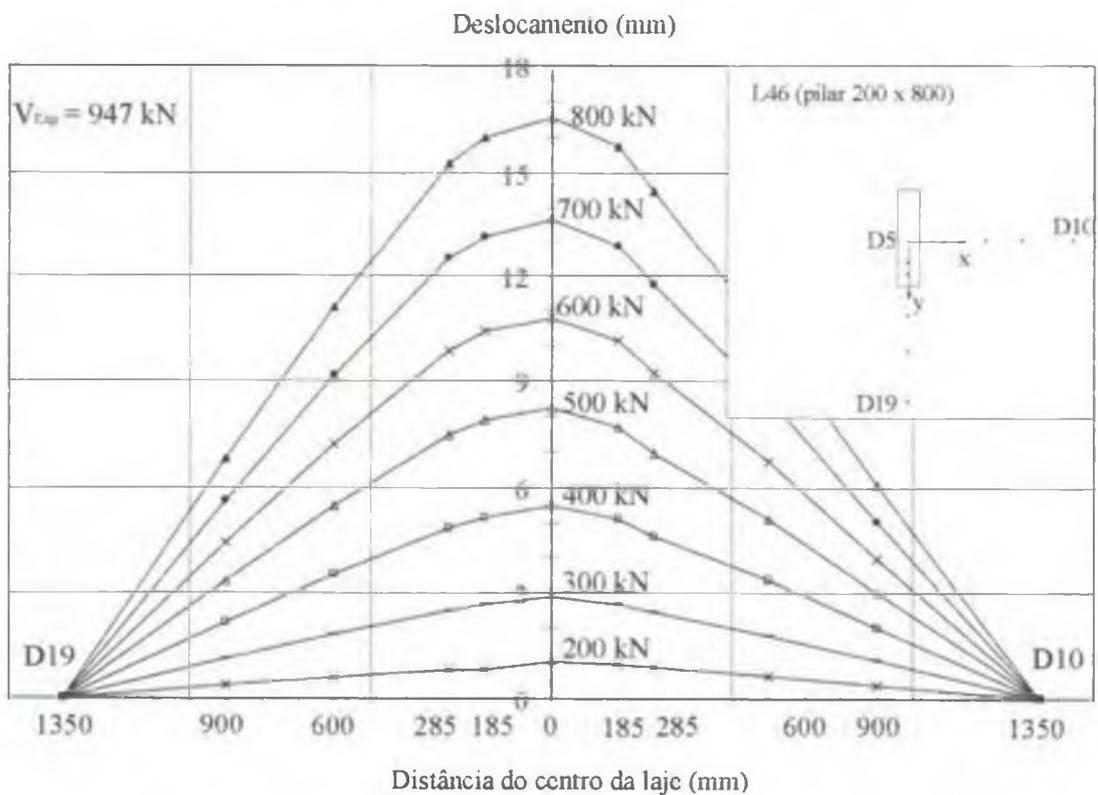


Figura 4.8 – Deslocamentos verticais da laje L46

A Fig.4.9 apresenta uma comparação entre os deslocamentos verticais, medidos no centro do pilar das lajes da Série 1, com pilares de dimensões 150 x c_{max} , e a Fig.4.10, das lajes com pilares de dimensões 200 x c_{max} .

Até o carregamento equivalente a 200 kN, que correspondeu à carga de fissuração visual ($V_{f(flexão)}$) das lajes com pilar de dimensões 150 x c_{max} , com exceção da laje L43A ($V_{f(flexão)} = 250$ kN), os deslocamentos centrais apresentaram valores aproximadamente iguais. A partir desta carga, a laje L43A apresentou os menores deslocamentos, até as últimas leituras registradas, em comparação com as demais lajes, como mostra a Fig.4.9. A partir de 300 kN, a laje L41 ($d = 139$ mm) desenvolveu deslocamentos superiores aos das demais lajes ($d = 164$ mm), devido às diferentes alturas efetivas. A cada incremento de carga, a diferença entre os deslocamentos das lajes L41, L41A e L44 aumentou.

Do início do carregamento até a carga de 250 kN, que correspondeu à carga de fissuração visual das lajes com pilar de dimensões 200 x c_{max} , os deslocamentos centrais das lajes mostraram-se aproximadamente iguais. A partir desta carga, a laje L46, apoiada no pilar de maior perímetro, desenvolveu os menores deslocamentos, em comparação com as demais lajes do grupo, para níveis de carga correspondentes, e a laje L42, apoiada no menor pilar, apresentou os maiores deslocamentos, como pode ser visto na Fig.4.10.

A laje L46 desenvolveu a capacidade à flexão com mais intensidade que as demais lajes, mostrando uma ductilidade superior quando próxima da ruptura, acompanhada de uma configuração composta de muitas fissuras de flexão. A Tab.4.3 apresenta os maiores deslocamentos registrados no ponto central das lajes, para cargas próximas da ruptura.

Tabela 4.3 – Deslocamentos centrais máximos medidos nas lajes da Série 1

Laje	Pilar (mm x mm)	$c_{max} /$ c_{min}	d (mm)	V_{Exp} (kN)	V (kN)	Deslocamento (mm)
L42	200 x 400	2	139	703	650	15,1
L42A	200 x 400	2	164	743	700	13,5
L45	200 x 600	3	154	843	700	16,0
L46	200 x 800	4	164	947	850	18,2
L41	150 x 250	1,67	139	600	600	15,4
L41A	150 x 250	1,67	164	650	600	13,0
L43A	150 x 450	3	164	776	600	10,9
L44	150 x 600	4	164	814	600	11,3

V – carga aplicada

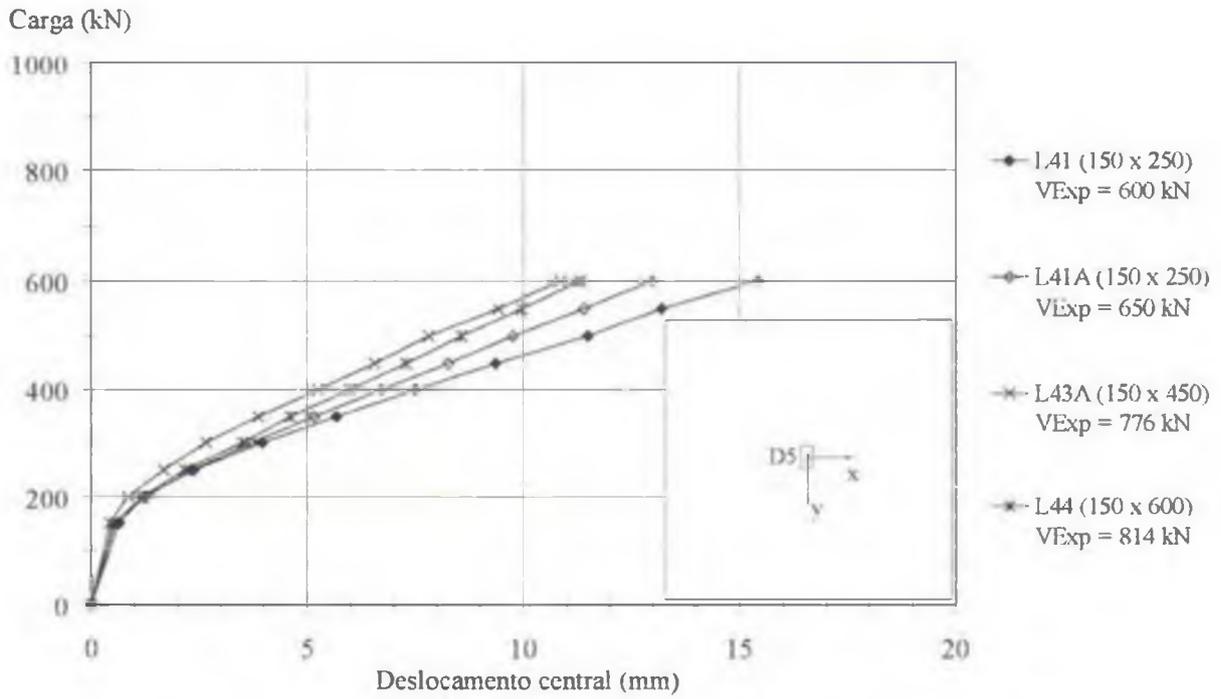


Figura 4.9 – Deslocamentos centrais das lajes com pilar 150 x c_{max}

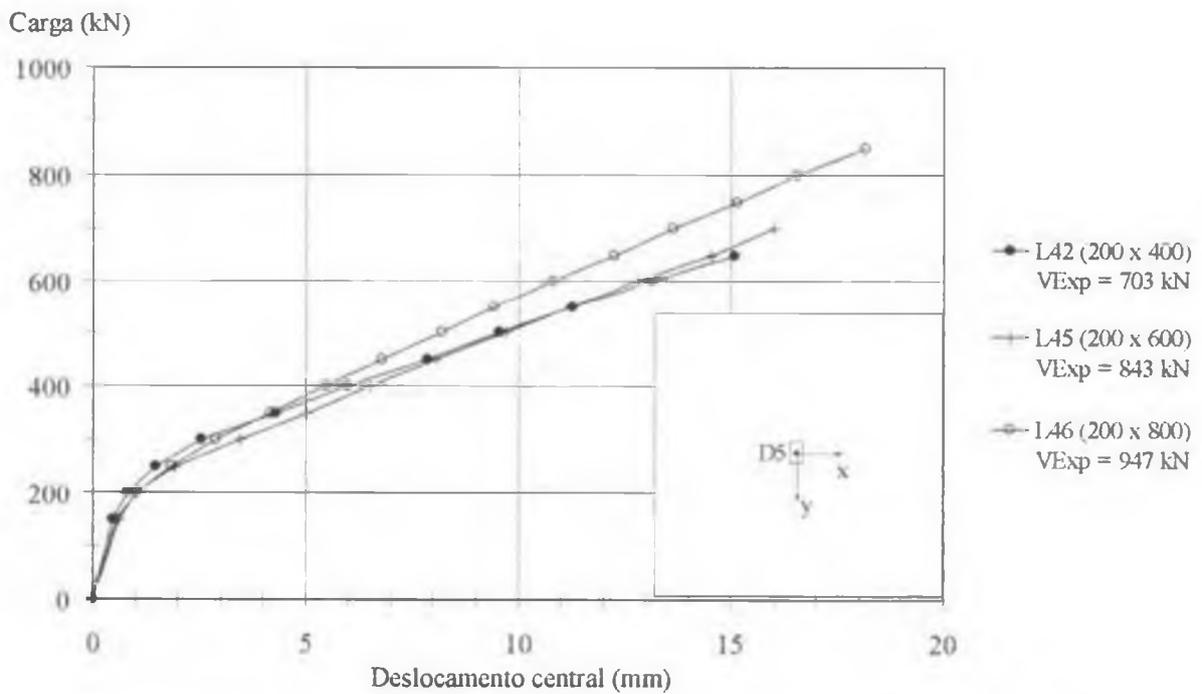


Figura 4.10 – Deslocamentos centrais das lajes com pilar 200 x c_{max}

4.4 – DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO

As deformações radiais das barras da armadura de flexão, medidas em relação à maior dimensão do pilar (direção x), foram superiores às da menor dimensão (direção y), especialmente com o aumento da relação c_{max}/c_{min} , com exceção das lajes L42 e L42A, que apresentaram grandes deformações radiais na armadura, próximo ao menor lado do pilar, até atingir o escoamento, sob carga de 600 kN. As deformações radiais no maior lado do pilar alcançaram 12,8 mm/m na laje L45, e, no lado menor do pilar, 7,1 mm/m na laje L42.

As deformações tangenciais, diferentemente das radiais, foram mais elevadas próximas à menor dimensão do pilar (direção x). Próximo à maior dimensão do pilar, as deformações tangenciais atingiram 2,7 mm/m na laje L41, enquanto no lado menor do pilar, alcançaram 3,6 mm/m na laje L45.

Na região próxima aos cantos dos pilares, foram registradas deformações medidas paralela (direção y) e perpendicularmente (direção x) à maior dimensão do pilar. Observou-se que as maiores deformações ocorreram nas barras dispostas perpendicularmente. Na laje L45, duas barras da armadura de flexão entrou em processo de escoamento, sob carga entre 750 kN e 800 kN, atingindo deformações iguais a 7,2 mm/m, e a laje L44 apresentou a barra central disposta na direção x em processo de escoamento, entre 700 e 800 kN.

A Tab.4.4 apresenta as deformações máximas registradas nas barras da armadura de flexão das lajes da Série 1. Observa-se que as barras da armadura de flexão mais solicitadas à tração, com maiores deformações, foram, na maioria dos casos, aquelas dispostas na direção perpendicular ao lado maior do pilar ($\epsilon_x > \epsilon_y$).

As Figs. 4.11 a 4.18 apresentam as curvas que relacionam as deformações da armadura de flexão com a força aplicada, das lajes da Série 1. As leituras das deformações medidas nas barras da armadura de flexão são apresentadas no ANEXO B.

Tabela 4.4 – Deformações máximas registradas nas barras da armadura de flexão das lajes da Série 1

Laje	Pilar (mm x mm)	c_{max}/c_{min}	Extensômetro na direção x	ϵ_x (mm/m)	Extensômetro na direção y	ϵ_y (mm/m)
L42	200 x 400	2	6	2,7	1	7,1
L42A	200 x 400	2	5	2,5	1	4,1
L45	200 x 600	3	6	12,8	4	2,5
L46	200 x 800	4	5	3,4	3	2,6
L41	150 x 250	1,67	5	3,3	4	2,7
L41A	150 x 250	1,67	5	3,3	4	2,5
L43A	150 x 450	3	5	3,5	3	2,5
L44	150 x 600	4	6	7,6	3	2,4

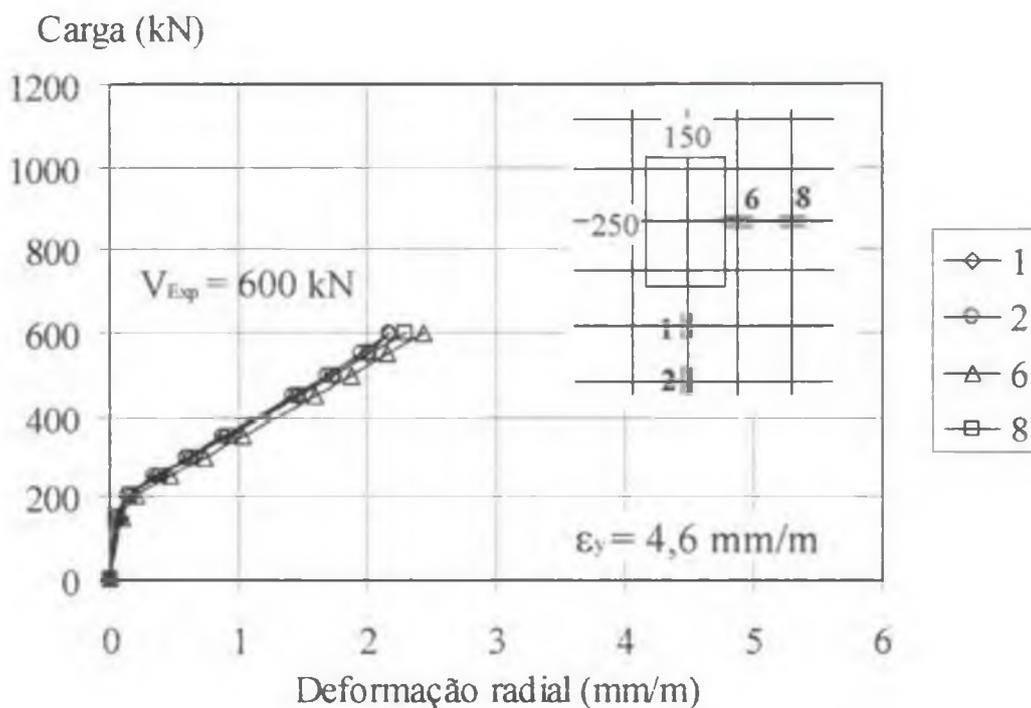


Figura 4.11 – Deformações da armadura de flexão da laje L41

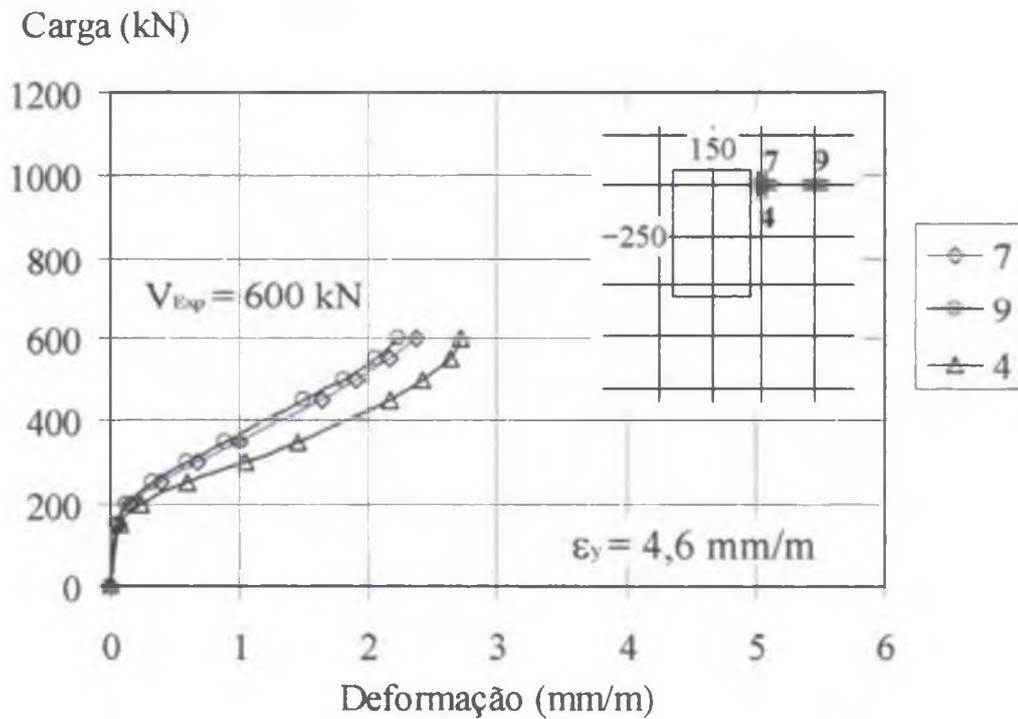
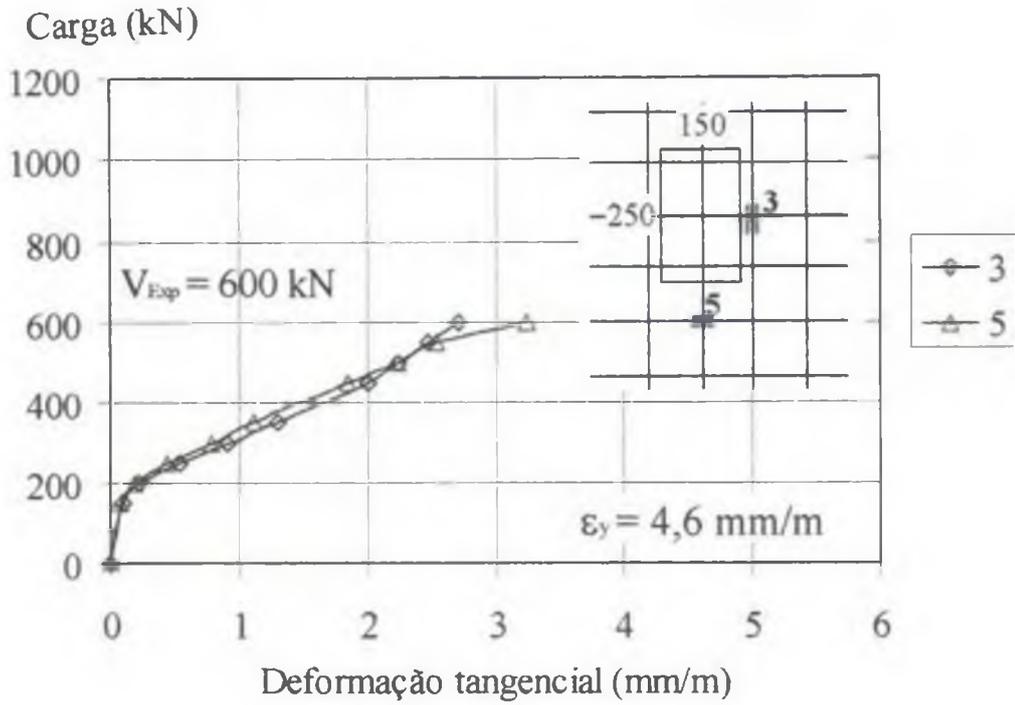


Figura 4.11 – Deformações da armadura de flexão da laje L41 (continuação)

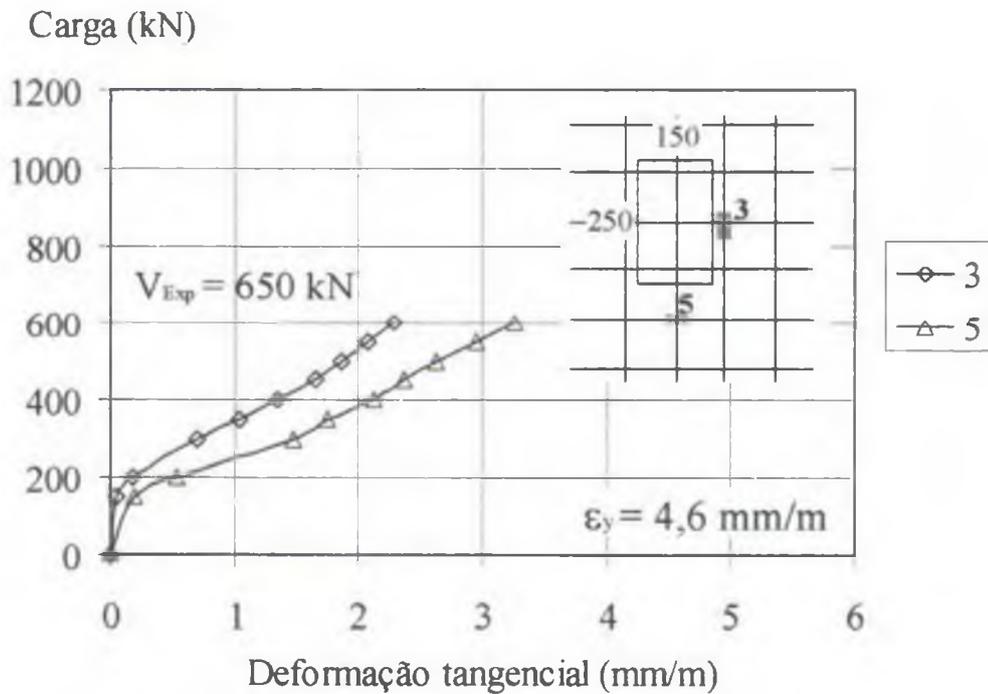
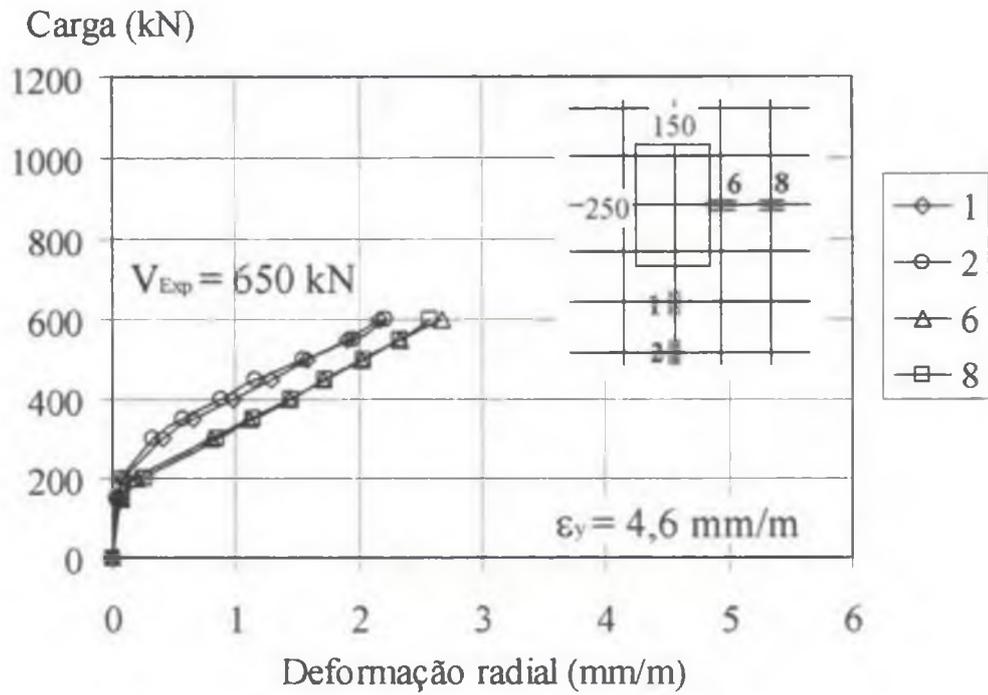


Figura 4.12 – Deformações da armadura de flexão da laje L41A

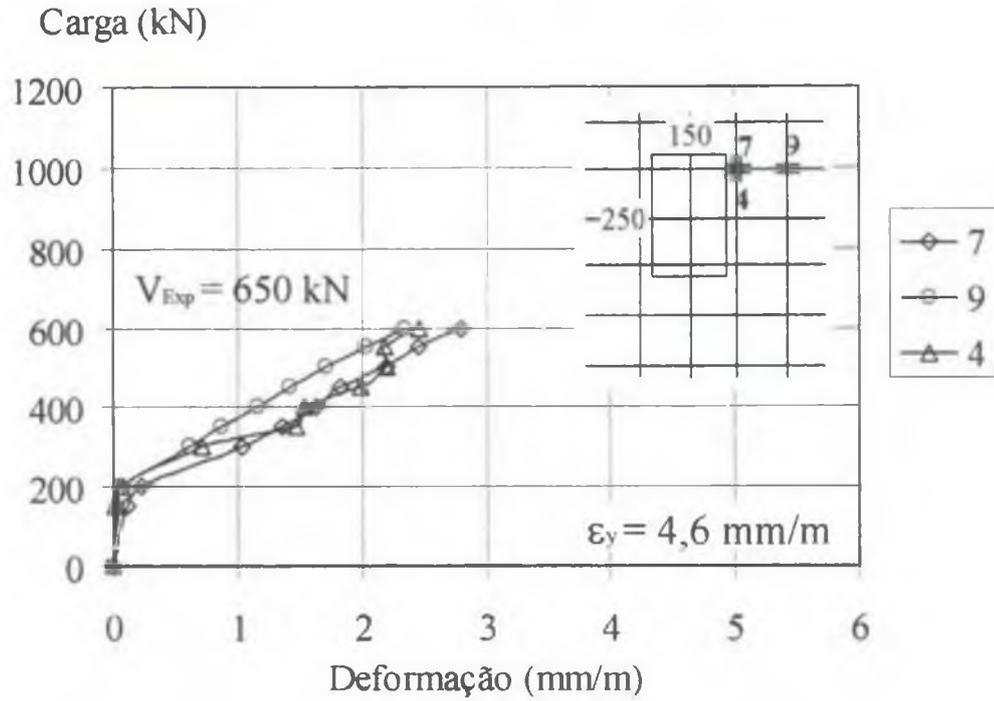


Figura 4.12 – Deformações da armadura de flexão da laje L41 A (continuação)

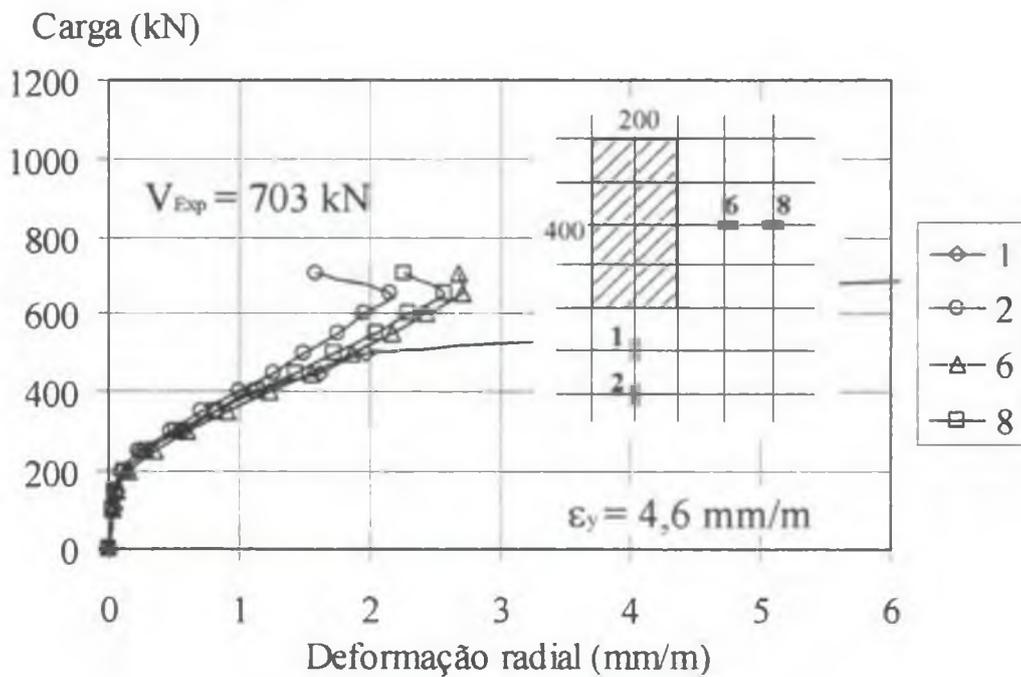


Figura 4.13 – Deformações da armadura de flexão da laje L42

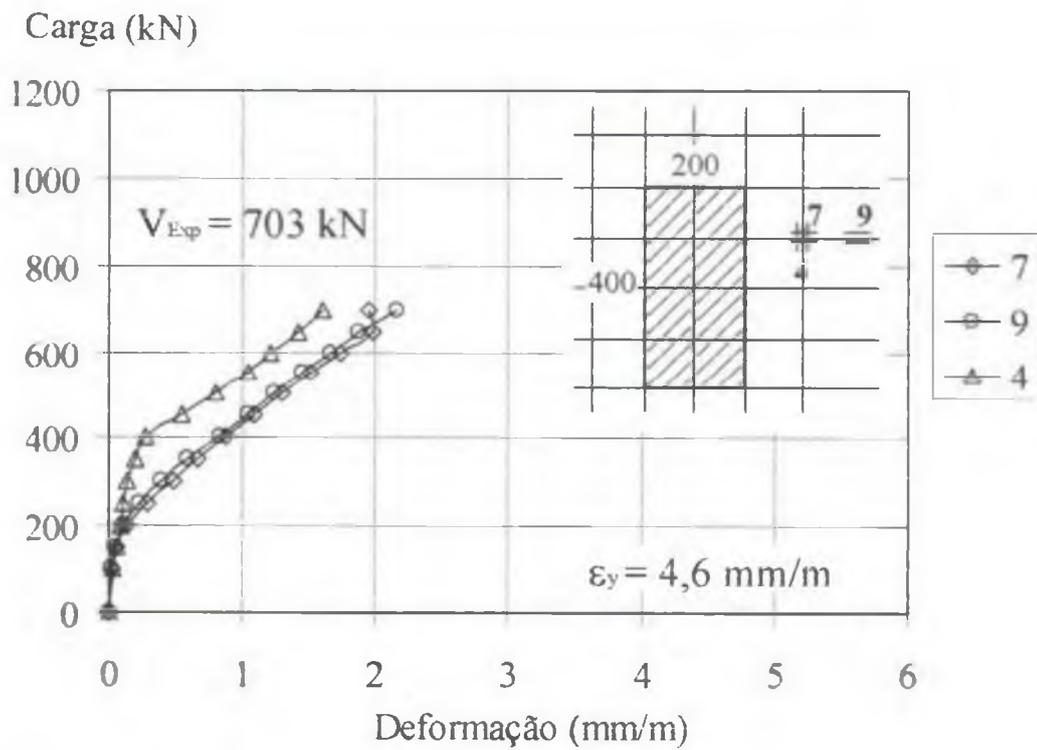
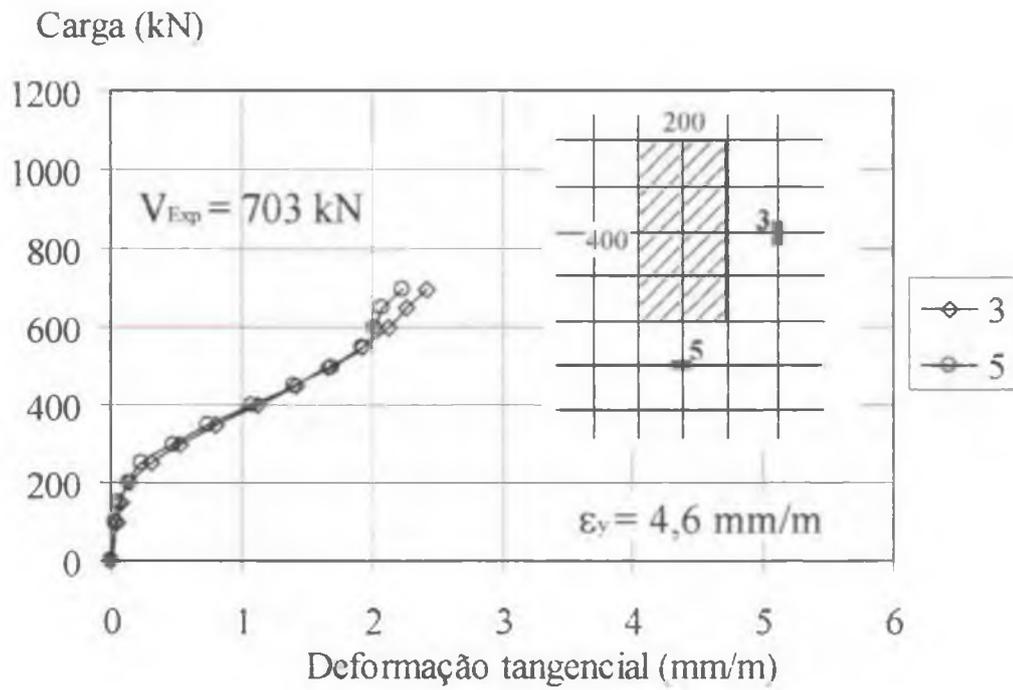


Figura 4.13 – Deformações da armadura de flexão da laje L42 (continuação)

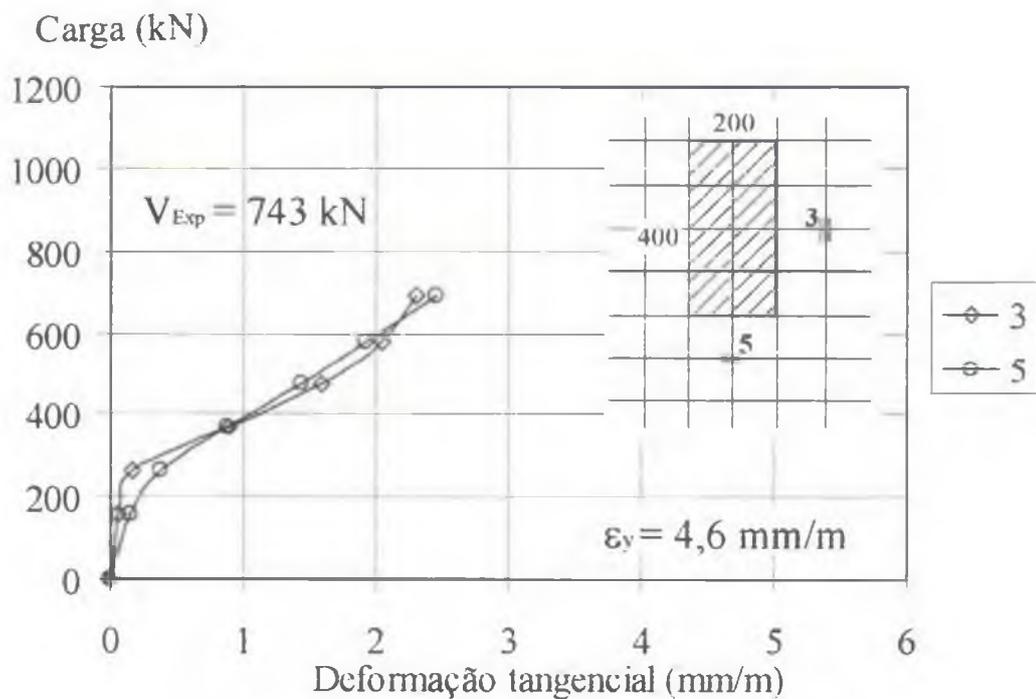
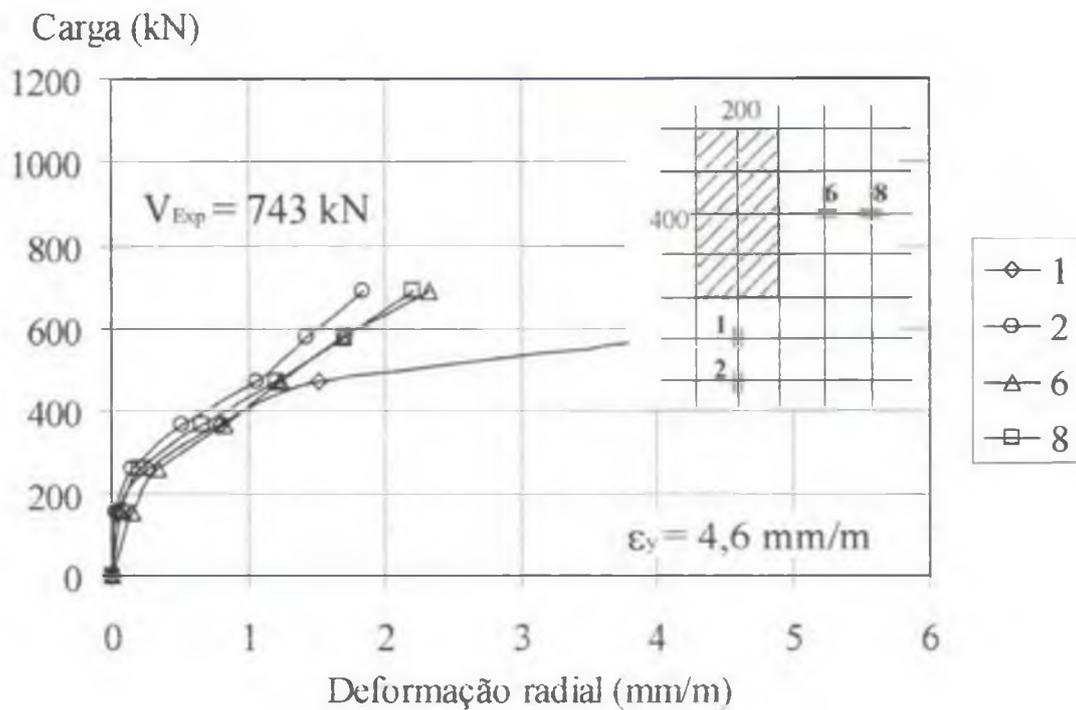


Figura 4.14 – Deformações da armadura de flexão da laje L42A

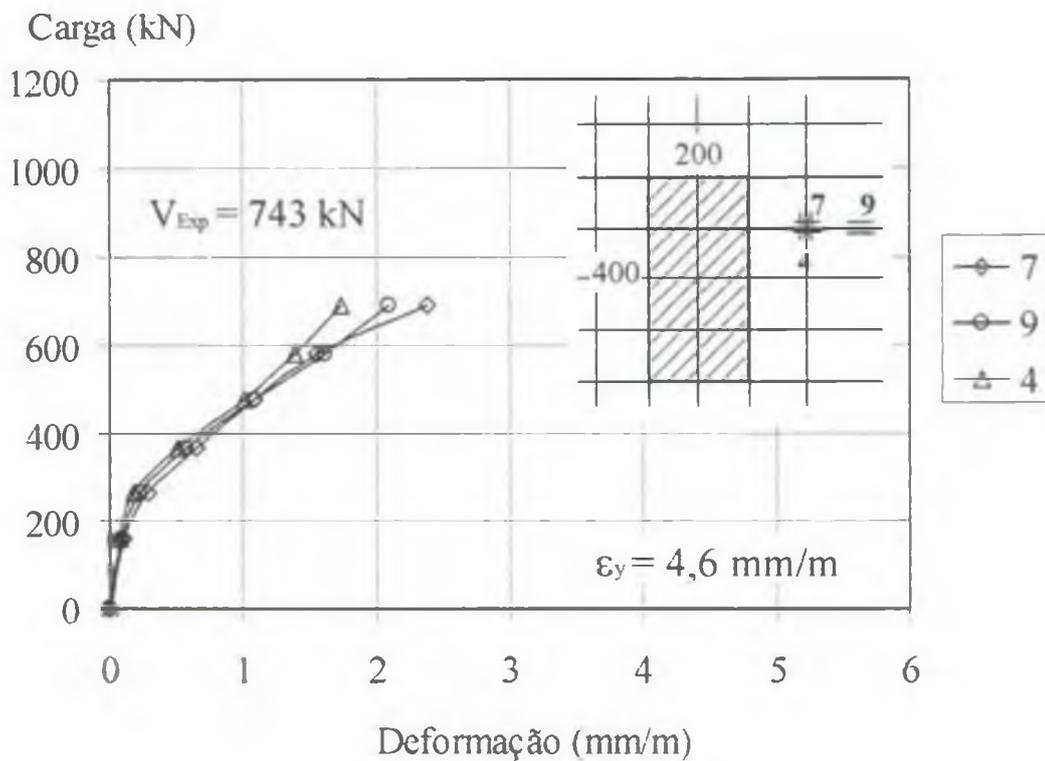


Figura 4.14 – Deformações da armadura de flexão da laje L42A (continuação)

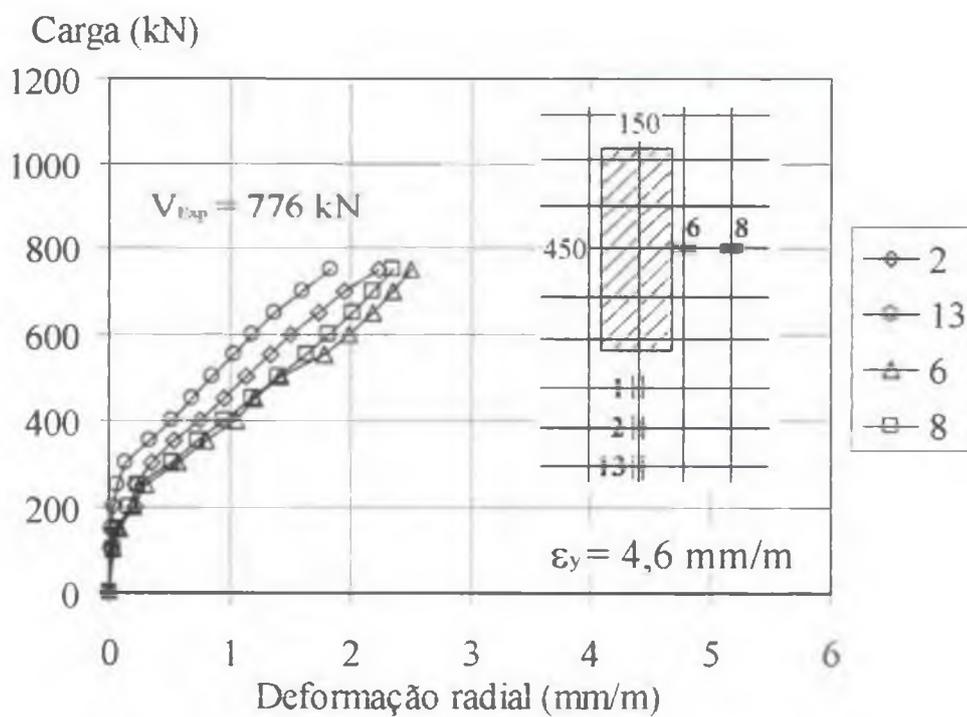


Figura 4.15 – Deformações da armadura de flexão da laje L43A

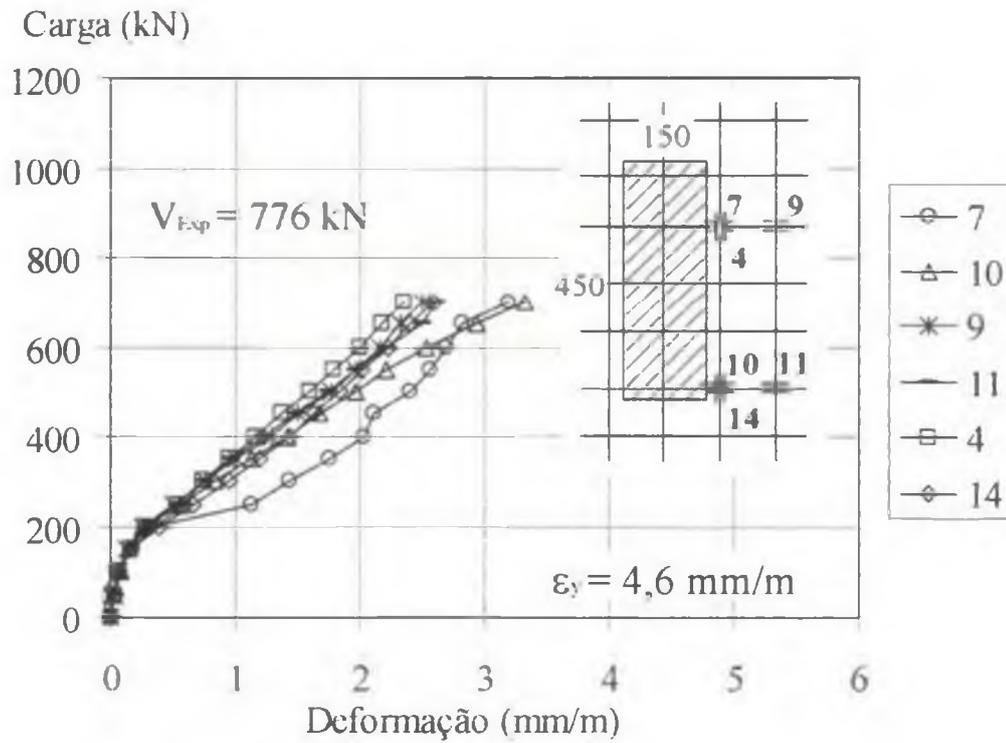
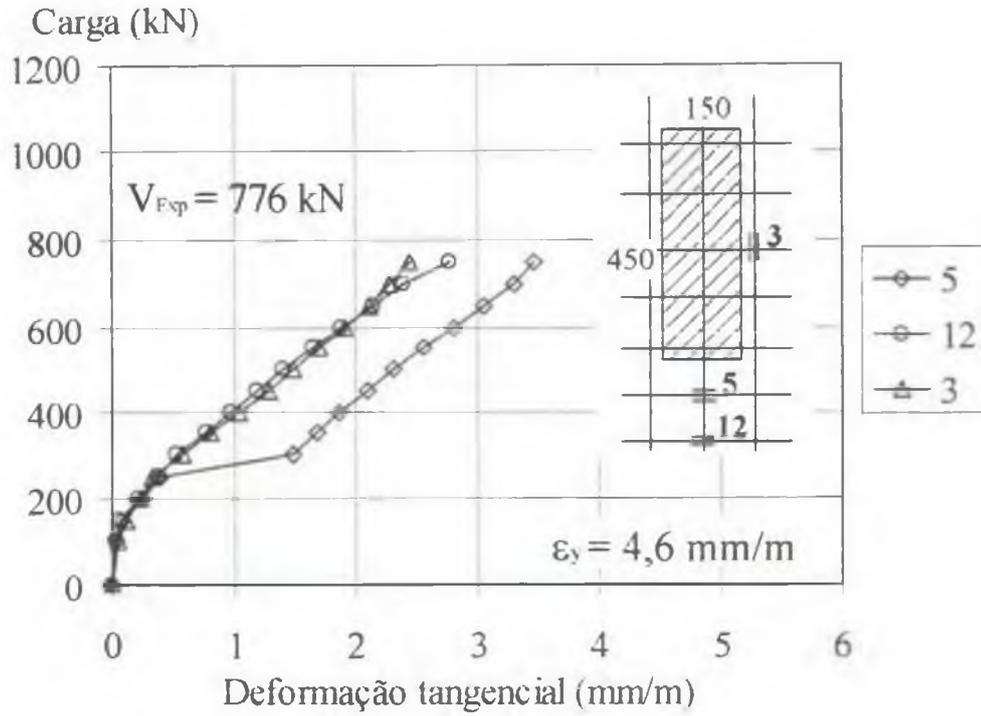


Figura 4.15 – Deformações da armadura de flexão da laje L43A (continuação)

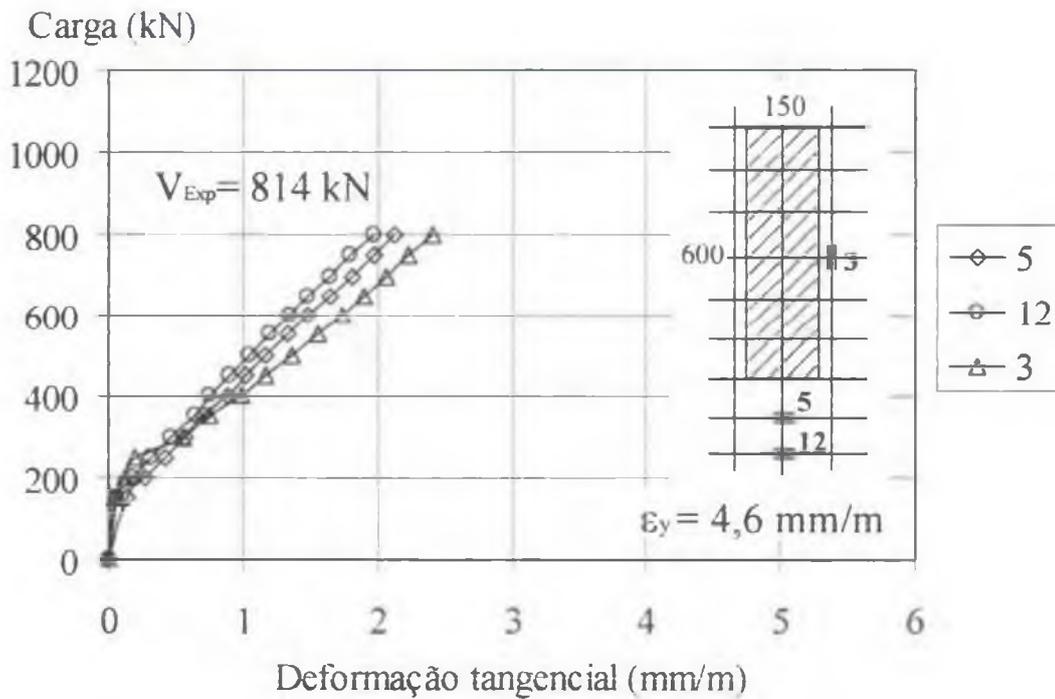
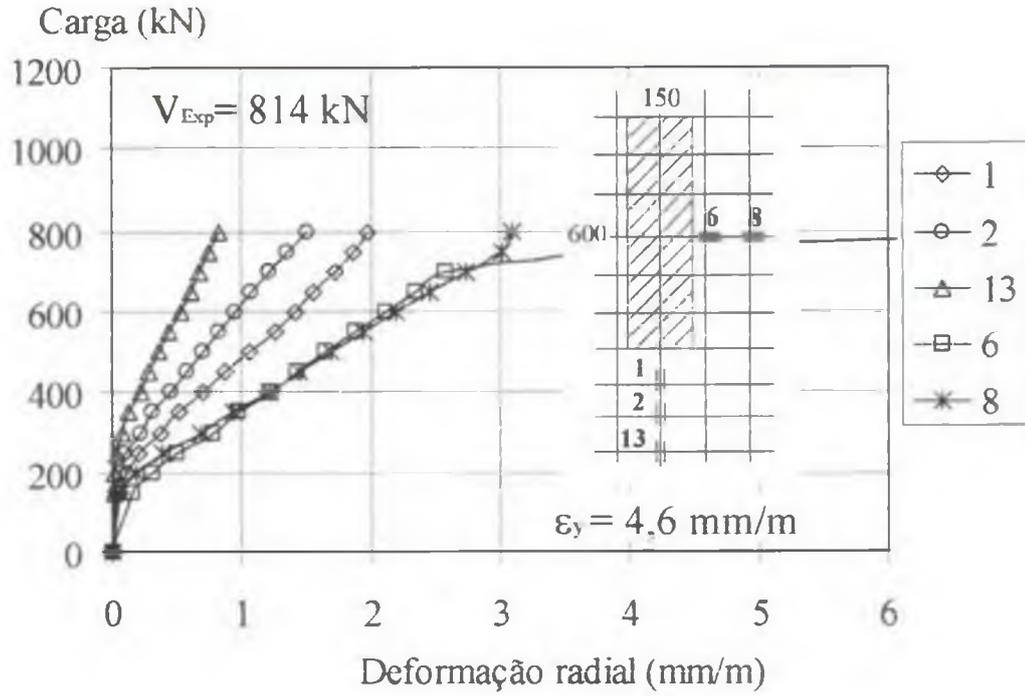


Figura 4.16 – Deformações da armadura de flexão da laje L44

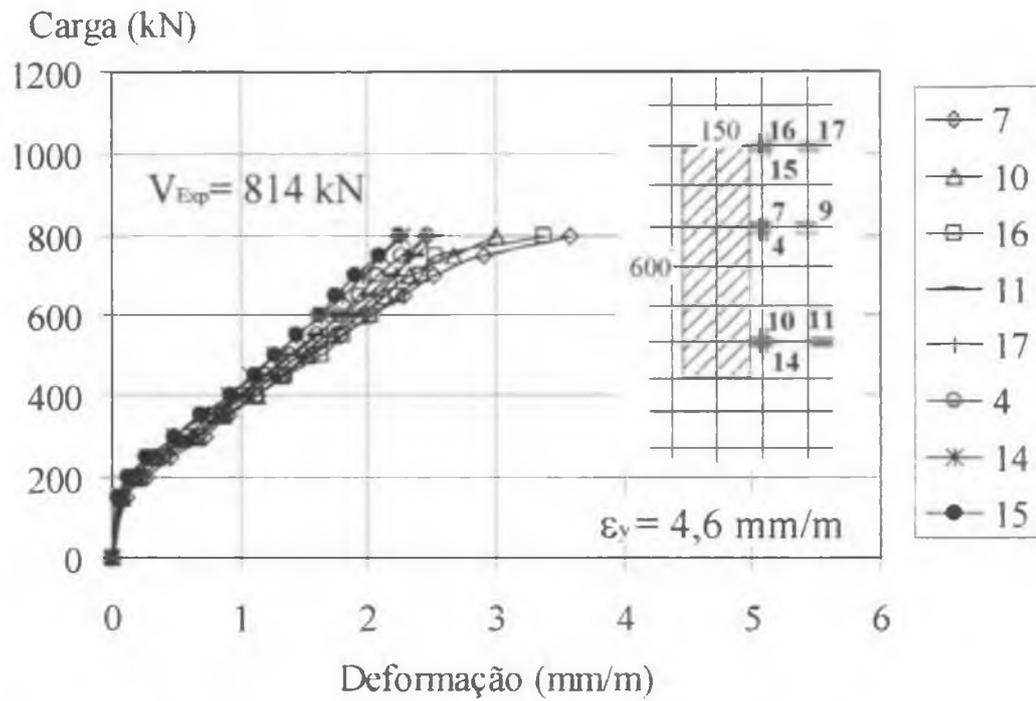


Figura 4.16 – Deformações da armadura de flexão da laje L44 (continuação)

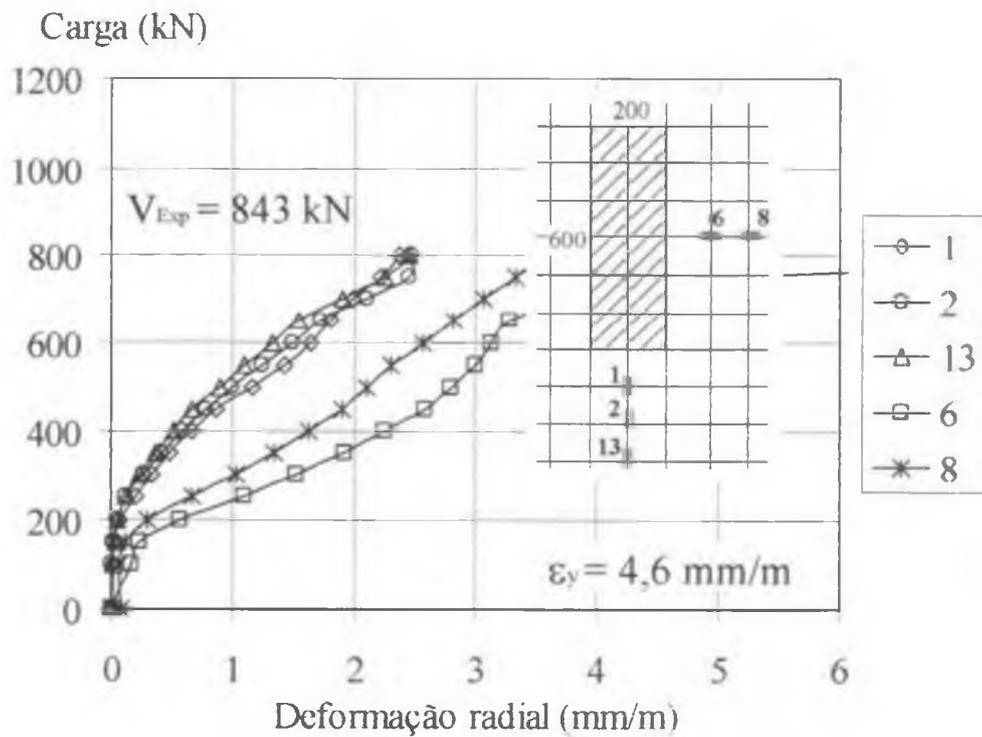


Figura 4.17 – Deformações da armadura de flexão da laje L45

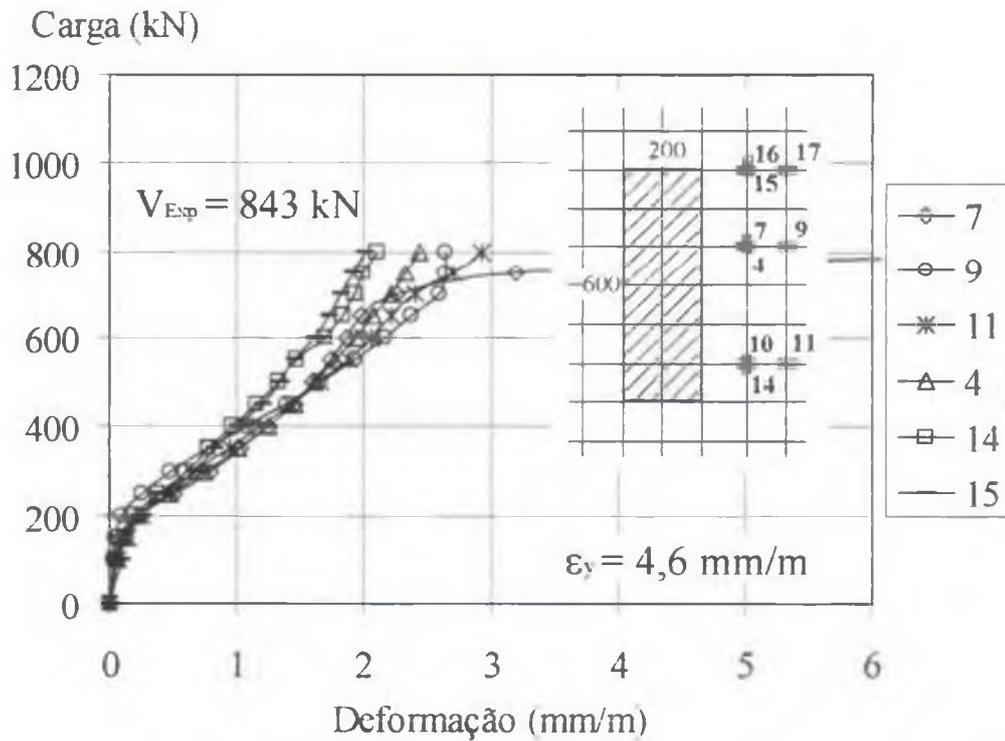
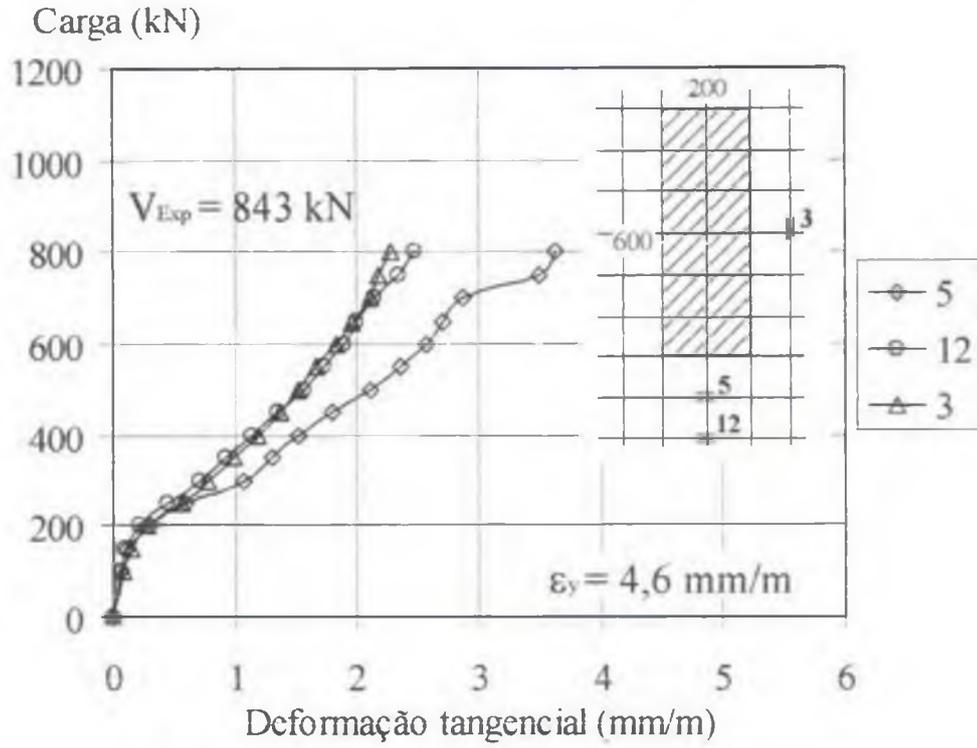


Figura 4.17 – Deformações da armadura de flexão da laje L45 (continuação)

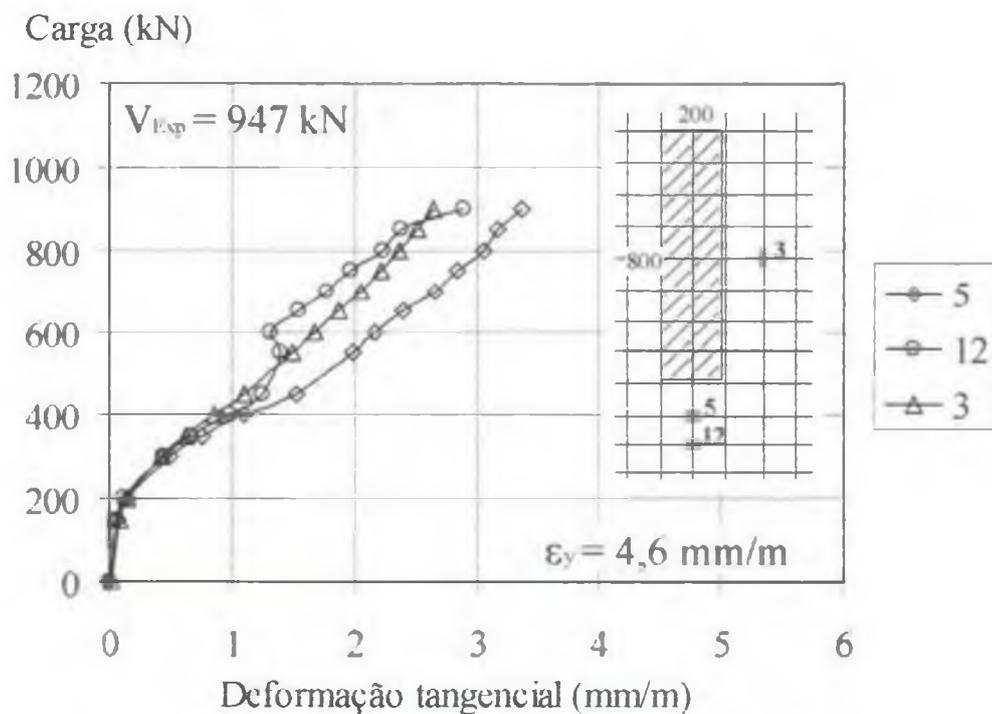
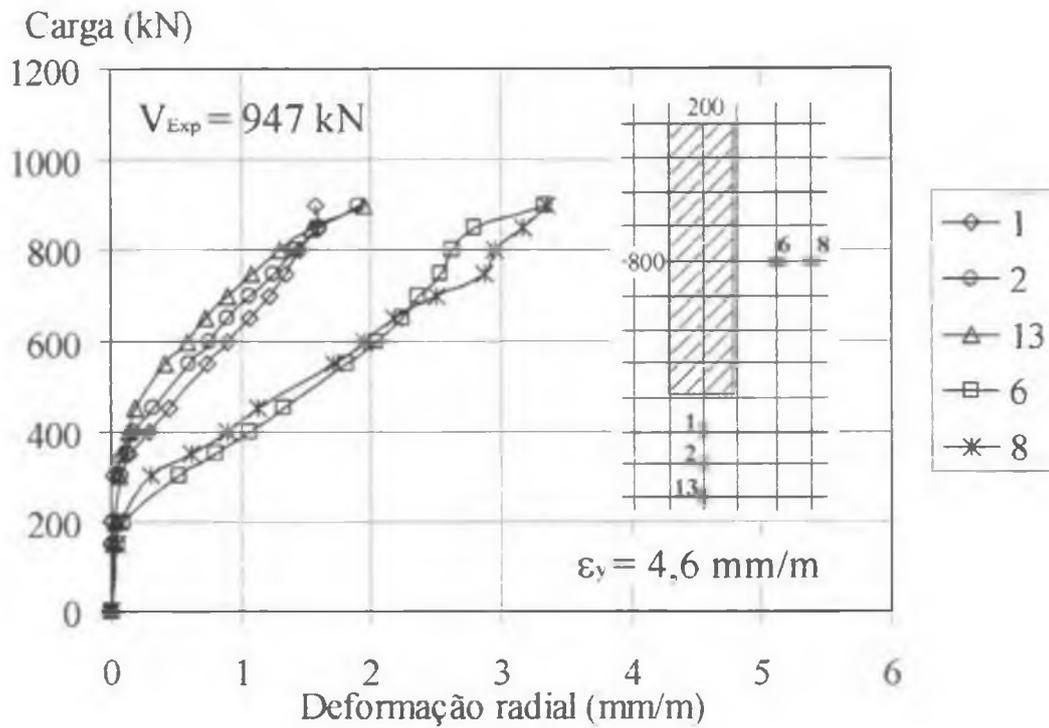


Figura 4.18 – Deformações da armadura de flexão da laje L46

4.5 – FISSURACÃO

A formação e o desenvolvimento das fissuras foram praticamente semelhantes em todas as lajes, independentemente da geometria do pilar. Inicialmente, surgiram fissuras de flexão (fissuras radiais) que se iniciaram no pilar, sob carga equivalente, em média, a 31% da carga de ruptura, e, com o aumento do carregamento, se estenderam em direção às bordas da laje, além do surgimento de novas fissuras.

As fissuras de cisalhamento (fissuras circunferenciais) surgiram em torno da região do pilar, sob carga correspondente, em média, a 44% da carga de ruptura, e, novas fissuras deste tipo foram surgindo com a aplicação do carregamento.

A Tab.4.5 apresenta as cargas correspondentes ao surgimento das fissuras radiais e circunferenciais, e suas respectivas relações com as cargas de ruptura, além das deformações das barras da armadura de flexão relativas ao aparecimento da respectiva fissura. As fissuras radiais ($V_{f(\text{flexão})}$) estão relacionadas com as deformações denominadas tangenciais (ε_t), enquanto as fissuras tangenciais ($V_{f(\text{cisalh})}$), com as deformações radiais (ε_r). A Tab. 4.5 mostra que a primeira fissura a surgir (flexão) apareceu na direção y, e a primeira fissura de cisalhamento, próxima à maior dimensão do pilar.

As deformações tangenciais ε_t , associadas às fissuras de flexão, tiveram valores mais elevados na região localizada próxima ao lado menor do pilar, em relação ao lado maior. É interessante ressaltar que, concordando com os resultados de deformações tangenciais nas barras da armadura de flexão, cujos maiores valores foram observados nos pontos próximos à menor dimensão do pilar, os deslocamentos dos pontos dispostos na direção y das lajes foram superiores aos na direção x, como já comentado.

As Figs. 4.19 a 4.26 mostram as fotografias das fissuras nas lajes testadas. Observa-se um maior número de fissuras de flexão e de cisalhamento nas lajes L44 (pilar 150 x 600) e L46 (200 x 800), que apresentaram os pilares de maior dimensão.

Tabela 4.5 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 1

Laje	V_{Exp} (kN)	$V_{f(flexão)}$ (kN)	$V_{f(flexão)} / V_{Exp}$	ϵ_t (mm/m)	Ponto	$V_{f(cisalh)}$ (kN)	$V_{f(cisalh)} / V_{Exp}$	ϵ_τ (mm/m)	Ponto
L42	703	250	0,36	0,3	5	300	0,43	0,6	6
L42A	743	200	0,27	0,4	5	300	0,40	0,8	6
L45	843	250	0,30	0,6	5	350	0,42	1,9	6
L46	947	250	0,26	0,5	5	400	0,42	1,1	6
L41	600	250	0,42	0,5	3	300	0,50	0,7	6
L41A	650	200	0,31	0,5	5	300	0,46	0,8	6
L43A	776	250	0,32	0,4	5	350	0,45	0,8	6
L44	814	200	0,25	0,3	5	350	0,43	1,0	6
MÉDIA			0,31	-	-	0,44	-	-	-
D.P.			0,05	-	-	0,03	-	-	-
C.V. (%)			17,0	-	-	7,0	-	-	-

$V_{f(flexão)}$ – carga correspondente ao surgimento da primeira fissura de flexão (visual)
 $V_{f(cisalh)}$ – carga correspondente ao surgimento da primeira fissura de cisalhamento (observação visual)

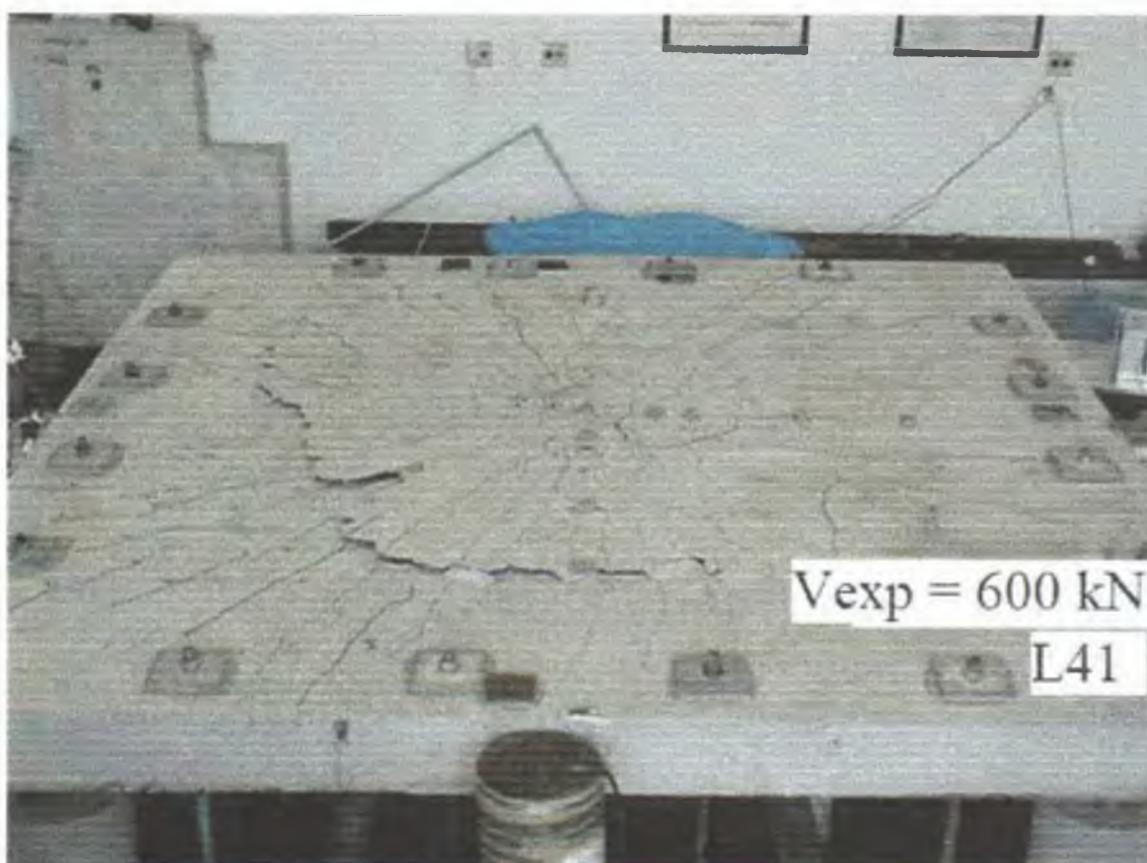


Figura 4.19 – Fissuração na laje L41

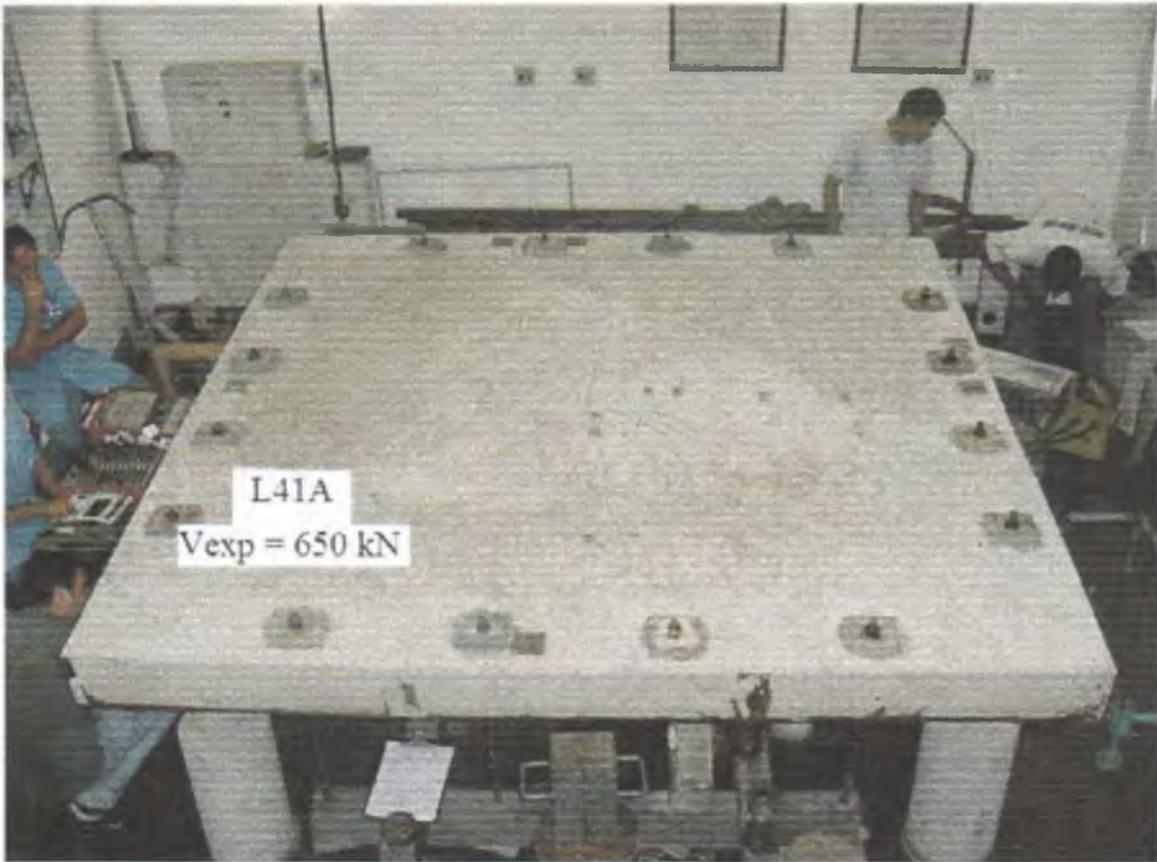


Figura 4.20 – Fissuração na laje L41A

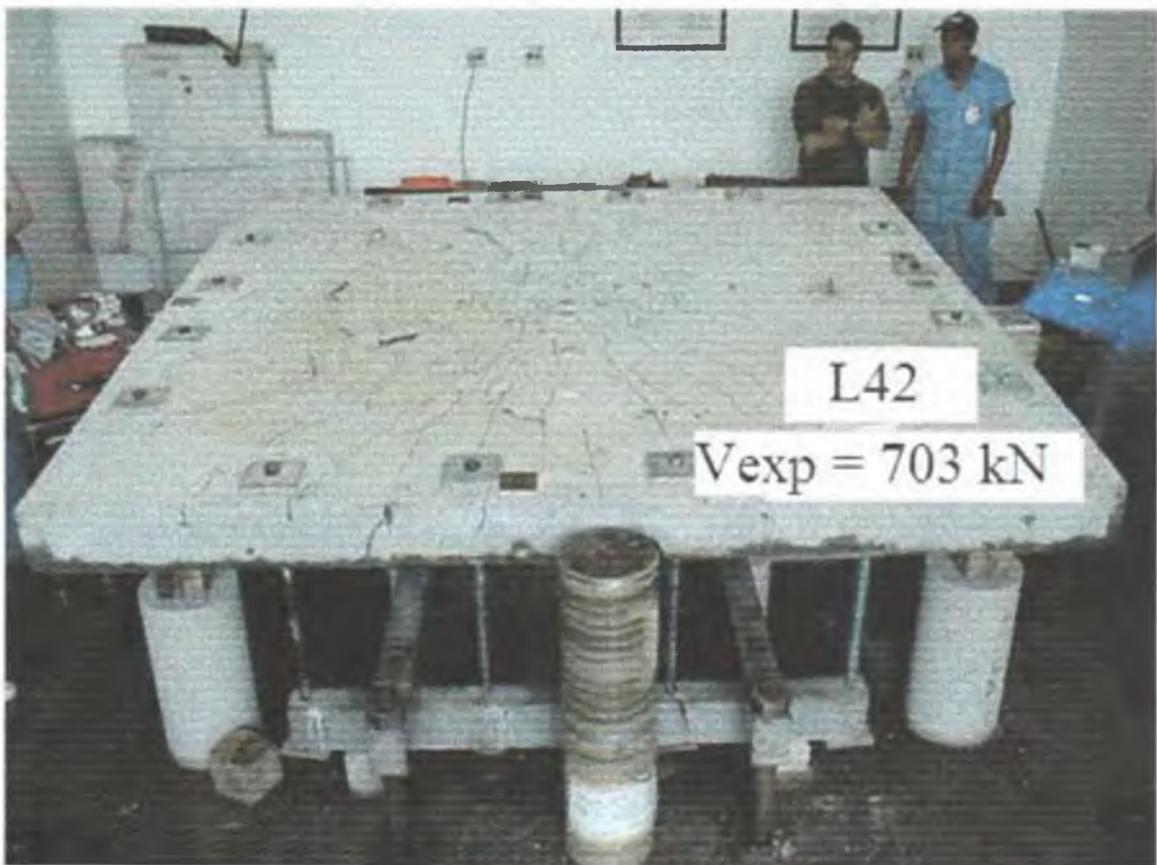


Figura 4.21 – Fissuração na laje L42

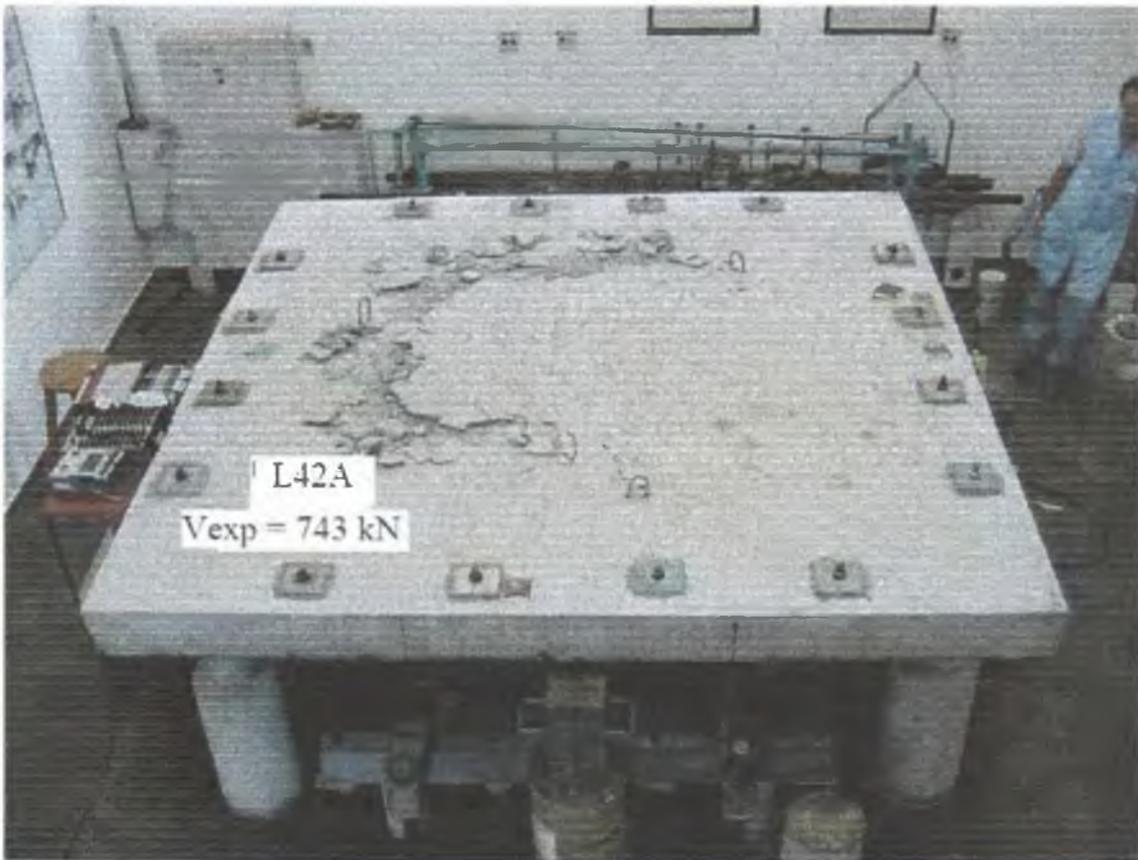


Figura 4.22 – Fissuração na laje L42A

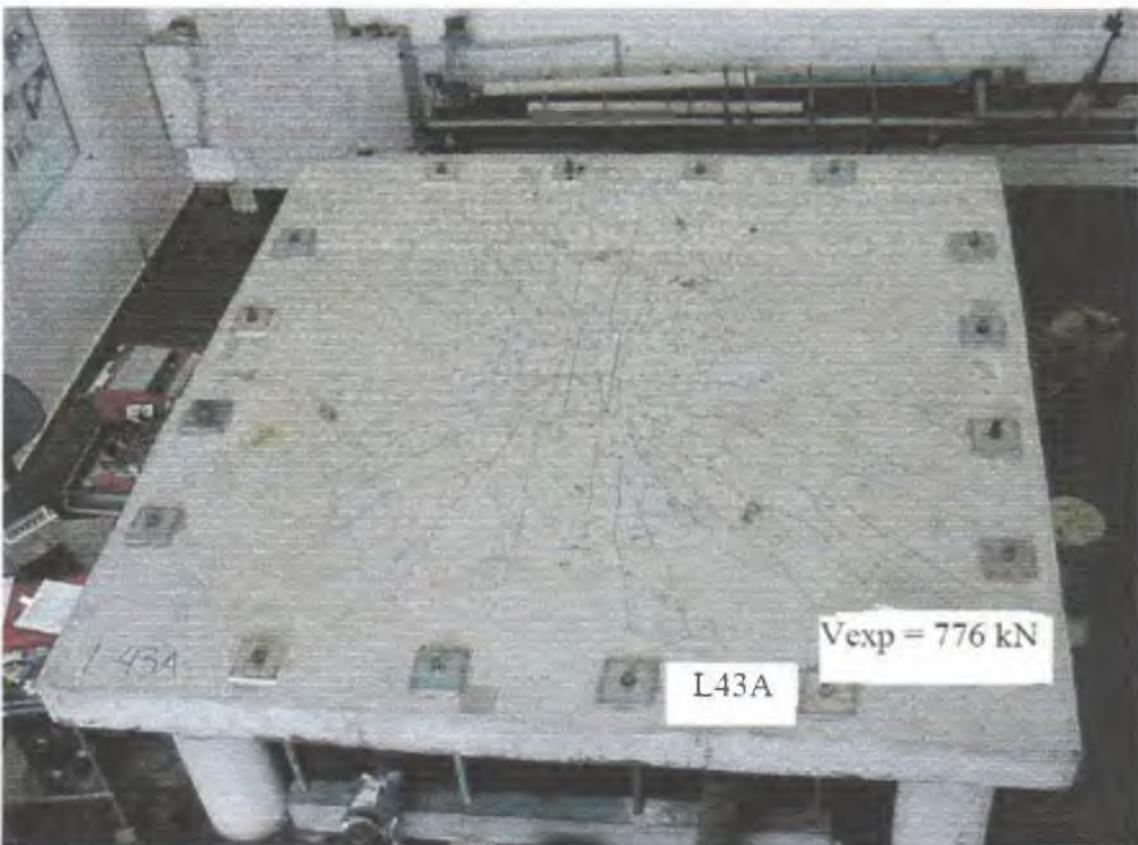


Figura 4.23 – Fissuração na laje L43A



Figura 4.24 – Fissuração na laje L44



Figura 4.25 – Fissuração na laje L45

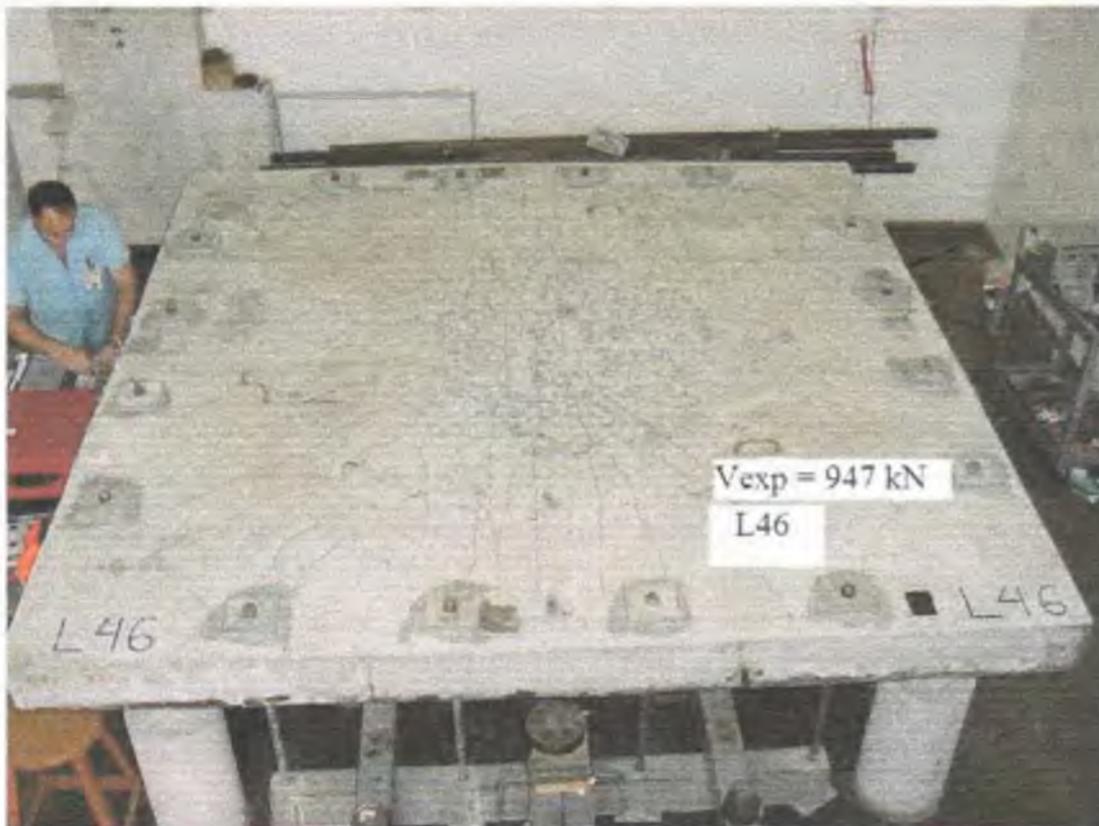


Figura 4.26 – Fissuração na laje L46

4.6 – RESISTÊNCIA

4.6.1 – FLEXÃO

As cargas últimas de flexão foram calculadas utilizando a teoria das linhas de ruptura, a partir das configurações das fissuras observadas durante os ensaios (ANEXO C), e de acordo com as expressões apresentadas por alguns autores (HALLGREN (1996) e MOKHTAR *et al.* (1985)). Os momentos resistentes por unidade de comprimento foram determinados através da expressão constante na norma do CEB-FIP MC90 (1991), com a utilização do diagrama simplificado de tensões em uma seção qualquer de concreto submetida à flexão.

As estimativas das expressões para cálculo da carga correspondente à ruptura por flexão, sugeridas por HALLGREN e MOKHTAR *et al.* para as lajes da Série I são bastante próximas. As lajes atingiram a ruptura com carregamento equivalente entre 56 e 77% da carga prevista para ruptura por flexão (Tab. 4.6) As estimativas obtidas a partir do

desenvolvimento das linhas de ruptura para as lajes do presente trabalho (vide ANEXO C) se apresentaram superiores às demais, sendo que os valores para a relação V_{Exp}/V_{flex} variaram entre 0,50 e 0,69.

As lajes L45 e L46, com as maiores cargas de ruptura experimental e os maiores deslocamentos verticais, até próximo da ruptura, além de uma acentuada configuração de fissuras na face tracionada da laje, apresentaram os maiores valores para a relação V_{Exp}/V_{flex} , para todas as cargas estimadas para ruptura por flexão. Adicionalmente, as lajes L41 e L41A, apoiadas nos pilares de menor seção transversal, apresentaram os menores valores para a relação V_{Exp}/V_{flex} . A Tab.4.6 apresenta as cargas de ruptura estimadas para uma ruptura por flexão para as lajes da Série 1.

O ANEXO C apresenta a configuração das linhas de ruptura desenvolvida para as lajes da Série 1 e os cálculos das cargas estimadas para ruptura por flexão. A configuração das linhas de ruptura adotada nas lajes teve que ser desenvolvida para pilares retangulares, e baseou-se nos modelos da literatura, desenvolvidos para pilar de seção transversal quadrada, considerando-se adequadamente as distâncias entre a face do pilar (ponto de carregamento) e os pontos de deslocamento nulo (tirantes).

Tabela 4.6 – Cargas de ruptura por flexão das lajes da Série 1

Laje	Pilar(mm) $c_{min} \times c_{max}$	ρ (%)	f_v (MPa)	d (mm)	f_c (MPa)	V_{Exp} (kN)	V_{Exp}/V_{flex} (HALLGREN)	V_{Exp}/V_{flex} (MOKHTAR)	V_{Exp}/V_{flex} (ANEXO C)
L42	200 x 400	1,51	604	139	43,2	703	0,72	0,71	0,52
L42A	200 x 400	1,28	604	164	36,2	743	0,64	0,63	0,55
L45	200 x 600	1,37	604	154	42,0	843	0,77	0,76	0,64
L46	200 x 800	1,28	604	164	39,3	947	0,72	0,71	0,63
L41	150 x 250	1,51	604	139	44,7	600	0,63	0,62	0,56
L41A	150 x 250	1,28	604	164	38,9	650	0,57	0,56	0,50
L43A	150 x 450	1,28	604	164	38,9	776	0,67	0,67	0,68
L44	150 x 600	1,28	604	164	40,0	814	0,71	0,70	0,59
MÉDIA							0,68	0,67	0,58
D.P.							0,06	0,06	0,05
C.V. (%)							9,4	9,5	8,1

V_{flex} – carga de ruptura estimada para a ruptura por flexão, segundo a teoria das L.R.

4.6.2 – CISALHAMENTO

Todas as lajes foram ensaiadas até a ruptura e romperam por punção. Este tipo de ruptura foi diagnosticado porque o comportamento geral das lajes, observado durante os ensaios até o momento da ruptura, mostrou que não houve uma generalização de deformações de escoamento das barras da armadura de flexão.

Quando o pico de carga foi atingido, que correspondeu ao momento da ruptura (resistência última da laje), a resistência da laje diminuiu rapidamente. Foi aplicada carga adicional permitindo que a laje se deformasse e fissuras se abrissem, de forma a obter a resistência na fase de pós-puncionamento e a melhor visualização da fissura formada no bordo superior da laje. A fissura visível no bordo superior da laje apresentou uma forma diferente da circular observada nas lajes com pilar quadrado, especialmente quando se aumentou a relação $C_{máx}/C_{mín}$.

Em todas as lajes ensaiadas, a superfície de ruptura interceptou a face inferior da laje, no pilar, e atingiu a armadura principal de flexão principal, aparecendo posteriormente no bordo superior, devido ao descolamento do cobrimento de concreto. A estimativa da inclinação das superfícies de ruptura foi feita através da remoção do concreto deslocado no bordo superior, quando então, determinou-se a altura efetiva da laje e o local onde a fissura cruzou o centro de gravidade da armadura principal de flexão.

As lajes apresentaram superfícies de ruptura com inclinações que variaram entre 20 e 35 graus, em relação ao plano médio da laje. A Fig.4.27 apresenta a configuração das superfícies de ruptura estimadas para as lajes com pilar retangular, e a Tab.4.7 apresenta os modos e cargas de ruptura observados nos ensaios.

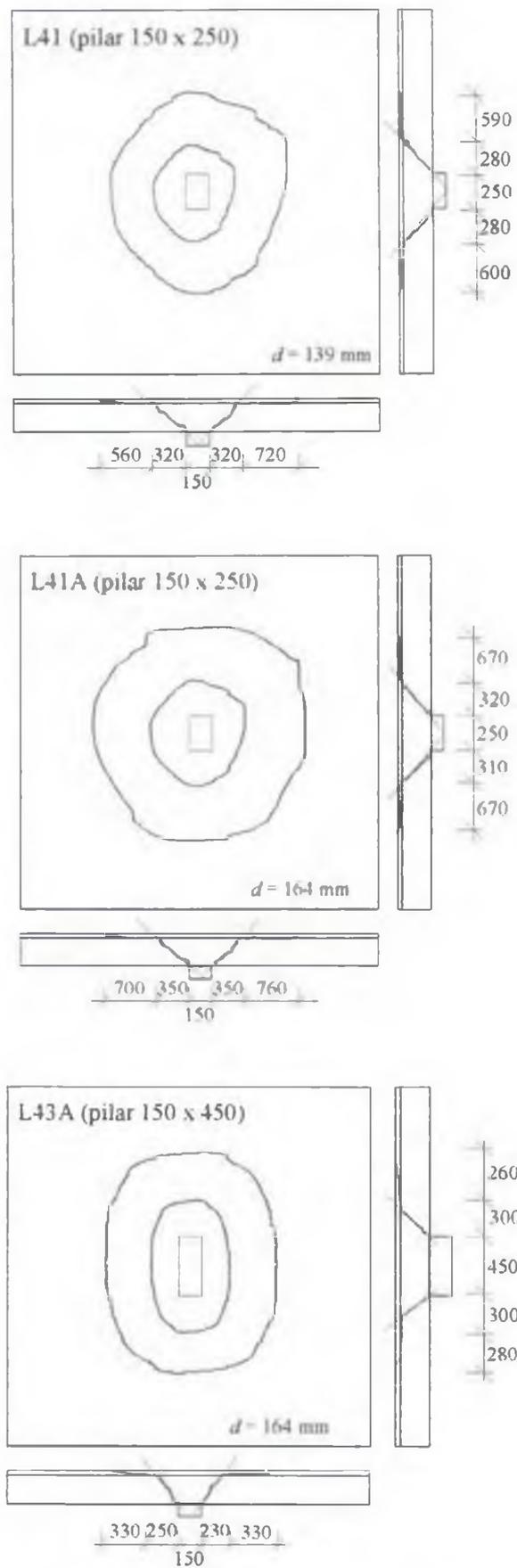


Figura 4.27 – Superfícies de ruptura das lajes da Série I – unidades em mm

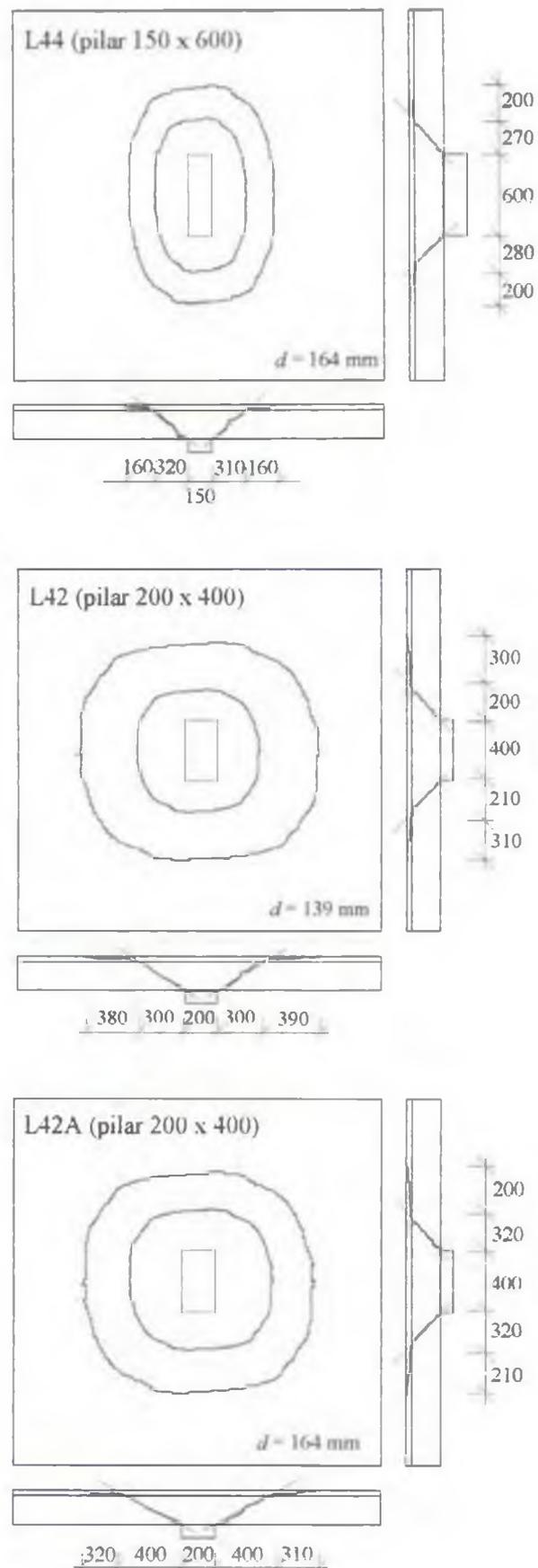


Figura 4.27 – Superfícies de ruptura das lajes da Série 1 – unidades em mm (continuação)

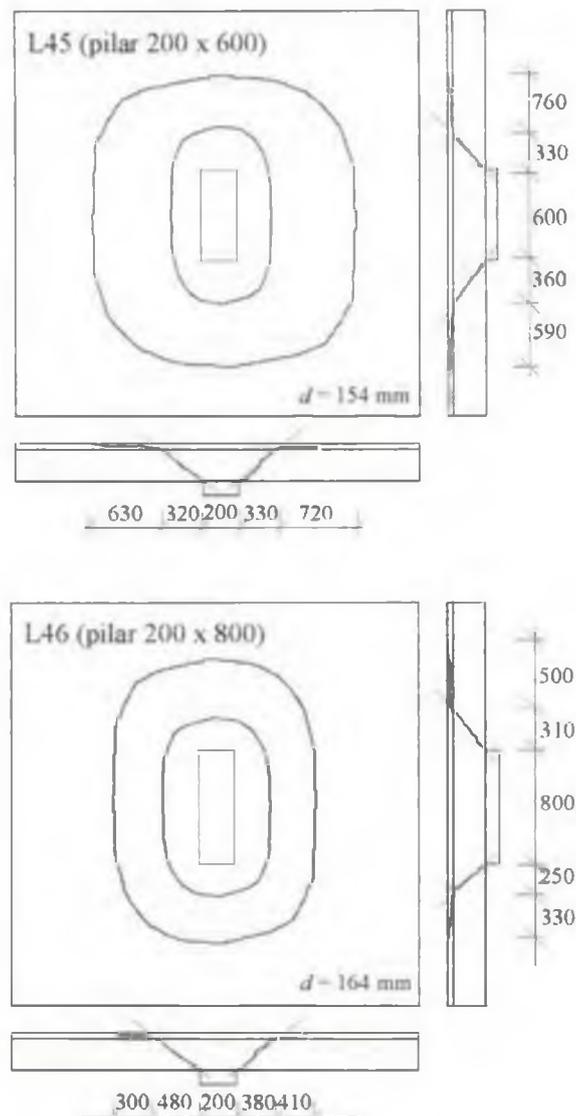


Figura 4.27 – Superfícies de ruptura das lajes da Série 1 – unidades em mm (continuação)

Observa-se na Tab.4.7, que as cargas de ruptura das lajes, tanto com pilar de dimensões $150 \times c_{max}$ como $200 \times c_{max}$ aumentaram com o acréscimo da relação entre lados do pilar, com aumento de até 35%, para as lajes com pilar $200 \times c_{max}$, e de até 36%, com pilar $150 \times c_{max}$.

Tabela 4.7 – Cargas e modos de ruptura observados nas lajes da Série 1

Laje	Pilar (mm)		d (mm)	f_c (MPa)	$f_{\alpha.sp}$ (MPa)	ρ (%)	V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura	Superfície de ruptura
	c_{min}	$c_{m\acute{a}x}$							
L42	200	400	139	43,2	4,0	1,53	703	punção	a partir do pilar
L42A	200	400	164	36,2	3,6	1,15	743	“	“
L45	200	600	154	42,0	4,3	1,29	843	“	“
L46	200	800	164	39,3	4,4	1,15	947	“	“
L41	150	250	139	44,7	4,3	1,39	600	“	“
L41A	150	250	164	38,9	3,4	1,24	650	“	“
L43A	150	450	164	38,7	3,3	1,24	776	“	“
L44	150	600	164	40,0	3,7	1,18	814	“	“

4.6.3 – PÓS-PUNÇIONAMENTO

A capacidade de carga na fase pós-punçionamento, que corresponde à carga residual que a laje resiste após sua ruptura, variou entre 30% e 40% da carga de ruptura, como pode ser visto na Tab.4.8.

Tabela 4.8 – Cargas de pós-punçionamento das lajes da Série 1

Laje	Pilar (mm)		d (mm)	f_c (MPa)	V_{Exp} (kN)	V_{pp} (kN)	V_{pp}/V_{Exp}
	c_{min}	$c_{m\acute{a}x}$					
L42	200	400	139	43,2	703	284	0,40
L42A	200	400	164	36,2	743	*	*
L45	200	600	154	42,0	843	250	0,30
L46	200	800	164	39,3	947	330	0,35
L41	150	250	139	44,7	600	239	0,40
L41A	150	250	164	38,9	650	218	0,34
L43A	150	450	164	38,7	776	260	0,34
L44	150	600	164	40,0	814	265	0,33
MÉDIA							0,35
D.P.							0,04
C.V. (%)							11,4
V_{pp} – carga de pós-punçionamento * leitura não registrada							

4.6.4 – ANÁLISE DAS LAJES COM PILARES RETANGULARES

4.6.4.1 – INTRODUÇÃO

Na análise das cargas de ruptura das lajes da Série 1, foi realizada uma investigação da influência da geometria do pilar, na resistência à punção das lajes, utilizando os resultados experimentais desta pesquisa e da laje L1 (pilar de dimensões 200 mm x 200 mm), ensaiada por GOMES (1991), que por sua vez, apresentaram características idênticas.

Uma comparação foi feita entre as cargas de ruptura das lajes da Série 1 e das ensaiadas por TENG *et al.* (1999), HAWKINS *et al.* (1971), OLIVEIRA (2003) e SILVA (2003).

4.6.4.2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para analisar a influência da geometria do pilar na carga última das lajes da Série 1, estas foram divididas em duas sub-séries. A Sub-Série 1A compreendeu as lajes que tiveram os pilares com uma das dimensões igual a 200 mm e a outra variável. A Sub-Série 1B reuniu as lajes apoiadas em pilares com uma das dimensões iguais a 150 mm e a outra também variável. A relação entre lados ($\beta_c = c_{max} / c_{min}$) variou entre 1,67 e 4, como mostra a Tab.4.9.

Como as lajes apresentaram alturas úteis diferenciadas, a comparação entre os resultados de cargas de ruptura experimentais foi realizado após a normalização das alturas úteis em relação à laje de referência em questão, utilizando um coeficiente $K (= d_{ref} / d)$, sendo que d_{ref} corresponde à altura útil da laje de referência.

Um acréscimo de 50% no perímetro do pilar, entre as lajes L1 (pilar 200 mm x 200 mm – testada por GOMES (1991)) e L42 (pilar 200 mm x 400 mm), acarretou um aumento de aproximadamente 44% na carga de ruptura. Entretanto, o mesmo acréscimo de perímetro, entre as lajes L1 e L42A (similar à L42), conduziu a um aumento de 29% na carga de ruptura.

Considerando as lajes L1 e L45 (pilar 200 mm x 600 mm), observa-se que o aumento de 100% no perímetro do pilar, produziu um aumento de 55% na carga de ruptura. Quando se

comparam as lajes L1 e L46 (pilar 200 mm x 800 mm), verifica-se que o aumento de 150% no perímetro do pilar, elevou em 64% a carga de ruptura.

Na Sub-Série IB, as lajes L41 e L41A, ambas apoiadas em pilares com dimensões 150 mm x 250 mm, apresentaram alturas efetivas diferentes, e iguais a 139 mm e 164 mm. Entretanto, após a normalização das alturas efetivas, a laje L41 apresentou carga de ruptura superior em 9% à da laje L41A. Uma comparação entre as lajes L41A e L43A, mostra que um aumento de 50% no perímetro do pilar provocou um acréscimo de 19% na carga de ruptura, e um aumento no perímetro do pilar de 88%, comparando as lajes L41A e L44 (pilar 150 mm x 600 mm), produziu um acréscimo de 25% na carga de ruptura (Tab.4.9).

Tabela 4.9 – Influência da variação do perímetro do pilar na variação da carga de ruptura experimental das lajes da Série I

Laje	Pilar (mm)		β_c (c_{max}/c_{min})	d (mm)	u_0 (mm)	V_{Exp} (kN)	$K.V_{Exp}$ (kN)	Δu_0	$\Delta (K.V_{Exp})$
	c_{min}	c_{max}							
L1*	200	200	1	159	800	560	560	1,00	1,00
L42	200	400	2	139	1200	703	804	1,50	1,44
L42A	200	400	2	164	1200	743	720	1,50	1,29
L45	200	600	3	154	1600	843	870	2,00	1,55
L46	200	800	4	164	2000	947	918	2,50	1,64
L41A*	150	250	1,67	164	800	650	650	1,00	1,00
L41	150	250	1,67	139	800	600	708	1,00	1,09
L43A	150	450	3	164	1200	776	776	1,50	1,19
L44	150	600	4	164	1500	814	814	1,88	1,25

* laje de referência; Δu_0 – variação do perímetro do pilar; $\Delta(K.V_{Exp})$ – variação da carga de ruptura; L1 – laje testada por GOMES (1991); $K = d_{ref}/d$

A Fig. 4.28 mostra curvas que relacionam a variação da carga de ruptura com a variação do perímetro do pilar (a partir da laje L1 - pilar de 200 mm x 200 mm, e da laje L41A - pilar de 150 mm x 250 mm), para os resultados experimentais. Observa-se que ocorre uma redução na taxa de crescimento da carga de ruptura experimental quando se elevou o perímetro do pilar em incrementos iguais, concomitante o acréscimo da relação entre os lados do pilar, a partir de $c_{max}/c_{min} = 3$.

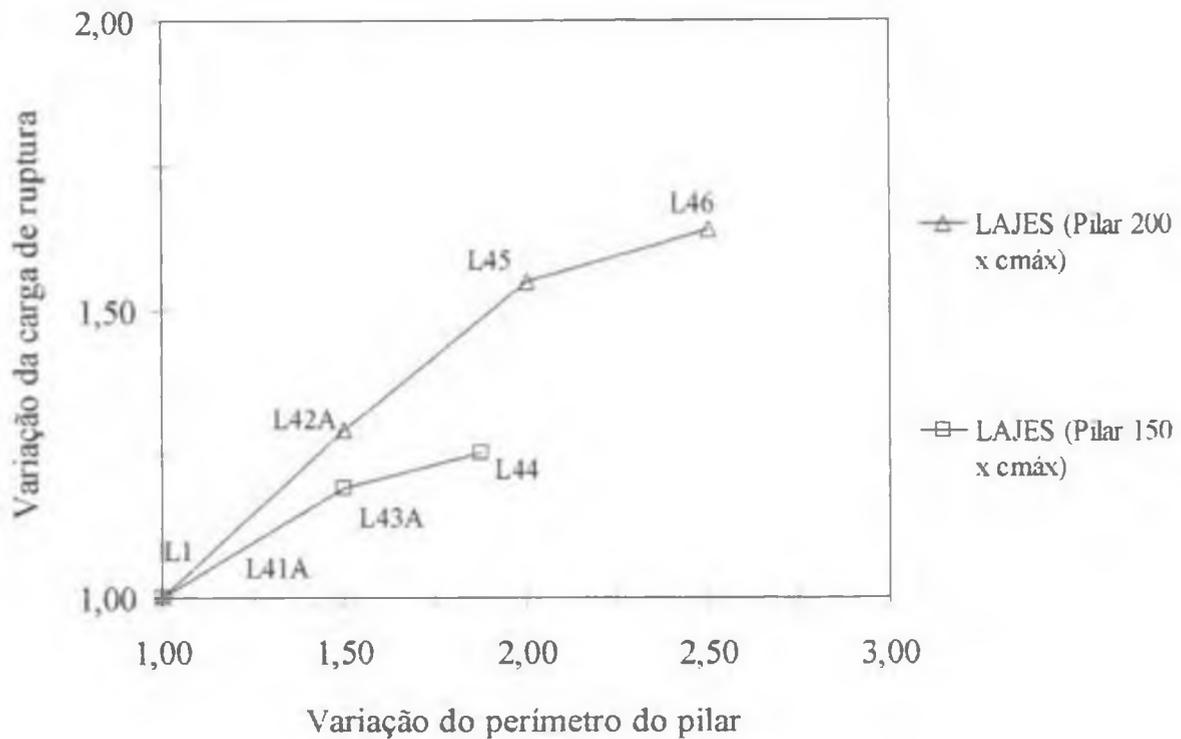


Figura 4.28 – Influência da variação do perímetro do pilar na variação da carga de ruptura experimental das lajes da Série 1

Na investigação da influência da relação entre lados do pilar na carga de ruptura experimental das lajes da Série 1, agrupou-se na Tab.4.10, a laje L1 (de GOMES (1991)) com as lajes ensaiadas com pilares de mesmo perímetro. Novamente, procedeu-se à normalização das alturas úteis das lajes em relação às lajes de referência em questão.

Considerando as lajes L1 e L41, após a normalização das alturas efetivas, ambas apoiadas em pilares de perímetro igual a 800 mm, observa-se que o aumento da relação entre lados de 1,0 para 1,67, aumentou a carga de ruptura experimental em 23%. Para as lajes L1 e L41A, a variação de c_{max}/c_{min} , de 1 para 1,67, provocou um aumento na carga de ruptura de 13%, como mostra a Tab.4.10.

Com relação às lajes apoiadas em pilares de perímetro igual a 1200 mm, o aumento da relação c_{max}/c_{min} do pilar de 2 para 3 (caso das lajes L42A e L43A), produziu um acréscimo de, aproximadamente, 5% na carga de ruptura experimental.

Tabela 4.10 – Influência de β_c na carga de ruptura experimental das lajes da Série 1

Laje	Pilar (mm)		$c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$	d (mm)	u_0 (mm)	V_{Exp} (kN)	$K \cdot V_{Exp}$ (kN)	$K V_{Exp}/V_{Exp(L.1 \text{ ou } L.42A)}$
	$c_{m\acute{i}n}$	$c_{m\acute{a}x}$						
L1	200	200	1	159	800	560	560	1,00
L41	150	250	1,67	139	800	600	686	1,23
L41A	150	250	1,67	164	800	650	630	1,13
L42A	200	400	2	164	1200	743	743	1,00
L43A	150	450	3	164	1200	776	776	1,05

4.6.4.3 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM RESULTADOS DA LITERATURA

O aumento do perímetro do pilar, mantendo constante a menor dimensão (aumento da relação entre lados), das lajes testadas por TENG *et al.* (1999), SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003), provocou acréscimo da carga de ruptura experimental (Tab. 4.11 e Fig. 4.29). O aumento da carga de ruptura não se apresentou linear, de forma que a taxa de crescimento da carga diminui com o aumento, em incrementos iguais, do perímetro do pilar e da relação $c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$.

Uma variação de 100% no perímetro do pilar das lajes de TENG *et al.*, a partir de um pilar quadrado, provocou um acréscimo de 44% na carga de ruptura, enquanto que nas lajes da presente pesquisa, o aumento na carga de ruptura foi de 55%. Este mesmo acréscimo no perímetro do pilar, a partir de um pilar quadrado, no caso das lajes de SILVA (2003) e de OLIVEIRA (2003), elevou as cargas de ruptura em, respectivamente, 72% e 13%.

Ao comparar as lajes da presente pesquisa com as testadas por SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003), observa-se que uma variação no perímetro do pilar de 50% produziu um acréscimo de 29% na carga de ruptura nas lajes ensaiadas, de 47%, nas lajes de SILVA (2003), e de apenas 4%, nas lajes de OLIVEIRA (2003).

Um aumento de 200% no perímetro do pilar, a partir de um pilar quadrado, provocou um acréscimo na carga de ruptura de 71%, no caso das lajes de TENG *et al.* (1999), e de 38%, nas lajes de OLIVEIRA (2003). Apesar das diferentes variações nas cargas, observa-se que esta continua a aumentar quando se eleva a relação $c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$ até 5, ao contrário do que prevê algumas normas de projeto e métodos de pesquisadores.

Tabela 4.11 – Comparação dos resultados experimentais das lajes da Série 1 com os de TENG *et al.* (1999), SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003)

Autor	Laje	Pilar (mm)		$c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$	d (mm)	u_0 (mm)	$K \cdot V_{Exp}$ (kN)	Δu_0	ΔV_{Exp}
		$c_{m\acute{i}n}$	$c_{m\acute{a}x}$						
TENG <i>et al.</i> (1999)	OC11	200	200	1	115	800	423	1,00	1,00
	OC13	200	600	3	107	1600	610	2,00	1,44
	OC15	200	1000	5	103	2400	725	3,00	1,71
Grupo 1 - pilar 200 x $c_{m\acute{a}x}$	L1*	200	200	1	159	800	560	1,00	1,00
	L42A	200	400	2	164	1200	720	1,50	1,29
	L45	200	600	3	154	1600	870	2,00	1,55
	L46	200	800	4	164	2000	918	2,50	1,64
Grupo 1 - pilar 150 x $c_{m\acute{a}x}$	L41A	150	250	1,67	164	800	650	1,00	1,00
	L43A	150	450	3	164	1200	776	1,50	1,19
	L44	150	600	4	164	1500	814	1,88	1,25
SILVA (2003)	L1	150	150	1	90	600	273	1,00	1,00
	L2	150	300	2	90	900	401	1,50	1,47
	L3	150	450	3	90	1200	469	2,00	1,72
OLIVEIRA (2003)	L1c	120	120	1	107	480	318	1,00	1,00
	L2c	120	240	2	107	720	331	1,50	1,04
	L3c	120	360	3	106	960	361	2,00	1,13
	L4c	120	480	4	107	1200	404	2,50	1,27
	L5c	120	600	5	109	1440	439	3,00	1,38

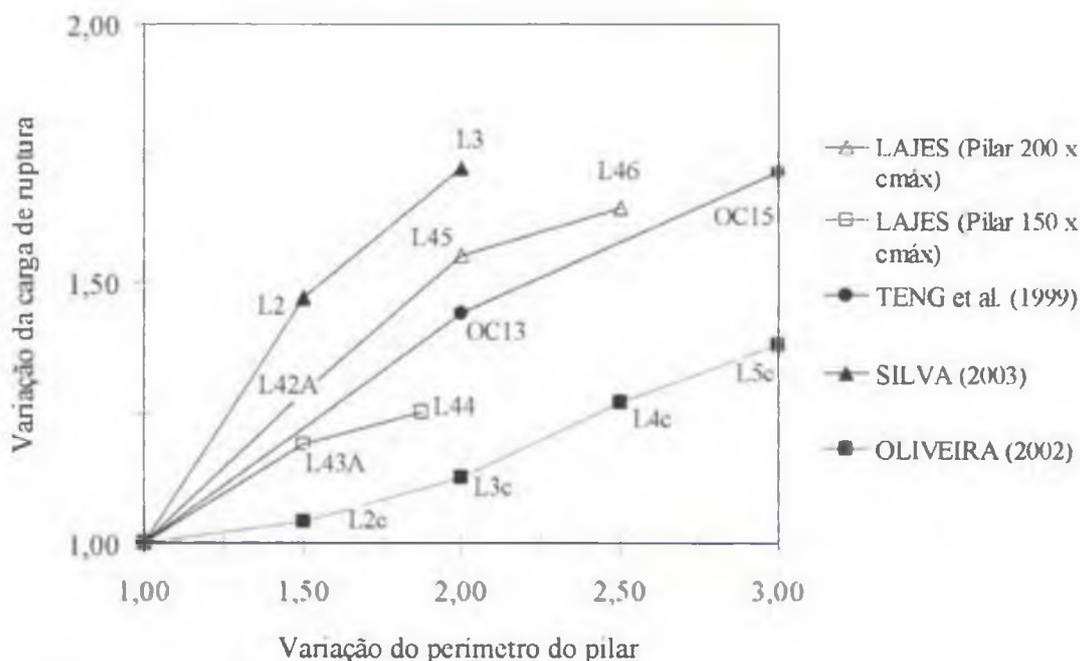


Figura 4.29 – Comparação das cargas de ruptura das lajes da Série 1 com as de TENG *et al.* (1999), SILVA (2003) e OLIVEIRA (2003)

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO

5.1 – INTRODUÇÃO

Os resultados experimentais de propriedades dos materiais, deslocamentos verticais, deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento, fissuração, e, resistência das lajes das Séries 2 e 3 são apresentados neste capítulo.

Para as lajes da Série 2 é feita uma análise da influência dos furos posicionados adjacentes ao pilar e do detalhamento da armadura de flexão, na ductilidade e na resistência ao cisalhamento das lajes. No caso das lajes da Série 3, uma análise dos detalhamentos de armadura é feita nas lajes sem e com dois furos.

Comparações entre os resultados experimentais da presente pesquisa e da literatura, são apresentadas e discutidas.

5.2 – MATERIAIS

5.2.1 – CONCRETO

Assim como na Série 1, foram realizados ensaios para obtenção do controle de qualidade do concreto, aos 7, 14, 28 e 90 dias, e no dia do ensaio das lajes das Séries 2 e 3. Os resultados individuais são apresentados no ANEXO A.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração por compressão diametral nos corpos de prova, se apresentaram dentro do intervalo estipulado pela NBR-6118 (2003). Os resultados dos

ensaios de módulo de elasticidade tangente apresentaram, assim como nas lajes da Série 1, valores inferiores aos estipulados pela norma brasileira em, no mínimo, 28%, e, no máximo, 44%. Os resultados teóricos da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e módulo de elasticidade inicial (E_c), para as lajes das Séries 2 e 3, foram calculados utilizando as eqs. 4.1 e 4.2.

A Tab. 5.1 apresenta os resultados médios dos ensaios realizados em corpos de prova cilíndricos de concreto de dimensões 150 mm x 300 mm. A Fig. 5.1 mostra as curvas de “Tensão x Deformação”, obtidas experimentalmente para o concreto utilizado nas lajes, até valores da tensão de compressão axial no concreto equivalente a 80% da carga de ruptura.

Tabela 5.1 – Propriedades do concreto no dia do ensaio das lajes das séries 2 e 3

Laje	Idade (dias)	f'_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ct,sp}$ (NB1/03) (MPa)	E_c (GPa)	E_c (NB1/03) (GPa)	$E_c / E_{c(NB1/03)}$
L45FS_CG	18	40,5	3,6	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,2$	20,2	35,6	0,57
L45FD_CG	18	39,0	4,2	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,0$	22,0	35,0	0,63
L45FD	18	41,4	4,0	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,2$	24,2	36,0	0,67
L45FFS_CG	19	41,6	4,2	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,2$	23,9	36,1	0,66
L45FFD_CG	19	40,6	4,2	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,2$	24,7	35,7	0,69
L45FFD	18	37,0	4,3	$2,5 < f_{ct,sp} < 4,7$	20,7	34,1	0,61
L45FFD_AC2	25	43,8	4,1	$2,9 < f_{ct,sp} < 5,3$	20,8	37,1	0,56
L45FFD_AC3	18	39,4	3,5	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,0$	25,4	35,2	0,72
L45FFD_AC4	18	43,2	3,1	$2,9 < f_{ct,sp} < 5,3$	22,5	36,8	0,61
L45FFD_AC5	18	40,7	3,2	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,2$	21,0	35,7	0,59
L45_AC1	18	39,0	3,2	$2,7 < f_{ct,sp} < 5,0$	21,5	35,0	0,61
L45_AC5	19	41,1	3,4	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,2$	23,1	35,9	0,64
MÉDIA		40,6	3,8	$2,8 < f_{ct,sp} < 5,1$	22,6	35,7	0,63
D.P.		1,87	0,46	-	1,47	0,81	0,03
C.V. (%)		4,6	12,1	-	6,5	2,3	4,8

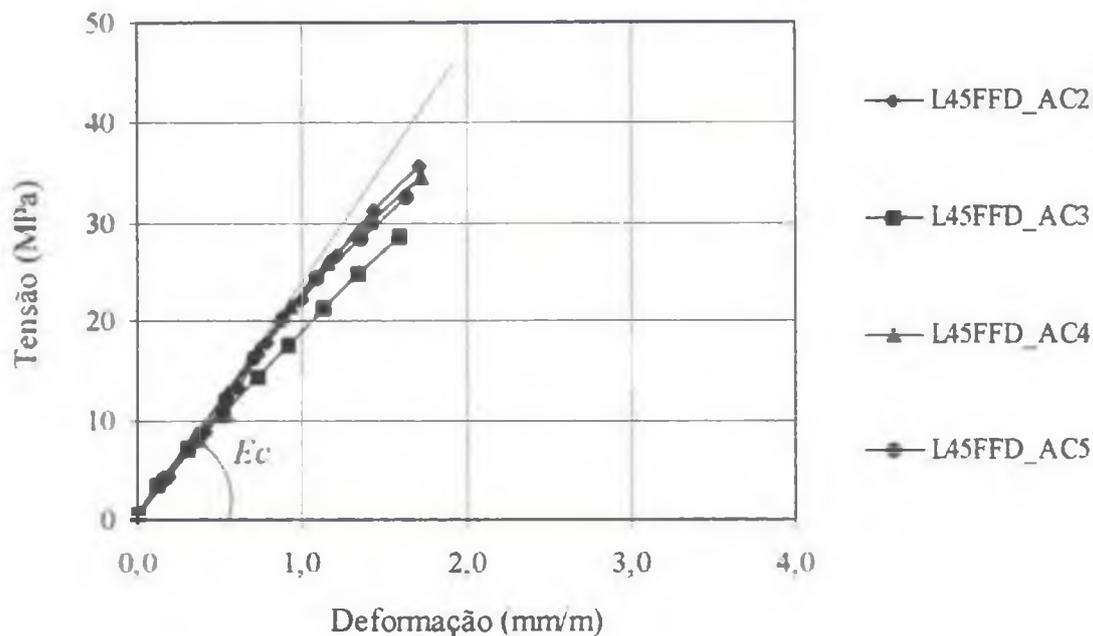


Figura 5.1 – Curvas “Tensão x Deformação” do concreto utilizado nas lajes

5.2.2 – AÇO

Os resultados dos ensaios de tração, realizados com o aço das armaduras de flexão e de cisalhamento, de acordo com a NBR-6152 (1992), são apresentados na Tab. 5.2, e as curvas de “Tensão x Deformação”, de cada diâmetro da armadura utilizada, são apresentadas na Fig. 5.2. Os resultados individuais dos valores apresentados na Tab. 5.2 constam no ANEXO A.

Tabela 5.2 – Propriedades dos aços utilizados nas lajes das séries 2 e 3

Diâmetro (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (mm/m)	E_s (GPa)	Utilização das barras
8,0	598	723	2,9	210	Armadura inferior de flexão e cisalhamento
10,0	593	733	2,8	213	Armadura de cisalhamento
12,5	541	702	2,4	229	Ancoragem da armadura de flexão
16,0	601	677	4,9	211	Armadura superior de flexão

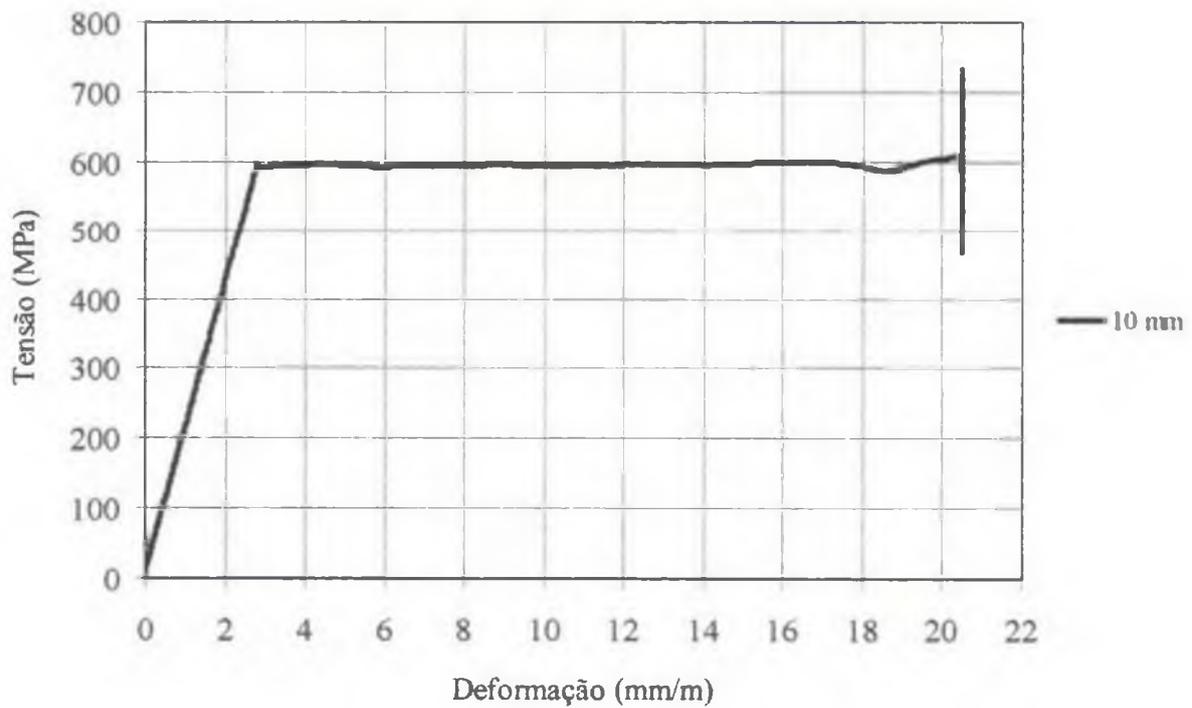
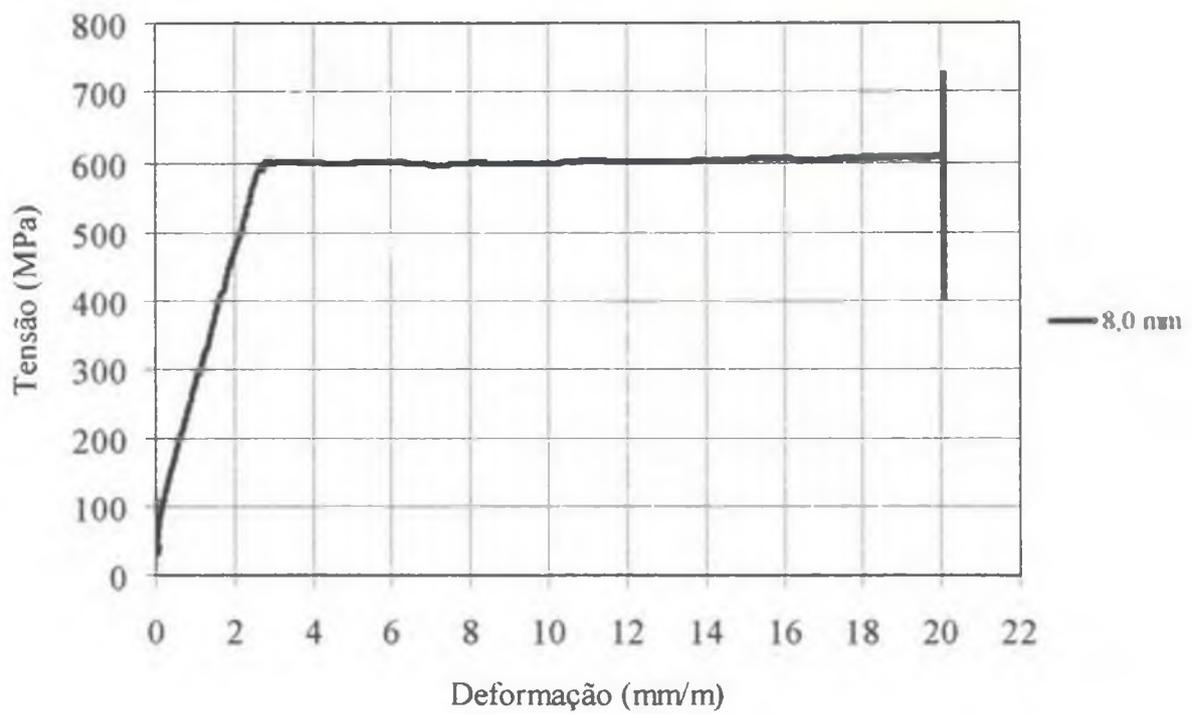


Figura 5.2 – Curvas de “Tensão x Deformação” média dos aços utilizados nas lajes das séries 2 e 3

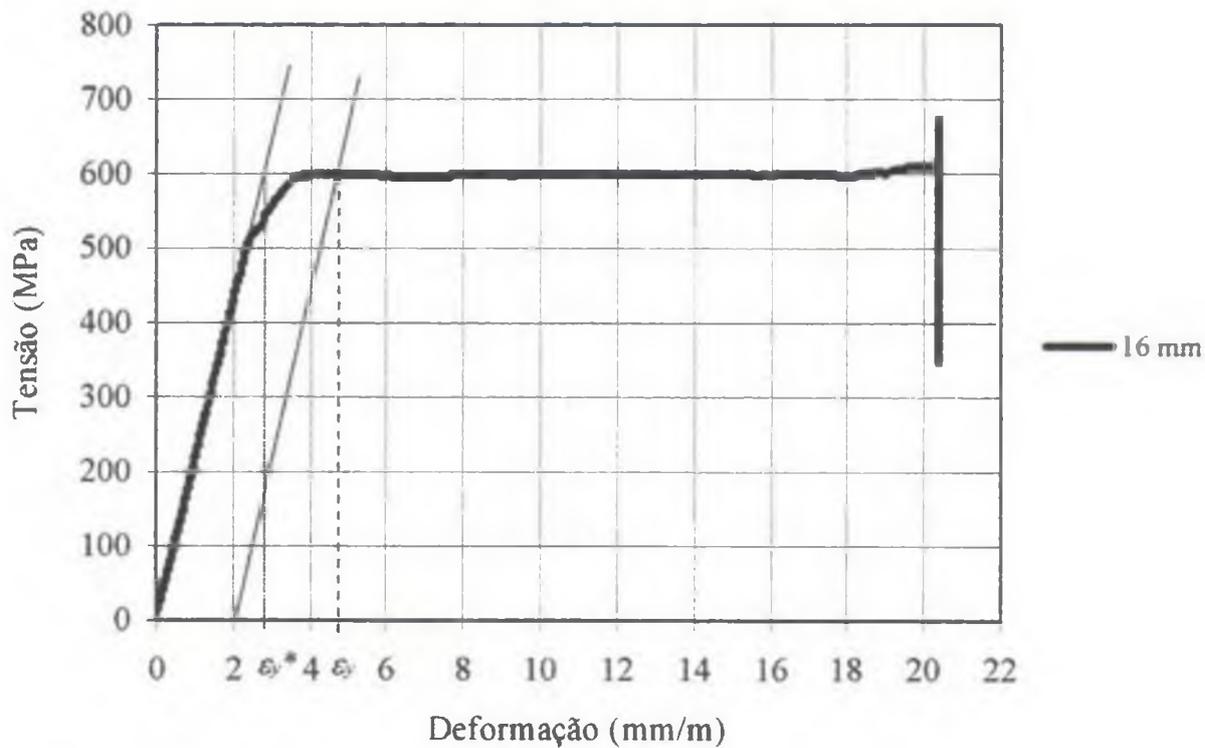
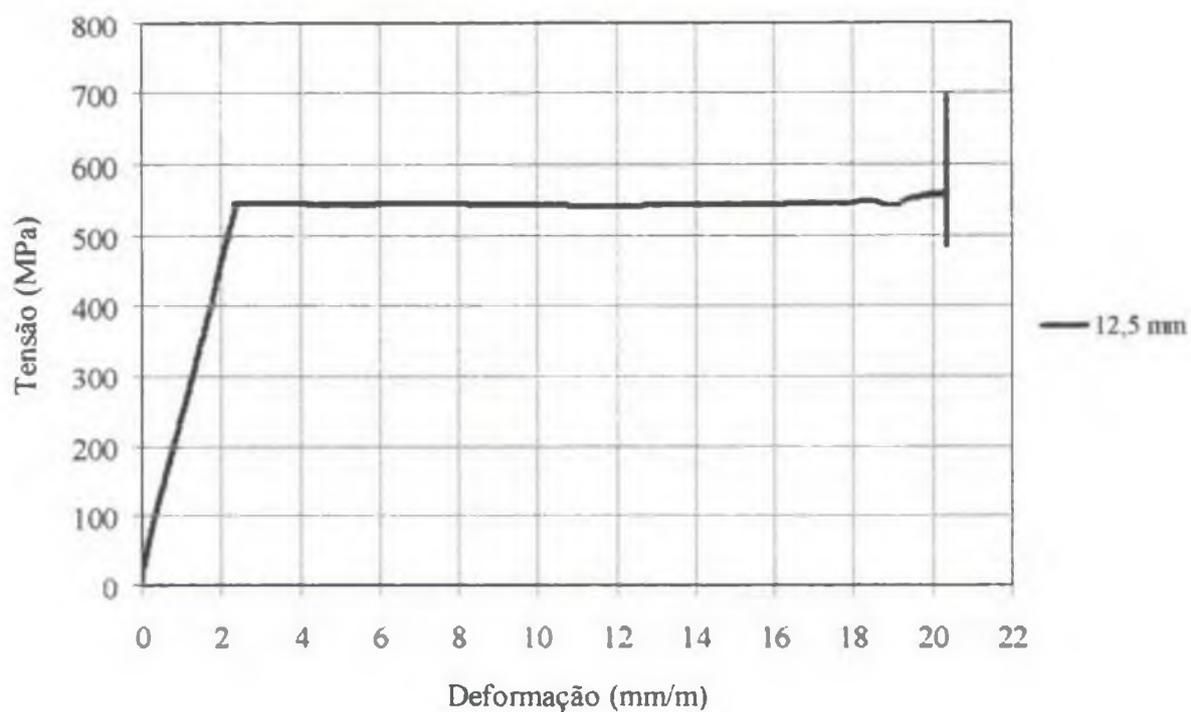


Figura 5.2 – Curvas de “Tensão x Deformação” média dos aços utilizados nas lajes das séries 2 e 3 (continuação)

5.3 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os maiores deslocamentos verticais das lajes das séries 2 e 3 ocorreram no centro da laje, e diminuíram com o afastamento do ponto instrumentado em relação ao ponto central.

Os deslocamentos das lajes da Série 2, especificamente com um furo (L45FS_CG e L45FD_CG), ao longo da direção x , foram praticamente semelhantes àqueles na direção y (lado do pilar sem o furo), como mostra a Fig. 5.3. Observa-se que ocorre uma simetria no perfil de deslocamentos da laje L45FD, em relação ao ponto central da laje, somente na direção x , como mostra a Fig. 5.4. Na direção y (direção do furo), não é observado a simetria na distribuição de deslocamentos, devido à presença do furo em um dos lados do pilar. Na direção y , os deslocamentos foram levemente superiores nos pontos dispostos no lado com furo, especialmente em pontos afastados do pilar.

A Fig. 5.5 mostra que, nas lajes com dois furos da Série 2, os deslocamentos das lajes, na direção y , foram mais elevados que aqueles na direção x , devido à menor deformação da laje causada pela restrição imposta pelo pilar, além da presença de furos adjacentes ao pilar, como pode ser visto a partir da comparação entre as figs. 5.3 e 5.5.

Na laje L45FFD, com dois furos simétricos, observa-se a simetria no perfil de deslocamentos nas direções x e y . Na direção y , nota-se a descontinuidade na distribuição de deslocamentos nos pontos externos aos furos, em relação aos pontos sobre o pilar, devido à presença dos furos, como mostra a Fig. 5.6.

Os deslocamentos das lajes da Série 3 foram medidos em pontos distribuídos alinhadamente sobre a laje, nas direções x e y , em posições idênticas às da L45FFD. Observa-se nas figs. 5.7 a 5.12 que, em todas as lajes da Série 3, os perfis de deslocamentos apresentaram-se simétricos, em relação ao centro da laje, nas direções x e y . Na direção x , os perfis apresentaram uma distribuição aproximadamente linear, em relação ao pilar. Na direção y , observa-se que este comportamento não ocorre nas lajes com furos.

Assim como na laje L45FFD, ocorreu uma descontinuidade no perfil de deslocamentos da laje na direção y (direção do furo), dos pontos sobre o pilar para os pontos externos ao furo. Observa-se, inclusive, uma descontinuidade na distribuição dos deslocamentos, do ponto

central da laje para os pontos adjacentes, e, posicionados sobre o pilar, provavelmente, devido aos pontos estarem fixados em suportes distintos. Tal fato não foi observado nas lajes monolíticas da Série 3 (L45_AC1 e L45_AC5).

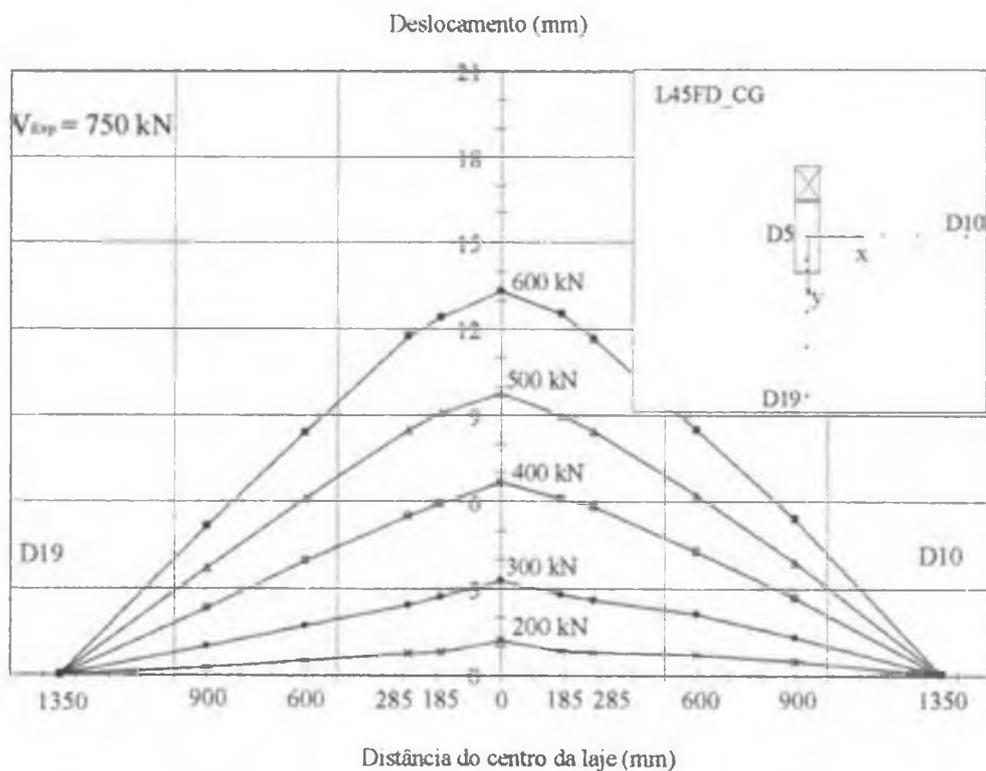
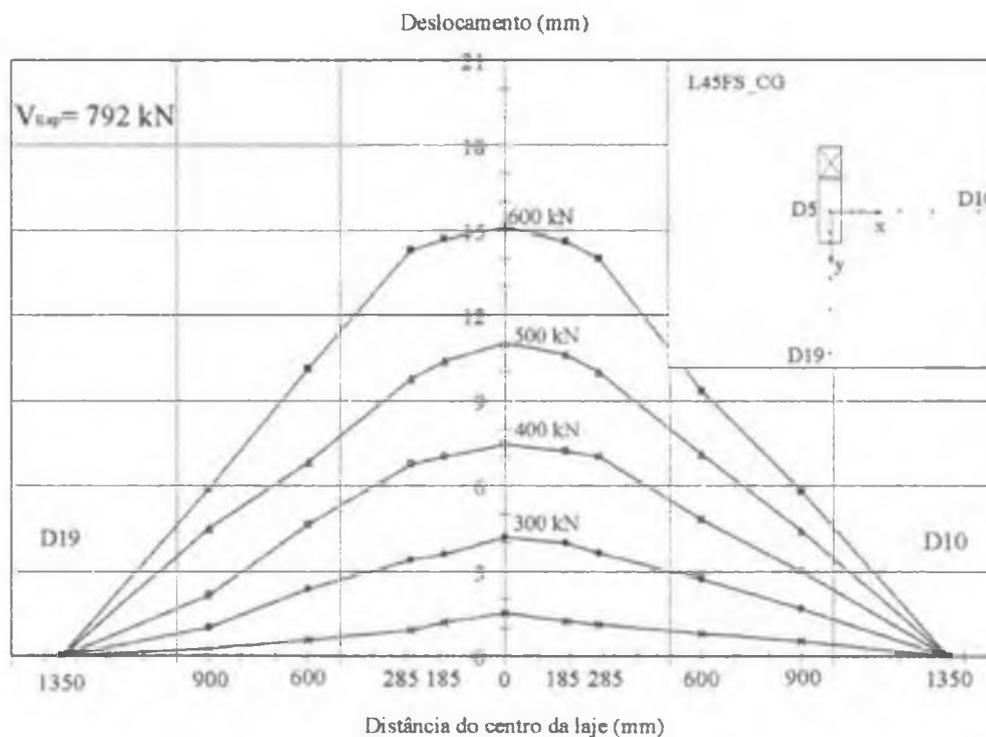


Figura 5.3 – Deslocamentos das lajes L45FS_CG e L45FD_CG

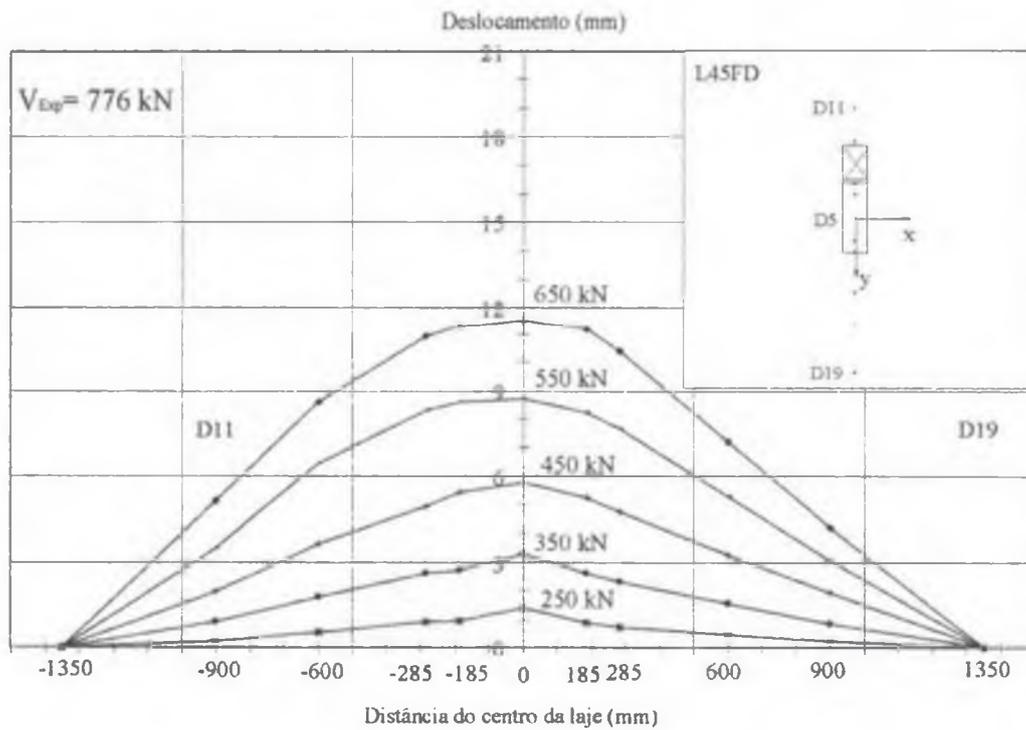
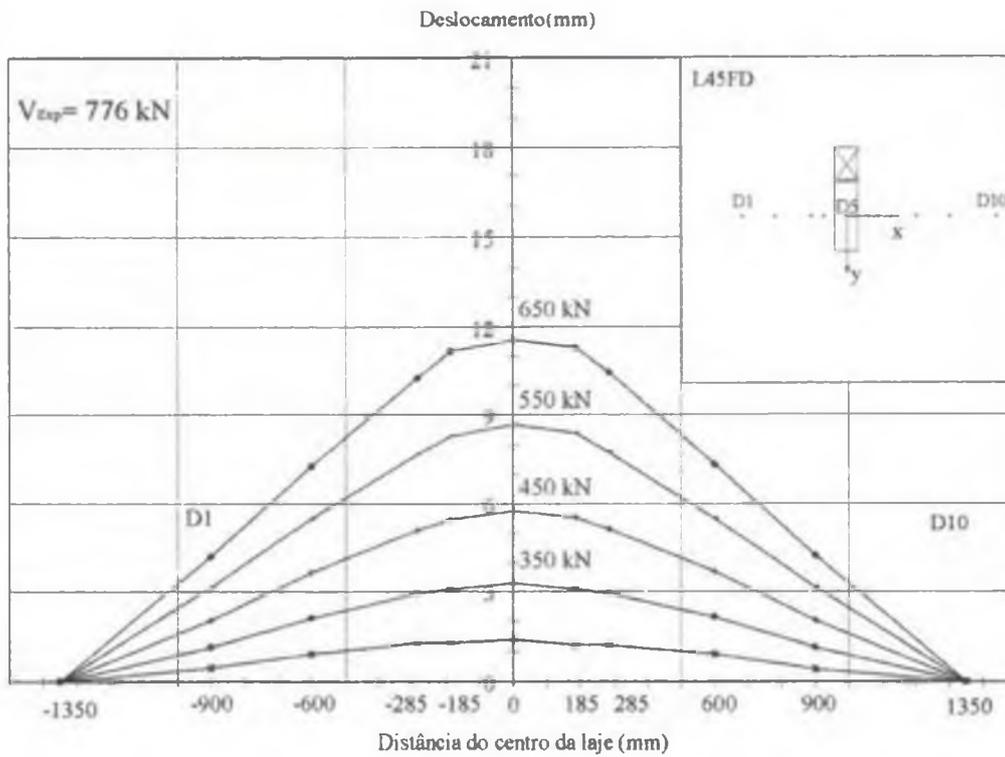


Figura 5.4 – Deslocamentos da laje L45FD

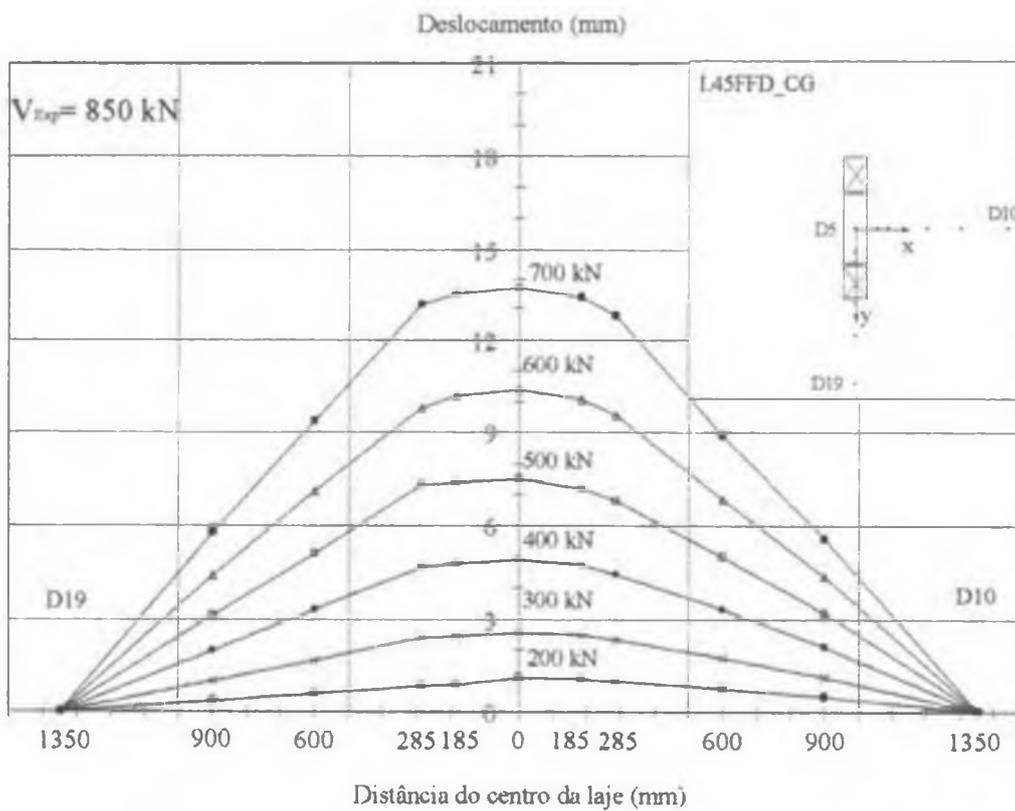
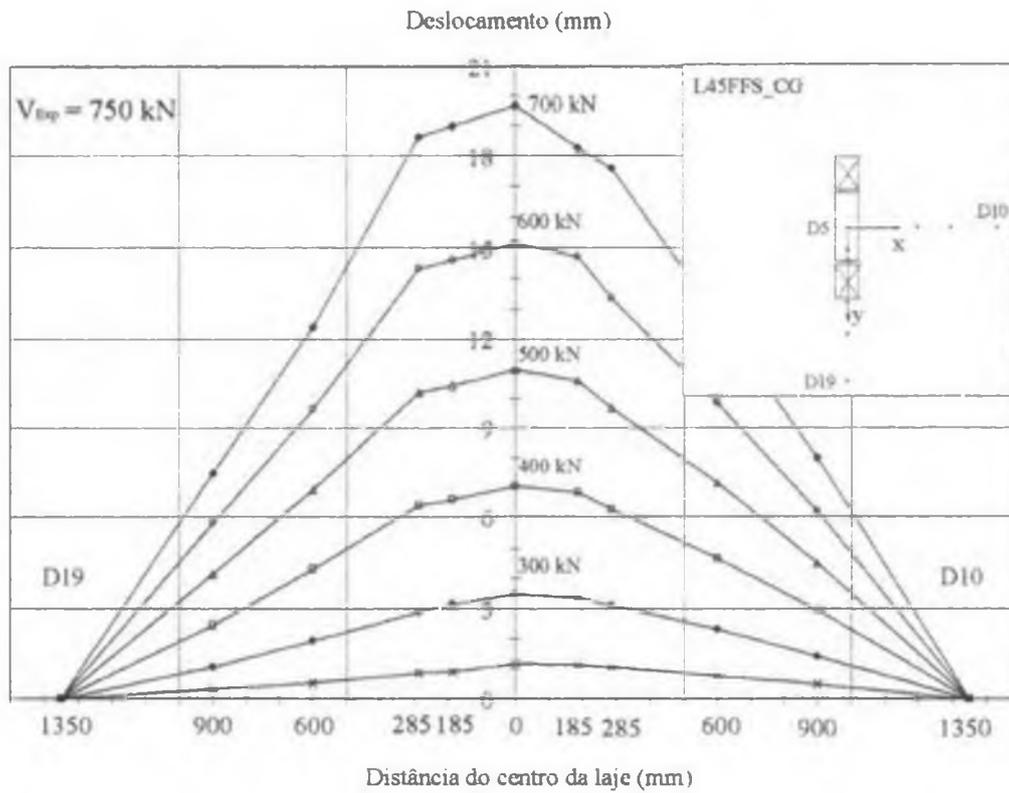


Figura 5.5 – Deslocamentos das lajes L45FFS_CG e L45FFD_CG

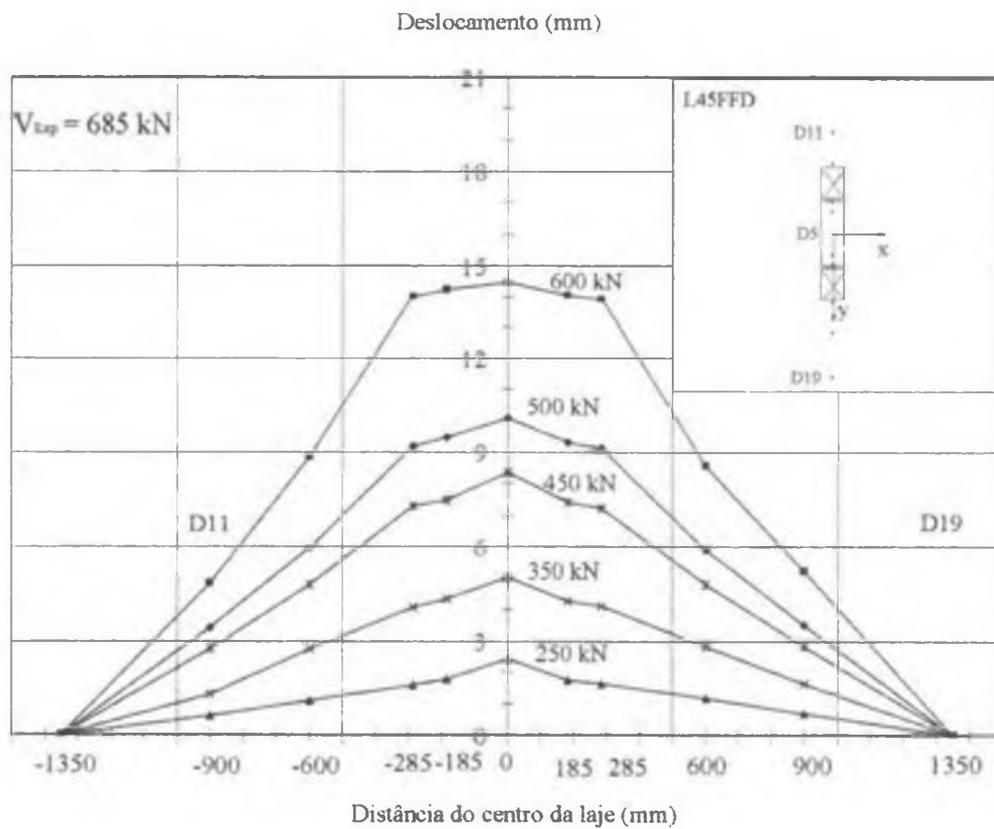
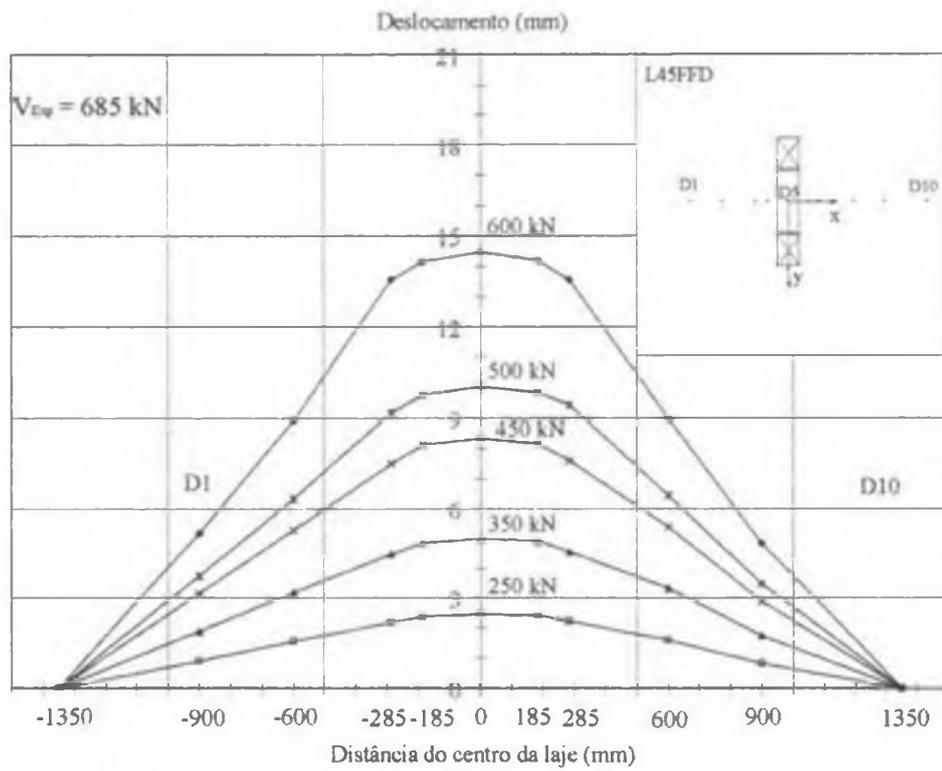


Figura 5.6 – Deslocamentos da laje L45FFD

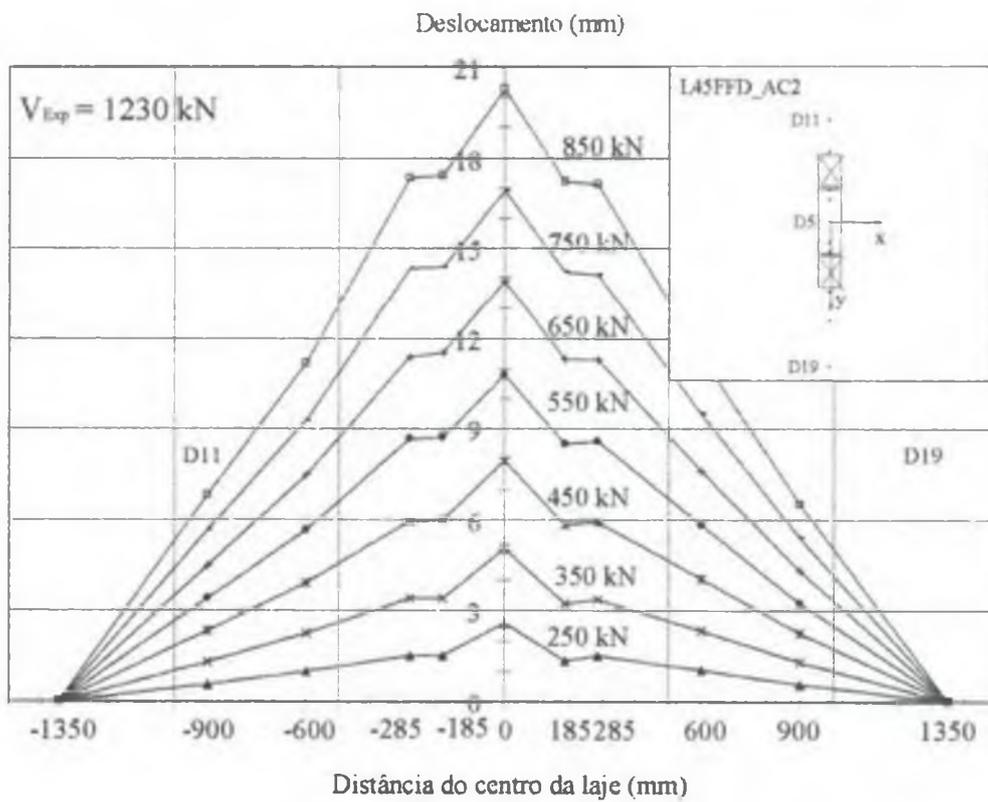
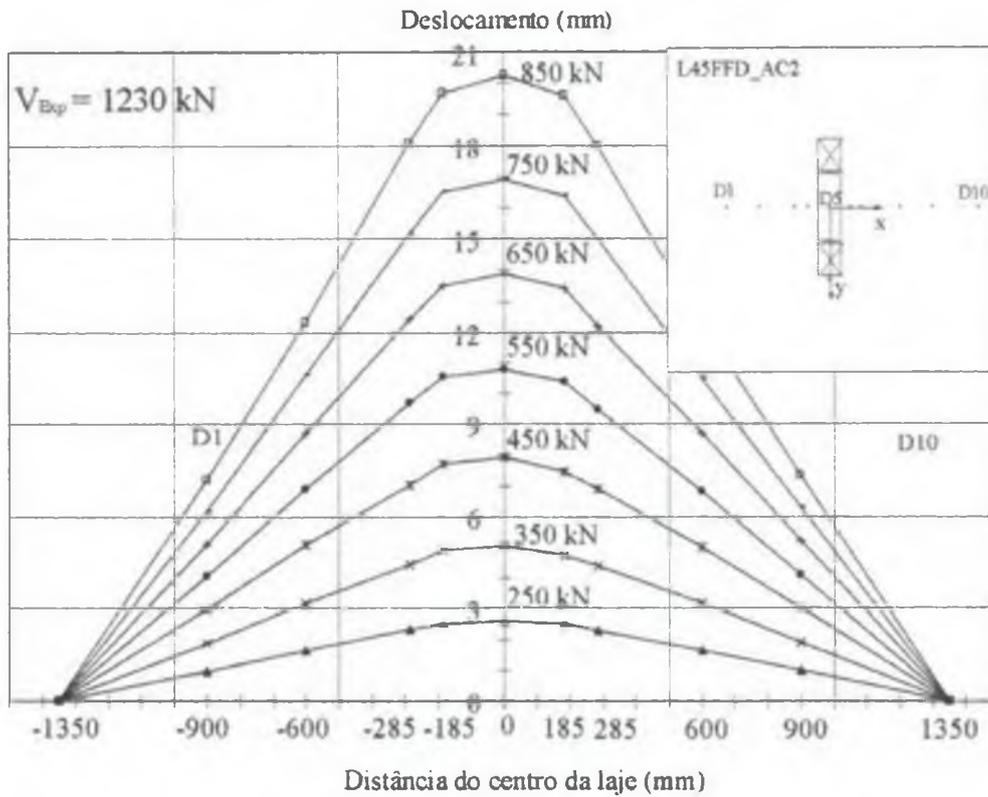


Figura 5.7 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC2

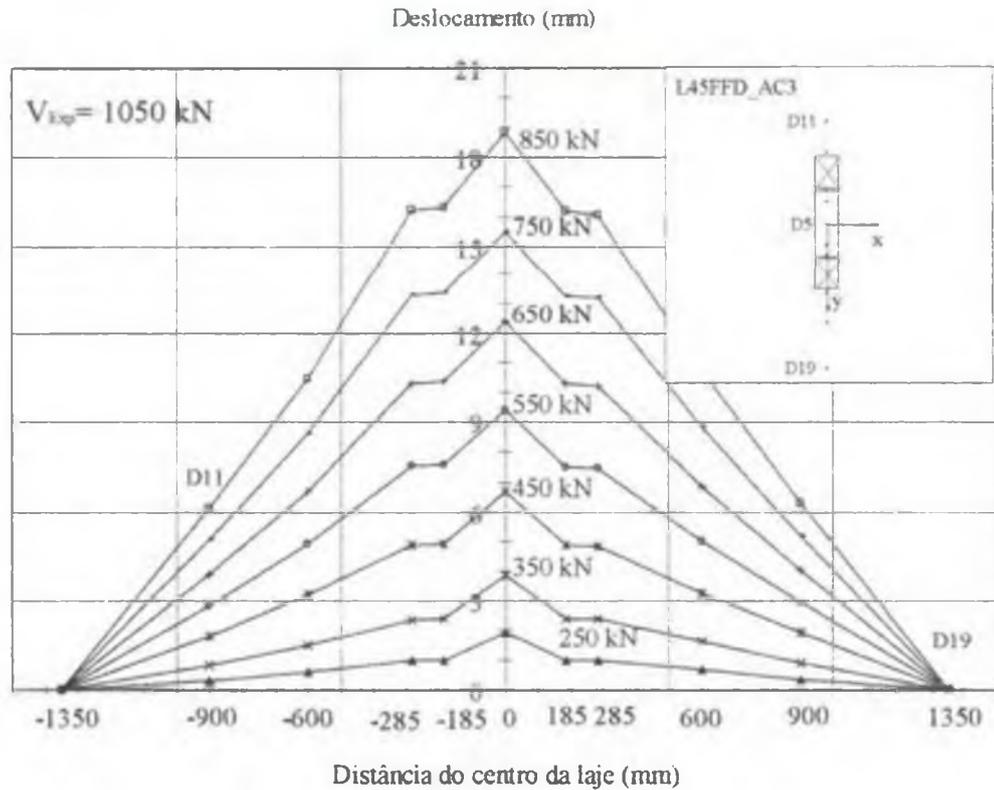
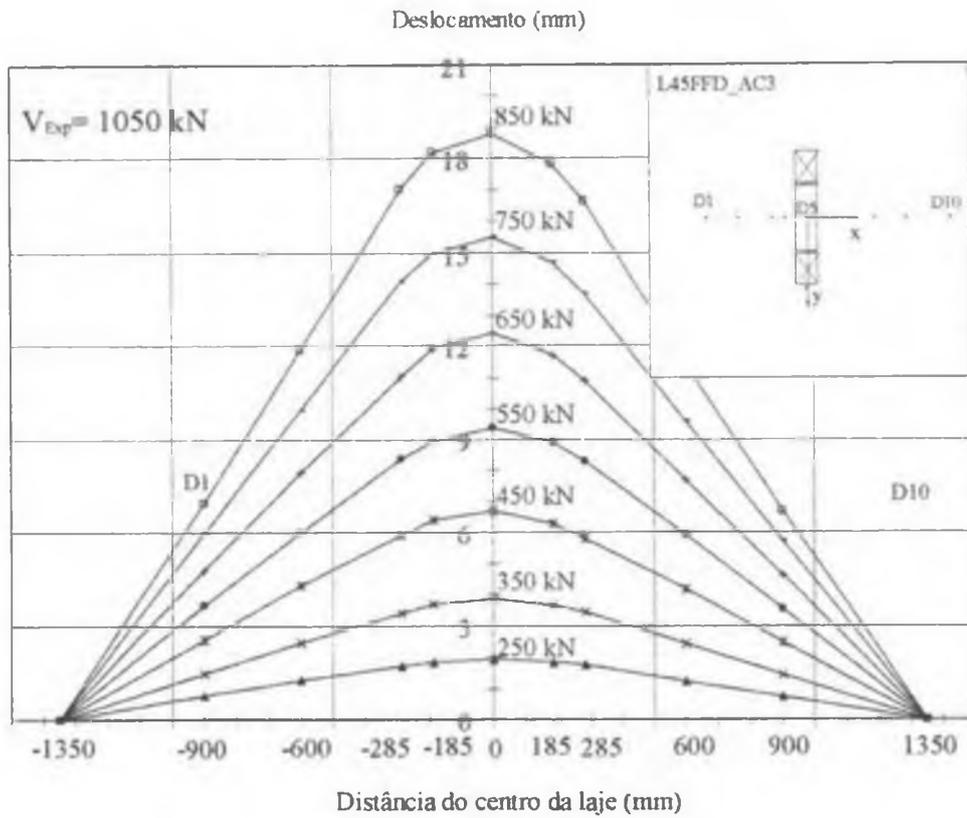


Figura 5.8 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC3

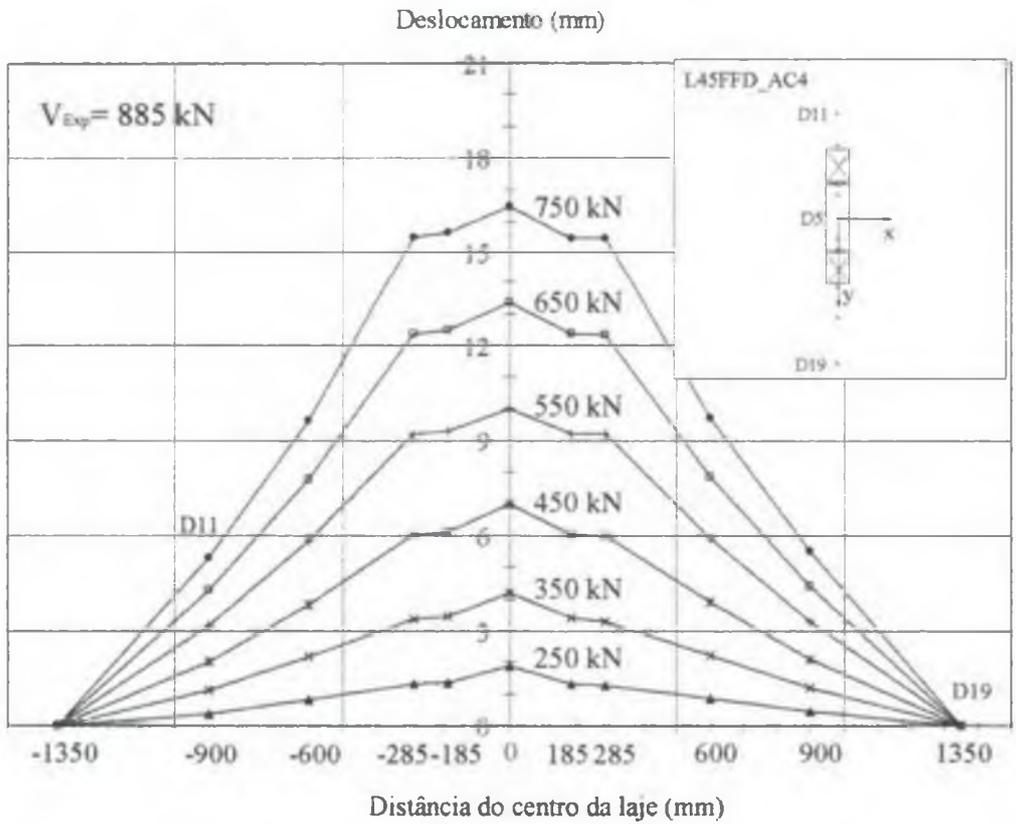
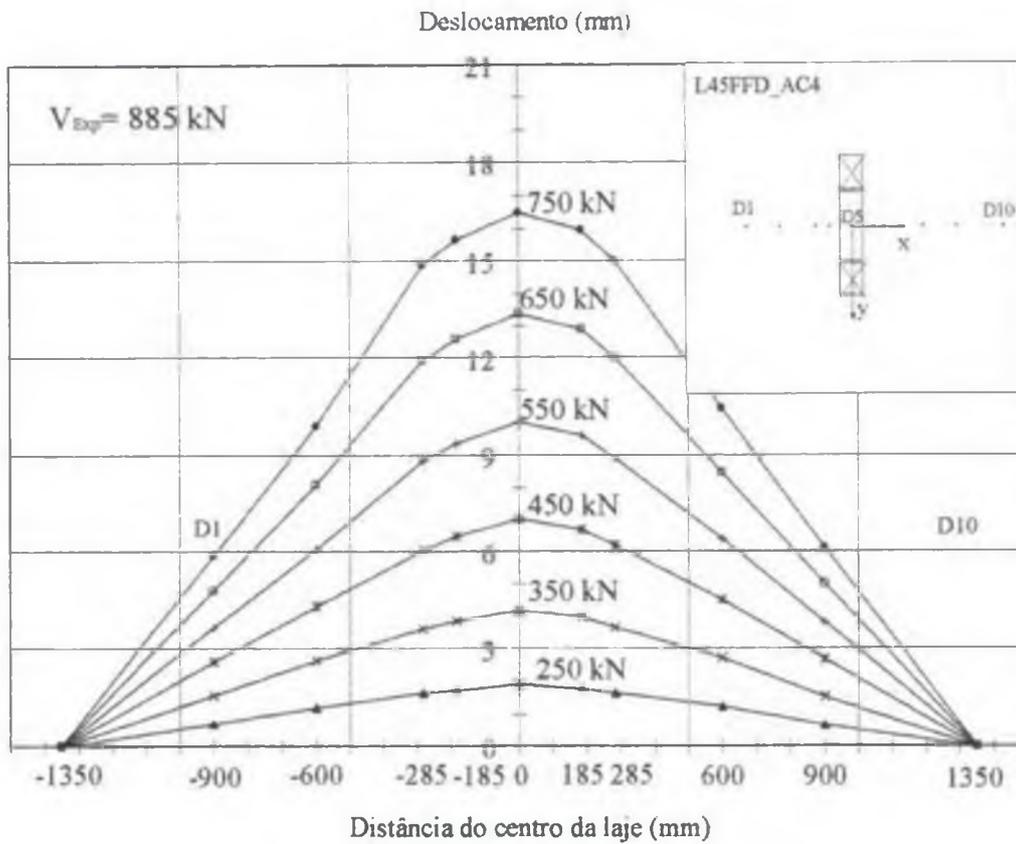


Figura 5.9 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC4

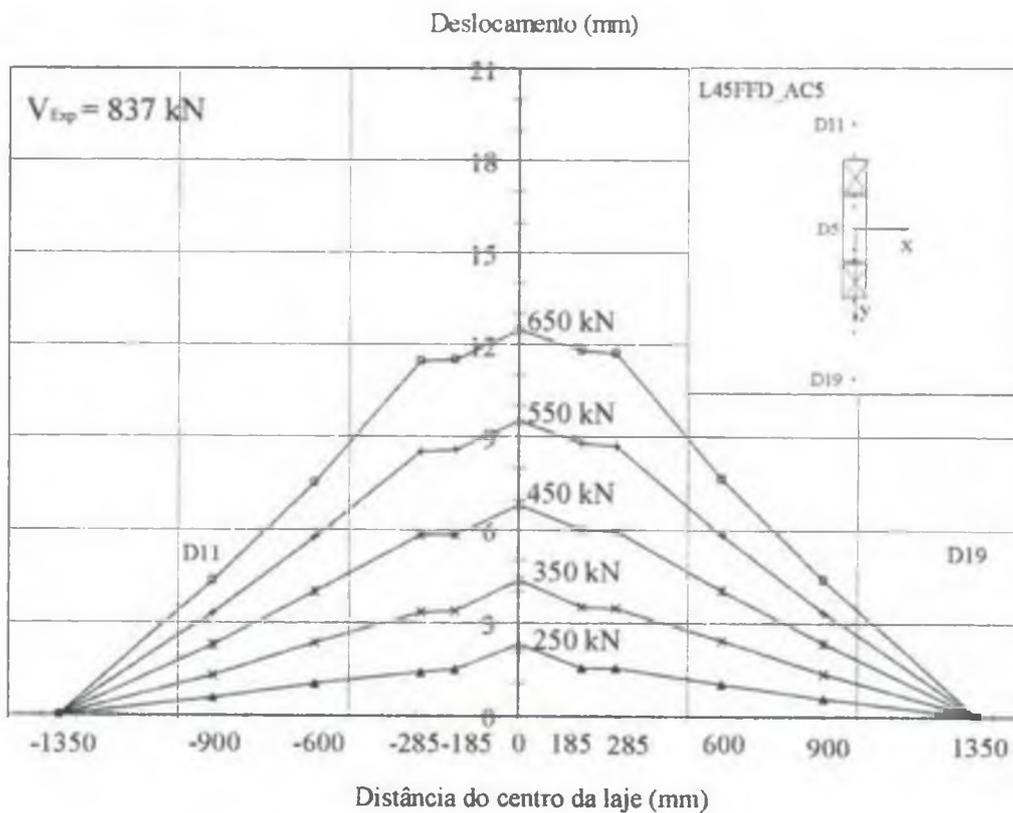
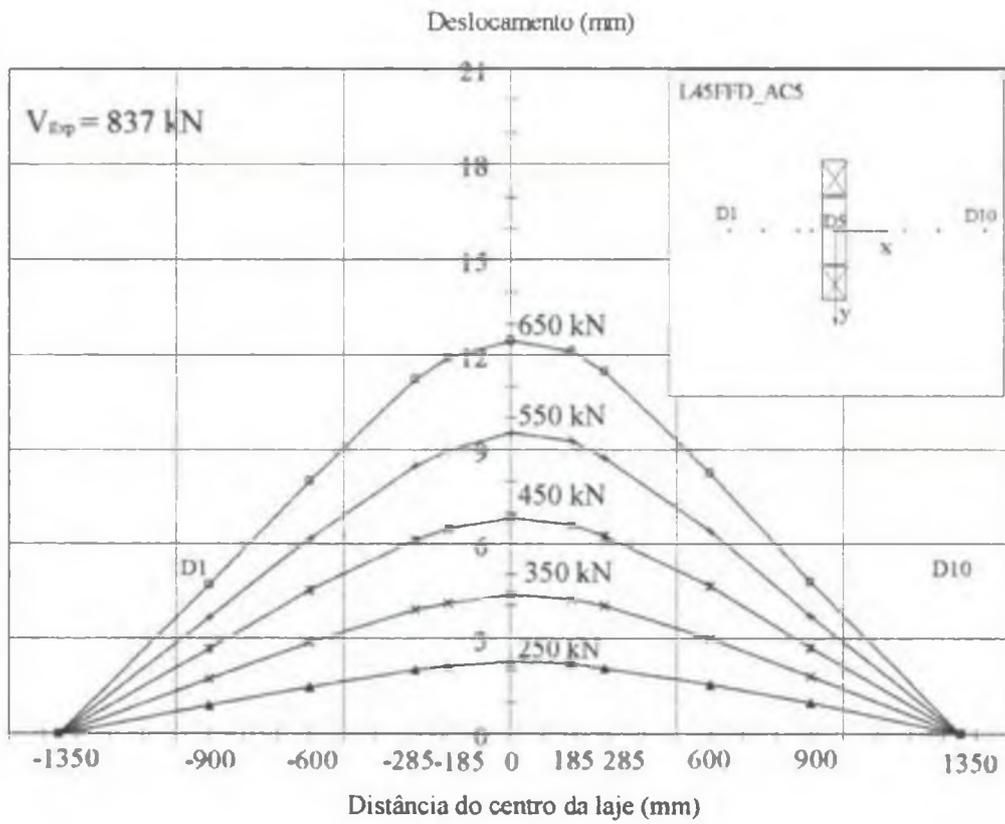


Figura 5.10 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC5

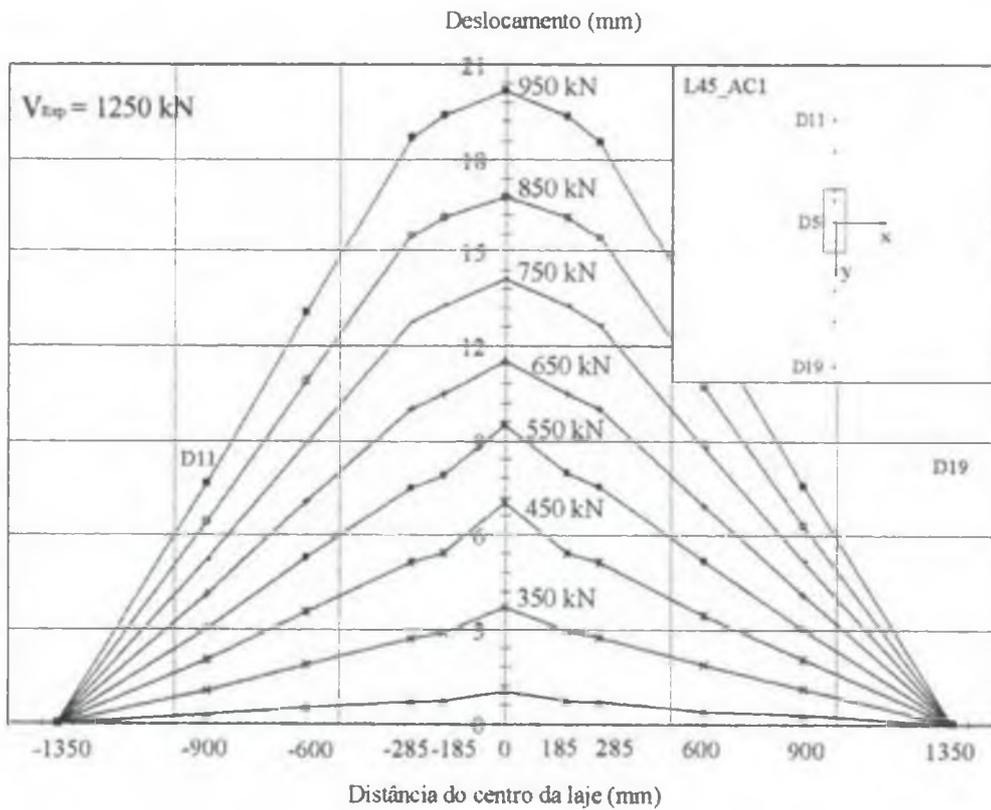
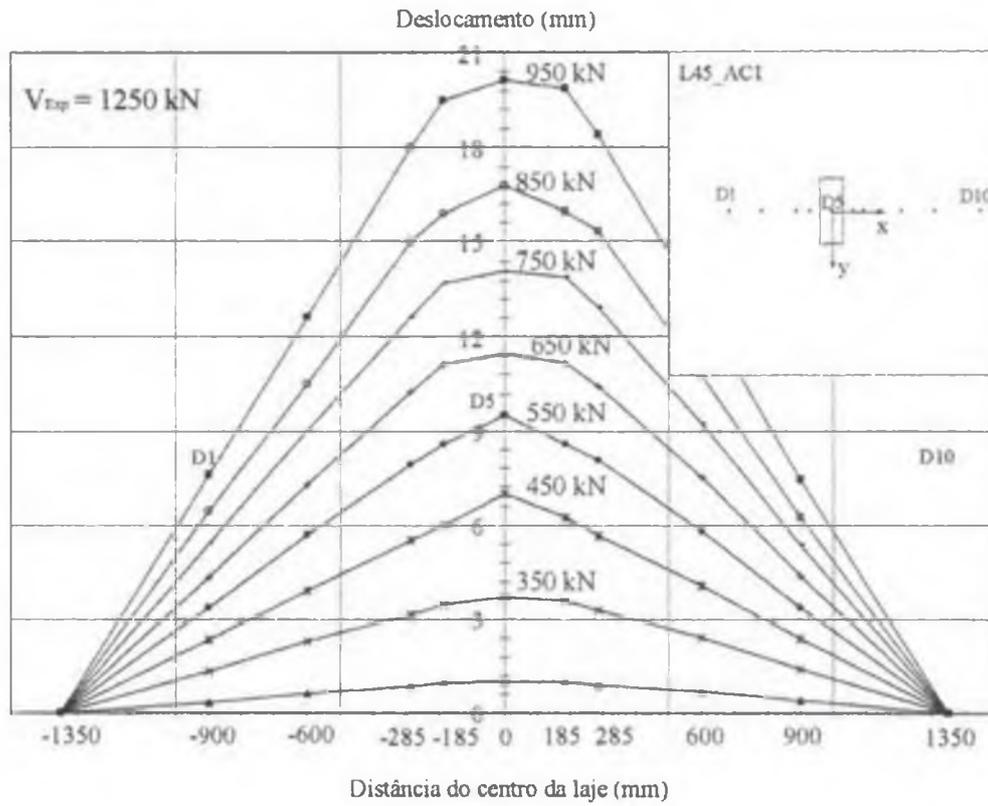


Figura 5.11 – Deslocamentos da laje L45_AC1

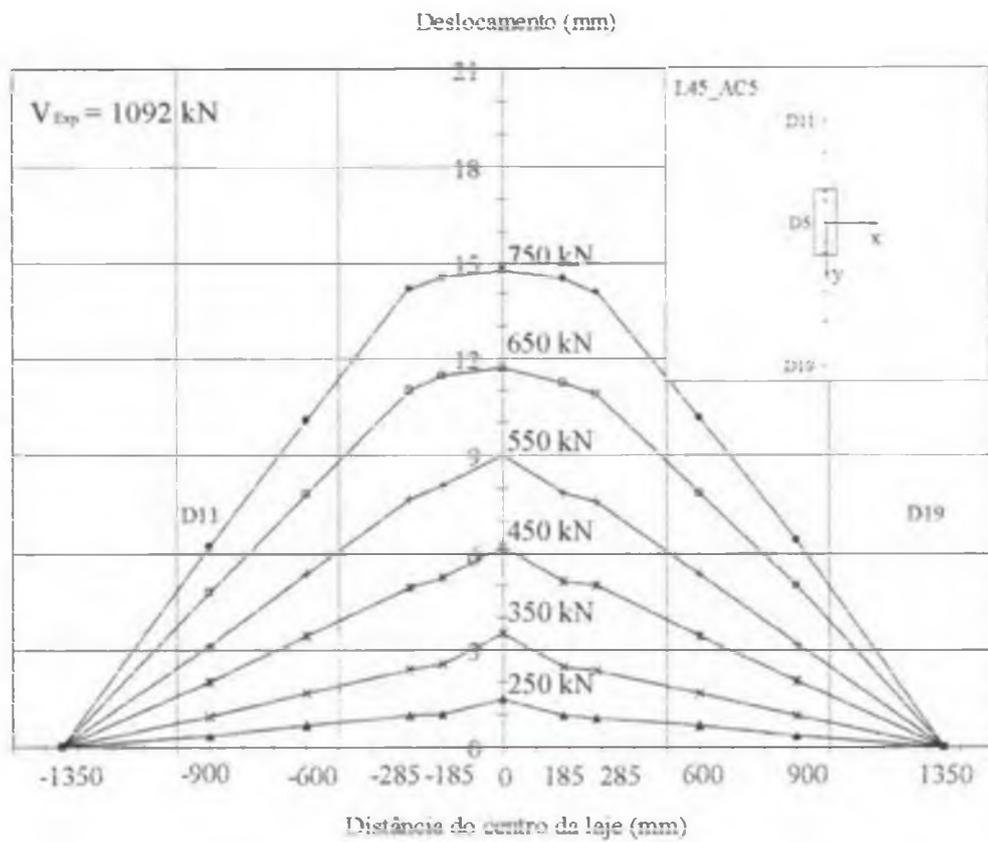
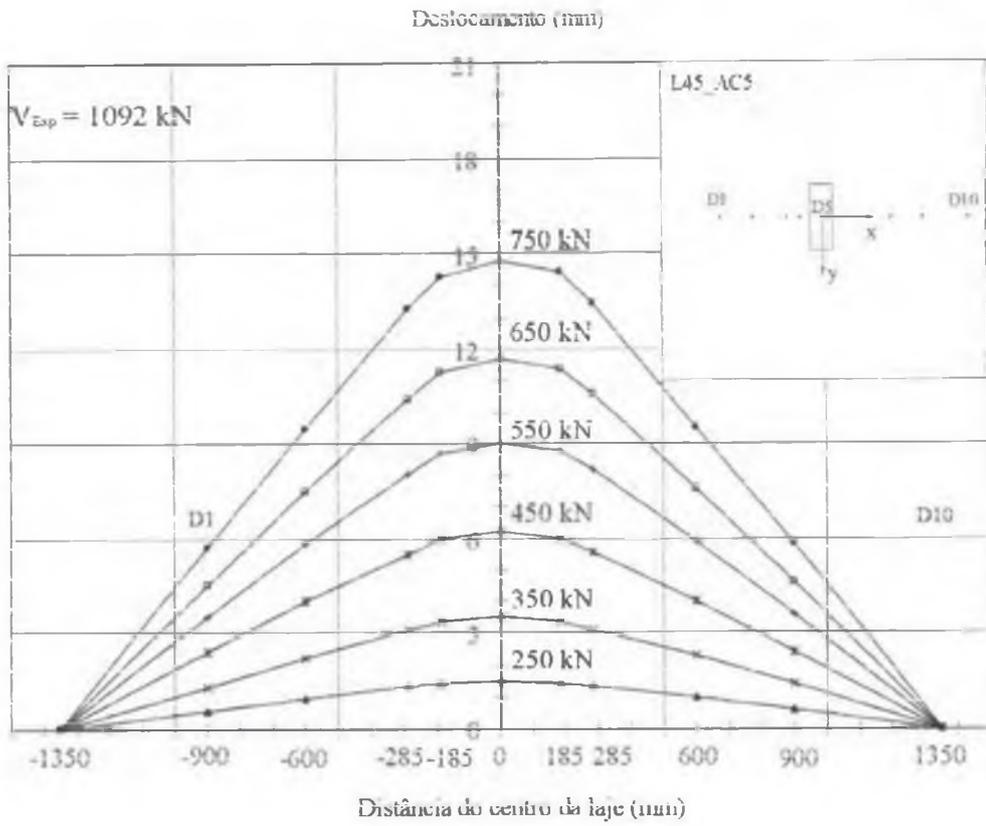


Figura 5.12 – Deslocamentos da laje L45_AC5

As figs. 5.13 e 5.14 apresentam uma comparação dos deslocamentos centrais, respectivamente, das lajes da Série 2 e Série 3, com os da laje L45.

Observa-se na Fig. 5.13, que a presença de furos influenciou o desenvolvimento dos deslocamentos centrais das lajes, pois a laje monolítica L45, apresentou os menores deslocamentos centrais, em relação às lajes da Série 2, exceto com a laje L45FFD_CG, pois esta apresentou altura efetiva igual a 164 mm. A quantidade de furos também influenciou nos deslocamentos das lajes, pois as lajes com dois furos apresentaram deslocamentos centrais superiores aos das lajes com um furo, para níveis de carga correspondentes.

A presença de barras adicionais de armadura de flexão, devido ao furo, permitiu que os deslocamentos centrais sofressem uma redução, quando se comparam as lajes L45FS_CG, L45FD_CG e L45FD, e, L45FFS_CG e L45FFD, inclusive, possibilitou que as lajes L45FD_CG e L45FD apresentassem deslocamentos bastante próximos aos da laje sem furo (L45), como pode ser visto na Fig. 5.13.

A utilização de armadura de cisalhamento, em todas as lajes testadas, provocou uma redução nos deslocamentos centrais, em relação à laje L45, e principalmente, em relação à laje L45FFD, em cada nível de carregamento, sendo que as lajes monolíticas da Série 3 (L45_AC1 e L45_AC5) apresentaram os menores deslocamentos, como pode ser visto na Fig. 5.14.

Devido à utilização de armadura de cisalhamento, as lajes apresentaram uma maior ductilidade, desenvolvendo grandes deslocamentos verticais, em relação às lajes sem armadura de cisalhamento, até cargas próximas da ruptura.

A laje L45_AC1 com maior número de camadas e diâmetro de armadura, apresentou os menores deslocamentos, em relação às demais lajes da Série 3, além de apresentar a maior ductilidade. Para as lajes com furos do Série 3, os maiores deslocamentos, em cada nível de carga, foram desenvolvidos pela laje L45FFD_AC2, embora esta laje tenha apresentado a maior área de armadura de cisalhamento por camada.

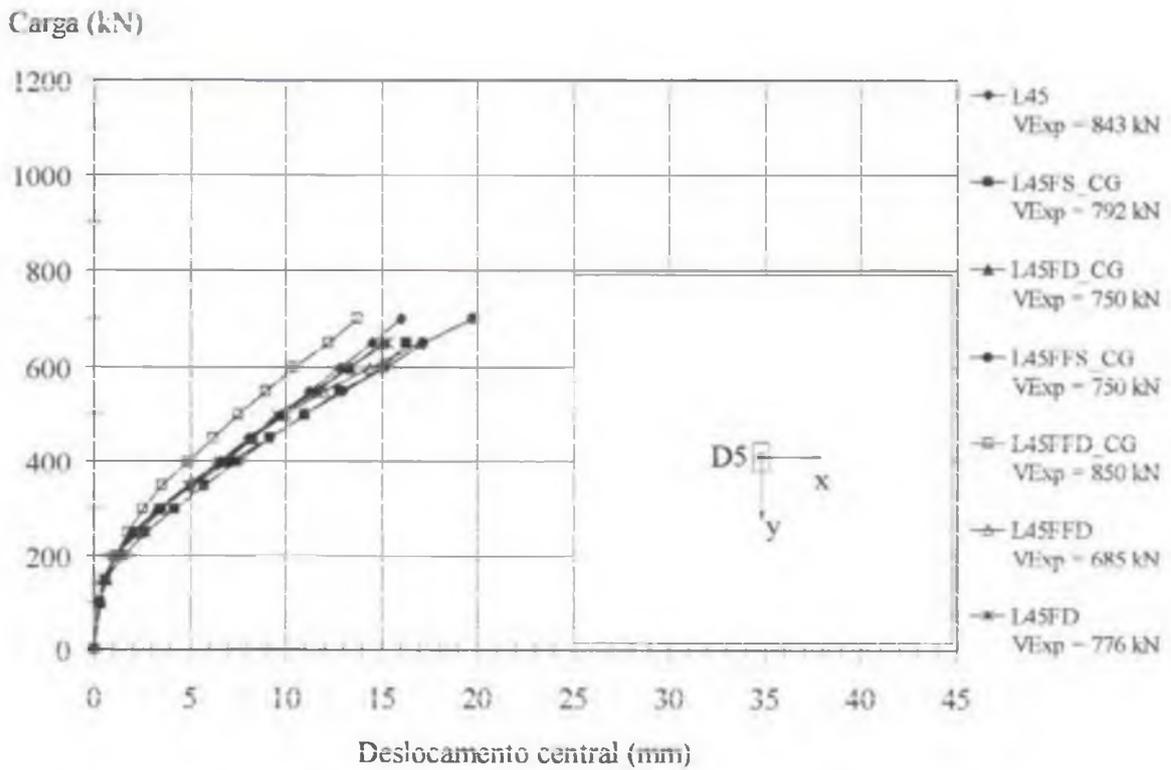


Figura 5.13 – Comparação dos deslocamentos centrais da laje L45 (Série 1) com os das lajes da Série 2

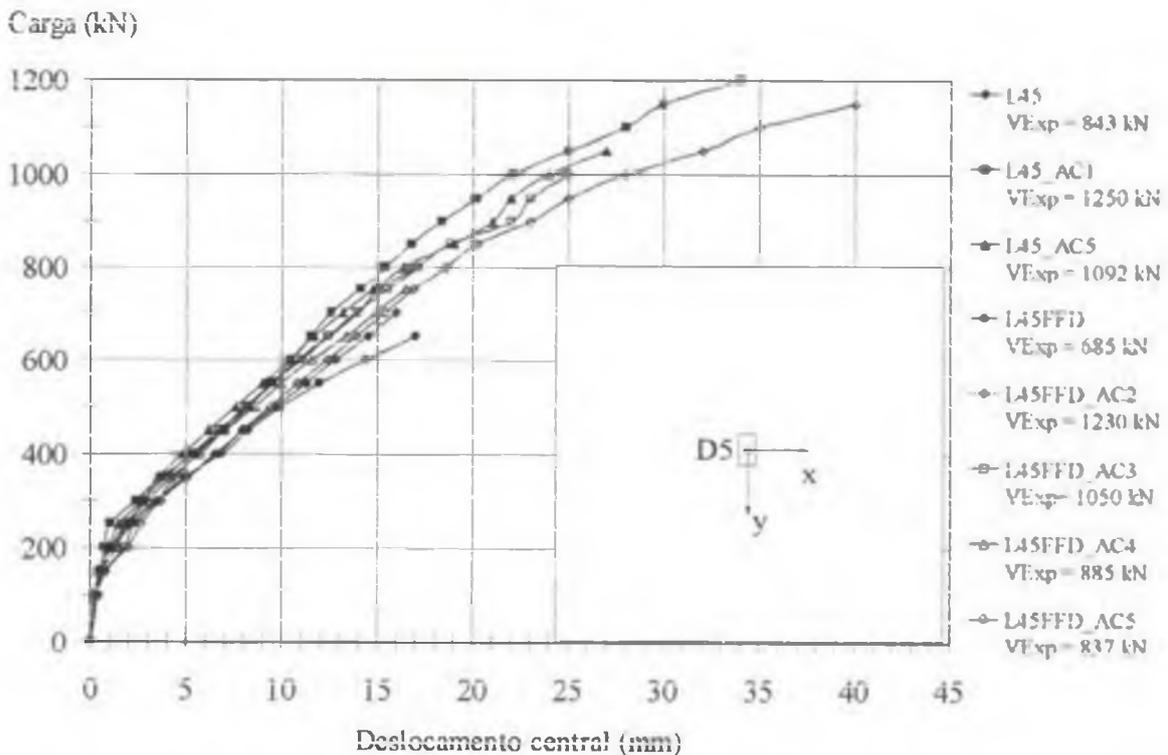


Figura 5.14 – Comparação dos deslocamentos centrais da laje L45 (Série 1) e da laje L45FFD (Série 2) com os das lajes as Série 3

5.4 – DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO

As deformações das barras da armadura de flexão das lajes da Série 2, dispostas nas direções x e y , são apresentadas nas figs. 5.15 a 5.20.

A presença de um furo, em um dos lados do pilar das lajes da Série 2, provocou, nas barras paralelas ao eixo x , maiores deformações naquelas posicionadas fora da região do pilar, oposta ao furo, a partir de um carregamento de, aproximadamente 600 kN, pois, até este nível de carga, as barras mais solicitadas foram aquelas posicionadas sobre o pilar, como mostram as figs. 5.15 e 5.16.

Observa-se que as barras paralelas ao eixo y foram mais solicitadas na região mais próxima à ligação pilar-furo, e, as menores deformações foram observadas na região mais próxima ao canto do pilar, oposto ao furo, como pode ser visto nas figs. 5.15 e 5.17.

Nas lajes com dois furos da Série 2, as maiores deformações da armadura de flexão, paralelas ao eixo x , foram registradas nas barras posicionadas sobre o pilar, especialmente na laje L45FFS_CG, onde as barras mais próximas ao eixo principal x escoaram com cargas entre 650 kN e 750 kN (Fig. 5.18).

As barras interceptadas pelos furos (extensômetro 7) praticamente não foram solicitadas, e, as barras instrumentadas externamente ao furo (extensômetros 12 e 13), apresentaram as menores deformações na laje L45FFS_CG. Entretanto, nas lajes L45FFD_CG e L45FFD, estas barras foram mais solicitadas que as demais, a partir da carga de 650 kN (Figs. 5.19 e 5.20).

As barras paralelas ao eixo y , nas lajes com dois furos, foram mais solicitadas na região compreendida pelos furos, enquanto, menores deformações foram registradas na região mais próxima ao furo. Observa-se, também, que as barras da armadura de flexão interceptadas pelo furo, praticamente não foram solicitadas (extensômetro 6), como mostram figs. 5.18 a 5.20.

O aumento da taxa de armadura de flexão, quando se comparam as lajes L45FFD_CG e L45FFD com a laje L45FFS_CG, possibilitou uma redução das tensões desenvolvidas individualmente pelas barras agrupadas, apenas na direção x .

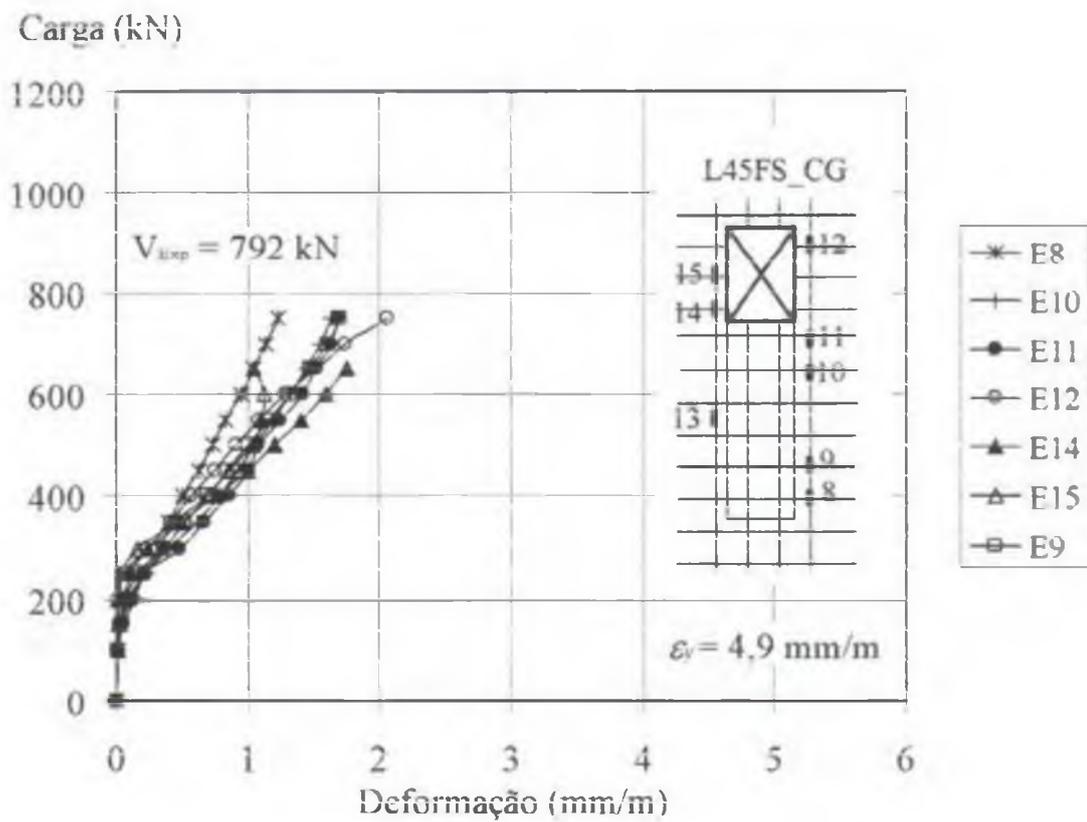
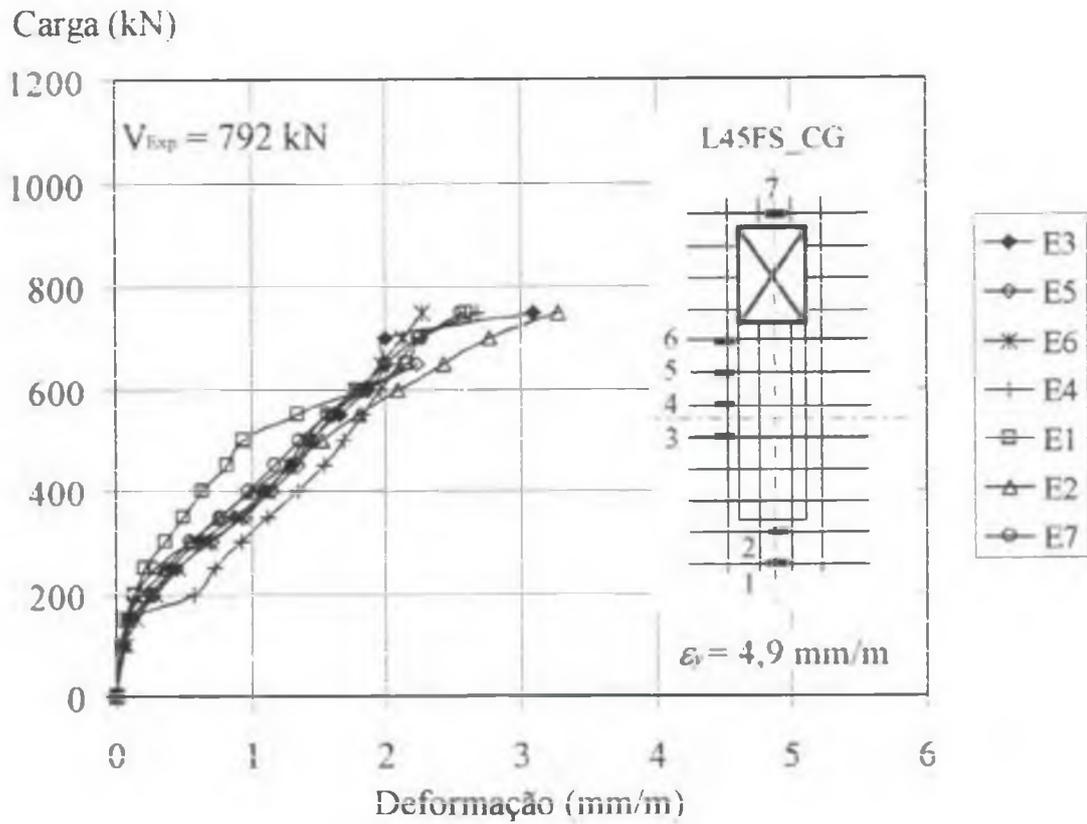


Figura 5.15 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FS_CG

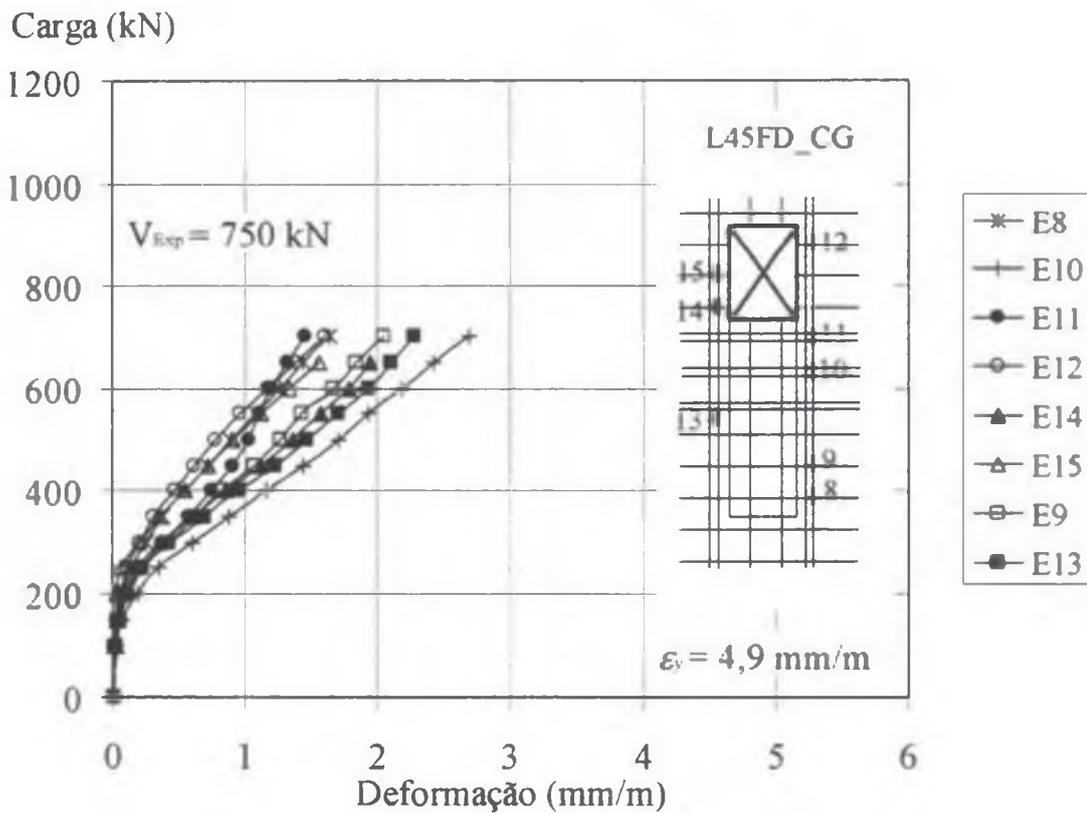
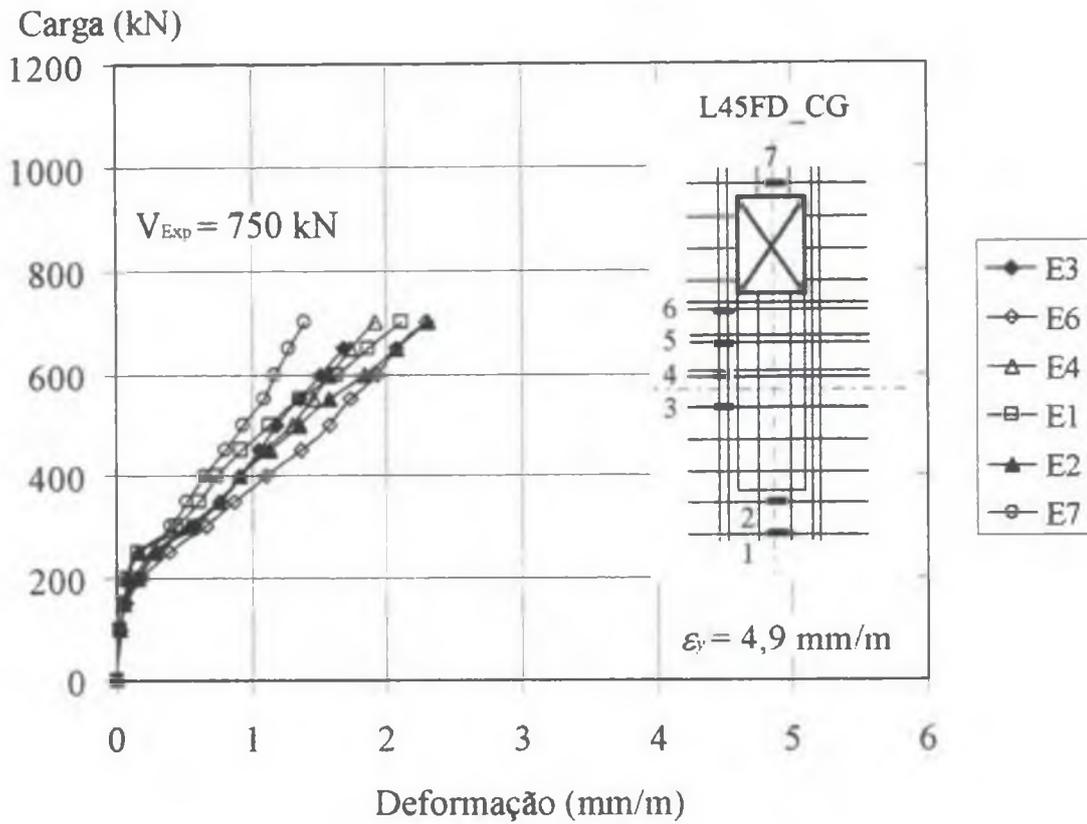


Figura 5.16 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FD_CG

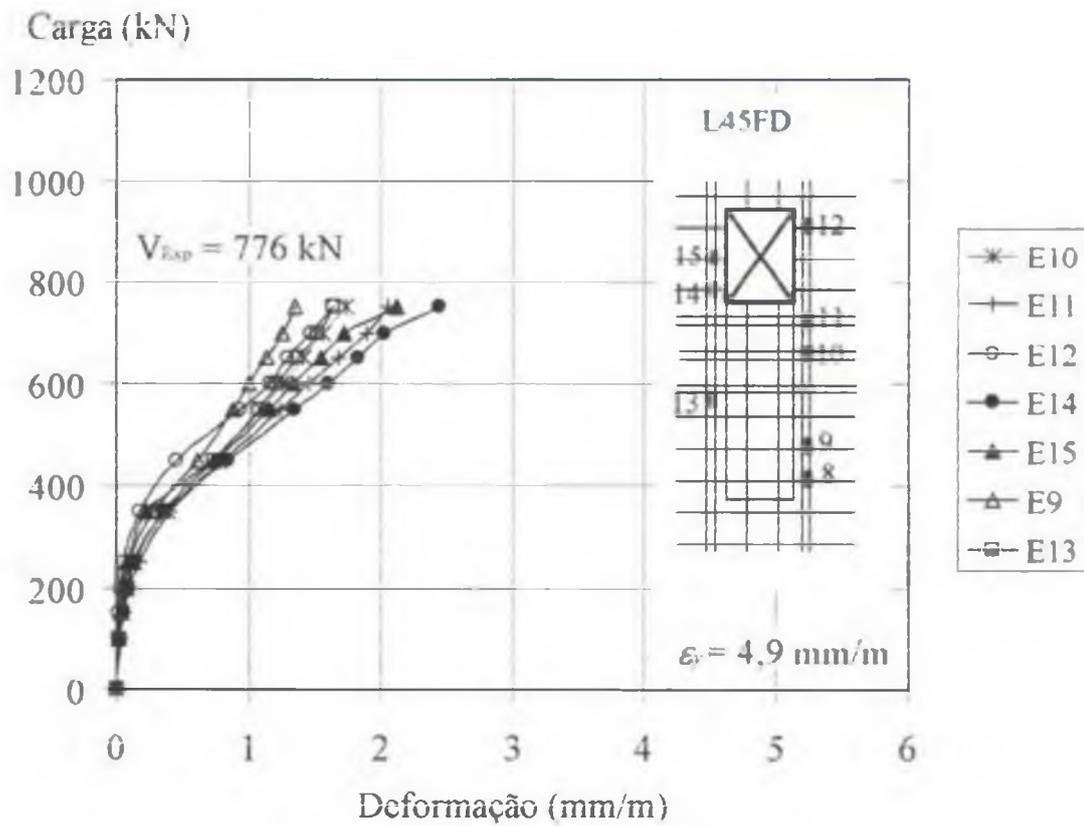
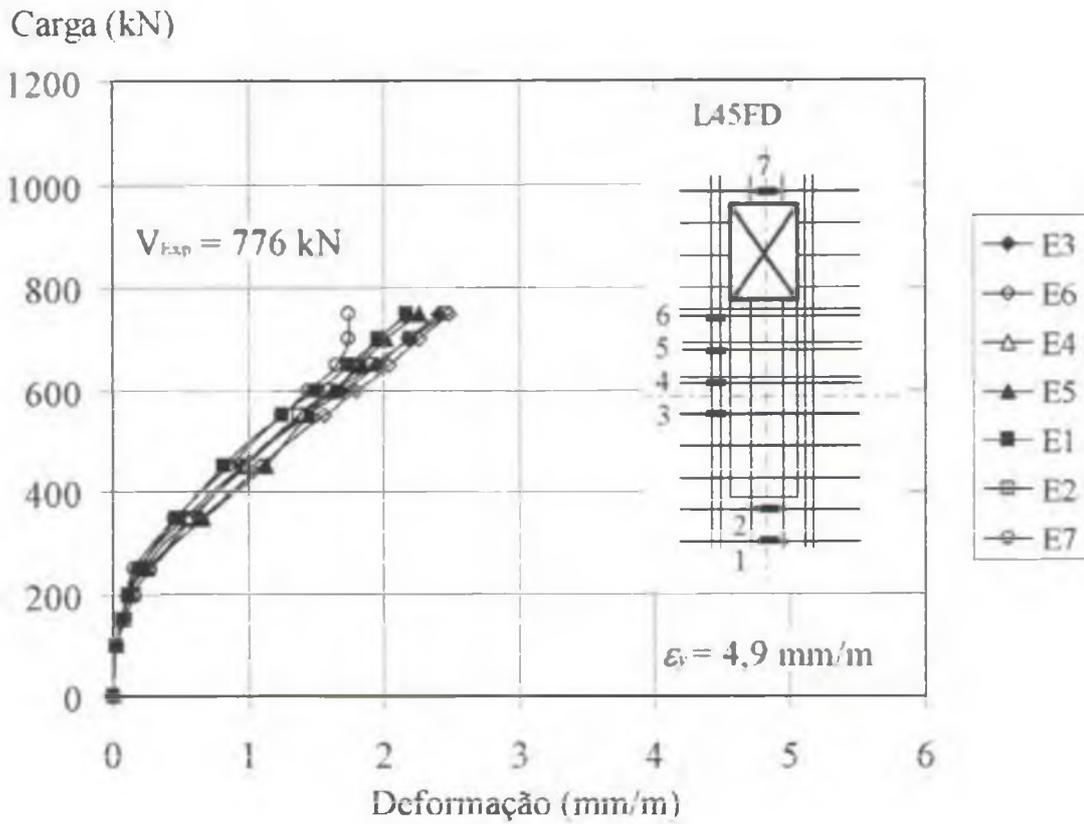


Figura 5.17 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FD

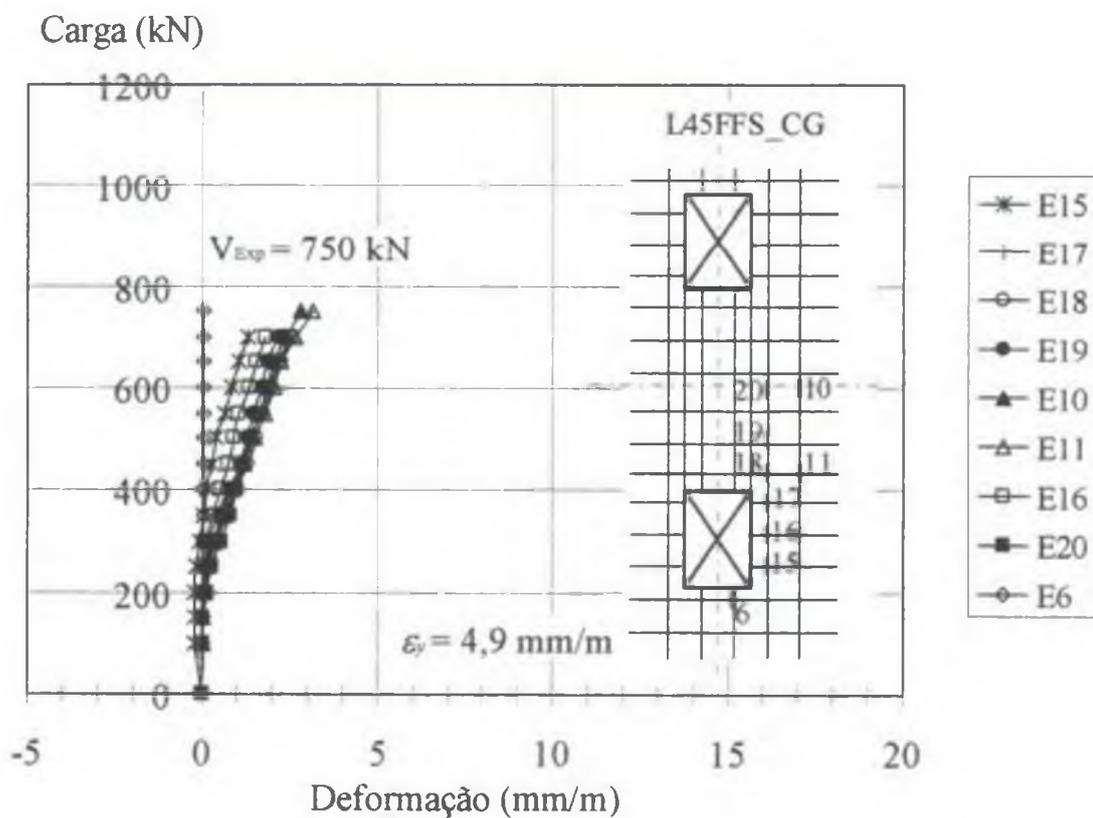
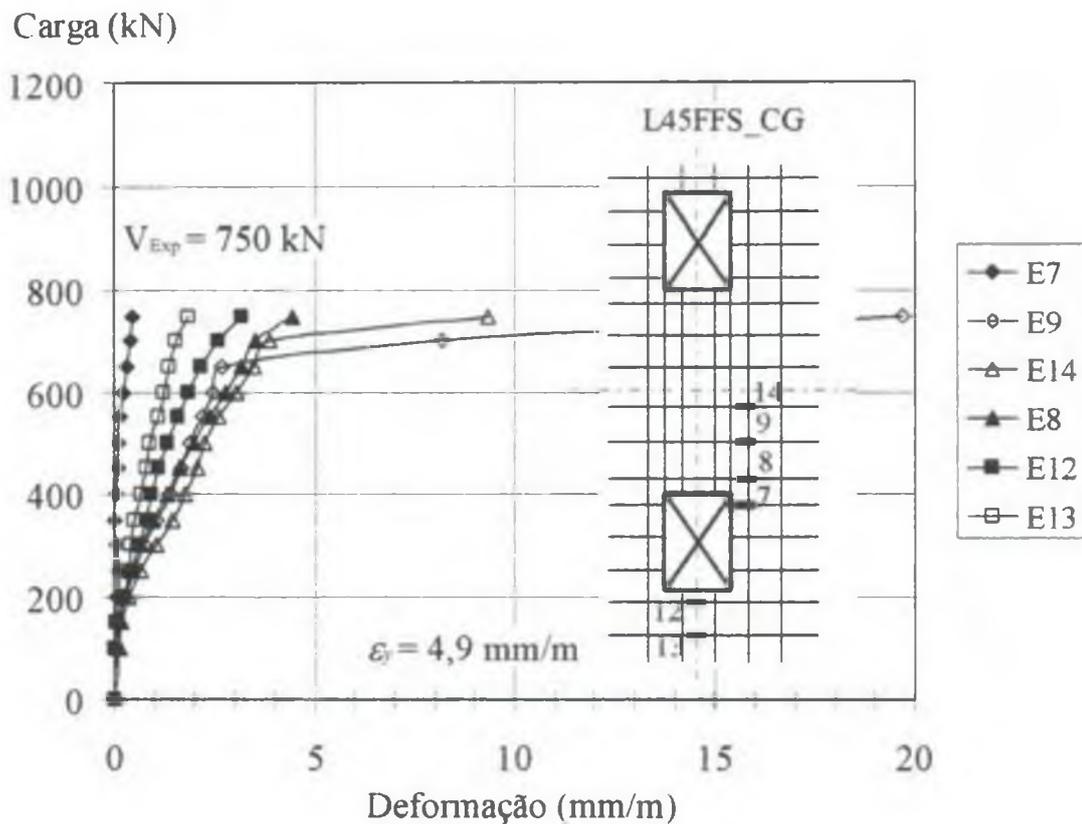


Figura 5.18 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FFS_CG

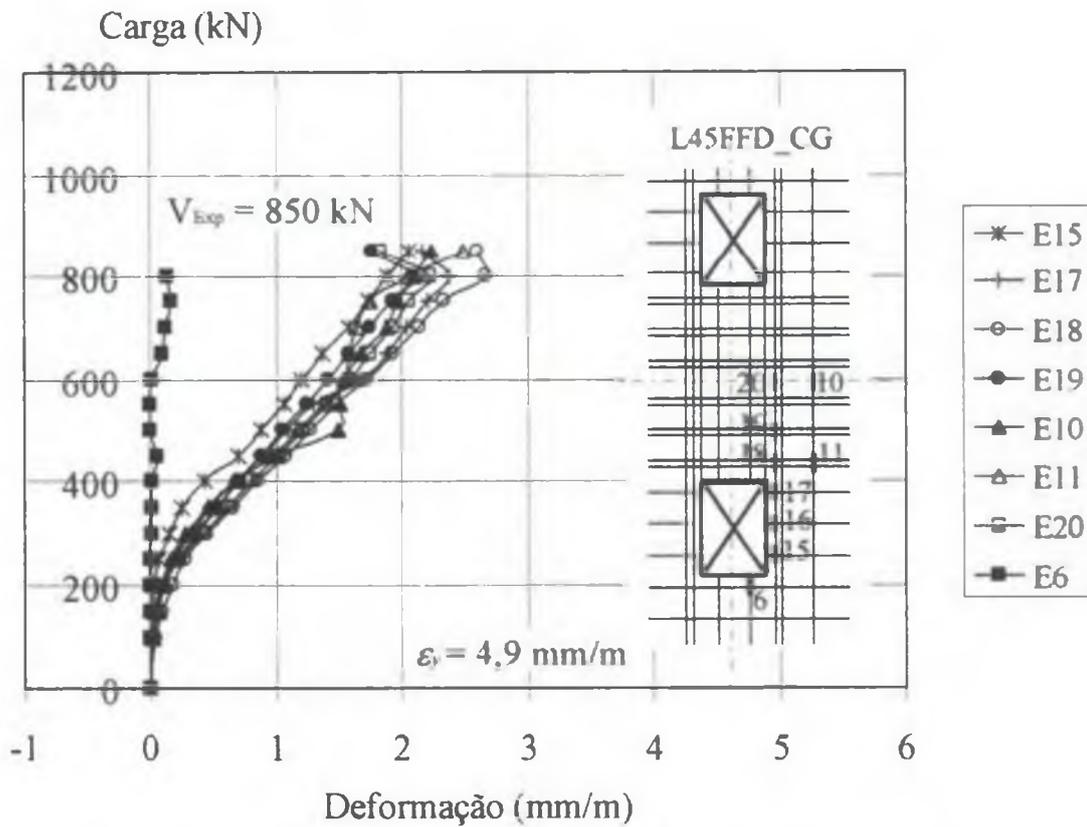
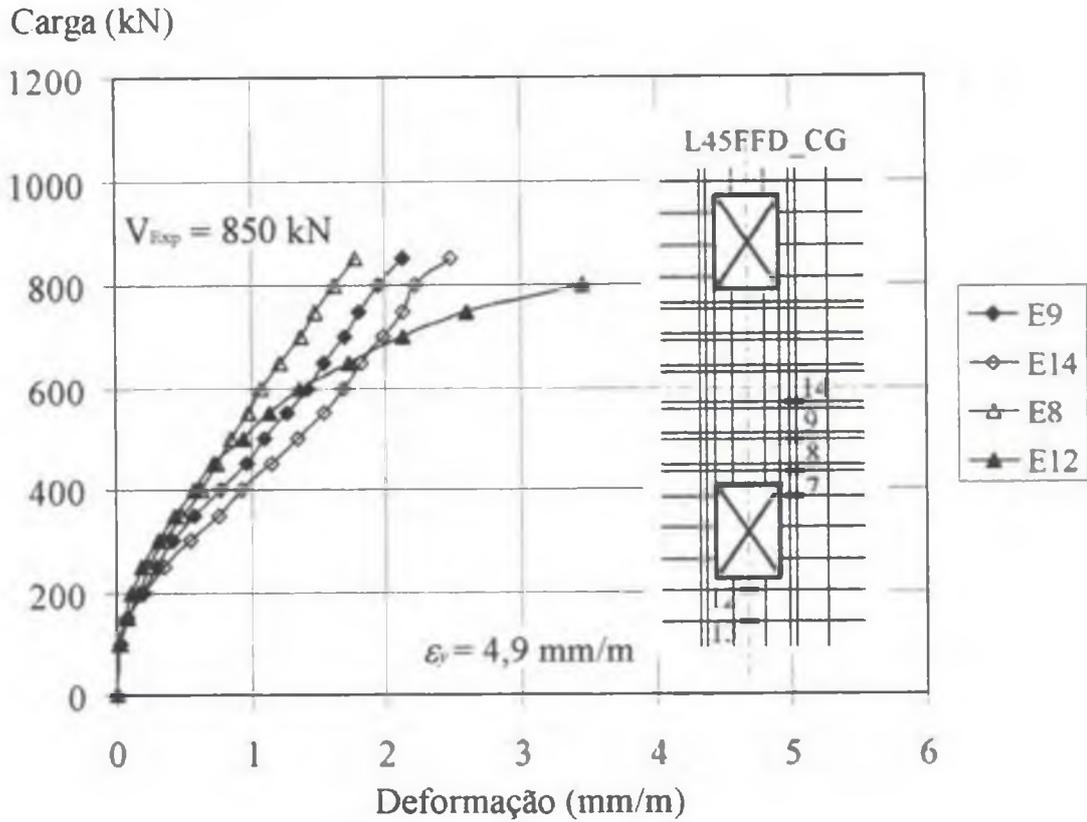


Figura 5.19 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FFD_CG

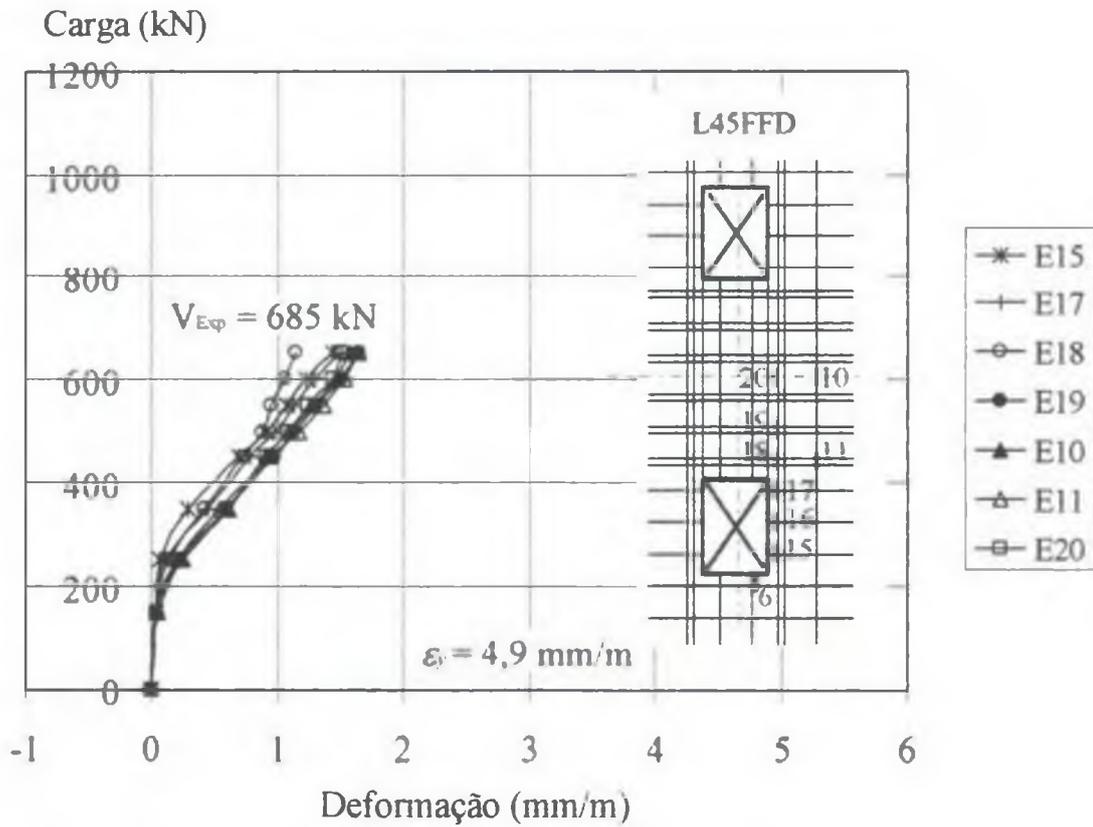
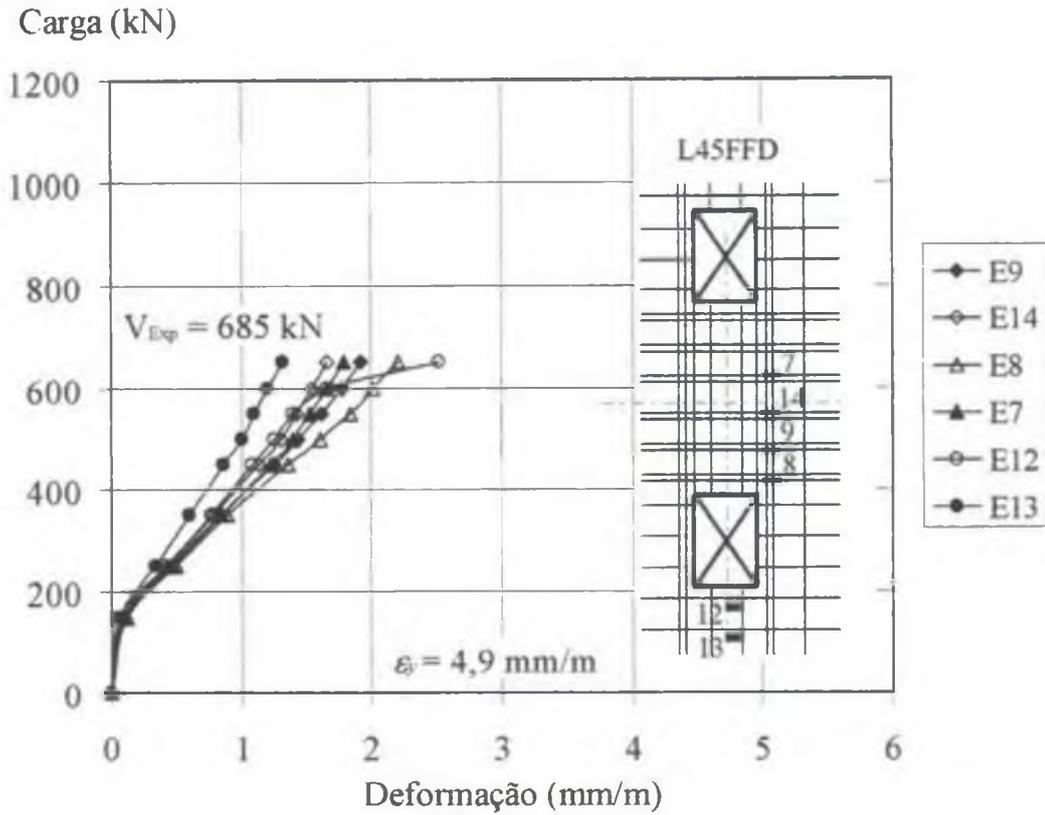


Figura 5.20 – Deformações da armadura de flexão da laje L45FFD

5.5 – DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE CISALHAMENTO

As figs. 5.21 a 5.26 apresentam o desenvolvimento das deformações da armadura de cisalhamento das lajes com a atuação do carregamento aplicado.

Na laje L45FFD_AC2, nenhum elemento da armadura de cisalhamento entrou em processo de escoamento até a leitura registrada ($0,98.V_{Exp}$), sendo que as maiores deformações foram registradas na terceira camada de armadura, próxima à face do furo (extensômetros 41 e 42 quase atingiram a deformação de escoamento, $\epsilon_s = 2,8$ mm/m). Os elementos da primeira camada, próximos ao centro do pilar, também apresentaram grandes deformações (Fig. 5.21).

As deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC3 são apresentadas na Fig. 5.22. Observa-se que, assim como na laje L45FFD_AC2, as maiores deformações foram registradas na região próxima à face do furo, na terceira e, especialmente na segunda camada de armadura, que atingiu o escoamento sob carga de aproximadamente 1000 kN.

Na distribuição adotada na laje L45FFD_AC4, os elementos da primeira camada de armadura de cisalhamento foram mais solicitados que os das outras camadas, especificamente na região mais próxima do centro do pilar, como se pode observar na Fig. 5.23, onde o elemento entrou em escoamento a partir de 800 kN.

O desenvolvimento das deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC5, devido à atuação do carregamento, é apresentado na Fig. 5.24. Os elementos da segunda camada de armadura de cisalhamento apresentaram deformações superiores aos da primeira camada, especialmente na linha central de “studs”, e todos entraram em escoamento a partir do carregamento entre 750 e 800 kN (aproximadamente 93% da carga de ruptura experimental). Os elementos situados mais próximos ao furo se deformaram levemente.

Na distribuição da armadura de cisalhamento da laje L45_AC1, apresentada na Fig. 5.25, observa-se que as deformações nos elementos da armadura apresentaram valores muito próximos, sendo que as deformações registradas na primeira camada de armadura, na região mais próxima ao menor lado do pilar, foram levemente superiores às demais.

Os elementos da primeira camada da armadura de cisalhamento da laje L45_AC5, localizados mais próximos ao menor lado do pilar, foram mais solicitados que os da segunda camada, sendo que entraram em processo de escoamento, sob carga entre 1000 kN e 1050 kN (94% da carga de ruptura), como mostra a Fig. 5.26. Quanto aos elementos próximos ao maior lado do pilar, os da segunda camada foram mais solicitados que os demais

Avaliando o comportamento geral dos elementos da armadura de cisalhamento das lajes da Série 3, observa-se que o posicionamento dos “studs” empregado nas lajes, permitiu que trabalhassem efetivamente, sendo solicitados somente à tração. Nas lajes L45FFD_AC5 e L45_AC5, alguns elementos da armadura de cisalhamento entraram em escoamento, em diferentes posições analisadas.

Em alguns casos, o escoamento da armadura de cisalhamento das lajes não ficou claramente definido por um patamar de escoamento nas curvas de “Carga x Deformação”, pois, trata-se de um sistema hiperestático composto pelo concreto, armadura de flexão e de cisalhamento que não permite o escoamento livre da barra analisada.

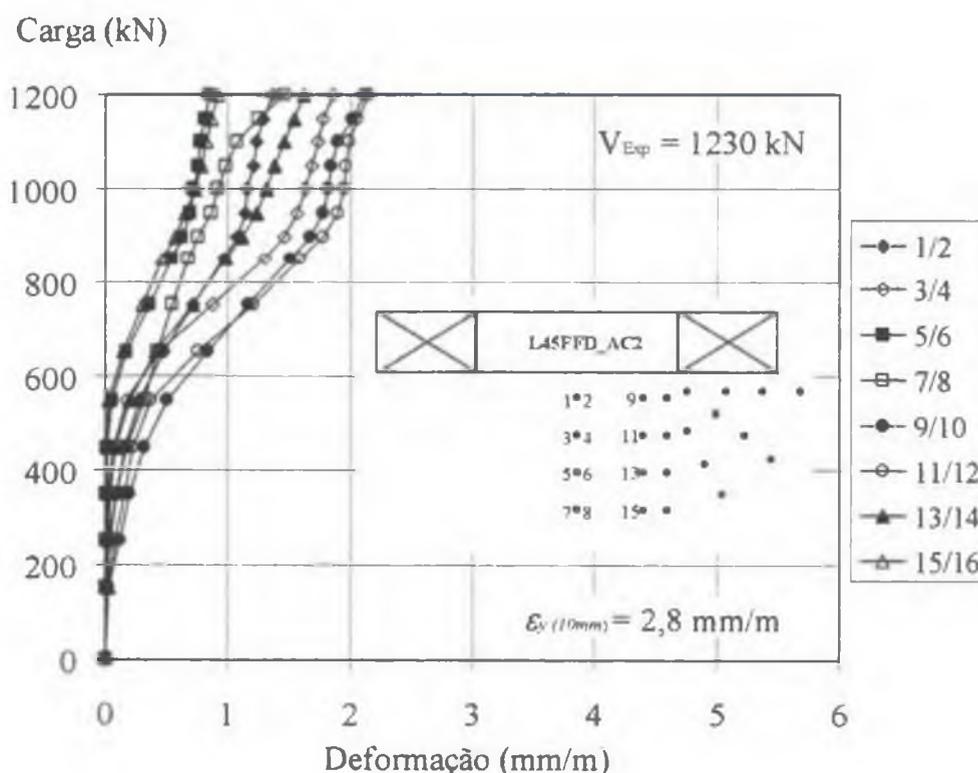


Figura 5.21 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC2

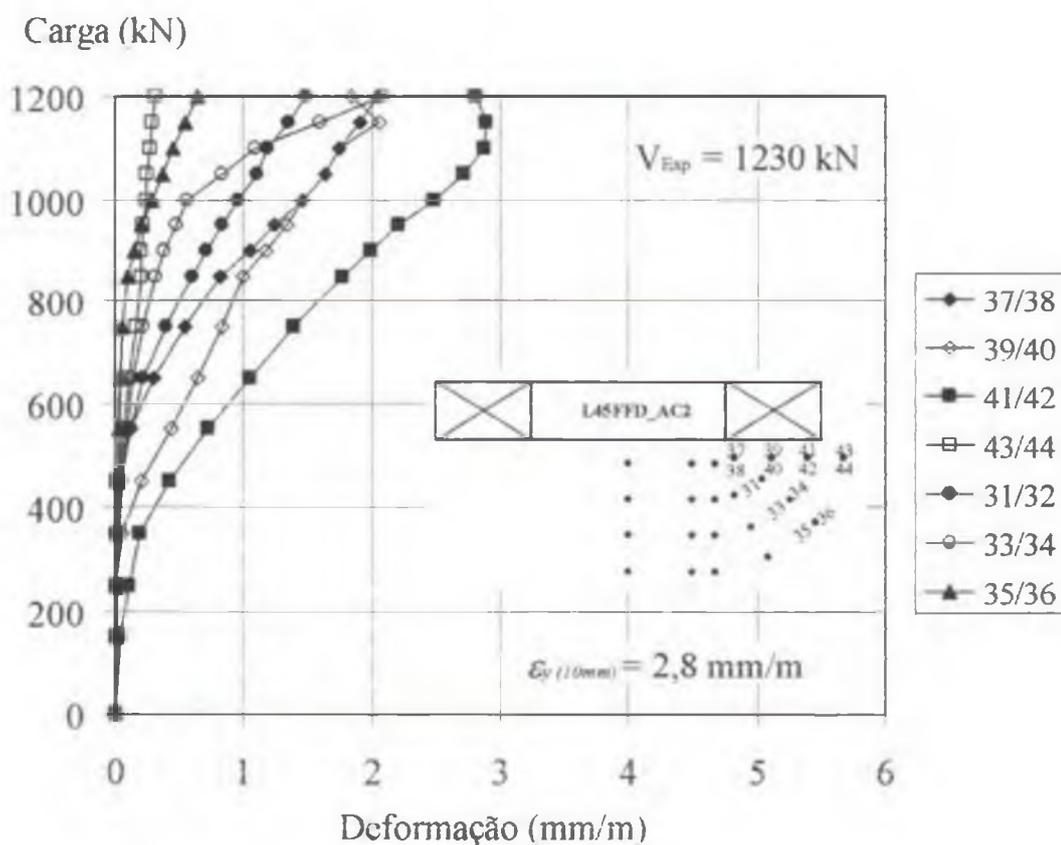
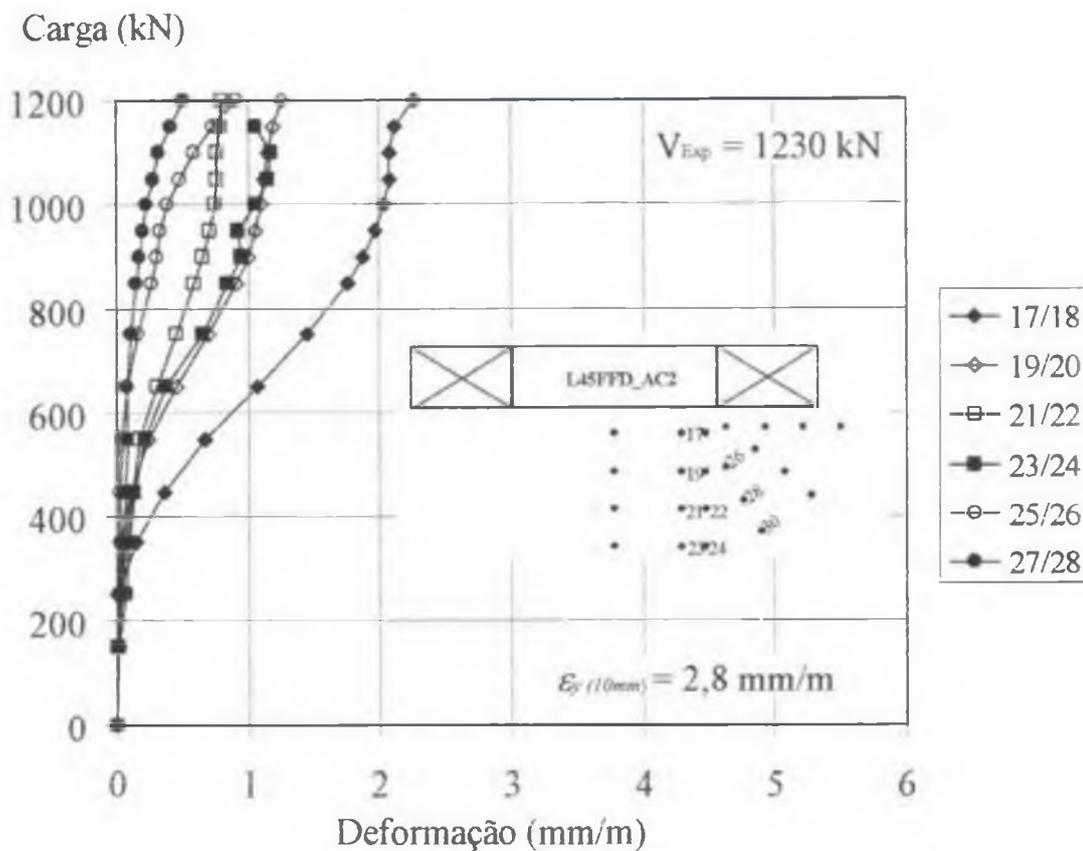


Figura 5.21 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC2 (continuação)

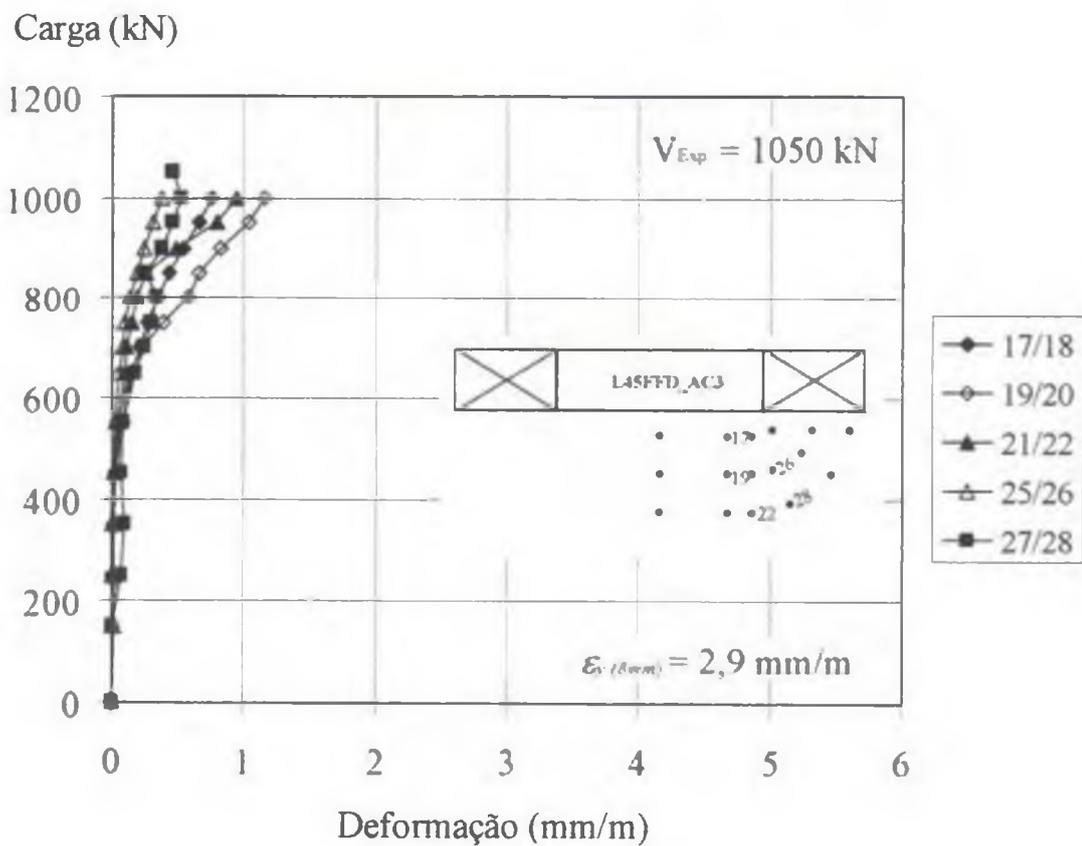
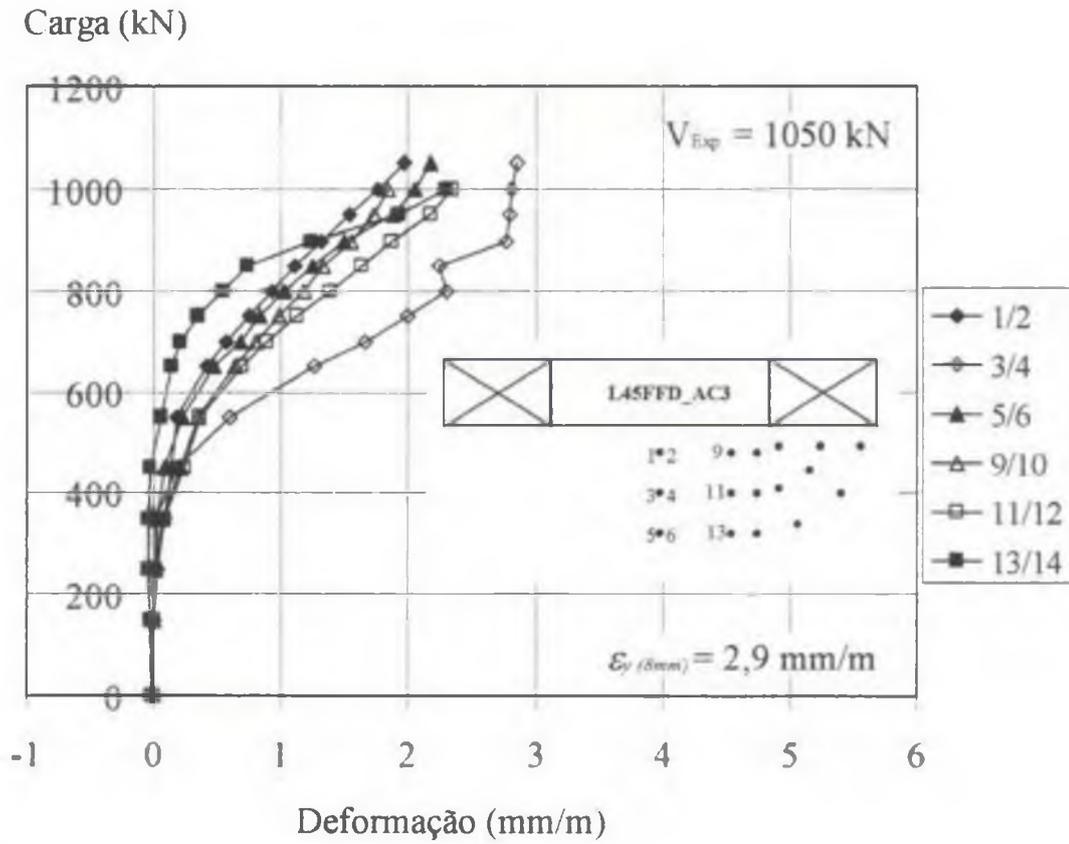


Figura 5.22 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC3

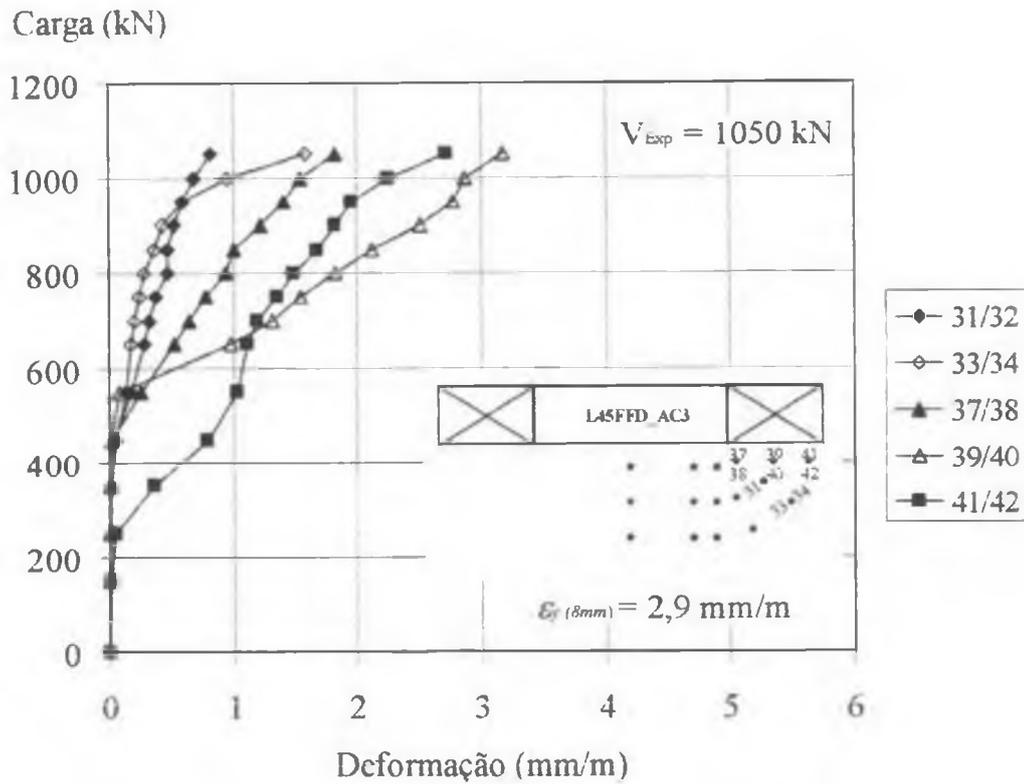


Figura 5.22 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC3 (continuação)

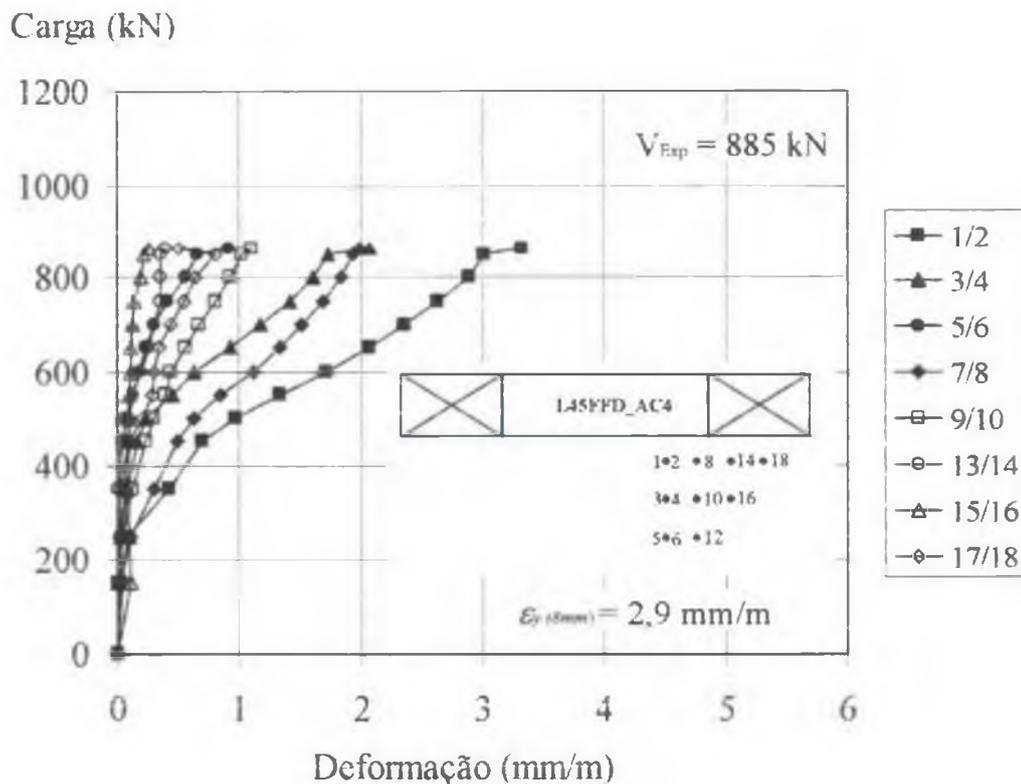


Figura 5.23 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC4

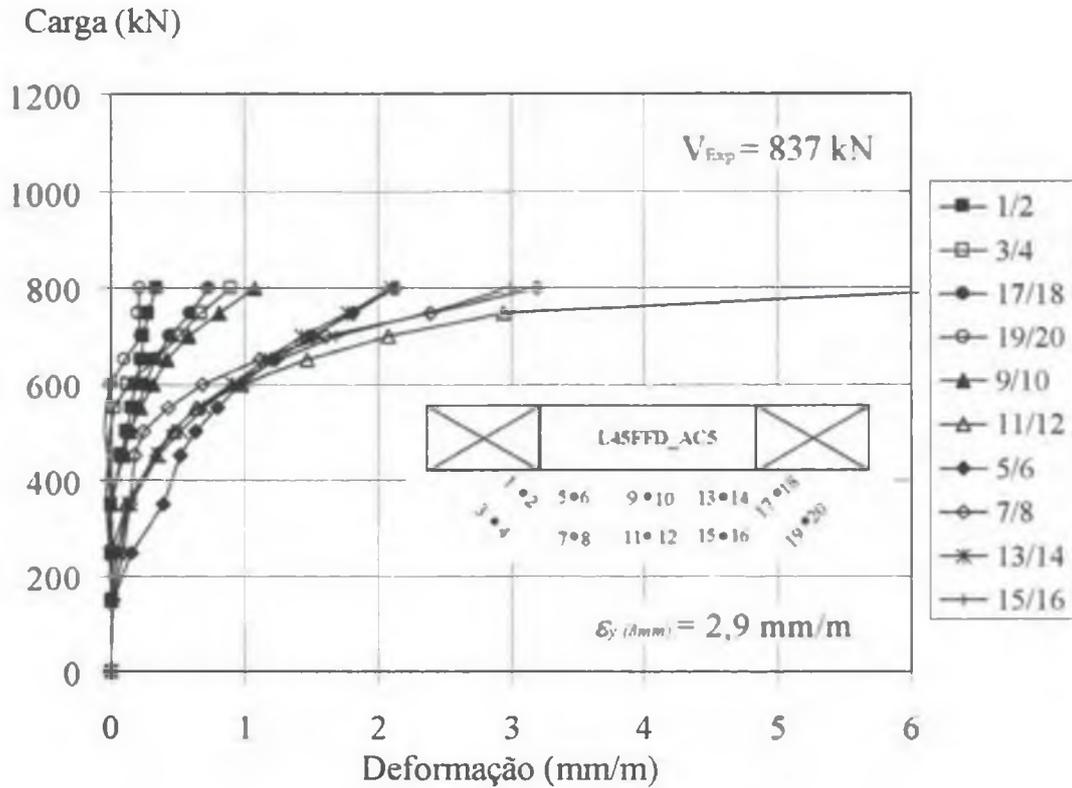


Figura 5.24 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC5

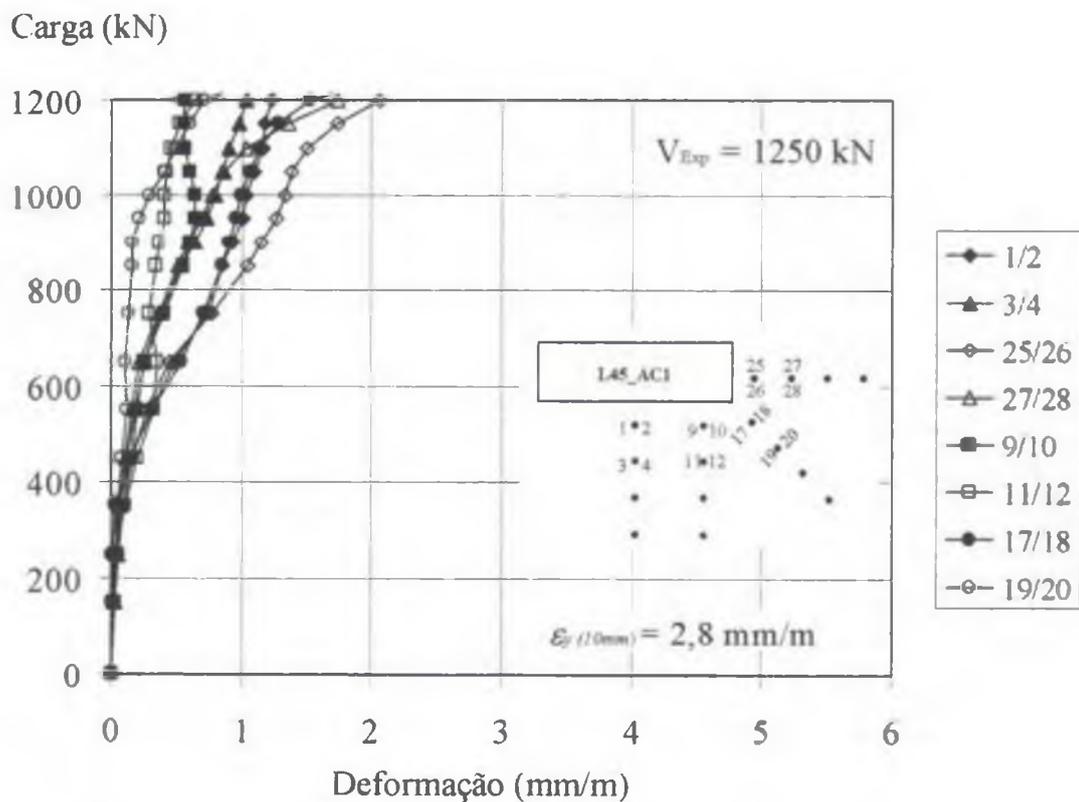


Figura 5.25 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45_AC1

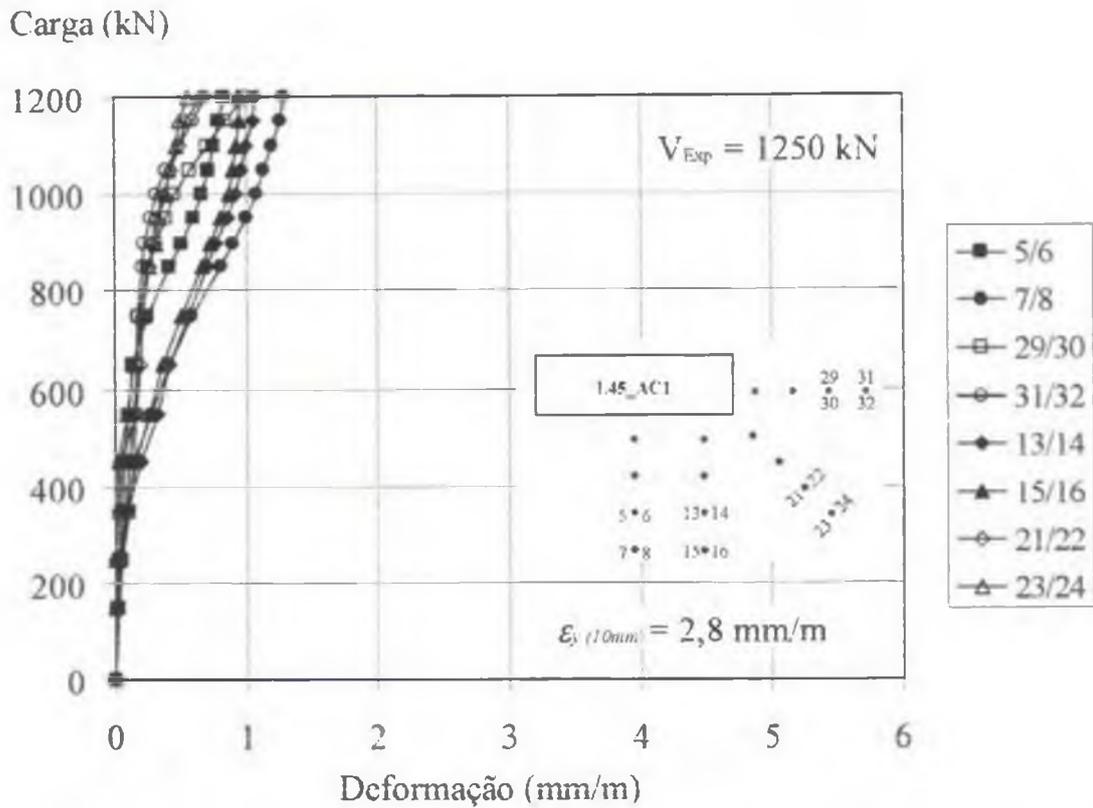


Figura 5.25 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45_AC1 (continuação)

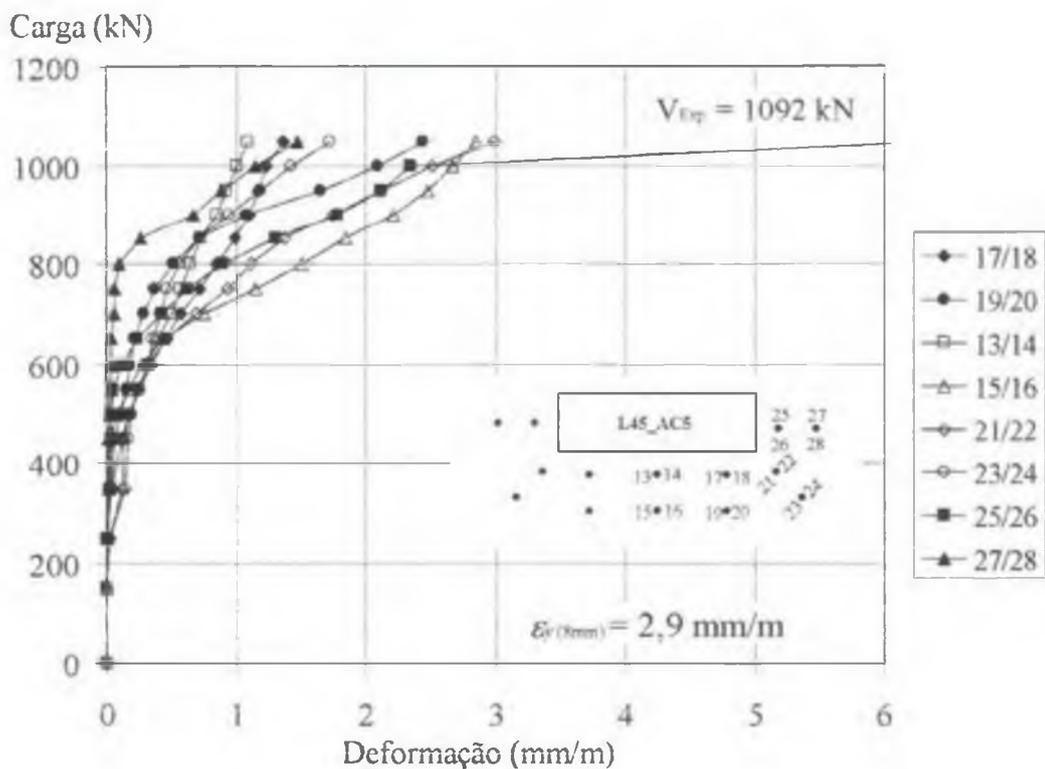


Figura 5.26 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L45_AC5

5.6 – FISSURAÇÃO

Em todas as lajes com furos, das séries 2 e 3, as primeiras fissuras radiais surgiram nos vértices dos furos e se desenvolveram em direção as bordas da laje. Nas lajes da Série 2, as fissuras radiais apareceram sob carga que variou entre 24% e 36% da carga de ruptura, e se estenderam em direção às bordas da laje. Nas lajes da Série 3, as fissuras radiais surgiram sob carga entre 20% e 30% da carga de ruptura, como mostra a Tab. 5.3.

As fissuras circunferenciais surgiram posteriormente às fissuras radiais, em torno do pilar, sob carga correspondente entre 33% e 51% da carga de ruptura, no caso das lajes da Série 2, e entre 36% e 54% da carga de ruptura, para as lajes da Série 3. Nas faces dos furos, pode ser observado, sob cargas superiores à $V_{ff(cisalh)}$ (carga referente ao surgimento da primeira fissura de cisalhamento), o surgimento de uma fissura de cisalhamento que se desenvolveu até se tornar a fissura de ruptura.

A utilização de armadura de cisalhamento nas lajes da Série 3 conduziu ao aumento das cargas de fissuração $V_{ff(flexão)}$ e $V_{ff(cisalh)}$, em relação às lajes sem tal armadura, embora a carga de ruptura das lajes com “studs” também tenha sido de maior valor. A Tab. 5.3 apresenta as cargas de fissuração radial e circunferencial observadas durante os ensaios e suas relações com a carga de ruptura das lajes. As figs. 5.27 a 5.37 mostram fotografias da fissuração no bordo superior das lajes das séries 2 e 3.

Nas lajes da Série 2, observa-se a menor quantidade de fissuras, tanto de flexão quanto de cisalhamento, em relação às lajes com tal armadura, como mostram as figs. 5.27 a 5.32. A presença de armadura de cisalhamento permitiu que, além de uma maior ductilidade da laje até próximo da ruptura, as lajes pudessem desenvolver um maior número de fissuras, antes que atingisse a ruptura.

Nas lajes da Série 3, observa-se nas fotografias das figs. 5.33 a 5.37, a grande quantidade de fissuras de flexão e de cisalhamento desenvolvidas no bordo tracionado das lajes, especialmente nas lajes sem furos, que desenvolveram uma capacidade resistente superior à das demais lajes testadas.

Tabela 5.3 – Cargas de fissuração visual das lajes das séries 2 e 3

Laje	d (mm)	f'_c (MPa)	$f_{cr,exp}$ (MPa)	$V_{f(flexão)}$ (kN)	$V_{f(cisalh)}$ (kN)	$V_{E,exp}$ (kN)	$V_{f(flexão)} / V_{E,exp}$	$V_{f(cisalh)} / V_{E,exp}$
L45FS_CG	154	40,5	3,6	200	300	792	0,25	0,38
L45FD_CG	154	39,0	4,2	200	300	750	0,27	0,40
L45FD	154	41,4	4,3	250	350	776	0,32	0,45
L45FFS_CG	154	41,6	4,2	200	250	750	0,27	0,33
L45FFD_CG	164	40,6	4,2	200	300	850	0,24	0,35
L45FFD	144	37,0	4,0	250	350	685	0,36	0,51
L45FFD_AC2	154	44,5	4,1	250	450	1230	0,20	0,37
L45FFD_AC3	154	39,6	3,5	250	450	1050	0,24	0,43
L45FFD_AC4	154	43,2	3,1	250	450	865	0,29	0,52
L45FFD_AC5	154	40,7	3,2	250	450	837	0,30	0,54
L45_AC1	154	39,0	3,2	350	450	1250	0,28	0,36
L45_AC5	154	41,1	3,4	250	450	1092	0,23	0,41
MÉDIA							0,27	0,42
D.P.							0,04	0,07
C.V. (%)							14,8	16,7



Figura 5.27 – Fissuração na laje L45FS_CG

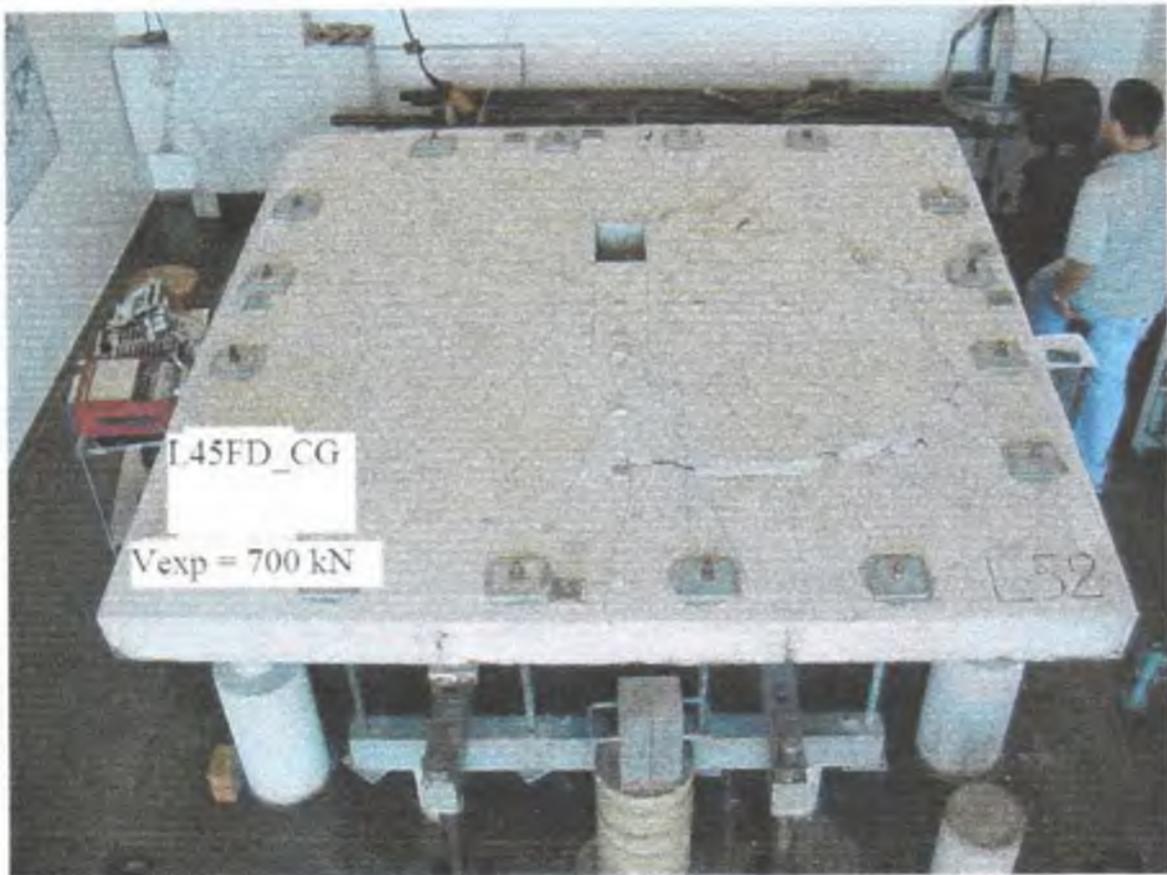


Figura 5.28 – Fissuração na laje L45FD_CG

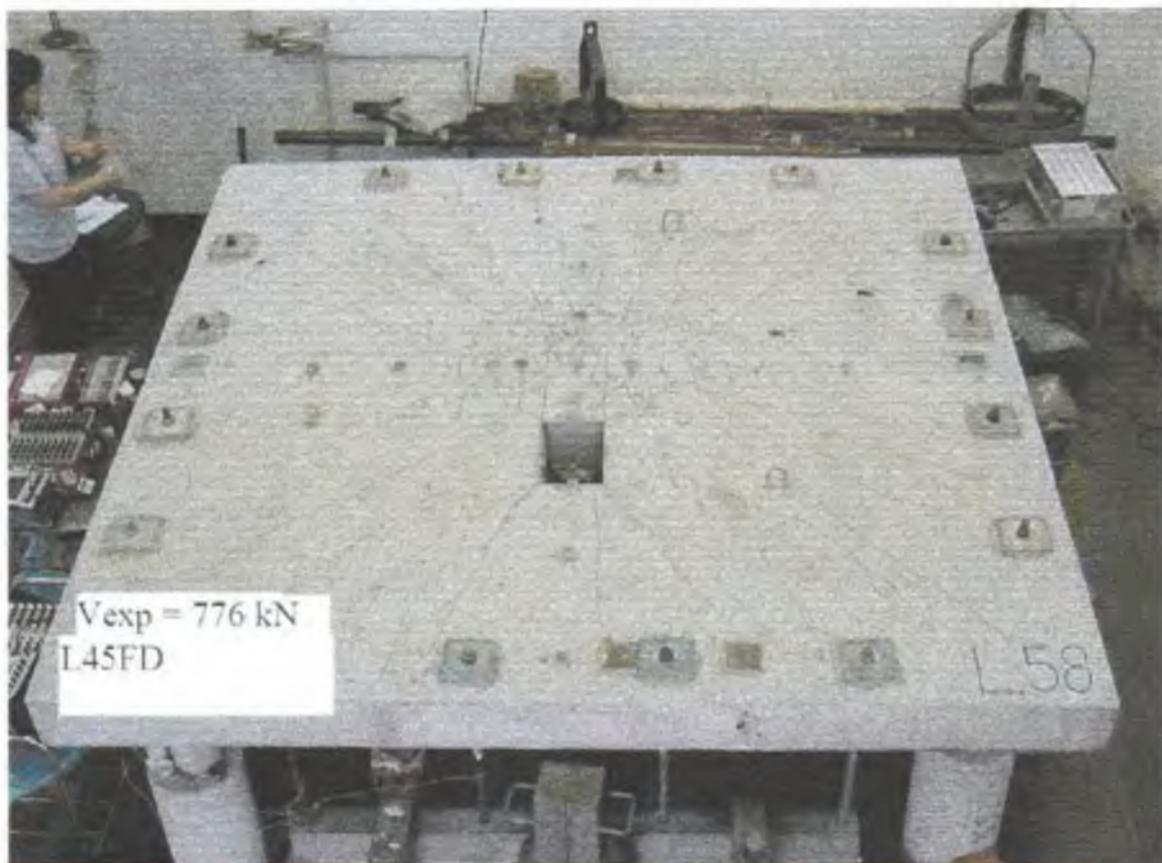


Figura 5.29 – Fissuração na laje L45FD



Figura 5.30 – Fissuração na laje L45FFS_CG



Figura 5.31 – Fissuração na laje L45FFD_CG



Figura 5.32 – Fissuração na laje L45FFD

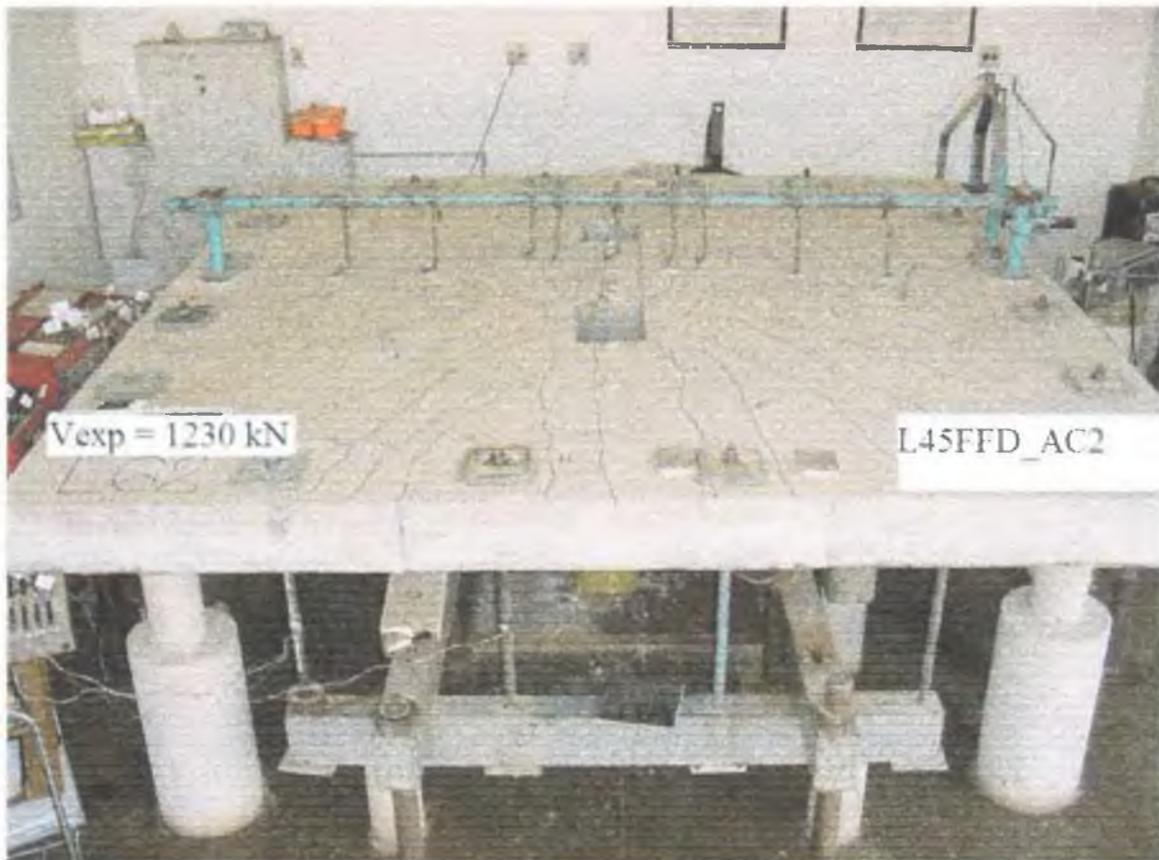


Figura 5.33 – Fissuração na laje L45FFD_AC2

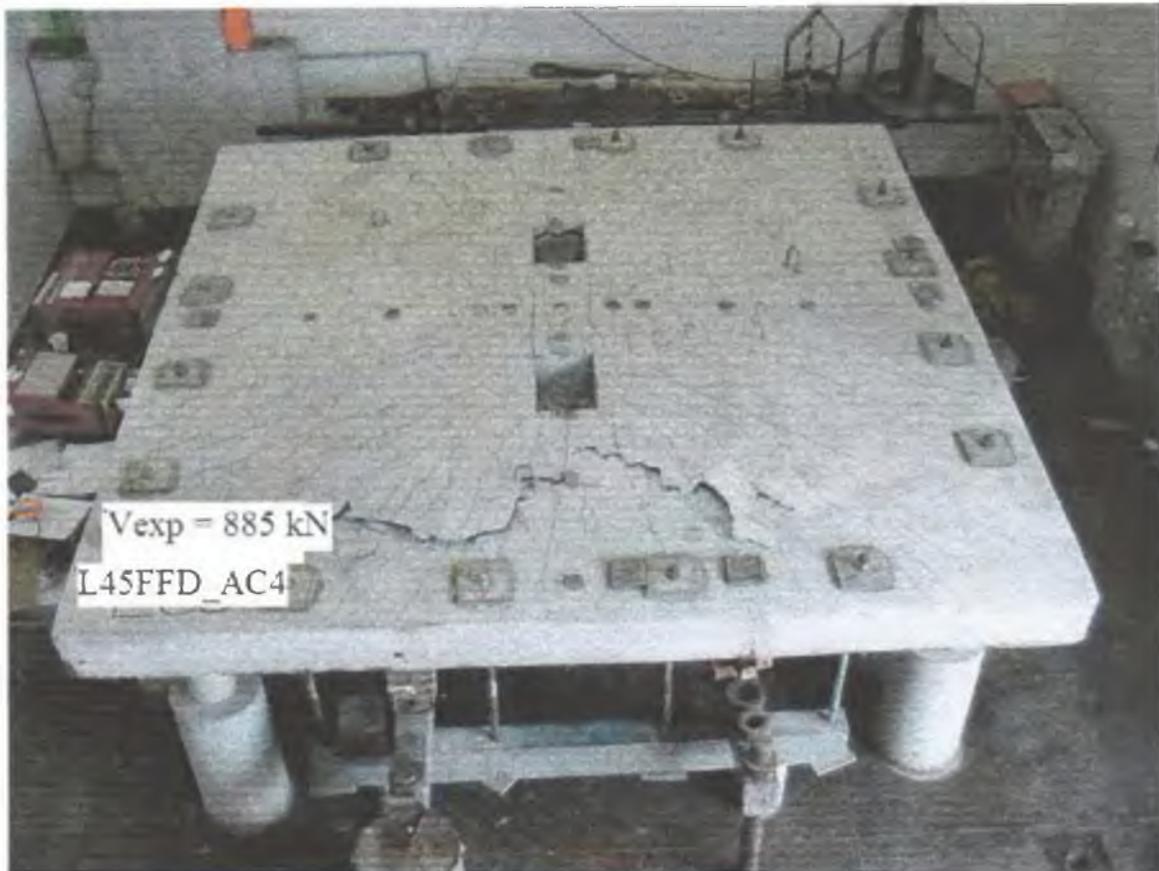


Figura 5.34 – Fissuração na laje L45FFD_AC4

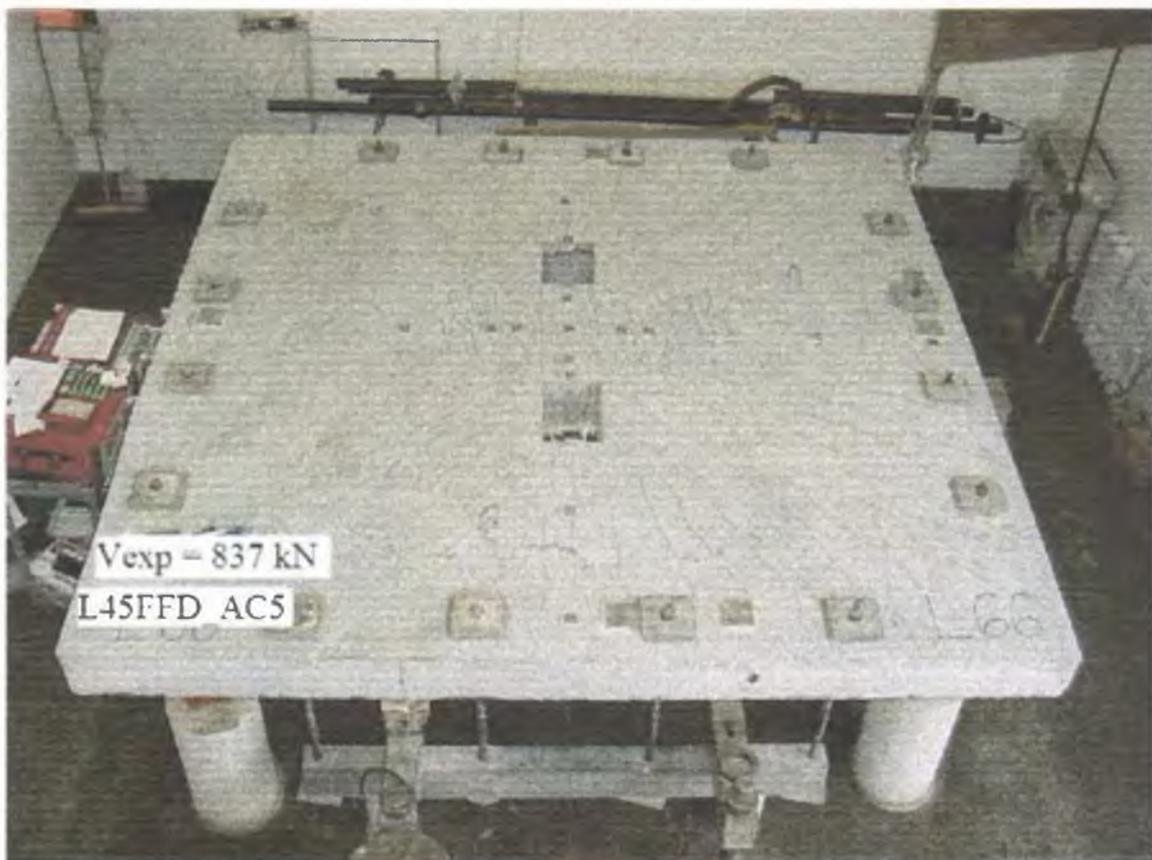


Figura 5.35 – Fissuração na laje L45FFD_AC5

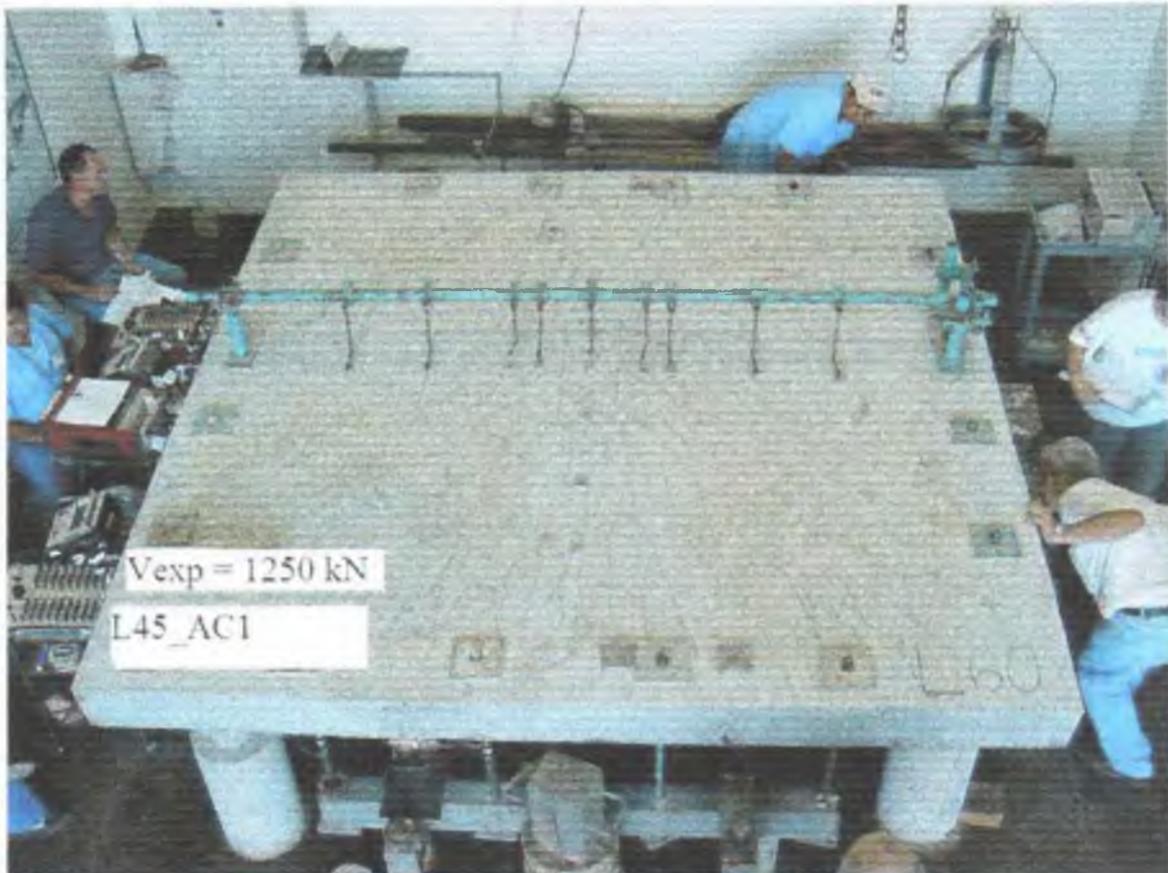


Figura 5.36 – Fissuração na laje L45_AC1

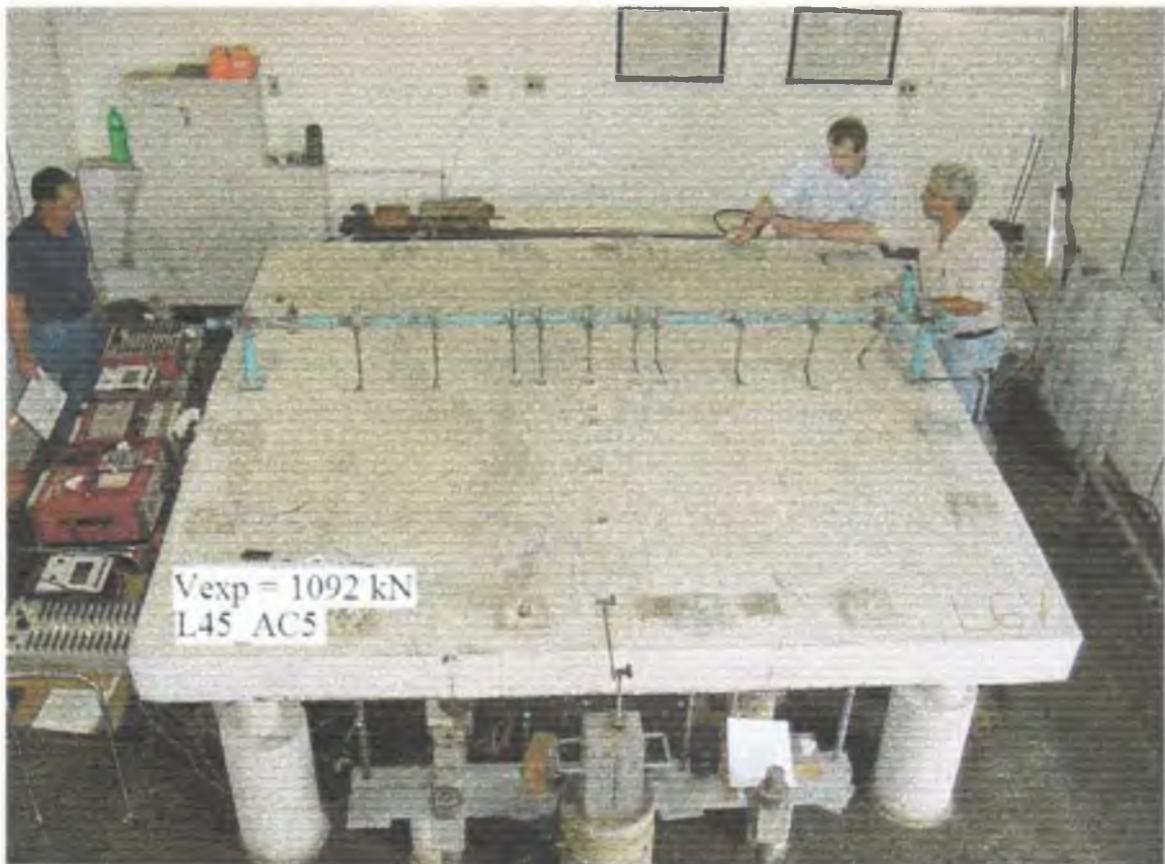


Figura 5.37 – Fissuração na laje L45_AC5

5.7 – RESISTÊNCIA

5.7.1 – FLEXÃO

As lajes da Série 2 apresentaram relações V_{Exp}/V_{flex} (V_{flex} é a carga última prevista para ruptura por flexão) que variaram entre 0,57 e 0,64, como mostra a Tab. 5.4. A resistência à flexão das lajes com furos foi determinada, assim como nas lajes monolíticas, através da teoria das linhas de ruptura apresentada no ANEXO C.

O detalhamento da armadura de flexão, utilizada na região próxima aos furos, das lajes L45FD_CG, L45FD, L45FFD_CG e L45FFD permitiu manter constante a quantidade de barras contínuas efetivas para o combate aos esforços de flexão, em relação à laje sem furos (L45), de forma que as variações nas taxas de armadura são apenas devidas às alterações nas alturas úteis.

As lajes L45FS_CG e L45FFS_CG, que não possuíam barras adicionais devido à presença dos furos, apresentaram as menores taxas de armadura de flexão, e, conseqüentemente, maiores valores para a relação V_{Exp}/V_{flex} , pois a resistência à flexão foi reduzida. Isto representa a maior proximidade da ruptura por flexão para estas lajes, em relação às demais.

As lajes da Série 3 apresentaram cargas previstas para a ruptura por flexão, muito próximas, diferenciando-se apenas devido à resistência do concreto, com relações V_{Exp}/V_{flex} variando entre 0,64 e 0,96.

A laje L45_AC1, que apresentou a maior carga de ruptura experimental (punção), apresentou o maior valor para a relação V_{Exp}/V_{flex} (0,96), enquanto que o menor valor para esta relação foi apresentado pela laje L45FFD_AC5 (0,64), que rompeu por punção com a menor carga registrada. A Tab. 5.4 apresenta as cargas estimadas para a ruptura por flexão das lajes das séries 2 e 3, calculadas através da teoria das linhas de ruptura.

Tabela 5.4 – Cargas de ruptura por flexão das lajes das séries 2 e 3

Laje	d (mm)	f'_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	ρ (%)	f_y (MPa)	V_{Exp} (kN)	V_{flex} (kN)	V_{Exp} / V_{flex}
L45FS_CG	154	40,5	3,6	1,21	601	792	1229	0,64
L45FD_CG	154	39,0	4,2	1,32	601	750	1300	0,58
L45FD	154	41,4	4,3	1,32	601	776	1309	0,59
L45FFS_CG	154	41,6	4,2	1,15	601	750	1199	0,63
L45FFD_CG	164	40,6	4,2	1,24	601	850	1406	0,60
L45FFD	144	37,0	4,0	1,41	601	685	1192	0,57
L45FFD_AC2	154	44,5	4,3	1,32	601	1230	1300	0,95
L45FFD_AC3	154	39,6	3,6	1,32	601	1050	1318	0,80
L45FFD_AC4	154	43,2	3,1	1,32	601	885	1302	0,68
L45FFD_AC5	154	40,7	3,2	1,32	601	837	1316	0,64
L45_AC1	154	39,0	4,0	1,32	601	1250	1307	0,96
L45_AC5	154	41,1	3,4	1,32	601	1092	1308	0,83

5.7.2 – CISALHAMENTO

Todas as lajes das séries 2 e 3 romperam por punção. Nas lajes da Série 2, a ruptura ocorreu brusca e repentinamente, enquanto que, nas lajes da Série 3, desenvolveu-se de forma dúctil e com aviso prévio, independente da presença de furos. A utilização de armadura de cisalhamento em torno do pilar e, também, próxima aos furos, favoreceu o desenvolvimento de uma ruptura calma e silenciosa.

Como comentado anteriormente, observou-se o surgimento da fissura de ruptura dentro do furo, e o seu desenvolvimento até a ruptura. Inicialmente, a fissura se inicia no bordo superior da laje (bordo tracionado) e percorre inclinadamente em direção ao pilar até, aproximadamente, a altura do plano médio da laje. Com o acréscimo de carga, surge outra fissura de cisalhamento na superfície inferior da laje, no pilar, e percorre, também, inclinadamente até encontrar a outra fissura. A superfície de ruptura se formou, quando estas duas fissuras se encontraram dentro do furo.

As superfícies de ruptura das lajes da Série 2 se desenvolveram com inclinações que variaram entre 25 e 60 graus, em relação ao plano médio da laje. As superfícies de ruptura foram estimadas, experimentalmente, em todas as lajes, da mesma forma que nas lajes da Série 1, sendo que, nas lajes L45FD e L45FFD, a superfície de ruptura foi observada após o corte ao meio, utilizando um equipamento contendo um disco diamantado, específico para o corte de concreto armado.

As figs. 5.38 e 5.39 apresentam, respectivamente, a configuração das superfícies de ruptura e as fotografias das superfícies de ruptura dentro dos furos, das lajes da Série 2 e, especialmente, das lajes L45FD e L45FFD cortadas ao meio.

Nas lajes da Série 3, as superfícies de ruptura se desenvolveram externamente à região armada, com inclinações que variaram entre 15 e 30 graus, em relação ao plano médio da laje, e se estenderam horizontalmente até aparecer no bordo superior. A Fig. 5.40 apresenta a configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 3.

Pode-se notar nas fotografias das lajes com armadura de cisalhamento (Fig. 5.41), que pequenas fissuras inclinadas se desenvolveram dentro da região com armadura, antes de atingir a ruptura. Como relatado anteriormente, as barras da armadura de punção trabalharam efetivamente em todas as posições, e principalmente, na região adjacente furo, por onde pode ser visualizada a superfície de ruptura

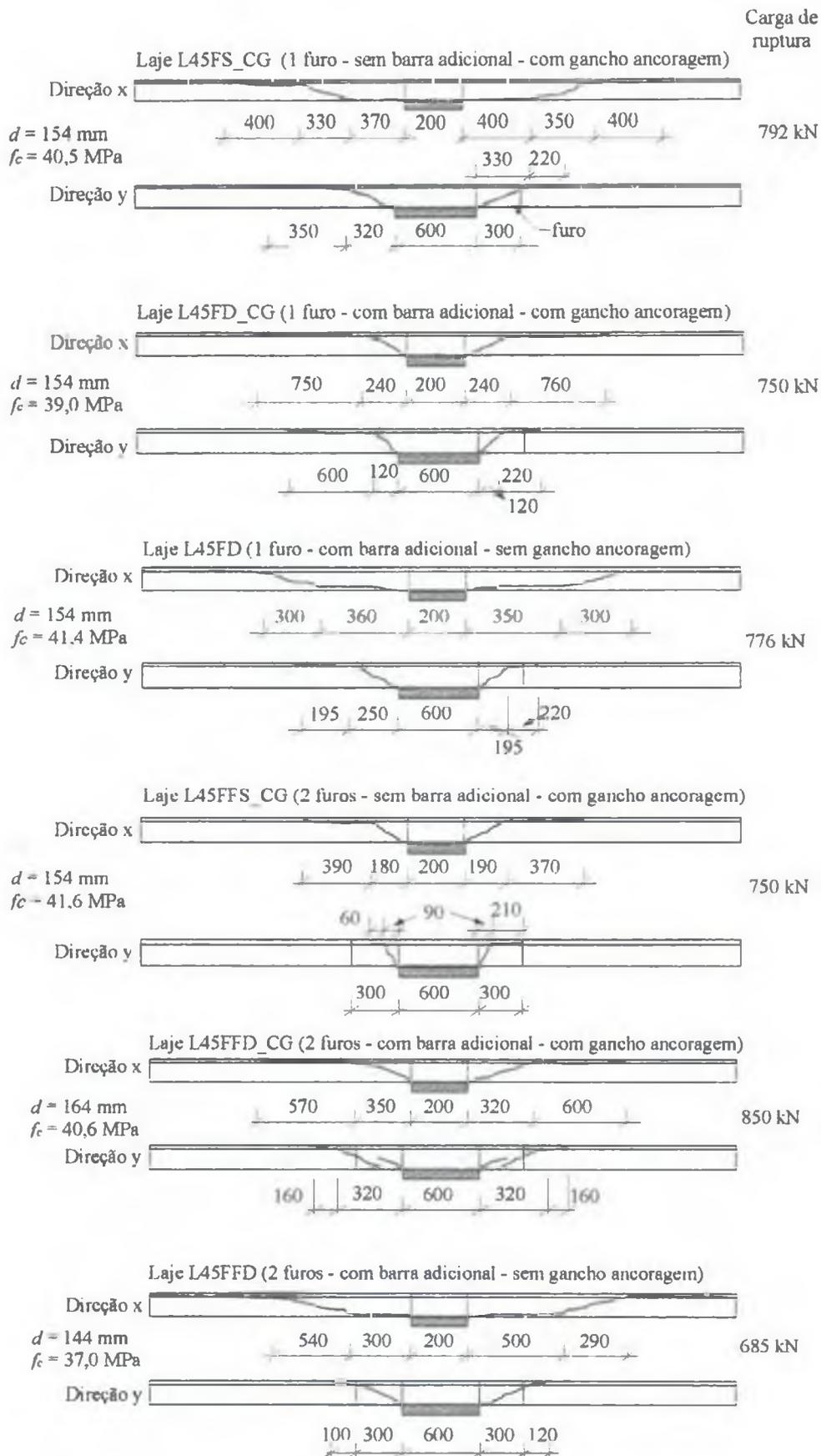


Figura 5.38 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (dimensões em mm)

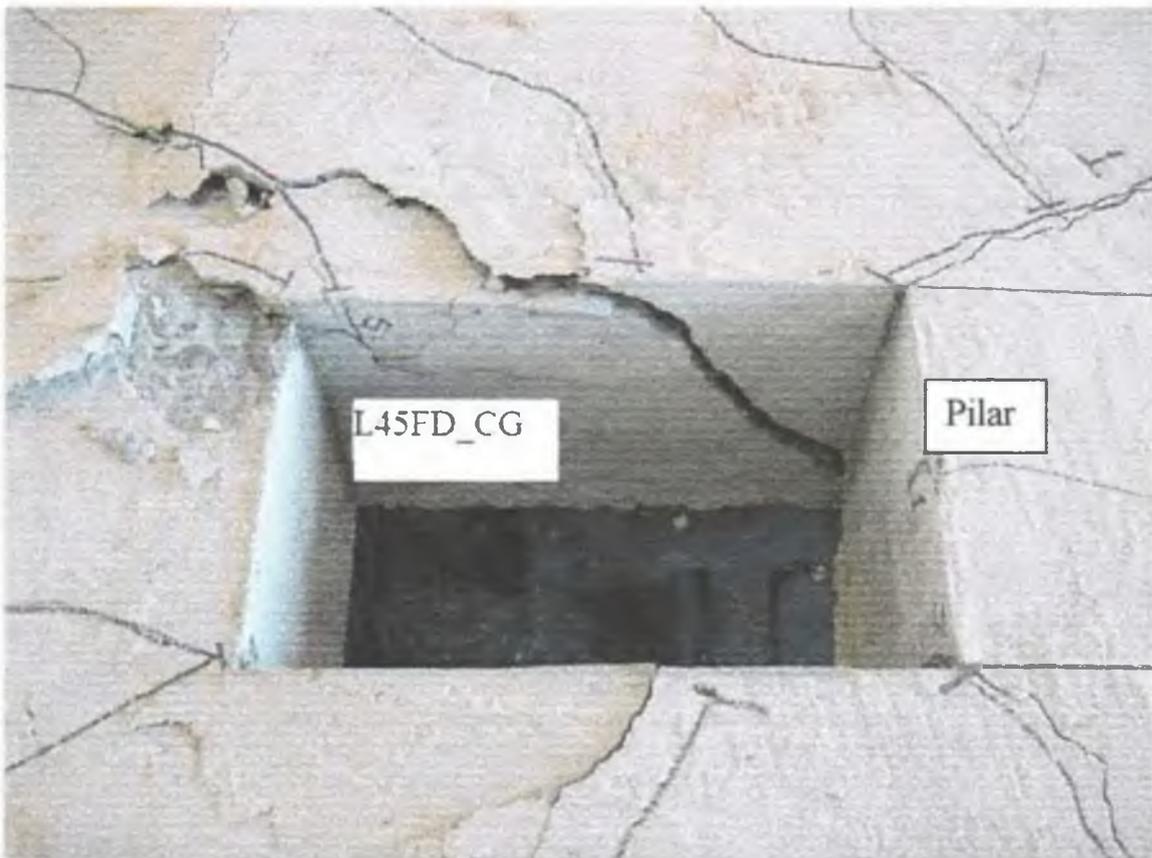


Figura 5.39 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 2

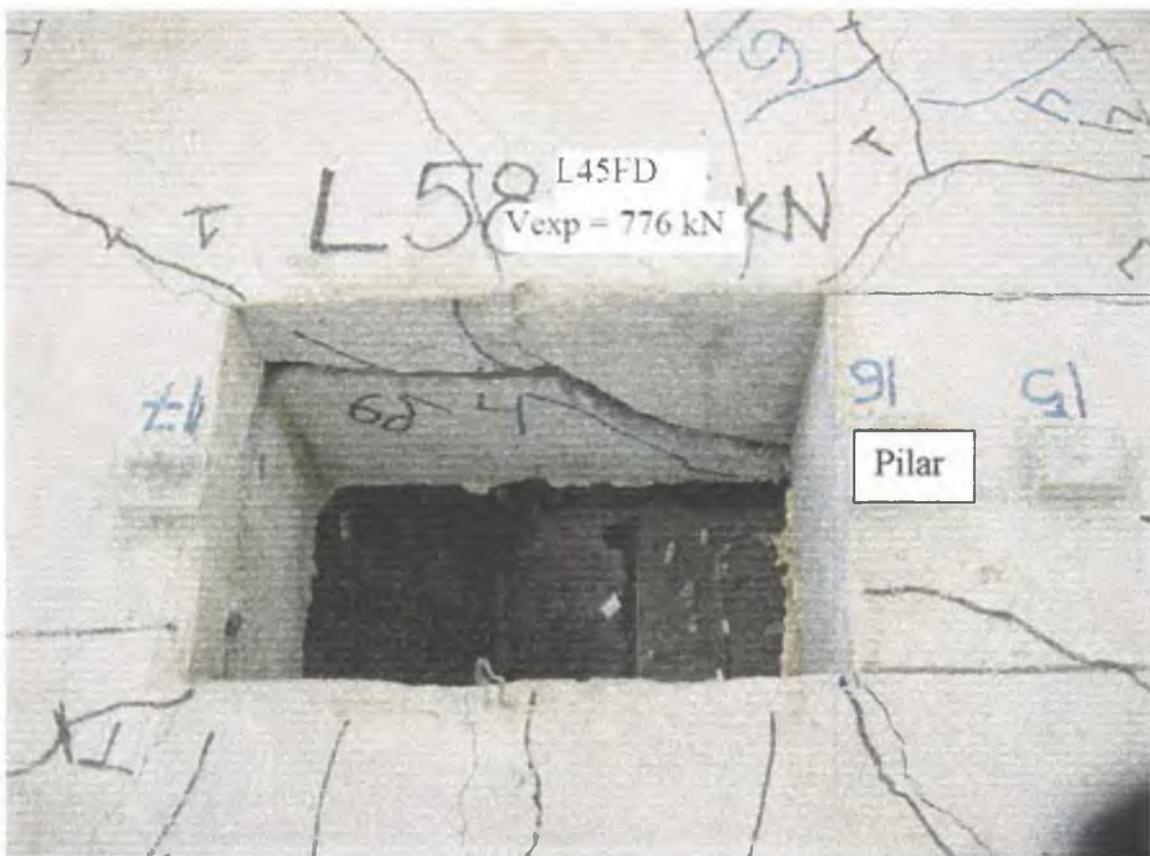


Figura 5.39 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

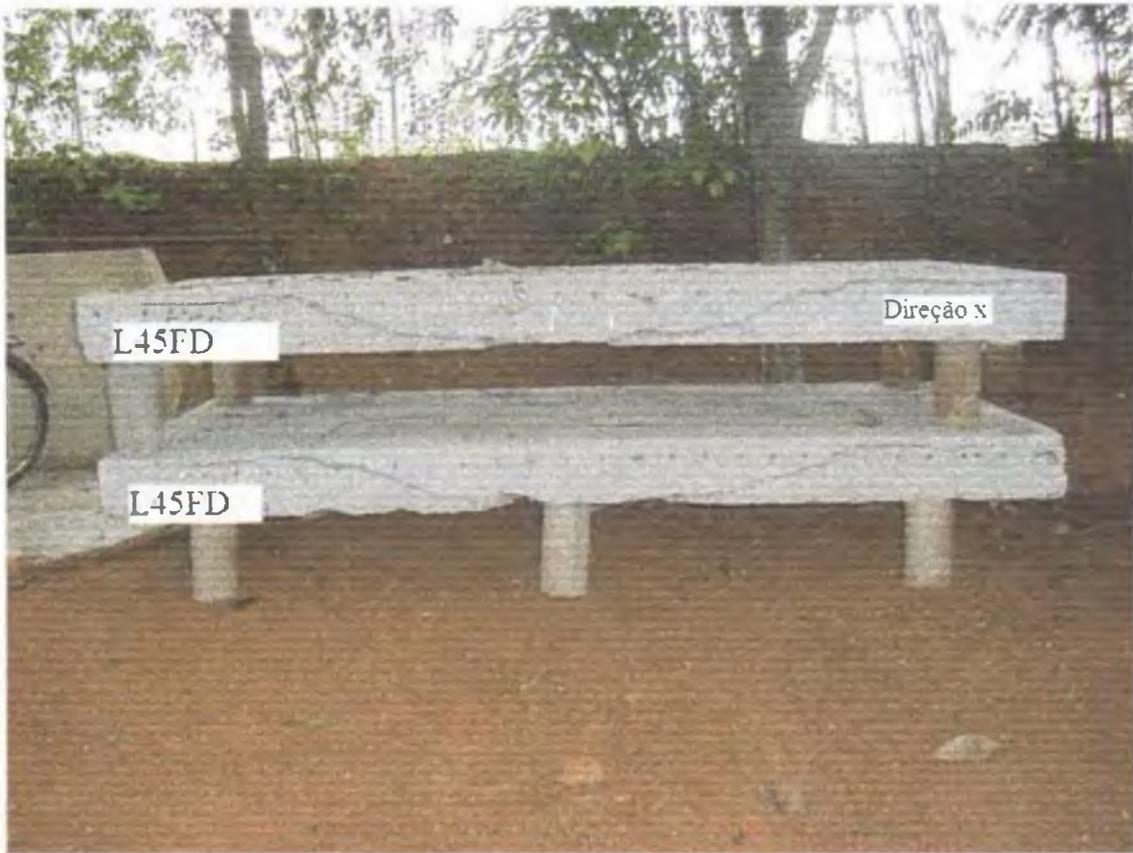


Figura 5.39 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

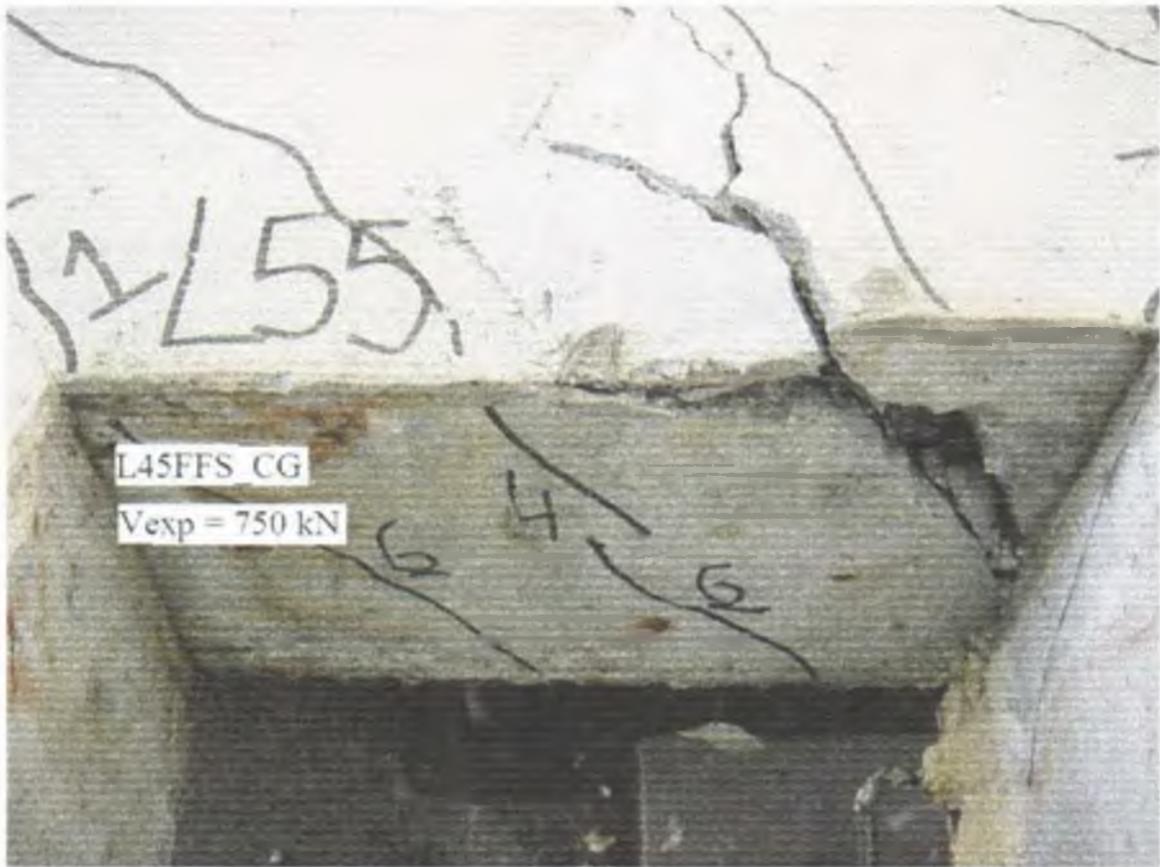


Figura 5.39 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

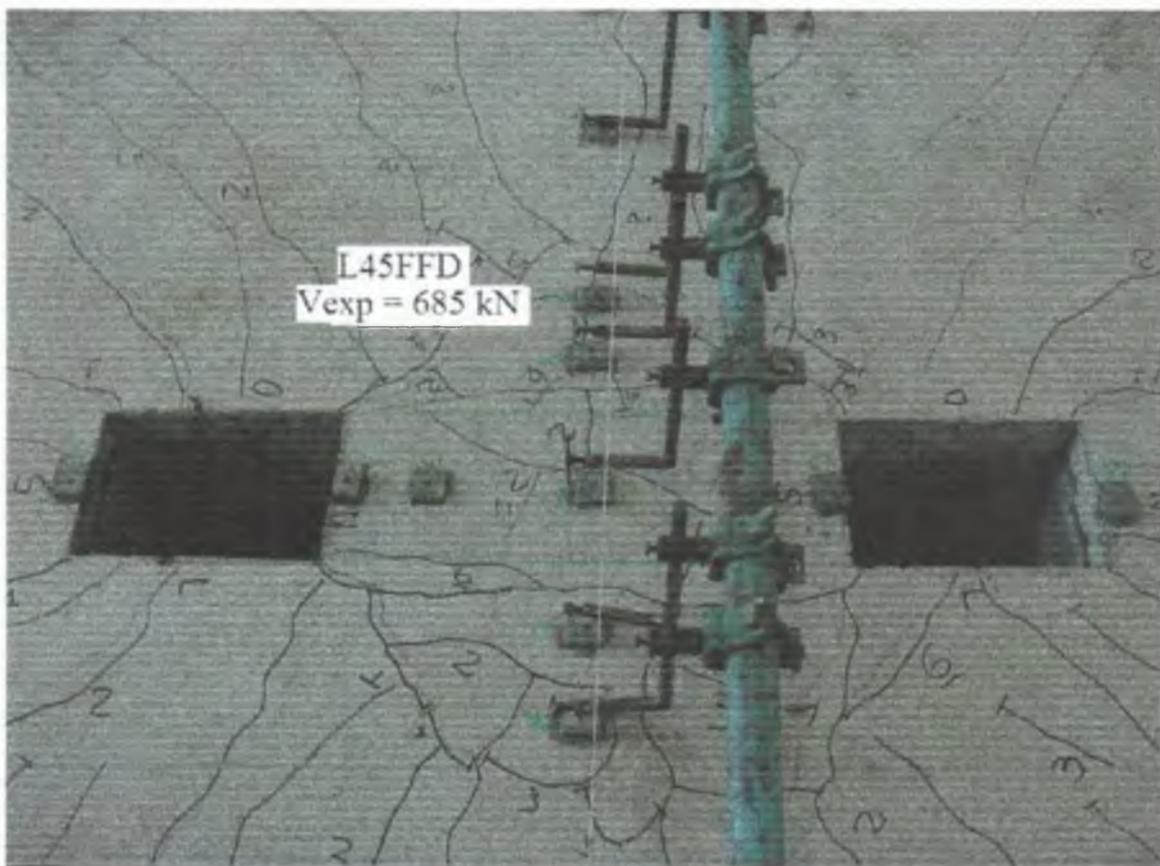


Figura 5.39 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)



Figura 5.39 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

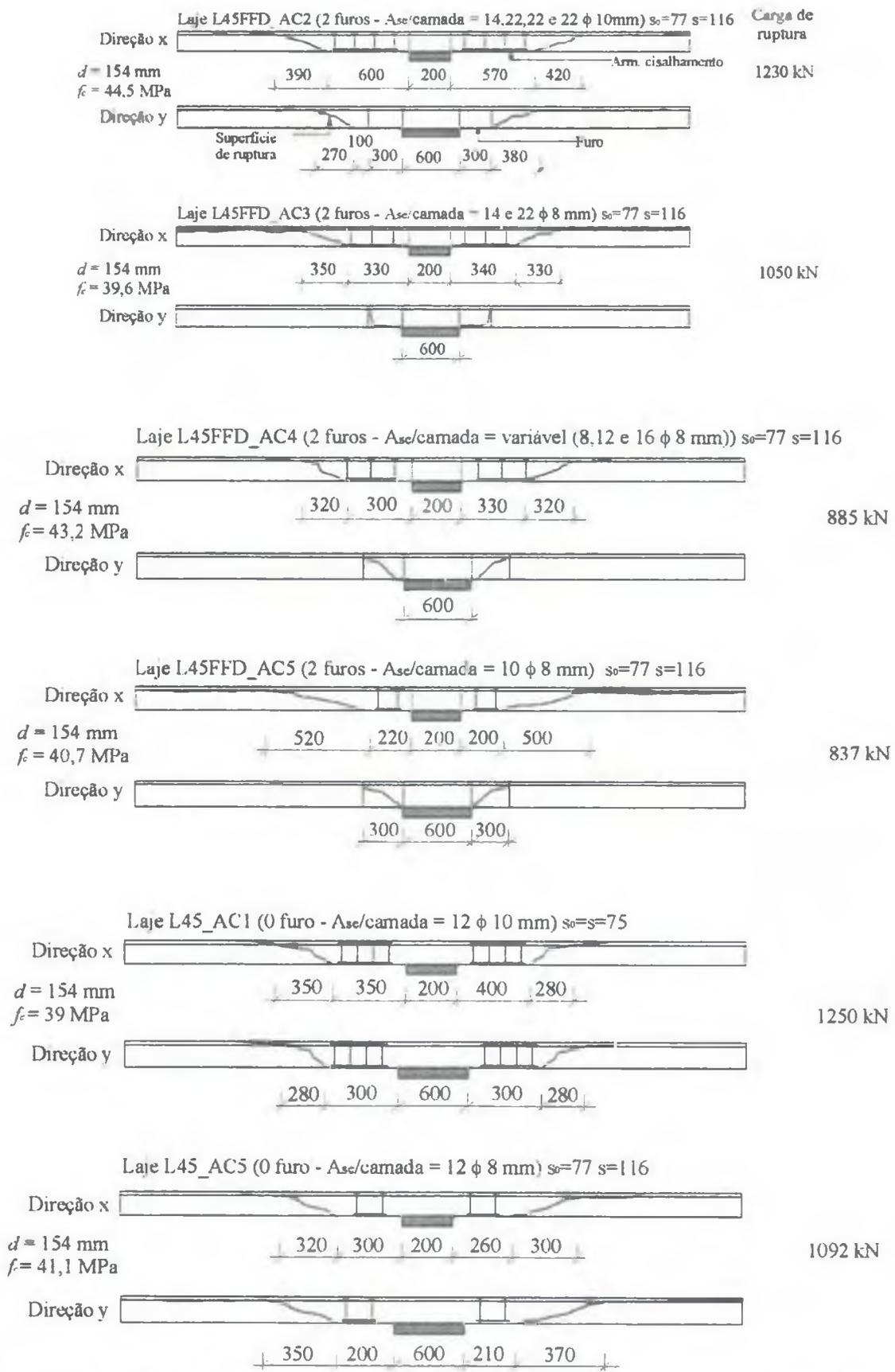


Figura 5.40 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 3 (dimensões em mm)



Figura 5.41 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 3

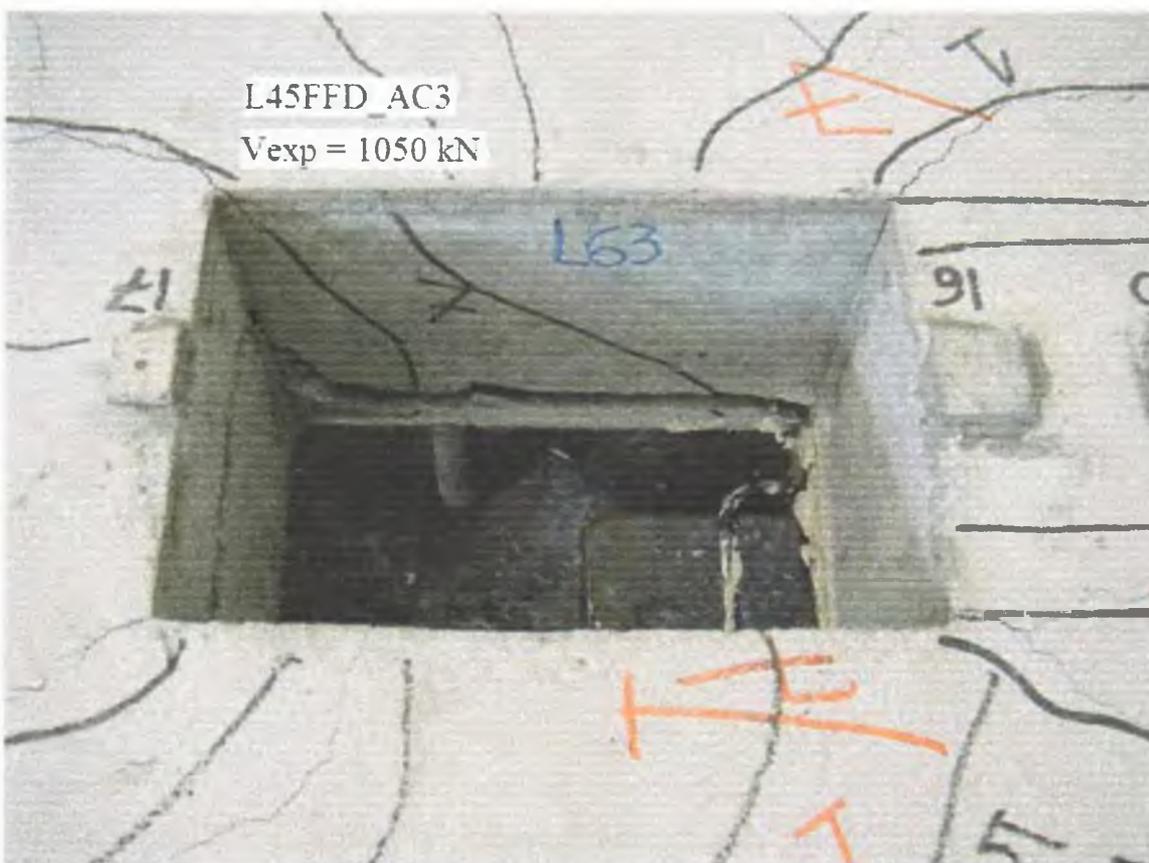


Figura 5.41 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 3 (continuação)



Figura 5.41 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 3 (continuação)



Figura 5.41 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 3 (continuação)

- Métodos de cálculo propostos:

A investigação experimental de lajes com características geométricas e dos materiais diferentes das desta pesquisa e a verificação dos seus resultados através dos métodos de cálculo propostos serviriam para verificar os resultados obtidos neste trabalho. consolidar os métodos de cálculo e estabelecer comparações e limites.

As variáveis poderiam ser a resistência à compressão do concreto (25MPa a 50MPa), distribuição dos cabos de protensão na laje (distribuição uniforme e concentrada em faixas), dimensões e forma do pilar (pilares circulares e quadrados com diâmetro ou comprimento do lado variando entre 200mm e 300mm).

- Verificação da superfície de ruptura cruzando apenas a 1ª camada da armadura de cisalhamento:

O aperfeiçoamento e a consolidação das verificações da superfície de ruptura cruzando apenas a 1ª camada da armadura de cisalhamento seriam feitos através de mais testes experimentais. Um dos objetivos seria confirmar o coeficiente $n = 1,5$ da equação 2.11. Além disso, poderia ser proposto um método de verificação da superfície de ruptura cruzando apenas a 1ª camada da armadura de cisalhamento para as adaptações do *fib* e do Método da Descompressão.

- Análise dos resultados experimentais através de métodos numéricos como os dos programas computacionais ANSYS ou DIANA e verificação da possibilidade da determinação de um modelo teórico para cálculo de lajes cogumelo protendidas com armadura de cisalhamento baseado em modelos como os propostos por SHEHATA (1985) e GOMES (1991).



Figura 5.41 – Fotografias das superfícies de ruptura das lajes da Série 3 (continuação)

As lajes da Série 2 com apenas um furo adjacente ao pilar (menores lados coincidentes), L45FD_CG ($d = 154$ mm, $f'_c = 40,5$ MPa), L45FS_CG ($d = 154$ mm, $f'_c = 39$ MPa) e L45FD ($d = 154$ mm, $f'_c = 41,4$ MPa), romperam com cargas iguais a, respectivamente, 750 kN, 792kN e 776 kN (vide Tab 5.5). As cargas de ruptura das lajes com um furo apresentaram valores aproximados, diferenciando-se, no máximo, em 6%.

As lajes da Série 2, com dois furos simétricos adjacentes ao pilar (L45FFD_CG ($d = 164$ mm, $f'_c = 40,6$ MPa), L45FFS_CG ($d = 154$ mm, $f'_c = 41,6$ MPa) e L45FFD ($d = 144$ mm, $f'_c = 37$ MPa)), romperam com cargas iguais a, respectivamente, 850 kN, 750 kN e 685 kN. As lajes com dois furos simétricos apresentaram cargas de ruptura razoavelmente diferenciadas, atingindo uma variação de até 24%.

A laje L45FFD_AC2 ($d = 154$ mm e $f'_c = 44,5$ MPa), com dois furos simétricos e armadura de cisalhamento, rompeu com carga igual a 1230 kN. A distribuição da armadura foi feita em 4 (quatro) camadas, sendo que a primeira camada conteve 14 (quatorze) elementos de 10 mm

de diâmetro, e as outras três camadas, 22 (vinte e dois) elementos. A distância entre a face do pilar e a primeira camada de armadura foi de 77 mm, e entre camadas, foi de 116 mm.

O detalhamento da armadura de cisalhamento na laje L45FFD_AC3 ($d = 154$ mm e $f'_c = 39,6$ MPa), semelhante ao da laje L45FFD_AC2, porém, constituindo-se de três camadas de armadura e com elementos de 8,0 mm de diâmetro, conduziu a uma carga de ruptura de 1050kN.

A laje L45FFD_AC4 ($d = 154$ mm e $f'_c = 43,2$ MPa), com dois furos e armadura de cisalhamento, rompeu sob carga de 885 kN. A distribuição da armadura de cisalhamento apresentou-se diferenciada das demais, constituída de 3 (três) camadas, sendo a primeira camada composta de 16 (dezesesseis) elementos, a segunda, de 12 (doze) elementos, e a terceira, de 8 (oito) elementos.

A laje L45FFD_AC5 ($d = 154$ mm e $f'_c = 40,7$ MPa), com dois furos e armadura de cisalhamento, rompeu sob carga de 837 kN. A armadura de cisalhamento desta laje foi distribuída radialmente, e se compôs de 2 (duas) camadas de “studs”, cada camada contendo 10 (dez) elementos de 8,0 mm de diâmetro. A distância entre a face do pilar e a primeira camada de armadura foi de 77 mm, e a distância entre camadas, de 116 mm.

A laje L45_AC1 ($d = 154$ mm e $f'_c = 39$ MPa), sem furos e com armadura de cisalhamento, rompeu sob carga de 1250 kN. A distribuição da armadura de cisalhamento, em torno de um pilar de dimensões 200 mm x 600 mm, foi feita radialmente, com 4 (quatro) camadas de “studs”, cada uma contendo 12 (doze) elementos de diâmetro igual a 10 mm, conforme mostrado na Fig. 3.7. O espaçamento entre camadas, e, entre a face do pilar e a primeira camada, foi de 75 mm.

A laje L45_AC5 ($d = 154$ mm e $f'_c = 41,1$ MPa), sem furos e com armadura de cisalhamento, rompeu sob carga de 1092 kN. O detalhamento da armadura de cisalhamento desta laje foi semelhante ao da laje L45FFD_AC5, diferenciando-se apenas no número de elementos por camada, que, neste caso, foi de 12 (doze) elementos.

A Tab 5.5 apresenta as cargas e modos de ruptura das lajes das séries 2 e 3.

Tabela 5.5 – Cargas e modos de ruptura das lajes das séries 2 e 3

Laje	d (mm)	f_c (MPa)	Grampo de ancoragem	Nº de furos	Armadura de cisalhamento		V_{Exp} (kN)	Modo de ruptura
					$A_{se}/cam.$	Nº cam.		
L45FS_CG	154	40,5	sim	1	-	-	792	Punção
L45FD_CG	154	39,0	sim	1	-	-	750	Punção
L45FD	154	41,4	não	1	-	-	776	Punção
L45FFS_CG	154	41,6	sim	2	-	-	750	Punção
L45FFD_CG	164	40,6	sim	2	-	-	850	Punção
L45FFD	144	37,0	não	2	-	-	685	Punção
L45FFD_AC2	154	43,8	não	2	14, 22, 22 e 22 ϕ 10mm	4	1230	Punção (externa)
L45FFD_AC3	154	39,6	não	2	14, 22 e 22 ϕ 8mm	3	1050	Punção (externa)
L45FFD_AC4	154	43,2	não	2	8, 12 e 16 ϕ 8 mm	3	885	Punção (externa)
L45FFD_AC5	154	40,7	não	2	10 ϕ 8 mm	2	837	Punção (externa)
L45_AC1	154	39,0	não	0	12 ϕ 10 mm	4	1250	Punção (externa)
L45_AC5	154	41,1	não	0	12 ϕ 8 mm	2	1092	Punção (externa)

Punção (externa) – superfície de ruptura na região externa à armadura de cisalhamento

5.7.3 – PÓS-PUNÇIONAMENTO

A Tab. 5.6 apresenta as cargas de pós-punçionamento das lajes das séries 2 e 3. Pode-se notar que a capacidade residual de carga das lajes variou entre 38% e 60% da carga de ruptura.

A capacidade pós-punçionamento das lajes com furos e armadura de cisalhamento foi, na maioria dos casos, superior à das lajes sem armadura, e inclusive, em relação às lajes monolíticas e armadas com “studs”.

Tabela 5.6 – Cargas de pós-puncionamento das lajes das séries 2 e 3

Laje	d (mm)	f'_c (MPa)	V_{Exp} (kN)	V_{pp} (kN)	V_{pp}/V_{Exp}
L45FS_CG	154	40,5	792	420	0,53
L45FD_CG	154	39,0	750	287	0,38
L45FD	154	41,4	776	338	0,44
L45FFS_CG	154	41,6	750	353	0,47
L45FFD_CG	164	40,6	850	498	0,58
L45FFD	144	37,0	685	400	0,58
L45FFD_AC2	154	44,5	1230	620	0,50
L45FFD_AC3	154	39,6	1050	580	0,55
L45FFD_AC4	154	43,2	885	510	0,58
L45FFD_AC5	154	40,7	837	440	0,53
L45_AC1	154	39,0	1250	470	0,38
L45_AC5	154	41,1	1092	530	0,48

5.7.4 – ANÁLISE DAS LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISCALHAMENTO

5.7.4.1 – INTRODUÇÃO

Inicialmente, fez-se uma análise considerando todos os resultados experimentais de cargas de ruptura obtidos e comparando-os entre si, a fim de investigar a influência das variáveis estudadas (furos, grampos de ancoragem e barras adicionais da armadura de flexão e armadura de cisalhamento) no comportamento das lajes.

Uma comparação entre os resultados obtidos nos ensaios e aqueles encontrados na literatura foi realizada. Como foram estudadas diversas variáveis, procurou-se focar apenas no estudo da presença de furos adjacentes ao pilar e da contribuição da armadura de cisalhamento na resistência última.

5.7.4.2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

a) Influência dos Furos

Uma vez que as lajes L45FFD_CG e L45FFD apresentaram alturas úteis diferentes da maioria das lajes, procedeu-se à normalização das alturas úteis em relação à da laje L45. A presença de um furo nas lajes da Série 2, L45FS_CG, L45FD_CG e L45FD, conduziu a reduções entre 6 e 11% na carga de ruptura, em relação às lajes monolíticas L45 e L45_AC5 (Tab. 5.7).

A presença de dois furos simétricos, nas lajes das séries 2 e 3, posicionados com suas menores dimensões adjacentes aos menores lados do pilar reduziu, em média, 13%, a carga de ruptura, quando se comparam as lajes L45FFS_CG, L45FFD_CG e L45FFD com a L45, e a laje L45FFD_AC5 com a L45_AC5.

A laje L45FFD_CG apresentou carga de ruptura praticamente igual à da L45, apesar de possuir dois furos adjacentes ao pilar, devido à altura útil da laje L45FFD_CG, enquanto que a laje L45FFD apresentou carga de ruptura inferior em 13% em relação à laje L45. As alturas úteis das lajes citadas foram normalizadas de acordo com a laje de referência L45, através do coeficiente K (Tab. 5.7). A Tab. 5.7 apresenta a influência dos furos, posicionados adjacentes ao pilar, na redução da resistência das lajes.

Tabela 5.7 – Influência da presença do furo na carga de ruptura experimental

Laje	d (mm)	f_c (MPa)	Nº de furos	Grupo de ancoragem	ρ (%)	V_{Exp} (kN)	$K \cdot V_{Exp}$ (kN)	$K \cdot V_{Exp} / V_{Exp}$
L45*	154	42,0	0	-	1,29	843	843	1,00
L45FS_CG	154	40,5	1	Sim	1,14	792	792	0,94
L45FD_CG	154	39,0	1	Sim	1,38	750	750	0,89
L45FD	154	41,4	1	Não	1,38	776	776	0,92
L45FFS_CG	154	41,6	2	Sim	1,00	750	750	0,89
L45FFD_CG	164	40,6	2	Sim	1,24	850	798	0,95
L45FFD	144	37,0	2	Não	1,55	685	733	0,87
L45_AC5*	154	41,1	0	-	1,38	1092	1092	1,00
L45FFD_AC5	154	40,7	2	Não	1,38	837	837	0,77

* laje de referência; K coeficiente de normalização da altura útil d ($K = d_{ref} / d$)

b) Influência da Armadura de Flexão

Nas lajes da Série 2, o aumento da taxa de armadura de flexão nas lajes com um furo, L45FD_CG e L45FD ($\rho = 1,38\%$), com relação à laje L45FS_CG ($\rho = 1,14\%$) praticamente não influenciou na carga de ruptura. A laje L45FS_CG rompeu com uma carga 4% superior, em média, à das demais lajes, como pode ser visto na Tab. 5.7.

Com relação às lajes com dois furos, houve um acréscimo na carga de ruptura, quando se comparam as lajes L45FFS_CG e L45FFD_CG. Entretanto, tal aumento deve-se, como mencionado anteriormente, ao aumento da altura efetiva que ocorreu na laje L45FFD_CG. Tal fato pode também ser observado quando se comparam as lajes citadas com a laje L45FFD, que apresentou uma altura efetiva inferior.

A partir da Tab. 5.7, observa-se, ao comparar as lajes L45FD e L45FD_CG, que a presença de grampos de ancoragem nas barras interceptadas pelos furos não provocou acréscimo da carga de ruptura por punção, uma vez que, os trechos verticais dos grampos de ancoragem poderiam, eventualmente, atuar como armadura de cisalhamento disposta em torno dos furos.

c) Influência da Armadura de Cisalhamento

A utilização da armadura de cisalhamento, nas lajes da Série 3, provocou um acréscimo da resistência última, nas lajes monolíticas e nas lajes com furos. Observou-se que pode-se alcançar resistências aproximadas e até mais elevadas, quando da utilização de armadura de cisalhamento em lajes com furos, em relação a lajes monolíticas.

A disposição da armadura de cisalhamento, nas lajes com furos adjacentes ao pilar, é um aspecto de extrema importância, pois, é necessário que esteja distribuída em uma região onde estão atuando os maiores esforços de punção e, também, onde ocorre uma deficiência de material (concreto, no caso) nas lajes.

A utilização de armadura de cisalhamento na laje L45_ACI, sem furos, provocou um aumento de 48% na carga de ruptura da laje, quando comparada com a laje similar L45, sem

furos e sem armadura de cisalhamento, como mostra a Tab. 5.8. A redução de quatro camadas para duas, e adicionalmente, a diminuição da área de armadura de cisalhamento por camada, como foi o caso das lajes L45_AC1 e L45_AC5, conduziu a uma diminuição no ganho de resistência da laje, pois a laje L45_AC5 apresentou uma carga de ruptura superior à da laje L45, em apenas 30%.

A presença de dois furos de dimensões 200 mm x 300 mm adjacentes ao pilar, com as menores dimensões coincidentes, provocou uma redução de 21% na carga de ruptura, quando se comparam as lajes L45 e L45FFD. Entretanto, com a utilização de armadura de cisalhamento constituída de quatro camadas de “studs” de diâmetro igual a 10 mm, da forma como foi disposta na laje L45FFD_AC2, foi possível aumentar a carga de ruptura em 80%, em relação à laje similar sem armadura (L45FFD), e inclusive, superar em 46% a carga de ruptura da laje L45.

A redução do número de camadas de armadura de cisalhamento de quatro para três, e, da área de armadura por camada, quando se comparam as lajes L45FFD_AC2 e L45FFD_AC3, conduziu a uma redução na carga de ruptura da L45FFD_AC3, pois o acréscimo de resistência à punção desta laje, em relação à L45FFD, foi de apenas 53%, comparado com 80% da laje L45FFD_AC2.

A Tab. 5.8 mostra que o detalhamento da armadura de cisalhamento utilizado na laje L45FFD_AC3 permitiu que a carga de ruptura desta laje superasse a resistência de uma laje similar sem furos e sem armadura de cisalhamento, em 25%.

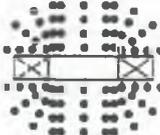
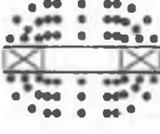
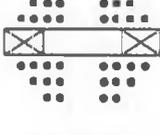
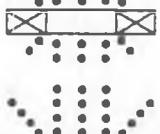
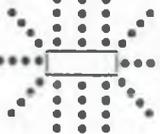
O detalhamento da armadura de cisalhamento utilizado na laje L45FFD_AC4 favoreceu o acréscimo da carga de ruptura, em relação à laje sem armadura (L45FFD), em torno de 29%, e também, em relação à laje sem furos e sem armadura (5%).

A distribuição da armadura de cisalhamento da laje L45FFD_AC5, similar à da laje L45_AC5, propiciou um acréscimo na carga de ruptura, em relação à laje L45FFD, de 22%, enquanto que, em relação à laje L45, não foi observado qualquer aumento da resistência à punção.

Observou-se nos resultados das lajes com furos e armadura de cisalhamento, tanto das cargas de ruptura quanto das deformações da armadura de cisalhamento, que a concentração de “studs” próxima ao furo e em torno do pilar, permitiu aumentar a resistência das lajes até valores superiores à de uma laje monolítica sem tal armadura.

Na laje L45FFD_AC5, onde a armadura de cisalhamento foi distribuída radial e uniformemente em torno do pilar, sem a concentração de armadura próxima ao furo, verificou-se que a carga de ruptura desta laje alcançou a resistência da laje monolítica L45.

Tabela 5.8 – Contribuição da armadura de cisalhamento na carga de ruptura experimental

Laje	Nº furos	Armadura de cisalhamento			V_{Exp} (kN)	$V_{Exp}/$ $V_{Exp(L45FFD)}$	$V_{Exp}/$ $V_{Exp(L45)}$	
		Detalhe	A_{se}/cam (mm ²)	s_0 (mm)				s_r (mm)
L45	0	-	-	-	-	843	1,23	1,00
L45FFD	2	-	-	-	-	685	1,00	0,79
L45FFD_AC2	2		1ª 1100 2ª 1728 3ª 1728 4ª 1728	77	116	1230	1,80	1,46
L45FFD_AC3	2		1ª 704 2ª 1106 3ª 1106	77	116	1050	1,53	1,25
L45FFD_AC4	2		1ª 804 2ª 603 3ª 402	77	116	885	1,29	1,05
L45FFD_AC5	2		503	77	116	837	1,22	0,99
L45_AC1	0		943	75	75	1250	1,82	1,48
L45_AC5	0		603	77	116	1092	1,59	1,30

5.7.4.3 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM RESULTADOS DA LITERATURA

a) Lajes com Furos

A Tab. 5.9 apresenta uma comparação dos resultados experimentais obtidos por diversos pesquisadores com os da pesquisa atual, considerando a presença de furos próximos ao pilar.

Nos resultados de GOMES & ANDRADE (1995) apresentados na Tab. 5.9, verifica-se uma redução de até 15% na carga de ruptura das lajes quadradas (3000 mm x 3000 mm x 200 mm) com pilares quadrados (200 mm x 200 mm) e furos circulares, quando comparadas com a laje monolítica L12A (caso de quatro furos).

O aumento do número e do diâmetro dos furos não provocou reduções consideráveis nas cargas de ruptura, a partir de um furo de 151 mm de diâmetro. Ocorreu um decréscimo da carga de ruptura quando se utilizou um furo de 90 e 151 mm de diâmetro, a partir da laje sem furo.

Nas lajes de dimensão retangular (1540 mm x 1020 mm x 120 mm), com pilares de borda (250 mm x 250 mm), estudadas por EL-SALAKAWY *et al.* (1999), verifica-se que a localização e o tamanho do furo é um fator extremamente importante na resistência da laje, especificamente em lajes com pilares de borda.

A presença de um furo quadrado (250 mm x 250 mm), adjacente ao pilar e alinhado na direção perpendicular à borda, reduziu em 30% a resistência da laje. A menor redução na resistência última à punção foi registrada na laje com furo quadrado (150 mm x 150 mm) adjacente ao pilar e perpendicular à borda, que foi de apenas 4% (Laje SE0).

As lajes quadradas (2200 mm x 2200 mm x 150 mm) com pilares internos quadrados (200 mm x 200 mm), testadas por TENG *et al.* (1999), tiveram uma redução de carga última entre 12 e 51%, quando da existência de furos de seção retangular (200 mm x 400 mm) adjacentes ao pilar. A situação mais desfavorável para a posição do furo é, obviamente, aquela em que o furo está significativamente inserido no perímetro crítico da região sob puncionamento

No caso das lajes de TENG *et al.* (1999), apoiadas em pilar de seção retangular, a presença de furos adjacentes ao pilar conduziu a uma redução de 10 a 40% da carga de ruptura, em relação à laje monolítica. Observa-se na Tab. 5.9 que, nestes casos, a resistência tende a diminuir, tanto com o posicionamento do furo dentro da região do perímetro crítico da punção, quanto estando adjacente ao menor lado do pilar.

Nos resultados de REGAN (1999), observa-se, que a presença de furos em lajes com pilares retangulares reduziu a carga de ruptura em até 36%, em relação a lajes monolíticas.

A presença de dois furos quadrados (150 mm x 150 mm) e simétricos, posicionados adjacentes ao pilar quadrado de mesmas dimensões do furo, provocou um decréscimo na carga de ruptura de aproximadamente 18%, em relação à laje monolítica, no caso das lajes ensaiadas por SILVA (2003). Nas lajes com pilares retangulares de dimensões, em mm, 150 x 300 e 150 x 450, ensaiadas pelo autor, os furos reduziram a carga de ruptura em, respectivamente, 13% e 20%, em relação às lajes semelhantes em furos.

Para as lajes da presente pesquisa, que foram ensaiadas com o objetivo de investigar a influência dos furos na resistência das lajes, observa-se que a presença de um furo, adjacente ao menor lado do pilar retangular, reduziu em 14% a carga de ruptura, e, a existência de dois furos simétricos, diminuiu a carga de ruptura em 33%, quando comparada com a laje monolítica.

Tabela 5.9 – Comparação dos resultados experimentais das lajes com furos da literatura com os da presente pesquisa

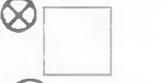
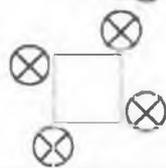
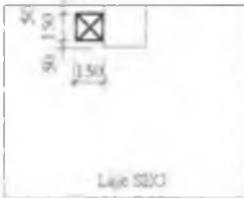
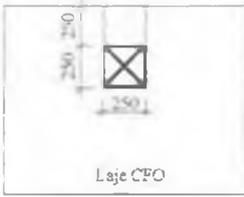
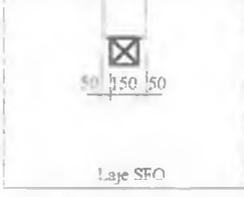
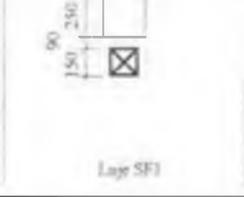
Autor	Laje	Pilar (mm)	Furo		f'_c (MPa)	d (mm)	V_{Exp} (kN)	
			Detalhe	Quant.				Tamanho (mm)
GOMES & ANDRADE (1995)	12A	Interno 200 x 200		0	-	36,5	163	650
	13	Interno 200 x 200		1	$\phi = 90$	31,4	153	600
	14	Interno 200 x 200		1	$\phi = 151$	31,4	155	556
	15	Interno 200 x 200		2	$\phi = 166$	27,8	148	554
	23	Interno 200 x 200		4	$\phi = 166$	36,4	160	550
EL-SALAKAWY <i>et al.</i> (1999)	XXX	Borda 250 x 250		0	-	33,0	90	125
	SE0	Borda 250 x 250		1	150x150	32,5	90	120
	CF0	Borda 250 x 250		1	250x250	30,5	90	87
	SF0	Borda 250 x 250		1	150x150	31,5	90	110
	SF1	Borda 250 x 250		1	150x150	33,0	90	115

Tabela 5.9 – Comparação dos resultados experimentais das lajes com furos da literatura com os da presente pesquisa (continuação)

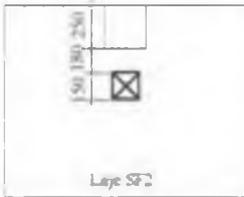
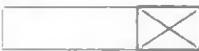
Autor	Laje	Pilar (mm)	Furo		f'_c (MPa)	d (mm)	V_{Exp} (kN)		
			Detalhe	N ^o				Tamanho (mm)	
EL-SALAKAWY	SF2	Borda 250 x 250		1	150x150	30,0	90	114	
	OC11	Interno 200x200		1	200x400	36,0	115	423	
TENG <i>et al.</i> (1999)	OC11H30	Interno 200x200		1	200x400	33,9	118	349	
	OC11V23	Interno 200x200		1	200x400	34,1	109	373	
	OC11V20	Interno 200x200		1	200x400	38,6	105	207	
	OC13	Interno 200x600		1	200x400	35,8	107	568	
	OC13H50	Interno 200x600		1	200x400	36,3	110	443	
	OC13V43	Interno 200x600		1	200x400	36,6	114	467	
	OC13V23	Interno 200x600		1	200x400	37,0	108	484	
	OC13V40	Interno 200x600		1	200x400	43,0	109	340	
	OC13H02	Interno 200x600		1	200x400	43,1	112	512	
	OC15	Interno 200x1000		1	200x400	40,0	103	649	
	OC15H70	Interno 200x1000		1	200x400	37,9	108	529	
	OC15V43	Interno 200x1000		1	200x400	36,0	109	612	
	REGAN/99	1	Interno 150 x 250		0	-	39,4	124	440
		2	Interno 150 x 250		2	100x150	40,7	124	380

Tabela 5.9 – Comparação dos resultados experimentais das lajes com furos da literatura com os da presente pesquisa (continuação)

Autor	Laje	Pilar (mm)	Furo		f_c (MPa)	d (mm)	V_{Exp} (kN)	
			Detalhe	Nº				Tamanho (mm)
REGAN (1999)	6	Interno 150 x 250		4	100x100 100x150	37,6	124	280
SILVA (2003)	L1	Interno 150 x 150		0	-	39,6	90	273
	L4	Interno 150 x 150		2	150x150	39,4	90	225
	L2	Interno 150 x 300		0	-	40,4	90	401
	L5	Interno 150 x 300		2	150x150	39,6	90	350
	L3	Interno 150 x 450		0	-	40,8	90	469
	L6	Interno 150 x 450		2	150x150	39,1	90	375
Presente pesquisa	L45	Interno 200 x 600		0	-	42,0	154	843
	L45FD	Interno 200 x 600		1	200x300	41,4	154	726
	L45FFD	Interno 200 x 600		2	200x300	37,0	144	635

b) Lajes com Armadura de Cisalhamento

A Tab. 5.10 apresenta os resultados experimentais da presente pesquisa e de algumas pesquisas da literatura referentes a lajes com armadura de cisalhamento, com pilares de seção transversal quadrada ou retangular.

Para os resultados de GOMES & ANDRADE (1995), observa-se na Tab. 5.10, que a utilização de armadura de cisalhamento na laje com um furo permitiu que a resistência desta laje superasse em 69% a da laje monolítica, e, em 83% a da laje similar sem armadura.

No caso das lajes com dois furos, o aumento na resistência última devido à armadura de cisalhamento, em relação à laje monolítica, foi de, no mínimo, 28% (distribuição radial com 6 camadas de elementos de 6,0 mm). Observa-se um acréscimo na carga de ruptura da laje com dois furos, com a utilização de 4 camadas de elementos de 10,0 mm de diâmetro, de aproximadamente 82%.

Nas lajes com quatro furos, a armadura de cisalhamento provocou um acréscimo na carga de ruptura de, no mínimo, 42% para os “studs” distribuídos em 8 linhas, cada uma com 4 camadas de elementos de 10,0 mm de diâmetro. O ganho máximo de resistência nas lajes com quatro furos foi de 79%, para os casos das lajes 26 e 27, que tiveram os furos revestidos com tubos de aço. Com a utilização destes tubos de aço dentro dos furos, observa-se na Tab. 5.10 que não houve aumento de resistência quando se elevou o número de camadas de “studs, de 6 para 10, e sim, mudança no modo de ruptura (flexão).

Em relação à laje monolítica L12A ensaiada pelos autores, a utilização de armadura de cisalhamento nas lajes com quatro furos, produziu um acréscimo de até 52%, na carga de ruptura.

A distribuição da armadura de cisalhamento, constituída de fatias de perfis de aço de viga de seção “T”, em torno da região do pilar da laje monolítica ensaiada por REGAN (1999), produziu um aumento na resistência da laje de aproximadamente 14%, quando da utilização de armadura mínima calculada de acordo com a norma BS8110 (1997).

Nas lajes com dois furos, a utilização da armadura de cisalhamento, cuja área de aço correspondeu à área mínima calculada segundo o BS8110 (1997), permitiu um acréscimo de 21% na carga de ruptura da laje similar sem tal armadura. Em relação à laje monolítica, a laje com dois furos e armadura mínima apresentou carga de ruptura superior em 5%.

O detalhamento da armadura de cisalhamento da laje 5 de REGAN (1999), que se constituiu apenas de 2 camadas, cada uma com 4 elementos de diâmetro de 6,0 mm, produziu uma carga de ruptura levemente superior (4%) à da laje 4, que teve uma área maior de armadura.

Nas lajes com quatro furos, as barras dobradas colocadas próximas às faces dos furos produziram um acréscimo na carga de ruptura, em relação a laje similar sem tal armadura, de

14%. Em relação à laje monolítica, a utilização de barras dobradas, nas lajes com quatro furos, não elevou a carga de ruptura

Ao comparar as lajes PSSCH4a e PSSCH4b, ensaiadas por IOANNOU (2001), e ponderando os diferentes valores da resistência à compressão do concreto, verifica-se, na Tab. 5.10, que a armadura de cisalhamento elevou em, aproximadamente, 22% a carga de ruptura.

Embora a laje PSSCH1 tenha apresentado o furo com a maior dimensão, em relação aos demais furos, esta rompeu com a maior carga (492 kN).

Assim como observado anteriormente, a laje que apresentou a menor resistência última, dentre aquelas com armadura de cisalhamento, foi aquela cujos furos tiveram seus maiores lados adjacentes ao pilar (PSSCH3). Entretanto, esta laje rompeu com uma carga superior à da laje sem armadura de cisalhamento, em aproximadamente 23%.

Nota-se nos resultados obtidos por SILVA (2003), que a armadura de cisalhamento aumentou a carga de ruptura das lajes monolíticas com pilar quadrado em 54%, e das lajes com pilar retangular, em 13%.

Nas lajes com pilar quadrado e dois furos simétricos, a presença da armadura de cisalhamento distribuída dentro do perímetro circular, cuja origem é o centro do pilar, e o raio é a distância entre este centro e o elemento da última camada, conduziu a uma carga de ruptura superior em 19% à de uma laje monolítica e sem armadura, mas inferior à carga de uma laje monolítica e com armadura de cisalhamento.

Na laje com pilar retangular e dois furos simétricos, a armadura de cisalhamento não aumentou a carga de ruptura, quando comparada com a laje monolítica sem armadura.

Nas lajes quadradas (3000 mm x 3000 mm x 200 mm) com pilares internos retangulares (200 mm x 600 mm), testadas na presente pesquisa, o emprego de armadura de cisalhamento nas lajes monolíticas, distribuída uniformemente em torno do pilar, produziu um acréscimo na carga de ruptura de até 48%, em relação à laje sem tal armadura.

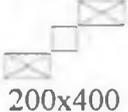
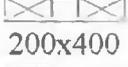
Obviamente, com a presença de dois furos simétricos na laje, a resistência tende a diminuir. Entretanto, a utilização de armadura de punção, constituída de “studs” ancorada nos bordos superior e inferior da laje, permitiu aumentar a resistência das lajes com dois furos em até 80%, inclusive, superar a resistência da laje monolítica L45 em 46%, como comentado anteriormente.

Nota-se nos resultados das lajes da Série 3 da presente pesquisa, que uma maior concentração de armadura de cisalhamento próxima do furo, permite elevar ainda mais a resistência da laje, quando comparada com a distribuição mais uniforme dos elementos da armadura, assim como foi observado nos resultados das lajes 4 e 5 de REGAN (1999).

Tabela 5.10 – Comparação dos resultados experimentais das lajes com armadura de cisalhamento da literatura com os da presente pesquisa

Autor	Laje	Furo		Armadura de cisalhamento			f'_c (MPa)	d (mm)	V_{Exp} (kN)
		Nº	Tamanho (mm)	Linhas	Camadas	ϕ (mm)			
GOMES & ANDRADE (1995)	12A	0	-	-	-	-	36,5	163	650
	13	1	$\phi = 90$	-	-	-	31,4	153	600
	17	1	$\phi = 90$	8	4	10,0	34,1	166	1096
	15	2	$\phi = 166$	-	-	-	27,8	148	554
	19	2	$\phi = 166$	8	4	10,0	36,6	165	1010
	21	2	$\phi = 166$	8	6	8,0	36,3	165	896
	22	2	$\phi = 166$	8	6	6,0	34,5	164	832
	23	4	$\phi = 166$	-	-	-	36,4	160	550
	20	4	$\phi = 166$	8	4	10,0	33,8	159	780
	24	4	$\phi = 166$	8	4	10,0	35,0	161	890
	25	4	$\phi = 166$	8/8	6/3	10,0	34,2	160	900
	26	4	$\phi = 166$	8/8	6/3	10,0	36,7	169	985
	27	4	$\phi = 166$	8/8	10/5	10,0	30,7	169	985
REGAN (1999)	1	-	-	-	-	-	39,4	124	440
	2	2	100x150	-	-	-	40,7	124	380
	3*	-	-	$A_{se,min}$ (BS8110:97)			39,7	124	500
	4*	2	100x150	$A_{se,min}$ (BS8110:97)			39,2	124	460
	5	2	100x150	$A_{se} < A_{se,min}$			46,4	124	480

Tabela 5.10 – Comparação entre resultados experimentais de lajes com furos e armadura de cisalhamento (continuação)

Autor	Laje	Furo		Armadura de cisalhamento			f'_c (MPa)	d (mm)	V_{Exp} (kN)
		Nº	Tamanho (mm)	Linha	Camada	ϕ (mm)			
REGAN(1999)	6	4	100x100 100x150		-		37,6	124	280
	8	4	100x100 100x150		Barras dobradas		41,8	124	320
IOANNOU (2001)	PSSCH1	1	 400x400	"Shearband" – figs.2.51 e 2.52			48,0	134	492
	PSSCH2	2	 200x400	"Shearband" – figs.2.51 e 2.52			124	280	433
	PSSCH3	2	 200x400	"Shearband" – figs.2.51 e 2.52			124	320	386
	PSSCH4a	2	 200x400	"Shearband" – figs.2.51 e 2.52			41,6	134	415
	PSSCH4b	2	 200x400		-		32,8	134	313
SILVA (2003)	L1 (150x150)	-	-	-	-	-	39,6	90	273
	L7 (150x150)	-	-	8	3	8,0	49,0	90	420
	L10(150x150)	2	150x150	6	3	8,0	40,0	90	325
	L2 (150x300)	-	-	-	-	-	40,4	90	401
	L8 (150x300)	-	-	8	3/2	8,0	49,4	90	452
	L11(150x300)	2	150x150	6	3	8,0	40,8	90	350
	L3 (150x450)	-	-	-	-	-	40,8	90	469
	L9 (150x450)	-	-	6	3	8,0	50,2	90	452
PRESENTE PESQUISA	L45	-	-	-	-	-	42,0	154	843
	L45FFD	2	200x300	-	-	-	37,0	144	635
	L45_AC1	-	-	12	4	10,0	39,0	154	1250
	L45_AC5	-	-	12	2	8,0	41,1	154	1092
	L45FFD_AC5	2	200x300	10	2	8,0	40,7	154	837
	L45FFD_AC2	2	200x300	22	4	10,0	43,8	154	1230
	L45FFD_AC3	2	200x300	22	3	8,0	39,4	154	1050
	L45FFD_AC4	2	200x300	16	3	8,0	43,2	154	885

CAPÍTULO 6

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS ESTIMADOS PELAS NORMAS DE PROJETO E POR PESQUISADORES

6.1 – INTRODUÇÃO

Uma comparação dos resultados experimentais com os fornecidos pelos métodos de cálculo de vários pesquisadores (ROLL *et al.* (1971), TENG *et al.* (1999), IOANNOU (2001), AL-YOUSIF & REGAN (2003), OLIVEIRA (2003)) e normas de projeto (ACI (2002), BS8110 (1997), CEB-FIP Model Code (1991), EUROCODE 2 (1992; 2001), Handbook to BS8110/85 (1987) e NBR-6118 (1978; 2003)) foi realizada para as lajes das séries 1, 2 e 3 da presente pesquisa.

6.2 – LAJES COM PILARES RETANGULARES (SÉRIE 1)

6.2.1 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA

A Tab. 6.1 e Fig. 6.1 apresentam comparações dos resultados experimentais das lajes da Série 1 com os estimados por algumas normas de projeto e por pesquisadores.

Os métodos de cálculo das normas do EC2 (1992), ACI (2002) e NBR (1978), apesar de considerarem no cálculo da resistência à punção, o efeito da relação c_{max}/c_{min} do pilar, ou no cálculo da tensão de cisalhamento ou do perímetro de controle, apresentaram, em ordem crescente, estimativas mais conservadoras em relação aos demais métodos, com maiores valores para o desvio padrão e coeficiente de variação. Observa-se que a NBR (1978) tende a ser menos conservadora para valores mais altos de c_{max}/d , ao contrário da norma do ACI (2002) e EC2 (1992), como mostram a Tab. 6.1 e Fig. 6.1.

O método de cálculo do EC2 (1992) se apresentou conservador, pois subestimou a carga de ruptura devido à redução significativa do perímetro de controle, como o aumento da relação entre os lados do pilar, a partir de $c_{max} c_{min} = 2$. A diferença entre a carga experimental e a teórica aumentou com o acréscimo do perímetro do pilar.

Os métodos da BS8110 (1997), TENG et al. (1999) e AL-YOUSIF & REGAN (2003) apresentaram estimativas próximas para as cargas de ruptura (vide Fig. 6.1). As previsões da BS8110 (1997) foram praticamente idênticas às do método de TENG et al. (1999), pois este último apresenta prescrições que limita o acréscimo do perímetro de controle a partir de relações $c_{max} c_{min} > 4$. A redução do perímetro de controle no método de AL-YOUSIF & REGAN (2003), que se torna efetivo para relações $c_{max} d > 3$, tornou o método levemente mais conservador em relação aos outros.

Melhores estimativas foram obtidas pelas normas do CEB (1991) e NB1 (2003), utilizando o coeficiente de segurança iguais a 1,50 e 1,40, respectivamente, ao invés de 1,33 (Tab. 6.1), obtendo-se, os menores valores para o desvio padrão (0,03) e coeficiente de variação (2,9%).

A limitação proposta no método de cálculo do EC2 (2001), para o termo $(1 + \sqrt{200/d})$, conduziu à redução da carga estimada, em relação à norma do CEB (1991) (ambas normas apresentam expressões de cálculo semelhantes). Assim, o EC2 (2001) forneceu resultados um pouco mais conservadores que o CEB (1991), com valor médio para relação V_{Exp}/V_{Calc} de 1,10, desvio padrão e coeficiente de variação iguais a, respectivamente, 0,04 e 3,6 (vide Fig. 6.1).

A proposta de OLIVEIRA (2003) para o método do CEB (1991), com a inclusão do fator de flexão, reduziu a carga de ruptura estimada das lajes, em relação à norma, e desta forma, forneceu estimativas pouco mais conservadoras, com média de 1,10, e, desvio padrão e coeficiente de variação praticamente iguais aos das normas do CEB (1991) e NB1 (2003).

Tabela 6.1 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados por normas de projeto e por pesquisadores para as lajes da Série 1

Laje	$c_{m\acute{a}x}/c_{m\acute{i}n}$	d (mm)	$c_{m\acute{a}x}/d$	V_{Exp}/V_{calc}									
				ACI/02	BS8110/97	CEB/91	EC2/92	EC2/01	NB1/78	NB1/03	OLIVEIRA/03	TENG/99	AL-YOUSIF/03
L42	2	139	2,88	1,31	1,17	1,09	1,20	1,20	1,47	1,09	1,15	1,17	1,17
L42A	2	164	2,44	1,22	1,11	1,03	1,18	1,09	1,37	1,03	1,09	1,11	1,11
L45	3	154	3,90	1,37	1,13	1,06	1,31	1,13	1,27	1,06	1,12	1,13	1,15
L46	4	164	4,88	1,39	1,10	1,03	1,43	1,08	1,28	1,03	1,10	1,10	1,14
L41	1,67	139	1,80	1,43	1,15	1,07	1,19	1,17	1,63	1,07	1,11	1,15	1,15
L41A	1,67	164	1,52	1,31	1,09	1,01	1,15	1,06	1,51	1,01	1,05	1,09	1,09
L43A	3	164	2,74	1,48	1,13	1,06	1,33	1,11	1,39	1,06	1,11	1,13	1,13
L44	4	164	3,66	1,46	1,07	1,00	1,36	1,06	1,32	1,00	1,06	1,07	1,09
Media				1,37	1,12	1,04	1,27	1,11	1,40	1,04	1,10	1,12	1,13
Desvio padrão				0,09	0,03	0,03	0,10	0,05	0,13	0,03	0,03	0,03	0,03
Coefficiente de variação (%)				6,3	3,0	2,9	7,9	4,7	9,0	2,9	3,0	3,0	2,8

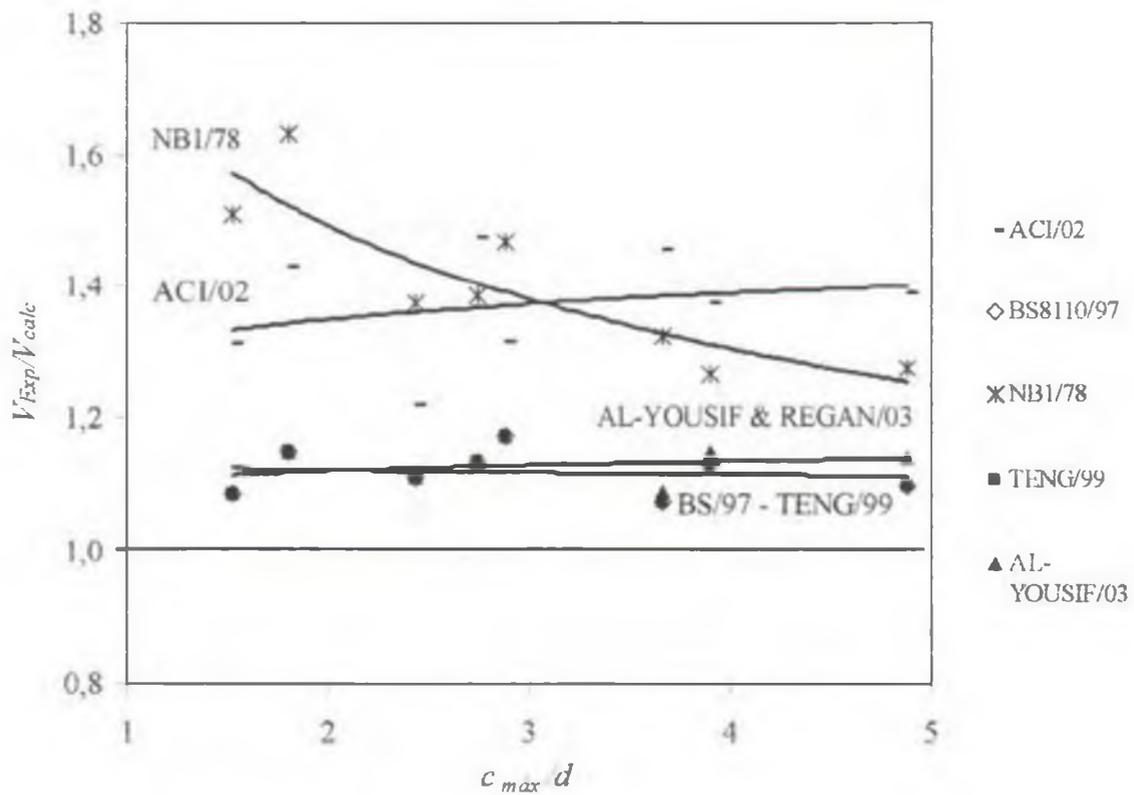
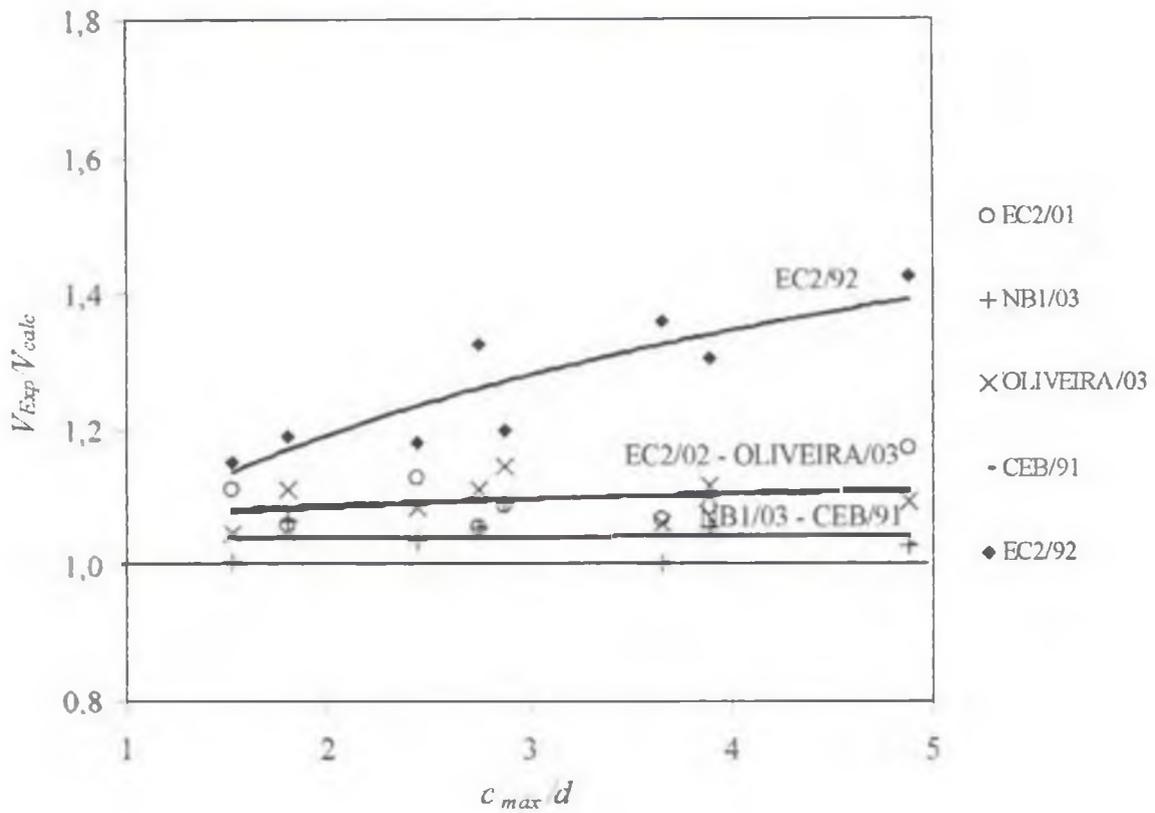


Figura 6.1 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1

6.2.2 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA

A Tab. 6.2 apresenta uma comparação dos resultados experimentais com as estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da presente pesquisa e da literatura, armadas bidirecionalmente e apoiadas/carregadas nos quatro bordos.

A Tab. 6.3 apresenta os valores médios para a relação V_{Exp}/V_{calc} , desvio padrão e coeficiente de variação relacionados às estimativas das normas de projeto e de pesquisadores. É apresentado, também, o parâmetro $c_{máx}/d$, utilizado em análise anteriores, para mostrar a tendência dos resultados devido a sua influência.

A NB1/78, novamente, se apresentou como a norma de projeto mais conservadora, apresentando um valor médio para V_{Exp}/V_{calc} de 1.50 e os maiores valores para o desvio padrão e coeficiente de variação.

As normas do ACI/02 e EC2/92 também se apresentaram conservadoras, fornecendo uma média de 1,43 e 1.37, respectivamente, com desvio padrão e coeficiente de variação inferiores ao apresentados pela NB1/78.

As normas NB1/03 e o CEB/91 tendem a superestimar levemente as resistências das lajes armadas bidirecionalmente, apresentando um valor médio de 0,99 para a relação V_{Exp}/V_{calc} , e os menores valores para o desvio padrão (0.11) e coeficiente de variação (10,6%).

O EC2/01 se apresentou conservador, principalmente, em relação às normas NB1/03 e CEB/91, com uma estimativa média de 1,15, desvio padrão de 0,15 e coeficiente de variação de 12,6%.

As melhores estimativas, a favor da segurança, foram apresentadas, em ordem crescente, pela BS/97 e OLIVEIRA/03, com estimativas médias iguais a, respectivamente, 1,07 e 1,05, e valores aproximadamente iguais para o desvio padrão (0,11) e coeficiente de variação (10,6%). As estimativas fornecidas pelos métodos de TENG et al./99 e AL-YOUSIF et al./03 foram bastante semelhantes (1,13 e 1,14, respectivamente), porém, se apresentaram mais conservadoras que a norma BS/97.

Tabela 6.2 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados por normas de projeto e por pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura

Autor	Laje	c_{adm}/d	V_{Exp}/V_{calc}									
			ACI02	BS 97	CEB 91	EC2 92	EC2 01	NB1 78	NB1 03	OLIVEIRA 03	TENG/99	AL-YOUSIF/03
SÉRIE 1	L42	2,88	1,31	1,17	1,09	1,20	1,20	1,47	1,09	1,15	1,17	1,17
	L42A	2,44	1,22	1,11	1,03	1,18	1,09	1,37	1,03	1,09	1,11	1,11
	L45	3,90	1,37	1,13	1,06	1,31	1,13	1,27	1,06	1,12	1,13	1,15
	L46	4,88	1,39	1,10	1,03	1,43	1,08	1,28	1,03	1,10	1,10	1,14
	L41	1,80	1,43	1,15	1,07	1,19	1,17	1,63	1,07	1,11	1,15	1,15
	L41A	1,52	1,31	1,09	1,01	1,15	1,06	1,51	1,01	1,05	1,09	1,09
	L43A	2,74	1,48	1,13	1,06	1,33	1,11	1,39	1,06	1,11	1,13	1,13
	L44	3,66	1,46	1,07	1,00	1,36	1,06	1,32	1,00	1,06	1,07	1,09
HAWKINS et al. (1971)	7	3,91	1,16	0,94	0,88	1,29	1,01	1,07	0,88	0,93	0,94	0,96
	8	4,09	1,28	0,93	0,86	1,43	0,99	1,19	0,86	0,91	1,16	0,95
	9	2,52	1,09	1,04	0,96	1,21	1,10	1,23	0,96	1,01	1,04	1,04
TENG et al. (1999)	OC11	1,90	1,65	1,20	1,10	1,37	1,31	1,86	1,10	1,15	1,20	1,20
	OC13	5,61	1,57	1,15	1,07	1,49	1,27	1,43	1,07	1,14	1,15	1,22
	OC15	9,71	1,52	1,03	0,96	1,66	1,15	1,55	0,96	1,03	1,15	1,20
FORSSELL & HOLMBERG (1946)	10	2,89	2,06	1,01	0,93	2,02	1,11	2,53	0,93	0,98	1,30	1,35
	11	4,82	1,30	1,03	0,96	1,71	1,12	1,26	0,96	1,02	1,03	1,10
	12	3,15	1,38	1,19	1,10	1,71	1,30	1,41	1,10	1,16	1,19	1,19
FLSTNER & HOGNESTAD (1956)	A2a	2,22	1,62	0,95	0,88	1,32	1,02	1,79	0,88	0,92	1,16	1,18
	A2b	2,22	1,59	1,01	0,93	1,29	1,08	1,80	0,93	0,98	0,99	1,10
	A2c	2,22	1,56	0,95	0,88	1,26	1,02	1,51	0,88	0,92	1,17	1,21
	A7b	2,22	1,72	1,15	1,06	1,36	1,23	1,92	1,06	1,11	1,25	1,26
	A5	3,11	1,41	1,02	0,95	1,19	1,10	1,55	0,95	1,00	1,21	1,22
REGAN	BD8	0,99	1,56	1,05	0,96	1,27	1,11	1,82	0,96	0,99	1,22	1,23
AL-YOUSIF et al.	2	6,25	1,53	0,98	0,90	1,87	1,16	1,61	0,90	0,96	1,19	1,24
	4	3,75	1,27	1,16	1,06	1,55	1,37	1,39	1,06	1,12	1,16	1,21
SILVA (2003)	L1	1,67	1,51	1,11	1,01	1,28	1,26	1,71	1,01	1,05	1,11	1,11
	L2	3,33	1,67	1,37	1,26	1,53	1,57	1,85	1,26	1,33	1,37	1,38
	L3	5,00	1,88	1,39	1,28	1,78	1,59	1,72	1,28	1,36	1,39	1,44
OLIVEIRA (2003)	L1C	1,12	1,28	1,04	0,95	1,03	1,13	1,48	0,95	0,99	1,04	1,04
	L2C	2,24	1,07	0,96	0,89	0,94	1,05	1,21	0,89	0,93	0,96	0,96
	L3C	3,40	1,20	0,96	0,88	1,07	1,05	1,11	0,88	0,93	0,96	0,96
	L4C	4,49	1,24	0,95	0,88	1,16	1,05	1,14	0,88	0,94	0,95	0,98
	L5C	5,50	1,18	0,91	0,85	1,16	1,00	1,16	0,85	0,90	1,00	0,96

Tabela 6.3 – Estimativa média, desvio padrão e coeficiente de variação das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura

Normas e Métodos de Cálculo	V_{Exp}/V_{calc}		
	M	DP	CV (%)
ACI/02	1,43	0,22	15,5
BS/97	1,07	0,12	10,7
CEB-FIP MC90/91	0,99	0,11	10,6
EC2/92	1,37	0,25	18,1
EC2/01	1,15	0,15	12,6
NB1/78	1,50	0,31	20,4
NB1/03	0,99	0,11	10,6
OLIVEIRA/03	1,05	0,11	10,7
TENG et al./99	1,13	0,11	9,9
AL-YOUSIF et al. /03	1,14	0,12	10,7

A Figura 6.2 apresenta, graficamente, as estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da literatura, incluindo as da Série 1 desta pesquisa, em função da relação c_{max}/d . A Figura 6.3 mostra a tendência das estimativas obtidas, traçadas com a utilização de equações do tipo potência, baseando-se nas justificativas descritas no CAPÍTULO 2, pág. 56.

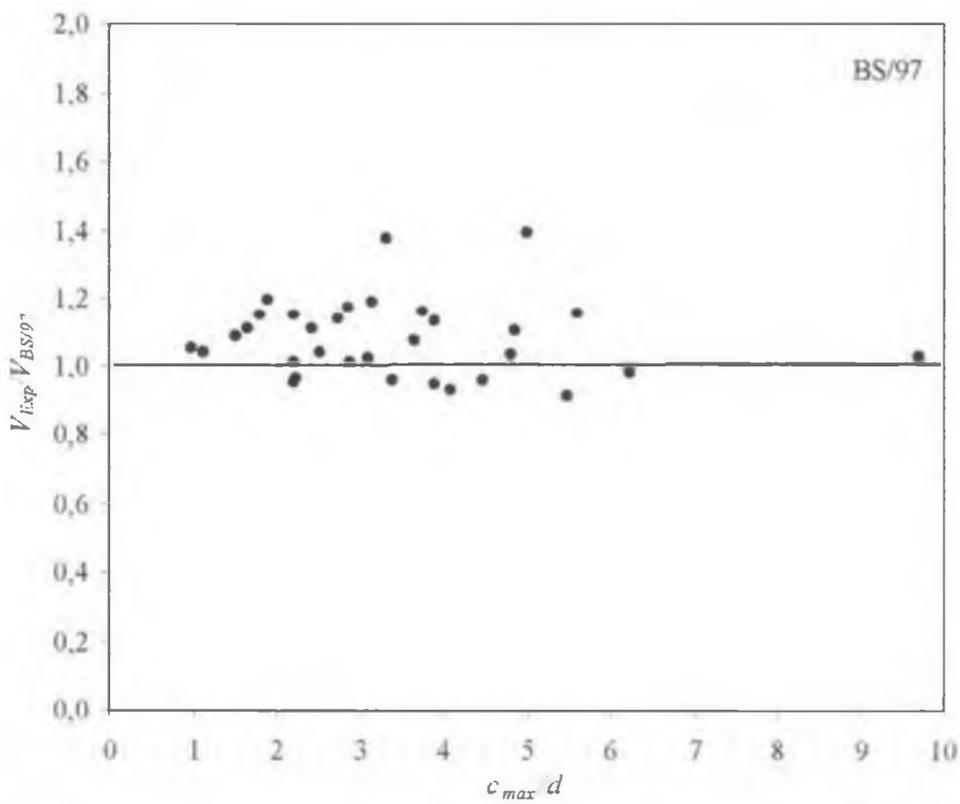
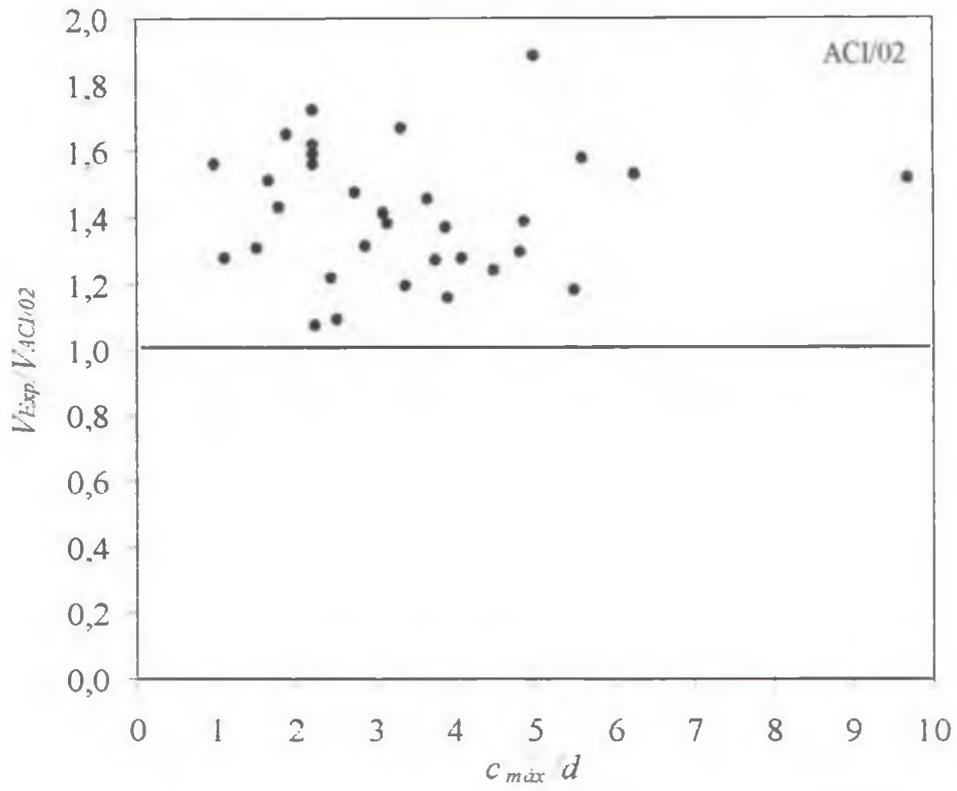


Figura 6.2 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura

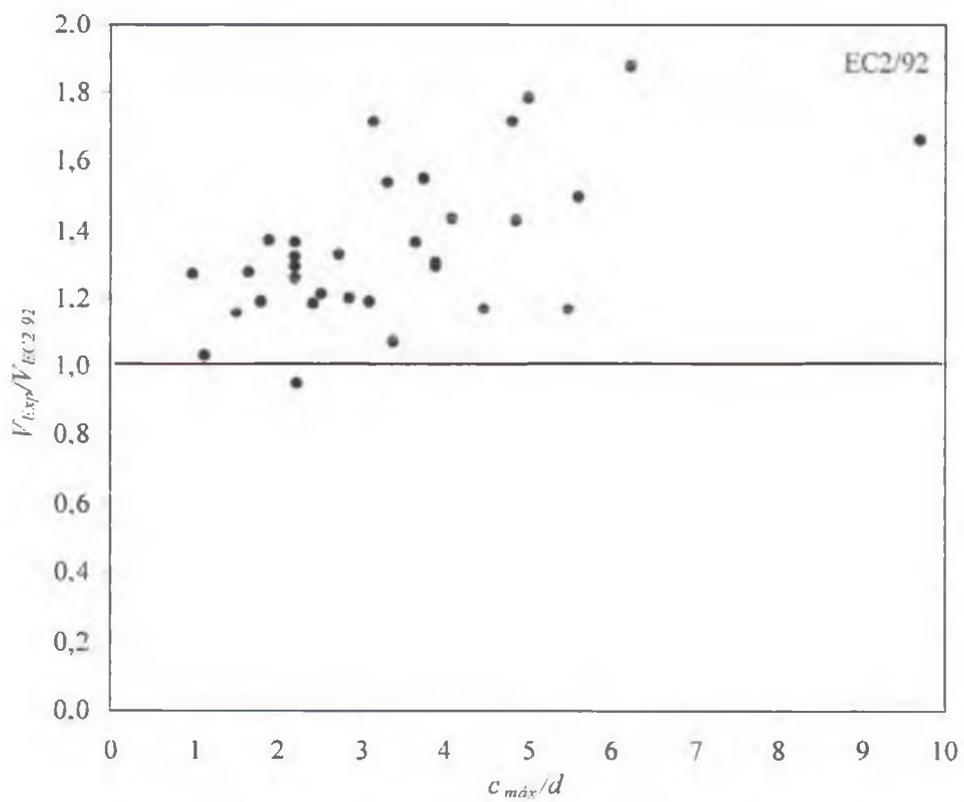
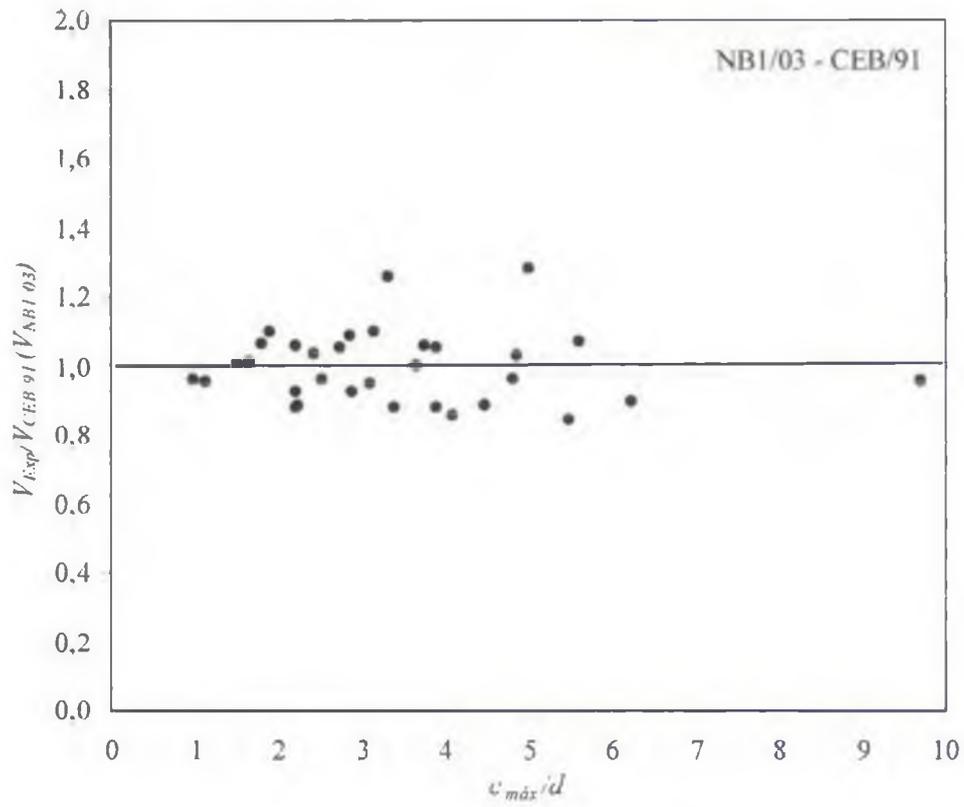


Figura 6.2 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura (continuação)

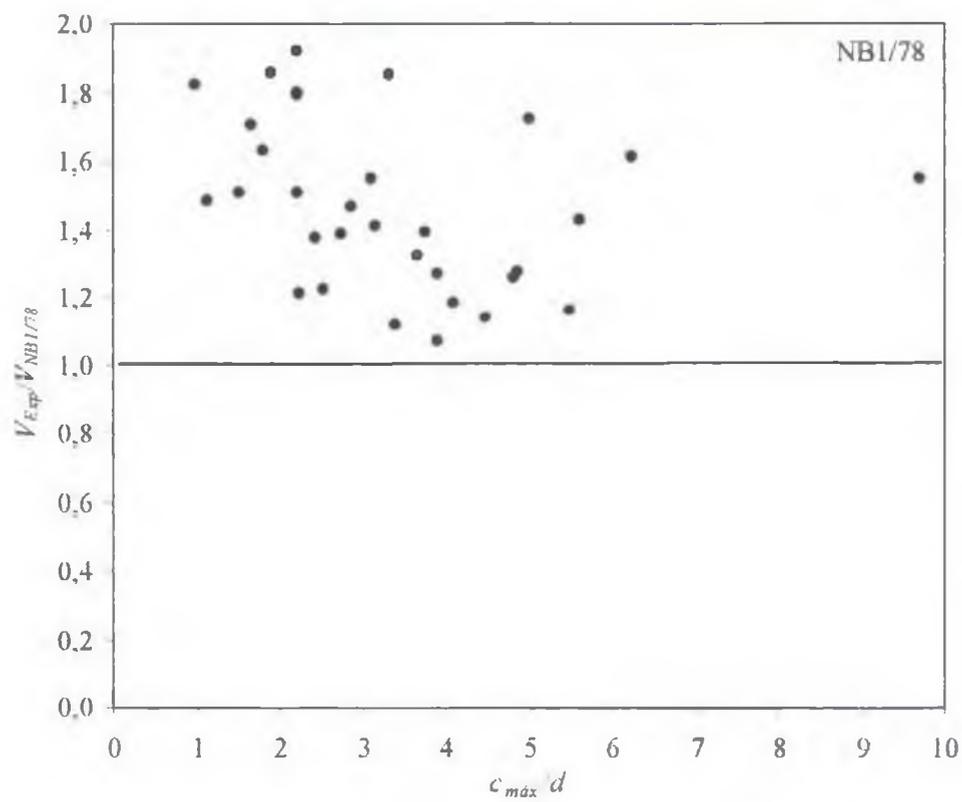
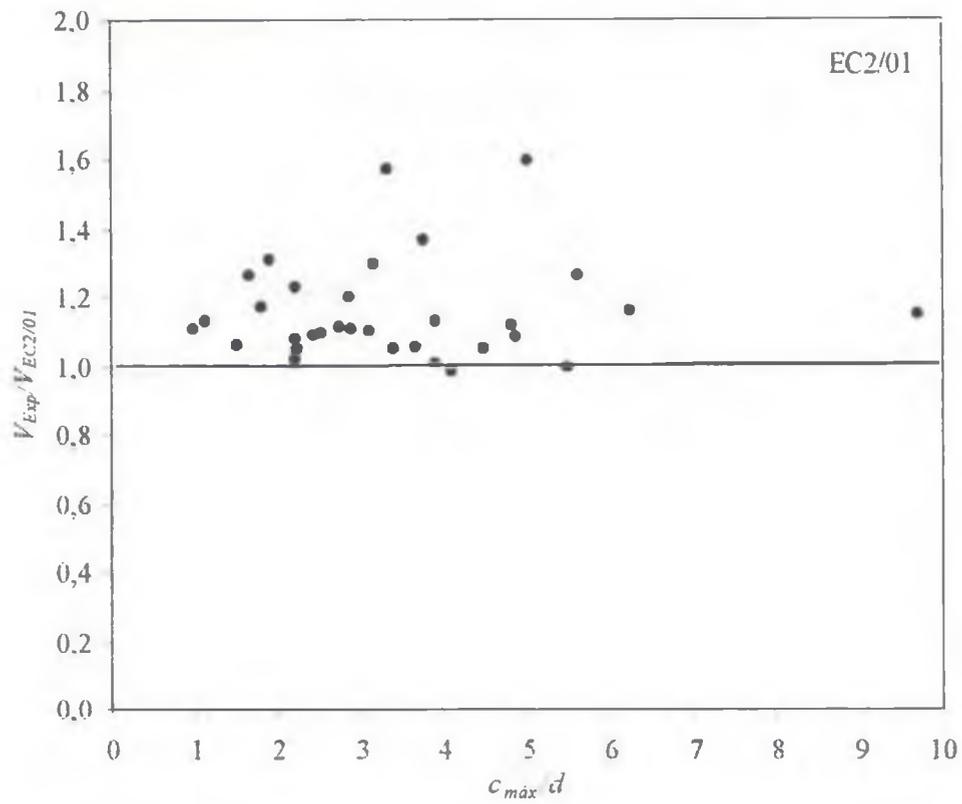


Figura 6.2 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura (continuação)

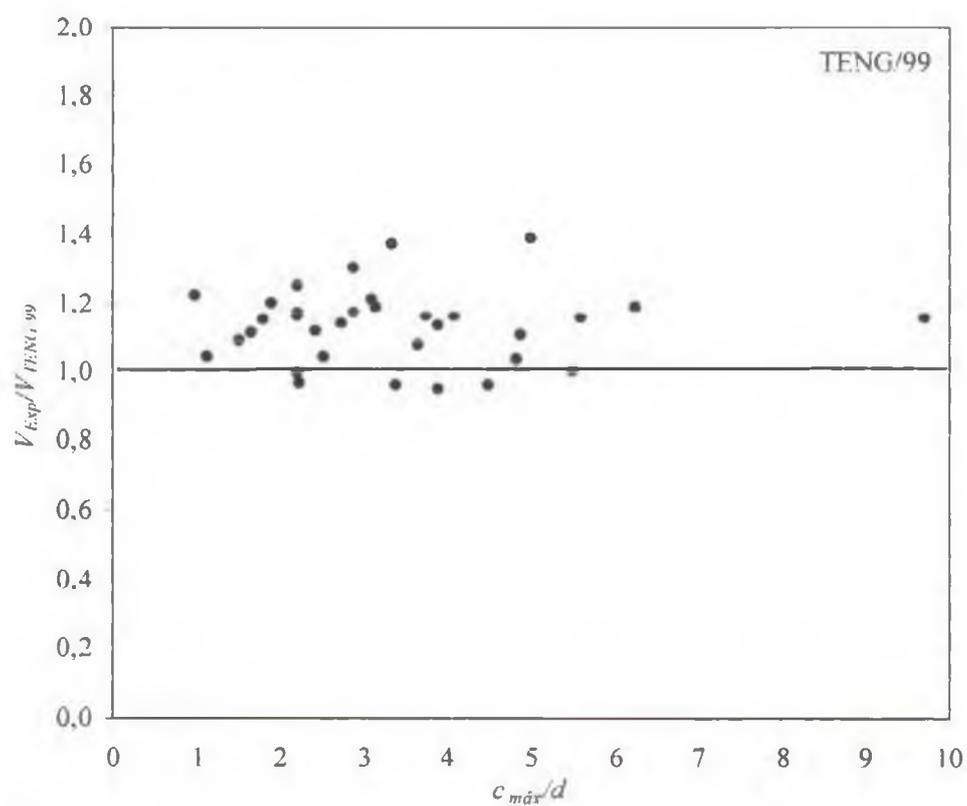
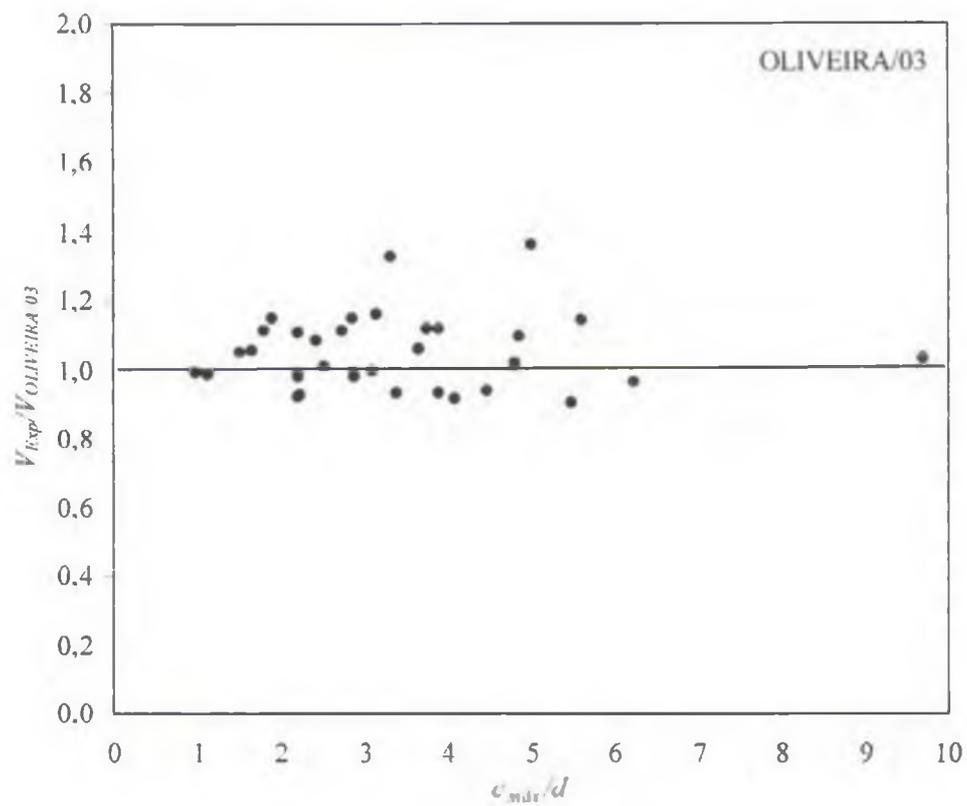


Figura 6.2 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura (continuação)

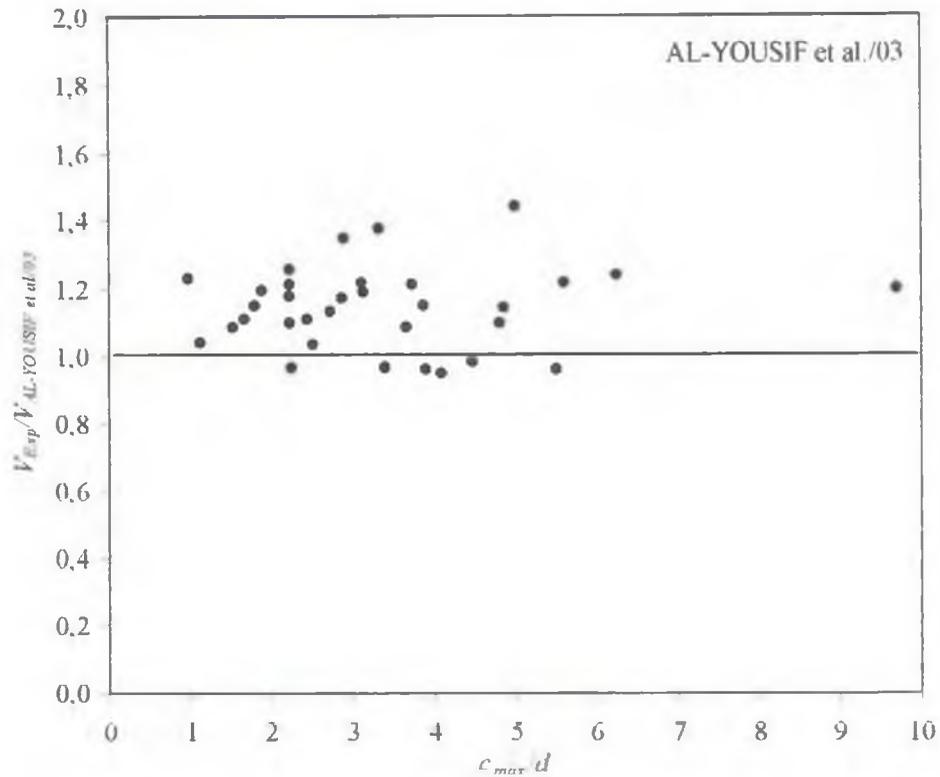


Figura 6.2 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura (continuação)

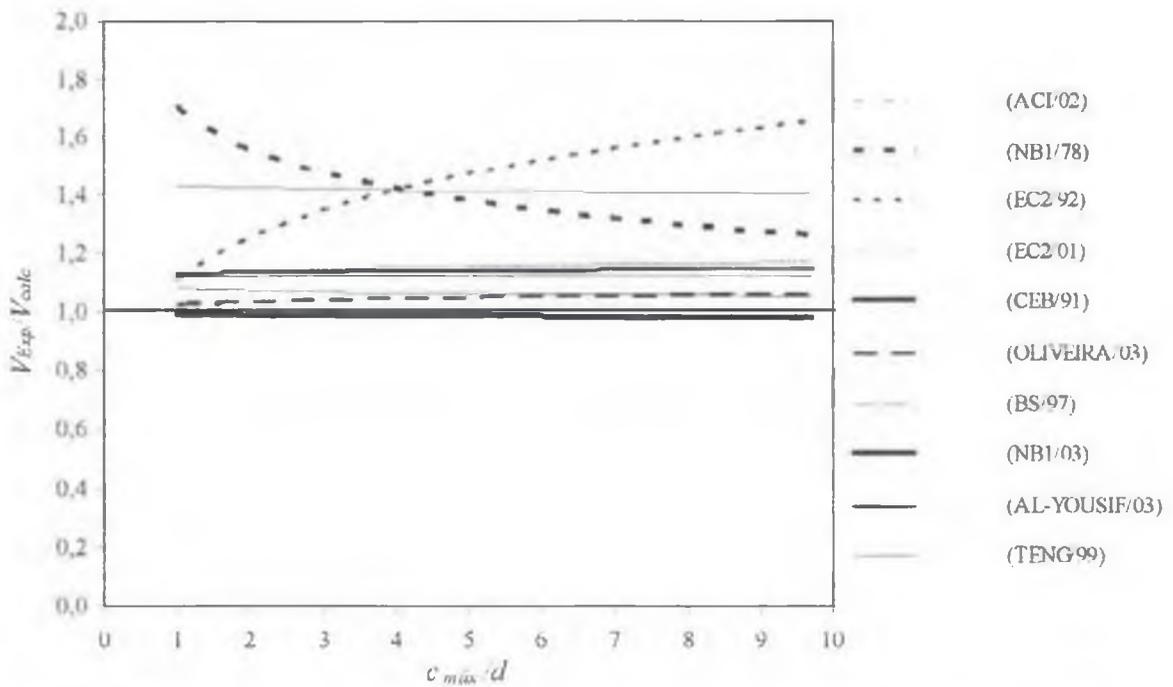


Figura 6.3 – Tendência das estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 1 e da literatura

6.2.3 – PROPOSTA DE CONSIDERAÇÃO DA RELAÇÃO $c_{m\acute{a}x}/d$ NAS EXPRESSÕES DAS NORMAS DE PROJETO DO ACI (2002) E CEB (1991)

Diante da importância de utilizar o parâmetro $c_{m\acute{a}x}/d$ nas análises das normas de projeto, foram utilizados os resultados experimentais desta pesquisa juntamente com os obtidos na literatura das lajes carregadas/apoiadas nos quatro bordos para incorporar este parâmetro nas expressões do ACI 318 (2002) e CEB-FIP MC90 (1991). As equações propostas para as normas citadas são apresentadas, respectivamente, nas Eqs. 6.1 e 6.2.

$$V_{prop_ACI} = \omega \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (\text{kN}) \quad (6.1)$$

$$V_{prop_CEB} = 0,18 \chi \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho f'_c)^{1/3} u d \quad (\text{kN}) \quad (6.2)$$

sendo d a altura útil da laje, ρ a taxa geométrica de armadura de flexão, f'_c a resistência à compressão do concreto medida em corpos de prova cilíndricos, e, b_0 e u o perímetro de controle recomendado por, respectivamente, ACI (2002) e CEB (1991).

Os fatores ω e χ são parâmetros derivados dos resultados de ensaios apresentados nesta pesquisa, que levam em consideração a geometria do pilar. As expressões para a determinação dos valores de ω e χ são apresentadas nas Eqs. 6.3 e 6.4.

$$\omega = \frac{0,5}{(c_{max}/d)^{0,1756}} \quad (6.3)$$

$$\chi = 0,95 \left(\frac{c_{max}}{d} \right)^{0,038} \quad (6.4)$$

6.2.4 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ESTIMADOS PELAS NORMAS DE PROJETO DO ACI (2002) E CEB-FIP (1991) COM OS ESTIMADOS PELAS PROPOSTAS PARA AS LAJES DA SÉRIE 1 E DA LITERATURA

A Tab. 6.4 apresenta uma comparação das estimativas das normas de projeto do ACI/02 e CEB/91 com suas respectivas propostas, e a Fig. 6.4 ilustra a tendência destas estimativas. A curva de tendência obtida das estimativas do ACI (2002) se apresenta consideravelmente a favor da segurança, ao contrário da linha de tendência obtida para o CEB (1991).

Como mencionado anteriormente, linha de tendência é uma curva ajustada para um conjunto de dados fornecidos, no presente caso, utilizando regressão não linear ajustando uma curva potencial. A equação da curva que melhor representa o conjunto de dados foi obtida através do “Método dos Mínimos Quadrados”, que define que a curva ajustada seja tal que a soma dos quadrados das distâncias verticais dos pontos à reta seja mínima.

A inclusão do parâmetro c_{max}/d nas expressões de cálculo do ACI/02 e CEB/91 conduziram a um valor médio para a relação V_{Exp}/V_{calc} mais próximo de 1,0 e a favor da segurança, com menor desvio padrão, em relação às estimativas atuais das normas citadas.

A Tab. 6.5 apresenta uma comparação das estimativas da norma de projeto do CEB/91 com as do método de OLIVEIRA/03 e da proposta atual para o CEB/91. A Fig. 6.5 mostra a tendência das estimativas apresentadas.

A inclusão do fator $\chi = 0,95 (c_{max}/d)^{0,038}$ na equação do CEB/91 para o cálculo da resistência à punção conduziu a uma estimativa média para a relação V_{Exp}/V_{calc} igual a 1,04, enquanto que OLIVEIRA/03 estimou um valor médio de 1,05, sendo aproximadamente iguais, os correspondentes valores para desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 6.4 – Comparação das estimativas das normas do ACI/02 e CEB/91 com as respectivas propostas

Autor	Laje	V_{Exp} (kN)	$c_{max} \cdot d$	$V_{Exp}/V_{prop\ CEB}$	$V_{Exp}/V_{prop\ ACI}$	V_{Exp}/V_{CEB}	V_{Exp}/V_{ACI}
SÉRIE I	L42	703	2.88	1,14	1,06	1,09	1,31
	L42A	743	2.44	1,08	1,05	1,03	1,22
	L45	843	3.90	1,10	1,07	1,06	1,37
	L46	947	4.88	1,07	1,02	1,03	1,39
	L41	600	1.80	1,12	1,17	1,07	1,43
	L41A	650	1.52	1,06	1,04	1,01	1,31
	L43A	776	2.74	1,10	1,09	1,06	1,48
	L44	814	3.66	1,05	1,01	1,00	1,46
HAWKINS et al. (1971)	7	326	3.91	0.91	0.91	0.88	1.16
	8	321	4.09	0.90	0.88	0.86	1.28
	9	322	2.52	1.00	0.95	0.96	1.09
TENG et al. (1999)	OC11	423	1.90	1,15	1,37	1,10	1,65
	OC13	568	5.61	1,11	1,31	1,07	1,57
	OC15	649	9.71	0,99	1,17	0,96	1,52
FORSEEL & HOLMIBERG (1946)	10	186	2.89	0.97	1.07	0.93	2.06
	11	279	4.82	1.00	0.96	0.96	1.30
	12	265	3,15	1,15	1,14	1,10	1,38
ELSTNER & HOGNESTAD (1956)	A2a	334	2.22	0.91	1.36	0.88	1.62
	A2b	400	2.22	0.97	1.36	0.93	1.59
	A2c	467	2.22	0.91	1.15	0.88	1.56
	A7b	512	2.22	1.10	1.46	1.06	1.72
	A5	534	3.11	0.99	1.27	0.95	1.41
REGAN	BD8	251	0.99	1.02	1.15	0.96	1.56
AL-YOUSFI et al. (2003)	2	209	6.25	0.93	1.09	0.90	1.53
	4	242	3.75	1.11	1.19	1.06	1.27
SILVA (2003)	L1	273	1.67	1.06	1.22	1.01	1.51
	L2	401	3.33	1.31	1.53	1.26	1.67
	L3	469	5.00	1.33	1.54	1.28	1.88
OLIVEIRA (2003)	L1C	318	1.12	1.00	0.96	0.95	1.28
	L2C	331	2.24	0.93	0.91	0.89	1.07
	L3C	358	3.40	0.92	0.91	0.88	1.20
	L4C	404	4.49	0.92	0.90	0.88	1.24
	L5C	447	5.50	0.88	0.82	0.85	1.18
MÉDIA				1,04	1,12	0,99	1,43
DESVIO PADRÃO				0,11	0,19	0,11	0,22
COEF. VARIAÇÃO (%)				10,7	16,9	10,6	15,5

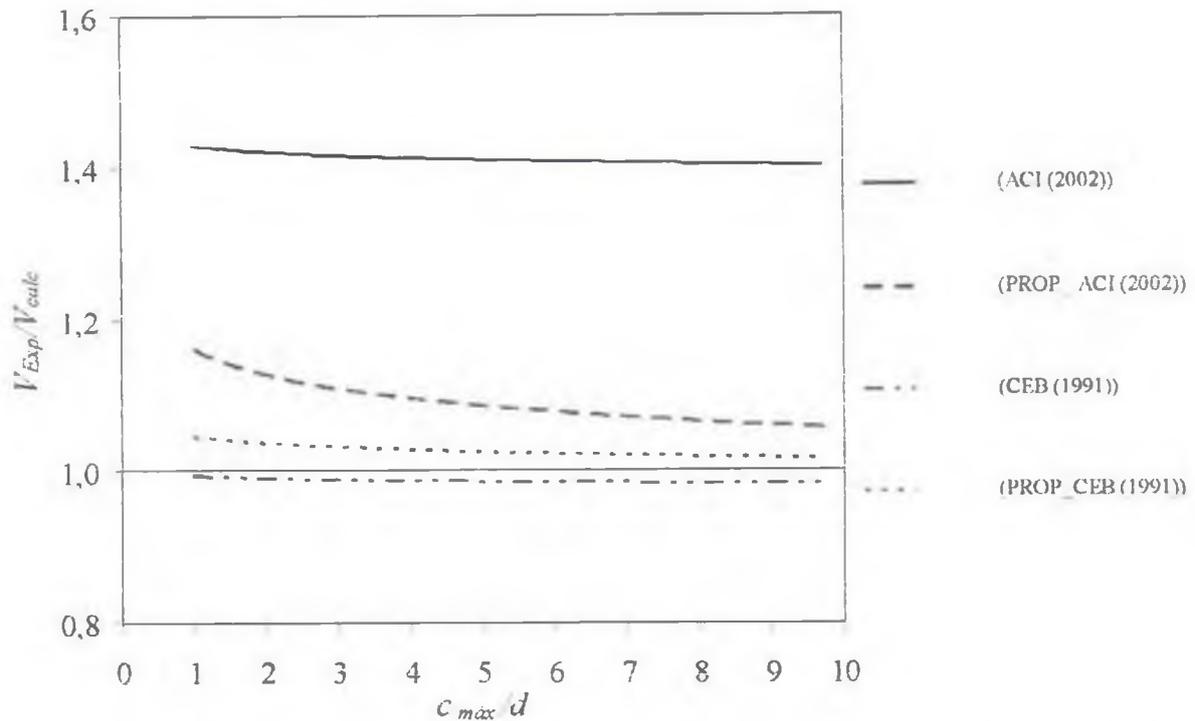


Figura 6.4 – Tendência das estimativas das normas de projeto do ACI (2002) e do CEB (1991) e das propostas para as normas

Tabela 6.5 – Comparação das estimativas do CEB/91 e do método de OLIVEIRA/03 com as estimativas da proposta para o CEB/91

Autor	Laje	c_{max}/d	V_{Exp}/V_{calc}		
			CEB/91	OLIVEIRA/03	Prop_CEB/91
SÉRIE I	L42	2,88	1,09	1,15	1,14
	L42A	2,44	1,03	1,09	1,08
	L45	3,90	1,06	1,12	1,10
	L46	4,88	1,03	1,10	1,07
	L41	1,80	1,07	1,11	1,12
	L41A	1,52	1,01	1,05	1,06
	L43A	2,74	1,06	1,11	1,10
	L44	3,66	1,00	1,06	1,05
HAWKINS et al. (1971)	7	3,91	0,88	0,93	0,91
	8	4,09	0,86	0,91	0,90
	9	2,52	0,96	1,01	1,00

Tabela 6.5 – Comparação das estimativas do CEB/91 e do método de OLIVEIRA/03 com as estimativas da proposta para o CEB/91 (continuação)

Autor	Laje	$c_{m\acute{a}x}/d$	V_{Exp}/V_{calc}		
			CEB/91	OLIVEIRA/03	Prop_CEB/91
TENG et al.(1999)	OC11	1,90	1,10	1,15	1,15
	OC13	5,61	1,07	1,14	1,11
	OC15	9,71	0,96	1,03	0,99
FORSSELE HOLMBERG (1946)	10	2,89	0,93	0,98	0,97
	11	4,82	0,96	1,02	1,00
	12	3,15	1,10	1,16	1,15
ELSTNER & HOGNESTAD (1956)	A2a	2,22	0,88	0,92	0,91
	A2b	2,22	0,93	0,98	0,97
	A2c	2,22	0,88	0,92	0,91
	A7b	2,22	1,06	1,11	1,10
	A5	3,11	0,95	1,00	0,99
REGAN	BD8	0,99	0,96	0,99	1,02
AL-YOUSIF et al. (2003)	2	6,25	0,90	0,96	0,93
	4	3,75	1,06	1,12	1,11
SILVA (2003)	L1	1,67	1,01	1,05	1,06
	L2	3,33	1,26	1,33	1,31
	L3	5,00	1,28	1,36	1,33
OLIVEIRA (2003)	L1C	1,12	0,95	0,99	1,00
	L2C	2,24	0,89	0,93	0,93
	L3C	3,40	0,88	0,93	0,92
	L4C	4,49	0,88	0,94	0,92
	L5C	5,50	0,85	0,90	0,88
MÉDIA			0,99	1,05	1,04
DESVIO PADRÃO			0,11	0,11	0,11
COEF. VARIAÇÃO (%)			10,6	10,7	10,7

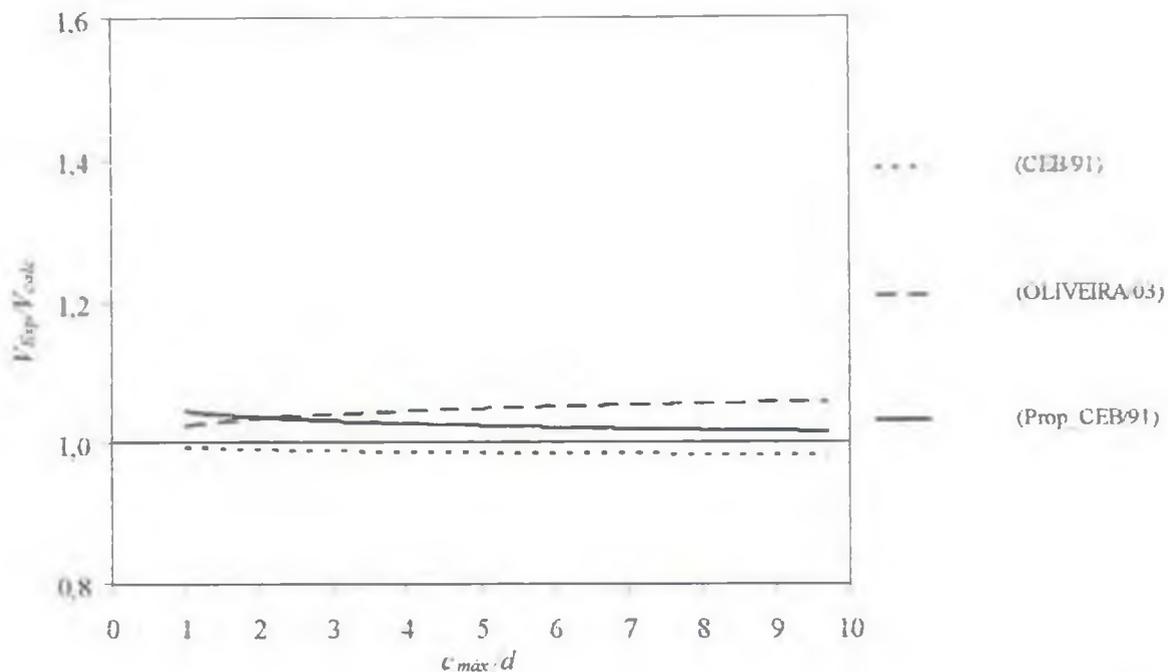


Figura 6.5 – Tendência das estimativas da norma de projeto do CEB (1991), do método de OLIVEIRA/03 e da proposta para o CEB (1991)

6.3 – LAJES COM FUROS (SÉRIE 2)

6.3.1 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA

A influência de furos adjacentes a pilares em lajes cogumelo de concreto armado é um fator referenciado por alguns métodos de cálculo na determinação da resistência à punção.

A norma do ACI (2002) apresenta recomendações especiais para o cálculo do perímetro de controle de lajes cogumelo com furos adjacentes ou próximos, em até $10h$ do pilar. Entretanto, as prescrições do ACI, para lajes da Série 2, forneceram resultados mais conservadores em relação às demais normas, principalmente com o aumento do número de furos ($M=1,55$; $DP=0,12$; $CV=0,08$), como pode ser visto na Tab. 6.6.

Para as lajes com um furo, as cargas de ruptura superaram no mínimo em 43% a carga prevista pela norma, enquanto que para as lajes com dois furos, as cargas de ruptura

experimentais foram superiores em, no mínimo, 59% a carga estimada. O ACI considera o perímetro de controle localizado a $0,5d$ da face do pilar, de forma que, isto resulta em uma carga resistente menor, além de reduzir a tensão de cisalhamento, para o caso de pilar de seção retangular.

Seguida da norma do ACI/02, o EC2/92 apresentou os resultados mais conservadores (Média = 1,49; DP = 0,13 e CV = 0,08). As considerações de ambas normas no tratamento de furos próximos ao pilar são praticamente os mesmos, entretanto, o EC2/92 considera o perímetro de controle com cantos arredondados e situados a $1,5d$ da face do pilar, e obtém o perímetro de controle efetivo através da redução deste devido à influência da relação c_{max}/c_{min} do pilar.

Comparando os resultados fornecidos pela norma BS8110/97 e pelo Handbook to BS8110/85 (1987), observa-se que o Handbook apresenta resultados mais satisfatórios em relação ao BS8110 (1997), devido às considerações relativas ao cálculo do perímetro de controle. Mesmo assim, ambos métodos de cálculo superestimam a influência dos furos no cálculo do perímetro de controle. A norma BS8110 (1997) estimou resultados menos conservadores que a norma do ACI (2002), pois, além dos parâmetros adicionais considerados (taxa de armadura, coeficiente de tamanho), a BS8110 (1997) adota um valor maior para o perímetro de controle.

A proposta de TENG et al. (1999) para o cálculo do perímetro de controle efetivo das lajes do Grupo 2, com furos próximos ao pilar ($< 6d$) tendeu a reduzir ainda mais o perímetro de controle devido ao furo, em relação à norma BS. Tal fato conduziu a cargas estimadas inferiores, e conseqüentemente, a estimativas mais conservadoras, principalmente com o aumento do número de furos.

As normas do EC2 (2001) e NB1 (2003) apresentam as mesmas considerações para o cálculo da resistência à punção de lajes com furos próximos a pilares, tanto com relação à expressão normativa quanto ao perímetro de controle efetivo considerado, porém, diferenciando-se no valor do coeficiente de tamanho $(1 + \sqrt{200/d})$. A NB1/03 apresentou um valor médio para a relação V_{Exp}/V_{calc} igual a 1,21, enquanto o EC2/01, 1,29, sendo que ambos apresentaram desvio padrão e coeficiente de variação correspondentes

aproximadamente iguais. Observa-se na Tab. 6.6 que ambas normas se tornam conservadoras com o aumento do número de furos.

O CEB-FIP (1991) não apresenta considerações especiais sobre o assunto, apenas prescreve que a resistência à punção de laje cogumelo de concreto armado deve ser verificada na seção localizada a uma distância igual a $2d$, a partir da face do pilar, independentemente da presença de furos. Desta forma, a norma do CEB (1991) não foi empregada nos cálculos das lajes da Série 2 da presente pesquisa.

A proposta de IOANNOU (2001), como sugestão para o CEB-FIP (1991), nas considerações do cálculo do perímetro de controle efetivo, devido a furos próximos ao pilar, forneceu, de maneira geral, resultados conservadores.

Para as lajes com um furo assimétrico, a proposta da autora de utilizar um furo fictício similar para estabelecer a simetria geométrica forneceu para o perímetro de controle efetivo valores superiores àqueles obtidos utilizando a proposta de considerar, nestes casos, o pilar com furo assimétrico como pilar de borda.

A utilização da primeira proposta forneceu resultados teóricos mais razoáveis que os obtidos da segunda proposta. Desta forma, os perímetros críticos efetivos calculados para as lajes com dois furos foram praticamente iguais aos das lajes com um furo.

A expressão proposta por ROLL, ZAIDI, SABNIS & CHUANG (1971) para estimar a resistência à punção das lajes, considerando a influência da resistência à flexão, forneceu as melhores estimativas, assim como o Handbook to BS8110/85 (1987), com um valor médio para V_{Exp}/V_{Calc} igual a 1,13, e os menores valores para desvio padrão (0,05) e coeficiente de variação (0,04).

A Tab. 6.6 e Fig. 6.6 apresentam uma comparação dos resultados experimentais com os estimados pelas normas de projeto do ACI (2002), BS8110 (1997), Handbook to BS8110 (1987), EC2 (1992), EC2 (2001) e NB1 (2003), e por pesquisadores, tais como, TENG et al. (1999), IOANNOU (2001) e ROLL et al. (1971), para as lajes da Série 2.

Tabela 6.6 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados pelas normas de projeto e por pesquisadores para as lajes da Série 2

Laje	d (mm)	V_{Exp} / V_{calc}								
		ACI/02	BS/97	HB/87	EC2/92	EC2/01	NB1/03	TENG/99	IOANNOU/01	ROLL/71
L45FS_CG	154	1,48	1,28	1,22	1,49	1,29	1,21	1,42	1,43	1,13
L45FD_CG	154	1,43	1,13	1,08	1,34	1,14	1,07	1,25	1,26	1,09
L45FD	154	1,43	1,15	1,09	1,34	1,16	1,08	1,27	1,28	1,11
L45FFS_CG	154	1,59	1,41	1,27	1,62	1,45	1,35	1,82	1,40	1,21
L45FFD_CG	164	1,70	1,36	1,22	1,58	1,37	1,30	1,77	1,35	1,14
L45FFD	144	1,68	1,29	1,16	1,59	1,34	1,23	1,65	1,28	1,08
MÉDIA		1,55	1,27	1,17	1,49	1,29	1,21	1,53	1,33	1,13
DESVIO PADRÃO		0,12	0,11	0,08	0,13	0,12	0,11	0,25	0,07	0,05
COEF. VARIAÇÃO (%)		7,7	8,9	6,6	8,5	9,4	9,5	16,3	5,3	4,0

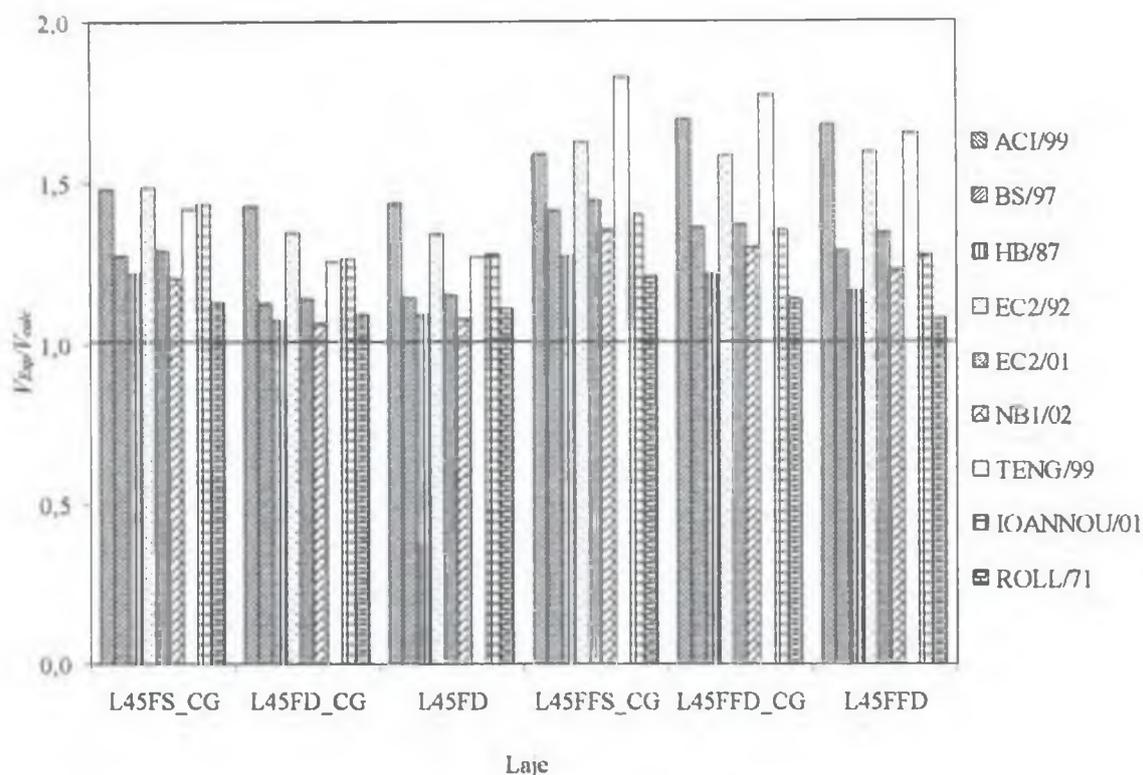


Figura 6.6 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes da Série 2

6.3.2 – ANÁLISE DO MÉTODO DE ROLL et al. (1971)

6.3.2.1 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA

A Tab. 6.7 apresenta as estimativas da expressão proposta por ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2, e as figs. 6.7 e 6.8 mostram a comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971), cujas coordenadas foram obtidas da Tab. 6.7. A curva proposta pelos pesquisadores, em função da resistência à flexão das lajes, se apresenta como o limite inferior dos resultados estimados.

Tabela 6.7 – Estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2

Laje	$V_{flex}/bd\text{raiz}(f_c)$	$V_{Exp}/bd\text{raiz}(f_c)$	$V_{ROLL}/bd\text{raiz}(f_c)$	V_{Exp}/V_{flex}	V_{ROLL}/V_{flex}	V_{Exp}/V_{ROLL}
L45FS_CG	9,8	7,0	6,2	0,72	0,64	1,13
L45FD_CG	9,7	6,8	6,2	0,70	0,64	1,09
L45FD	9,5	6,8	6,1	0,72	0,64	1,11
L45FFS_CG	10,2	7,7	6,4	0,76	0,63	1,21
L45FFD_CG	12,4	8,2	7,2	0,66	0,58	1,14
L45FFD	12,8	7,9	7,3	0,61	0,57	1,08

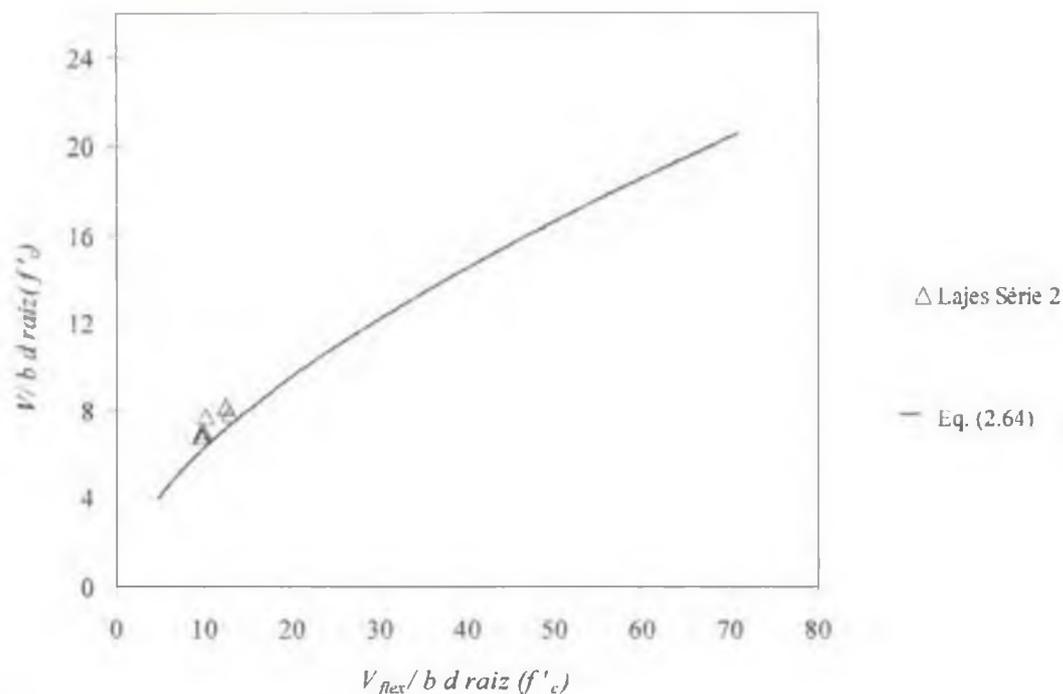


Figura 6.7 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 – Curvas $V / b d \sqrt{f'_c} \times V_{flex} / b d \sqrt{f'_c}$

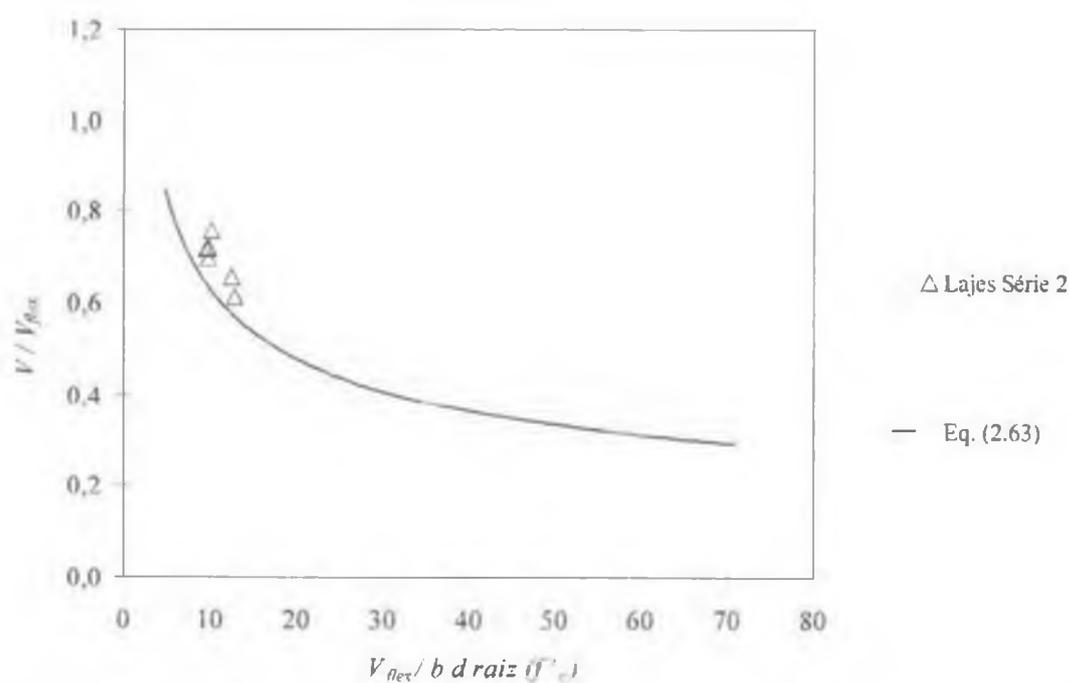


Figura 6.8 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 – Curvas $V / V_{flex} \times V_{flex} / b d \sqrt{f'_c}$

6.3.2.2 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA

A Tab. 6.8 apresenta os resultados obtidos utilizando a proposta de ROLL et al. (1971) para as lajes com furos da Série 2 e da literatura. Foram realizados os mesmos cálculos desenvolvidos pelos pesquisadores citados, com o propósito de realizar análises semelhantes, porém, reunindo resultados da literatura não abordados anteriormente.

As figs. 6.9 e 6.10 mostram a tendência dos resultados estimados pela proposta de ROLL et al. (1971), e os resultados experimentais das lajes com furos (Série 2 e literatura), através da influência de $V_{Flex} / bd\sqrt{f'_c}$, respectivamente, nas relações $V / bd\sqrt{f'_c}$ e V/V_{Flex} .

As estimativas fornecidas pelas eqs. 2.64 e 2.63, apresentadas, respectivamente, nas figs. 6.9 e 6.10, seguem a tendência dos resultados experimentais da literatura, com exceção dos resultados de EL-SALAKAWY et al. (1999), que ensaiaram lajes com pilar de borda, e apresentaram resultados experimentais inferiores aos estimados pelas expressões, e dos resultados de MOWRER & VANDERBILT (1967), que ensaiaram lajes com concreto leve, cujos pontos se distanciam das curvas representativas das expressões citadas, a favor da segurança, como mostram as figs. 6.9 e 6.10.

Os pontos mais afastados da curva (lajes de MOWRER & VANDERBILT) correspondem às lajes com dois furos adjacentes ao pilar e que apresentaram o perímetro de controle (prescrito pelo método de ROLL et al. (1971)) bastante reduzido, em relação às outras lajes.

Para algumas lajes ensaiadas por TENG et al. (1999) (OC11V20 e OC13V40), os resultados estimados pelo método de ROLL et al. (1971) se apresentaram superiores aos experimentais, portanto, contra a segurança. Para os demais resultados, com exceção das lajes citadas anteriormente e de ROLL et al. (1971), com altos valores para o termo $V_{Flex} / bd\sqrt{f'_c}$, os pontos estão próximos das curvas.

A proposta dos pesquisadores forneceu valores para a relação V_{Exp}/V_{ROLL} entre 0,62 (lajes de EL-SALAKAWY et al) e 2,68 (lajes de MOWRER & VANDERBILT), média de 1,30, desvio padrão de 0,31 e coeficiente de variação de 23,5%, como mostra a Tab. 6.8.

Tabela 6.8 – Estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura

Autor	Laje	$V_{flex}^{bd} / \text{raiz}(f_c)$	$V_{exp}^{bd} / \text{raiz}(f_c)$	$V_{ROLL}^{bd} / \text{raiz}(f_c)$	V_{exp} / V_{flex}	V_{ROLL} / V_{flex}	V_{exp} / V_{ROLL}
	S-000-0-0-2	6,7	7,2	5,0	1,08	0,74	1,44
	S-000-0-0-3	7,5	7,6	5,3	1,01	0,71	1,43
	S-000-0-0-4	7,5	7,4	5,3	0,98	0,71	1,38
	S-000-0-0-5	7,5	7,7	5,3	1,02	0,71	1,43
	S-121-0-0-1	8,6	8,9	5,8	1,03	0,67	1,54
	S-121-0-0-2	8,8	8,1	5,9	0,92	0,66	1,38
	S-122-0-0-1	10,1	9,6	6,3	0,96	0,63	1,52
	S-122-0-0-2	10,3	8,9	6,4	0,87	0,62	1,39
	S-122-0-0-1a	10,2	6,8	6,4	0,66	0,63	1,06
	S-122-0-0-1b	10,5	9,1	6,5	0,86	0,62	1,40
	S-123-0-0-1	12,2	8,8	7,1	0,72	0,58	1,24
	S-123-0-0-2	11,8	9,7	6,9	0,82	0,59	1,40
	S-124-0-0-1	15,3	9,8	8,1	0,64	0,53	1,22
	S-124-0-0-1	14,7	10,8	7,9	0,73	0,54	1,36
	S-121-1-0.9-1	8,3	8,2	5,7	0,99	0,68	1,45
	S-121-2-1.8-1	8,0	7,7	5,5	0,96	0,69	1,39
	S-121-3-2.7-1	7,4	8,2	5,3	1,10	0,71	1,55
	S-121-4-3.6-1	7,4	8,1	5,3	1,10	0,72	1,53
	S-121-5-4.5-1	7,6	7,8	5,4	1,03	0,71	1,46
	S-121-6-5.4-1	7,8	7,9	5,4	1,02	0,70	1,45
	S-000-0-0-1	14,7	10,2	7,9	0,70	0,54	1,30
	S-000-0-0-2	17,6	10,4	8,8	0,59	0,50	1,18
	S-121-0-0-1	16,8	9,7	8,5	0,58	0,51	1,14
	S-121-0-0-2	17,4	10,9	8,7	0,62	0,50	1,25
	S-122-0-0-1	22,5	12,0	10,1	0,53	0,45	1,18
	S-122-0-0-1a	19,4	11,7	9,3	0,60	0,48	1,26
	S-123-0-0-1	24,3	13,9	10,6	0,57	0,44	1,31
	S-124-0-0-1	30,0	15,9	12,1	0,53	0,40	1,31
	S-221-0-0-1	19,4	11,2	9,3	0,58	0,48	1,21
	S-222-0-0-1	23,2	12,5	10,3	0,54	0,44	1,21
	S-222-0-0-1a	22,8	12,5	10,2	0,55	0,45	1,22
	S-223-0-0-1	27,7	14,7	11,5	0,53	0,42	1,28
	S-224-0-0-1	33,5	15,7	13,0	0,47	0,39	1,21
	S-241-9-0-1	21,1	10,1	9,7	0,48	0,46	1,04
	S-242-9-0-1	26,0	11,2	11,1	0,43	0,43	1,01
	S-242-9-0-2	26,6	11,8	11,2	0,44	0,42	1,05
	S-242-9-0-1a	25,2	12,4	10,9	0,49	0,43	1,14
	S-243-9-0-1	35,0	14,6	13,4	0,42	0,38	1,09
	S-244-9-0-1	45,8	22,2	16,0	0,48	0,35	1,39
	S-244-9-0-2	50,0	20,1	17,0	0,40	0,34	1,18
	Série H (b=271mm)	11,9	10,7	7,0	0,90	0,59	1,53
	Série H (b=163mm)	19,8	13,4	9,4	0,68	0,47	1,43
	Série H (b=102 mm)	31,9	18,9	12,6	0,59	0,39	1,50
	Série H (b=0)	infinito	infinito	infinito	0,39	0,38	1,02
	Série H (b=0)	infinito	infinito	infinito	0,44	0,37	1,19
	Série H (b=271mm)	26,2	15,7	11,1	0,60	0,42	1,41
	Série H (b=163mm)	43,0	19,4	15,3	0,45	0,36	1,27
	Série H (b=135mm)	50,0	20,1	17,0	0,40	0,34	1,18
	Série H (b=117mm)	60,9	22,2	19,6	0,36	0,32	1,13
	Série H (b=102mm)	70,8	24,2	22,0	0,34	0,31	1,10
	Série H (b=0)	infinito	infinito	infinito	0,23	0,23	1,01
	Série H (b=0)	infinito	infinito	infinito	0,23	0,21	1,12

Séries A-I, B e H - ROLL et al. (1971)

Tabela 6.8 – Estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura (continuação)

Autor	Laje	V_{flex}/bd raiz(f'_c)	V_{Exp}/bd raiz(f'_c)	V_{ROLL}/bd raiz(f'_c)	V_{Exp}/V_{flex}	V_{ROLL}/V_{flex}	V_{Exp}/V_{ROLL}
MOWER & VANDERBILT (1967)	JN-1-1.7	14,3	14,2	7,7	0,99	0,54	1,83
	JN-2-1.7	31,6	33,6	12,5	1,06	0,40	2,68
	JN-3-1.7	9,8	12,7	6,3	1,29	0,64	2,02
	JN-1-2.2	17,9	14,1	8,9	0,79	0,49	1,60
	JN-2-2.2	39,6	35,3	14,5	0,89	0,37	2,43
	JN-3-2.2	11,9	13,4	7,0	1,12	0,59	1,92
GOMES & ANDRADE (1995)	13	16,8	11,2	8,5	0,67	0,51	1,32
	14	18,0	10,9	8,9	0,60	0,49	1,22
	15	20,7	13,8	9,6	0,67	0,47	1,43
	23	28,9	15,9	11,8	0,55	0,41	1,35
SÉRIE 2	L45FS CG	9,8	7,0	6,2	0,72	0,64	1,13
	L45FD CG	9,7	6,8	6,2	0,70	0,64	1,09
	L45FD	9,5	6,8	6,1	0,72	0,64	1,11
	L45FFS CG	10,2	7,7	6,4	0,76	0,63	1,21
	L45FFD CG	12,4	8,2	7,2	0,66	0,58	1,14
	L45FFD	12,8	7,9	7,3	0,61	0,57	1,08
TENG et al. (1999)	OC11H30	17,6	11,2	8,8	0,63	0,50	1,27
	OC11V23	16,2	10,8	8,3	0,67	0,52	1,30
	OC11V20	19,9	8,6	9,4	0,43	0,47	0,91
	OC13H50	7,4	5,8	5,3	0,78	0,71	1,09
	OC13V43	7,8	6,2	5,5	0,79	0,70	1,13
	OC13V23	7,7	6,7	5,4	0,87	0,70	1,24
	OC13V40	8,8	5,3	5,9	0,59	0,66	0,89
	OC13H02	8,1	7,0	5,6	0,87	0,69	1,26
	OC15H70	4,7	4,4	4,0	0,93	0,85	1,10
OC15V43	5,4	5,8	4,3	1,07	0,81	1,33	
REGAN (1999)	2	19,3	11,9	9,2	0,62	0,48	1,29
6	33,1	15,4	12,9	0,46	0,39	1,19	
7	32,9	15,3	12,8	0,46	0,39	1,19	
LIANG et al. (1991)	PSSCH4b	17,1	12,1	8,6	0,71	0,50	1,40
IL- SALAKAWY et al. (1995)	SE0	9,1	4,7	6,0	0,52	0,66	0,79
	CF0	11,2	4,2	6,8	0,38	0,60	0,62
	SF0	8,6	4,1	5,8	0,47	0,67	0,70
	SF1	8,6	4,2	5,8	0,49	0,67	0,73
	SF2	8,1	4,0	5,6	0,49	0,69	0,72
SILVA (2003)	L4	29,8	16,0	12,1	0,54	0,40	1,33
	L5	14,9	12,4	7,9	0,84	0,53	1,56
	L6	10,0	8,9	6,3	0,90	0,63	1,42
MÉDIA							1,30
DESVIO PADRAO							0,31
COEFICIENTE DE VARIACAO (%)							23,5

Observa-se nas figs. 6.9 e 6.10 que as curvas representativas, respectivamente, das eqs. 2.64 e 2.63 definem o limite inferior para os valores dos termos $V/bd\sqrt{f'_c}$ e V/V_{Flex} das lajes de ROLL et al. (1971). Entretanto, com a inclusão dos demais resultados, as curvas das eqs. 2.64 e 2.63 não se apresentam como o limite inferior, pois alguns resultados de TENG et al. (1999) ficaram abaixo das curvas. As lajes OC11V20 e OC13V40 apresentaram cargas de ruptura experimentais inferiores às estimadas pelo método de ROLL et al. (1971).

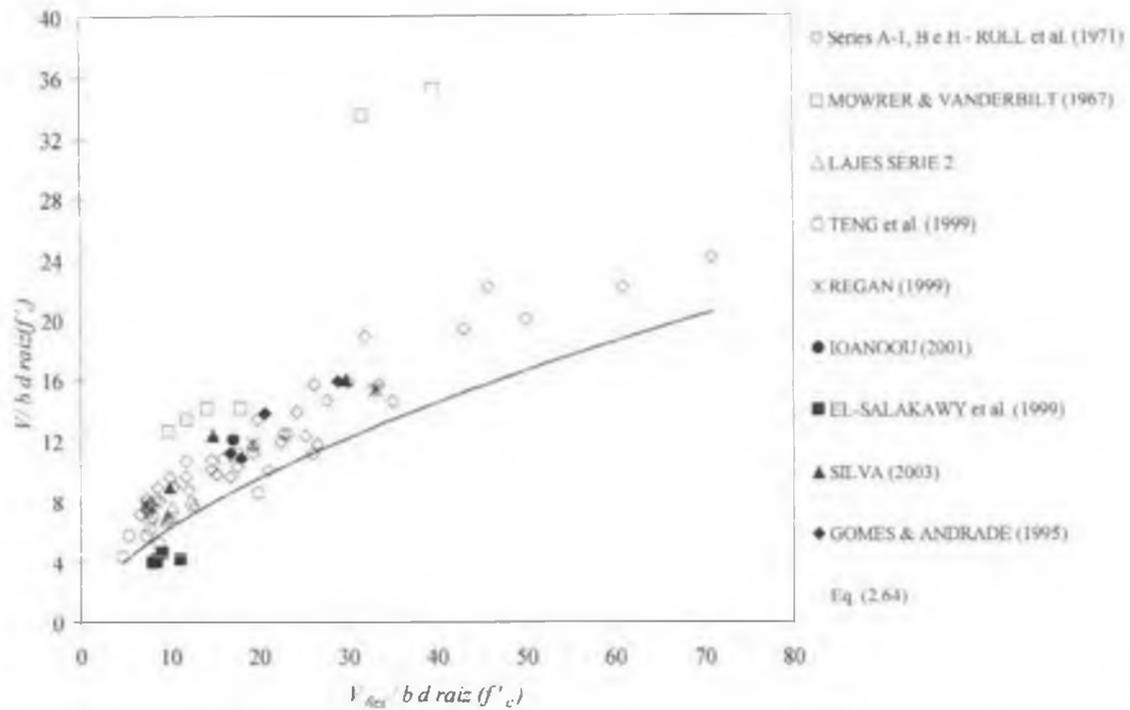


Figura 6.9 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL *et al.* (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas $V / bd\sqrt{f'_c}$ x

$$V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$$

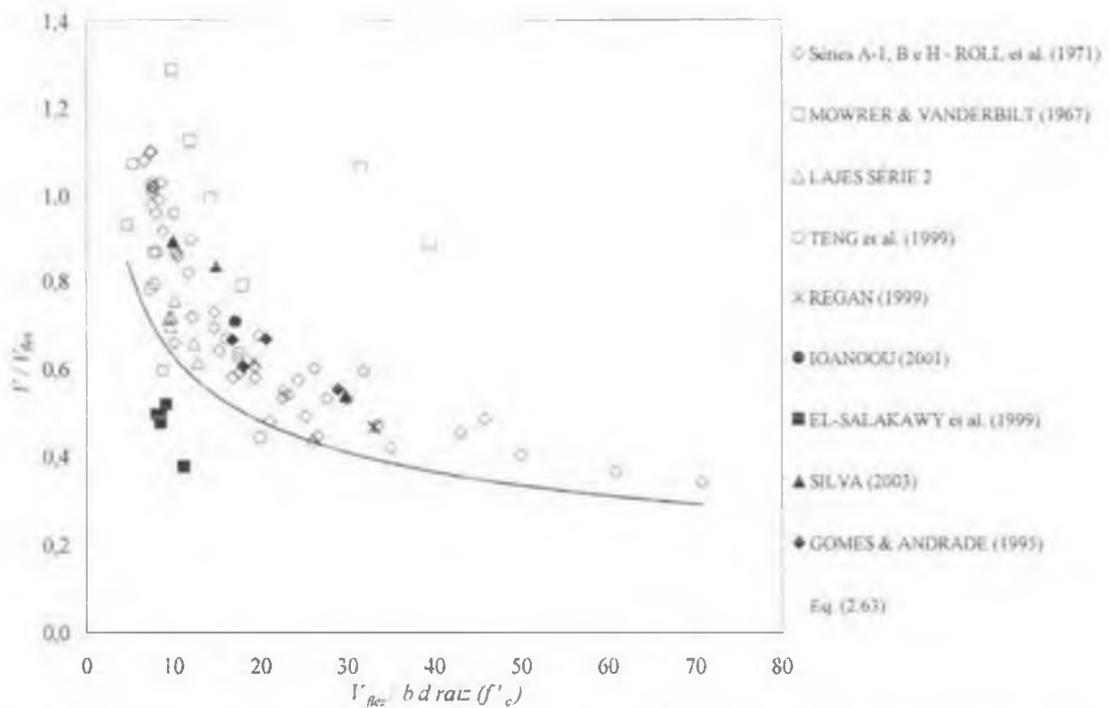


Figura 6.10 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL *et al.* (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas V/V_{flex} x

$$V_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$$

6.3.2.3 – PROPOSTA PARA A MODIFICAÇÃO DO LIMITE INFERIOR DA EXPRESSÃO DE ROLL *et al.* (1971)

Para definir uma curva que represente o limite inferior para os resultados experimentais e dados da literatura, de forma a incluir as lajes OC11V20 e OC13V40 de TENG *et al.* (1999) nos gráficos das figs. 6.9 e 6.10, propõe-se calcular as referidas lajes de TENG *et al.* (1999) e as demais lajes com furos assimétricos apresentadas, de acordo com as propostas apresentadas por IOANNOU (2001) para lajes com furos assimétricos próximos ou adjacentes ao pilar.

IOANNOU (2001) recomenda que, para lajes com furos assimétricos próximos ao pilar, o perímetro efetivo de controle pode ser calculado de duas formas, adotando-se aquele de menor valor: ou tratando a laje com furo assimétrico com pilar de borda, ou, restabelecendo a simetria da laje com um furo fictício.

Observa-se na Tab. 6.9 que, nos casos de lajes com furos assimétricos, apresentados em negrito, a proposta atual de utilizar a sugestão de IOANNOU (2001) que forneça a estimativa de menor valor para a carga de ruptura, forneceu estimativas (V_{Prop}) inferiores às estimadas por ROLL *et al.* (1971) (V_{ROLL}), e conseqüentemente, relações V_{Exp}/V_{Prop} superiores à respectiva relação V_{Exp}/V_{ROLL} , inclusive nos casos das lajes OC11V20 e OC13V40.

A Tab. 6.9 apresenta a comparação das estimativas do método de ROLL *et al.* (1971) com as obtidas através das duas sugestões apresentadas por IOANNOU (2001). O restabelecimento da simetria da laje com a utilização de furos fictícios para o cálculo do perímetro efetivo de controle forneceu um valor médio para V_{Exp}/V_{Prop} de 1,38, desvio padrão de 0,29 e coeficiente de variação de 20,9%, enquanto que o tratamento do pilar da laje com furo assimétrico como sendo de borda apresentou estimativa média para V_{Exp}/V_{Prop} de 1,40, desvio padrão de 0,31 e coeficiente de variação de 22,2%.

Para o caso das lajes OC11V20 e OC13V40, que apresentaram o furo assimétrico posicionado adjacente ao pilar, e, cujo comprimento do lado foi maior que o do pilar, especificamente, o artifício da simetria geométrica do furo conduziu a estimativas mais

satisfatórias e a favor da segurança, como mostra a Tab. 6.9. Cabe ressaltar que as lajes OC11V20 e OC13V40 apresentaram, respectivamente, pilar de seção quadrada e retangular.

Para algumas lajes, o artifício da simetria do furo foi o método empregado no cálculo do perímetro efetivo de controle, enquanto que, para outras, utilizou-se o tratamento do pilar com o furo assimétrico como sendo pilar de borda. A Tab. 6.9 apresenta as relações V_{Exp}/V_{Prop} para cada um dos casos utilizados para o cálculo do perímetro efetivo de controle, sendo que, nas figs. 6.11 e 6.12, os resultados teóricos fornecidos pela curva da proposta correspondem às menores estimativas de V_{Prop} .

Observa-se que os valores médios da relação V_{Exp}/V_{PROP} apresentaram-se pouco superiores ao da relação V_{Exp}/V_{ROLL} e valores praticamente iguais para desvio padrão e coeficiente de variação. Entretanto a proposta forneceu, individualmente, estimativas consideravelmente mais seguras que o método de ROLL et al. (1971) para as lajes com furos assimétricos, especialmente para as lajes de TENG et al. (1999). As figs. 6.11 e 6.12 apresentam as linhas de tendência para os resultados estimados pela proposta e pelo método de ROLL et al. (1971), e os pontos relativos aos resultados experimentais.

Os resultados de EL-SALAKAWY et al. (1999) não são apresentados na Tab. 6.9 e nas figs. 6.11 e 6.12, pois se referem a lajes com pilar de borda e não fornecem qualquer contribuição para a proposta.

Tabela 6.9 - Estimativas da proposta para o método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura

Autor	Laje	V_{Exp} / V_{ROLL}	$V_{Exp} / V_{PROP(FURO SIMETRICO)}$	$V_{Exp} / V_{PROP(PILAR DE BORDA)}$
	S-000-0-0-2	1,44	1,44	1,44
	S-000-0-0-3	1,43	1,43	1,43
	S-000-0-0-4	1,38	1,38	1,38
	S-000-0-0-5	1,43	1,43	1,43
	S-121-0-0-1	1,54	1,79	1,71
	S-121-0-0-2	1,38	1,62	1,48
	S-122-0-0-1	1,52	1,52	1,52
	S-122-0-0-2	1,39	1,39	1,39
	S-122-0-0-1a	1,06	1,06	1,06
	S-122-0-0-1b	1,40	1,40	1,40
	S-123-0-0-1	1,24	1,36	1,32
	S-123-0-0-2	1,40	1,52	1,48
	S-124-0-0-1	1,22	1,22	1,22
	S-124-0-0-1	1,36	1,36	1,36
	S-121-1-0.9-1	1,45	1,52	1,49
	S-121-2-1.8-1	1,39	1,54	1,48
	S-121-3-2.7-1	1,55	1,64	1,59
	S-121-4-3.6-1	1,53	1,65	1,60
	S-121-5-4.5-1	1,46	1,57	1,51
	S-121-6-5.4-1	1,45	1,55	1,49
	S-000-0-0-1	1,30	1,30	1,30
	S-000-0-0-2	1,18	1,18	1,18
	S-121-0-0-1	1,14	1,21	1,18
	S-121-0-0-2	1,25	1,29	1,27
	S-122-0-0-1	1,18	1,18	1,18
	S-122-0-0-1a	1,26	1,26	1,26
	S-123-0-0-1	1,31	1,39	1,33
	S-124-0-0-1	1,31	1,31	1,31
	S-221-0-0-1	1,21	1,25	1,24
	S-222-0-0-1	1,21	1,21	1,21
	S-222-0-0-1a	1,22	1,22	1,22
	S-223-0-0-1	1,28	1,33	1,31
	S-224-0-0-1	1,21	1,21	1,21
	S-241-9-0-1	1,04	1,10	1,09
	S-242-9-0-1	1,01	1,01	1,01
	S-242-9-0-2	1,05	1,05	1,05
	S-242-9-0-1a	1,14	1,14	1,14
	S-243-9-0-1	1,09	1,12	1,10
	S-244-9-0-1	1,39	1,39	1,39
	S-244-9-0-2	1,18	1,18	1,18
	Série H (b=271mm)	1,53	1,53	1,53
	Série H (b=163mm)	1,43	1,43	1,43
	Série H (b=102 mm)	1,50	1,50	1,50
	Série H (b=0)	1,02	1,02	1,02
	Série H (b=0)	1,19	1,19	1,19
	Série H (b=271mm)	1,41	1,41	1,41
	Série H (b=163mm)	1,27	1,27	1,27
	Série H (b=135mm)	1,18	1,18	1,18
	Série H (b=117mm)	1,13	1,13	1,13
	Série H (b=102mm)	1,10	1,10	1,10
	Série H (b=0)	1,01	1,01	1,01
	Série H (b=0)	1,12	1,12	1,12

ROLL et al (1971)

Tabela 6.9 - Estimativas da proposta para o método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 2 e da literatura (continuação)

Autor	Laje	V_{Exp} / V_{ROLL}	$V_{Exp} / V_{PROP(TURO SIMETRICO)}$	$V_{Exp} / V_{PROP(PILAR DE BORDA)}$
MOWRER & VANDERBILT (1967)	JN-1-1.7	1,83	2,02	1,98
	JN-2-1.7	2,68	2,68	2,68
	JN-3-1.7	2,02	2,15	2,06
	JN-1-2.2	1,60	1,68	1,64
	JN-2-2.2	2,43	2,43	2,43
	JN-3-2.2	1,92	2,09	1,99
GOMES & ANDRAD E (1995)	13	1,32	1,40	1,70
	14	1,22	1,32	1,65
	15	1,43	1,43	1,43
	23	1,35	1,35	1,35
SÉRIE 2	L45FS_CG	1,13	1,24	1,28
	L45FD_CG	1,09	1,19	1,22
	L45FD	1,11	1,22	1,26
	L45FFS_CG	1,21	1,21	1,21
	L45FFD_CG	1,14	1,14	1,14
	L45FFD	1,08	1,08	1,08
TENG et al. (1999)	OC11H30	1,27	1,31	1,29
	OC11V23	1,30	1,35	1,32
	OC11V20	0,91	1,27	1,13
	OC13H50	1,09	1,23	1,11
	OC13V43	1,13	1,29	1,22
	OC13V23	1,24	1,53	1,43
	OC13V40	0,89	1,15	1,11
	OC13H02	1,26	1,41	1,31
	OC15H70	1,10	1,25	1,15
	OC15V43	1,33	1,48	1,40
REGA N (1999)	2	1,29	1,29	1,29
	6	1,19	1,19	1,19
	7	1,19	1,19	1,19
SILVA (2003)	PSSCH4b	1,40	1,40	1,40
SILVA (2003)	L4	1,33	1,33	1,33
	L5	1,56	1,56	1,56
	L6	1,42	1,42	1,42
MEDIA		1,32	1,38	1,40
DESVIO PADRAO		0,28	0,29	0,31
EFICIENTE DE VARIAÇÃO		21,2	20,9	22,2

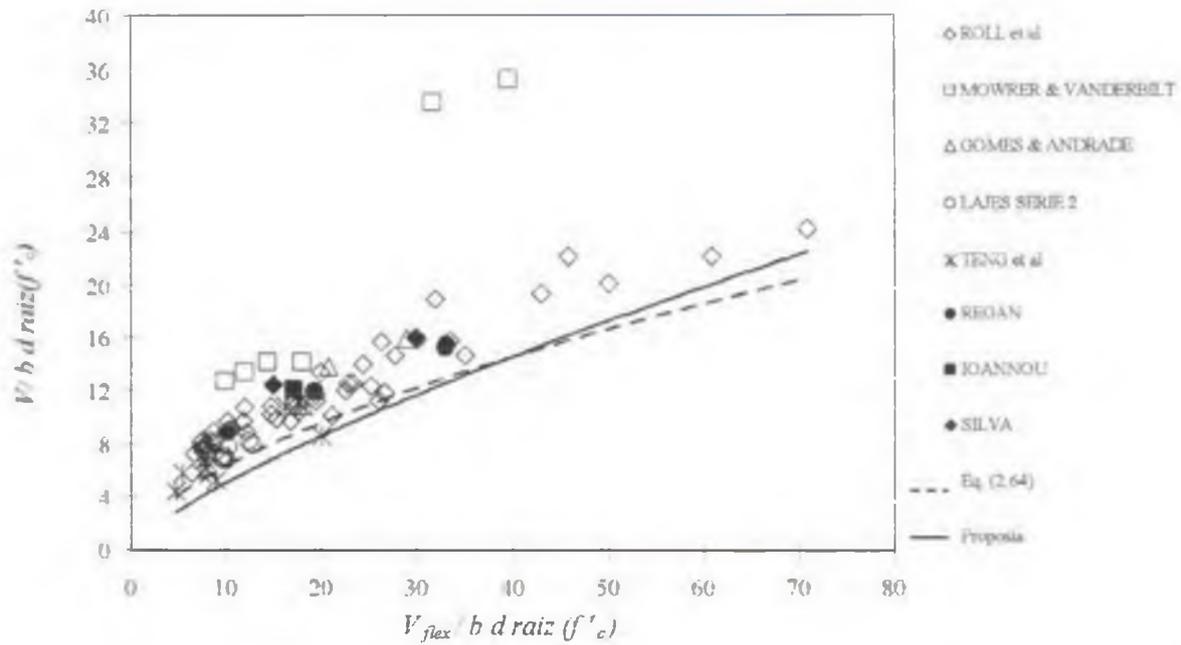


Figura 6.11 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) e da proposta para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas

$$V/bd\sqrt{f'_c} \times V_{flex}/bd\sqrt{f'_c}$$

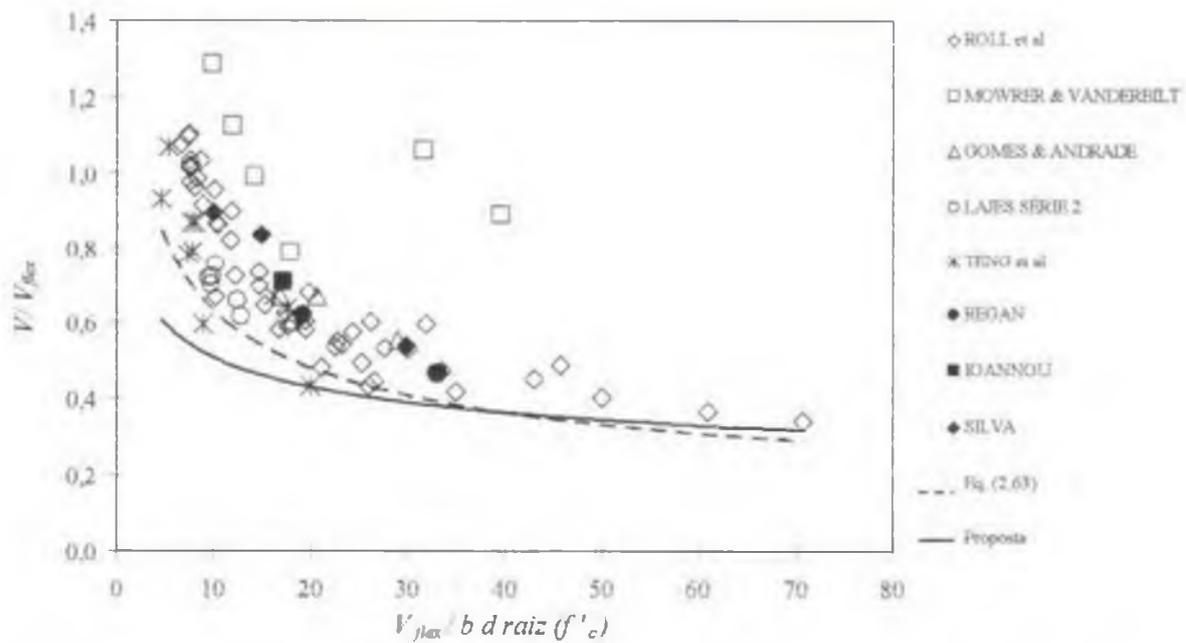


Figura 6.12 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) e da proposta para as lajes da Série 2 e da literatura – Curvas

$$V/V_{flex} \times V_{flex}/bd\sqrt{f'_c}$$

6.3.3 – PROPOSTA DE CÁLCULO DO PERÍMETRO EFETIVO DE CONTROLE PARA A NBR-6118 (2003) UTILIZANDO O MÉTODO DO HANDBOOK TO BS8110/85 (1987)

O método de cálculo da norma NBR 6118 (2003) prescreve que o perímetro efetivo de controle, na presença de furos, é obtido através da dedução do perímetro de controle situado a $2d$ do pilar no trecho compreendido entre linhas de projeção radial, que partem do centro do pilar e tangenciam os vértices do furo. Observa-se nos resultados apresentados nas tabs. 6.6 e 2.24 (Capítulo 2) que a norma brasileira forneceu, de modo geral, resultados conservadores para as estimativas V_{Exp}/V_{calc} , devido à redução significativa do perímetro de controle devido ao furo.

Como apresentado anteriormente (Tabs. 6.6 e 2.24), a proposta de REGAN (1974) para o Handbook to BS8110/85 (1987), considerando a influência de furos em lajes com a exclusão dos trechos do perímetro de controle inseridos dentro de projeções paralelas às faces do furo e que partem do pilar (vide Fig. 2.12), apresentou os melhores resultados teóricos, depois do método de ROLL et al. (1971), para as lajes da Série 2. Desta forma, propõe-se aplicar o método apresentado no Handbook to BS8110 (1987) no tratamento de furos, para o cálculo do perímetro de controle situado a $2d$ da face do pilar, prescrito pela NBR 6118 (2003).

6.3.4 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ESTIMADOS PELAS NORMAS DE PROJETO E POR PESQUISADORES COM OS ESTIMADOS PELA PROPOSTA PARA A NBR-6118 (2003)

A Tab. 6.10 apresenta as estimativas das normas de projeto e dos pesquisadores analisados, incluindo a proposta do Handbook to BS8110/85 (1987) para a NBR 6118 (2003), para as lajes da Série 2 e da literatura. São apresentados os valores médios, obtidos a partir de todas as lajes com furos, para a relação V_{Exp}/V_{calc} , desvio padrão e coeficiente de variação.

Para as lajes de MOWRER & VANDERBILT (1967) a proposta para o método da NBR 6118 (2003) forneceu relações V_{Exp}/V_{calc} entre 0,92 e 1,23, enquanto que a norma estimou valores entre 1,09 e 2,23. Nas lajes de ROLL et al. (1971), tanto a norma brasileira quanto a proposta para esta, apresentaram para a maioria das lajes, estimativas contra a segurança. Para as lajes com furos posicionados com um dos vértices coincidentes com o do pilar (série S221 a S224

e série S241 a S244), o aumento do número de furos conduziu a resultados mais conservadores, tanto com furos pequenos quanto maiores.

Para as lajes de GOMES & ANDRADE (1995), a proposta do Handbook para a NB1 (2003) forneceu estimativas mais conservadoras (V_{Exp}/V_{calc} entre 1,17 e 1,98) que as apresentadas pela própria norma (V_{Exp}/V_{calc} entre 1,14 e 1,67), especialmente com o aumento do diâmetro e número de furos. As estimativas da proposta foram semelhantes às de IOANNOU (2001), para as lajes com furos em pares (lajes 15 e 23).

As estimativas da proposta, para a maioria das lajes ensaiadas por TENG et al. (1999) apresentaram relações V_{Exp}/V_{calc} inferior a 1,0, assim como a NB1 (2003). Entretanto, a proposta tendeu a melhorar as estimativas apenas das lajes OC11V20 e OC13V40.

Para as lajes ensaiadas por REGAN (1999), a proposta forneceu estimativas contra a segurança, exceto apenas para a laje com dois furos (laje 2). A NB1 (2003) forneceu estimativas conservadoras para as lajes, apresentando V_{Exp}/V_{calc} entre 1,56 e 1,68.

Em todas as lajes ensaiadas por EL-SALAKAWY et al. (1999), tanto a proposta atual quanto a NB1 (2003) apresentaram resultados contra a segurança, com relações V_{Exp}/V_{calc} entre 0,71 e 0,88 (proposta) e entre 0,86 e 1,09 (norma brasileira).

Para as lajes de SILVA (2003), a proposta conduziu a resultados mais satisfatórios em relação aos obtidos pela NB1 (2003). A proposta atual forneceu valores V_{Exp}/V_{calc} entre 0,99 e 1,26, enquanto que a NB1 (2003), entre 1,31 e 1,63. A NB1 (2003) tende a superestimar a influência do furo no cálculo do perímetro de controle efetivo.

A proposta do Handbook para a NB1 (2003), assim como nas lajes de SILVA (2003), forneceu para as lajes do presente trabalho estimativas mais próximas de 1,0, em relação às fornecidas pela NB1 (2003), sendo que a norma estimou resultados conservadores para as lajes, com valores para V_{Exp}/V_{calc} entre 1,07 e 1,35.

De acordo com a Tab. 6.10, verifica-se que, dentre todos os métodos de cálculo analisados, o método da norma do ACI (2002) foi o que se apresentou como o mais conservador nas

estimativas da carga de ruptura, com o maior valor para a média da relação V_{Exp}/V_{calc} (1,92), e maiores valores para o desvio padrão (0,86) e coeficiente de variação (44,9%).

A proposta do Handbook to BS (1987) para a NB1 (2003) apresentou a melhor média para a relação V_{Exp}/V_{calc} (1,03) com desvio padrão e coeficiente de variação iguais a, respectivamente, 0,24 e 23,4, enquanto que a NB1 (2003) apresentou um valor médio para a relação V_{Exp}/V_{calc} igual a 1,19, desvio padrão de 0,32 e coeficiente de variação de 27,0.

Seguido da proposta atual, o Handbook to BS8110 (1987) forneceu os melhores resultados para a média (1,13), desvio padrão (0,24) e coeficiente de variação (21,4).

Tabela 6.10 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos da Série 2 e da literatura, incluindo a proposta para a NB1 (2003)

Autor	Laje	V_{Exp}/V_{calc}									
		ACI'02	BS'97	IB'87	EC2'92	EC2'01	NB1'03	PROPOSTA	TENG'99	IOANNOU'01	ROLL'71
MOWRER & VANDERBILT (1967)	JN-1-1.7	2,44	1,39	1,16	2,36	1,83	1,22	1,02	1,39	1,42	1,83
	JN-2-1.7	5,00	2,54	1,52	4,48	3,33	2,23	1,21	2,54	1,67	2,68
	JN-3-1.7	2,30	1,35	1,30	2,55	1,89	1,26	1,23	1,35	1,19	2,02
	JN-1-2.2	2,46	1,24	1,04	2,19	1,63	1,09	0,92	1,24	1,27	1,60
	JN-2-2.2	5,26	2,27	1,36	4,55	2,98	2,00	1,08	2,27	1,49	2,43
	JN-3-2.2	2,45	1,31	1,27	2,45	1,83	1,23	1,20	1,31	1,16	1,92
ROLL, ZAIDI, SABNIS & CHUANG (1971)	S-121-0-0-1	1,52	1,04	0,96	1,49	1,37	0,89	0,84	1,04	0,89	1,14
	S-122-0-0-1	1,63	1,12	0,94	1,60	1,43	0,93	0,82	1,12	0,82	1,18
	S-123-0-0-1	1,50	1,03	0,76	1,46	1,26	0,81	0,66	1,03	0,71	1,31
	S-124-0-0-1	1,67	1,14	0,72	1,60	1,31	0,85	0,63	1,14	0,63	1,31
	S-221-0-0-1	1,90	1,04	1,06	1,35	1,38	0,89	0,93	1,04	1,13	1,21
	S-222-0-0-1	2,12	1,13	1,19	1,49	1,46	0,95	1,05	1,13	1,05	1,21
	S-223-0-0-1	2,48	1,33	1,46	1,69	1,95	1,26	1,29	1,33	1,75	1,28
	S-224-0-0-1	2,67	1,45	1,71	1,71	1,73	1,12	1,54	1,45	1,54	1,21
	S-241-9-0-1	1,71	0,91	0,89	1,25	1,21	0,78	0,78	0,91	0,94	1,23
	S-242-9-0-1	1,89	1,02	0,96	1,33	1,33	0,86	0,84	1,02	0,84	1,22
	S-243-9-0-1	2,46	1,28	1,12	1,76	1,59	1,03	1,00	1,28	1,35	1,09
	S-244-9-0-1	3,71	1,94	1,52	2,51	2,24	1,46	1,37	1,94	1,37	1,39
GOMES & ANDRADE'95	13	1,57	1,27	1,28	1,47	1,27	1,18	1,21	1,27	1,33	1,32
	14	1,50	1,22	1,22	1,40	1,21	1,14	1,17	1,22	1,38	1,22
	15	1,92	1,50	1,59	1,85	1,57	1,46	1,57	1,50	1,57	1,43
	23	2,05	1,81	1,92	1,93	1,77	1,67	1,98	1,81	1,98	1,35

Tabela 6.10 – Estimativas das normas de projeto e de pesquisadores para as lajes com furos da Série 2 e da literatura, incluindo a proposta para a NB1 (2003) (continuação)

Autor	Laje	V_{Exp} / V_{calc}									
		ACI/02	BS/97	HB/87	EC2/92	EC2/01	NB1/03	PROPOSTA	TENG/99	IOANNOU/01	ROLL/71
HEGAN (1999)	2	2,01	1,75	1,10	1,95	1,91	1,68	1,01	1,75	1,01	1,29
	6	2,41	1,98	0,94	2,08	1,77	1,56	0,86	1,98	1,09	1,19
	7	2,39	1,97	0,93	2,06	1,77	1,56	0,86	1,97	1,08	1,19
TENG et al. (1999)	OC11H30	1,80	1,32	1,09	1,54	1,44	1,22	1,01	1,32	1,30	1,27
	OC11V23	1,74	1,28	1,24	1,47	1,37	1,17	1,14	1,28	1,41	1,30
	OC11V20	1,25	0,93	0,97	1,01	0,99	0,83	0,89	0,93	0,96	0,81
	OC13H50	1,33	0,98	0,94	1,30	1,08	0,92	0,87	1,07	1,08	1,09
	OC13V43	1,43	1,07	1,01	1,39	1,14	0,98	0,95	1,03	1,09	1,14
	OC13V23	1,59	1,18	1,04	1,51	1,28	1,08	0,96	1,18	1,04	1,23
	OC13V40	1,15	0,83	0,90	0,96	0,90	0,76	0,85	0,88	1,19	0,89
	OC13H02	1,76	1,43	1,09	1,61	1,49	1,28	1,02	1,09	1,19	1,26
	OC15H70	1,31	0,89	0,98	1,52	0,98	0,83	0,81	1,10	0,96	1,10
OC15V43	1,72	1,16	1,15	1,96	1,26	1,07	0,95	1,28	1,01	1,32	
PSSCH4b	1,83	1,74	1,05	1,91	1,80	1,62	0,96	1,74	1,21	1,40	
EL-SALAKAWY et al. (1999)	SE0	0,97	1,05	0,96	1,19	1,20	0,96	0,88	1,05	1,40	0,79
	CF0	0,89	1,05	0,78	1,17	1,21	0,97	0,71	1,05	0,82	0,62
	SF0	0,90	1,03	0,88	1,32	1,36	1,09	0,81	1,03	0,81	0,70
	SF1	0,82	0,94	0,91	1,05	1,10	0,89	0,84	0,94	0,84	0,72
	SF2	0,82	0,91	0,93	1,05	1,07	0,86	0,86	0,91	0,86	0,72
SILVA (2003)	L4	2,49	1,78	1,08	2,06	2,03	1,63	0,99	1,78	1,23	1,33
	L5	2,13	1,65	1,38	1,92	1,95	1,56	1,26	2,04	1,51	1,56
	L6	1,67	1,54	1,26	1,95	1,63	1,31	1,16	1,74	1,35	1,42
SÉRIE 2	L45FS_CG	1,48	1,28	1,22	1,49	1,29	1,21	1,14	1,42	1,43	1,13
	L45FD_CG	1,43	1,13	1,08	1,34	1,14	1,07	1,00	1,25	1,26	1,09
	L45FD	1,43	1,15	1,09	1,34	1,16	1,08	1,02	1,27	1,28	1,11
	L45FFS_CG	1,59	1,41	1,27	1,62	1,45	1,35	1,18	1,82	1,40	1,21
	L45FFD_CG	1,70	1,36	1,22	1,58	1,37	1,30	1,14	1,77	1,35	1,14
	L45FFD	1,68	1,29	1,16	1,59	1,34	1,23	1,08	1,65	1,28	1,08
MEDIA	1,92	1,33	1,13	1,75	1,52	1,19	1,03	1,37	1,20	1,27	
DESVIO PADRÃO	0,86	0,37	0,24	0,69	0,46	0,32	0,24	0,39	0,28	0,38	
C. VARIAÇÃO (%)	44,9	27,9	21,4	39,3	30,1	27,0	23,4	28,4	23,2	30,0	

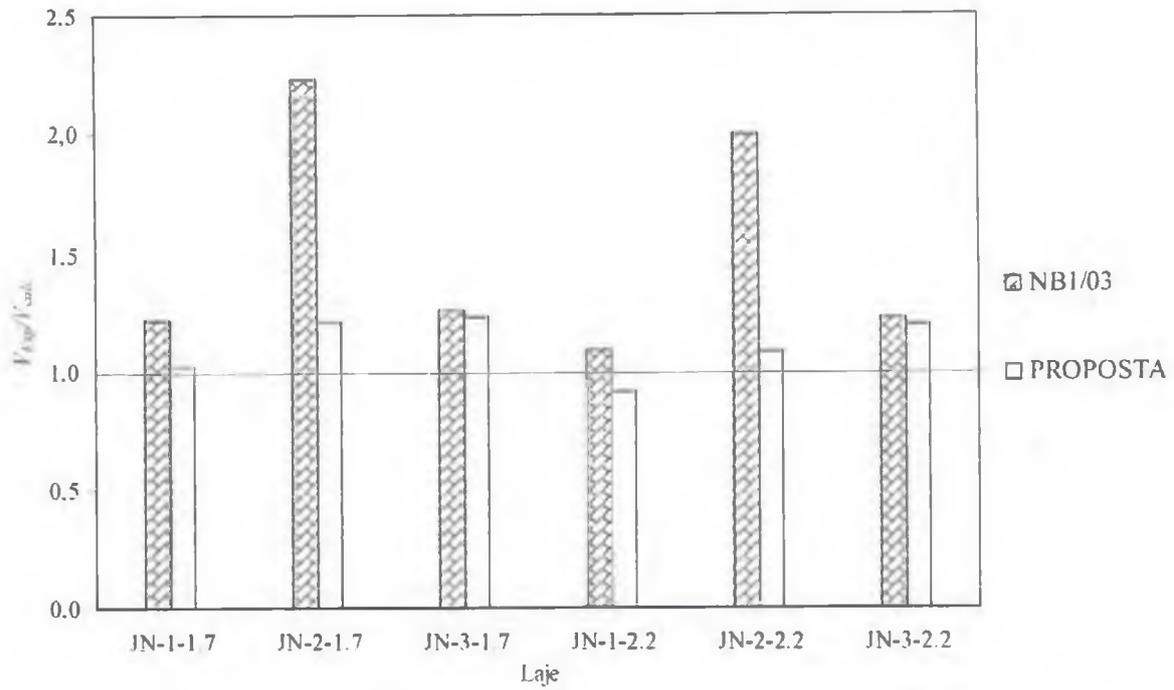


Figura 6.13 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de MOWRER & VANDERBILT (1967)

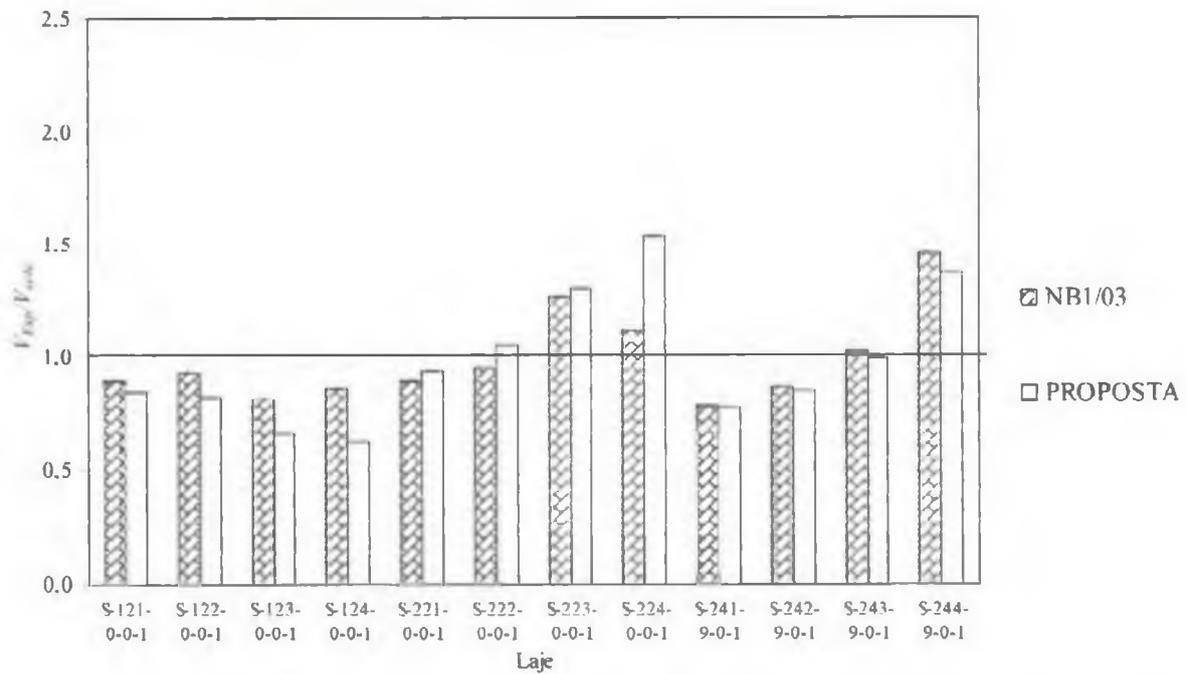


Figura 6.14 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de ROLL et al. (1971)

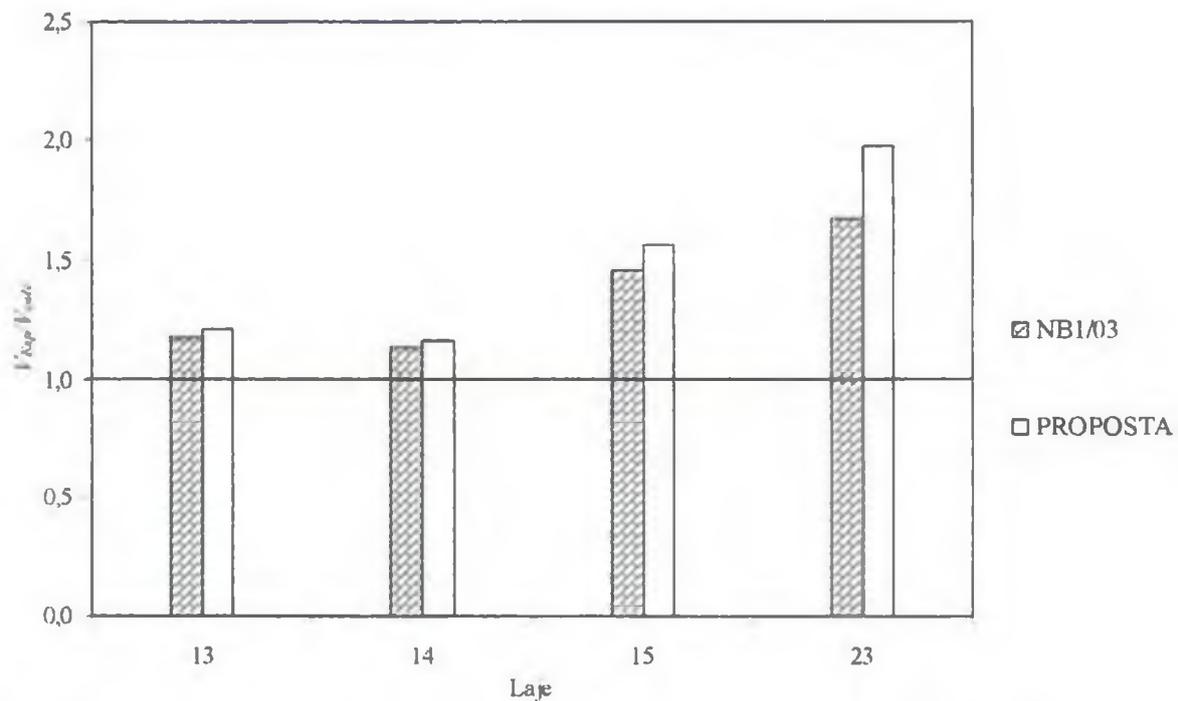


Figura 6.15 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de GOMES & ANDRADE (1995)

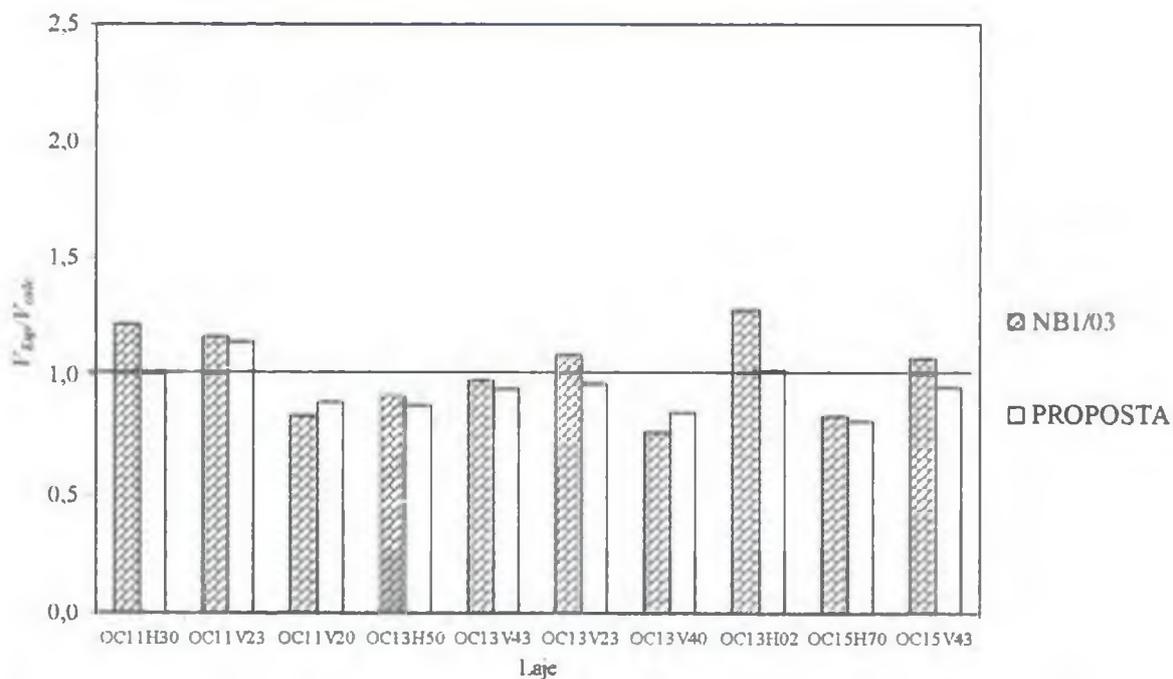


Figura 6.16 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de TENG et al. (1999)

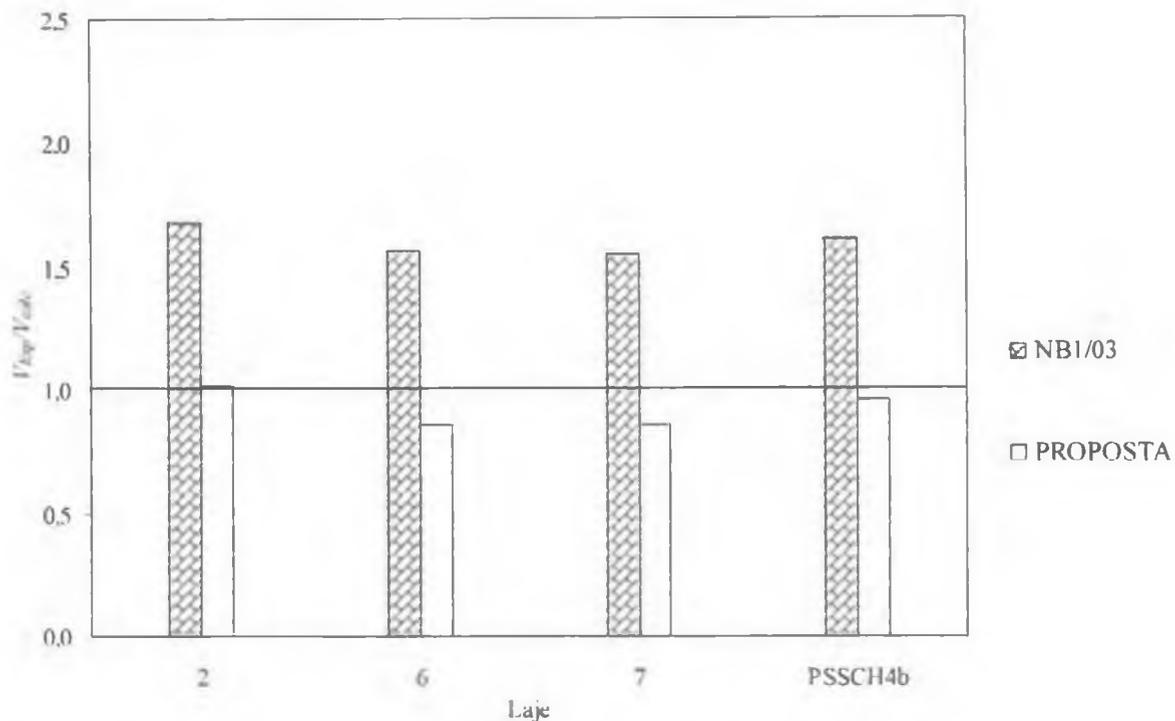


Figura 6.17 – Comparação das estimativas da NBI (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de REGAN (1999) e IOANNOU (2001)

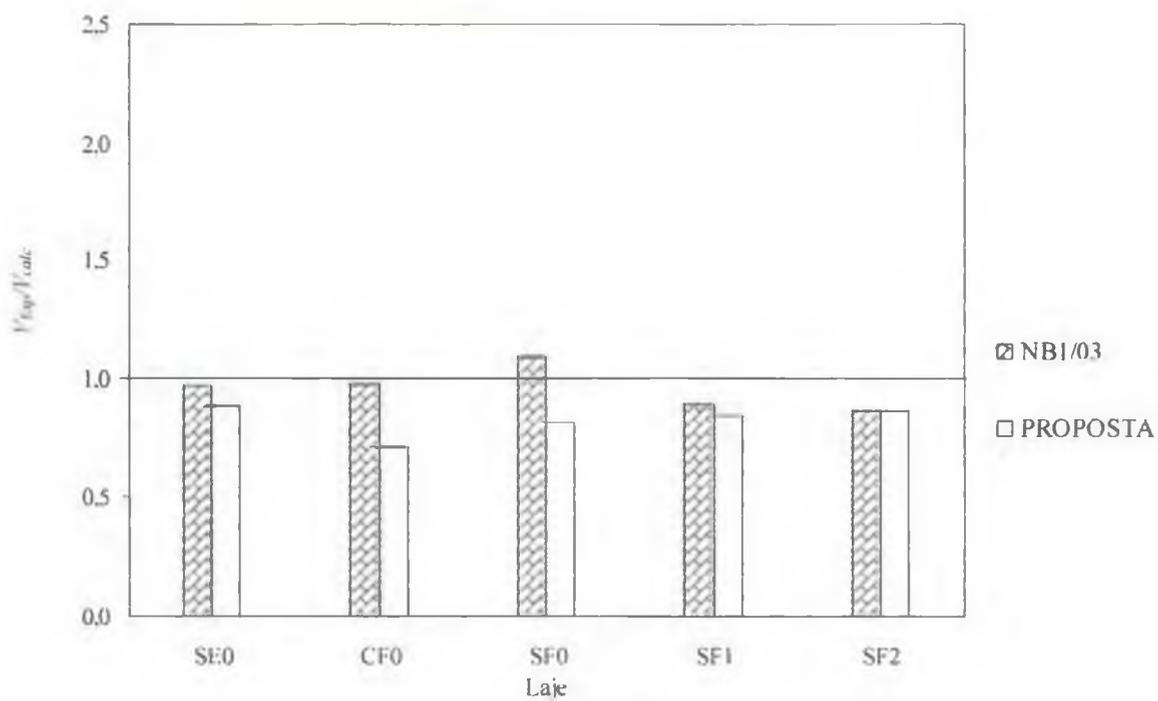


Figura 6.18 – Comparação das estimativas da NBI (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de EL-SALAKAWY et al. (1999)

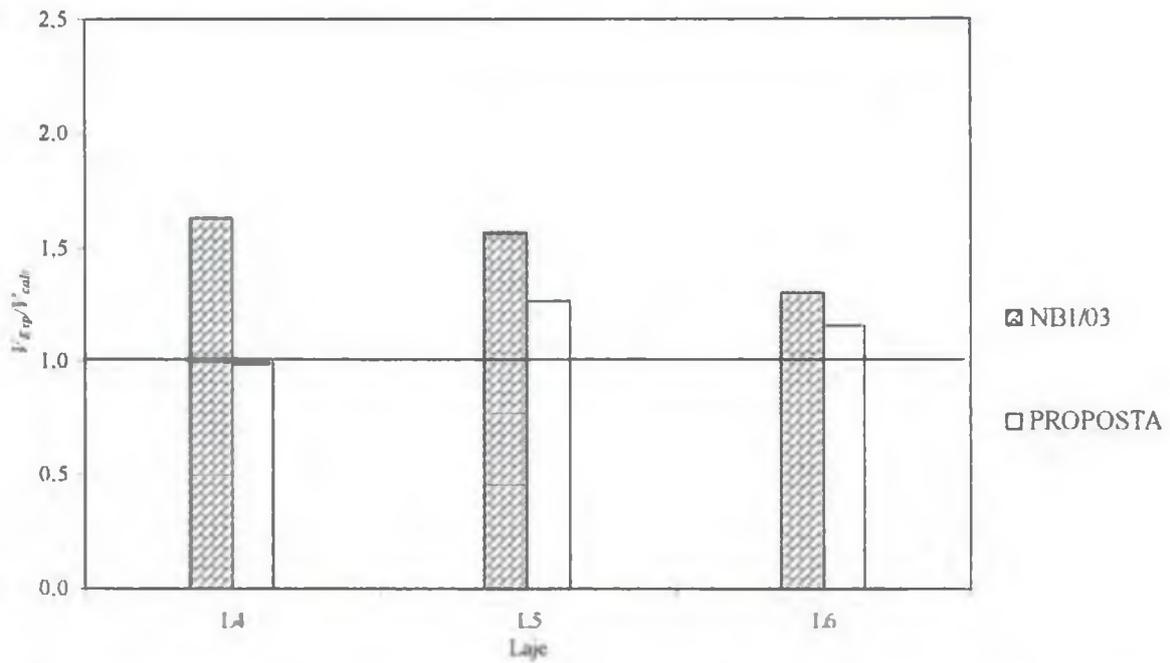


Figura 6.19 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes de SILVA (2003)

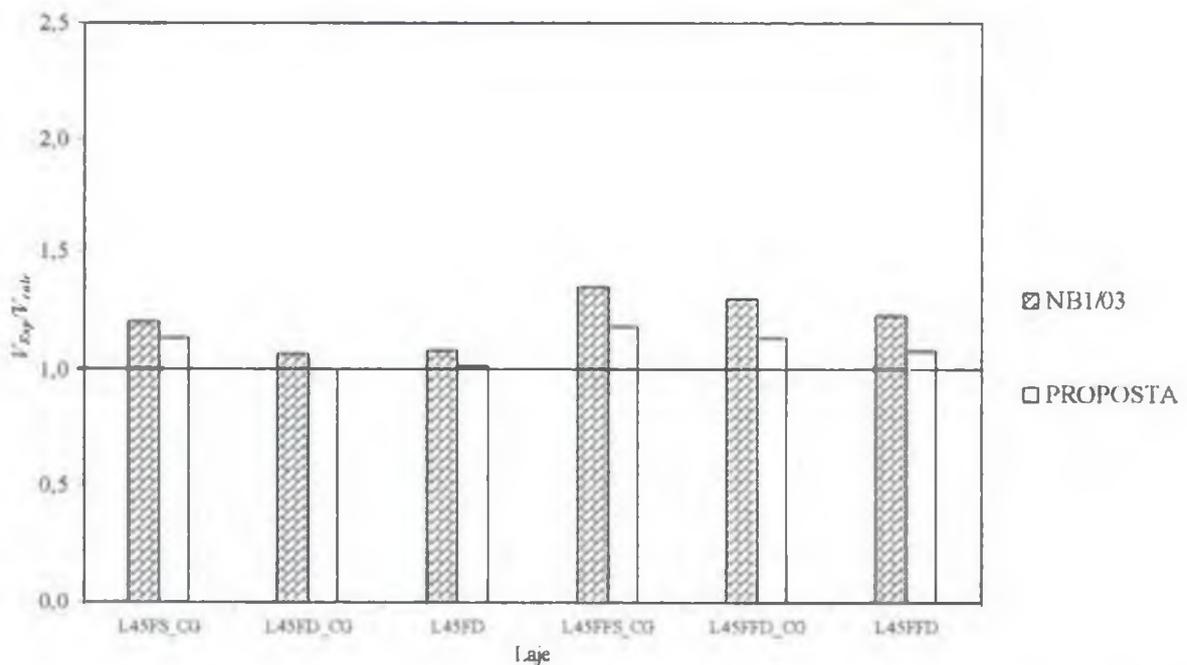


Figura 6.20 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as estimativas da proposta para a norma brasileira das lajes da Série 2

6.4 – LAJES COM ARMADURA DE CISALHAMENTO

6.4.1 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA

As tabs. 6.11 a 6.17 apresentam, respectivamente, as estimativas do ACI (2002), BS8110 (1997), Handbook to BS8110/85 (1987), EC2 (1992), EC2 (2001), NB1 (2003) e da proposta para a NB1 (2003) para as lajes da Série 3.

Segundo o ACI (2002), as cargas de ruptura experimentais das lajes da Série 3 foram superiores às cargas previstas em até 63%, como pode ser visto na Tab. 6.11, além dos mecanismos de ruptura previstos se diferenciarem dos experimentais. Todas as lajes apresentaram superfície de ruptura externa à região com armadura de cisalhamento, sendo que foram previstas para as lajes L45_AC1, L45FFD_AC2 e L45FFD_AC3, superfícies de ruptura adjacentes ao pilar, e, para as lajes L45FFD_AC4, L45FFD_AC5 e L45_AC5, superfície de ruptura cruzando a armadura de cisalhamento.

Apesar disto, observa-se na Tab. 6.11 que as cargas de ruptura experimentais apresentaram-se próximas das estimadas para superfície de ruptura externa à região com armadura de cisalhamento, com exceção da laje L45FFD_AC4. Tal fato mostra que o espaçamento entre camadas e entre o pilar e a primeira camada foi adequado de forma a evitar qualquer ruptura adjacente, e, a armadura de cisalhamento apresentou efetividade superior à esperada nos cálculos do ACI (2002).

Para o BS8110 (1997), as cargas previstas para as lajes do Grupo 3 apresentaram-se próximas das experimentais (V_{Exp}/V_{BS8110} entre 0,99 e 1,04), além dos mecanismos de ruptura previstos terem coincido com os experimentais, como mostra a Tab. 6.12. Isto mostra que os perímetros calculados externamente à região com armadura de cisalhamento, foram considerados adequadamente, além da armadura de cisalhamento ter apresentado comportamento coerente com a previsão da norma.

O Handbook to BS8110 (1987) estimou resultados semelhantes os fornecidos pelo BS8110 (1997) para o caso das lajes monolíticas da Série 3, como esperado, pois ambos métodos de cálculo se diferenciam apenas com relação ao tratamento de furos em lajes. Com relação às lajes com furos, a proposta do Handbook tendeu a estimar cargas de ruptura superiores às

previstas pelo BS, tanto para superfície cruzando a armadura de cisalhamento quanto localizada externamente à região armada (Tab. 6.13). As estimativas do Handbook para a relação V_{Exp}/V_{calc} , para as lajes da Série 3, variou entre 0,87 (L45FFD_AC4) e 1,04 (L45_AC5), e os mecanismos de ruptura experimentais diferenciaram dos previstos, para todas as lajes com furos.

Para o EC2 (1992), todas as lajes apresentaram cargas de ruptura experimentais superiores às previstas pela norma entre 13% e 55%, além dos mecanismos de ruptura experimentais não terem coincidido com os previstos, como mostra a Tab. 6.14. Apesar disto, observa-se que as cargas estimadas pela norma para ruptura com superfície localizada externamente à região com armadura de cisalhamento se apresentaram próximas das experimentais, com exceção da laje L45FFD_AC4.

O EC2 (2001) e a NB1 (2003) estimaram, para todas as lajes, mecanismos de ruptura coincidentes com os experimentais, e, também, resultados conservadores (V_{Exp}/V_{calc} entre 1,19 e 1,25, para o EC2, e entre 1,06 e 1,20, para a NB1), como mostram as tabs. 6.15 e 6.16, respectivamente.

A proposta apresentada anteriormente para a NB1 (2003) que, por sua vez, considera a influência do furo no cálculo do perímetro de controle, conforme recomenda o Handbook to BS8110 (1987), conduziu a estimativas praticamente iguais às da norma, como esperado, para as lajes monolíticas.

Para as lajes com furos, a proposta tendeu a fornecer resultados superiores aos da norma, uma vez que o perímetro efetivo de controle é maior, neste caso. Assim, os valores determinados pela proposta para a relação V_{Exp}/V_{calc} se apresentaram inferiores aos da norma (V_{Exp}/V_{calc} entre 0,98 e 1,16), além da proposta estimar mecanismos de ruptura idênticos aos experimentais.

Tabela 6.11 – Estimativas da norma do ACI (2002) para as lajes da Série 3

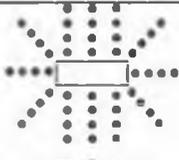
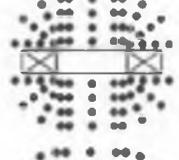
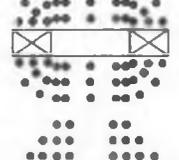
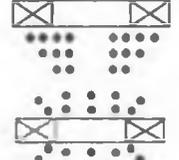
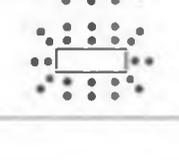
Laje	d (mm)	f'_c (MPa)	Armadura de cisalhamento	A_{sc}/cam (mm ²)	ϕ (mm)	s_o (mm)	s_r (mm)	V_{exp} (kN)	V_{int} (kN)	V_{ext} (kN)	V_{adj} (kN)	V_{ACI} (kN)	$V_{exp}/$ V_{ACI}	Ruptura prevista	Ruptura real
L45_AC1	154	39,0		943	10,0	75	75	1250	1066	1205	769	769	1,63	Adjacente	Externa
L45FFD_AC2	154	43,8		1728	10,0	77	116	1230	872	1238	815	815	1,51	Adjacente	Externa
L45FFD_AC3	154	39,4		1106	8,0	77	116	1050	828	942	774	774	1,36	Adjacente	Externa
L45FFD_AC4	154	43,2		603	8,0	77	116	885	738	922	810	738	1,20	Interna	Externa
L45FFD_AC5	154	40,7		503	8,0	77	116	837	561	768	786	561	1,49	Interna	Externa
L45_AC5	154	41,1		603	8,0	77	116	1092	701	1022	790	701	1,56	Interna	Externa

Tabela 6.12 – Estimativas da norma do BS8110 (1997) para as lajes da Série 3

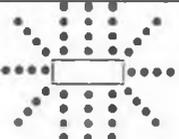
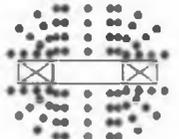
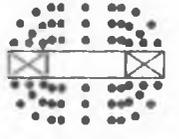
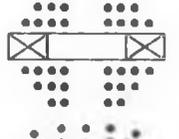
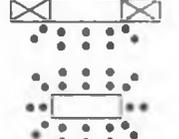
Laje	d (mm)	f_c (MPa)	Armadura de cisalhamento	A_{sv}/cam (mm ²)	ϕ (mm)	s_0 (mm)	s_r (mm)	V_{Exp} (kN)	V_{int} (kN)	V_{ext} (kN)	V_{adj} (kN)	V_{BS8110} (kN)	$V_{Exp} /$ V_{BS8110}	Ruptura prevista	Ruptura real
L45_AC1	154	39,0		943	10,0	75	75	1250	1479	1230	1232	1230	1,02	Externa	Externa
L45FFD_AC2	154	43,8		1728	10,0	77	116	1230	1327	1188	1232	1188	1,04	Externa	Externa
L45FFD_AC3	154	39,4		1106	8,0	77	116	1050	1061	1022	1232	1022	1,03	Externa	Externa
L45FFD_AC4	154	43,2		603	8,0	77	116	885	956	893	1232	893	0,99	Externa	Externa
L45FFD_AC5	154	40,7		503	8,0	77	116	837	851	850	1232	850	0,99	Externa	Externa
L45_AC5	154	41,1		603	8,0	77	116	1092	1056	1053	1232	1053	1,04	Externa	Externa

Tabela 6.13 – Estimativas da norma do HANDBOOK TO BS8110 (1987) para as lajes da Série 3

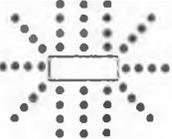
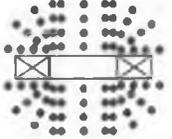
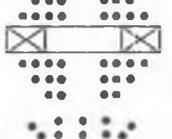
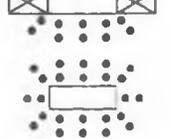
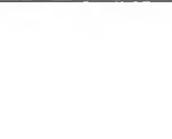
Laje	d (mm)	f'_c (MPa)	Armadura de cisalhamento	A_{sv}/cam (mm ²)	ϕ (mm)	s_0 (mm)	s_r (mm)	V_{exp} (kN)	V_{int} (kN)	V_{est} (kN)	V_{adj} (kN)	$V_{HB\ 87}$ (kN)	$V_{exp}/$ $V_{HB\ 87}$	Ruptura prevista	Ruptura real
L45_AC1	154	39,0		943	10,0	75	75	1250	1479	1230	1232	1230	1,02	Externa	Externa
L45FFD_AC2	154	43,8		1728	10,0	77	116	1230	1393	1371	1232	1232	1,00	Adjacente	Externa
L45FFD_AC3	154	39,4		1106	8,0	77	116	1050	1127	1172	1232	1127	0,93	Interna	Externa
L45FFD_AC4	154	43,2		603	8,0	77	116	885	1022	1034	1232	1022	0,87	Interna	Externa
L45FFD_AC5	154	40,7		503	8,0	77	116	837	917	987	1232	917	0,92	Interna	Externa
L45_AC5	154	41,1		603	8,0	77	116	1092	1056	1053	1232	1053	1,04	Externa	Externa

Tabela 6.14 – Estimativas da norma do EC2 (1992) para as lajes da Série 3

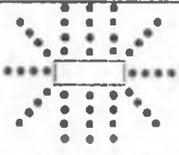
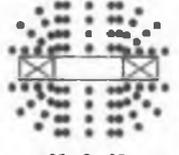
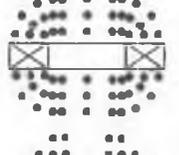
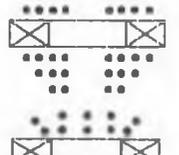
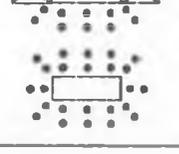
Laje	d (mm)	f_c (MPa)	Armadura de cisalhamento	A_{se}/cam (mm ²)	ϕ (mm)	s_o (mm)	s_r (mm)	V_{Exp} (kN)	V_{rd2} (kN)	V_{rd3} (kN)	V_{ext} (kN)	$V_{EC'92}$ (kN)	V_{Exp} $V_{EC'92}$	Ruptura prevista	Ruptura real
L45_AC1	154	39,0		943	10,0	75	75	1250	999	1095	1122	999	1,25	Interna	Externa
L45FFD_AC2	154	43,8		1728	10,0	77	116	1230	795	1361	1136	795	1,55	Interna	Externa
L45FFD_AC3	154	39,4		1106	8,0	77	116	1050	741	1294	888	741	1,42	Interna	Externa
L45FFD_AC4	154	43,2		603	8,0	77	116	885	788	794	903	788	1,13	Interna	Externa
L45FFD_AC5	154	40,7		503	8,0	77	116	837	757	725	740	725	1,16	Interna	Externa
L45_AC5	154	41,1		603	8,0	77	116	1092	1035	949	998	949	1,15	Interna	Externa

Tabela 6.15 – Estimativas da norma do EC2 (2001) para as lajes da Série 3

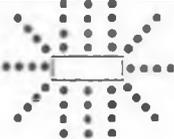
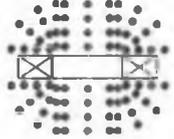
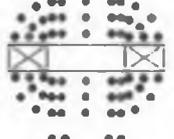
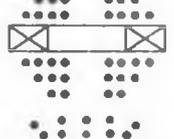
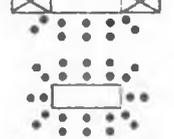
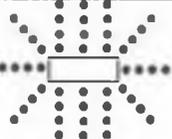
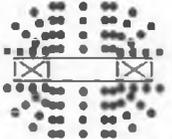
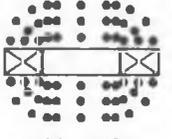
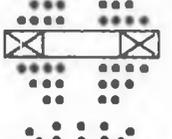
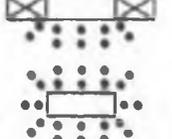
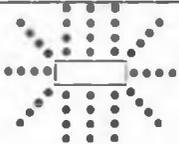
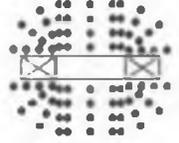
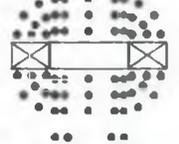
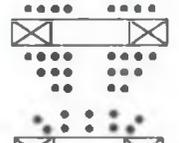
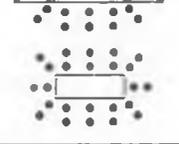
Laje	d (mm)	f'_c (MPa)	Armadura de cisalhamento	A_{sw}/cam (mm ²)	ϕ (mm)	s_θ (mm)	s_r (mm)	V_{Exp} (kN)	V_{int} (kN)	V_{ext} (kN)	V_{adj} (kN)	V_{EC01} (kN)	$V_{Exp}/$ V_{EC01}	Ruptura prevista	Ruptura real
L45_AC1	154	39,0		943	10,0	75	75	1250	1426	1005	2433	1005	1,24	Externa	Externa
L45FFD_AC2	154	43,8		1728	10,0	77	116	1230	1480	1019	2670	1019	1,21	Externa	Externa
L45FFD_AC3	154	39,4		1106	8,0	77	116	1050	1096	837	2453	837	1,25	Externa	Externa
L45FFD_AC4	154	43,2		603	8,0	77	116	885	806	718	2641	718	1,23	Externa	Externa
L45FFD_AC5	154	40,7		503	8,0	77	116	837	738	701	2519	701	1,19	Externa	Externa
L45_AC5	154	41,1		603	8,0	77	116	1092	925	881	2539	881	1,24	Externa	Externa

Tabela 6.16 – Estimativas da norma da NB1 (2003) para as lajes da Série 3

Laje	d (mm)	f_c (MPa)	Armadura de cisalhamento	A_{se}/cam (mm ²)	ϕ (mm)	s_0 (mm)	s_r (mm)	V_{Exp} (kN)	V_{int} (kN)	V_{ext} (kN)	V_{adj} (kN)	V_{NB1} (kN)	$V_{Exp}/$ V_{NB1}	Ruptura prevista	Ruptura real
L45_AC1	154	39,0		943	10,0	75	75	1250	1487	1175	2190	1175	1,06	Externa	Externa
L45FFD_AC2	154	43,8		1728	10,0	77	116	1230	1530	1044	2403	1044	1,18	Externa	Externa
L45FFD_AC3	154	39,4		1106	8,0	77	116	1050	1141	873	2208	873	1,20	Externa	Externa
L45FFD_AC4	154	43,2		603	8,0	77	116	885	855	768	2377	768	1,15	Externa	Externa
L45FFD_AC5	154	40,7		503	8,0	77	116	837	786	696	2267	696	1,20	Externa	Externa
L45_AC5	154	41,1		603	8,0	77	116	1092	981	939	2235	939	1,16	Externa	Externa

#0E

Tabela 6.17 – Estimativas da proposta para a NB1 (2003) para as lajes da Série 3

Laje	d (mm)	f'_c (MPa)	Armadura de cisalhamento	A_{sc}/cam (mm ²)	ϕ (mm)	s_0 (mm)	s_r (mm)	V_{exp} (kN)	V_{int} (kN)	V_{adm} (kN)	V_{adj} (kN)	V_{prop} (kN)	$V_{exp} /$ V_{prop}	Ruptura prevista	Ruptura real
L45_AC1	154	39,0		943	10,0	75	75	1250	1487	1175	2190	1175	1,06	Externa	Externa
L45FFD_AC2	154	43,8		1728	10,0	77	116	1230	1600	1249	2403	1249	0,98	Externa	Externa
L45FFD_AC3	154	39,4		1106	8,0	77	116	1050	1210	1043	2208	1043	1,01	Externa	Externa
L45FFD_AC4	154	43,2		603	8,0	77	116	885	935	880	2377	880	1,01	Externa	Externa
L45FFD_AC5	154	40,7		503	8,0	77	116	837	854	825	2267	825	1,01	Externa	Externa
L45_AC5	154	41,1		603	8,0	77	116	1092	981	939	2235	939	1,16	Externa	Externa

Baseando-se na Tab. 6.18 e Fig. 6.21, observa-se que, para as lajes da Série 3, a norma do ACI (2002) se apresentou como a mais conservadora na estimativa das cargas de ruptura (V_{Exp}/V_{ACI}), com média de 1,46, desvio padrão de 0,15 e coeficiente de variação de 10,6%), além de estimar mecanismos de ruptura diferentes dos experimentais. As cargas previstas pelo ACI para ruptura externa ficaram bem próximas das cargas experimentais.

Seguida do ACI (2002), a norma EC2 (1992) subestimou as cargas de ruptura para as lajes da Série 3, apresentando para a relação $V_{Exp}/V_{EC/92}$ um valor médio de 1,27, e os maiores valores para o desvio padrão (0,17) e para o coeficiente de variação (13,5%). O EC2 (1992) estimou mecanismos de ruptura diferentes dos experimentais, ressaltando que as cargas previstas para ruptura externa à região com armadura apresentaram-se próximas das cargas reais.

O EC2 (2001) apresentou também resultados conservadores, mostrando uma média de 1,23, com os menores valores, dentre todos analisados, para desvio padrão (0,02) e coeficiente de variação (1,9%). A NB1 (2003) forneceu estimativas pouco menos conservadoras que o EC2 (2001) ($V_{Exp}/V_{NB1/03} = 1,16$), porém com valores maiores para desvio padrão (0,05) e coeficiente de variação (4,4%).

A proposta do Handbook to BS8110 (1987) para a NB1 (2003) tendeu a melhorar os resultados estimados pela norma brasileira para as lajes com furos da Série 3, pois apresentou menor valor médio para V_{Exp}/V_{Prop} (1,04), apesar de valores para desvio padrão e coeficiente de variação pouco superiores (DP = 0,07 e CV = 6,3%).

O método da BS8110 (1997) estimou resultados mais satisfatórios que a NB1 (2003) e que a proposta para a NB1 (2003), pois apresentou valor médio para $V_{Exp}/V_{BS/97}$ igual a 1,02, e desvio padrão e coeficiente de variação inferiores (DP = 0,02 e CV = 2,1%). O Handbook to BS8110 (1987) apresentou, de maneira geral, resultados contra a segurança para as lajes com furos, com valor médio para a relação $V_{Exp}/V_{HB/87}$ de 0,96, e valores para o desvio padrão e coeficiente de variação relativamente altos.

Tabela 6.18 – Comparação dos resultados experimentais com os estimados pelas normas de projeto para as lajes da Série 3

Laje	$V_{Exp} /$	$V_{Exp} /$	$V_{Exp} /$	$V_{Exp} /$	$V_{Exp} /$	$V_{Exp} /$	$V_{Exp} /$
	$V_{ACI/02}$	$V_{BS/97}$	$V_{EC/92}$	$V_{EC/01}$	$V_{HB/87}$	$V_{NB1/03}$	V_{Prop}
L45_AC1	1,63	1,02	1,25	1,24	1,02	1,06	1,06
L45FFD_AC2	1,51	1,04	1,55	1,21	1,00	1,18	0,98
L45FFD_AC3	1,36	1,03	1,42	1,25	0,93	1,20	1,01
L45FFD_AC4	1,20	0,99	1,13	1,23	0,87	1,15	1,01
L45FFD_AC5	1,49	0,99	1,16	1,19	0,92	1,20	1,01
L45_AC5	1,56	1,04	1,15	1,24	1,04	1,16	1,16
MÉDIA	1,46	1,02	1,27	1,23	0,96	1,16	1,04
D.P.	0,15	0,02	0,17	0,02	0,07	0,05	0,07
C.V. (%)	10,6	2,1	13,5	1,9	6,9	4,4	6,3

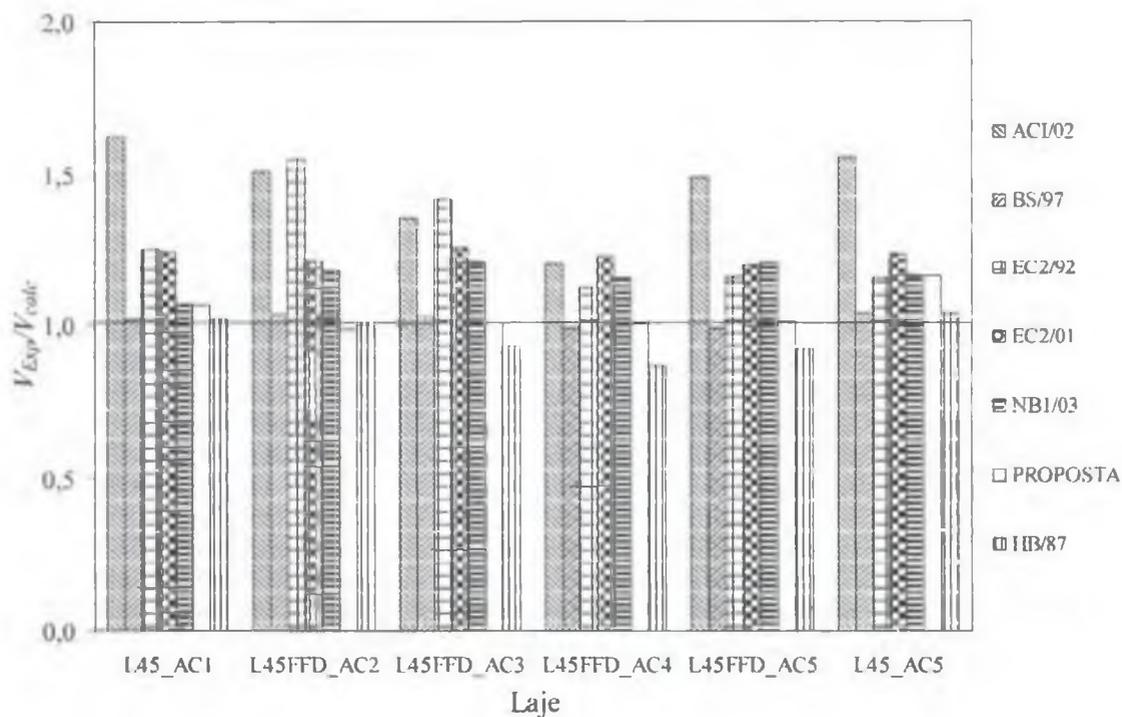


Figura 6.21 – Estimativas das normas de projeto para as lajes da Série 3

6.4.2 – ANÁLISE DO MÉTODO DE ROLL et al. (1971)

6.4.2.1 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA

A Tab. 6.19 apresenta uma comparação dos resultados experimentais com os estimados pela expressão de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3, em função da resistência à flexão das lajes (V_{flex}). As figs. 6.22 e 6.23 mostram a comparação dos resultados experimentais com a tendência dos resultados fornecidos pelo método de ROLL et al. (1971).

Observa-se que as cargas de ruptura experimentais foram superiores às estimadas pela expressão de ROLL et al. (1971) entre 21 e 74%. Como esperado, a considerável diferença entre os valores ocorreu devido à existência de armadura de cisalhamento nas lajes, que foram calculadas pela expressão de ROLL et al. (1971), que estima apenas a contribuição do concreto.

Tabela 6.19 – Estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3

Laje	$V_{flex} \cdot bd$ raiz(f'_c)	$V_{Exp} \cdot bd$ raiz(f'_c)	$V_{ROLL} \cdot bd$ raiz(f'_c)	V_{Exp} / V_{flex}	V_{ROLL} / V_{flex}	V_{Exp} / V_{ROLL}
L45_AC1	9,3	9,8	6,0	1,06	0,65	1,62
L45FFD_AC2	11,8	12,1	7,0	1,03	0,59	1,74
L45FFD_AC3	12,3	10,9	7,1	0,89	0,58	1,53
L45FFD_AC4	11,9	8,8	7,0	0,74	0,59	1,26
L45FFD_AC5	12,2	8,6	7,1	0,70	0,58	1,21
L45_AC5	9,1	8,3	6,0	0,92	0,66	1,40
MÉDIA						1,46
DESVIO PADRÃO						0,21
COEFICIENTE DE VARIACÃO (%)						14,3

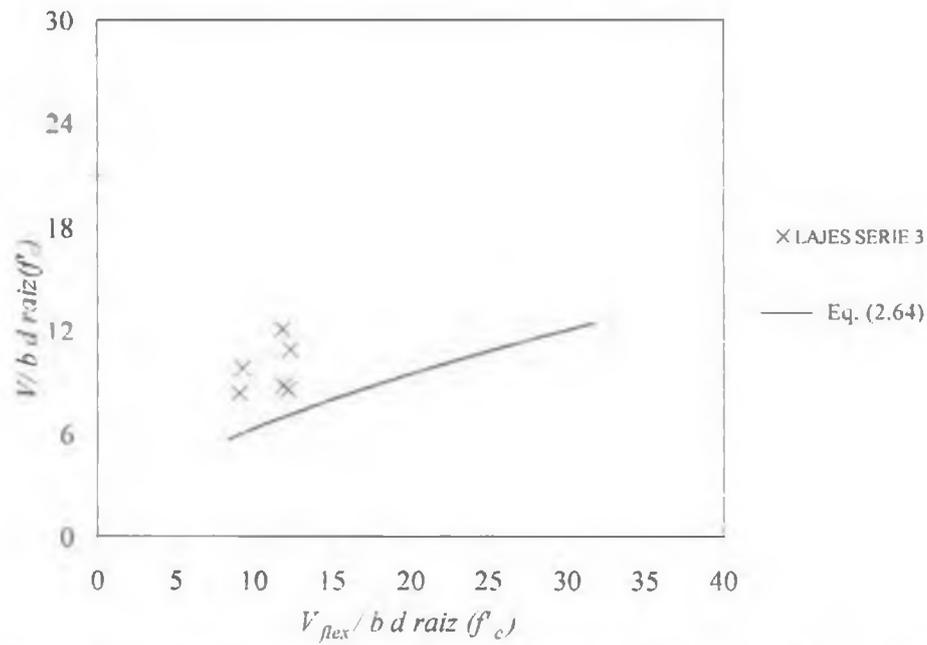


Figura 6.22 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3 – Curvas $V / b d \sqrt{f'_c}$ x $V_{flex} / b d \sqrt{f'_c}$

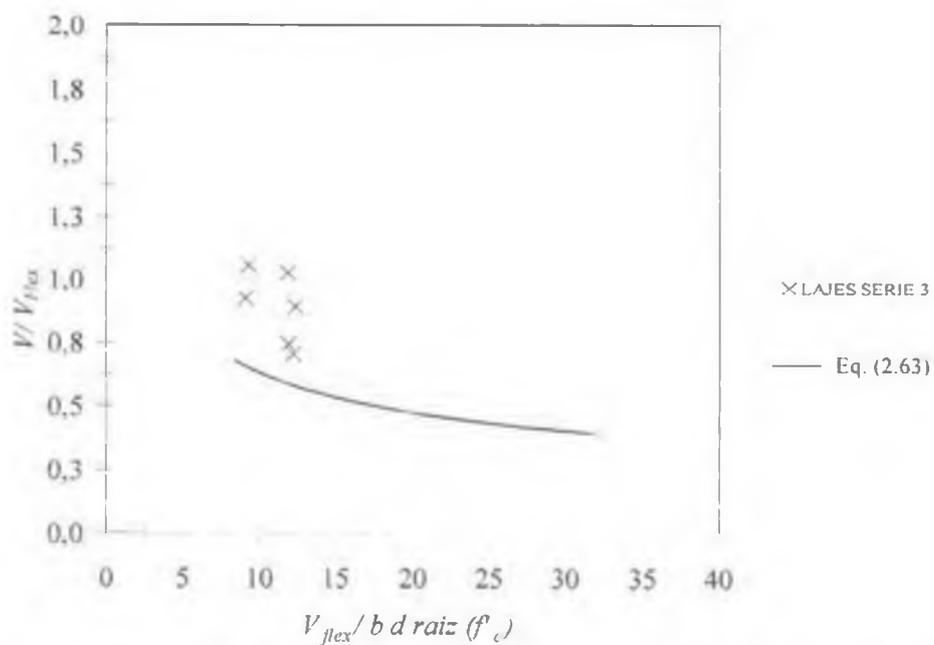


Figura 6.23 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3 – Curvas V / V_{flex} x $V_{flex} / b d \sqrt{f'_c}$

6.4.2.2 – LAJES DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA

A Tab. 6.20 apresenta as estimativas mostradas na Tab. 6.19 juntamente com as previsões do método de ROLL et al. (1971) para as lajes com armadura de cisalhamento da literatura, e as figs. 6.24 e 6.25 apresentam uma comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971).

Novamente, observa-se que os resultados experimentais foram superiores aos estimados pela equação de ROLL et al. (1971), sendo que a relação V_{Exp}/V_{ROLL} variou entre 1,21 e 2,46, com uma média de 1,77, desvio padrão de 0,32 e coeficiente de variação de 18,2%

Tabela 6.20 – Estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3 e da literatura

Autor	Laje	V_{flex}/bd raiz(f'_c)	V_{Exp}/bd raiz(f'_c)	V_{ROLL}/bd raiz(f'_c)	V_{Exp}/V_{flex}	V_{ROLL}/V_{flex}	V_{Exp}/V_{ROLL}
GOMES & ANDRADE (1995)	16	15,5	18,7	8,1	1,21	0,52	2,30
	17	17,6	18,1	8,8	1,03	0,50	2,06
	18	18,0	16,8	8,9	0,93	0,49	1,89
	19	20,6	19,6	9,6	0,95	0,47	2,04
	20	29,6	23,6	12,0	0,80	0,41	1,97
	21	20,7	17,5	9,6	0,84	0,47	1,81
	22	21,0	16,7	9,7	0,80	0,46	1,72
	24	29,5	26,1	12,0	0,88	0,41	2,18
	25	29,6	26,9	12,0	0,91	0,41	2,24
	26	30,4	26,9	12,2	0,88	0,40	2,20
REGAN (1999)	3	12,3	10,0	7,1	0,81	0,58	1,40
	4	19,8	14,7	9,4	0,75	0,47	1,57
	5	18,2	13,9	8,9	0,76	0,49	1,56
	8	31,7	16,6	12,5	0,52	0,40	1,32
IOANOCU (2001)	PSSCH1	9,8	10,7	6,2	1,09	0,64	1,71
	PSSCH2	10,3	10,0	6,4	0,97	0,62	1,55
	PSSCH3	19,4	16,7	9,3	0,86	0,48	1,80
	PSSCH4a	15,7	14,5	8,2	0,92	0,52	1,77

Tabela 6.20 – Estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3 e da literatura (continuação)

Autor	Laje	V_{flex}/bd $raiz(f'_c)$	V_{exp}/bd $raiz(f'_c)$	V_{ROLL}/bd $raiz(f'_c)$	$V_{exp}/$ V_{flex}	$V_{ROLL}/$ V_{flex}	$V_{exp}/$ V_{ROLL}
SILVA (2003)	L7	25,5	26,8	10,9	1,05	0,43	2,46
	L8	12,7	14,4	7,2	1,13	0,57	1,98
	L9	8,4	9,5	5,7	1,13	0,68	1,67
	L10	29,6	23,0	12,0	0,77	0,41	1,91
	L11	14,7	12,2	7,9	0,83	0,54	1,55
SÉRIE 3	L45_AC1	9,3	9,8	6,0	1,06	0,65	1,62
	L45FFD_AC2	11,8	12,1	7,0	1,03	0,59	1,74
	L45FFD_AC3	12,3	10,9	7,1	0,89	0,58	1,53
	L45FFD_AC4	11,9	8,8	7,0	0,74	0,59	1,26
	L45FFD_AC5	12,2	8,6	7,1	0,70	0,58	1,21
	L45_AC5	9,1	8,3	6,0	0,92	0,66	1,40
MÉDIA							1,77
DESVIO PADRÃO							0,32
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)							18,2

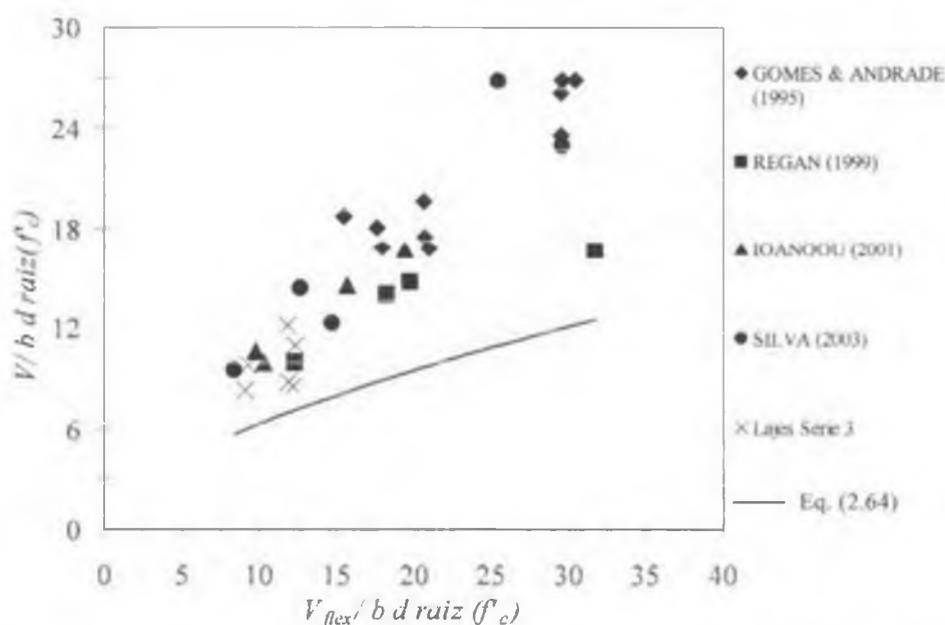


Figura 6.24– Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3 e da literatura – Curvas $V / b d \sqrt{f'_c}$ x

$$V_{flex} / b d \sqrt{f'_c}$$

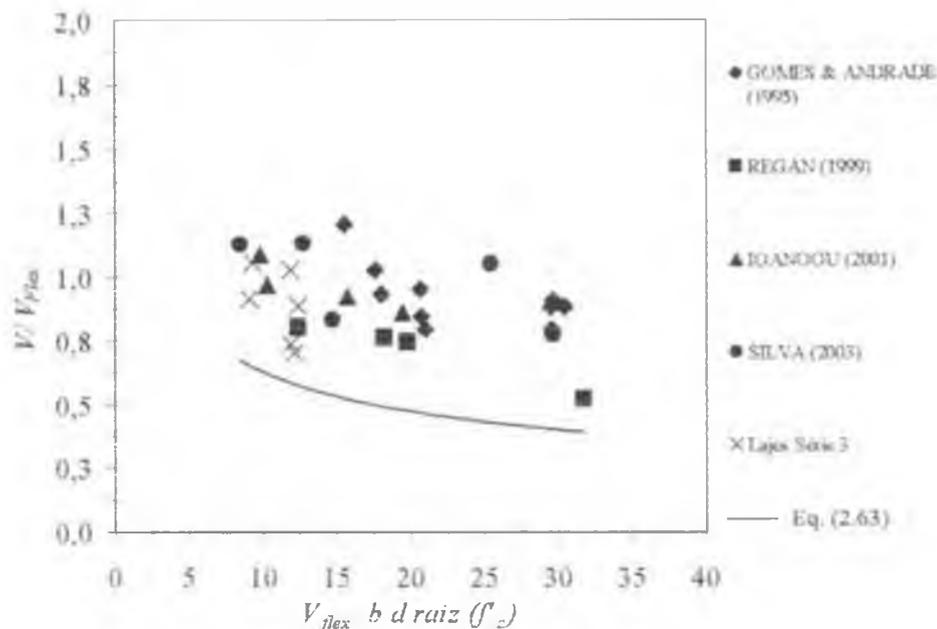


Figura 6.25 – Comparação dos resultados experimentais com a tendência das estimativas do método de ROLL et al. (1971) para as lajes da Série 3 e da literatura – Curvas V/V_{flex} x

$$V_{flex} / bd \sqrt{f'_c}$$

6.4.2.3 – DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PARCELA DE ARMADURA DE CISALHAMENTO NO CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO UTILIZANDO A EXPRESSÃO DE ROLL et al. (1971)

As equações propostas por ROLL et al. (1971) basearam-se em ensaios realizados com lajes cuja principal variável foi o furo (tamanho, forma, número e localização), não utilizando armadura de cisalhamento nas lajes.

Os perímetros de controle calculados externamente à região de armadura de cisalhamento, para as lajes que apresentaram a superfície de ruptura localizada externa à armadura (lajes do Grupo 3, de SILVA (2003), e algumas de GOMES & ANDRADE (1995)), mostraram que a equação de ROLL et al. não é adequada para estimar cargas de ruptura associadas com superfície de ruptura externa.

Para as lajes que apresentaram superfície de ruptura cruzando a armadura de cisalhamento, fez-se, inicialmente, uma normalização das cargas de ruptura estimadas pela equação de

ROLL et al. (1971), referentes à contribuição do concreto, baseando-se no valor médio de V_{Exp}/V_{calc} igual a 1,30 ($V_{calc}/V_{Exp} = 0.77$), obtido dos resultados das lajes da Série 2.

A diferença entre a carga experimental e a parcela referente à contribuição da armadura de cisalhamento, calculada tomando-se como número de camadas o valor de $1,5 d/s_r$, assim como algumas normas de projeto, forneceu a provável contribuição do concreto em lajes com tal armadura.

A relação entre a parcela referente à contribuição do concreto, em lajes com armadura de cisalhamento, e a do concreto, em lajes sem a armadura, foi obtido para cada uma das lajes que tiveram superfície de ruptura cruzando a região armada.

A Tab. 6.21 apresenta as cargas de ruptura estimadas pela equação de ROLL et al. (V_{ROLL}) e suas correspondentes após a normalização (V_{ROLL}^*), a parcela referente à armadura de cisalhamento distribuída em $1,5 d/s_r$ camadas (V_s), a parcela do concreto quando da existência da armadura (V_c), e, por fim, o coeficiente que relaciona a V_c (laje com armadura de cisalhamento) e V_{ROLL}^* (laje sem armadura de cisalhamento).

Observa-se que a contribuição do concreto na resistência à punção é reduzida quando existe armadura de cisalhamento, em relação a sua parcela em lajes sem a armadura, em 12%, em média, com desvio padrão e coeficiente de variação, iguais a, respectivamente, 0,14 e 16,2%.

Tabela 6.21 – Resultados das estimativas para armadura e concreto das lajes com armadura de cisalhamento, utilizando a equação de ROLL et al. (1971)

Autor	Laje	V_{ROLL} (kN)	V_{ROLL}^* (kN)	V_{Exp} (kN)	V_s (kN)	V_c (kN)	V_c / V_{ROLL}^*
GOME S & ANDR ADE (1995)	L21	495	643	896	374	522	0,81
	L22	484	629	832	209	623	0,99
	L25	402	522	900	565	335	0,64
REGAN (1999)	L3	370	480	516	131	385	0,80
	L4	303	394	476	126	350	0,89
	L5	318	413	496	71	425	1,03
	L8	254	330	336	-	336	1,02
MÉDIA							0,88
DESVIO PADRÃO							0,14
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)							16,2

6.4.3 – COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DA NB1 (2003) COM AS DA PROPOSTA PARA A NORMA BRASILEIRA

A Tab. 6.22 apresenta uma comparação das estimativas da norma NB1 (2003) com as fornecidas pela proposta para a norma para as lajes da Série 3 e da literatura, e os valores médios para a relação V_{Exp}/V_{calc} , desvio padrão e coeficiente de variação.

Para as lajes de GOMES & ANDRADE (1995), a proposta do Handbook para a NB1 (2003) estimou resultados mais conservadores que a norma para a relação V_{Exp}/V_{calc} , para todas as lajes com furos.

A proposta do Handbook para a NB1 (2003) para o cálculo do perímetro efetivo de controle, através da desconsideração dos trechos compreendidos entre linhas de projeção que partem do vértice do pilar e tangenciam os furos circulares, forneceu valores inferiores para o perímetro efetivo de controle, que os obtidos da norma, e conseqüentemente, menores cargas de ruptura estimadas.

A localização dos furos, próximos aos vértices do pilar tende a fornecer resultados menores para o perímetro, quando se usam linhas partindo do vértice do pilar, ao invés do centro deste.

Para a laje 3 (sem furo) de REGAN (1999), a estimativa da NB1 (2003) foi semelhante à da proposta para a norma, como esperado. Para as lajes com furos, a proposta melhorou os resultados pois, nestes casos, o perímetro de controle efetivo foi obtido a partir de linhas de projeção paralelas às face do furo, obtendo-se um valor maior para este, em relação ao da norma, e conseqüentemente, cargas de ruptura estimadas mais próximas das experimentais.

A NB1 (2003) forneceu estimativas para V_{Exp}/V_{calc} entre 1,22 e 1,81, enquanto que a proposta do Handbook para a NB1 (2003), entre 1,12 e 1,26.

Para a laje PSSCH4a de IOANNOU (2001), a relação V_{Exp}/V_{calc} obtida através da NB1 (2003) foi de 1,21, enquanto que, da proposta do Handbook para a norma, foi de 0,92.

Para as lajes PSSCH2 e PSSCH3, ocorreu o inverso. Observa-se nas configurações dos furos das lajes PSSCH2 e PSSCH3 e das lajes de GOMES & ANDRADE (1995) (furos afastados do pilar) que os resultados apresentaram tendências semelhantes de terem o valor de V_{calc} diminuído com a utilização da proposta do Handbook, pois ocorreu redução do perímetro efetivo de controle.

As lajes sem furos ensaiadas por SILVA (2003) apresentaram as estimativas da NB1 (2003) semelhantes às da proposta do Handbook para a norma. Para as lajes com furos posicionados adjacentes ao pilar, as cargas de ruptura estimadas pela proposta foram superiores às da NB1 (2003), e conseqüentemente, as relações V_{Exp}/V_{calc} foram menores (1,00 para L10 e 1,07 para L11), como mostra a Tab. 6.22.

Para as lajes da Série 3, o comportamento das estimativas da norma e da proposta foi semelhante ao ocorrido com as lajes de SILVA (2003), ou seja, as estimativas da proposta para a relação V_{Exp}/V_{calc} foram inferiores às da norma.

Observa-se na Tab. 6.22 que o ACI (2002) apresentou o maior valor para a estimativa média de V_{Exp}/V_{calc} (1,92), e os maiores valores para desvio padrão (0,57) e coeficiente de variação (29,7%), seguido do EC2 (2001), que forneceu uma relação média de V_{Exp}/V_{calc} igual a 1,35, desvio padrão de 0,27 e coeficiente de variação de 20,1%.

Verifica-se que o Handbook, dentre todos os métodos de cálculo analisados, apresentou a melhor estimativa média para a relação V_{Exp}/V_{calc} , seguido da proposta do Handbook para a NB1 (2003), que teve valor médio de V_{Exp}/V_{calc} igual a 1,11, desvio padrão de 0,14 e coeficiente de variação de 12,3%.

As figs. 6.26 a 6.30 mostram uma comparação das estimativas da norma NB1 (2003) com as da proposta para esta norma, respectivamente, para as lajes de GOMES & ANDRADE (1995), REGAN (1999), IOANNOU (2001), SILVA (2003) e da Série 3.

Tabela 6.22 – Comparação das estimativas das normas de projeto com as da proposta para a NBI (2003) para as lajes da Série 3 e da literatura

Autor	Laje	V_{Exp}/V_{calc}						
		ACI'02	BS'97	EC2'92	EC2'01	HB/87	NBI'03	PROPOSTA
GOMES & ANDRADE (1995)	16	2,38	1,10	1,31	1,43	1,10	1,20	1,19
	17	2,14	1,04	1,18	1,27	1,07	1,07	1,12
	18	1,88	1,04	1,02	1,13	1,08	1,06	1,17
	19	1,92	1,04	1,04	1,15	1,07	1,08	1,17
	20	1,19	1,25	1,34	0,99	1,29	0,97	1,02
	21	1,60	1,32	1,42	1,24	1,37	1,22	1,26
	22	2,08	1,44	1,29	1,52	1,51	1,47	1,54
	24	1,93	1,05	1,04	1,13	1,09	1,06	1,16
	25	1,37	1,43	1,53	1,13	1,48	1,11	1,17
26	1,47	1,04	1,20	1,13	1,07	1,05	1,11	
REGAN (1999)	3	2,04	1,00	1,00	1,34	1,00	1,22	1,22
	4	2,64	1,42	1,53	1,97	1,02	1,81	1,26
	5	2,53	1,68	1,40	1,92	1,14	1,77	1,23
	8	2,97	1,82	1,38	1,86	0,94	1,70	1,12
IOANNOU (2001)	PSSCH1	1,34	1,23	0,98	1,12	1,00	1,06	1,05
	PSSCH2	1,23	0,93	1,06	0,96	0,90	0,92	0,94
	PSSCH3	1,60	1,16	1,26	1,17	1,22	1,12	1,29
	PSSCH4a	1,54	1,09	1,35	1,26	0,83	1,21	0,92
SILVA (2003)	L7	2,59	1,00	1,17	1,48	1,00	1,05	1,05
	L8	2,77	1,07	1,25	1,59	1,07	1,13	1,12
	L9	2,76	1,06	1,24	1,58	1,06	1,12	1,12
	L10	2,21	1,07	1,01	1,19	0,90	1,07	1,00
	L11	2,36	1,15	1,07	1,28	0,97	1,14	1,07
SÉRIE 3	L45_AC1	1,63	1,02	1,25	1,24	1,02	1,06	1,06
	L45FFD_AC2	1,51	1,04	1,55	1,21	1,00	1,18	0,98
	L45FFD_AC3	1,36	1,03	1,42	1,25	0,93	1,20	1,01
	L45FFD_AC4	1,20	0,99	1,12	1,23	0,87	1,15	1,01
	L45FFD_AC5	1,49	0,99	1,15	1,19	0,92	1,20	1,01
	L45_AC5	1,56	1,04	1,15	1,24	1,04	1,16	1,16
MEDIA		1,92	1,16	1,24	1,35	1,04	1,22	1,11
DESVIO PADRÃO		0,57	0,24	0,17	0,27	0,17	0,24	0,14
COEF.VARIAÇÃO (%)		29,7	20,3	14,1	20,1	16,0	19,5	12,3

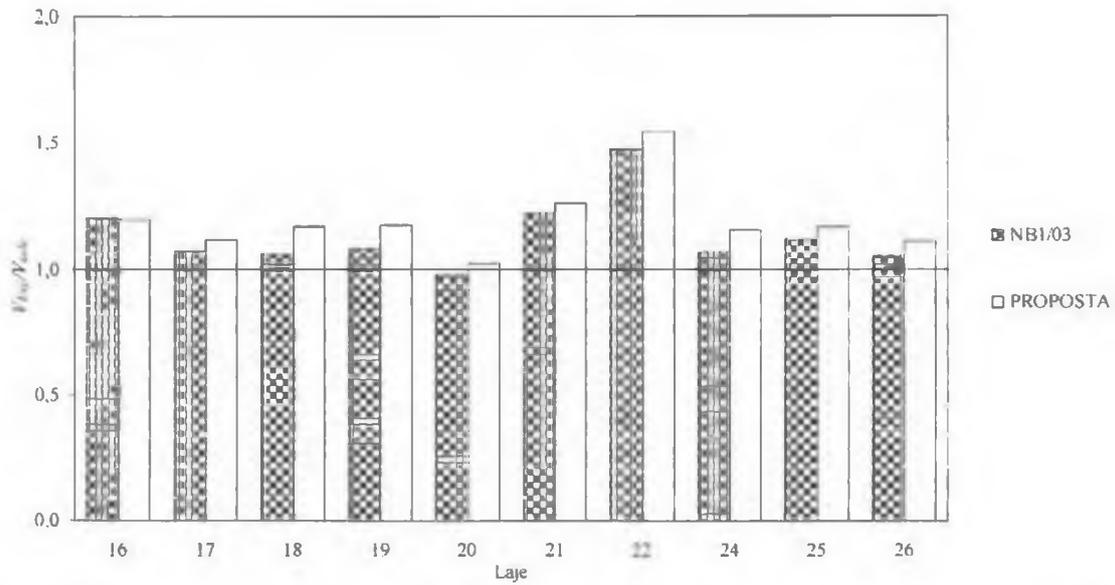


Figura 6.26 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de GOMES & ANDRADE (1995)

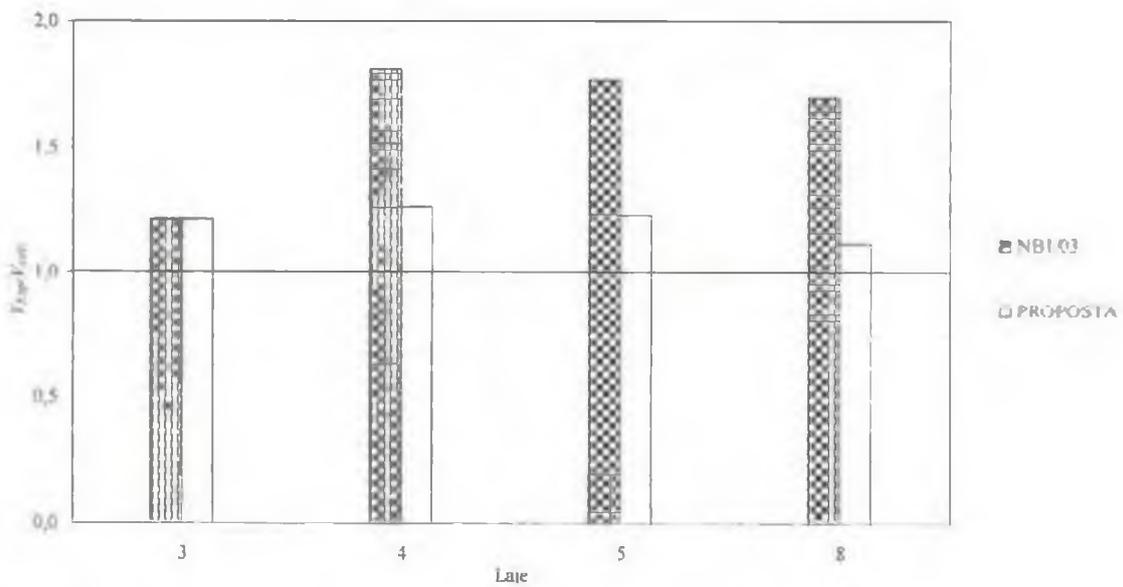


Figura 6.27 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de REGAN (1999)

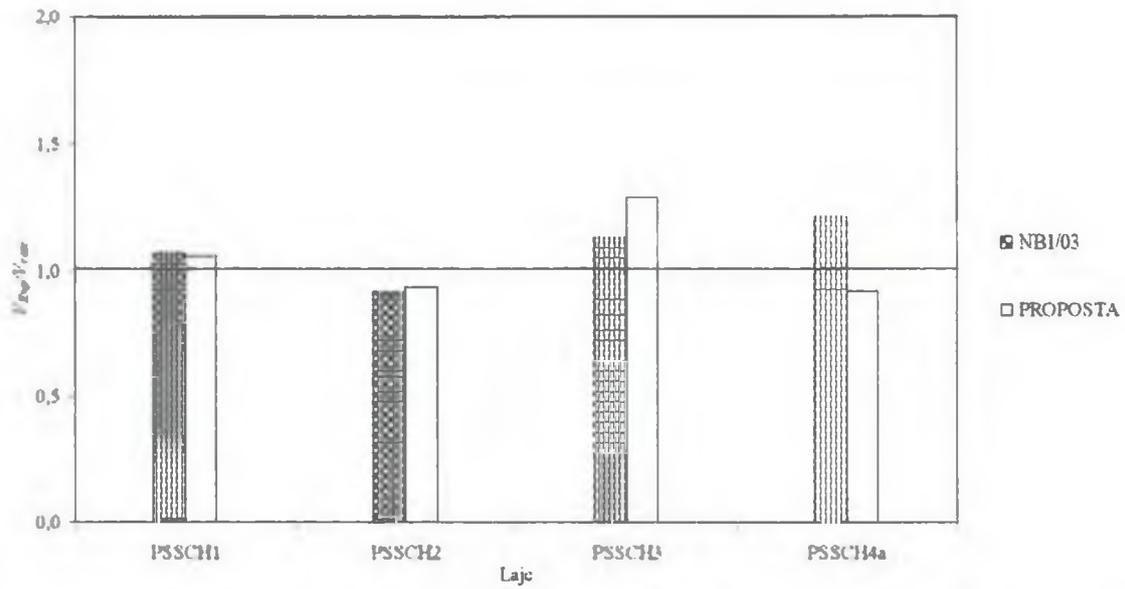


Figura 6.28 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de IOANNOU (2001)

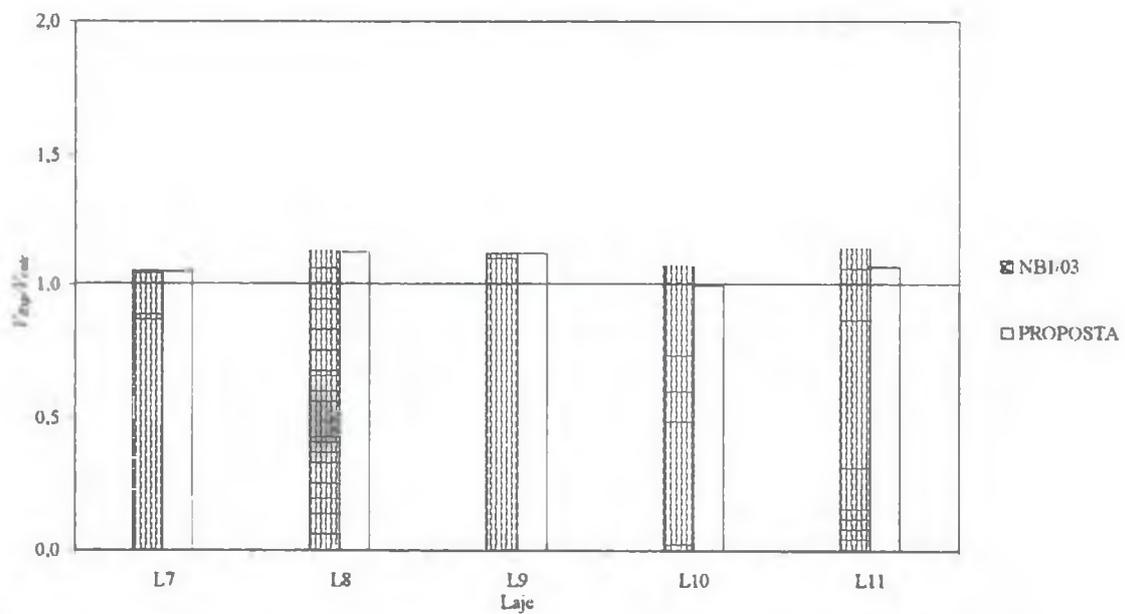


Figura 6.29 – Comparação das estimativas da NB1 (2003) com as da proposta para a norma para as lajes com armadura de cisalhamento de SILVA (2003)

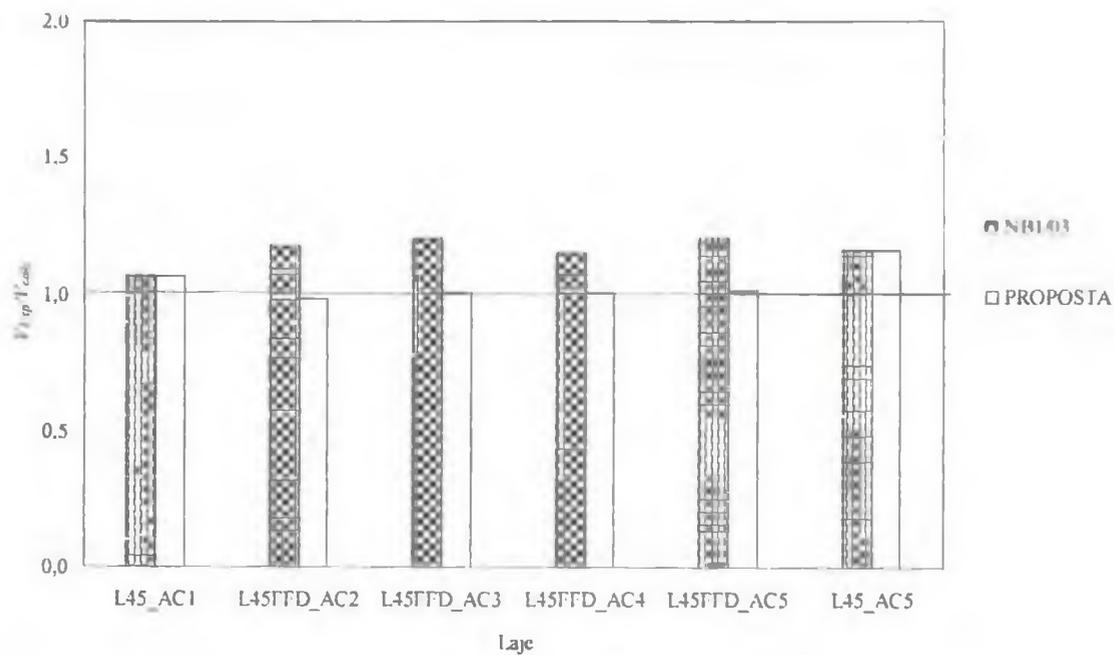


Figura 6.30 – Comparação das estimativas da NBI (2003) com as da proposta para a norma para as lajes da Série 3

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 – CONCLUSÕES

As dimensões das lajes e as variáveis utilizadas na pesquisa (furos, seção do pilar, armadura de cisalhamento, relações c_{max}/c_{min} e c_{max}/d), definidas em função da utilização prática, de pesquisas anteriores e das condições disponíveis no laboratório, foram consideradas satisfatórias para o estudo do puncionamento das lajes com pilares com relação das dimensões da seção transversal retangular (c_{max}/c_{min}) de até 4 e furos com dimensões da mesma ordem de grandeza do pilar.

O aumento da relação c_{max}/c_{min} e a utilização de armadura de cisalhamento, na forma estudada na pesquisa, conduziram a cargas últimas mais próximas das correspondentes à ruptura por flexão das lajes.

A disposição das placas de aço utilizadas para a simulação de variação da seção dos pilares estudados apresentou desempenho satisfatório, pois, permitiu um espraiamento uniforme da carga aplicada sobre a superfície inferior da laje, além de ter evitado uma eventual flexão das chapas.

A inclusão do parâmetro que relaciona a dimensão do pilar e a altura útil da laje (c_{max}/d) nas expressões de cálculo da resistência à punção das normas ACI (2002) e CEB (1991) permitiu que as estimativas das normas se aproximassem dos resultados experimentais das lajes

A proposta, para a NB1 (2003), de cálculo do perímetro efetivo de controle de lajes com furos próximos ao pilar, utilizando o método recomendado pelo Handbook to BS8110 (1987) se mostrou como uma possível alternativa para estimar a resistência última de lajes sob punção.

7.1.1 – LAJES COM PILARES RETANGULARES (SÉRIE 1)

7.1.1.1 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os deslocamentos das lajes apresentaram uma distribuição linear nas direções x e y . Os maiores valores foram registrados nos pontos mais próximos da área carregada, sendo que os pontos próximos à menor dimensão do pilar se deslocaram mais que os próximos à maior dimensão. Isto significa menor deformação da laje em relação ao centro do pilar, uma vez que no ensaio o pilar é que se move (e o centro do pilar tem o maior deslocamento medido), enquanto que as bordas da laje permanecem fixas, a menos do deslocamento devido à deformação dos tirantes de fixação.

7.1.1.2 – DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO

As barras da armadura de flexão mais solicitadas à tração, com as maiores deformações, foram, na maioria dos casos, aquelas dispostas na direção perpendicular à maior dimensão do pilar, que, em algumas lajes, atingiram o escoamento sob cargas próximas a ruptura por punção. Isto indica que os maiores esforços de flexão ocorreram nessa direção (x), na região delimitada pelo pilar.

7.1.1.3 – FISSURAÇÃO

As primeiras fissuras a surgir nas lajes foram as radiais, seguidas pelas tangenciais em níveis maiores de carregamento.

7.1.1.4 – MODOS, CARGAS E SUPERFÍCIES DE RUPTURA

Todas as lajes com pilares de seção retangular romperam por punção. O aumento da relação c_{max}/c_{min} do pilar conduziu ao aumento da carga de ruptura das lajes, em níveis inferiores à resistência à flexão das lajes, calculada pela teoria das linhas de ruptura. No entanto, a taxa de 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). As superfícies de ruptura observadas nos ensaios apresentaram uma inclinação entre 20 e 35 graus em relação ao plano médio da laje, como mostra REGAN & BRAESTRUP (1985).

7.1.1.5 – NORMAS DE PROJETO E MÉTODOS DE CÁLCULO DE PESQUISADORES

Com relação à influência da geometria do pilar, as normas que apresentam considerações específicas sobre o assunto, ACI (2002), EC2 (1992) e NB1 (1978), forneceram as estimativas mais conservadoras para as cargas de ruptura por punção, com maiores valores para desvio padrão e coeficiente de variação.

Melhores estimativas foram fornecidas pelo CEB (1991) e NB1 (2003), com média de 0,99, desvio padrão de 0,11 e coeficiente de variação de 10,6%. As estimativas de OLIVEIRA (2003), com a inclusão do fator ($c_{m\acute{a}x}/d$) tendeu a fornecer resultados levemente mais conservadores que a NB1 e CEB.

7.1.1.6 – PROPOSTA DE CONSIDERAÇÃO DO PARÂMETRO ($c_{m\acute{a}x}/d$)

A proposta de inclusão do fator $c_{m\acute{a}x}/d$ nas expressões de cálculo da resistência à punção das normas do ACI (2002) e CEB (1991) conduziu a melhores estimativas, com menor desvio padrão e coeficiente de variação, e a favor da segurança.

As normas do ACI (2002) e CEB (1991) forneceram valores médios para a relação V_{Exp}/V_{calc} iguais a, respectivamente, 1,43 e 0,99, enquanto que as propostas correspondentes às normas, 1,12 e 1,04. As expressões das normas do ACI (2002) e CEB (1991), juntamente com os fatores propostos, são apresentadas abaixo.

$$V_{prop_CEB} = 0,18 \left(0,95 \left(\frac{c_{m\acute{a}x}}{d} \right)^{0,035} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100 \rho f_c)^{\frac{1}{3}} u d$$

$$V_{prop-ACI} = \frac{0,5}{(c_{max}/d)^{0,1756}} \sqrt{f_c} b_0 d$$

7.1.2–LAJES COM FUROS E/OU ARMADURA DE CISALHAMENTO (SÉRIE 2 E 3)

7.1.2.1 – ARMADURA DE FLEXÃO

A utilização de barras adicionais de armadura de flexão na região em torno dos furos, como utilizado nesta pesquisa, não provocou acréscimo na resistência ao funcionamento das lajes. Os grampos utilizados como ancoragem da armadura principal de flexão, que foi interceptada pelos furos, não alteraram as cargas de ruptura das lajes com furos.

7.1.2.2 – ARMADURA DE CISALHAMENTO

A armadura de cisalhamento constituída de “studs”, que são conectores do tipo pino com chapas de aço nas extremidades, com a função de garantir a ancoragem na armadura de flexão, apresentou um adequado desempenho, com a armadura de cisalhamento sendo ancorada externamente às barras superior e inferior da armadura de flexão.

7.1.2.3 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS

A presença e o aumento no número de furos nas lajes conduziu ao aumento dos deslocamentos verticais das lajes em relação à laje monolítica.

As barras adicionais da armadura de flexão na região próxima ao furo reduziram os deslocamentos verticais das lajes, em relação às lajes sem tal armadura, permitindo que lajes com furos apresentassem deslocamentos semelhantes aos de lajes monolíticas.

A utilização de armadura de cisalhamento nas lajes permitiu uma redução dos deslocamentos verticais, para níveis de carga correspondentes. As lajes com armadura de cisalhamento

apresentaram maior ductilidade antes da ruptura, diferentemente das lajes sem tal armadura, independente da presença de furos.

7.1.2.4 – DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE FLEXÃO

As barras da armadura de flexão descontínuas (que foram interceptadas pelos furos) das lajes da Série 2, praticamente não foram solicitadas. Os pontos instrumentados das armaduras que registraram as maiores deformações foram aqueles localizados próximos à ligação laje-pilar.

A presença de barras adicionais na armadura de flexão na região dos furos das lajes da Série 2, apenas na direção paralela à menor dimensão do pilar (direção x), permitiu que as deformações medidas em cada uma destas barras reduzissem, quando comparadas com as lajes sem barras adicionais.

Apenas algumas barras dispostas na direção x (próximo ao centro da laje), na laje L45FFS_CG, entraram em escoamento sob carga próxima da ruptura (punção).

7.1.2.5 – DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE CISALHAMENTO

Com exceção das lajes L45FFD_AC5 e L45_AC5, com furos e armadura de cisalhamento, todas as demais lajes não apresentaram elementos da armadura de cisalhamento em processo de escoamento.

Os elementos da armadura de cisalhamento situados mais próximos aos furos foram tão solicitados quanto àqueles posicionados próximos ao meio do pilar. Na maioria dos casos, as maiores deformações foram registradas nos elementos das últimas camadas, uma vez que as superfícies de ruptura de todas as lajes com armadura de cisalhamento se desenvolveram externamente à região armada.

7.1.2.6 – FISSURAÇÃO

As primeiras fissuras a surgir nas lajes com furos e/ou armadura de cisalhamento foram as radiais, seguidas pelas tangenciais em níveis maiores de carregamento. Nas lajes com furos, as fissuras radiais surgiram inicialmente nos vértices dos furos e se desenvolveram em direção às bordas da laje.

As fissuras circunferenciais foram observadas nas faces internas dos furos com carregamento superior ao registrado no bordo tracionado da laje. As fissuras observadas nas faces dos furos se desenvolveram com o carregamento até se tornarem, na maioria dos casos, na própria superfície de ruptura.

7.1.2.7 – MODOS, CARGAS E SUPERFÍCIES DE RUPTURA

Todas as lajes com furos e/ou armadura de cisalhamento romperam por punção. Nas lajes sem armadura de cisalhamento a ruptura ocorreu de forma brusca e repentina, enquanto que, nas lajes com armadura de cisalhamento a ruptura se desenvolveu com algum aviso prévio.

A presença de furos adjacentes ao pilar reduziu a carga de ruptura das lajes rompendo por punção em até 24% (lajes L45_AC5 e L45FFD_AC5).

A utilização de armadura de cisalhamento nas lajes sem furos conduziu a um aumento de até 48% na carga de ruptura (lajes L45 e L45_AC1), chegando a atingir níveis próximos da resistência à flexão. Nas lajes com furos, a armadura de cisalhamento elevou a carga de ruptura em até 80% (lajes L45FFD e L45FFD_AC2).

O uso de armadura de cisalhamento, nas lajes com furos, permitiu à laje alcançar resistência à punção, no mínimo, igual à da laje similar monolítica (lajes L45 e L45FFD_AC5).

Devido à existência de furos adjacentes ao pilar, as superfícies de ruptura das lajes com furos e sem armadura de cisalhamento se desenvolveram de forma diferente daquelas registradas nas lajes monolíticas, com inclinações, em relação ao plano da laje, entre 15 e 60 graus.

No caso das lajes com armadura de cisalhamento, embora tenha ocorrido fissuras secundárias cruzando os elementos da armadura, como visualizado nas fotografias, a superfície de ruptura

ocorreu externamente à região com armadura de cisalhamento, apresentando inclinações que variaram entre 15 e 30 graus.

7.1.2.8 – NORMAS DE PROJETO E MÉTODOS DE CÁLCULO DE PESQUISADORES

As normas que consideram a influência de furos no cálculo da resistência à punção, através da redução do perímetro de controle, com linhas de projeção radial que partem do centro do pilar e tangenciam o furo (ACI (2002), BS8110 (1997), EC2 (1992), EC2 (2001), e NB1 (2003)), apresentaram resultados mais a favor da segurança em relação às demais normas de projeto e métodos de cálculo, para as lajes das séries 2 e 3.

O Handbook to BS8110 (1987), que sugere que o perímetro de controle seja calculado tomando-se linhas de projeção paralelas às faces do furo, forneceu as melhores estimativas, juntamente com o método de cálculo proposto por ROLL et al. (1971), com os menores valores para o desvio padrão e coeficiente de variação, para as lajes da Série 2. Para as lajes do Série 3, o Handbook to BS8110 (1987) forneceu estimativas de carga e mecanismos de ruptura contra a segurança para a maioria das lajes.

As normas NB1 (2003) e EC2 (2001) foram conservadoras apenas nas estimativas das cargas de ruptura das lajes da Série 3, pois previram corretamente os mecanismos de ruptura, enquanto que a BS8110 (1997) foi a que apresentou as melhores estimativas, tanto para cargas quanto para mecanismos de ruptura.

7.1.2.9 – PROPOSTA DE CÁLCULO DO PERÍMETRO EFETIVO DE CONTROLE PARA A NB1 (2003)

A proposta de calcular o perímetro de controle de acordo com o Handbook (1987) utilizando as expressões da norma brasileira NB1 (2003), conforme a Fig. 7.1, forneceu melhores estimativas que as duas referidas normas de projeto, além de ter estimado, para as lajes com armadura de cisalhamento, mecanismos de ruptura coincidentes com os experimentais:

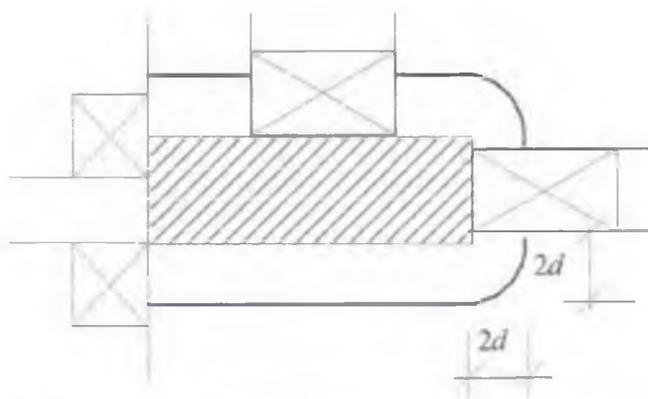


Figura 7.1 – Perímetro efetivo de controle proposto para a NB1 (2003)

7.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ensaiai mais lajes com furos e armadura de cisalhamento, mas com essa armadura dimensionada para que a superfície de ruptura cruze a armadura, e esse mecanismo de ruptura possa ser mais bem estudado. Estudar novas distribuições da armadura de cisalhamento na região dos furos, especialmente em torno do pilar.

Investigar o comportamento de lajes cogumelo com furos e pilares situados nos bordos ou cantos dessas lajes.

Estudar o efeito da relação entre as dimensões do pilar de seção retangular, mantendo constante o perímetro do pilar, para se ter menor variação do nível de tensões no pilar e no entorno.

Na realização de ensaios experimentais, sugere-se utilizar pilaretes monoliticamente ligados às lajes, evitando as placas de aço. Assim, o ensaio pode retratar com mais fidelidade a situação real de uma estrutura, embora não reduza o elevado nível de tensões atuantes nas extremidades do pilar.

Estudar modelos eficientes de cálculo dos deslocamentos das lajes cogumelo, monolíticas ou não, de modo que os resultados previstos se aproximem dos experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 318 (1963). *Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318 – 63)*. SP-10, American Concrete Institute, Detroit, 1963, 91 pp.
- ACI Committee 318 (1970). “*Proposed Revision of ACI Committee 318-63: Building Code Requirements for Reinforced Concrete*”. *ACI Journal, Proceedings* V.67, N° 2, Feb. 1970, p. 77-186.
- ACI Committee 318 (1989). *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318 – 89)*. American Concrete Institute, Detroit, 1989.
- ACI Committee 318 (1995). *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318 – 95) and Commentary (ACI 318R-95)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1995, 369 pp.
- ACI Committee 318 (2002). *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318 – 02) and Commentary (ACI 318R-02)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002, 391 pp.
- ACI-ASCE Committee 326 (1962). “*Shear and Diagonal Tension, Part 3 – Slabs and Footings*”. *ACI Journal, Proceedings* V.59, N° 3, Mar. 1962, p. 353-396.
- ACI-ASCE Committee 426 (1974). “*The shear strength of reinforced concrete members-slabs*”. *Proceedings ASCE*, vol. 100 (S18), Aug. 1974, p. 1543-1591.
- AL-YOUSIF, A.T., REGAN, P.E. “*Punching resistances of rc slabs supported by large an/or elongated columns*”. *The Structural Engineer*, March, 2003, p. 130-134.
- ANDRADE, M.A.S. (1999). “*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 pp.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado – Procedimento*. Rio de Janeiro, 1978.
- 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 a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-5739/94 – *Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro, 1994.
- BS8110 (1997). *Structural Use of Concrete : Part 1, Code of Practice for Design and Construction*. (BS 8110 :Part 1 :1997), British Standards Institution, London, 1997.
- CEB-FIP MC90 (1991). “*CEB-FIP Model Code 1990: Final Draft*”. Bulletin D'Information 204, Comité Euro-International du Béton, Lausanne, July 1991.
- CEB-FIP Bulletin 2 (1999). “*Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990*”. Lausanne, July 1999, 305 pp.
- CEB-FIP Bulletin 12 (2001). “*Punching of structural concrete slabs*”. Lausanne, April 2001, 307 pp.
- DILGER, W., GHALI, A. (1981). “*Shear reinforcement for concrete slabs*”. Proceeding ASCE, vol. 107 (ST12), Dec. 1981, p. 2403-2430.
- DIAZ DE COSSIO, R. (1962) Discussion of “*Shear and Diagonal Tension.. Part 3 – Slabs and Footings*”, by ACI-ASCE Committee 326, ACI Journal, Proceedings V.59, n.9, September 1962, p. 1323-1332.
- ELGABRY, A.A., GHALI, A. “*Design of stud-shear reinforcement for slabs*”. ACI Structural Journal, May-June 1990, p.350-361.
- EL-SALAKAWY, POLAK, M. A, SOLIMAN, M. H. (1999). “*Reinforced Concrete Slab-Column Edge Connections with Openings*”. ACI Structural Journal, v.96, n.1, January-February 1999, p. 79-87.
- ELSTNER, R.C., HOGNESTAD, E. “*Shearing strength of reinforced concrete slabs*”. Journal of the American Concrete Institute, vol.28, n.1, July 1956.
- EUROCODE 2 (1992). “*Design of concrete structures Part1: General Rules and Rules for Buildings*”. European Prestandard ENV 1992-1-1:1991. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 1992, 253 pp.
- EUROCODE 2 (2001). “*Design of concrete structures Part1: General Rules and Rules for Buildings*”. European Prestandard ENV 2001-1-1:2001. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2001, 253 pp.
- FORSELL, C., HOLMBERG, A., *Stampellast pa platter av betong*. Betong, v.31, n.2, 1946, p. 95-123.

- GOMES, R.B. (1991). "*Punching Resistance of Reinforced Concrete Flat Slabs with Shear Reinforcement*". Ph.D. Thesis, The Polytechnic of Central London, London, Oct. 1991, 185 pp.
- GOMES, R.B., ANDRADE, M.A.S (1995). "*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.
- HALLGREN, M. (1996). "*Punching Hear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs*". Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm-Sweden, Nov. 1996, 206 pp.
- HANDBOOK TO BRITISH STANDARD BS8110.1985. "Structural use of concrete". Palladian Publications Ltd, London, 1987.
- HAWKINS, N.M., FALLSEN, H.B., HINOJOSA, R.C. (1971). "*Influence of Column Rectangularity on the Behavior of Flat Plate Structures*". ACI Publication SP-30: Cracking, Deflection, and Ultimate Load of Concrete Slab Systems, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1971, p. 126-146.
- HOGNESTAD, E., ELSTNER, R.C., HANSON, J.A. (1964). "*Shear strength of reinforced concrete structural lightweight aggregate concrete slabs*". ACI Journal, June 1964, p.643-656.
- JOHANSEN, K.W. (1962). "*Linhas de Ruptura – Teoria e Prática*". Traduzido e adaptado do original dinamarquês por Jayme Mason (livre docente da Escola Nacional de Engenharia). Editora Ao Livro Técnico S.A. Rio de Janeiro, 1962.
- IOANNOU, C. (2001). "*Behaviour of flat slabs with openings*". Ph.D. Thesis, University of Sheffield, 2001.
- KINNUNEN, S. (1963). "*Punching of concrete slabs with two-way reinforcement, with special reference to dowel effect and deviation of reinforcement from polar symmetry*". In: *Civil Engineering 6*, Transactions of the Royal Institute of Technology, n. 198, Stockholm, 1963.
- KINNUNEN, S., NYLANDER, H. (1960). "*Punching of concrete slabs without shear reinforcement*". In: *Civil Engineering 3*, Transactions of the Royal Institute of Technology, n.158, Stockholm, 1960, 112 pp.
- MAC GREGOR, J.G. "*Reinforced Concrete Mechanics & Design*". 2^a edition, Prentice Hall, New Jersey, 1992, 848 pp.
- MELO, G.S.S.A. (1990). "*Behavior of reinforced concrete flat slabs after local failure*". PhD Thesis, The Polytechnic of Central London. London, August 1990, 214 pp.
- MELO, G.S.S.A., COELHO, A.E.G., OLIVEIRA, D.R.C. (2000). "*Reinforced concrete flat slabs with inclined stirrups as shear reinforcement*". International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs, Stockholm, Sweden, 2000, p. 155-162.

- MELO, G.S.S.A.(2000). "Puncionamento, pós-puncionamento e colapso progressivo em lajes cogumelo". IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, 2000, 17pp.
- MOE, J. (1961). "Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings Under Concentrated Loads". Development Department Bulletin D47, Portland Cement Association, Skokie, Apr.1961, 130 pp.
- MOKHTAR, A.S., GHALI, A., DILGER, W. "Stud shear reinforcement for flat concrete plate". ACI Journal, Sep-Oct 1985, p. 676-683.
- MOWRER, R.D., VANDERBILT, M.D. "Shear strength of lightweight aggregate reinforced concrete flat plates". ACI Journal, November 1967, p. 722-729.
- OLIVEIRA, D.R.C. (1998). "Análise experimental de lajes cogumelo de concreto armado com armadura de cisalhamento ao puncionamento". Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 1998, 121 pp.
- OLIVEIRA, D.R.C. (2003). "Análise experimental de lajes cogumelo de concreto de alta resistência com pilares retangulares". Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília, Brasília, Agosto 2003, 183 pp.
- PARK, R. GAMBLE, W. L. (1980). *Reinforced Concrete Slabs*. John Wiley & Sons Inc., New York 1980, 618 pp.
- REGAN, P.E. (1974) "Design for punching shear". *The Structural Engineer*, vol.52, nº6, June 1974, p. 197-207.
- REGAN, P.E. (1984). "The Dependence of Punching Resistance upon the Geometry of the Failure Surface". *Magazine of Concrete Research*, v.36, n.126, March 1984, p. 3-8.
- REGAN, P.E. & BRAESTRUP, M.W. (1985). "Punching shear in reinforced concrete: a state of art report". *Bulletin D'information* 168, Comité Euro International Du Béton, January 1985, 232 pp.
- REGAN, P.E., REZAI-JORABI,H. "Shear resistance of one-way slabs under concentrated loads". *ACI Structural Journal*, March-April 1988, p.150-158.
- REGAN, P.E. (1985). "Shear combs, reinforcement against punching". *The Structural Engineer*, vol 63B (4), December 1985, p. 76-84.
- REGAN, P.E. (1993). "Punching tests of concrete slabs with riss star shear reinforcement for riss AG". School of Architecture & Engineering, University of Westminster, London, January 1993.
- REGAN, P.E. (1999). "Punching tests of reinforced concrete slabs with and without shear reinforcement with openings adjacent to columns". School of the Built Environment, University of Westminster, London, July 1999, 41 pp.

- ROLL, F., ZAIDI, S.T.H., SABNIS, G.M., CHUANG, K. (1971). "*Shear Resistance of Perforated Reinforced Concrete Slabs*" SP-30, Crack, Deflection and Ultimate Load of Concrete Slab System, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1971, p. 77-101.
- 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 pp.
- SHEHATA, I.A.M.S. (1985). "*Theory of punching in concrete slabs*". PhD Thesis, The Polytechnic of Central London, London, 1985, 257 pp.
- TENG, S., KUANG, K. L., CHEONG, H. K. (1999). "*Concrete Flat Plate Design – Findings of Joint BCA-NTU*", R&D Project, 1999, 15 pp.
- TRAUTWEIN, L.M. (2001). "*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 pp.

A – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETO

Tabela A.1 - Resultados individuais dos ensaios em corpos de prova cilíndricos de concreto
de dimensões 150 mm x 300 mm

<i>Laje</i>	<i>Idade</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>		<i>Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)</i>		<i>Resistência à tração diametral (MPa)</i>		
		<i>Valores individuais</i>	<i>Média</i>	<i>Valores individuais</i>	<i>Média</i>	<i>Valores individuais</i>	<i>Média</i>	
L42	7	32,3	32,8	20,8	20,9	3,5	3,6	
		33,3		21,0		3,7		
	14	38,5	39,1	23,0	22,9	3,5	3,7	
		39,6		22,8		3,8		
	16	43,0	43,2	24,0	25,1	4,3	4,0	
		43,3		26,2		3,6		
	28	48,3	47,7	25,2	24,7	4,8	4,8	
		47,0		24,2		-		
	91	49,4	51,3	-	-	-	-	
		53,1		-		-		
L42A	7	32,2	31,7	20,6	20,2	3,6	3,3	
		31,2		19,8		3,0		
	17	35,3	36,2	22,0	22,2	3,3	3,6	
		37,0		22,4		3,9		
	28	41,6	40,9	23,7	24,3	3,8	3,9	
		40,1		24,8		3,9		
	91	46,5	48,4	-	-	-	-	
		50,2		-		-		
	L45	7	30,6	31,2	-	-	3,3	3,3
			31,7		-		3,2	
14		38,3	38,7	-	-	3,8	3,7	
		39,1		-		3,5		
19		41,2	42,0	-	-	4,3	4,3	
		42,8		-		4,2		
28		41,4	41,4	24,4	25,7	3,8	3,8	
		-		26,9		-		
91		46,3	45,9	28,9	30,4	3,9	4,0	
		45,5		31,8		4,1		

Tabela A.1 - Resultados individuais dos ensaios em corpos de prova cilíndricos de concreto de dimensões 150 mm x 300 mm (continuação)

Laje	Idade	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência tração diametral (MPa)	
		Valores individuais	Média	Valores individuais	Média	Valores individuais	Média
L46	7	34,2	33,5	24,7	24,3	3,7	3,2
		32,8		23,8		2,7	
	14	39,9	39,3	25,2	27,5	4,5	4,4
		38,6		29,7		4,2	
	28	42,7	43,3	28,3	28,0	3,6	3,8
		43,8		27,6		3,9	
	91	48,9	48,5	-	-	-	-
		48,1		-		-	
L41	7	32,2	32,3	20,1	19,5	3,2	3,1
		32,3		18,8		2,9	
	14	35,5	37,4	20,4	21,3	3,1	3,1
		39,3		22,1		3,1	
	21	40,4	40,4	23,7	23,7	-	-
		40,4		-		-	
	28	41,1	40,5	22,3	22,3	-	-
		39,8		-		-	
	37	44,7	44,8	23,6	23,6	4,5	4,3
		44,8		-		4,1	
L41A	7	28,2	28,5	19,5	19,6	2,8	2,5
		28,7		19,7		2,1	
	14	35,3	33,8	20,0	20,1	3,4	3,8
		32,2		20,1		4,2	
	17	37,9	38,9	21,5	20,9	3,5	3,4
		39,8		20,2		3,3	
	28	39,9	38,7	22,2	23,2	4,1	3,8
		37,5		24,2		3,5	
	91	44,9	45,8	-	-	-	-
		46,7		-		-	
L43A	7	30,8	30,5	19,6	20,9	2,6	2,6
		30,1		22,2		2,5	
	14	36,6	36,6	22,1	21,8	3,2	3,4
		36,5		21,5		3,6	
	18	37,9	38,7	22,8	22,4	3,6	3,3
		39,5		22,0		3,0	
	28	40,5	41,8	23,0	22,9	3,4	3,6
		43,1		22,8		3,7	
	91	47,9	48,5	-	-	-	-
		49,1		-		-	

Tabela A.1 - Resultados individuais dos ensaios em corpos de prova cilíndricos de concreto de dimensões 150 mm x 300 mm (continuação)

Laje	Idade	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)		Resistência à tração diametral (MPa)	
		Valores individuais	Média	Valores individuais	Média	Valores individuais	Média
I 44	7	34,1	34,0	24,0	23,9	2,8	2,8
		33,9		23,8		-	
	14	37,9	38,1	-	-	4,0	3,9
		38,2		-		3,7	
	19	40,1	40,1	-	-	3,8	3,7
		40,0		-		3,5	
	28	43,8	42,5	-	-	3,6	3,3
		41,1		-		3,0	
	91	44,2	43,8	30,7	30,9	3,7	3,9
		43,3		31,0		4,1	
L45FS_CG	7	33,2	33,1	19,2	20,6	3,3	3,0
		33,0		22,0		2,6	
	14	38,7	38,6	22,7	22,7	4,2	4,0
		38,4		22,7		3,7	
	18	40,9	40,4	19,9	20,2	3,7	3,6
		39,9		20,5		3,5	
	28	43,4	42,5	25,7	25,7	4,4	4,3
		41,6		-		4,2	
	91	48,0	47,9	26,4	26,0	4,6	4,3
		47,7		25,6		4,0	
L45FD_CG	7	25,1	24,7	18,1	17,8	2,5	2,7
		24,3		17,4		2,8	
	14	32,6	31,9	24,4	23,8	3,6	3,6
		31,2		23,1		3,5	
	18	40,0	39,0	21,9	22,0	4,4	4,2
		37,9		22,0		4,0	
	28	36,9	37,9	21,7	22,7	4,8	4,4
		38,9		23,7		4,0	
	91	45,5	44,3	30,4	30,4	-	-
		43,1		-		-	
L45FD	7	32,1	31,5	-	-	2,9	2,8
		30,9		-		2,7	
	14	39,9	38,9	22,9	23,0	3,3	3,9
		37,8		23,0		4,4	
	18	40,9	41,4	24,8	24,2	4,0	4,0
		41,8		23,6		3,9	
	28	43,3	43,5	-	-	4,8	4,4
		43,6		-		3,9	

Tabela A.1 - Resultados individuais dos ensaios em corpos de prova cilíndricos de concreto de dimensões 150 mm x 300 mm (continuação)

Laje	Idade	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)		Resistência à tração diametral (MPa)		
		Valores individuais	Média	Valores individuais	Média	Valores individuais	Média	
L45FFS CG	3	26,5	27,0	20,8	21,1	3,3	3,1	
		27,4		21,3		2,9		
	7	33,3	33,8	-	-	3,6	3,8	
		34,3		-		3,9		
	14	35,1	35,8	24,1	22,8	4,2	4,0	
		36,4		21,5		3,8		
	19	41,5	41,6	24,8	23,9	4,1	4,2	
		41,7		23,0		4,3		
	28	44,8	44,9	25,4	25,2	4,3	4,5	
		44,9		25,0		4,7		
	L45FFD CG	3	24,8	25,1	17,9	18,6	2,9	2,8
			25,4		19,3		2,7	
7		28,5	30,3	21,3	21,6	3,5	3,5	
		32,1		21,9		3,4		
14		36,8	37,8	23,6	23,7	3,8	3,6	
		38,7		23,8		3,4		
19		40,4	40,6	24,7	24,7	4,7	4,2	
		40,8		-		3,7		
28		41,9	41,4	24,4	24,2	-	-	
		40,8		24,0		-		
L45FFD	7	29,5	29,7	17,7	18,0	3,5	3,2	
		29,9		18,2		2,8		
	14	34,2	34,5	-	-	2,7	3,4	
		34,8		-		4,1		
	18	37,4	37,0	21,0	20,7	4,1	4,3	
		36,5		20,4		4,4		
	28	41,2	41,2	22,5	22,5	4,2	4,2	
		-		-		-		
L45 ACI	3	22,3	22,8	16,0	16,0	2,4	2,5	
		23,2		15,9		2,5		
	7	27,6	28,3	-	-	2,4	2,9	
		28,9		-		3,3		
	14	33,9	33,7	20,0	19,9	3,0	3,0	
		33,4		19,8		3,0		
	18	40,4	39,0	22,0	21,5	2,7	3,2	
		37,5		20,9		3,7		
	28	37,6	37,6	-	-	-	-	
		-		-		-		

Tabela A.1 - Resultados individuais dos ensaios em corpos de prova cilíndricos de concreto de dimensões 150 mm x 300 mm (continuação)

Laje	Idade	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)		Resistência à tração diametral (MPa)	
		Valores individuais	Média	Valores individuais	Média	Valores individuais	Média
L45FFD_AC2	3	26,3	25,3	16,3	16,9	2,8	2,8
		24,3		17,5		2,7	
	7	31,6	31,2	19,6	19,7	2,8	3,0
		30,8		19,7		3,1	
	14	39,4	39,2	21,0	21,7	4,0	3,8
		38,9		22,3		3,6	
	25	43,5	43,8	22,0	20,8	4,2	4,1
		44,0		19,6		4,0	
	28	45,0	45,0	-	-	4,3	4,3
		-		-		-	
L45FFD_AC3	3	24,5	24,9	16,4	16,5	2,0	2,0
		25,3		16,5		2,0	
	7	31,4	31,9	11,3	11,3	1,5	1,6
		32,4		-		1,6	
	14	37,5	37,9	18,9	18,8	3,5	3,2
		38,2		18,6		2,9	
	18	39,7	39,4	24,0	25,4	3,7	3,5
		39,0		26,7		3,3	
	28	41,9	41,4	25,6	25,8	-	-
		40,9		25,9		-	
L45FFD_AC4	3	27,5	27,7	19,5	20,8	2,8	2,8
		27,9		22,1		2,7	
	7	34,9	34,6	20,1	20,1	3,3	3,2
		34,3		20,0		3,1	
	14	39,7	39,4	22,0	22,0	3,6	3,6
		39,1		21,9		3,5	
	18	43,1	43,2	22,1	22,5	3,0	3,1
		43,3		22,9		3,1	
	28	43,3	43,7	22,1	22,9	-	-
		44,1		23,6		-	
L45FFD_AC5	3	29,7	29,2	19,8	18,8	2,6	2,4
		28,6		17,7		2,2	
	7	33,3	33,1	19,9	19,5	-	-
		32,8		19,0		-	
	14	38,9	38,7	-	-	2,5	2,8
		38,5		-		3,1	
	18	40,8	40,7	22,0	21,0	3,4	3,2
		40,6		20,0		3,0	
	28	42,6	42,1	23,8	24,2	-	-
		41,6		24,6		-	

Tabela A.1 - Resultados individuais dos ensaios em corpos de prova cilíndricos de concreto de dimensões 150 mm x 300 mm (continuação)

Laje	Idade	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)		Resistência à tração diametral (MPa)	
		Valores individuais	Média	Valores individuais	Média	Valores individuais	Média
L45_AC5	3	25,9	26,1	19,7	19,4	2,6	2,6
		26,2		19,0		2,5	
	7	33,6	33,0	21,3	21,7	3,5	3,5
		32,3		22,0		3,4	
	14	39,3	39,4	-	-	4,0	3,7
		39,5		-		3,3	
	19	40,9	41,1	23,1	23,1	3,8	3,4
		41,3		-		3,0	
	28	43,5	44,3	-	-	-	-
		45,0		-		-	

Tabela A.2 - Resultados individuais dos ensaios de tração axial em amostras de aço de vários diâmetros utilizados nas lajes da Série 1

Diâmetro (mm)	f_y (MPa)		ϵ_y (mm/m)		f_u (MPa)		E_s (GPa)	
	Individual	Média	Individual	Média	Individual	Média	Individual	Média
8,0	676	674	4,76	4,70	821	814	202	215
	668		4,42		789		231	
	679		4,92		832		213	
12,5	621	617	4,60	4,04	749	748	218	214
	630		3,87		736		223	
	601		3,64		758		202	
16,0	598	604	3,99	4,57	760	757	231	229
	615		4,87		742		243	
	600		4,84		769		212	

Tabela A.3 - Resultados individuais dos ensaios de tração axial em amostras de aço de vários diâmetros utilizados nas lajes das séries 2 e 3

Diâmetro (mm)	f_y (MPa)	ϵ_y (mm/m)	f_u (MPa)	ϵ_u (mm/m)	E_s (GPa)
8,0	598	2,85	723	20,11	210
10,0	593	2,78	733	20,51	213
12,5	541	2,36	702	20,43	229
16,0	601	4,85	677	20,44	211

B - LEITURAS DOS DEFLETÔMETROS E EXTENSÔMETROS

Tabela B.1 – Deslocamentos da laje L41

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L41 (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0.16	0.10	0.40	0.57	0.58	0.64	0.39	0.42	0.39	0.10	0.15
150	0.35	0.33	0.78	1.09	1.13	1.21	0.89	0.86	0.69	0.28	0.39
200	0.87	0.77	1.53	2.15	2.24	2.39	2.09	1.95	1.44	0.70	0.82
250	1.40	1.34	2.48	3.54	3.74	3.97	3.69	3.43	2.50	1.35	1.41
300	1.78	1.95	3.51	5.02	5.35	5.66	5.38	5.00	3.68	2.03	1.61
400	2.91	3.21	5.69	8.20	8.90	9.35	9.02	8.35	6.15	3.58	2.11
450	3.21	3.92	6.87	10.00	10.90	11.50	11.00	10.20	7.50	4.40	2.78
500	3.64	4.55	8.04	11.58	12.70	13.21	12.65	11.70	8.60	5.06	3.21
550	4.26	5.39	9.28	13.62	14.89	15.44	14.68	13.52	9.90	5.82	3.79

Tabela B.2 – Deslocamentos da laje L41A

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L41A (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0.55	0.10	0.20	0.30	0.32	0.52	0.38	0.35	0.31	0.18	0.76
150	1.001	0.31	0.45	0.80	0.97	1.25	1.15	1.09	0.82	0.48	1.430
200	1.433	0.59	0.93	1.49	1.65	2.35	2.10	1.98	1.48	0.88	2.060
250	1.815	1.00	1.62	2.48	2.92	3.72	3.38	3.16	2.35	1.40	2.590
300	2.168	1.50	2.42	3.60	4.15	5.15	4.75	4.40	3.27	1.95	3.080
350	2.529	2.60	3.36	4.88	5.55	6.72	6.15	5.73	4.20	2.50	3.490
400	2.875	3.20	4.30	6.19	6.80	8.25	7.60	7.15	5.18	3.05	3.910
450	3.175	3.80	5.30	7.55	8.38	9.75	9.08	8.35	6.10	3.58	4.300
500	3.463	4.45	6.32	9.00	10.00	11.40	10.58	9.70	7.08	4.15	4.680
550	3.758	5.05	7.32	10.38	11.56	13.00	12.15	11.30	8.05	4.72	5.030

Tabela B.3 – Deslocamentos da laje L42

Força	Deslocamentos verticais Laje L42 (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
(kN)	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,28	0,24	0,39	0,50	0,51	0,46	0,43	0,41	0,30	0,17	0,26
150	0,49	0,43	0,66	0,86	0,90	0,82	0,78	0,74	0,54	0,31	0,45
200	0,78	0,66	1,06	1,42	1,49	1,47	1,35	1,29	0,92	0,53	0,66
250	1,17	1,05	1,69	2,36	2,45	2,55	2,30	2,16	1,52	0,88	0,91
300	1,70	1,59	2,60	3,65	3,82	4,30	3,96	3,66	2,61	1,49	1,27
350	2,16	2,28	3,72	5,22	5,54	6,00	5,62	5,21	3,72	2,23	1,65
400	2,57	3,09	5,00	6,98	7,39	7,88	7,36	6,79	4,86	2,79	1,99
450	2,92	3,76	6,08	8,00	8,50	9,55	8,96	8,29	5,93	3,39	2,31
500	3,27	4,45	7,14	10,01	10,64	11,29	10,55	9,74	6,97	3,98	2,64
550	3,62	5,25	8,36	11,77	12,44	13,14	12,29	11,31	8,10	4,62	2,96
600	3,96	6,00	9,56	13,60	14,32	15,08	14,12	12,98	9,30	5,30	3,29

Tabela B.4 – Deslocamentos da laje L42A

Força	Deslocamentos verticais Laje L42A (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
(kN)	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
107	1,484	0,17	0,31	0,58	0,68	0,75	0,73	0,72	0,54	0,34	1,778
213	2,293	0,52	0,89	1,49	1,65	1,78	1,75	1,65	1,25	0,78	2,862
320	3,010	1,45	2,44	3,46	3,69	4,14	4,02	3,80	2,80	1,75	3,812
426	3,739	2,75	4,52	6,42	6,80	7,15	6,90	6,50	4,85	3,00	4,650
533	4,313	4,00	6,50	9,35	9,80	10,05	9,80	9,25	6,85	4,25	5,368
640	4,950	5,35	8,75	13,00	13,45	13,50	13,18	12,60	9,00	5,55	6,083

Tabela B.5 – Deslocamentos da laje L43A

Força	Deslocamentos verticais Laje L43A (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
(kN)	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,35	0,03	0,04	0,13	0,14	0,15	0,14	0,13	0,09	0,05	0,28
100	0,86	0,17	0,25	0,40	0,42	0,52	0,38	0,38	0,26	0,15	0,81
150	1,31	0,35	0,55	0,82	0,82	0,84	0,80	0,81	0,56	0,32	1,25
200	1,73	0,63	0,98	1,47	1,52	1,67	1,51	1,44	1,03	0,60	1,59
250	2,10	1,02	1,66	2,39	2,48	2,64	2,38	2,28	1,59	0,95	2,00
300	2,43	1,55	2,44	3,47	3,65	3,88	3,71	3,33	2,35	1,37	2,30
350	2,73	2,26	3,43	4,84	5,00	5,23	4,72	4,45	3,18	1,85	2,60
400	3,05	2,68	4,28	6,02	6,28	6,55	5,92	5,58	4,00	2,35	2,98
450	3,35	3,28	5,18	7,21	7,54	7,80	7,08	6,75	4,80	2,85	3,25
500	3,67	3,90	6,20	8,65	9,06	9,43	8,75	8,26	5,75	3,40	3,55
550	3,93	4,45	7,10	9,90	10,40	10,85	10,15	9,55	6,61	3,90	3,85

Tabela B.6 – Deslocamentos da laje L44

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L44 (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1.06	0.25	0.37	0.46	0.50	0.55	0.43	0.39	0.36	0.22	1.27
150	1.55	0.46	0.74	0.95	1.01	1.19	0.95	0.86	0.73	0.47	1.70
200	2.05	0.90	1.51	1.91	2.01	2.17	1.94	1.85	1.41	0.85	2.11
250	2.56	1.42	2.47	3.28	3.42	3.52	3.27	3.16	2.27	1.38	2.48
300	2.97	1.85	3.14	4.24	4.51	4.60	4.40	4.10	2.94	1.77	2.74
350	3.37	2.32	3.94	5.53	5.89	5.99	5.75	5.33	3.84	2.32	3.06
400	3.73	2.83	4.80	6.60	7.19	7.30	7.00	6.48	4.69	2.84	3.30
450	4.09	3.40	5.70	7.71	8.40	8.58	8.25	7.62	5.52	3.33	3.60
500	4.43	4.25	6.63	8.89	9.70	9.98	9.55	8.81	6.41	4.26	3.87
550	4.77	4.99	7.60	10.55	11.10	11.30	10.80	10.00	7.40	4.98	4.13

Tabela B.7 – Deslocamentos da laje L45

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45 (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1.17	0.19	0.30	0.40	0.40	0.61	0.55	0.51	0.38	0.22	0.97
150	1.62	0.35	0.58	0.75	0.76	1.02	0.93	0.87	0.63	0.37	1.41
200	2.07	0.74	1.22	1.59	1.65	1.95	1.75	1.64	1.15	0.67	1.83
250	2.58	1.47	2.35	3.05	3.20	3.47	3.15	3.00	2.09	1.20	2.37
300	3.01	2.20	3.48	4.55	4.75	5.03	4.58	4.35	3.02	1.71	2.80
350	3.39	2.85	4.52	5.95	6.25	6.50	5.97	5.68	3.95	2.25	3.20
400	3.70	3.56	5.64	7.48	7.80	8.05	7.40	7.07	4.90	2.79	3.58
450	4.13	4.28	6.80	9.08	9.44	9.70	8.97	8.59	5.96	3.39	3.96
500	4.42	4.98	7.90	10.57	10.98	11.25	10.45	10.00	6.96	3.95	4.30
550	4.71	5.71	9.06	12.20	12.62	12.80	11.90	11.43	7.96	4.52	4.65
600	5.05	6.48	10.30	13.92	14.40	14.53	13.56	13.00	9.00	5.11	4.97
650	5.31	7.16	11.37	15.45	15.98	16.00	15.00	14.34	9.90	5.61	5.26

Tabela B.8 – Deslocamentos da laje L46

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L46 (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
50	0,97	0,05	0,12	0,16	0,19	0,25	0,23	0,22	0,18	0,10	0,94
100	1,42	0,12	0,30	0,40	0,44	0,54	0,50	0,47	0,36	0,21	1,49
150	1,88	0,36	0,59	0,80	0,82	1,04	0,95	0,88	0,65	0,39	2,03
200	2,30	0,64	1,06	1,46	1,58	1,83	1,67	1,54	1,14	0,67	2,47
250	2,69	1,10	1,82	2,50	2,68	2,90	2,68	2,44	1,79	1,06	3,01
300	3,21	1,62	2,67	3,65	3,90	4,17	3,87	3,51	2,58	1,51	3,46
350	3,53	2,16	3,54	4,85	5,15	5,46	5,10	4,61	3,39	2,00	3,82
400	3,87	2,73	4,48	6,13	6,49	6,79	6,33	5,74	4,20	2,47	4,17
450	4,22	3,35	5,47	7,48	7,90	8,21	7,69	6,97	5,10	3,00	4,52
500	4,52	3,88	6,34	8,65	9,11	9,43	8,84	8,03	5,86	3,45	4,81
550	4,82	4,42	7,22	9,87	10,40	10,80	10,14	9,22	6,74	3,97	5,10
600	5,12	5,02	8,24	11,27	11,83	12,26	11,55	10,53	7,66	4,52	5,39
650	5,40	5,60	9,15	12,54	13,16	13,64	12,90	11,77	8,53	5,02	5,67
700	5,69	6,22	10,17	13,92	14,62	15,16	14,35	13,14	9,45	5,57	5,92
750	5,96	6,80	11,11	15,24	16,00	16,56	15,75	14,47	10,30	6,08	6,17
800	6,25	7,45	12,22	16,83	17,62	18,17	17,34	16,02	11,20	6,58	6,43

Tabela B.9 – Deslocamentos da laje L45FS_CG

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FS CG (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
50	-	0,05	0,10	0,15	0,15	0,24	0,15	0,15	0,10	0,05	-
100	-	0,12	0,30	0,34	0,36	0,61	0,48	0,44	0,40	0,25	-
150	-	0,26	0,58	0,92	1,20	1,53	1,24	1,14	0,82	0,53	-
200	-	0,52	1,75	2,27	2,45	2,65	2,50	2,32	1,75	1,08	-
250	-	1,00	2,37	3,40	3,62	4,20	4,00	3,65	2,70	1,68	-
300	-	1,55	3,43	5,00	5,30	5,75	5,54	5,25	3,71	2,30	-
350	-	2,15	4,65	6,76	7,00	7,42	7,20	7,00	4,80	2,98	-
400	-	3,20	5,70	8,00	8,50	9,14	8,85	8,40	5,90	3,65	-
450	-	4,50	6,80	9,75	10,40	11,00	10,62	10,00	7,10	4,40	-
500	-	5,15	7,85	11,90	12,40	12,80	12,46	12,00	8,25	5,10	-
550	-	5,90	10,10	14,30	14,70	15,10	14,60	14,00	9,35	5,80	-
600	-	6,60	11,00	15,70	15,98	16,25	15,80	15,10	10,38	6,42	-

Tabela B.10 – Deslocamentos da laje L45FD CG

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FD CG (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,88	0,05	0,10	0,18	0,18	0,31	0,00	0,26	0,18	0,11	1,39
150	1,40	0,14	0,25	0,36	0,37	0,65	0,33	0,57	0,40	0,25	2,11
200	1,94	0,29	0,52	0,76	0,81	1,20	0,84	1,05	0,73	0,48	2,66
250	2,35	0,55	0,98	1,40	1,50	2,03	1,70	1,85	1,25	0,84	3,19
300	2,76	1,00	1,70	2,45	2,65	3,28	2,80	2,90	2,10	1,31	3,61
350	3,09	1,61	2,75	3,90	4,20	4,87	4,32	4,20	3,08	1,95	4,16
400	3,47	2,32	3,95	5,48	5,93	6,64	6,10	5,80	4,25	2,65	4,57
450	3,82	3,05	5,05	7,08	7,60	8,30	7,60	7,20	5,25	3,30	5,02
500	4,05	3,70	6,10	8,50	9,08	9,75	9,00	8,45	6,20	3,90	5,35
550	4,38	4,76	7,15	10,08	10,75	11,55	10,70	10,00	7,35	4,65	5,74
600	4,65	5,13	8,40	11,70	12,40	13,30	12,50	11,65	8,50	5,37	6,06
650	4,96	5,85	9,52	13,30	14,10	15,00	14,10	13,10	9,60	6,10	6,38

Tabela B.11 – Deslocamentos da laje L45FD – Direção x

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FD (mm)										
	Número do relógio comparador										
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	-900	-600	-285	-185	0	185	285	600	900	1350	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
50	0,00	0,10	0,13	0,10	0,15	0,10	0,10	0,12	0,00	0,321	
100	0,11	0,35	0,46	0,45	0,52	0,35	0,43	0,35	0,09	1,024	
150	0,28	0,62	0,89	0,82	0,94	0,76	0,81	0,64	0,25	1,867	
200	0,47	0,93	1,30	1,30	1,40	1,23	1,23	0,95	0,44	2,331	
300	1,15	2,11	2,95	3,10	3,30	3,10	2,94	2,15	1,14	3,243	
400	2,05	3,65	5,10	5,45	5,75	5,52	5,15	3,70	2,05	4,117	
500	3,17	5,50	7,68	8,30	8,70	8,40	7,75	5,50	3,15	4,864	
550	3,72	6,37	8,90	9,65	10,08	9,80	9,05	6,40	3,66	5,148	
600	4,20	7,30	10,25	11,15	11,57	11,30	10,50	7,35	4,25	1,967	
650	-	-	-	-	14,40	-	-	-	-	-	
700	-	-	-	-	17,00	-	-	-	-	-	

Tabela B.12 – Deslocamentos da laje L45FD – Direção y

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FD (mm)										
	Número do relógio comparador										
		D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	D19
	Distância ao centro da laje (mm)										
	-900	-600	-285	-185	0	185	285	600	900	1330	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
50	0,00	0,00	0,01	0,07	0,15	0,07	0,08	0,00	0,00	0,29	
100	0,00	0,05	0,01	0,20	0,52	0,24	0,25	0,00	0,04	1,09	
150	0,09	0,24	0,37	0,50	0,94	0,53	0,50	0,25	0,16	1,52	
200	0,22	0,47	0,73	0,88	1,40	0,95	0,90	0,53	0,32	1,96	
300	0,85	1,57	2,30	2,63	3,30	2,72	2,60	1,78	1,04	2,82	
400	1,95	3,27	4,75	5,23	5,75	5,42	4,93	3,65	2,86	3,50	
500	3,08	5,28	7,65	8,23	8,70	8,62	8,31	6,45	4,50	4,12	
550	3,63	6,20	8,95	9,60	10,08	10,03	9,80	7,65	5,00	4,39	
600	4,22	7,20	10,40	11,16	11,57	11,30	10,90	8,60	5,60	4,63	
650	-	-	-	-	14,40	-	-	-	-	-	
700	-	-	-	-	17,00	-	-	-	-	-	

Tabela B.13 – Deslocamentos da laje L45FFS CG

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFS CG (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	4,48	0,04	0,06	0,16	0,14	0,25	0,25	0,22	0,16	0,10	2,79
100	5,13	0,13	0,24	0,42	0,41	0,58	0,57	0,54	0,39	0,24	3,54
150	5,62	0,30	0,53	0,85	0,86	1,15	1,10	1,04	0,75	0,48	4,10
200	6,08	0,58	1,05	1,64	1,70	2,10	2,04	1,90	1,36	0,89	4,53
250	6,52	1,05	1,90	2,85	2,95	3,45	3,35	3,10	2,30	1,40	5,00
300	6,86	1,68	2,95	4,42	4,70	5,10	4,90	4,55	3,40	2,12	5,46
350	7,22	2,45	4,30	6,40	6,50	7,05	6,85	6,30	4,66	2,93	5,90
400	7,53	3,29	5,60	8,35	8,60	9,15	8,90	8,15	6,07	3,82	6,34
450	7,87	4,15	6,95	10,20	10,45	10,95	10,60	9,70	7,18	4,52	6,66
500	8,18	5,00	8,30	12,20	12,50	13,00	12,60	11,50	8,50	5,35	6,97
550	8,52	5,80	9,63	14,30	14,60	15,15	14,72	13,34	9,85	6,20	7,36
600	8,85	6,55	10,90	16,20	16,55	17,20	16,70	16,20	11,15	7,05	7,68
650	9,22	7,60	12,40	18,65	19,00	19,70	18,30	17,60	12,70	8,00	7,95

Tabela B.14 – Deslocamentos da laje L45FFD CG

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD CG (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D19	D18	D17	D16	D15	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)										
	1350	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	3,04	0,05	0,10	0,15	0,16	0,24	0,24	0,22	0,16	0,10	3,46
100	3,96	0,16	0,29	0,41	0,44	0,59	0,56	0,54	0,40	0,26	4,30
150	4,46	0,34	0,58	0,84	0,88	1,10	1,08	1,00	0,75	0,48	4,95
200	4,91	0,62	1,04	1,50	1,54	1,74	1,70	1,60	1,20	0,75	5,51
250	5,29	0,98	1,65	2,40	2,45	2,57	2,47	2,32	1,74	1,09	6,08
300	5,59	1,40	2,30	3,40	3,50	3,55	3,42	3,20	2,40	1,50	6,56
350	5,91	1,97	3,30	4,78	5,00	4,90	4,75	4,43	3,30	2,10	7,08
400	6,20	2,55	4,23	6,15	6,32	6,18	6,00	5,57	4,15	2,62	7,51
450	6,49	3,10	5,12	7,42	7,60	7,50	7,20	6,80	5,00	3,17	7,89
500	6,76	3,80	6,17	8,95	9,20	8,97	8,70	8,25	6,00	3,78	8,24
550	7,06	4,40	7,10	10,40	10,70	10,40	10,07	9,54	6,85	4,35	8,61
600	7,30	5,18	8,38	12,30	12,56	12,20	11,84	11,25	7,95	5,00	8,93
650	7,61	5,80	9,35	13,80	14,10	13,70	13,38	12,80	8,90	5,60	9,27

Tabela B.15 – Deslocamentos da laje L45FFD – Direção x

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	
	Distância ao centro da laje (mm)										
	-900	-600	-285	-185	0	185	285	600	900	1350	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0,16	0,27	0,35	0,40	0,45	0,40	0,40	0,30	0,08	0,465	
200	0,88	1,51	2,13	2,30	2,33	2,32	2,18	1,55	0,80	1,662	
300	1,88	3,15	4,43	4,80	4,90	4,83	4,50	3,30	1,75	2,502	
400	3,13	5,26	7,43	8,02	8,25	8,05	7,54	5,35	2,90	3,281	
450	3,73	6,30	9,13	9,70	9,95	9,75	9,40	6,40	3,50	3,585	
500	4,40	7,46	11,00	11,60	11,95	11,70	11,10	7,55	4,10	3,966	
550	5,18	8,90	13,50	14,07	14,38	14,10	13,50	8,95	4,85	4,339	
600	-	-	-	-	17,00	-	-	-	-	-	

Tabela B.16 – Deslocamentos da laje L45FFD – Direção y

Força		Deslocamentos verticais Laje L45FFD (mm)									
		Número do relógio comparador									
		D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	D19
(kN)	Distância ao centro da laje (mm)										
	-900	-600	-285	-185	0	185	285	600	900	1350	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0,05	0,18	0,26	0,23	0,45	0,24	0,23	0,17	0,10	1,01	
200	0,60	1,10	1,70	1,73	2,33	1,70	1,68	1,17	0,68	2,34	
300	1,30	2,75	4,16	4,27	4,90	4,20	4,14	2,78	1,64	3,15	
400	2,75	4,80	7,38	7,44	8,25	7,34	7,27	4,78	2,80	3,83	
450	3,43	5,95	9,30	9,40	9,95	9,24	9,15	5,88	3,50	4,54	
500	4,13	7,15	11,30	11,34	11,95	11,14	11,06	7,03	4,22	4,75	
550	4,83	8,85	14,10	14,19	14,38	14,00	13,93	8,54	5,20	4,90	
600	-	-	-	-	17,00	-	-	-	-	-	

Tabela B.17 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC2 – Direção x

Força		Deslocamentos verticais Laje L45FFD_AC2 (mm)									
		Número do relógio comparador									
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
(kN)	Distância ao centro da laje (mm)										
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0,28	0,51	0,73	0,75	0,78	0,77	0,72	0,52	0,31	1,31	
200	0,95	1,65	2,32	2,50	2,58	2,50	2,30	1,66	1,00	1,89	
300	1,87	3,20	4,45	4,90	5,05	4,75	4,40	3,20	1,90	2,49	
400	2,96	5,07	7,05	7,70	7,92	7,45	6,90	5,00	3,00	3,08	
500	4,04	6,88	9,70	10,55	10,80	10,40	9,50	6,80	4,10	3,64	
600	5,10	8,73	12,40	13,50	13,90	13,40	12,20	8,70	5,20	4,13	
700	6,18	10,60	15,20	16,50	16,90	16,40	15,00	10,50	6,30	4,62	
800	7,18	12,33	18,10	19,70	20,25	19,60	18,00	12,30	7,35	5,08	
850	-	-	-	-	23,00	-	-	-	-	-	
900	-	-	-	-	25,00	-	-	-	-	-	
950	-	-	-	-	28,00	-	-	-	-	-	
1000	-	-	-	-	32,00	-	-	-	-	-	
1050	-	-	-	-	35,00	-	-	-	-	-	
1100	-	-	-	-	40,00	-	-	-	-	-	

Tabela B.18 Deslocamentos da laje L45FFD AC2 – Direção y

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD AC2 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0,16	0,28	0,42	0,42	0,78	0,23	0,42	0,27	0,14	
200	0,55	1,00	1,50	1,50	2,58	1,35	1,50	1,04	0,55	
300	1,30	2,24	3,40	3,41	5,05	3,25	3,37	2,35	1,30	
400	2,32	3,92	5,95	6,00	7,92	5,80	5,90	4,05	2,25	
500	3,40	5,66	8,65	8,70	10,80	8,50	8,56	5,80	3,25	
600	4,50	7,45	11,40	11,50	13,90	11,30	11,30	7,60	4,30	
700	5,65	9,28	14,30	14,35	16,90	14,18	14,12	9,48	5,39	
800	6,80	11,15	17,35	17,40	20,25	17,20	17,10	11,40	6,50	
850	-	-	-	-	23,00	-	-	-	-	
900	-	-	-	-	25,00	-	-	-	-	
950	-	-	-	-	28,00	-	-	-	-	
1000	-	-	-	-	32,00	-	-	-	-	
1050	-	-	-	-	35,00	-	-	-	-	
1100	-	-	-	-	40,00	-	-	-	-	

Tabela B.19 – Deslocamentos da laje L45FFD AC3 – Direção x

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD AC3 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0,25	0,37	0,50	0,52	0,55	0,52	0,50	0,36	0,22	
200	0,78	1,26	1,73	1,84	1,93	1,84	1,74	1,24	0,75	
300	1,49	2,46	3,41	3,68	3,84	3,65	3,42	2,43	1,45	
400	2,52	4,30	5,93	6,40	6,68	6,28	5,82	4,18	2,46	
500	3,63	6,02	8,36	8,95	9,40	8,90	8,30	5,92	3,52	
600	4,77	7,94	11,05	11,95	12,40	11,72	10,90	7,70	4,60	
650	5,34	8,90	12,60	13,45	13,90	13,20	12,30	8,65	5,12	
700	5,95	9,96	14,10	15,00	15,52	14,70	13,70	9,60	5,70	
750	6,35	10,74	15,58	16,60	17,12	16,22	15,15	10,10	6,15	
800	6,95	11,87	17,05	18,20	18,80	17,80	16,65	11,30	6,70	
850	-	-	-	-	22,00	-	-	-	-	
900	-	-	-	-	23,00	-	-	-	-	
950	-	-	-	-	25,00	-	-	-	-	

Tabela B.20 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC3 – Direção y

Força (kN)	Deslocamentos verticais laje L45FFD AC3 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0.04	0.14	0.28	0.28	0.55	0.28	0.29	0.20	0.10	
200	0.28	0.61	1.00	1.00	1.93	1.00	1.00	0.70	0.36	
300	0.81	1.51	2.36	2.38	3.84	2.39	2.38	1.63	0.92	
400	1.80	3.20	4.89	4.94	6.68	4.88	4.85	3.26	1.93	
500	2.84	4.94	7.54	7.59	9.40	7.50	7.46	5.00	2.95	
600	3.90	6.70	10.30	10.37	12.40	10.29	10.18	6.85	4.05	
650	4.43	7.60	11.70	11.78	13.90	11.67	11.60	7.80	4.58	
700	5.04	8.62	13.28	13.39	15.52	13.26	13.20	8.83	5.18	
750	5.60	9.56	14.80	14.90	17.12	14.74	14.66	9.78	5.74	
800	6.12	10.44	16.25	16.35	18.80	16.20	16.08	10.70	6.28	
850	-	-	-	-	22.00	-	-	-	-	
900	-	-	-	-	23.00	-	-	-	-	
950	-	-	-	-	25.00	-	-	-	-	

Tabela B.21 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC4 – Direção x

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD AC4 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0.24	0.39	0.52	0.55	0.58	0.55	0.50	0.39	0.23	0.81
200	0.70	1.18	1.63	1.72	1.88	1.75	1.64	1.22	0.65	1.71
300	1.55	2.61	3.62	3.87	4.18	3.97	3.66	2.72	1.53	2.54
400	2.58	4.32	6.03	6.50	7.00	6.68	6.20	4.52	2.65	3.33
450	3.17	5.28	7.48	8.00	8.60	8.20	7.58	5.50	3.20	3.67
500	3.65	6.08	8.80	9.37	10.00	9.58	8.90	6.39	3.80	4.00
550	4.20	7.00	10.25	10.90	11.55	11.15	10.40	7.37	4.38	4.34
600	4.80	8.07	11.94	12.60	13.36	12.86	12.00	8.43	5.00	4.66
650	5.30	8.92	13.32	14.05	14.90	14.34	13.50	9.36	5.57	4.96
700	5.86	9.90	14.90	15.65	16.50	15.95	15.00	10.40	6.12	5.32

Tabela B.22 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC4 – Direção y

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD AC4 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	D19
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0.06	0.20	0.33	0.35	0.58	0.33	0.34	0.24	0.12	0.85
200	0.37	0.82	1.31	1.35	1.88	1.32	1.29	0.88	0.45	1.58
300	1.10	2.18	3.38	3.44	4.18	3.40	3.30	2.20	1.18	2.24
400	2.03	3.84	6.05	6.12	7.00	6.06	6.00	3.90	2.10	2.80
450	2.66	4.95	7.81	7.90	8.60	7.80	7.79	5.04	2.80	3.08
500	3.15	5.82	9.20	9.30	10.00	9.20	9.20	5.90	3.30	3.32
550	3.68	6.74	10.78	10.90	11.55	10.76	10.77	6.85	3.83	3.55
600	4.26	7.75	12.38	12.50	13.36	12.33	12.35	7.83	4.40	3.82
650	4.80	8.65	13.90	14.00	14.90	13.85	13.85	8.75	4.90	4.06
700	5.32	9.60	15.50	15.65	16.50	15.44	15.44	9.70	5.50	4.31

Tabela B.23 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC5 – Direção x

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD AC5 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0.30	0.49	0.65	0.69	0.73	0.70	0.68	0.51	0.32	
200	0.89	1.49	2.00	2.15	2.26	2.23	2.05	1.56	0.97	
300	1.71	2.87	3.90	4.12	4.36	4.22	4.00	3.00	1.80	
400	2.65	4.50	6.12	6.50	6.82	6.62	6.24	4.64	2.70	
450	3.12	5.26	7.25	7.70	8.10	7.85	7.42	5.50	3.20	
500	3.64	6.15	8.50	9.00	9.50	9.25	8.75	6.40	3.70	
550	4.17	7.05	9.90	10.50	11.05	10.80	10.20	7.42	4.29	
600	4.69	8.00	11.25	11.92	12.46	12.14	11.50	8.25	4.77	
650	5.22	8.88	12.65	13.40	14.00	13.64	12.95	9.18	5.25	
700	-	-	-	-	15.00	-	-	-	-	
750	-	-	-	-	17.00	-	-	-	-	

Tabela B.24 – Deslocamentos da laje L45FFD_AC5 – Direção y

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45FFD AC5 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0.17	0.31	0.41	0.36	0.73	0.47	0.45	0.32	0.17	
200	0.53	1.00	1.40	1.48	2.26	1.50	1.50	1.03	0.56	
300	1.25	2.30	3.34	3.38	4.36	3.50	3.46	2.40	1.34	
400	2.23	4.00	5.85	5.87	6.82	6.00	6.00	4.05	2.30	
450	2.72	4.84	7.14	7.15	8.10	7.36	7.30	4.95	2.80	
500	3.27	5.77	8.55	8.58	9.50	8.80	8.70	5.86	3.34	
550	3.82	6.70	10.05	10.31	11.05	10.45	10.35	6.75	3.85	
600	4.32	7.55	11.45	11.47	12.46	11.77	11.68	7.64	4.36	
650	4.90	8.50	13.07	13.46	14.00	13.40	13.28	8.70	4.93	
700	-	-	-	-	15.00	-	-	-	-	
750	-	-	-	-	17.00	-	-	-	-	

Tabela B.25 – Deslocamentos da laje L45_AC1 – Direção x

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45 AC1 (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	
	Distância ao centro da laje (mm)										
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0.14	0.33	0.39	0.48	0.50	0.48	0.41	0.35	0.20	1.16	
200	0.34	0.65	0.85	0.97	1.02	1.00	0.90	0.70	0.41	1.75	
300	1.35	2.30	3.15	3.50	3.70	3.60	3.30	2.40	1.40	3.01	
400	2.35	3.95	5.50	6.00	7.00	6.25	5.65	4.08	2.39	3.81	
500	3.40	5.70	7.90	8.60	9.50	8.60	8.05	5.80	3.37	4.52	
600	4.35	7.30	10.25	11.15	11.50	11.20	10.45	7.50	4.40	5.14	
700	5.39	9.02	12.65	13.70	14.10	13.90	12.95	9.25	5.35	5.78	
800	6.42	10.52	15.00	15.90	16.80	16.00	15.35	10.78	6.25	6.42	
850	6.95	11.45	16.40	17.70	18.35	18.05	16.80	11.79	6.80	6.73	
900	7.60	12.62	18.00	19.50	20.15	19.87	18.40	12.90	7.45	7.04	
950	8.27	13.72	19.60	21.30	22.10	21.70	20.05	14.05	8.05	7.32	
1000	-	-	-	-	25.00	-	-	-	-	-	
1050	-	-	-	-	28.00	-	-	-	-	-	
1100	-	-	-	-	30.00	-	-	-	-	-	
1150	-	-	-	-	34.00	-	-	-	-	-	

Tabela B.26 – Deslocamentos da laje L45_AC1 – Direção y

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45 AC1 (mm)										
	Número do relógio comparador										
	D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	D19	
	Distância ao centro da laje (mm)										
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	1350	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0.17	0.28	0.38	0.38	0.50	0.40	0.35	0.26	0.15	0.84	
200	0.30	0.50	0.70	0.73	1.02	0.72	0.69	0.40	0.30	1.36	
300	1.04	1.85	2.70	2.90	3.70	2.95	2.75	1.85	1.10	2.60	
400	2.00	3.55	5.10	5.40	7.00	5.40	5.10	3.45	2.05	3.35	
500	3.00	5.25	7.50	7.90	9.50	7.95	7.52	5.15	3.00	3.90	
600	4.10	7.05	10.00	10.48	11.50	10.50	10.00	6.90	4.08	4.41	
700	5.20	8.92	12.73	13.25	14.10	13.25	12.65	8.75	5.15	4.88	
800	6.38	10.90	15.54	16.15	16.80	16.15	15.45	10.70	6.30	5.44	
850	7.00	11.90	17.00	17.65	18.35	17.72	16.90	11.70	6.90	5.70	
900	7.65	13.05	18.70	19.40	20.15	19.35	18.55	12.80	7.55	5.99	
950	8.40	15.30	20.60	21.40	22.10	21.30	20.40	15.00	8.25	6.30	
1000	-	-	-	-	25.00	-	-	-	-	-	
1050	-	-	-	-	28.00	-	-	-	-	-	
1100	-	-	-	-	30.00	-	-	-	-	-	
1150	-	-	-	-	34.00	-	-	-	-	-	

Tabela B.27 – Deslocamentos da laje L45_AC5 – Direção x

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45 AC5 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0,18	0,32	0,45	0,46	0,47	0,46	0,45	0,35	0,21	
200	0,56	0,94	1,32	1,40	1,48	1,41	1,33	1,00	0,62	
300	1,31	2,20	3,10	3,35	3,50	3,35	3,10	2,27	1,40	
400	2,40	4,00	5,50	6,00	6,20	6,00	5,58	4,00	2,40	
450	2,94	4,90	6,80	7,35	7,60	7,40	6,90	4,93	3,00	
500	3,50	5,83	8,05	8,70	9,00	8,75	8,20	5,90	3,58	
550	4,00	6,70	9,25	10,00	10,43	10,20	9,50	6,80	4,14	
600	4,50	7,50	10,45	11,30	11,70	11,40	10,60	7,58	4,60	
650	5,10	8,50	11,80	12,80	13,20	12,90	12,05	8,60	5,25	
700	5,70	9,50	13,30	14,30	14,80	14,43	13,44	9,53	5,83	
750	6,30	10,50	14,70	15,80	16,40	16,00	14,85	10,50	6,45	
800	-	-	-	-	19,00	-	-	-	-	
850	-	-	-	-	21,00	-	-	-	-	
900	-	-	-	-	22,00	-	-	-	-	
950	-	-	-	-	24,00	-	-	-	-	
1000	-	-	-	-	27,00	-	-	-	-	

Tabela B.28 – Deslocamentos da laje L45_AC5 – Direção y

Força (kN)	Deslocamentos verticais Laje L45 AC5 (mm)									
	Número do relógio comparador									
	D11	D12	D13	D14	D5	D15	D16	D17	D18	
	Distância ao centro da laje (mm)									
	900	600	285	185	0	185	285	600	900	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100	0,17	0,29	0,35	0,35	0,47	0,35	0,31	0,23	0,13	
200	0,36	0,67	0,95	1,00	1,48	0,97	0,90	0,64	0,35	
300	0,92	1,66	2,38	2,55	3,50	2,46	2,35	1,65	0,95	
400	2,00	3,43	4,94	5,25	6,20	5,12	5,00	3,44	2,05	
450	2,58	4,43	6,30	6,70	7,60	6,54	6,23	4,42	2,65	
500	3,12	5,35	7,64	8,05	9,00	7,85	7,55	5,35	3,20	
550	4,05	6,70	9,45	9,88	10,43	9,65	9,32	6,68	4,15	
600	4,78	7,80	11,00	11,45	11,70	11,25	10,90	7,82	5,00	
650	5,50	8,95	12,50	13,08	13,20	12,85	12,43	8,95	5,65	
700	6,20	10,08	14,20	14,80	14,80	14,55	14,10	10,15	6,40	
750	6,90	11,20	15,80	16,38	16,40	16,15	15,60	11,20	7,05	
800	-	-	-	-	19,00	-	-	-	-	
850	-	-	-	-	21,00	-	-	-	-	
900	-	-	-	-	22,00	-	-	-	-	
950	-	-	-	-	24,00	-	-	-	-	
1000	-	-	-	-	27,00	-	-	-	-	

C - CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES UTILIZANDO A TEORIA DAS LINHAS DE RUPTURA

A resistência à flexão das lajes da pesquisa foram determinadas a partir da configuração das linhas de ruptura apresentadas na Fig. C.1.

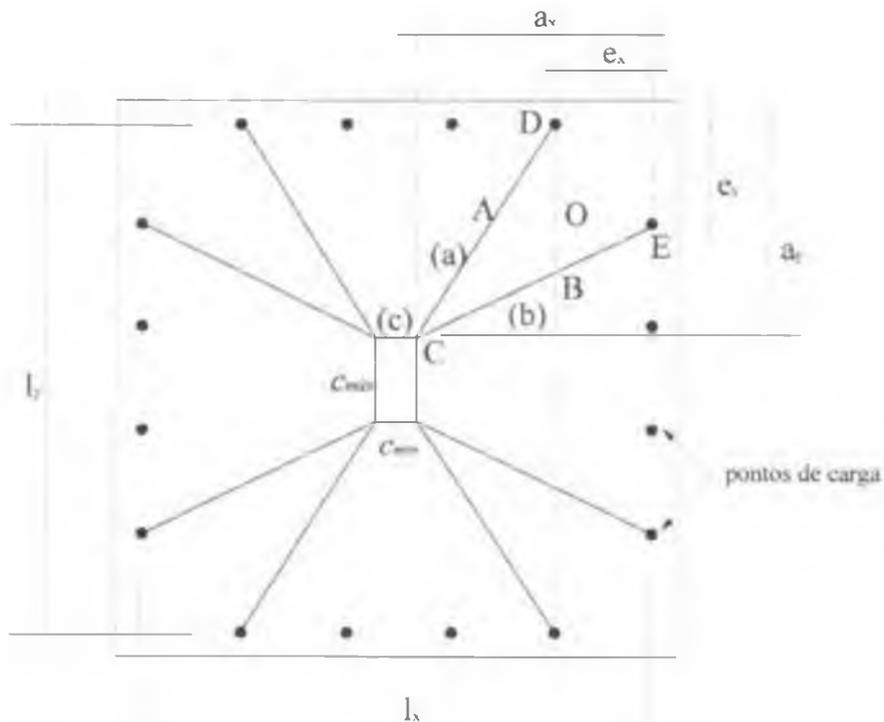


Figura C.1 – Linhas de ruptura para as lajes dos grupos 1, 2 e 3

Sendo

$$a_x = 1350 - \frac{c_{min}}{2} \text{ (mm)}$$

$$a_y = 1350 - \frac{c_{max}}{2} \text{ (mm)}$$

$$e_x = e_y = 525 \text{ mm}$$

$$l_x = l_y = 2700 \text{ mm}$$

Aplicando um deslocamento virtual unitário no ponto C (pilar), e considerando o deslocamento dos pontos de carga iguais a zero, tem-se:

- Deslocamento do ponto B = $\Delta B = \frac{e_x}{a_x}$

- Rotação da linha de ruptura no ponto B = $\alpha = \frac{\Delta B}{DO + OB} = \frac{\Delta B}{e_y + \left(825 - \frac{c_{max}}{2}\right) \Delta B}$

- Deslocamento do ponto A = $\Delta A = \frac{e_y}{a_y}$

- Rotação da linha de ruptura no ponto A = $\beta = \frac{\Delta A}{OE + AO} = \frac{\Delta A}{e_x + \left(825 - \frac{c_{min}}{2}\right) \Delta A}$

- Deslocamento do ponto C e demais vértices do pilar = $\Delta C = 1$

- Rotação da linha de ruptura na face do pilar (direção x) = $\chi = \frac{l}{a_x}$

- Rotação da linha de ruptura na face do pilar (direção y) = $\delta = \frac{l}{a_y}$

Aplicando o Princípio dos Trabalhos Virtuais, obtém-se:

$$W_{externo} = W_{interno}$$

$$V_{flex} = \Sigma (\text{trabalho interno das linhas de escoamento do tipo (a), (b) e (c)})$$

$$V_{flex} = 2m_u \left\{ \frac{l_x}{a_y} + \frac{l_y}{a_x} - 2 \left(\frac{a_y}{a_x} f_x + \frac{a_x}{a_y} f_y \right) \right\}$$

Onde

$$f_x = \frac{e_y}{a_y} \frac{\frac{e_x}{a_x} \left(\frac{a_y}{e_y} - 1 \right)}{1 + \frac{e_x}{a_x} \left(\frac{a_y}{e_y} - 1 \right)} ; f_y = \frac{e_x}{a_x} \frac{\frac{e_y}{a_y} \left(\frac{a_x}{e_x} - 1 \right)}{1 + \frac{e_y}{a_y} \left(\frac{a_x}{e_x} - 1 \right)} ; m_u = \rho f_y d^2 \left(1 - 0,5 \rho \frac{f_y}{f_c} \right)$$

Sendo m_u o momento fletor por unidade de comprimento atuante na linha de ruptura, obtido do diagrama simplificado de tensões em uma seção de concreto sob flexão. As tabs. C.1 e C.2 apresentam as cargas previstas para ruptura por flexão para as lajes dos grupos 1, 2 e 3.

Tabela C.1 – Cargas previstas para ruptura por flexão das lajes do Grupo 1

Laje	c_{min} (mm)	c_{max} (mm)	e_x (mm)	e_y (mm)	l_x (mm)	l_y (mm)	a_x (mm)	a_y (mm)	f_x	f_y	$\Sigma W_i/m_u$	m_u (N.m/m)	V_{flex} (kN)
L41	150	250	525	525	2700	2700	1275	1225	0,152	0,156	7,409	144579	1071
L41A	150	250	525	525	2700	2700	1275	1225	0,152	0,156	7,409	173786	1288
L43A	150	450	525	525	2700	2700	1275	1125	0,149	0,165	7,762	143979	1118
L44	150	600	525	525	2700	2700	1275	1050	0,146	0,172	8,064	172283	1389
L42	200	400	525	525	2700	2700	1250	1150	0,152	0,162	7,750	173786	1347
L42A	200	400	525	525	2700	2700	1250	1150	0,152	0,162	7,750	174337	1351
L45	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	162545	1325
L46	200	800	525	525	2700	2700	1250	950	0,140	0,182	8,621	173990	1500

Tabela C.2 – Cargas previstas para ruptura por flexão das lajes dos grupos 2 e 3

Laje	c_{min} (mm)	c_{max} (mm)	e_x (mm)	e_y (mm)	l_x (mm)	l_y (mm)	a_x (mm)	a_y (mm)	f_x	f_y	$\Sigma W_i/m$	m_u (N.m/m)	V_{flex} (kN)
L45FS_CG	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	150757	1229
L45FD_CG	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	159578	1300
L45FD	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	160693	1309
L45FFS_CG	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	147185	1199
L45FFD_CG	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	172583	1406
L45FFD	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	146292	1192
L45_AC1	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	159578	1300
L45FFD_AC2	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	161686	1318
L45FFD_AC3	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	159773	1302
L45FFD_AC4	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	161448	1316
L45FFD_AC5	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	160381	1307
L45_AC5	200	600	525	525	2700	2700	1250	1050	0,148	0,172	8,149	160561	1308

D – CÁLCULO DAS FORÇAS NOS TIRANTES DO SISTEMA DE ENSAIO

O posicionamento dos tirantes nas lajes é apresentado na Figura A3.1, juntamente com a identificação. Foram registradas leituras das deformações dos tirantes em algumas lajes ensaiadas, incluindo lajes com um e dois furos e lajes monolíticas. A Tabela A3.1 apresenta as características mecânicas dos tirantes.

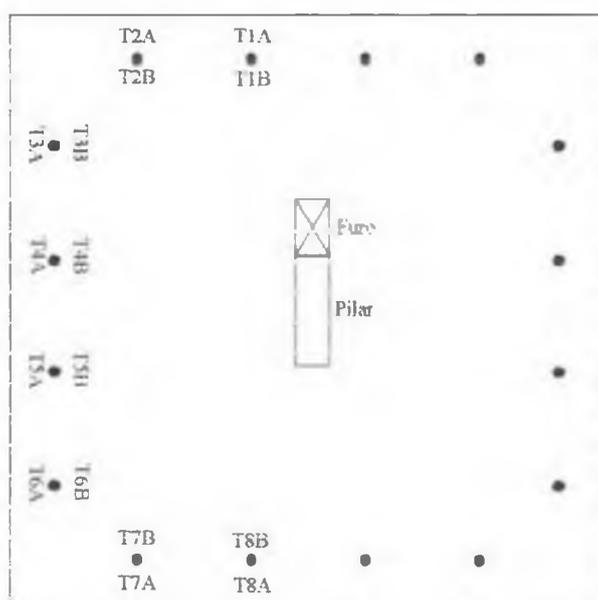


Figura D.1 – Posição e identificação dos tirantes nas lajes

Tabela D.1 – Características mecânicas dos tirantes

Amostra	Diâmetro(mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_s (mm/m)	E_s (GPa)
1		525	679	2,5	210
2	25,0	555	697	2,4	231
3		536	670	2,3	233
MEDIA		539	682	2,4	225
DESVIO PADRÃO		15,2	13,7	0,1	12,7
COEF. VARIAÇÃO (%)		2,8	2,0	4,2	5,7

O cálculo das forças atuantes em cada tirante foi feito utilizando a Lei de Hooke, que relaciona linearmente a tensão normal atuante ($\sigma = F/A$, sendo F a força atuante e A a área da seção transversal do tirante) com a deformação específica correspondente, e é apresentada nas eqs. D.1 e D.2.

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (\text{MPa}) \quad \text{Eq. D.1}$$

onde

σ é a tensão atuante, em MPa;

E_s é o módulo de elasticidade longitudinal do aço, em MPa

ε é a deformação específica, em mm/m;

Substituindo $\sigma = \frac{F}{A}$ na eq. D.1, pode-se determinar a força F atuante, através da eq. D.2, em função da deformação correspondente ε , considerando as características mecânicas do aço.

$$F = A E_s \varepsilon \quad (\text{N}) \quad \text{Eq. D.2}$$

onde

A é a área da seção transversal do tirante, em mm^2

As tabs. D.2 a D.11 apresentam os valores médios para as leituras de deformações dos tirantes T1 a T8, respectivamente, das lajes L45FD, L45FFD, L45FFD_AC2, L45FFD_AC3 e L45 AC1.

As figs. D.2 a D.6 mostram as curvas que relacionam as deformações nos tirantes com as correspondentes cargas aplicadas.

Tabela D.2 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45FD

Carga (kN)	Deformações nos tirantes (mm/m)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
150	0,01	0,02	0,04	0,07	0,03	0,01	0,02	0,03
200	0,03	0,06	0,09	0,15	0,07	0,02	0,03	0,06
250	0,05	0,11	0,12	0,21	0,12	0,03	0,05	0,10
350	0,10	0,18	0,15	0,33	0,22	0,04	0,09	0,20
450	0,15	0,23	0,17	0,47	0,35	0,05	0,12	0,30
550	0,18	0,28	0,19	0,61	0,47	0,07	0,15	0,40
600	0,24	0,31	0,20	0,65	0,53	0,07	0,16	0,45
650	0,26	0,33	0,22	0,71	0,59	0,08	0,17	0,50
700	0,32	0,36	0,24	0,77	0,65	0,09	0,18	0,55
750	0,32	0,39	0,25	0,84	0,72	0,10	0,18	0,58

Tabela D.3 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FD

Carga (kN)	Força nos tirantes (kN)								$2 \sum F_i$
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	
0	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	1	-4
100	1	1	0	1	1	1	1	1	13
150	1	2	4	7	3	1	2	3	44
200	3	6	9	15	7	2	3	6	101
250	5	11	12	22	12	3	5	10	158
350	10	18	15	33	23	4	9	20	266
450	15	23	17	48	36	5	12	31	375
550	19	29	20	63	48	7	15	41	480
600	24	31	21	66	55	7	16	46	532
650	27	34	22	73	61	8	18	51	586
700	32	37	24	79	67	9	19	56	646
750	32	40	25	87	74	10	19	60	692

Tabela D.4 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45FFD

Carga (kN)	Deformações nos tirantes (mm/m)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0,04	0,02	0,09	0,08	0,09	0,02	0,03	0,01
250	0,13	0,10	0,16	0,19	0,22	0,06	0,11	0,03
350	0,23	0,13	0,18	0,29	0,37	0,07	0,14	0,08
450	0,33	0,13	0,19	0,41	0,53	0,09	0,16	0,12
500	0,39	0,15	0,20	0,47	0,61	0,10	0,18	0,15
550	0,44	0,16	0,21	0,52	0,69	0,11	0,19	0,19
600	0,50	0,16	0,21	0,58	0,76	0,12	0,19	0,23
650	0,56	0,16	0,21	0,65	0,85	0,13	0,20	0,26

Tabela D.5 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FFD

Carga (kN)	FORÇA NOS TIRANTES (kN)								$2 \sum F_i$
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	4	2	9	8	9	2	3	1	73
250	13	10	16	19	22	6	11	3	202
350	22	13	19	30	38	7	14	8	301
450	33	13	20	42	55	9	16	12	403
500	40	15	21	48	62	10	18	15	459
550	45	16	22	53	71	11	19	19	512
600	51	16	22	60	78	12	19	24	563
650	58	16	22	67	88	13	20	27	620

Tabela D.6 – Leituras médias das deformações ε nos tirantes da laje L45FFD_AC2

Carga (kN)	Deformações nos tirantes (mm/m)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
150	0,03	0,02	0,11	0,17	0,04	0,10	0,00	0,11
250	0,13	0,08	0,15	0,30	0,04	0,17	0,02	0,24
350	0,29	0,11	0,16	0,42	0,09	0,19	0,03	0,42
450	0,41	0,14	0,17	0,53	0,14	0,20	0,05	0,60
550	0,55	0,17	0,18	0,65	0,20	0,20	0,07	0,78
650	0,68	0,20	0,19	0,75	0,26	0,19	0,09	0,94
750	0,82	0,23	0,20	0,86	0,35	0,16	0,11	1,10
850	0,96	0,27	0,21	0,95	0,45	0,15	0,14	1,24
900	1,05	0,30	0,21	1,00	0,55	0,15	0,15	1,32
950	1,12	0,32	0,21	1,04	0,55	0,13	0,16	1,39
1000	1,21	0,34	0,20	1,08	0,59	0,10	0,17	1,48
1050	1,30	0,36	0,20	1,12	0,64	0,09	0,20	1,55
1100	1,37	0,37	0,19	1,15	0,68	0,07	0,21	1,62
1150	1,47	0,39	0,17	1,20	0,73	0,05	0,25	1,73
1200	1,53	0,38	0,14	1,27	0,79	0,03	0,28	1,81

Tabela D.7 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FFD_AC2

Carga (kN)	Força nos tirantes (kN)								$2 \sum F_i$
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	3	2	11	17	4	10	0	11	117
250	13	8	15	30	4	18	2	25	230
350	29	11	16	43	9	20	3	43	348
450	42	14	17	54	14	21	5	62	457
550	57	17	18	67	21	21	7	80	574
650	70	20	19	77	27	20	9	97	677
750	84	24	20	88	36	16	11	113	786
850	98	27	21	98	46	15	14	128	896
900	108	31	22	103	57	15	15	135	973
950	115	32	21	107	57	13	16	143	1009
1000	124	34	21	111	61	10	18	152	1061
1050	133	37	20	115	66	9	20	160	1121
1100	141	38	19	118	70	7	22	166	1164
1150	151	40	17	124	75	5	26	178	1230
1200	158	39	14	130	81	3	29	186	1281

Tabela D.8 – Leituras médias das deformações ϵ nos tirantes da laje L45FFD_AC3

Carga (kN)	Deformações nos tirantes (mm/m)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	0	0	0	0	0	-	0	0,0
150	0,03	0,02	0,07	0,06	0,07	-	0,03	0,02
250	0,08	0,05	0,14	0,17	0,18	-	0,08	0,04
350	0,24	0,07	0,16	0,26	0,27	-	0,14	0,10
450	0,40	0,09	0,17	0,36	0,39	-	0,19	0,19
550	0,53	0,11	0,17	0,46	0,50	-	0,25	0,30
650	0,67	0,13	0,18	0,57	0,61	-	0,28	0,42
700	0,80	0,14	0,19	0,62	0,66	-	0,31	0,48
750	0,82	0,15	0,20	0,67	0,72	-	0,33	0,55
800	0,89	0,17	0,20	0,72	0,77	-	0,35	0,61
850	0,97	0,18	0,20	0,77	0,82	-	0,36	0,67
900	1,03	0,19	0,20	0,82	0,87	-	0,37	0,76
950	1,11	0,20	0,20	0,87	0,93	-	0,39	0,84
1000	1,19	0,22	0,21	0,91	0,98	-	0,41	0,91

Tabela D.9 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45FFD AC3

Carga (kN)	Força nos tirantes (kN)							
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
0	0	0	0	0	0	-	0	0
150	3	2	7	6	7	-	3	2
250	8	5	14	18	18	-	8	4
350	25	7	16	27	28	-	14	10
450	41	9	17	37	40	-	20	19
550	54	11	17	47	51	-	25	30
650	69	13	19	58	63	-	29	43
700	82	14	20	63	67	-	31	49
750	84	15	20	69	74	-	33	56
800	91	17	21	74	79	-	36	62
850	99	18	21	79	84	-	37	69
900	106	20	21	84	90	-	38	78
950	114	21	21	89	96	-	40	86
1000	123	22	21	94	100	-	42	94

Tabela D.10 – Leituras médias das deformações ε nos tirantes da laje L45 AC1

Carga (kN)	Deformações nos tirantes (mm/m)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	-	0	0	0	0	0	0	0,0
150	-	0,02	0,08	0,13	0,05	0,05	0,01	0,07
250	-	0,05	0,12	0,21	0,09	0,06	0,02	0,09
350	-	0,11	0,16	0,38	0,21	0,17	0,07	0,17
450	-	0,12	0,18	0,51	0,31	0,26	0,11	0,22
550	-	0,15	0,20	0,65	0,42	0,34	0,15	0,31
650	-	0,16	0,23	0,76	0,53	0,41	0,18	0,40
750	-	0,18	0,26	0,86	0,64	0,47	0,21	0,49
850	-	0,20	0,29	0,96	0,75	0,55	0,24	0,60
900	-	0,22	0,31	1,01	0,81	0,59	0,25	0,64
950	-	0,23	0,33	1,04	0,85	0,62	0,27	0,69
1000	-	0,25	0,34	1,09	0,90	0,66	0,28	0,75
1050	-	0,26	0,35	1,13	0,96	0,69	0,29	0,81
1100	-	0,26	0,36	1,17	1,01	0,73	0,30	0,87
1150	-	0,28	0,37	1,23	1,06	0,76	0,30	0,94
1200	-	0,28	0,37	1,28	1,10	0,79	0,31	1,00

Tabela D.11 – Leituras médias das forças F nos tirantes da laje L45 AC1

Carga (kN)	Força nos tirantes (kN)							
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
0	-	0	0	0	0	0	0	0
150	-	2	8	13	5	5	1	7
250	-	5	12	21	9	6	2	9
350	-	11	16	39	21	18	7	17
450	-	12	18	53	32	27	11	22
550	-	15	21	66	43	35	15	32
650	-	16	23	78	54	42	18	41
750	-	19	26	89	66	48	21	50
850	-	21	29	98	77	57	24	61
900	-	23	31	103	83	61	25	66
950	-	23	33	107	88	64	27	71
1000	-	25	35	112	93	68	28	77
1050	-	26	36	116	98	71	30	83
1100	-	27	37	120	103	75	30	90
1150	-	28	38	126	109	78	31	96
1200	-	28	38	131	113	81	31	103

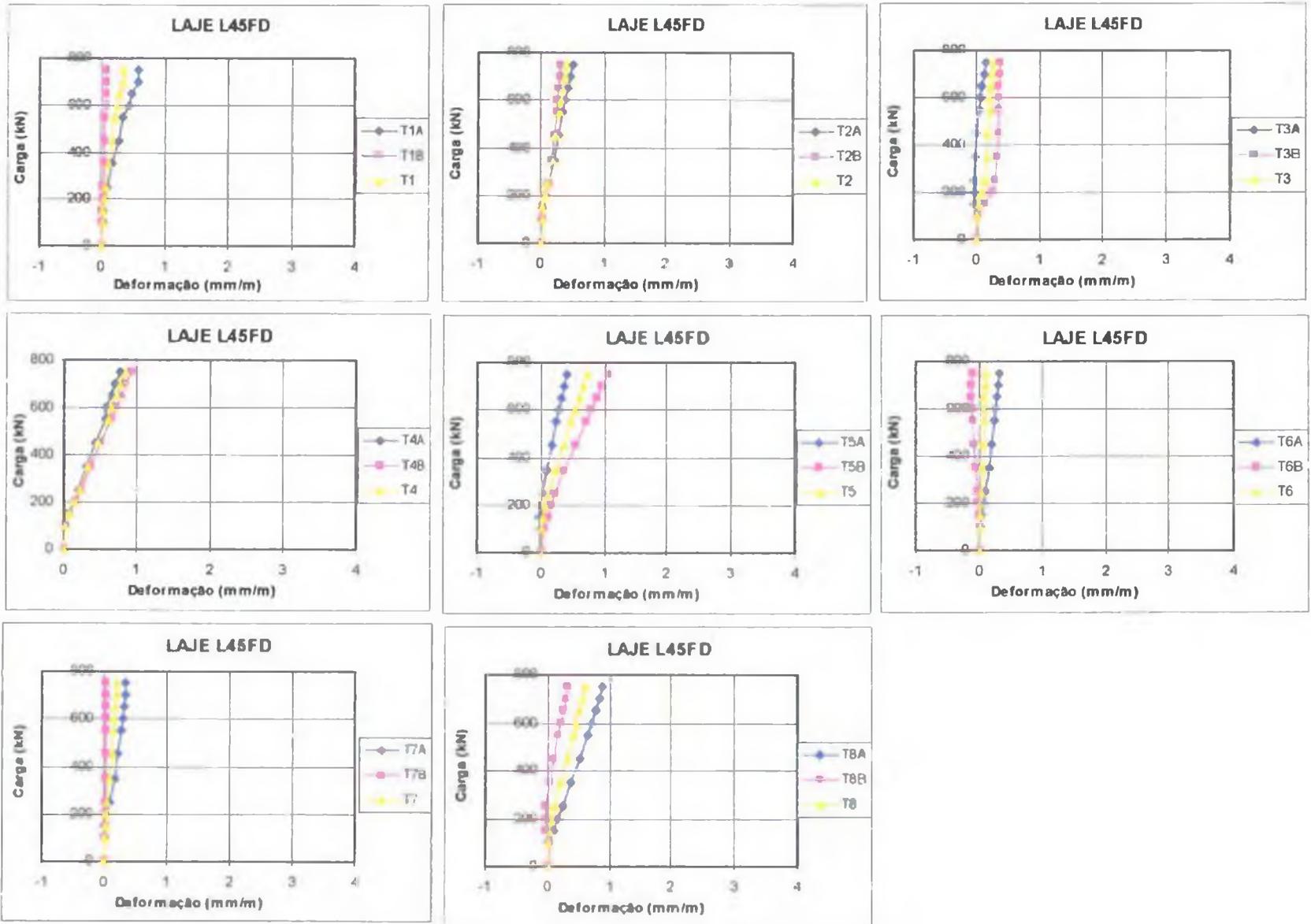


Figura D 2 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FD

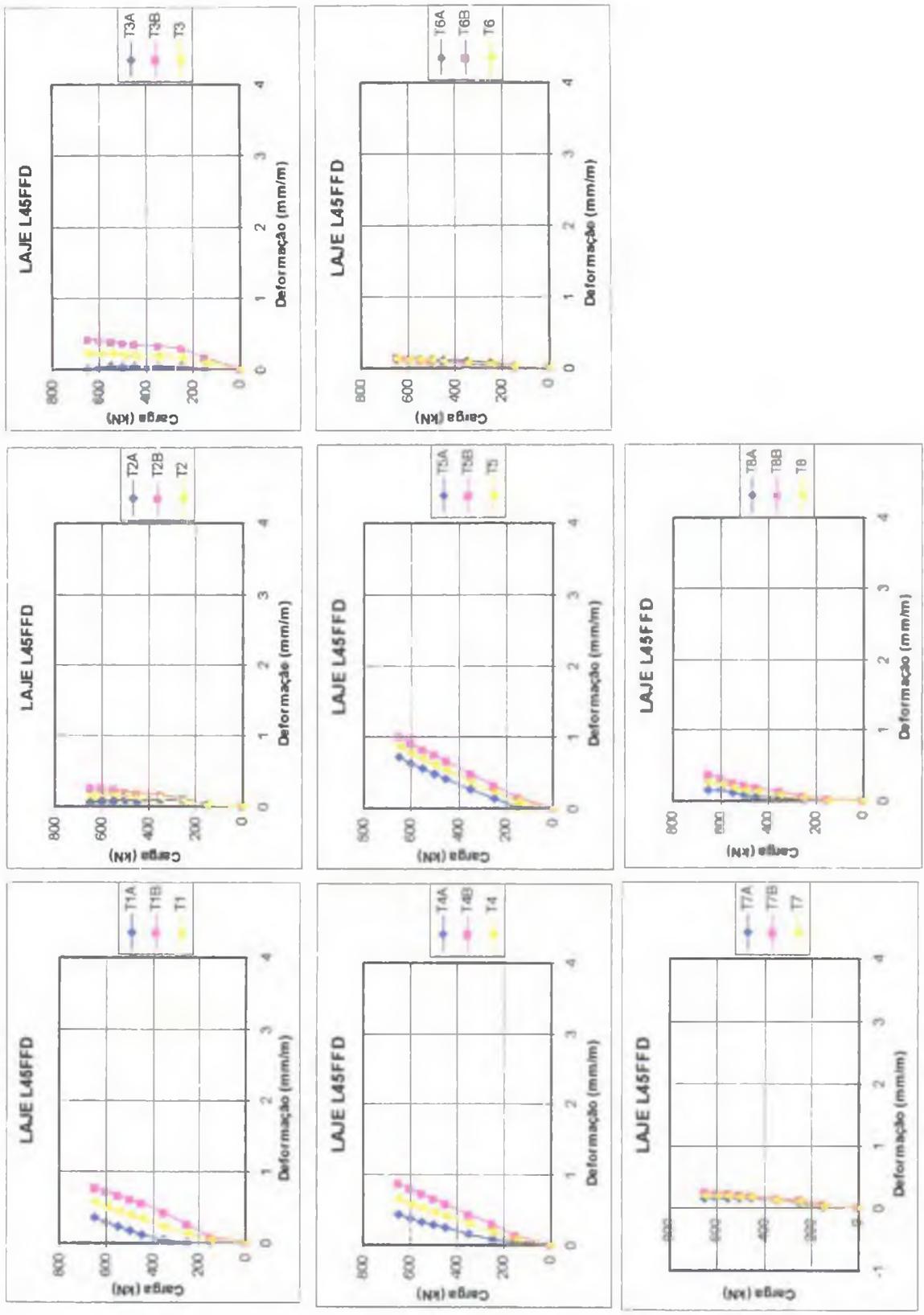


Figura D.3 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FFD

Figura D.4 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FFD_AC2

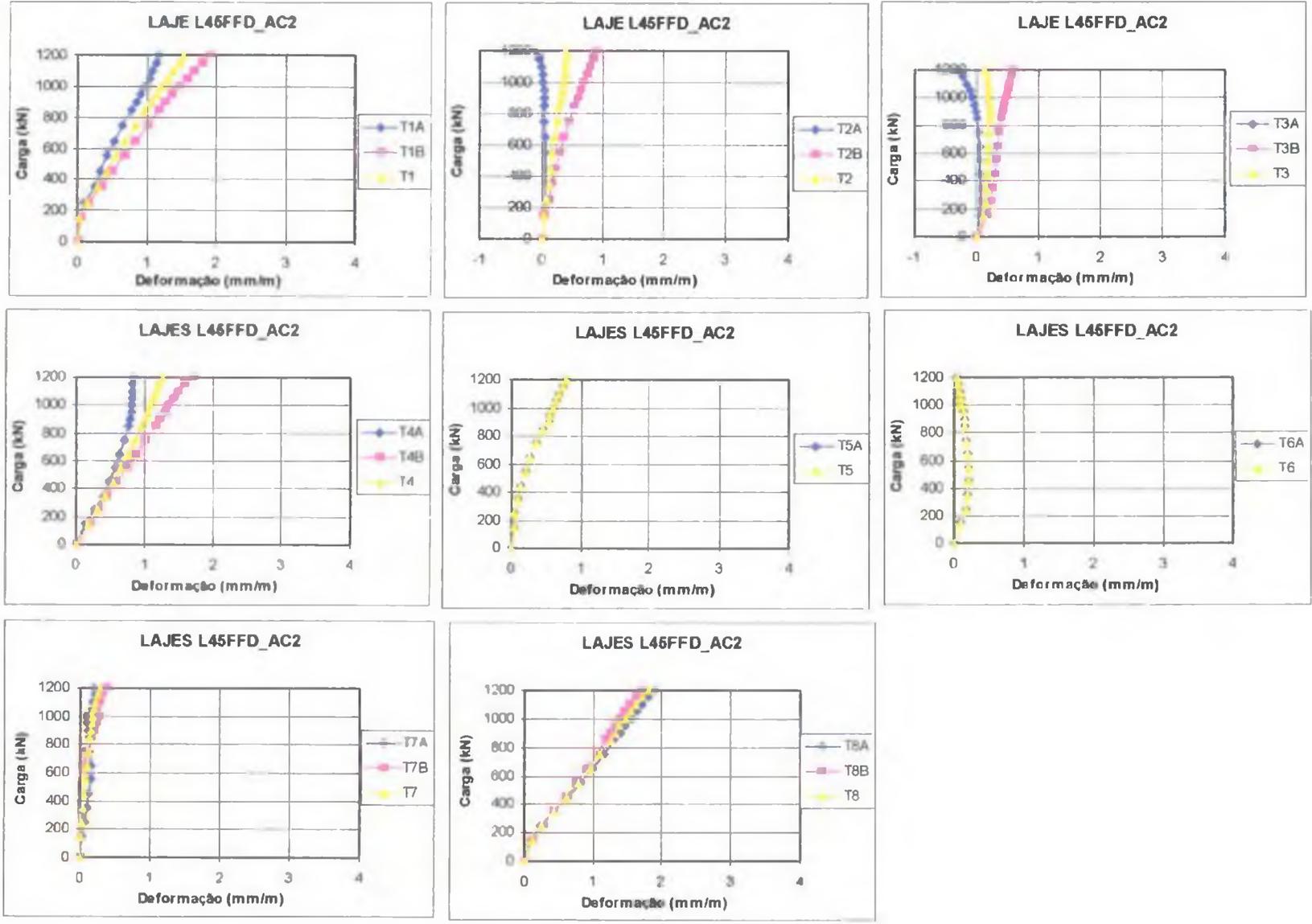


Figura D.5 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45FFD_AC3

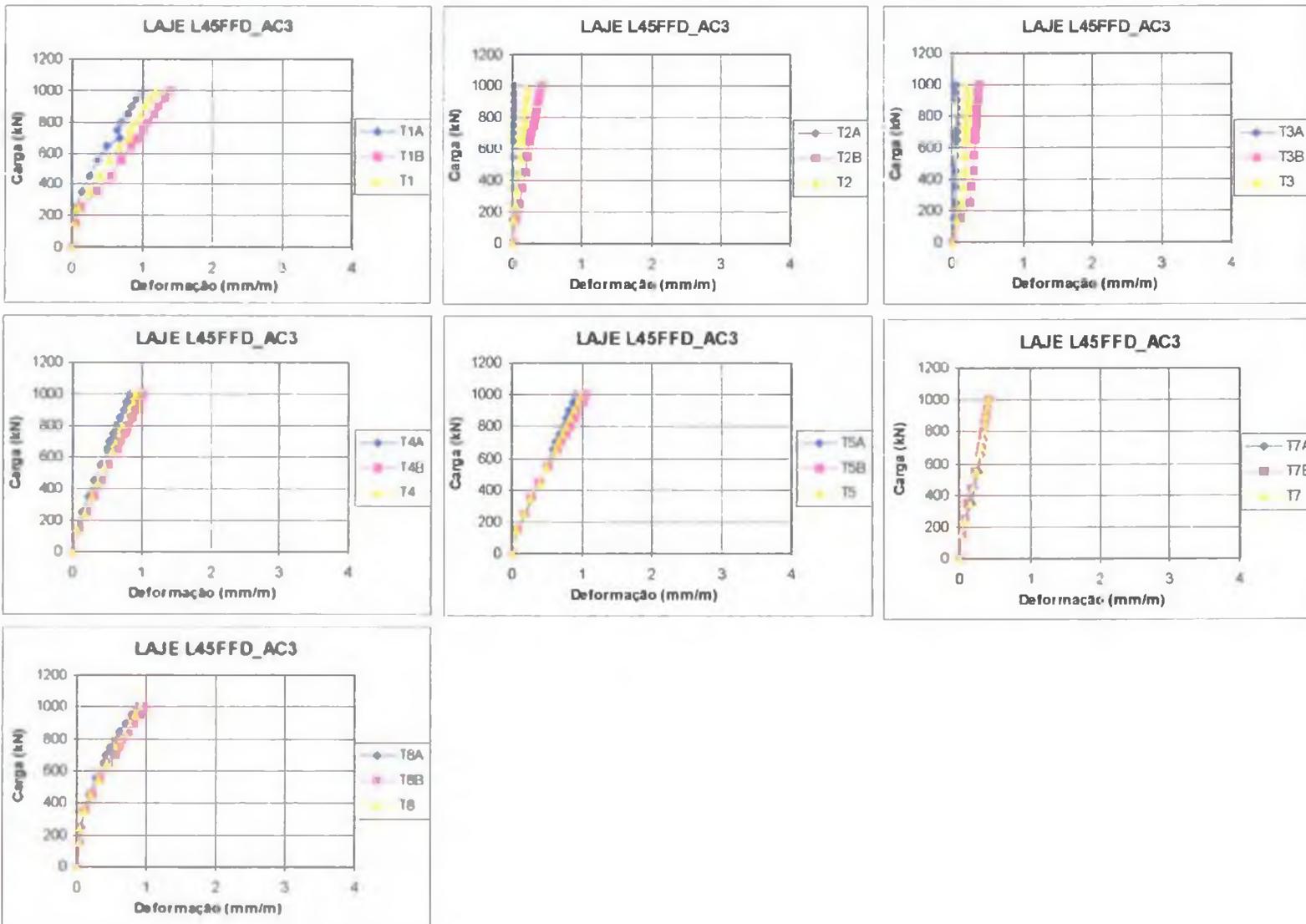


Figura D.6 – Deformações dos aços dos tirantes na laje L45_AC1

