

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM FUROS
ADJACENTES AO PILAR E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO**

RAPHAEL MIRANDA DE SOUZA

ORIENTADOR: GUILHERME SALES S. A. MELO

CO-ORIENTADOR: RONALDO BARROS GOMES

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD – 003A/08
BRASÍLIA/DF, OUTUBRO – 2008

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**“PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM FUROS
ADJACENTES AO PILAR E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO”**

RAPHAEL MIRANDA DE SOUZA

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

APROVADA POR:

GUILHERME SALES S. A. MELO, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)

YOSIAKI NAGATO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

FLÁVIO ANTÔNIO DOS SANTOS, DSc (CEFET-MG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DÊNIO RAMAM CARVALHO DE OLIVEIRA, DSc (UFPA)
(EXAMINADOR EXTERNO)

FERNANDO REBOUÇAS STUCCHI, DSc (USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 23 DE OUTUBRO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, RAPHAEL MIRANDA DE

Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Furos Adjacentes ao Pilar e Transferência de Momento [Distrito Federal] 2008.

XXXV, 407 p., 297mm (ENC/FT/UnB. Doutor. Estruturas e Construção Civil. 2008).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. Estruturas | 2. Laje Lisa |
| 3. Concreto Armado | 4. Punção |
| 5. Furos | |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, RAPHAEL MIRANDA DE (2008). *Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Furos Adjacentes ao Pilar e Transferência de Momento*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 003A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 442 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Raphael Miranda de Souza.

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Furos Adjacentes ao Pilar e Transferência de Momento.

GRAU/ANO: Doutor/2008.

É concedida à Universidade de Brasília 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.

Raphael Miranda de Souza

Avenida das Camélias, 93, Apartamento 301, Nova Suíça

CEP: 30.460-150 – Belo Horizonte/MG – Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico à minha esposa Flávia Amélia.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Guilherme Sales S. A. Melo, pela contundente orientação, amizade, apoio e motivação ao longo do trabalho.

Ao Professor Ronaldo B. Gomes, pela co-orientação, amizade e acolhimento incondicional no período de desenvolvimento do programa experimental.

Ao Professor Paul Regan, pelas contribuições de grande valor desde o início do programa experimental.

Ao Professor Yosiaki Nagato, pelas gentilezas e ajudas durante o desenvolvimento do programa experimental.

Ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (CMEC-UFG), em especial ao Professor Gilson Natal Guimarães, pelo acolhimento, amizade e incentivo durante o desenvolvimento do programa experimental na UFG.

Ao CEFET-MG, em especial ao Professor Flávio Antônio dos Santos, por conceder redução de carga horária, fundamental para o término deste trabalho, além da compreensão durante os momentos de finalização desta tese.

Aos Colegas da UnB, UFG e UEG, Carlos Luna, Helder, Maurício, Wladimir, Ariovaldo, Agnaldo, David, Diórgenes, Elisandra, Fábio, Keyla, Murilo, Poliana, Tancredo, Tais e Liana pela fundamental ajuda na realização dos ensaios, conhecimentos compartilhados e incentivo.

Às empresas REALMIX CONCRETO Ltda, Carlos Campos Consultoria Ltda, FURNAS Centrais Elétricas S.A. e Perfínasa – Perfilados e Ferros Nossa Senhora Aparecida Ltda por terem colaborado com materiais e ensaios de caracterização.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, por todo apoio e incentivo.

À minha esposa, pelo amor, apoio e compreensão, e a Deus.

RESUMO

PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM FUROS ADJACENTES AO PILAR E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO

São investigados o comportamento estrutural e a resistência última à punção de ligações laje-pilar de regiões internas das lajes lisas, com um ou dois furos adjacentes ao pilar, e com ou sem transferência de momento fletor da laje ao pilar. As principais variáveis foram: o posicionamento e as dimensões dos furos, a taxa e a distribuição da armadura de flexão, a armadura de cisalhamento e a excentricidade de carga (relação $M(\text{momento transferido ao pilar})/V(\text{força cortante})$) na ligação. Foram ensaiadas 19 ligações internas laje-pilar, distribuídas em 2 grupos: o primeiro sem a transferência de momento (Série 1 – 10 lajes), com 1 (uma) ligação sem furo, 5 (cinco) com um furo, 2 (duas) com um furo e armadura de cisalhamento e 2 (duas) com dois furos, tendo como principais variáveis o tamanho e posicionamento dos furos, a taxa e a distribuição da armadura de flexão e a armadura de cisalhamento; e o segundo grupo com transferência de momento (Série 2 – 9 lajes), com 2 (duas) ligações sem furo, 4 (quatro) com um furo e 3 (três) com dois furos, tendo como principais variáveis o tamanho e posicionamento dos furos, a direção e sentido do momento transferido e a excentricidade de carga (relação M/V) igual a 0,50m ou 0,25m na ligação.

Foram analisados os resultados de cargas últimas, fissuração, deslocamento vertical, deformações das armaduras de flexão, de cisalhamento e do concreto. O posicionamento dos furos em relação ao pilar, adjacente ao maior ou menor lado, as dimensões dos furos, a taxa e a distribuição da armadura de flexão, a armadura de cisalhamento, a variação da relação M_u/V_u em função do carregamento, e, por conseguinte, da excentricidade, influenciaram o comportamento e a carga de ruptura das lajes. Essas influências foram quantificadas.

Os resultados experimentais foram comparados com os estimados pelas normas: CEB-FIP/MC1990, EC2/2004, ACI-318:2005 e NBR 6118:2003. O ACI e o EC2 apresentaram estimativas mais conservadoras, embora tenham apresentado algumas estimativas contra a segurança. A NBR 6118:2003, apesar de baseada em parte no EC2, apresentou estimativas menos conservadoras e com um número maior de estimativas contra a segurança. Recomenda-se que todas as normas passem a considerar o momento causado pela excentricidade do perímetro crítico em lajes com furos e, neste sentido, foram apresentadas propostas de modificações para todas as normas estudadas.

ABSTRACT

PUNCHING SHEAR IN REINFORCED FLAT SLABS WITH HOLES ADJACENTS TO THE COLUMN AND MOMENT TRANSFER

The structural behavior and the ultimate punching shear resistance of internal reinforced concrete flat slab-column connections, with one or two holes adjacent to the column, with or without flexural moment transfer of the slab to the column was investigated. Main variables were: hole placing and dimensions, flexural reinforcement layout and ratio, shear reinforcement and the eccentricity of the load (M (moment transferred to column) / V (shear)) ratio at the connection. Nineteen internal slab-column joining were tested, separated in two groups: one without moment transfer (Series 1), with 10 (ten) connections: one without hole, five with one hole, two with one hole and shear reinforcement, and two with two holes; and the second group with moment transfer (Series 2), with 9 (nine) connections: two without hole, four with one hole, and three with two holes. For series 1 the variables were hole placing and dimensions, flexural reinforcement layout and ratio, and shear reinforcement, while for series 2 the variables were the direction and orientation of the applied moment and the eccentricity of the applied load (M/V ratio direction and sense of moment transferred and eccentricity of the load (relation M/V) - 0,50m or 0,25m).

Ultimate loads, cracking, deflections, concrete and reinforcement strains were analyzed. The hole placing in relation of the column, adjacent to the smaller or bigger column dimension, the hole dimension, flexural reinforcement rate and placing, shear reinforcement, the variation of relation M_u/V_u in function of the load, and, than, of eccentricity of the load, influenced the slabs behavior and rupture load. These influences were quantified.

Test results were compared with the estimations from CEB-FIP/MC1990, EC2/2004, ACI-318:2005 and NBR 6118:2003. ACI and EC2 presented most conservative estimates, although have presented some non conservative estimates. Brazilian NBR, even though being partly based in EC2, presented smaller conservative estimates and more non conservative estimates. A modification on all codes is proposed for taking in account the moment caused by the eccentricity at the critical perimeter for slabs with holes.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	2
1.3 OBJETIVO.....	3
1.4 METODOLOGIA E CONTEÚDO.....	3
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES.....	6
2.1.1 CEB-FIP/MC1990.....	6
2.1.2 EUROCODE 2 (EC2/2004).....	10
2.1.3 ACI-318:2005.....	13
2.1.4 NBR 6118:2003.....	17
2.2 HISTÓRICO RESUMIDO DO ESTUDO DA PUNÇÃO.....	20
2.3 ESTUDOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE FUROS.....	22
2.3.1 Trabalhos realizados no exterior.....	22
2.3.2 Trabalhos realizados no Brasil.....	47
2.4 ESTUDOS SOBRE LAJES COM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO PARA O PILAR.....	64
2.4.1 Trabalhos realizados no exterior.....	64
2.4.2 Trabalhos realizados no Brasil.....	80
2.5 CONCLUSÕES SOBRE OS ESTUDOS REALIZADOS.....	86
CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	88
3.1 DEFINIÇÃO DAS SÉRIES DE LAJES E PRINCIPAIS VARIÁVEIS.....	89
3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIDAS.....	91
3.2.1 Características geométricas.....	91
3.2.2 Carregamento.....	93
3.2.2.1 Carregamento das lajes da Série 1 – sem transferência de momento.....	93
3.2.2.2 Carregamento das lajes da Série 2 – com transferência de momento.....	94
3.2.3 Armadura de flexão.....	98

3.2.4 Armadura de cisalhamento.....	108
3.2.5 Materiais.....	111
3.2.5.1 Aço.....	111
3.2.5.2 Concreto.....	112
3.2.6 Moldagem e cura.....	119
3.3 SISTEMA DE ENSAIO.....	122
3.4 INSTRUMENTAÇÃO.....	126
3.4.1 Deslocamento vertical da laje.....	126
3.4.2 Deformação específica.....	131
3.4.2.1 Instrumentação da armadura.....	131
3.4.2.2 Instrumentação do concreto.....	139
3.5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	142
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES SEM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO (SÉRIE 1).....	146
4.1 INTRODUÇÃO.....	146
4.2 CARGA E MODO DE RUPTURA.....	146
4.3 FISSURAÇÃO E SUPERFÍCIE DE RUPTURA.....	156
4.3.1 Fissuração.....	156
4.3.2 Superfície de ruptura.....	163
4.4 DESLOCAMENTO VERTICAL.....	174
4.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DA ARMADURA DE FLEXÃO.....	184
4.6 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DA ARMADURA DE CISALHAMENTO.....	189
4.7 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DO CONCRETO.....	191
CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES COM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO (SÉRIE 2).....	201
5.1 INTRODUÇÃO.....	201
5.2 CARGA E MODO DE RUPTURA.....	201
5.3 FISSURAÇÃO E SUPERFÍCIE DE RUPTURA.....	212
5.3.1 Fissuração.....	212
5.3.2 Superfície de ruptura.....	218
5.4 DESLOCAMENTO VERTICAL.....	227

5.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DA ARMADURA DE FLEXÃO.....	237
5.6 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DO CONCRETO.....	242
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	247
6.1 LAJES DA SÉRIE 1.....	247
6.1.1 Carga de ruptura.....	247
6.1.2 Fissuração.....	249
6.1.3 Deslocamento vertical.....	251
6.1.4 Deformação nas armaduras.....	254
6.1.4.1 Armadura de flexão.....	254
6.1.4.2 Armadura de cisalhamento.....	255
6.1.5 Deformação no concreto.....	255
6.2 LAJES DA SÉRIE 2.....	256
6.2.1 Carga de ruptura.....	256
6.2.2 Fissuração.....	261
6.2.3 Deslocamento vertical.....	263
6.2.4 Deformação da armadura de flexão.....	266
6.2.5 Deformação do concreto.....	266
6.3 COMPARAÇÃO DAS CARGAS DE RUPTURA ENTRE AS SÉRIES.....	267
6.3.1 Lajes sem furo.....	269
6.3.2 Lajes com um furo.....	269
6.3.3 Lajes com dois furos.....	271
6.3.4 Lajes com furo e/ou momento na direção <i>EW</i>	272
6.3.5 Lajes com furo e/ou momento na direção <i>NS</i>	275
6.4 COMPARAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS ENTRE AS SÉRIES.....	276
6.4.1 Lajes com furo e/ou momento na direção <i>EW</i>	276
6.4.2 Lajes com furo e/ou momento na direção <i>NS</i>	277
CAPÍTULO 7 – COMPARAÇÃO COM NORMAS E PROPOSTAS PARA CÁLCULO DE LAJES LISAS COM FURO ADJACENTE A UM PILAR INTERNO E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO.....	279
7.1 INTRODUÇÃO.....	279
7.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM NORMAS.....	279

7.2.1 Lajes da Série 1 – sem transferência de momento.....	281
7.2.1.1 CEB-FIP/MC1990.....	281
7.2.1.1.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento.....	281
7.2.1.2 EUROCODE 2/2004.....	281
7.2.1.2.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento.....	281
7.2.1.2.2 Lajes da Série 1 com armadura de cisalhamento.....	284
7.2.1.3 ACI-318:2005.....	286
7.2.1.3.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento.....	286
7.2.1.3.2 Lajes da Série 1 com armadura de cisalhamento.....	289
7.2.1.4 NBR 6118:2003.....	290
7.2.1.4.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento.....	290
7.2.1.4.2 Lajes da Série 1 com armadura de cisalhamento.....	292
7.2.2 Lajes da Série 2 – com transferência de momento.....	294
7.2.2.1 CEB-FIP/MC1990.....	300
7.2.2.2 EUROCODE 2/2004.....	301
7.2.2.3 ACI-318:2005.....	303
7.2.2.4 NBR 6118:2003.....	307
7.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS ESTUDADAS.....	310
7.3.1 Lajes da Série 1 – sem transferência de momento.....	310
7.3.2 Lajes da Série 2 – com transferência de momento.....	313
7.4 SUGESTÃO PARA A NBR 6118:2003 PARA O CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) SEM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO.....	316
7.5 SUGESTÃO PARA O EUROCODE 2/2004 E O ACI-318:2005 PARA O CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) SEM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO.....	324
7.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS ESTUDADAS, A PROPOSTA DE BORGES, AS PROPOSTAS APRESENTADAS PARA AS NORMAS E UMA ALTERAÇÃO NA PROPOSTA DE BORGES, PARA LAJES COM FURO(S), SEM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO E SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA.....	325
7.7 SUGESTÃO PARA A NBR 6118:2003 PARA O CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO.....	334
7.8 SUGESTÃO PARA O EUROCODE 2/2004 E O ACI-318:2005 PARA O	

CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO.....	337
7.9 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS ESTUDADAS E AS PROPOSTAS APRESENTADAS PARA LAJES COM FURO(S), E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA.....	338
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	343
8.1 CONCLUSÕES.....	343
8.1.1 Comportamento das lajes.....	344
8.1.1.1 Lajes sem transferência de momento da laje ao pilar (Série 1).....	344
8.1.1.1.1 Modo, carga e superfície de ruptura.....	344
8.1.1.1.2 Deslocamentos verticais.....	345
8.1.1.1.3 Deformações nas armaduras de flexão.....	345
8.1.1.1.4 Deformações nas armaduras de cisalhamento.....	345
8.1.1.1.5 Deformações do concreto.....	346
8.1.1.2 Lajes com transferência de momento da laje ao pilar (Série 2).....	346
8.1.1.2.1 Modo, carga e superfície de ruptura.....	346
8.1.1.2.2 Deslocamentos verticais.....	347
8.1.1.2.3 Deformações nas armaduras de flexão.....	348
8.1.1.2.4 Deformações do concreto.....	348
8.1.2 Normas de projeto.....	348
8.1.2.1 Sugestão para as normas de cálculo para lajes com furo(s), sem transferência de momento.....	349
8.1.2.2 Sugestão para as normas de cálculo para lajes com furo(s) e transferência de momento.....	351
8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	352
8.2.1 Com relação ao aparato experimental utilizado no laboratório.....	352
8.2.2 Novas pesquisas experimentais.....	352
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	353
A - GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DO AÇO DA ARMADURA	

DE FLEXÃO E DA ARMADURA DE CISALHAMENTO.....	360
B – LEITURAS DOS ENSAIOS.....	365
C - CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES UTILIZANDO A TEORIA DAS LINHAS DE RUPTURA.....	397

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 – Valores de K.....	8
Tabela 2.2 – Valores de K (NBR 6118:2003).....	19
Tabela 2.3 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por MOWRER & VANDERBILT (1967).....	25
Tabela 2.4 – Parâmetros dos furos nas lajes ensaiadas por ROLL at al. (1971).....	27
Tabela 2.5 – Disposição dos furos utilizados por ROLL at al. (1971).....	28
Tabela 2.6 – Características e cargas de ruptura das lajes de ROLL at al. (1971).....	29
Tabela 2.7 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por TENG et al. ...	34
Tabela 2.8 – Comparações das médias dos valores das cargas obtidas, entre BS8110 estendido (recomendado por TENG et al.) e outros códigos (ACI/95 e EC2/92).....	38
Tabela 2.9 – Características, cargas e modos de ruptura das lajes de REGAN (1999)...	42
Tabela 2.10 – Resultados das lajes testadas por IOANNOU (2001).....	46
Tabela 2.11 – Resultados das cargas experimentais e estimadas por IOANNOU (2001).....	46
Tabela 2.12 – Resultados das lajes testadas por GOMES e ANDRADE (1993)	49
Tabela 2.13 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por SILVA (2003).....	53
Tabela 2.14 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por SOUZA (2004).....	57
Tabela 2.15 – Características e cargas de ruptura das lajes de BORGES (2004).....	58
Tabela 2.16 – Comparações entre as médias das estimativas das normas ACI/02, EC2/01, NBR6118:2003, as propostas dos autores TENG at al.(1999), IOANNOU (2001), ROLL et al. (1977) e a proposta de BORGES (2004) para a NBR6118:2003 para lajes com furo e sem armadura de cisalhamento.....	62
Tabela 2.17 – Comparações entre as médias das estimativas das normas ACI/02, EC2/01, NBR6118:2003 e a proposta de BORGES (2004) para a NBR6118:2003 para lajes com furo e armadura de cisalhamento.....	63
Tabela 2.18 – Lajes testadas por MOE (1961).....	65
Tabela 2.19 – Lajes ensaiadas por HANSON & HANSON (1964).....	70
Tabela 2.20 – Lajes ensaiadas por ISLAM & PARK (1976).....	74

Tabela 2.21 – Lajes ensaiadas por HAWKINS, BAO & YAMASAKI (1989).....	78
Tabela 2.22 – Lajes ensaiadas por CORDOVIL (1995).....	84
Tabela 3.1 – Lajes da Série 1 e da Série 2 (dimensões em mm).....	90
Tabela 3.2 – Carregamento das lajes das séries 1 e 2.....	97
Tabela 3.3 – Caracterização das lajes.....	107
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados.....	111
Tabela 3.5 – Composição do concreto por m ³	112
Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas do concreto das lajes L1 a L4.....	113
Tabela 3.7– Propriedades mecânicas do concreto das lajes L5 a L13.....	115
Tabela 3.8– Propriedades mecânicas do concreto das lajes L14 a L19.....	117
Tabela 3.9– Resistência à compressão de cada laje na data dos ensaios.....	118
Tabela 4.1 – Carga e modo de ruptura das lajes da Série 1.....	148
Tabela 4.2 – Quadro de cargas da laje L1.....	149
Tabela 4.3 – Quadro de cargas da laje L2.....	149
Tabela 4.4 – Quadro de cargas da laje L3.....	150
Tabela 4.5 – Quadro de cargas da laje L4.....	150
Tabela 4.6 – Quadro de cargas da laje L5.....	151
Tabela 4.7 – Quadro de cargas da laje L6.....	152
Tabela 4.8 – Quadro de cargas da laje L7.....	153
Tabela 4.9 – Quadro de cargas da laje L9.....	154
Tabela 4.10 – Quadro de cargas da laje L16.....	155
Tabela 4.11 – Quadro de cargas da laje L19.....	156
Tabela 4.12 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 1.....	157
Tabela 5.1 – Carga e modo de ruptura das lajes da Série 2.....	203
Tabela 5.2 – Quadro de cargas da laje L8.....	205
Tabela 5.3 – Quadro de cargas da laje L10.....	206
Tabela 5.4 – Quadro de cargas da laje L11.....	207
Tabela 5.5 – Quadro de cargas da laje L12.....	208
Tabela 5.6 – Quadro de cargas da laje L13.....	208
Tabela 5.7 – Quadro de cargas da laje L14.....	209
Tabela 5.8 – Quadro de cargas da laje L15.....	210
Tabela 5.9 – Quadro de cargas da laje L17.....	211
Tabela 5.10 – Quadro de cargas da laje L18.....	211

Tabela 5.11 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 2.....	213
Tabela 6.1 – Lajes da Série 1 – comparação entre as cargas de ruptura.....	248
Tabela 6.2 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 1 – relações com as cargas de ruptura.....	250
Tabela 6.3 – Lajes da Série 2 – comparação entre as cargas de ruptura.....	258
Tabela 6.4 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 2 – relações com as cargas de ruptura.....	262
Tabela 6.5 – Cargas e momentos de ruptura das lajes das Séries 1 e 2 (mm).....	268
Tabela 6.6 – Comparação entre as cargas de ruptura das lajes sem furos.....	269
Tabela 6.7 – Comparação entre as lajes com um furo e a laje L1.....	270
Tabela 6.8 – Comparação entre as lajes com dois furos e a laje L1.....	272
Tabela 6.9 – Comparação entre as cargas de ruptura das lajes com furo e/ou momento na direção <i>EW</i>	273
Tabela 6.10 – Comparação entre as cargas de ruptura das lajes com furo e/ou momento na direção <i>NS</i>	275
Tabela 7.1 – Dados geométricos, cargas e momentos de ruptura das lajes das Séries 1 e 2 (mm).....	280
Tabela 7.2 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo CEB-FIP/MC1990.....	281
Tabela 7.3 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo EC2/2004.....	283
Tabela 7.4 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo EC2/2004.....	283
Tabela 7.5 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e armadura de cisalhamento, e a estimada pelo EC2/2004.....	285
Tabela 7.6 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo ACI-318:2005.....	287
Tabela 7.7 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo ACI-318:2005.....	287
Tabela 7.8 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e armadura de cisalhamento, e a estimada pelo ACI-318:2005.....	289
Tabela 7.9 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pela NBR 6118:2003.....	292

Tabela 7.10 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pela NBR 6118:2003.....	292
Tabela 7.11 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e armadura de cisalhamento, e a estimada pelo NBR 6118:2003.....	293
Tabela 7.14 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a estimada pelo CEB-FIP/MC1990.....	300
Tabela 7.15 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a resistente pelo EC/2004.....	302
Tabela 7.16 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, com furo(s), e a estimada pelo EC/2004.....	302
Tabela 7.17 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a estimada pelo ACI-318:2005.....	305
Tabela 7.18 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, com furo(s), e a estimada pelo ACI-318:2005.....	306
Tabela 7.19 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a estimada pela NBR 6118:2003.....	309
Tabela 7.20 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, com furo(s), e a estimada pela NBR 6118:2003.....	309
Tabela 7.21 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para a laje L1, da Série 1.....	311
Tabela 7.22 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para as lajes da Série 1 com furo(s).....	311
Tabela 7.23 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para as lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento.....	311
Tabela 7.24 – Comparação entre as relações tensão última atuante e tensão admissível pelas normas, para as lajes da Série 2, sem furo.....	314
Tabela 7.25 – Comparação entre as relações tensão última atuante e tensão admissível pelas normas, para as lajes da Série 2, com furo(s).....	315
Tabela 7.26 – Comparação entre a tensão solicitante proposta para as lajes da Série 1, com furo(s), e a tensão admissível estimada pela NBR 6118:2003.....	320
Tabela 7.27 – Comparação entre a tensão solicitante proposta para as lajes da Série 1, com furo(s), e a tensão admissível estimada pela NBR 6118:2003 com a limitação da taxa de armadura de: $\rho \leq 0,50\%$	323

Tabela 7.28 – Comparação entre as relações V_u/V_{cal} e as relações Tensão atuante / Tensão resistente obtidas com a aplicação das normas apresentadas, com as propostas para as normas, com a sugestão de BORGES (2004) e com a sugestão de BORGES (2004) com a limitação: $\rho \leq 0,50\%$, para as lajes com furo da Série 1 e da literatura.....	326
Tabela 7.29 – Comparação entre a tensão proposta para as lajes da Série 2 (v_u) e a estimada pela NBR 6118:2003 (v_{r1}).....	336
Tabela 7.30 – Comparação entre as relações Tensão atuante / Tensão resistente obtidas com a aplicação das normas apresentadas e as obtidas com as propostas para as normas, para as lajes com furo da Série 2 e da literatura.....	339
Tabela B.1 – Deslocamentos verticais da laje L1.....	365
Tabela B.2 – Deslocamentos verticais da laje L2.....	365
Tabela B.3 – Deslocamentos verticais da laje L3.....	366
Tabela B.4 – Deslocamentos verticais da laje L4.....	366
Tabela B.5 – Deslocamentos verticais da laje L5.....	367
Tabela B.6 – Deslocamentos verticais da laje L6.....	367
Tabela B.7 – Deslocamentos verticais da laje L7.....	368
Tabela B.8 – Deslocamentos verticais da laje L8.....	368
Tabela B.9 – Deslocamentos verticais da laje L9.....	369
Tabela B.10 – Deslocamentos verticais da laje L10.....	369
Tabela B.11 – Deslocamentos verticais da laje L11.....	369
Tabela B.12 – Deslocamentos verticais da laje L12.....	370
Tabela B.13 – Deslocamentos verticais da laje L13.....	370
Tabela B.14 – Deslocamentos verticais da laje L14.....	371
Tabela B.15 – Deslocamentos verticais da laje L15.....	371
Tabela B.16 – Deslocamentos verticais da laje L16.....	372
Tabela B.17 – Deslocamentos verticais da laje L17.....	372
Tabela B.18 – Deslocamentos verticais da laje L18.....	373
Tabela B.19 – Deslocamentos verticais da laje L19.....	373
Tabela B.20 – Deformações da armadura de flexão da laje L1.....	374
Tabela B.21 – Deformações da armadura de flexão da laje L2.....	375
Tabela B.22 – Deformações da armadura de flexão da laje L3.....	375
Tabela B.23 – Deformações da armadura de flexão da laje L4.....	376
Tabela B.24 – Deformações da armadura de flexão da laje L5.....	377

Tabela B.25 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L5.....	377
Tabela B.26 – Deformações da armadura de flexão da laje L6.....	378
Tabela B.27 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L6.....	378
Tabela B.28 – Deformações da armadura de flexão da laje L7.....	379
Tabela B.29 – Deformações da armadura de flexão da laje L8.....	379
Tabela B.30 – Deformações da armadura de flexão da laje L9.....	379
Tabela B.31 – Deformações da armadura de flexão da laje L10.....	380
Tabela B.32 – Deformações da armadura de flexão da laje L11.....	380
Tabela B.33 – Deformações da armadura de flexão da laje L12.....	380
Tabela B.34 – Deformações da armadura de flexão da laje L13.....	381
Tabela B.35 – Deformações da armadura de flexão da laje L14.....	381
Tabela B.36 – Deformações da armadura de flexão da laje L15.....	382
Tabela B.37 – Deformações da armadura de flexão da laje L16.....	382
Tabela B.38 – Deformações da armadura de flexão da laje L17.....	383
Tabela B.39 – Deformações da armadura de flexão da laje L18.....	384
Tabela B.40 – Deformações da armadura de flexão da laje L19.....	385
Tabela B.41 – Deformações do concreto da laje L1.....	385
Tabela B.42 – Deformações do concreto da laje L2.....	386
Tabela B.43 – Deformações do concreto da laje L3.....	387
Tabela B.44 – Deformações do concreto da laje L4.....	387
Tabela B.45 – Deformações do concreto da laje L5.....	388
Tabela B.46 – Deformações do concreto da laje L6.....	389
Tabela B.47 – Deformações do concreto da laje L7.....	390
Tabela B.48 – Deformações do concreto da laje L8.....	391
Tabela B.49 – Deformações do concreto da laje L9.....	391
Tabela B.50 – Deformações do concreto da laje L10.....	392
Tabela B.51 – Deformações do concreto da laje L11.....	393
Tabela B.52 – Deformações do concreto da laje L12.....	393
Tabela B.53 – Deformações do concreto da laje L13.....	394
Tabela B.54 – Deformações do concreto da laje L14.....	395
Tabela B.55 – Deformações do concreto da laje L15.....	395
Tabela B.56 – Deformações do concreto da laje L16.....	395
Tabela B.57 – Deformações do concreto da laje L17.....	396

Tabela B.58 – Deformações do concreto da laje L18.....	396
Tabela B.59 – Deformações do concreto da laje L19.....	396
Tabela C.1 – Cargas de ruptura por flexão e comparação com carga última de ensaio..	406

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 – Modo de ruptura de uma laje cogumelo sem armadura de cisalhamento (CEB/MC90).....	5
Figura 2.2 – Perímetro de controle conforme o CEB- FIP/MC 90.....	7
Figura 2.3 – Distribuição de cisalhamento devido ao momento fletor, CEB- FIP/MC 90.....	9
Figura 2.4 – Perímetro de controle situado a 2d da última camada de armadura de cisalhamento, CEB- FIP/MC 90.....	10
Figura 2.5 – Perímetro crítico com a existência de furo, segundo o EC2/2004.....	11
Figura 2.6 – Perímetro de controle situado a 1,5d da última camada de armadura de cisalhamento, EC2/2004.....	13
Figura 2.7 – Perímetro crítico, ACI-318:2005.....	13
Figura 2.8 – Perímetro crítico para lajes com furos, ACI-318:2005.....	14
Figura 2.9 – Seção crítica e distribuição das tensões de cisalhamento, ACI-318:2005..	15
Figura 2.10 – Perímetro crítico a 0,5d da última camada de armadura de flexão, ACI-318:2005.....	17
Figura 2.11 – Perímetro crítico em pilares internos de acordo com a NBR 6118:2003.	17
Figura 2.12 – Perímetro crítico de acordo com a NBR 6118:2003 para lajes com furos	18
Figura 2.13 – Perímetro crítico externo à armadura de cisalhamento segundo a NBR 6118:2003.....	20
Figura 2.14 – Modelos das lajes ensaiadas por MOWRER & VANDERBILT (mm)....	24
Figura 2.15 – Dimensões das lajes ensaiadas por ROLL at al. (1971) (mm).....	27
Figura 2.16 – Características principais e cargas últimas das lajes de TENG et al. (mm).....	33
Figura 2.17 – Perímetro crítico, para o cálculo de lajes sem armadura de cisalhamento e sem furos, recomendado por TENG et al.	34
Figura 2.18 – Perímetro de controle, para o cálculo de lajes sem armadura de cisalhamento e com furos, recomendado por TENG et al.	36
Figura 2.19 – Perímetro de controle para lajes com furos adotado pelo BS8110/1995..	35
Figura 2.20 – Locais onde a armadura de punção é inefetiva, segundo a BS8110 (1985).....	37

Figura 2.21 – Perímetro de controle proposto por REGAN (1974) para o Handbook to BS8110 (1987).....	37
Figura 2.22 – Esquema de aplicação de carga e posicionamento dos furos nas lajes testadas por REGAN (1999) (mm).....	39
Figura 2.23 – Armadura de cisalhamento utilizada por REGAN (1999) (mm).....	40
Figura 2.24 – Lajes ensaiadas por IOANNOU (2001) (mm).....	42
Figura 2.25 – Distribuição da armadura de cisalhamento nas lajes de IOANNOU (2001).....	42
Figura 2.26 – Armadura de cisalhamento “shearbands” utilizada por IOANNOU.....	43
Figura 2.27 – Perímetros de controle adotados por IOANNOU (2001).....	43
Figura 2.28 – Armadura de cisalhamento utilizada por GOMES e ANDRADE (1995) (mm).....	46
Figura 2.29 – Disposição dos furos em relação ao pilar nas lajes de GOMES e ANDRADE (1995) (mm).....	46
Figura 2.30 – Lajes de GOMES e ANDRADE (1993).....	48
Figura 2.31 – Armadura de cisalhamento utilizada por SILVA (mm).....	49
Figura 2.32 – Sistema de ensaio utilizado por SILVA (2003) (mm).....	50
Figura 2.33 – Características das lajes ensaiadas por SILVA (mm).....	52
Figura 2.34 – Características das lajes ensaiadas por SOUZA (2004) – mm.....	54
Figura 2.35 – Características das lajes ensaiadas por BORGES (2004) – mm.....	57
Figura 2.36 – Esquema de ensaio utilizado por BORGES (2004) – mm.....	58
Figura 2.37 – Perímetro efetivo de controle proposto por BORGES (2004) para NBR6118:2003.....	59
Figura 2.38 – Dimensões e linha de carga das lajes de HANSON & HANSON (1964) (mm).....	64
Figura 2.39 – Configurações das lajes de HANSON & HANSON (1964) (mm).....	64
Figura 2.40 – Furos nas lajes de HANSON & HANSON (1964) (mm)	66
Figura 2.41 – Métodos de carregamento de HANSON & HANSON (1964) (mm).....	67
Figura 2.42 – Dimensões e carregamento das lajes de ISLAM & PARK (1976) (mm).	71
Figura 2.43 – Sistema de aplicação de carga e dimensões das lajes de HAWKINS, BAO & YAMASAKI (1989) (mm).....	74
Figura 2.44 – Armaduras de flexão e cisalhamento das lajes de HAWKINS, BAO & YAMASAKI (1989) (mm).....	77
Figura 2.45 – Sistema de aplicação de carga e dimensões das lajes e detalhe do	

“trans-moment” utilizado por CORDOVIL (1995) (mm).....	81
Figura 2.46 – Armadura de cisalhamento utilizada nas lajes 8 e 11 (mm).....	82
Figura 2.47 – Armadura de cisalhamento utilizada nas lajes 10, 14 e 16 (mm).....	83
Figura 2.48 – Perímetro de controle sugerido por CORDOVIL (1995).....	84
Figura 2.49 – Perímetro de controle un sugerido por CORDOVIL (1995)	85
Figura 3.1 – Características das lajes ensaiadas – Modelos 1 ao 6.....	92
Figura 3.2 – Carregamento das lajes da Série 1: L1 a L7, L9, L16 e L19 (dimensões em mm).....	93
Figura 3.3 – Carregamento das lajes L8, L10 e L14 (dimensões em mm).....	94
Figura 3.4 – Carregamento da laje L11 (dimensões em mm).....	95
Figura 3.5 – Carregamento das lajes L12 e L13 (dimensões em mm).....	96
Figura 3.6 – Carregamento das lajes L15, L17 e L18 (dimensões em mm).....	96
Figura 3.7 – Armadura de flexão da laje sem furo, L1, L14 e L15 (cm).....	99
Figura 3.8 – Armadura de flexão da laje L2 (cm).....	101
Figura 3.9 – Armadura de flexão das lajes L3 e L5 (cm).....	102
Figura 3.10 – Armadura de flexão da laje L4 (cm).....	102
Figura 3.11 – Armadura de flexão da laje L6 (cm).....	103
Figura 3.12 – Armadura de flexão das lajes L7 e L8, L11 e L12 (cm).....	104
Figura 3.13 – Armadura de flexão das lajes L9 e L10, L13 (cm).....	105
Figura 3.14 – Armadura de flexão das lajes L16 e L17 (cm).....	105
Figura 3.15 – Armadura de flexão das lajes L18 e L19 (cm).....	106
Figura 3.16 – Armadura de cisalhamento das lajes L5 e L6 – barra dobrada.....	108
Figura 3.17 – Posicionamento da armadura de cisalhamento da laje L5 (cm).....	109
Figura 3.18 – Fotografia da armadura de cisalhamento da laje L5.....	109
Figura 3.19 – Posicionamento da armadura de cisalhamento da laje L5 (cm).....	110
Figura 3.20 – Fotografia da armadura de cisalhamento da laje L6.....	110
Figura 3.21 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto da laje L1.....	113
Figura 3.22 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L2 e L3.....	114
Figura 3.23 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto da laje L4.....	114
Figura 3.24 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L5 a L7.....	115
Figura 3.25 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L8 a L10.....	116

Figura 3.26 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L11 a L13.....	116
Figura 3.27 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L14 a L16.....	117
Figura 3.28 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L17 a L19.....	118
Figura 3.29 – Fotografia das lajes L3 e L4 prontas para moldagem.....	119
Figura 3.30 – Fotografia das lajes L9 e L10 antes da moldagem.....	120
Figura 3.31 – Fotografia das lajes L11, L12 e L13 prontas para moldagem.....	120
Figura 3.32 – Fotografia das lajes L14 antes da moldagem.....	121
Figura 3.33 – Fotografia das lajes L17 e L18 antes da moldagem.....	121
Figura 3.34 – Sistema de ensaio, vista superior e cortes (mm).....	124
Figura 3.35 – Fotografias do sistema de ensaio.....	125
Figura 3.36 – Célula de carga – protensão.....	126
Figura 3.37 – Fotografia da estrutura para fixação dos defletômetros utilizados nas lajes L1 a L4.....	127
Figura 3.38 – Fotografia da estrutura para fixação dos defletômetros utilizados nas lajes L5 a L19.....	127
Figura 3.39 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 1 (mm).....	128
Figura 3.40 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 2 (mm).....	128
Figura 3.41 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 3 (mm).....	129
Figura 3.42 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 4 (mm).....	129
Figura 3.43 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 5 (mm).....	130
Figura 3.44 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 6 (mm).....	130
Figura 3.45 – Extensômetro colado.....	132
Figura 3.46 – Posicionamento dos extensômetros das lajes L1 (mm).....	132
Figura 3.47 – Posicionamento dos extensômetros da laje L2.....	133
Figura 3.48 – Posicionamento dos extensômetros da laje L3.....	133
Figura 3.49 – Posicionamento dos extensômetros da laje L4.....	134
Figura 3.50 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L5 (mm).....	134
Figura 3.51 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L6 (mm).....	135
Figura 3.52 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L7, L8, L11 e L12 (mm)	135
Figura 3.53 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L9, L10, L13 (mm).....	136
Figura 3.54 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L14 (mm).....	136

Figura 3.55 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L15 (mm).....	137
Figura 3.56 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L16 a L17 (mm).....	137
Figura 3.57 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L18 (mm).....	138
Figura 3.58 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L19 (mm).....	138
Figura 3.59 – Extensômetros de concreto colados.....	139
Figura 3.60 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L1 a L4 (mm).....	140
Figura 3.61 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L5 a L13 (mm).....	141
Figura 3.62 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L14 e L15 (mm).....	141
Figura 3.63 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L16, L17 e L19 (mm)..	142
Figura 3.64 – Posicionamento dos EERs do concreto na laje L18 (mm).....	142
Figura 3.65 – Equipamento utilizado para protensão na laje L1.....	143
Figura 3.66 – Chapa e arruela com 62,5mm de espessura.....	144
Figura 3.67 – Equipamento utilizado para aplicação de carga.....	145
Figura 4.1 – Posicionamento das células de carga.....	146
Figura 4.2 – Fissuração na laje L1.....	158
Figura 4.3 – Fissuração na laje L2.....	159
Figura 4.4 – Fissuração na laje L3.....	159
Figura 4.5 – Fissuração na laje L4.....	160
Figura 4.6 – Fissuração na laje L5.....	160
Figura 4.7 – Fissuração na laje L6.....	161
Figura 4.8 – Fissuração na laje L7.....	161
Figura 4.9 – Fissuração na laje L9.....	162
Figura 4.10 – Fissuração na laje L16.....	162
Figura 4.11 – Fissuração na laje L19.....	163
Figura 4.12 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 1.....	164
Figura 4.13 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 1.....	169
Figura 4.14 – Deslocamentos verticais medidos na laje L1, eixo <i>WE</i>	174
Figura 4.15 – Deslocamentos verticais medidos na laje L1, eixo <i>NS</i>	174
Figura 4.16 – Deslocamentos verticais medidos na laje L2, eixo <i>WE</i>	175
Figura 4.17 – Deslocamentos verticais medidos na laje L2, eixo <i>NS</i>	175
Figura 4.18 – Deslocamentos verticais medidos na laje L3, eixo <i>WE</i>	176
Figura 4.19 – Deslocamentos verticais medidos na laje L3, eixo <i>NS</i>	176
Figura 4.20 – Deslocamentos verticais medidos na laje L4, eixo <i>WE</i>	177
Figura 4.21 – Deslocamentos verticais medidos na laje L4, eixo <i>NS</i>	177

Figura 4.22 – Deslocamentos verticais medidos na laje L5, eixo <i>WE</i>	178
Figura 4.23 – Deslocamentos verticais medidos na laje L5, eixo <i>NS</i>	178
Figura 4.24 – Deslocamentos verticais medidos na laje L6, eixo <i>WE</i>	179
Figura 4.25 – Deslocamentos verticais medidos na laje L6, eixo <i>NS</i>	179
Figura 4.26 – Deslocamentos verticais medidos na laje L7, eixo <i>WE</i>	180
Figura 4.27 – Deslocamentos verticais medidos na laje L7, eixo <i>NS</i>	180
Figura 4.28 – Deslocamentos verticais medidos na laje L9, eixo <i>WE</i>	181
Figura 4.29 – Deslocamentos verticais medidos na laje L9, eixo <i>NS</i>	181
Figura 4.30 – Deslocamentos verticais medidos na laje L16, eixo <i>WE</i>	182
Figura 4.31 – Deslocamentos verticais medidos na laje L16, eixo <i>NS</i>	182
Figura 4.32 – Deslocamentos verticais medidos na laje L19, eixo <i>WE</i>	183
Figura 4.33 – Deslocamentos verticais medidos na laje L19, eixo <i>NS</i>	183
Figura 4.34 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1 extensômetros 1 ao 18.....	184
Figura 4.35 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 1 ao 22.....	184
Figura 4.36 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 1 ao 22.....	185
Figura 4.37 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 1 ao 16.....	185
Figura 4.38 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensômetros 1 ao 6.....	186
Figura 4.39 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensômetros 1 ao 6.....	186
Figura 4.40 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L7, extensômetros 1 ao 6.....	187
Figura 4.41 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L9, extensômetros 1 ao 6.....	187
Figura 4.42 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L16, extensômetros 1 ao 18.....	188
Figura 4.43 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L19, extensômetros 1 ao 18.....	188
Figura 4.44 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensômetros 7 ao 10, bent bar 1.....	189
Figura 4.45 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensôm. 11 ao 14, bent bar 2	190
Figura 4.46 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensômetros 7 ao 10, bent bar 1.....	190
Figura 4.47 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensôm. 11 ao 14, bent bar 2	191
Figura 4.48 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1, extensômetros 1, 5, 6 e 10.....	192
Figura 4.49 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1, extensômetros 11 ao 16.....	192
Figura 4.50 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9...	193
Figura 4.51 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 1, 5, 6 e 10.....	193
Figura 4.52 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 11 ao 16.....	194
Figura 4.53 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9...	194

Figura 4.54 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 1, 5, 6 e 10.....	195
Figura 4.55 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 11 ao 16.....	195
Figura 4.56 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9...	196
Figura 4.57 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 1, 5, 6 e 10.....	196
Figura 4.58 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 11 ao 16.....	197
Figura 4.59 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9...	197
Figura 4.60 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensômetros 1 ao 16.....	198
Figura 4.61 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensômetros 1 ao 16.....	198
Figura 4.62 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L7, extensômetros 1 ao 16.....	199
Figura 4.63 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L9, extensômetros 1 ao 16.....	199
Figura 4.64 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L16, extensômetros 1 ao 4.....	200
Figura 4.65 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L19, extensômetros 1 ao 4.....	200
Figura 5.1 – Posicionamento das células de carga.....	202
Figura 5.2 – Fissuração na laje L8.....	214
Figura 5.3 – Fissuração na laje L10.....	214
Figura 5.4 – Fissuração na laje L11.....	215
Figura 5.5 – Fissuração na laje L12.....	215
Figura 5.6 – Fissuração na laje L13.....	216
Figura 5.7 – Fissuração na laje L14.....	216
Figura 5.8 – Fissuração na laje L15.....	217
Figura 5.9 – Fissuração na laje L17.....	217
Figura 5.10 – Fissuração na laje L18.....	218
Figura 5.11 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2.....	219
Figura 5.12 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 2.....	224
Figura 5.13 – Deslocamentos verticais medidos na laje L8, eixo <i>WE</i>	228
Figura 5.14 – Deslocamentos verticais medidos na laje L8, eixo <i>NS</i>	228
Figura 5.15 – Deslocamentos verticais medidos na laje L10, eixo <i>WE</i>	229
Figura 5.16 – Deslocamentos verticais medidos na laje L10, eixo <i>NS</i>	229
Figura 5.17 – Deslocamentos verticais medidos na laje L11, eixo <i>WE</i>	230
Figura 5.18 – Deslocamentos verticais medidos na laje L11, eixo <i>NS</i>	230
Figura 5.19 – Deslocamentos verticais medidos na laje L12, eixo <i>WE</i>	231
Figura 5.20 – Deslocamentos verticais medidos na laje L12, eixo <i>NS</i>	231
Figura 5.21 – Deslocamentos verticais medidos na laje L13, eixo <i>WE</i>	232
Figura 5.22 – Deslocamentos verticais medidos na laje L13, eixo <i>NS</i>	232

Figura 5.23 – Deslocamentos verticais medidos na laje L14, eixo <i>WE</i>	233
Figura 5.24 – Deslocamentos verticais medidos na laje L14, eixo <i>NS</i>	233
Figura 5.25 – Deslocamentos verticais medidos na laje L15, eixo <i>WE</i>	234
Figura 5.26 – Deslocamentos verticais medidos na laje L15, eixo <i>NS</i>	234
Figura 5.27 – Deslocamentos verticais medidos na laje L17, eixo <i>WE</i>	235
Figura 5.28 – Deslocamentos verticais medidos na laje L17, eixo <i>NS</i>	235
Figura 5.29 – Deslocamentos verticais medidos na laje L18, eixo <i>WE</i>	236
Figura 5.30 – Deslocamentos verticais medidos na laje L18, eixo <i>NS</i>	236
Figura 5.31 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L8, extensômetros 1 ao 6.....	237
Figura 5.32 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L10, extensômetros 1 ao 6.....	237
Figura 5.33 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L11, extensômetros 1 ao 6.....	238
Figura 5.34 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L12, extensômetros 1 ao 6.....	238
Figura 5.35 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L13, extensômetros 1 ao 6.....	239
Figura 5.36 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L14, extensômetros 1 ao 18.....	239
Figura 5.37 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L15, extensômetros 1 ao 18.....	240
Figura 5.38 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L17, extensômetros 1 ao 18.....	240
Figura 5.39 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L18, extensômetros 1 ao 16.....	241
Figura 5.40 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L18, extensômetros 17 ao 32.....	241
Figura 5.41 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L8, extensômetros 1 ao 16.....	242
Figura 5.42 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L10, extensômetros 1 ao 16.....	243
Figura 5.43 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L11, extensômetros 1 ao 16.....	243
Figura 5.44 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L12, extensômetros 1 ao 16.....	244
Figura 5.45 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L13, extensômetros 1 ao 16.....	244
Figura 5.46 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L14, extensômetros 1 ao 7.....	245
Figura 5.47 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L15, extensômetros 1 ao 7.....	245
Figura 5.48 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L17, extensômetros 1 ao 4.....	246
Figura 5.49 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L18, extensômetros 1 ao 8.....	246
Figura 6.1 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1 – Direção <i>W</i>	252
Figura 6.2 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1 – Direção <i>E</i>	252
Figura 6.3 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1 – Direção <i>N</i>	253
Figura 6.4 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1	

– Direção <i>E</i>	253
Figura 6.5 – Deslocamentos verticais a 850 mm do centro do pilar das lajes da Série 2	
– Direção <i>W</i>	264
Figura 6.6 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 2	
– Direção <i>E</i>	264
Figura 6.7 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 2	
– Direção <i>N</i>	265
Figura 6.8 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 2	
– Direção <i>S</i>	265
Figura 6.9 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes L1, L3, L5, L7, L9, L8, L10, L12, L13 e L14 – Direção <i>E</i>	277
Figura 6.10 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes L1, L16, L19, L15, L17 e L18 – Direção <i>N</i>	278
Figura 7.1 – Perímetro crítico com a existência de furo, segundo o EC2/2004.....	282
Figura 7.2 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo EC2/2004 - lajes da Série 1 com furo(s) e sem armadura de cisalhamento.....	284
Figura 7.3 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo EC2/2004 - lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento.....	285
Figura 7.4 – Perímetro crítico para lajes com furos, ACI-318:2005.....	286
Figura 7.5 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 1 com furo(s) e sem armadura de cisalhamento.....	288
Figura 7.6 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento.....	290
Figura 7.7 – Perímetro crítico de acordo com a NBR 6118:2003 para lajes com furos..	290
Figura 7.8 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento.....	291
Figura 7.9 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento.....	293
Figura 7.10 – Trechos para cálculo de W_1 para lajes sem furo, L14.....	294
Figura 7.11 – Trechos para cálculo de W_1 – lajes com furo(s): L8, L11, L12, L10 e L13.....	296
Figura 7.12 – Trechos para cálculo de W_1 – lajes com furo(s): L17 e L18.....	296
Figura 7.13 – Faces críticas para cálculo de J_c em ligações laje-pilar interno sem furo e com furo adjacente ao menor lado pilar.....	298

Figura 7.14 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pelo EC2/2004 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento.....	303
Figura 7.15 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{u(AB)}$) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento.....	307
Figura 7.16 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento.....	310
Figura 7.17 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para as lajes da Série 1.....	312
Figura 7.18 – Comparação entre as relações tensão última atuante e tensão resistente pelas normas, para as lajes da Série 2.....	315
Figura 7.19 – Perímetros crítico (u) e crítico reduzido (u^*) para as ligações laje-pilar de borda.....	316
Figura 7.20 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela proposta para NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 com furo(s).....	321
Figura 7.21 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela proposta para NBR 6118:2003 com limitação da taxa de armadura ($\rho \leq 0,50\%$) - lajes da Série 1 com furo(s).....	324
Figura 7.22 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s).....	330
Figura 7.23 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente (v_{uAB}) pela Proposta para o ACI-318:2005 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s).....	330
Figura 7.24 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo EUROCODE 2/2004 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s).....	331
Figura 7.25 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pela Proposta para o EUROCODE 2 / 2004 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s).....	331
Figura 7.26 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s).....	332
Figura 7.27 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela Proposta para o NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s).....	332
Figura 7.28 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) por BORGES (2004) - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s).....	333
Figura 7.29 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) por BORGES (2004) com limitação da taxa de armadura ($\rho \leq 0,50\%$) - lajes da Série 1 e da literatura com	

furo(s).....	333
Figura 7.30 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela proposta para NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento.....	337
Figura 7.31 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{u(AB)}$) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento.....	340
Figura 7.32 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{u(AB)}$) pela Proposta para o ACI-318:2005 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento.....	340
Figura 7.33 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pelo EUROCODE 2/2004 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento.....	341
Figura 7.34 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pela Proposta para o EUROCODE 2/2004 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento.....	341
Figura 7.35 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento.....	351
Figura 7.36 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela Proposta para o NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento.....	342
Figura 8.1 – Momento M_{sd}^* , resultante da excentricidade do perímetro crítico u.....	350
Figura A.1 – Prensa utilizada para o ensaio do aço com 5,0mm de diâmetro.....	360
Figura A.2 – Curva “Tensão x Deformação” do aço com 5,0mm de diâmetro.....	361
Figura A.3 – Prensa utilizada para o ensaio dos aços com diâmetro maior ou igual a 6,3mm.....	361
Figura A.4 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 1 do aço com 6,3mm de diâmetro.....	362
Figura A.5 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 2 do aço com 6,3mm de diâmetro.....	362
Figura A.6 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 1 do aço com 12,5mm de diâmetro.....	363
Figura A.7 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 2 do aço com 12,5mm de diâmetro.....	363
Figura A.8 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 3 do aço com 12,5mm de diâmetro.....	364

Figura A.9 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 1 do aço com 16,0mm de diâmetro.....	364
Figura C.1 – Linhas de ruptura para a laje L1.....	397
Figura C.2 – Linhas de ruptura para as lajes L2 a L6.....	398
Figura C.3 – Linhas de ruptura para a laje L7.....	398
Figura C.4 – Linhas de ruptura para a laje L8 – configurações “a” e “b”.....	398
Figura C.5 – Linhas de ruptura para as lajes L9.....	399
Figura C.6 – Linhas de ruptura para as lajes L10 e L13.....	399
Figura C.7 – Linhas de ruptura para a laje L11.....	399
Figura C.8 – Linhas de ruptura para a laje L12.....	400
Figura C.9 – Linhas de ruptura para a laje L14.....	400
Figura C.10 – Linhas de ruptura para a laje L15.....	400
Figura C.11 – Linhas de ruptura para a laje L16.....	401
Figura C.12 – Linhas de ruptura para a laje L17.....	401
Figura C.13 – Linhas de ruptura para a laje L18.....	401
Figura C.14 – Linhas de ruptura para a laje L19.....	402

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	-	Área de concreto
A_s	-	Área de armadura
b_o	-	Perímetro de controle ou perímetro crítico
b_1	-	Largura da seção crítica medida na direção do vão para o qual os momentos são determinados
b_2	-	Largura da seção crítica medida na direção perpendicular a b_1
C	-	Perímetro do pilar ou da área carregada
C'	-	Perímetro de controle ou perímetro crítico
c_1	-	dimensão do pilar paralela à direção do momento transferido
c_2	-	dimensão do pilar perpendicular à direção do momento transferido
CG_u	-	Centro de gravidade do perímetro crítico (u)
d	-	Altura útil da laje
d_x	-	Altura efetiva da armadura de flexão na direção x da laje
d_y	-	Altura efetiva da armadura de flexão na direção y da laje
e	-	Excentricidade de carga
e_u	-	Excentricidade de carga última
e^*	-	Excentricidade do perímetro crítico em relação ao centro do pilar
E_c	-	Módulo de elasticidade do concreto
E_s	-	Módulo de elasticidade do aço
f_c	-	Resistência à compressão do concreto
f_{cd}	-	Resistência à compressão de cálculo do concreto
f_{ck}	-	Resistência à compressão do concreto característica
f_y	-	Tensão de escoamento do aço
F_{Sd}	-	Força concentrada na laje de cálculo
F_S	-	Força concentrada na laje
f_y	-	Tensão de escoamento do aço
f_u	-	Resistência de ruptura do aço

h	-	Espessura total da laje
J_c	-	Momento polar de inércia da seção crítica assumida
k	-	Coefficiente que leva em consideração a altura útil da laje
K, k	-	Coefficiente determinado em função das dimensões do pilar
M	-	Momento fletor
M_u	-	Momento fletor último transferido da laje ao pilar
M_{Sd}	-	Momento atuante de cálculo
M_{Sd}^*	-	Momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico, e^* , em relação ao centro do pilar
P	-	Força aplicada por um atuador hidráulico (“macaco hidráulico”)
u, u_1	-	Perímetro de controle ou perímetro crítico
u_0	-	Perímetro do pilar ou área carregada
V_{calc}	-	Carga calculada – sem adoção de coeficiente de segurança
$V_{circ.}$	-	Carga da primeira fissura circunferencial
V_{Ed}, V_{Sd}	-	Força concentrada na laje de cálculo
V_{flex}	-	Carga correspondente à ruptura por flexão de uma laje monolítica
V_{radial}	-	Carga da primeira fissura radial
V_u	-	Carga resistente última obtida em ensaio
W_1	-	Momento plástico resistente
α	-	Inclinação da superfície de ruptura da laje
β	-	Coefficiente que leva em conta os efeitos da excentricidade da carga
γ_c	-	Coefficiente de minoração do concreto para o estado limite último
γ_s	-	Coefficiente de minoração do aço para o estado limite último
δ	-	Deslocamento da laje
ε_y	-	Deformação de escoamento do aço
ϕ	-	Diâmetro da barra de aço
ϕ	-	Fator de redução da resistência nominal
v_{Ed}	-	Tensão de cisalhamento atuante de cálculo
v_n	-	Tensão nominal de cisalhamento

$V_{Rd,c}$	-	Tensão resistente ao cisalhamento de cálculo
$V_{R,c}, V_{u(AB)}$	-	Tensão resistente ao cisalhamento
V_u	-	Tensão atuante última
ρ	-	Taxa de armadura geométrica
ρ_x	-	Taxa de armadura na direção x
ρ_y	-	Taxa de armadura na direção y
τ_{Mu}	-	Tensão atuante provocada pelo momento de ruptura
τ_{Vu}	-	Tensão atuante provocada pela carga de ruptura
τ_{Rd}, τ_{rdl}	-	Tensão resistente ao cisalhamento de cálculo
τ_R, τ_{rl}	-	Tensão resistente ao cisalhamento
τ_{Sd}	-	Tensão de cisalhamento atuante de cálculo
τ_u	-	Tensão atuante última

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Lajes lisas, como são denominadas pela norma brasileira NBR 6118:2003, são estruturas laminares planas, horizontais, apoiadas diretamente sobre pilares. É um sistema estrutural que aparece como alternativa para o sistema convencional, em que as lajes são apoiadas em vigas. A ausência de vigas apresenta algumas vantagens, tais como: economia de fôrmas, diminuição do pé direito, possível aumento do número de andares para prédios com limitação de cota e uma maior flexibilidade para o arranjo arquitetônico.

A adoção de lajes lisas também possibilita uma maior velocidade de execução dos painéis de laje, o que as torna mais econômicas em comparação com o sistema convencional, com vigas. Esta maior velocidade pode ser obtida pela simplicidade construtiva, com facilidade na: execução de formas, com a redução de recorte devido à ausência de vigas; no corte, na dobra e na colocação das armaduras; e na concretagem.

Uma desvantagem das lajes lisas é a possibilidade de uma ruptura por puncionamento, para uma carga menor do que seria a carga de ruptura por flexão. A ruptura por puncionamento ocorre repentinamente, com pequeno ou nenhum aviso, praticamente sem apresentar ductilidade, podendo levar até a ocorrência de colapso progressivo (propagação de uma ruptura ocorrida originalmente em pequena parte da estrutura, na qual o dano resultante é desproporcionalmente maior que o original).

Apesar deste sistema estrutural ser amplamente utilizado, o estudo da punção é um assunto ainda não perfeitamente definido teoricamente. Os códigos internacionais e o nacional existentes sobre o assunto de punção são baseados em trabalhos empíricos e os critérios adotados para o dimensionamento não são os mesmos. As especificações de cálculo apontadas por todas as normas, inclusive as de grandes centros tais como o Americano e o Europeu, são freqüentemente questionadas pelos estudiosos da área.

As pesquisas experimentais são fundamentais no entendimento dos diversos problemas que envolvem a utilização deste tipo de sistema.

Vários trabalhos experimentais têm sido realizados no exterior e no Brasil abordando diversos temas envolvendo o estudo da ligação laje-pilar. Na Universidade de Brasília (UnB) diversas dissertações de mestrado e teses de doutorado investigando o assunto foram feitas ou estão em andamento sob a orientação do professor Guilherme Sales Melo. Na Universidade Federal de Goiás (UFG), sob orientação do professor Ronaldo Barros Gomes, várias dissertações de mestrado sobre o tema já foram concluídas e outras estão em andamento.

O presente trabalho é fruto da colaboração entre as duas instituições mencionadas e dos professores Guilherme e Ronaldo, além da colaboração do professor Paul Regan. O estudo contribui para a solução do problema de punção em lajes lisas com furos e com transferência de momento fletor da laje ao pilar. Para serem feitos os experimentos, foi necessária a criação do sistema de ensaio, que ocorreu no Laboratório de Estruturas da UFG, e que será apresentado adiante, no Capítulo 3.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os furos em lajes lisas freqüentemente são utilizados para passagem de tubulações de água, esgoto, eletricidade, telefone e outros. Muitas vezes esses furos são localizados adjacentes aos pilares.

O estudo de furos adjacentes ou próximos a pilares centrais de lajes lisas vem sendo feito por alguns pesquisadores no mundo, inclusive com importantes descobertas, sobretudo na influência destes sobre a carga de ruptura e em maneiras de contornar a perda de resistência com o uso da armadura de cisalhamento.

Entretanto, estudos sobre o comportamento da ligação laje-pilar de interior, com furo adjacente ao pilar e transferência de momento fletor da laje ao pilar são incipientes. Este tipo de solicitação que caracteriza um carregamento assimétrico em pilares internos é bastante comum em lajes lisas, podendo ser provocado por comprimentos desiguais de vãos adjacentes ou carregamentos desbalanceados. A existência de furo junto à ligação laje-pilar indica que a resistência ao puncionamento pode ser sensivelmente reduzida em relação à mesma ligação sem furo.

O estudo das recomendações normativas indicou que não são apresentadas recomendações específicas ao problema mencionado e os estudos existentes não dão margem

ao entendimento por completo da distribuição dos esforços na laje lisa com furo e tampouco a uma resposta que venha a solucionar problema.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é investigar experimentalmente o comportamento de ligações laje-pilar de regiões internas das lajes lisas, com um ou dois furos adjacentes ao pilar, e com ou sem transferência de momento fletor da laje ao pilar.

Também tem como objetivo propor recomendações às normas atuais para o cálculo de lajes lisas com tais furos e solicitações, a partir da análise de dados experimentais.

1.4 METODOLOGIA E CONTEÚDO

O tema foi elaborado a partir de pesquisa bibliográfica – mostrado no Capítulo 2.

No Capítulo 2 também são apresentadas as recomendações de algumas normas de projeto para o tratamento da punção em lajes lisas.

Após a definição do tema foram determinadas as dimensões das lajes, em função das dimensões mais utilizadas usualmente e da melhor adaptação à laje de reação do Laboratório de Estruturas da UFG.

O sistema de ensaio também foi elaborado e executado com intenção de realizar o proposto no tema.

Foram ensaiadas 19 lajes quadradas com 2400mm de lado e espessura de 150mm, ligadas monoliticamente a um tronco de pilar com 850mm (300mm para cima e 400mm para baixo) de altura com seção transversal retangular de 200x500mm. As lajes foram carregadas nas bordas, de cima pra baixo.

Entre as lajes, as principais características que diferem umas das outras são: quantidade, posicionamento e dimensões dos furos, a taxa e a distribuição da armadura de flexão, a armadura de cisalhamento e a excentricidade de carga (relação $M(\text{momento transferido ao pilar})/V(\text{força cortante})$) na ligação laje-pilar. As lajes foram divididas em duas séries em função do carregamento. As lajes sem transferência de momento fletor da laje ao pilar formam a Série 1 e as lajes com transferência de momento fletor a Série 2. Todos os

detalhes são mostrados no Capítulo 3. No mesmo capítulo também são mostrados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios das lajes da Série 1, sem transferência de momento.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios das lajes da Série 2, com transferência de momento.

O Capítulo 6 contém uma análise dos resultados experimentais. São feitas comparações entre os resultados dos ensaios das lajes das duas séries.

Uma comparação entre os resultados obtidos pelas recomendações das normas e os resultados experimentais é apresentada no Capítulo 7. Neste mesmo capítulo são propostas recomendações para as normas de cálculo, baseadas nos resultados experimentais obtidos no trabalho.

As conclusões obtidas com este trabalho são apresentadas no Capítulo 8. O mesmo capítulo também traz recomendações para trabalhos futuros.

A bibliografia apresentada foi a consultada para a condução da presente pesquisa.

Finalmente, os apêndices apresentam as tabelas e gráficos com os dados numéricos obtidos nos ensaios (Apêndices A e B) e o cálculo da resistência à flexão das lajes utilizando a teoria das linhas de ruptura (Apêndice C).

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O modo de ruptura ao redor do pilar, dado por cisalhamento em elementos delgados submetidos a cargas localizadas aplicadas transversalmente é chamado de punção. O elemento estrutural plano (laje ou elemento de fundação) pode receber uma carga ou uma reação concentrada que provoca elevadas tensões de cisalhamento, resultando na ruptura sem aviso chamada de punção. A complexa distribuição de carga, na pequena porção da placa próxima ao pilar, dificulta o desenvolvimento de equações analíticas das tensões nesse tipo de laje. Todas as normas de projeto são calcadas na resistência à tensão cisalhante de uma seção em torno do pilar denominada seção crítica, e são ajustadas por coeficientes embasados em trabalhos experimentais.

Na Figura 2.1 é apresentada a superfície de ruptura por punção, de uma laje cogumelo sem armadura de cisalhamento, com uma inclinação de 25° a 30° , de acordo com o CEB-FIP/MC1990.

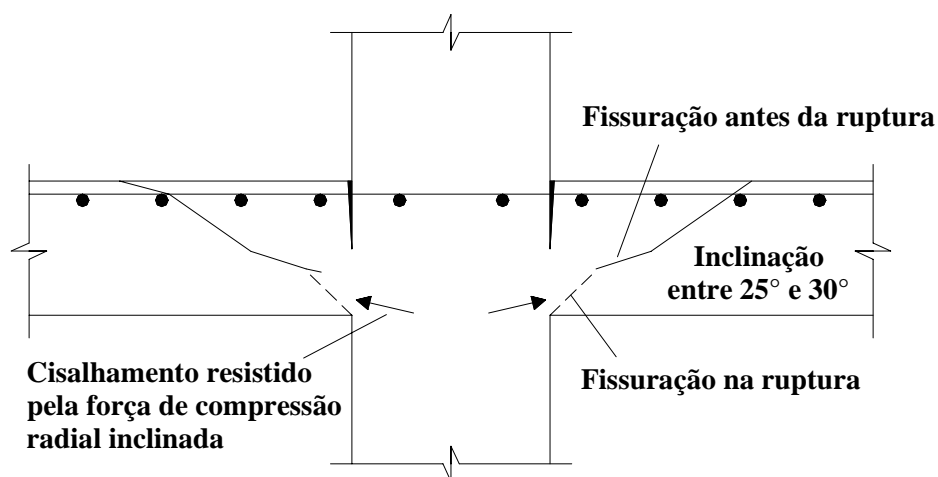


Figura 2.1 – Modo de ruptura de uma laje cogumelo sem armadura de cisalhamento (CEB/MC90)

Entre os problemas que podem diminuir a resistência ao funcionamento de lajes lisas estão a existência de furos e o efeito de momento no pilar, que se caracteriza em pilares internos por cargas assimétricas na laje que geram uma transferência de momento fletor da laje ao pilar.

Devido aos furos, o problema de punção se agrava pela diminuição da resistência ao cisalhamento, provocada pela retirada de concreto e de armadura no furo, reduzindo o perímetro crítico.

Quanto ao efeito de momento, parte da transferência do momento fletor da laje para o pilar se dá por flexão, por meio de tensões de compressão no pilar. A outra parcela, que interessa ao estudo de punção, é transmitida pela excentricidade da força cortante que aumenta as tensões de cisalhamento no perímetro crítico. Todas as normas de cálculo estipulam a parcela de momento fletor que deve ser transformada em tensões de cisalhamento e somada ao carregamento já existente.

Neste capítulo são apresentadas as recomendações dos códigos de projeto nacional (NBR 6118:2003) e internacionais (CEB-FIP/MC1990, ACI/318:2005, e Eurocode 2/2006) para o tratamento da punção em lajes lisas. Também são apresentados resumos de alguns trabalhos sobre lajes lisas de concreto armado envolvendo a utilização de furos e pilares internos com efeito de momento, realizados no exterior e no Brasil.

2.1 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES

2.1.1 CEB-FIP/MC1990

Em lajes lisas sem armadura de cisalhamento, o CEB-FIP/MC1990 recomenda duas verificações: compressão do concreto no perímetro do pilar e verificação da tensão de cisalhamento ao longo de um perímetro de controle traçado a uma distância “2d”.

A verificação da compressão do concreto no perímetro do pilar é feita através da comparação entre a tensão de cisalhamento atuante no perímetro do pilar e a tensão resistente do concreto:

$$\frac{F_{Sd}}{u_0 d} \leq 0,5f_{cd} \quad (2.1)$$

onde:

u_0 é o perímetro do pilar;

$d = (d_x + d_y)/2$.

$$f_{cd2} = 0,60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \quad (2.2)$$

A Figura 2.2 apresenta o perímetro de controle traçado a uma distância “2d” para um pilar interno.

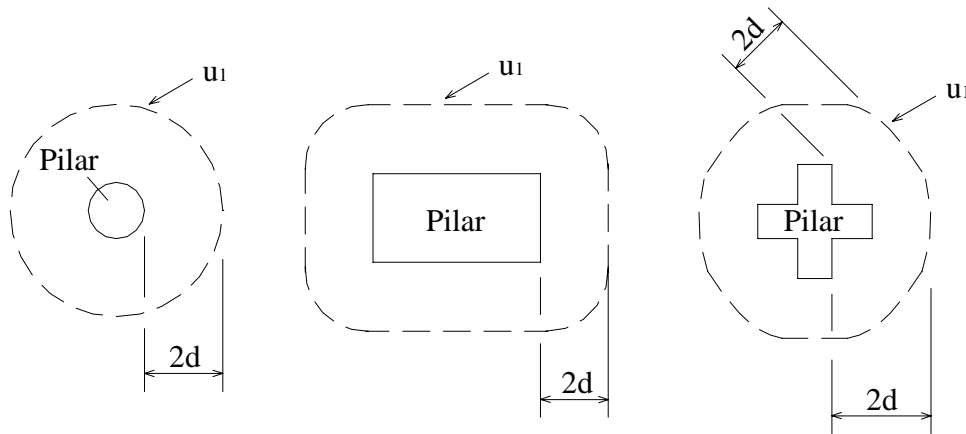


Figura 2.2 – Perímetro de controle conforme o CEB- FIP/MC 90

A tensão causada pela carga aplicada no perímetro de controle, em lajes com carregamento simétrico, é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{Sd}}{u_1 d} \quad (2.3)$$

onde:

F_{Sd} é a força concentrada;

u_1 é o comprimento do perímetro de controle;

d é a altura efetiva da laje (mm).

A resistência ao cisalhamento de uma laje de concreto armado sem armadura de cisalhamento é tomada como:

$$\tau_{Rd} = 0,12 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} \quad (2.4)$$

onde:

ρ é a taxa de armadura;

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

$$\xi = 1 + \sqrt{200/d} \quad (2.5)$$

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd} \quad (2.6)$$

Para lajes com carregamento assimétrico, com transmissão de momento entre a laje e o pilar a tensão cisalhante é dada por:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u_1 d} + \frac{KM_{Sd}}{W_1 d} \quad (2.7)$$

onde:

M_{Sd} é o momento transferido da laje ao pilar;

W_1 é o parâmetro do perímetro de controle, dado pela expressão:

$$W_1 = \int_0^{u_1} |e| \cdot dl \quad (2.8)$$

sendo que:

dl é o comprimento elementar do perímetro de controle;

e é a distância de dl ao eixo em torno do qual atua o momento M_{Sd} .

Para pilar com seção retangular:

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1 \quad (2.9)$$

K é o coeficiente de eficiência que depende da dimensão do pilar c_1 paralela a excentricidade M_{Sd}/F_{Sd} e c_2 perpendicular a excentricidade. Esse valor é função da proporção do momento não balanceado transmitido por excentricidade da força cortante em uma direção, e por flexão e torção na outra. O valor de K por ser tirado da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores de K

c_1/c_2	0,5	1,0	2,0	3,0
K	0,45	0,60	0,70	0,80

A distribuição do cisalhamento causado pelo desequilíbrio do momento é mostrada na Figura 2.3.

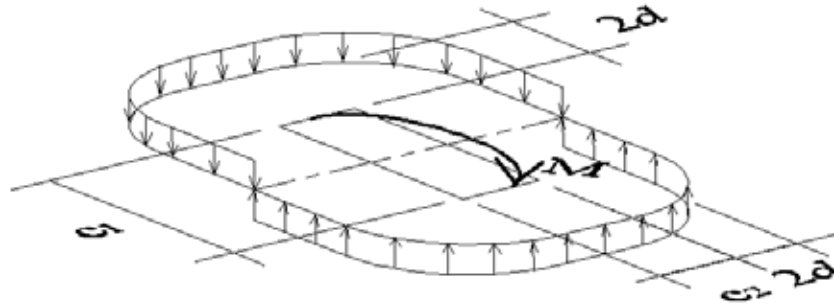


Figura 2.3 – Distribuição de cisalhamento devido ao momento fletor, CEB- FIP/MC 90

O CEB-FIP/MC1990 não estipula, em suas prescrições, o perímetro de controle a ser considerado quando há a presença de furos.

Em lajes com armadura de cisalhamento, a resistência à punção deve ser verificada na região adjacente ao pilar, como mostrado na Equação 2.1 e também:

a) Na região da armadura de cisalhamento

$$F_{Sd} \leq 0,09\xi(100\rho f_{ck})^{1/3} u_1 d + 1,5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd} \text{sen}\alpha \quad (2.10)$$

$$1,5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd} \text{sen}\alpha \geq 0,03\xi(100\rho f_{ck})^{1/3} u_1 d \quad (2.11)$$

onde:

s_r é o espaçamento radial das camadas de armadura de cisalhamento $\leq 0,75d$;

A_{sw} é a área da armadura de cisalhamento por camada;

F_{ywd} é a tensão de escoamento de cálculo da armadura de cisalhamento $\leq 300\text{MPa}$;

α é o ângulo formado entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje.

b) Na região externa à armadura de cisalhamento

$$F_{Sd} \leq 0,12\xi(100\rho f_{ck})^{1/3} u_{n,ef} d \quad (2.12)$$

onde:

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

A Figura 2.4 apresenta os perímetros de controle para lajes com armadura de cisalhamento.

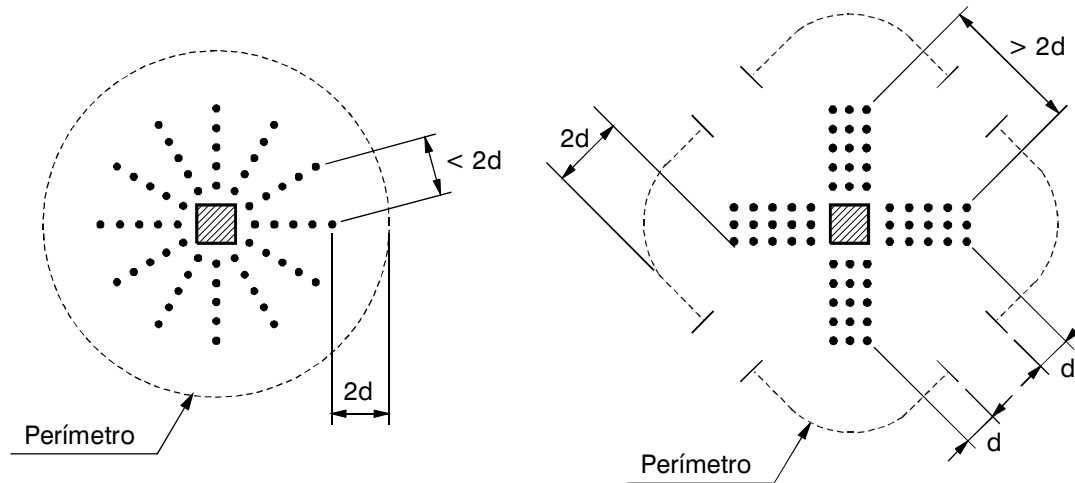


Figura 2.4 – Perímetro de controle situado a 2d da última camada de armadura de cisalhamento, CEB- FIP/MC 90

2.1.2 EUROCODE 2 (EC2/2004)

O EC2/2004, para lajes lisas sem armadura de cisalhamento, recomenda que a verificação do esforço cortante por unidade de comprimento deve ser feita no perímetro do pilar e em um perímetro de controle igual ao adotado pelo CEB-FIP, 1990, distante “2d” da face do pilar, mostrado na Figura 2.2.

A verificação da tensão atuante na face do pilar é feita através da equação:

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} = 0,5v f_{ck} \quad (2.13)$$

onde:

V_{Ed} é a carga concentrada;

u_0 é o perímetro do pilar;

$d = (d_x + d_y)/2$.

$$v = 0,60 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (2.14)$$

O perímetro de controle quando existem furos a $6d$ da face do pilar é considerada como mostra a Figura 2.5.

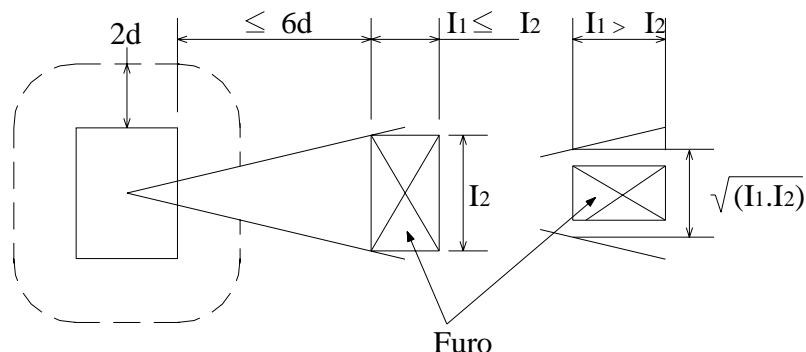


Figura 2.5 – Perímetro crítico com a existência de furo, segundo o EC2/2004

A tensão cisalhante na superfície de controle u_1 é definida pela expressão:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_1 d} \quad (2.15)$$

onde:

β é coeficiente que leva em consideração os efeitos da excentricidade da carga;

No caso de não haver excentricidade pode-se tomar $\beta = 1,00$;

No caso da laje apresentar carregamento assimétrico, o valor de β deve ser calculado pela equação:

$$\beta = \left(1 + k \cdot \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1} \right) \quad (2.16)$$

onde:

W_1 é o módulo resistente da seção crítica, calculado pela expressão:

$$W_1 = \int_0^{u_1} |e| \cdot dl \quad (2.17)$$

onde:

dl é o comprimento elementar do perímetro de controle;

e é a distância de dl ao eixo em torno do qual atua o momento M_{Sd} .

Para pilares internos de seção retangular o módulo resistente pode ser determinado pela equação:

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1c_2 + 4c_2d + 16d^2 + 2\pi dc_1 \quad (2.18)$$

k é o mesmo coeficiente de eficiência utilizado pelo CEB-FIP, 1990, e assume os mesmos valores encontrados na Tabela 2.1.

A verificação da tensão resistente de uma laje lisa de concreto armado, com pilar interno é dada por:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (2.19)$$

onde:

$$V_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100\rho_1 f_{ck})^{1/3} \quad (2.20)$$

e:

$$\gamma_c = 1,5;$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \text{ (“d” em mm);} \quad (2.21)$$

$\rho_1 = \sqrt{\rho_{1x} \cdot \rho_{1y}} \leq 0,02$, taxa de armadura nas duas direções ortogonais, calculadas com a largura igual à dimensão do pilar mais “3d” para cada um dos lados.

Para lajes com armadura de cisalhamento, a resistência total é dada por:

$$V_{Rd,cs} = 0,75v_{Rd,c}u_1d + 1,5 \frac{d}{s_r} A_{sw}f_{ywd,ef} \sin\alpha \quad (2.22)$$

Podendo atingir, no máximo, o valor da ruptura adjacente ao pilar $V_{Rd,m\acute{a}x}$.

onde:

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

Também deve ser verificado se a ruptura por punção ocorre externamente à região de armadura de cisalhamento. É considerada apenas a resistência do concreto em uma superfície de controle situada a $1,5d$ da armadura, u_{out} , mostrada na Figura 2.6.

$$v_{Rd,c} = \frac{V_{Rd,c}}{u_{out}d} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100\rho_1 f_{ck})^{1/3} \quad (2.23)$$

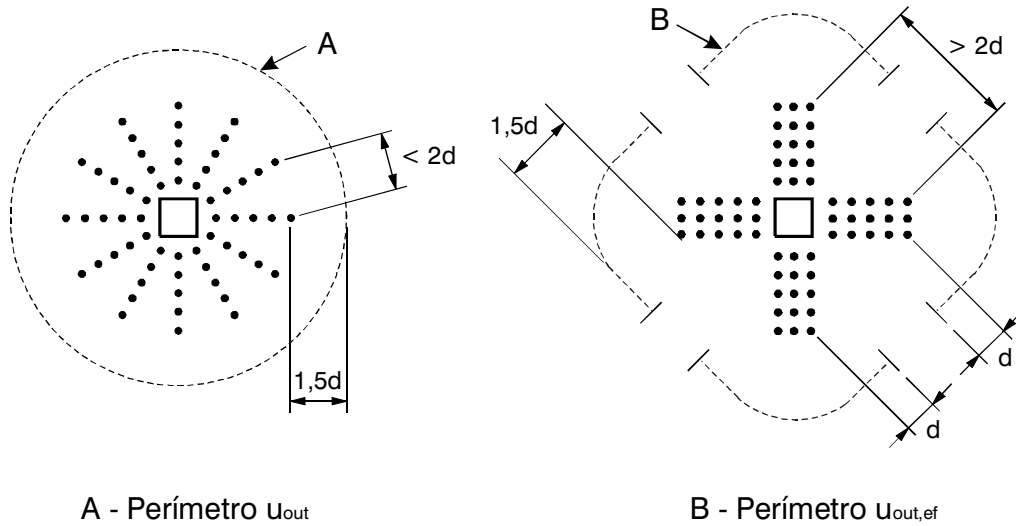


Figura 2.6 – Perímetro de controle situado a 1,5d da última camada de armadura de cisalhamento, EC2/2004

2.1.3 ACI-318:2005

O perímetro de controle para verificação da tensão resistente é dado a uma distância de “0,5d” medida da face do pilar. Para uma laje cogumelo, com pilar interno de seção retangular, o perímetro crítico é o mostrado na Figura 2.7.

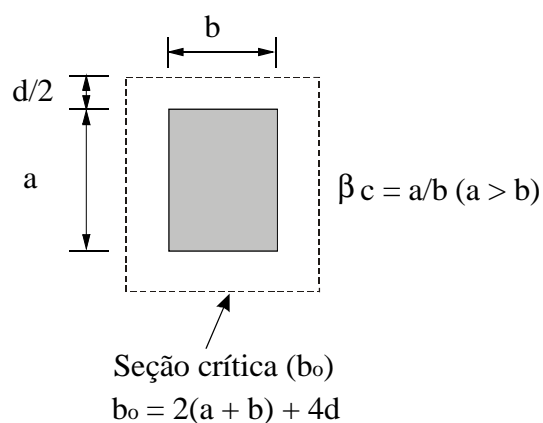


Figura 2.7 – Perímetro crítico, ACI-318:2005

A verificação da punção em lajes lisas, segundo o ACI (2005) é realizada através da comparação entre a força atuante “ V_u ” e a força resistente “ V_n ”.

$$\phi V_n \geq V_u, \phi=0,85 \quad (2.24)$$

Para lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento, V_n é igual a V_c , que deve ser igual ao menor resultado obtido com a aplicação das equações:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.25)$$

onde:

β_c é a razão entre o comprimento do maior lado sobre o menor lado do pilar.

$$V_c = 0,083 \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.26)$$

onde:

α_s é a constante que assume os seguintes valores: 40 para pilares internos, 30 para pilares de borda e 20 para pilares de canto (para todas as lajes deste trabalho $\alpha_s=40$).

$$V_c = 0,33 \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.27)$$

Quando houver furos, o perímetro de controle deve ser reduzido como mostrado na Figura 2.8. Furos localizados a uma distância superior a $10h$ devem ser desconsiderados, sendo h a altura da laje.

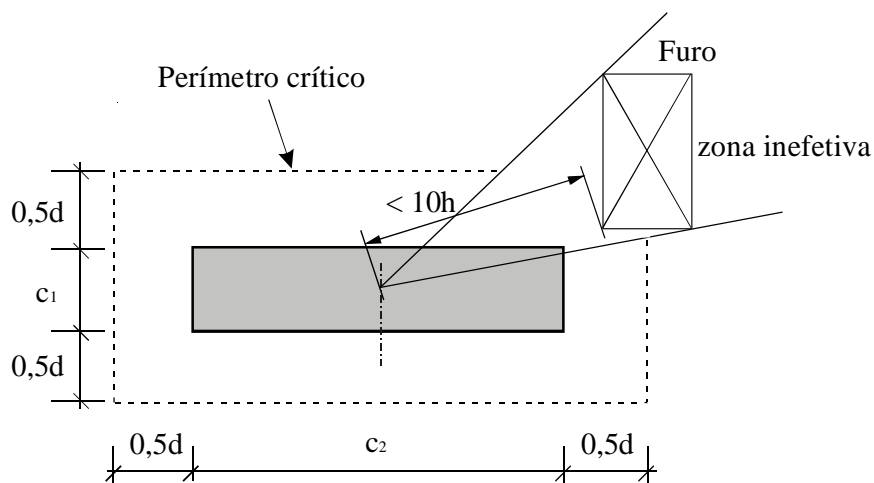


Figura 2.8 – Perímetro crítico para lajes com furos, ACI-318:2005

Quanto à transferência de momento fletor na conexão laje-pilar, o código americano estipula a máxima tensão de cisalhamento v_u da seguinte maneira:

$$v_{u(AB)} = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_u c_{AB}}{J_c} \quad (2.28)$$

ou

$$v_{u(CD)} = \frac{V_u}{A_c} - \frac{\gamma_v M_u c_{CD}}{J_c} \quad (2.29)$$

onde:

C_{AB} e C_{CD} são distâncias entre os lados e o centróide da seção crítica;

A_c é a área de concreto da seção crítica: $A_c = b_0 \cdot d$;

J_c é o momento de inércia polar da seção crítica ($b_0 d$), que, para um pilar interno é dado por:

$$J_c = \frac{d \cdot (c_1 + d)^3}{6} + \frac{(c_1 + d) \cdot d^3}{6} + \frac{d \cdot (c_2 + d) \cdot (c_1 + d)^2}{2} \quad (2.30)$$

γ_v é o coeficiente de transferência de momento fletor pela excentricidade da força cortante:

$$\gamma_v = 1 - \frac{1}{1 + (2/3) \cdot \sqrt{b_1/b_2}} \quad (2.31)$$

com b_1 e b_2 sendo, respectivamente, as dimensões da seção crítica na direção de aplicação do momento fletor e na direção perpendicular a essa, como mostrado na Figura 2.9.

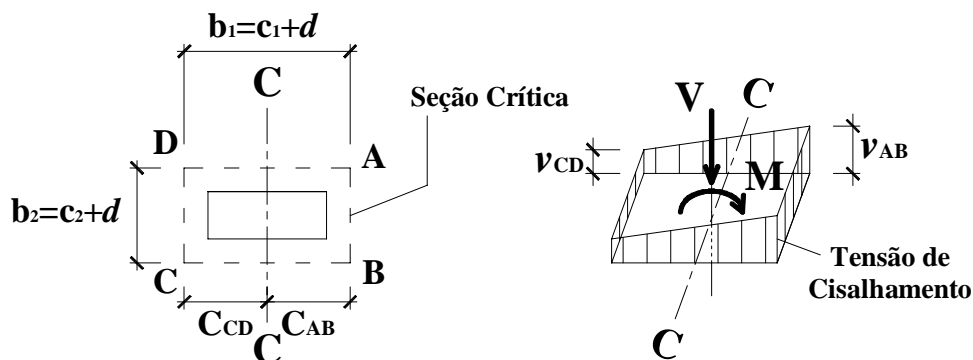


Figura 2.9 – Seção crítica e distribuição das tensões de cisalhamento, ACI-318:2005

Em lajes com armadura de cisalhamento, para determinar a resistência à punção, devem ser consideradas as parcelas de contribuição do concreto e do aço.

$$V_c \leq 0,17\sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.32)$$

$$V_c + V_s \leq 0,5\sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.33)$$

A contribuição da armadura, quando se tem estribos verticais, é calculada pela expressão:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.34)$$

onde:

A_v é a área da armadura de cisalhamento em um espaçamento “s”;

f_y é a tensão específica de escoamento do aço (MPa) ≤ 420 MPa;

s é o espaçamento entre os elementos da armadura de cisalhamento.

Quando a armadura de cisalhamento é composta por estribos inclinados, a contribuição desta armadura é dada por:

$$V_s = A_v f_y (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) d / s \quad (2.35)$$

onde:

α é o ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje.

Com a armadura composta de barras dobradas, a contribuição da mesma é dada por:

$$V_s = A_v f_y (\text{sen}\alpha) \leq 0,25 b_0 d \sqrt{f'_c} \quad (2.36)$$

A região externa à armadura de cisalhamento deve ser verificada em uma seção $0,5d$ da última camada de armadura, como mostra a Figura 2.10, utilizando as Equações 2.24 a 2.26.

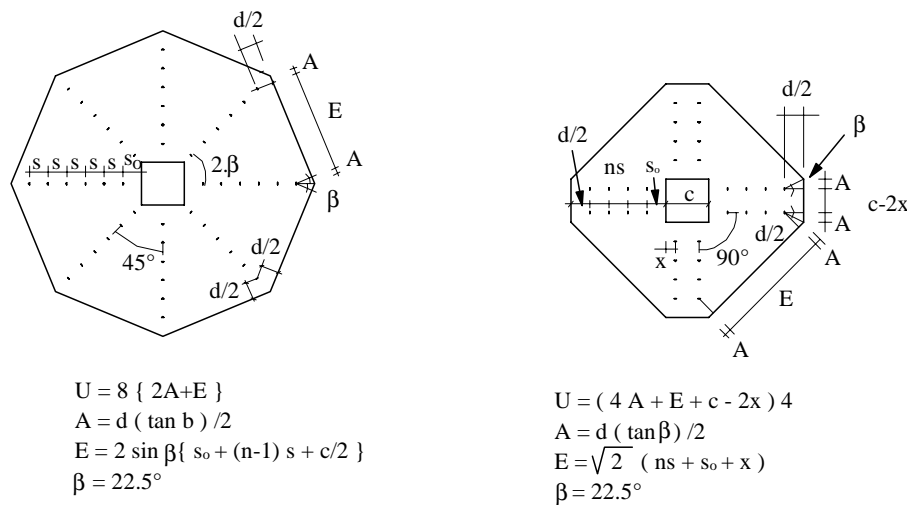


Figura 2.10 – Perímetro crítico a $0,5d$ da última camada de armadura de flexão, ACI-318:2005

2.1.4 NBR 6118:2003

A NBR 6118:2003, para lajes sem armadura de cisalhamento, prevê a verificações do cisalhamento em duas superfícies críticas: a primeira no contorno C, que é o próprio perímetro do pilar; e, a segunda no contorno C', sendo este o perímetro crítico situado a $2d$ da superfície do pilar, tendo suas extremidades arredondadas, como mostrado na Figura 2.11.

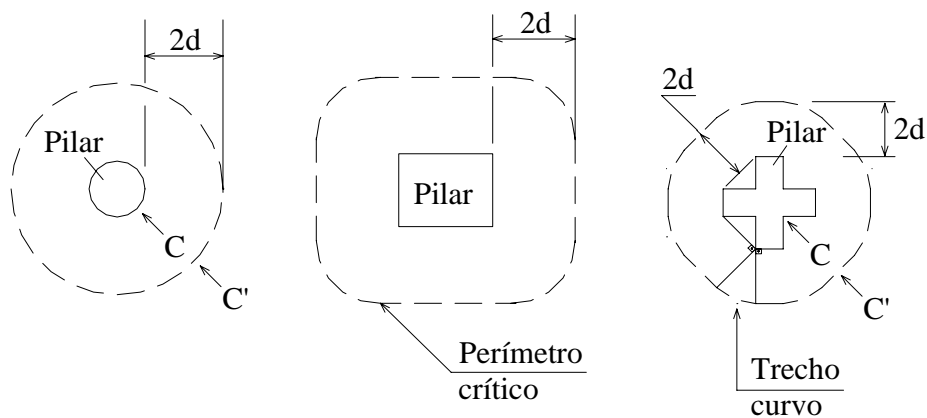


Figura 2.11 – Perímetro crítico em pilares internos de acordo com a NBR 6118:2003

Para o tratamento de furos, a norma altera o perímetro crítico a ser considerado, como mostrado na Figura 2.12. Furos situados a uma distância maior que “8d” do perímetro do pilar devem ser desconsiderados.

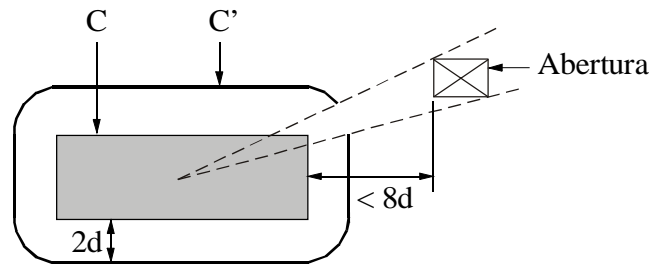


Figura 2.12 – Perímetro crítico de acordo com a NBR 6118:2003 para lajes com furos

A tensão solicitante nas superfícies críticas C e C' é definida pela equação:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} \quad (2.37)$$

A tensão resistente das lajes de concreto armado no perímetro de controle C é dada por:

$$\tau_{rd2} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \quad (2.38)$$

No perímetro de controle C', a tensão resistente é

$$\tau_{rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100\rho f_{cd})^{1/3} \quad (2.39)$$

com d em mm ($d=(d_x+d_y)/2$)

onde:

$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$ é taxa geométrica de armadura. A taxa de armadura em cada direção é calculada para a área de concreto situada dentro das dimensões do pilar mais a extensão de “3d” para cada lado.

Em lajes lisas com pilares internos sujeitos ao efeito de momento, a tensão solicitante é dada pela expressão:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} + \frac{KM_{Sd}}{W_p d} \quad (2.40)$$

onde:

u é o perímetro crítico (C');

K é o coeficiente que fornece a parcela de M_{sd} transmitida ao pilar por cisalhamento, que depende da relação C_1/C_2 . O coeficiente K assume os valores indicados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de K (NBR 6118:2003)

C_1/C_2	0,5	1,0	2,0	3,0
K	0,45	0,60	0,70	0,80

Onde:

C_1 é a dimensão do pilar paralela à excentricidade da força

C_2 é a dimensão do pilar perpendicular à excentricidade da força

W_p é módulo resistente da seção crítica. Para um pilar retangular é dado por:

$$W_p = \frac{C_1^2}{2} + C_1 C_2 + 4C_2 d + 16d^2 + 2\pi d C_1 \quad (2.41)$$

Ou, W_p pode ser calculado desprezando a curvatura dos cantos do perímetro crítico, através da expressão:

$$W_p = \int_0^{u_1} |e| \cdot dl \quad (2.42)$$

onde:

dl é o comprimento elementar do perímetro de controle;

e é a distância de dl ao eixo que passa pelo centro do pilar e sobre o qual atua o momento fletor M_{Sd} .

Para os casos de lajes com armadura de cisalhamento, a verificação da tensão deve ser feita no perímetro C' , como mostrado na equação:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{rd3} = 0,10 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100\rho f_{cd})^{1/3} + 1,5 \frac{d}{s_r} \frac{A_{sw} f_{ywd} \sin \alpha}{(ud)} \quad (2.43)$$

onde:

s_r é o espaçamento entre as armaduras $\leq 0,75d$;

A_{sw} é a área da armadura de punção de uma camada;

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

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

A verificação também deve ser feita em um perímetro distante $2d$, C'' , da última camada da armadura de cisalhamento, conforme mostrado na Figura 2.13, utilizando a Equação 2.37.

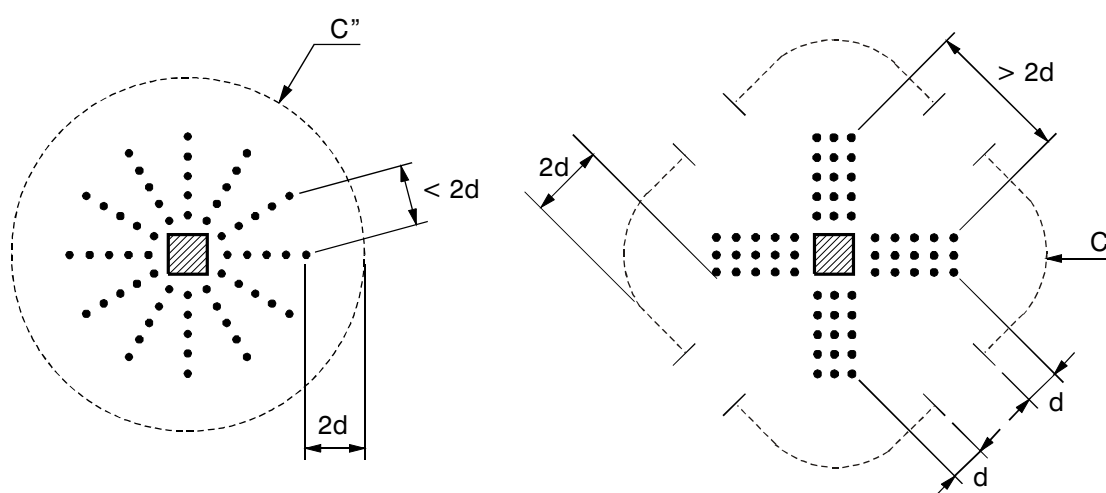


Figura 2.13 – Perímetro crítico externo à armadura de cisalhamento segundo a NBR 6118:2003

2.2 HISTÓRICO RESUMIDO DO ESTUDO DA PUNÇÃO

A primeira pesquisa experimental envolvendo o estudo da punção foi realizada por TALBOLT (1913). O autor apresentou um estudo experimental de sapatas de concreto armado, no qual algumas dessas sapatas romperam por punção. O autor também foi pioneiro ao utilizar um perímetro crítico situado a uma distância d (altura útil da laje) do pilar em sua sugestão para o cálculo de sapatas e lajes submetidas à punção. Sua formulação não incluía a contribuição da armadura de flexão.

GRAFF (1933), por sua vez, ensaiou uma série de lajes submetidas à punção e concluiu que a resistência ao cisalhamento aumentava muito pouco com o aumento da resistência à compressão, tendo uma relação não linear. Cinco anos mais tarde, o mesmo autor

ensaiou lajes utilizando armadura de cisalhamento e verificou acréscimos de carga de até 86% (GRAFF (1938)).

Dez anos depois, RICHART (1948) constatou um acréscimo de carga em lajes submetidas à punção devido ao aumento da taxa de armadura de flexão. HOGNESTAD (1953) apresentou uma proposta para o cálculo de lajes submetidas à punção considerando a taxa (%) e a resistência da armadura de flexão. Mais tarde ELSTNER & HOGNESTAD (1956) fizeram um estudo experimental com 39 lajes, variando a taxa de armadura, o tamanho do pilar e a armadura de cisalhamento. Com esse estudo, os autores confirmaram que o acréscimo da taxa de armadura aumenta a resistência à punção e atribuíram este aumento à menor fissuração decorrente da maior taxa de armadura.

KINNUNEN & NYLANDER (1960) ensaiaram lajes com formato circular e foram os primeiros a apresentar uma teoria racional, com um modelo mecânico, sobre lajes submetidas à punção, considerando o caso específico de lajes com armadura de flexão circular. Três anos depois KINNUNEN (1963) estendeu seu modelo para lajes armadas com armadura ortogonal considerando os efeitos de pino e de membrana da armadura. Outros autores, como por exemplo ANDERSSON (1963), BRAESTRUP (1976), ANDRÄ (1982), e SHEHATA (1985) também fizeram trabalhos teóricos e experimentais envolvendo o estudo da punção.

Outros estudos experimentais com a utilização de armadura de cisalhamento foram conduzidos por ANDERSSON (1963), YITZHAKI (1966), HAWKINS (1974), LANGHOR et al (1976), ANDRÄ (1981), SEIBLE et al (1980), STIGLAT & STEINER (1980), KINNUNEN et al (1980), VAN DER VOET et al (1982), NILSSON (1983), ANDRÄ (1981), MOKHTAR et al (1985), REGAN (1985), KOCH (1990), BROMS (1990), GOMES (1991), HALLGREN (1996).

No Brasil, na EESC/USP, os estudos foram iniciados sob orientação do Prof. Martinelli (MARTINELLI (1974)) e posteriormente do professor Takeya (TAKEYA (1981)). Outros autores, MELGES (1995) e VARGAS (1997), receberam orientação de outros professores.

Na EPUSP, o Prof. Fusco tem se dedicado ao punção desde 1985 (FUSCO (1985)), tendo também orientado a tese de doutorado de Cordovil (CORDOVIL (1995)). Recentemente TRAUTWEIN (2006) apresentou pesquisa experimental e numérica sobre o assunto.

Na COPPE/UFRJ, foi apresentada em 1981 uma dissertação de mestrado sobre o funcionamento de lajes protendidas (CARVALHO (1982)). Posteriormente o Prof. Ibrahim Shehata passou a se dedicar ao assunto (SHEHATA & REGAN (1989)) e orientou outros dois autores (PINTO (1993); DIAS (1997)).

Na Universidade de Brasília, o assunto foi tratado por SANTOS (1995), OLIVEIRA (1998), COELHO (1999), ANDRADE (2000) e TRAUTWEIN (2001). Na Universidade Federal de Goiás, o assunto foi investigado por GOMES e ANDRADE (1993), ANDRADE (1999) e SILVA (2003).

Um dos aspectos importantes no estudo da punção são os pilares retangulares, assunto que foi estudado por FORSSEL & HOLMBERG (1946), DIAZ DE COSSIO (1962), HAWKINS et al (1971), REGAN & REZAI-JORABI (1988), TENG et AL (1999), e AL-YOUSIF & REGAN (2003). No Brasil o assunto foi pesquisado por SILVA (2003), OLIVEIRA (2003) e BORGES (2004).

Os trabalhos mais relevantes envolvendo o estudo de furos e transferência de momento em lajes lisas são apresentados a seguir.

2.3 ESTUDOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE FUROS

2.3.1 Trabalhos realizados no exterior

Uma das primeiras pesquisas sobre ligação laje-pilar em lajes lisas foi desenvolvida por MOE (1961). MOE (1961) apud MOWRER & VANDERBILT (1967) ensaiou 186 lajes, das quais 15 possuíam furos. O autor, baseado em seus experimentos e em estudos teóricos, propôs a Equação 2.44 para determinação da carga última de lajes lisas sem furo e com furo.

$$P_u = \frac{(15bd\sqrt{f'_c})(1-0,075r/d)}{1 + (5,25bd\sqrt{f'_c})/P_{flex}} \quad (2.44)$$

onde:

P_u é a carga de ruptura por cisalhamento (lb);

b é o perímetro do pilar – no caso de lajes com furo, o perímetro é reduzido da parte interna à área formada por linhas radiais que partem do centro do pilar até as extremidades do furo;

d é a altura efetiva da laje (in);

f'_c é a tensão de compressão do concreto (psi);

r é o comprimento do lado da área quadrada carregada (in);

P_{flex} é a carga de ruptura considerando a laje sem furo (lb).

O termo P_{flex} é calculado de acordo com a Equação 2.45, obtida por ELSTNER & HOGNESTAD (1956), usando a teoria das linhas de escoamento.

$$P_{flex} = 8m \left(\frac{1}{1-r/a} - 3 + 2\sqrt{2} \right) \quad (2.45)$$

$$m = \rho f_y d^2 \left(1 - 0,59 \rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (2.46)$$

onde:

a é o comprimento da laje quadrada;

m é o momento fletor último por unidade de largura da laje sem furo.

Com base no abrangente trabalho de MOE (1961), o ACI-ASCE Committee 326 (1962) recomendou um método simplificado para o cálculo de lajes com e sem furos, propondo a Equação 2.47.

$$P_u = 4bd \frac{r+d}{r} \sqrt{f'_c} \quad (2.47)$$

onde:

b é o perímetro do pilar, levando em consideração a presença de furos; quando quadrado igual a $4r$.

Foi notado que o mesmo valor de P_u poderia ser obtido pela Equação 2.48.

$$P_u = 4b_0 d \sqrt{f'_c} \quad (2.48)$$

onde:

b_0 é o perímetro efetivo da seção “pseudocrítica” a uma distância de $d/2$ do perímetro do pilar (in).

MOWRER & VANDERBILT (1967) conduziram uma pesquisa com o objetivo de investigar, em lajes lisas com furos, a utilização de concreto de agregado de massa leve. Em uma série de testes, foram ensaiadas dezessete lajes com concreto de agregado de massa leve e oito lajes com concreto de agregado de massa normal. Os modelos das lajes foram os mesmos utilizados em ensaios realizados anteriormente por MOE (1961).

As lajes de dimensões quadradas, com 915mm de lado e 76mm de espessura, foram ensaiadas simplesmente apoiadas nas quatro bordas e moldadas monoliticamente com o pilar quadrado de 152mm de lado, localizado na superfície superior da laje. As principais variáveis entre os modelos ensaiados nesta série foram a forma, a quantidade dos furos, a taxa de armadura e a resistência do concreto.

Os modelos das lajes são mostrados na Figura 2.14.

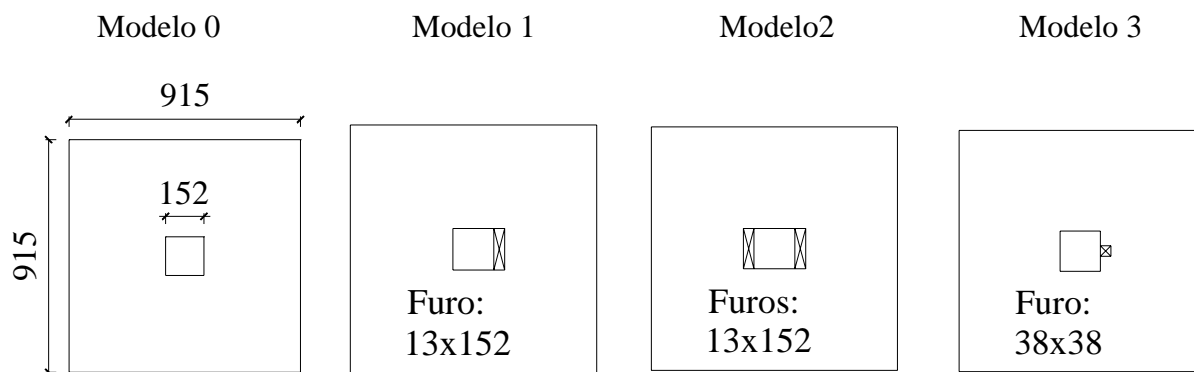


Figura 2.14 – Modelos das lajes ensaiadas por MOWRER & VANDERBILT (mm)

As principais características das lajes ensaiadas e as cargas de ruptura são mostradas na Tabela 2.3. Na nomenclatura das lajes, a letra “J” indica a série de testes. As letras “L” e “N” significam concreto de agregado de massa leve e concreto de agregado de massa normal, respectivamente. O primeiro número após as letras se refere ao modelo da laje, mostrado na Figura 2.14. O último número é referente à taxa de armadura utilizada. A última

letra “a” ou “b” indica que as lajes que possuem a mesma letra foram concretadas de uma só vez.

Tabela 2.3 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por MOWRER & VANDERBILT (1967)

LAJE	f_c (MPa)	f_y (MPa)	d (mm)	ρ (%)	V_u (kN)
JL – 0 – 1,7a	15,0	352	51	1,67	81
JL – 1 – 1,7a	18,1	352	51	1,67	66
JL – 2 – 1,7a	17,8	352	51	1,67	65
JL – 3 – 1,7a	15,6	352	51	1,67	93
JL – 0 – 2,2a	13,0	352	51	2,20	85
JL – 1 – 2,2a	17,4	352	51	2,20	80
JL – 2 – 2,2a	16,8	352	51	2,20	66
JL – 3 – 2,2a	14,6	352	51	2,20	80
JL – 0 – 1,7b	28,4	352	51	1,67	96
JL – 1 – 1,7b	23,1	352	51	1,67	86
JL – 2 – 1,7b	26,2	352	51	1,67	90
JL – 3 – 1,7b	24,9	352	51	1,67	111
JL – 0 – 2,2a	20,0	352	51	2,20	80
JL – 1 – 2,2a	22,8	352	51	2,20	86
JL – 2 – 2,2a	28,1	352	51	2,20	86
JL – 3 – 2,2a	23,9	352	51	2,20	115
JL – 0 – 1,1	41,2	352	51	1,10	103
JN – 0 – 1,7	12,4	352	51	1,67	113
JN – 1 – 1,7	16,5	352	51	1,67	83
JN – 2 – 1,7	16,0	352	51	1,67	86
JN – 3 – 1,7	14,6	352	51	1,67	106
JN – 0 – 2,2	15,2	352	51	2,20	123
JN – 1 – 2,2	14,0	352	51	2,20	77
JN – 2 – 2,2	10,4	352	51	2,20	73
JN – 3 – 2,2	14,6	352	51	2,20	113

Baseando-se em seus ensaios e na equação proposta por MOE (1961), os autores propuseram a seguinte equação a ser utilizada quando há a utilização de concreto de agregado de massa leve:

$$V_u = \frac{9,7(1+d/r)bd\sqrt{f'_c}}{1+(5,25bd\sqrt{f'_c})/V_{flex}} \quad (2.49)$$

onde:

V é a carga de ruptura, em lb;

b é o perímetro da área carregada, em in;

d é a altura efetiva da laje, em in;

f'_c é a resistência 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.

ROLL, ZAIDI, SABNIS & CHUANG (1971) realizaram testes em 158 lajes quadradas, com 737mm de lado, com intuito de propor uma expressão para a previsão da resistência ao cisalhamento de lajes lisas, com furos ao redor do pilar, considerando a resistência à flexão da laje sem furo. O estudo envolveu várias combinações de tamanho, forma, localização e número de furos.

As lajes foram apoiadas nas bordas e o carregamento foi aplicado de baixo para cima em troncos de pilares concretados monoliticamente, de seção transversal quadrada, com 102mm de lado, como mostrado na Figura 2.15.

Houve uma divisão das lajes em três Séries: A, B e H. A Série A compreendeu 124 ensaios e foi subdividida em outras duas séries, A-1 e A-2. Na Série A-1, foram testadas lajes com várias combinações de furos, mantendo a mesma altura efetiva $d = 45,7\text{mm}$, a mesma taxa de armadura $\rho = 1,15\%$ e utilizando malha ortogonal de armadura de flexão negativa com barras de 6,35mm de diâmetro. Na Série A-2, foram mantidos os parâmetros da Série A-1, com exceção da altura efetiva que diminuiu, $d = 39,4\text{mm}$, e, por conseqüência, aumentou a taxa de armadura, $\rho = 1,34\%$. A Série B englobou 20 ensaios. A altura efetiva foi a mesma da Série A-1, $d = 45,7\text{mm}$, e teve como principais diferenças a utilização de barras na armadura de flexão com 9,52mm de diâmetro e uma taxa de armadura superior $\rho = 2,53\%$. Na Série H, foram ensaiadas 14 lajes, sempre com quatro furos nas extremidades do pilar, semelhantes a duas vigas se cruzando, tendo como principal variação o tamanho dos furos e a

taxa de armadura. A altura efetiva foi a mesma da Série A-1, $d = 45,7\text{mm}$. As descrições das lajes quanto aos furos são mostradas nas Tabelas 2.4 e 2.5.

As características e as cargas de ruptura das lajes com furos da Série A-1, com furo tipo 1 adjacente ao pilar, da Série B e da Série H são mostradas na Tabela 2.6.

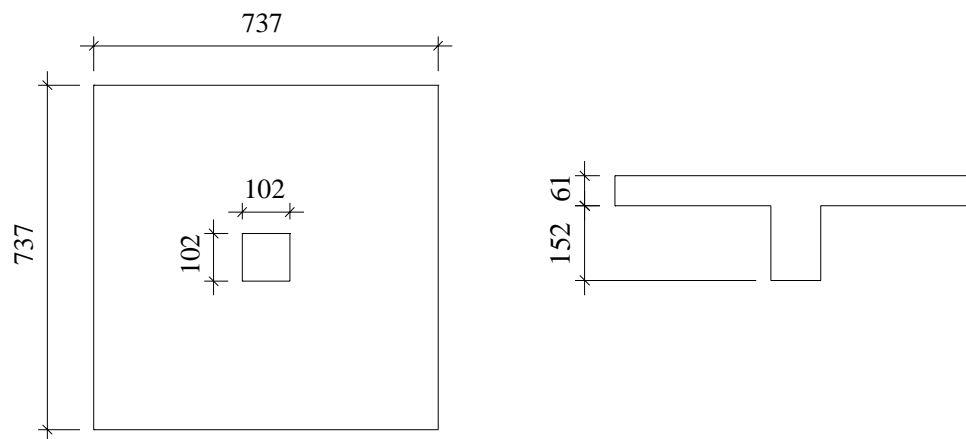


Figura 2.15 – Dimensões das lajes ensaiadas por ROLL at al. (1971) (mm)

Tabela 2.4 – Parâmetros dos furos nas lajes ensaiadas por ROLL at al. (1971)

Tipo	Tipo de furo (Tab. 2.5)	Forma do furo	Tamanho (mm)	Nº de furos	Distância do pilar
	0		Laje sem furo		
A	1	S ; C	50,8	1 a 4	Variável
	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
	6	L	50,8 x 102,0	1	0
	7	S	50,8	2	0
	0		Laje sem furo		
B	1	S	50,8	1 a 4	0
	2	S	50,8 102,0	1 a 4	0
H	2	S	25,4	4	0
			76,2		
			127,0		
			152,0		
			318,8		

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

Tabela 2.5 – Disposição dos furos utilizados por ROLL at al. (1971)

Tipo	Forma e localização	Tipo	Forma e localização
0	Sem furo	4	
1	<p data-bbox="531 645 579 674">Furo</p>	5	
2		6	
3		7	

Tabela 2.6 – Características e cargas de ruptura das lajes de ROLL at al. (1971)

Identificação: a - bcd - e - f - g

a – forma do furo; b – tipo de disposição de furo (Tab. 2.5); c – tamanho do furo (in); d – n° de furos; e – tipo de configuração de armadura (0 é a configuração da lajes sem furo que também foi usada em lajes com furo); f – distância do furo para até o pilar; g – número do ensaio

LAJE Série A-1	f _c (MPa)	f _y (MPa)	ρ (%)	V _u (kN)	LAJE Série H	f _c (MPa)	f _y (MPa)	ρ (%)	V _u (kN)
S-121-0-0-1	28,5	359	1,15	65	S-214-9-0-1	30,3	387	1,15	61
S-121-0-0-2	27,0	359	1,15	57	S-234-9-0-1	29,0	379	1,15	45
S-122-0-0-1 ^b	28,5	359	1,15	60	S-254-9-0-1	29,0	392	1,15	42
S-122-0-0-2 ^b	27,0	359	1,15	54	S-264-9-0-1	30,1	388	1,15	40
S-122-0-0-1a ^c	28,1	359	1,15	41	S-214-9-0-1	29,6	455	2,53	88
S-122-0-0-2a ^c	26,0	359	1,15	53	S-234-9-0-1	29,0	442	2,53	64
S-123-0-0-1	28,0	359	1,15	45	S-254-9-0-1	29,6	454	2,53	53
S-123-0-0-2	30,5	359	1,15	52	S-264-9-0-1	30,1	464	2,53	51
S-124-0-0-1	28,0	359	1,15	40					
S-124-0-0-2	30,5	359	1,15	46					
S-224-9-0-1	28,3	359	1,15	45					

d = 46mm, para todas as lajes (das 3 séries)

^bfuros em faces opostas

^cfuros em faces adjacentes

LAJE Série B	f _c (MPa)	f _y (MPa)	ρ (%)	V _u (kN)
S-121-0-0-1	31,4	367	2,53	70
S-121-0-0-2	29,2	374	2,53	79
S-122-0-0-1 ^b	29,8	436	2,53	76
S-122-0-0-1a ^c	30,2	358	2,53	75
S-123-0-0-1	29,2	373	2,53	73
S-124-0-0-1	30,2	372	2,53	68
S-221-0-0-1	34,6	458	2,53	89
S-222-0-0-1 ^b	30,7	457	2,53	80
S-222-0-0-1a ^c	34,6	463	2,53	85
S-223-0-0-1	30,7	454	2,53	78
S-224-0-0-1	33,8	448	2,53	71
S-241-9-0-1	29,8	463	2,53	71
S-242-9-0-1 ^b	32,8	463	2,53	66
S-242-9-0-2 ^b	29,6	467	2,53	66
S-242-9-0-1a ^c	32,8	443	2,53	73
S-243-9-0-1	24,8	436	2,53	56
S-244-9-0-1	24,8	361	2,53	57
S-244-9-0-2	33,8	442	2,53	60

^bfuros em faces ou extremidades opostas

^cfuros em faces ou extremidades adjacentes

Os autores verificaram que o termo $P_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$, parâmetro utilizado na formulação dos autores, atingiu valor máximo 23 para as lajes da Série A (A-1 e A-2). Para aumentar o termo $P_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$, os autores optaram por aumentar o termo V_{flex} através do acréscimo de taxa de armadura, criando a Série B. Para a Série B, o parâmetro atingiu valor máximo de 50, valor superior ao utilizado em projetos, segundo os autores.

Baseados na experiência anterior de MOE (1961) e na análise estatística das 124 lajes da Série A-1 e A-2, os autores chegaram a uma complexa equação exponencial que foi simplificada pelas Equações 2.50 e 2.51, em função de novos parâmetros, como a relação dimensão do pilar/altura efetiva (r/d), a relação excentricidade/altura efetiva (e/d), além da área carregada ($b.d$) e da carga de flexão da laje sem furo V_{flex} .

$$\frac{P_u}{bd\sqrt{f'_c}} = \frac{14,0(1 + 0,15r/d - 0,425e/d)}{1 + (10bd\sqrt{f'_c}) / P_{flex}} \quad (2.50)$$

$$\frac{P_u}{P_{flex}} = \frac{14,0(1 + 0,15r/d - 0,425e/d)}{P_{flex} / (bd\sqrt{f'_c}) + 10} \quad (2.51)$$

onde:

P_u é a carga de ruptura por cisalhamento (lb);

b é o perímetro do pilar – no caso de lajes com furo, o perímetro é reduzido da parte interna à área formada por linhas radiais que partem do centro do pilar até as extremidades do furo;

d é a altura efetiva da laje (in);

f'_c é a tensão de compressão do concreto (psi);

r é o comprimento do lado da área quadrada carregada (in);

e é a distância entre centróide da área efetiva ($b.d$) e o centro do pilar;

P_{flex} é a carga de ruptura considerando a laje sem furo (lb).

Foi constatado que as Equações 2.50 e 2.51 mostraram-se conservadoras para os casos das lajes da Série A, com quatro furos nas extremidades, furos na disposição 2,

fornecendo uma relação entre a carga calculada e a experimental de 0,905, contra 0,950 quando estes dados foram eliminados da estatística.

Para as lajes da série B, as Equações 2.50 e 2.51 previram cargas próximas das experimentais para valores de $P_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$ até 27, mostrando-se levemente conservadoras dentro do intervalo de 28 a 35; e, muito conservadora no intervalo entre 46 e 50, nos casos de lajes com quatro grandes furos nas extremidades.

Devido a estes indicadores, com o propósito de investigar o efeito do tamanho dos furos, ao se utilizar 4 furos nas extremidades (tipo 2 – Tab. 2.5), foram realizados os ensaios da Série H. A Série H também mostrou os efeitos de uma grande redução do perímetro b, resultando em altos valores do parâmetro $P_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$. Nos ensaios com furos de 318mm o autor considerou que a parcela $bd\sqrt{f'_c}$ era tão pequena que o parâmetro $P_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$ tendia ao infinito.

Os autores notaram que as parcelas com r/d e e/d nas Equações 2.50 e 2.51 tendem a se cancelar para variações usuais dos termos, ou tendem a ter pouca variação na resistência ao cisalhamento das lajes lisas. Com isto, os termos foram desprezados, resultando em duas novas expressões simplificadas, um pouco mais conservadoras que as anteriores, Equações 2.52 e 2.53, em função apenas de $P_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$ e com a limitação de $P_u/P_{flex} = 0,23$ (relação aproximada para duas vigas se cruzando) quando o parâmetro $P_{flex} / bd\sqrt{f'_c}$ tender ao infinito.

$$\frac{P_u}{P_{flex}} = \frac{6,1}{5,2 + P_{flex} / (bd\sqrt{f'_c})} + 0,23 \quad (2.52)$$

$$\frac{P_u}{bd\sqrt{f'_c}} = \frac{6,1}{1 + 5,2(bd\sqrt{f'_c}) / P_{flex}} + 0,23 \left[\left(P_{flex} / bd\sqrt{f'_c} \right) \right] \quad (2.53)$$

TENG, KUANG, & CHEONG (1999) desenvolveram um trabalho experimental sobre lajes lisas de concreto armado e analisaram: a influência de furos adjacentes ao pilar com diferentes localidades, retangularidade da coluna e carregamento diferenciado nas direções “x” e “y” da laje.

Foram ensaiadas, até a ruptura, 20 lajes quadradas de dimensões 2200mm x 2200mm x 150mm, apoiadas em pilares com as seguintes dimensões: 200x200mm, 200x600mm e 200x1000mm. Estes apresentaram relações entre os lados de 1, 3 e 5. Os furos existentes em algumas das lajes ensaiadas (15 lajes) eram retangulares com 200x400mm.

Cargas iguais foram aplicadas em oito pontos do bordo superior das lajes das Séries OC11, OC13 e OC15, enquanto nas lajes das Séries OC13- α e OC13- β , as cargas não foram iguais em todas as bordas. O carregamento na direção “y” foi igual a 1,6 (α) vez ou 0,63 (β) vez o aplicado na direção “x”. Dessa maneira, os momentos em “y” eram maiores que os momentos em “x” em 1,6 vez, para as lajes com o fator α , e menores em 0,63 vez, para as lajes com o fator β . Apesar de aplicar carregamentos diferenciados, não houve transferência de momentos da laje ao pilar.

Na Figura 2.16 é mostrado um desenho esquemático com as dimensões utilizadas nas lajes e pilares, posicionamento dos furos e cargas últimas obtidas.

Na tabela 2.7 são mostradas as características e as cargas de ruptura das lajes ensaiadas pelos autores.

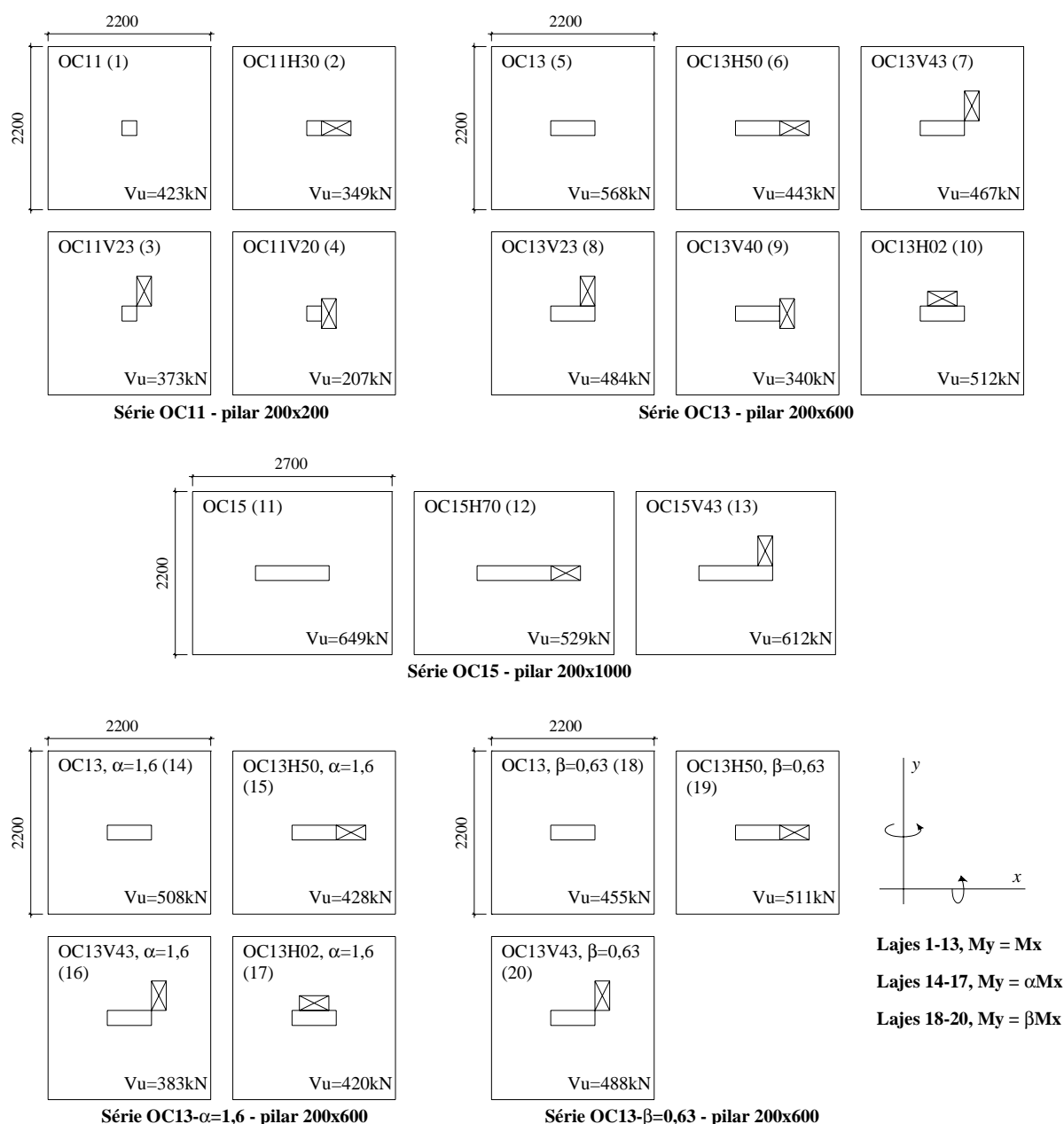


Figura 2.16 – Características principais e cargas últimas das lajes de TENG et al. (mm)

O furo localizado adjacente ao menor lado do pilar, das lajes OC11V20 e OC13V40, causou uma perda significativa na carga de ruptura quando comparadas com as lajes similares OC11 e OC13, sem furos, 51% e 40% respectivamente. Com isso, ficou caracterizado que grande parte da tensão de cisalhamento está concentrada nas extremidades do pilar alongado. Assim, a resistência à punção da laje apoiada em coluna retangular possivelmente é determinada pela região extrema do pilar.

Tabela 2.7 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por TENG et al.

LAJE	B (mm)	H (mm)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	d (mm)	ρ (%)	V_u (kN)
OC11	200	200	36,0	452,5	105	1,81	423
OC11H30	200	200	33,9	452,5	108	1,70	349
OC11V23	200	200	34,1	452,5	109	1,69	373
OC11V20	200	200	38,6	452,5	105	1,74	207
OC13	200	600	35,8	452,5	107	1,71	568
OC13H50	200	600	36,3	452,5	110	1,67	443
OC13V43	200	600	36,6	452,5	114	1,61	467
OC13V23	200	600	36,9	452,5	108	1,70	484
OC13V40	200	600	43,0	452,5	109	1,69	340
OC13H02	200	600	43,1	452,5	112	1,64	512
OC15	200	1000	40,1	452,5	103	1,76	649
OC15H70	200	1000	37,9	470,2	108	1,67	529
OC15V43	200	1000	36,0	470,2	109	1,66	612
OC13, α=1,6	200	600	33,0	470,2	110	1,67	508
OC13H50, α=1,6	200	600	33,1	470,2	115	1,60	428
OC13V43, α=1,6	200	600	33,2	470,2	111	1,65	383
OC13H02, α=1,6	200	600	37,5	470,2	114	1,61	420
OC13, β=0,63	200	600	39,7	470,2	111	1,65	455
OC13H50, β=0,63	200	600	39,8	470,2	110	1,67	511
OC13V23, β=0,63	200	600	35,7	470,2	110	1,67	488

Os pesquisadores, baseados nos resultados das lajes ensaiadas, sugeriram algumas recomendações para o cálculo da resistência à punção no código britânico BS8110/1985:

a) a capacidade resistente de uma laje sem furos e sem armadura de cisalhamento deveria ser verificada em um perímetro localizado a $1,5d$ da face do pilar. No caso de lajes apoiadas em colunas retangulares, uma parte do perímetro de controle, na região central de maior lado, considera-se inefetiva de acordo com a Figura 2.17.

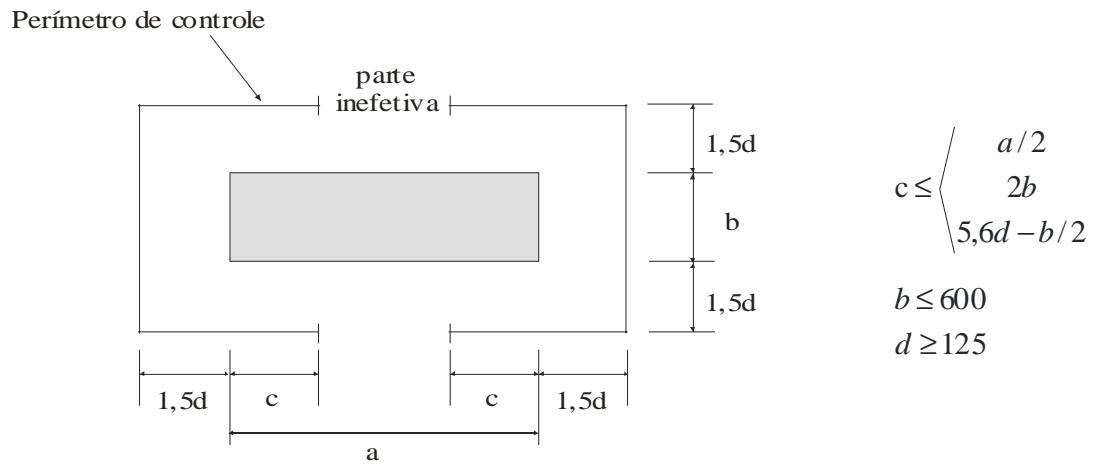


Figura 2.17 – Perímetro crítico, para o cálculo de lajes sem armadura de cisalhamento e sem furos, recomendado por TENG et al.

b) na existência de furos, localizados a uma distância menor que $6d$ da face do pilar, parte do perímetro crítico (região entre as linhas de projeção de um ponto, adotado pela interseção entre as bissetrizes da extremidade ao furo) também é considerada inefetiva para a resistência à punção (Figura 2.18).

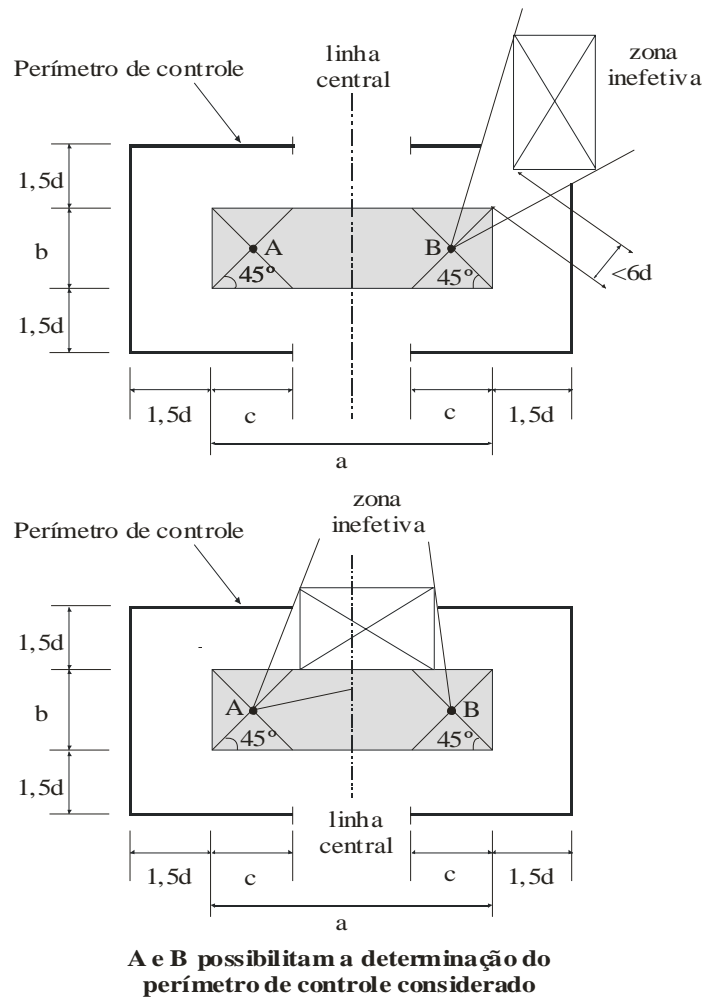


Figura 2.18 – Perímetro de controle, para o cálculo de lajes sem armadura de cisalhamento e com furos, recomendado por TENG et al.

O código britânico BS8110/1995 apud TENG, KUANG, & CHEONG (1999) indica que a tensão nominal atuante pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$v_c = 0,79 \left(\frac{100A_s}{bd} \right)^{1/3} \left(\frac{400}{d} \right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{1/3} / \gamma_m \text{ (MPa)} \quad (2.54)$$

onde:

A_s/bd é a taxa de armadura de flexão;

$400/d$ é o fator de efeito de tamanho ($\geq 1,0$);

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

$\gamma_m=1,25$.

A capacidade de resistência à punção devido à carga última concentrada pode ser obtida por:

$$V = v_c u d \quad (2.55)$$

onde:

u é o perímetro efetivo de cisalhamento distante $1,5d$ das faces do pilar com extremidades quadradas. Para lajes com furos distantes do pilar até 6 vezes a altura efetiva, o perímetro é reduzido por projeções radiais partindo do centro do pilar até as extremidades do furo, como mostrado na Figura 2.19:

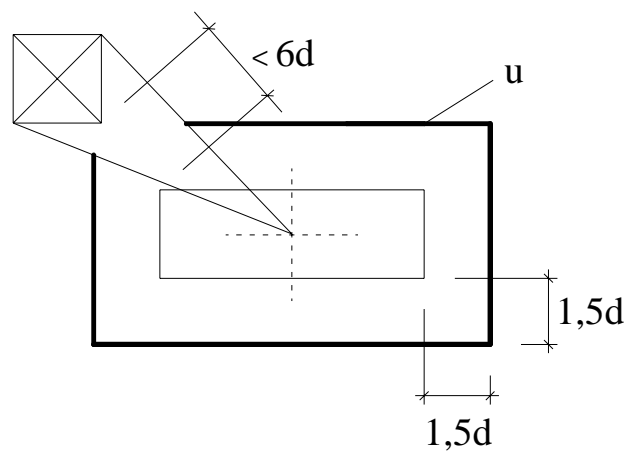


Figura 2.19 – Perímetro de controle para lajes com furos adotado pelo BS8110/1995

Com os resultados das 20 lajes pesquisadas e mais 114 lajes testadas por outros pesquisadores (MOE - 1961 e ROLL et al. - 1971), os autores realizaram uma comparação entre as cargas experimentais e as previstas pelo ACI/95, EC2/92 e BS8110 estendido (código britânico de 1985 com as sugestões em relação ao perímetro de controle recomendado por TENG et al.). Notaram que o BS8110 estendido apresenta melhores resultados que o ACI/95 e o EC2/92, conforme mostrado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Comparações das médias dos valores das cargas obtidas, entre BS8110 estendido (recomendado por TENG et al.) e outros códigos (ACI/95 e EC2/92)

Métodos	Coefficientes	20 lajes BCA-NTU	20 + 114 = 134 lajes
BS8110 com recomendação dos pesquisadores	V_{prev} / V_{exp}	0,891	0,881
	Desvio padrão	0,114	0,192
	Coefficiente de variação	0,128	0,218
ACI/95	V_{prev} / V_{exp}	0,685	0,622
	Desvio padrão	0,111	0,181
	Coefficiente de variação	0,162	0,291
EC2/92	V_{prev} / V_{exp}	0,697	0,616
	Desvio padrão	0,112	0,164
	Coefficiente de variação	0,161	0,266

V_{prev} : carga prevista pelo cálculo;
 V_{exp} : carga obtida experimentalmente.

REGAN (1999) realizou pesquisa com objetivo de avaliar o efeito de furos, posicionados adjacentes a colunas, na resistência à punção de lajes lisas e procurar minimizar a perda desta resistência com o uso de armadura de cisalhamento.

O autor menciona que as recomendações para os cálculos de tensão no caso de lajes com furos adjacentes a pilares são muito conservadoras e, em casos de lajes com furos, não fazem referência a recomendações específicas quando se utiliza armadura de cisalhamento, embora recomendem uma armadura mínima.

O autor também comenta que as recomendações dadas pela norma BS8110 (1985) para o cálculo do perímetro de controle de lajes, com furos adjacentes ao pilar, são conservadoras e até incoerentes, pois indicam que um furo adjacente ao menor lado de um pilar retangular proporciona uma menor perda de tensão que um adjacente ao maior lado do

pilar. Segundo o autor a norma ignora uma eventual excentricidade do perímetro reduzido e considera que a armadura de punção colocada nos locais indicados na Figura 2.20 é inefetiva.

O autor utilizou os dados obtidos em seus ensaios para avaliar as prescrições do BS8110/85 e Handbook do BS8110/85 (1987).

Área onde armadura de cisalhamento pode ser inefetiva de acordo o BS8110 (1985)

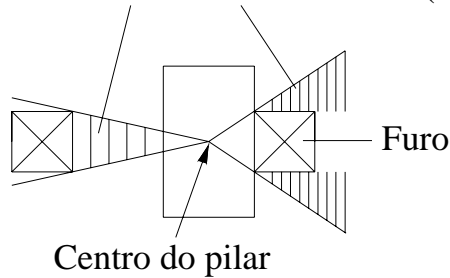


Figura 2.20 – Locais onde a armadura de punção é inefetiva, segundo a BS8110 (1985)

Como proposta para o cálculo do perímetro de controle para lajes lisas com furos para o Handbook to BS8110/85 (1987) o autor sugeriu o mesmo perímetro de controle para estimar a influência do furo na resistência à punção indicado pelo mesmo autor em 1974, REGAN (1974), utilizando projeções paralelas ao invés de radiais para subtrair o perímetro de controle, como mostrado na Figura 2.21.

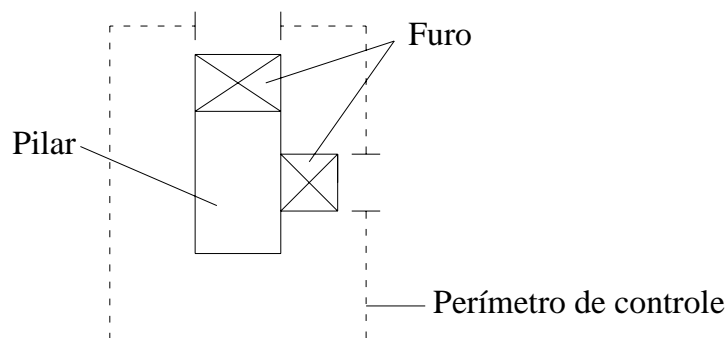


Figura 2.21 – Perímetro de controle proposto por REGAN (1974) para o Handbook to BS8110 (1987)

Foram ensaiadas oito lajes quadradas com lado de 2000mm e espessura de 160mm, apoiadas em pilares retangulares de 250x150mm. Foi aplicado um carregamento em oito pontos de carga, sendo dois em cada extremidade da laje. Na Figura 2.22 são mostrados: o sistema de ensaio, as características geométricas das lajes e o posicionamento dos furos adotados.

A laje 1, sem furos, e a laje 2, com dois furos adjacentes aos maiores lados do pilar, não tiveram armadura de cisalhamento. As lajes 3 e 4, com a mesma geometria das lajes 1 e 2, respectivamente, tiveram armadura de cisalhamento mínima calculada conforme as exigências do BS8110 (1985), dispostas como mostrado na Figura 2.23. A armadura foi colocada em duas camadas em torno do pilar, para se adequar aos furos. O detalhamento na laje 4 foi levemente alterado. A laje 5 teve armadura de cisalhamento apenas adjacente aos furos e uma resistência no escoamento suficiente para suprir a perda de resistência proveniente dos furos.

A laje 6, com quatro furos adjacentes, não possuiu armadura de cisalhamento. As lajes 7 e 8, também com quatro furos, tiveram armadura de cisalhamento constituída de barras dobradas, posicionadas ao lado dos furos 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 houvesse armadura de cisalhamento.

Na Tabela 2.9 são mostradas as características, as cargas e os modos de ruptura das lajes ensaiadas pelo autor.

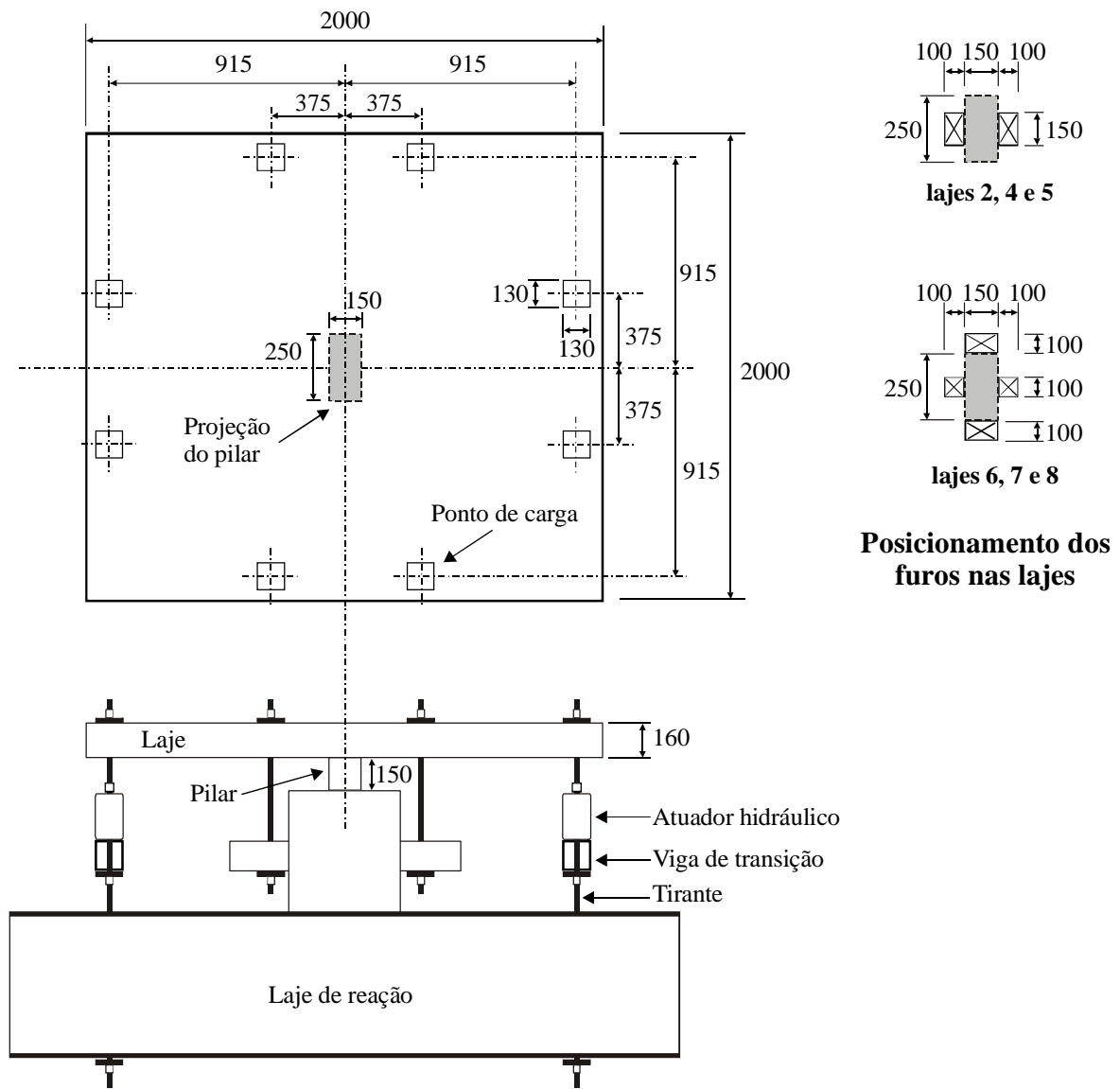


Figura 2.22 – Esquema de aplicação de carga e posicionamento dos furos nas lajes testadas por REGAN (1999) (mm)

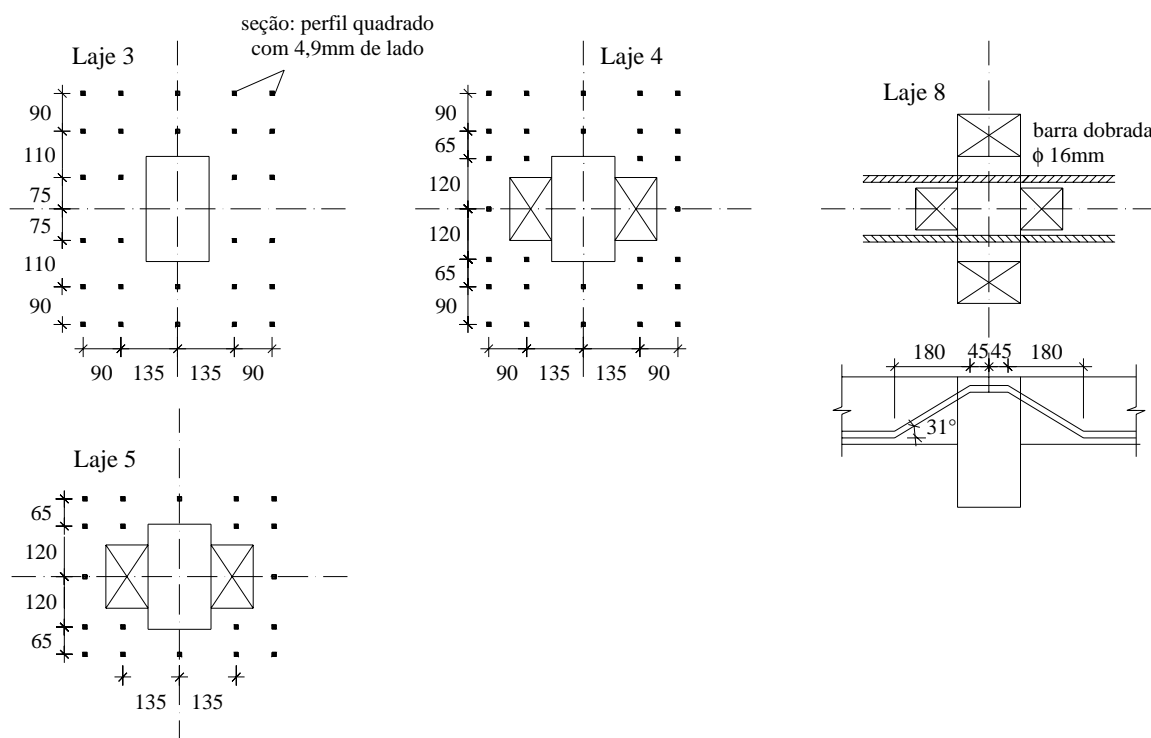


Figura 2.23 – Armadura de cisalhamento utilizada por REGAN (1999) (mm)

Tabela 2.9 – Características, cargas e modos de ruptura das lajes de REGAN (1999)

LAJE	Furo	Armadura de cisalhamento	$\sum A_{sv} f_y \text{sen}\alpha$ (kN)	V_u (kN)	Modo de Ruptura	Superfície de Ruptura
1	-	-	-	456	Punção	A partir do pilar
2	2	-	-	396	Punção	A partir do pilar
3	-	Tiras de perfil I	201	516	Punção	Cruzando a armadura de cisalhamento
4	2	Tiras de perfil I	201 ⁽¹⁾	476	Punção	Cruzando a armadura de cisalhamento
5	2	Tiras de perfil I	80	496	Punção	Cruzando a armadura de cisalhamento
6	4	-	-	296	Punção	A partir do pilar
7	4	-	-	296	Punção	A partir do pilar
8	4	Barra dobrada	-	336	Punção	Cruzando a armadura de cisalhamento

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

Os resultados obtidos por REGAN (1999) mostraram que as prescrições do BS8110 (1985) foram bastante conservadoras, enquanto que a proposta recomendada pelo Handbook to BS8110/85 forneceu bons resultados.

Também mostram que a armadura de cisalhamento colocada ao lado dos furos pode ser bastante efetiva para restaurar a perda de resistência devido aos furos e, para furos com largura total igual a $\frac{3}{8}$ do perímetro do pilar, a armadura de cisalhamento local somada à armadura mínima prescrita pela norma resultou em resistências levemente superiores a de uma laje sem furo e sem armadura de cisalhamento.

A armadura de cisalhamento foi mais efetiva quando próxima aos furos.

Quanto ao uso de barras dobradas, houve um acréscimo de resistência da laje com furo, que teve removida $\frac{5}{8}$ da interface laje-pilar e que a resistência foi governada pelas condições locais da face do pilar. O autor sugere que os códigos possam aumentar o limite de resistência à punção devido à parte do carregamento ser transferida diretamente ao pilar pela barra inclinada, alterando as condições da face do pilar quanto ao carregamento total transferido pela laje.

IOANNOU (2001) ensaiou cinco lajes circulares de 2000mm de diâmetro e 170mm de espessura, apoiadas no centro de um pilar de 200x200mm. O carregamento foi aplicado em oito pontos, posicionados em distâncias iguais entre eles, em uma circunferência de 1700mm de diâmetro. Foi acionado um atuador hidráulico em cada ponto de aplicação de carga. Foi utilizada uma única bomba para ativar os oito atuadores. Existiam furos posicionados nas proximidades do pilar em todas as lajes. Em apenas uma laje não se utilizou armadura de cisalhamento tipo “shearband”. A resistência do concreto variou de 32,8 a 48,0MPa. Na Figura 2.24 é mostrado o posicionamento dos pontos de aplicação de carga e dos furos existentes nas lajes ensaiadas. Nas Figuras 2.25 e 2.26 é mostrada a distribuição da armadura de cisalhamento utilizada e seu detalhamento, respectivamente.

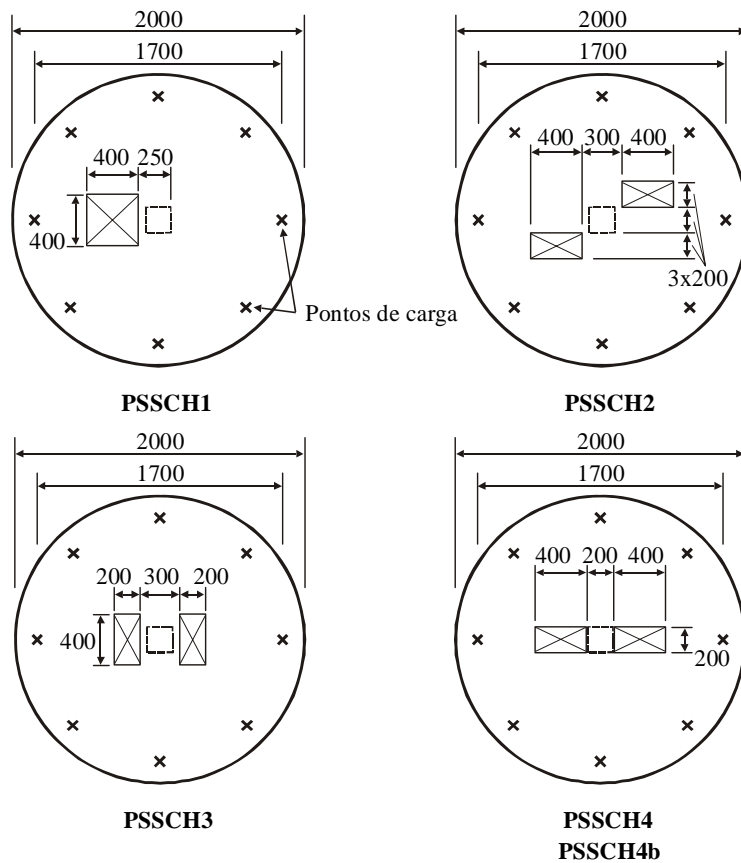


Figura 2.24 – Lajes ensaiadas por IOANNOU (2001) (mm)

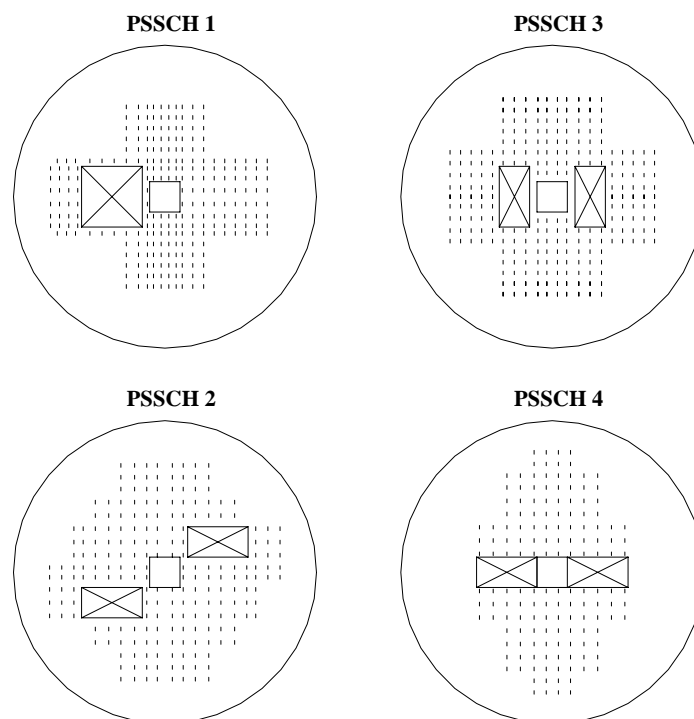


Figura 2.25 – Distribuição da armadura de cisalhamento nas lajes de IOANNOU (2001)

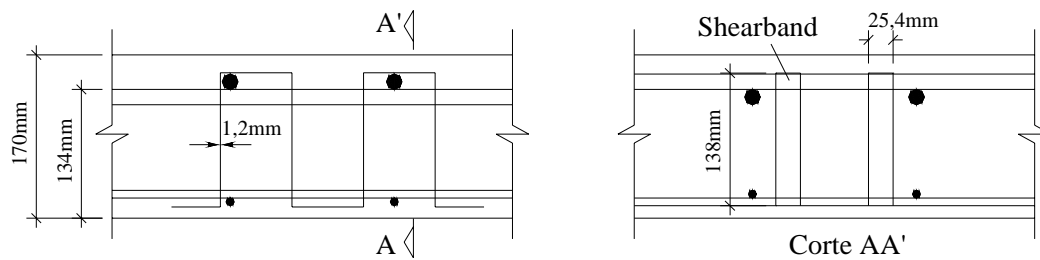


Figura 2.26 – Armadura de cisalhamento “shearbands” utilizada por IOANNOU

A autora analisou as cargas de ruptura baseando-se no CEB-FIP MC90, mas usando alguns perímetros de controle para tratar o efeito de furos. Ela determina os perímetros de controle das lajes, com furos simétricos de acordo com o manual do BS8110/85 (Handbook - 1987), com exceção das lajes com furos percorrendo todo o lado do pilar (PSSCH 4 e 4b). Para estas lajes, a redução do perímetro é feita por uma projeção iniciando no canto do pilar, com um ângulo de 22,5°. IOANNOU considerou duas possibilidades no cálculo do perímetro para a laje com apenas um furo (PSSCH1): a) considerando um furo fictício para restaurar a simetria; e b) adotando a coluna como sendo de extremidade. Na Figura 2.27 são mostrados os perímetros considerados pela autora.

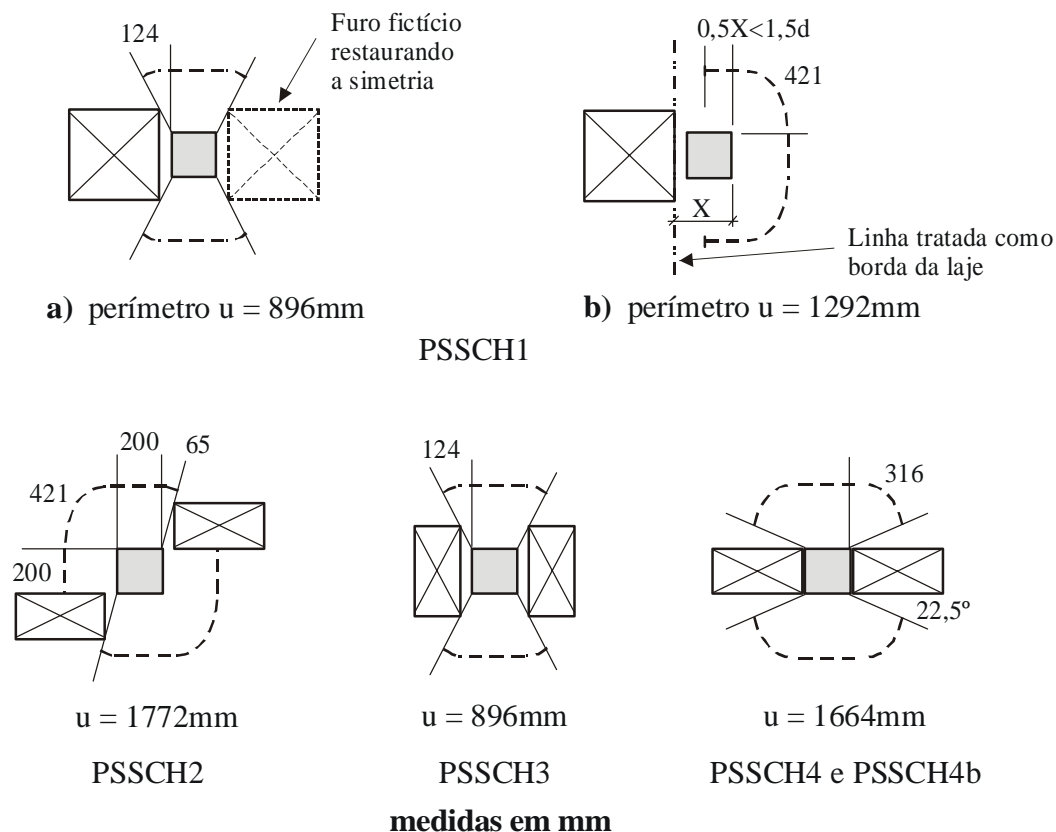


Figura 2.27 – Perímetros de controle adotados por IOANNOU (2001)

Houve um aumento de 22% na comparação entre a carga de ruptura da laje PSSCH4 e a similar sem armadura de cisalhamento PSSCH4b, como mostrado na Tabela 2.10. Dentre as lajes com armadura de cisalhamento, a PSSCH3, com dois furos próximos ao pilar, teve uma menor carga de ruptura.

Tabela 2.10 – Resultados das lajes testadas por IOANNOU (2001)

Laje	f_c (MPa)	V_u (kN)	Modo de Ruptura
PSSCH1	48,0	492	esmagamento do concreto ao redor do pilar
PSSCH2	39,2	433	punção / flexão
PSSCH3	41,6	386	punção
PSSCH4	41,6	415	punção depois do esmagamento do concreto
PSSCH4b	32,8	313	punção

* Altura útil de 134mm;
 * Taxa de armadura de flexão de 0,75%;
 * A laje PSSCH4b foi sem armadura de cisalhamento.

Na Tabela 2.11 são apresentados os resultados das cargas de ruptura calculados por IOANNOU, baseados nas cargas obtidas experimentalmente e em suas considerações.

Tabela 2.11 – Resultados das cargas experimentais e estimadas por IOANNOU (2001)

Laje	$f_{cu}^{(1)}$ (MPa)	$N^{(2)}$	V_c	V_s	V_{c+s} ($0,75V_c+V_s$)	V_u (kN)	$V_u / V_{c+s}^{(3)}$	OBS
PSSCH1	60	22	158	231	350	492	1,41	(4)
		26	229	273	445		1,11	(5)
PSSCH2	49	26	289	273	490	433	0,88	
PSSCH3	52	20	151	210	323	386	1,20	
PSSCH4	52	20	281	210	421	415	0,99	
PSSCH4b	41	-	259	-	259	313	1,21	

(1) – resistência cúbica à compressão do concreto;

(2) – número de elementos da armadura de cisalhamento considerados efetivos na contribuição da resistência à punção (cada contribuição 10,5kN);

(3) – relação entre a carga última experimental e a calculada por IOANNOU;

(4) – calculado com o perímetro a) da Figura 2.7;

(5) – calculado com o perímetro b) da Figura 2.7.

Para a laje PSSCH1, o tratamento como pilar de borda, perímetro “b”, apresentou um melhor resultado que ao se tomar um perímetro de controle adotando um furo fictício para restaurar a simetria, perímetro “a”, embora a aproximação do furo fictício forneça bons resultados para furos menores.

A autora relata ainda que os resultados foram satisfatórios para as lajes PSSCH3, PSSCH4 e PSSCH4b, considerando a dificuldade na estimativa do somatório da área de armadura de cisalhamento a ser adotada como efetiva.

2.3.2 Trabalhos realizados no Brasil

As investigações no Brasil se iniciaram com ensaios realizados em Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, Goiás, por GOMES e ANDRADE (1995), onde se pesquisou a influência da armadura de cisalhamento tipo “stud” na resistência à punção de lajes lisas, com furos próximos à região do pilar, que simulavam a passagem de tubulações através das lajes.

Esta pesquisa avaliou a eficiência e a necessidade da armadura de cisalhamento na presença de furos circulares próximos a um pilar interno. Foram ensaiadas dezesseis lajes quadradas de concreto armado, com 3000mm de lado e 200mm de altura, sendo cinco lajes sem armadura de cisalhamento e duas lajes sem furos. Foi utilizado pilar quadrado com 200mm de lado para todas as lajes. A armadura de flexão foi a mesma para todas as lajes, sendo constituída de uma malha ortogonal com 31 barras de 16mm de diâmetro em cada direção. Os furos existentes em algumas lajes foram em três quantidades (1, 2 e 4) e três diâmetros diferentes (90mm, 151mm e 166mm).

A Figura 2.28 mostra o detalhe dos “studs” utilizados por GOMES e ANDRADE (1995). A configuração da disposição dos furos circulares ao redor do pilar é apresentada na Figura 2.29.

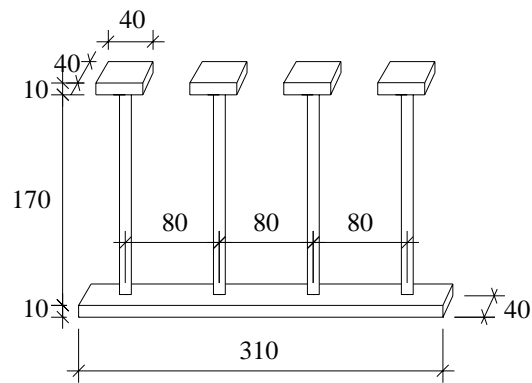


Figura 2.28 – Armadura de cisalhamento utilizada por GOMES e ANDRADE (1995) (mm)

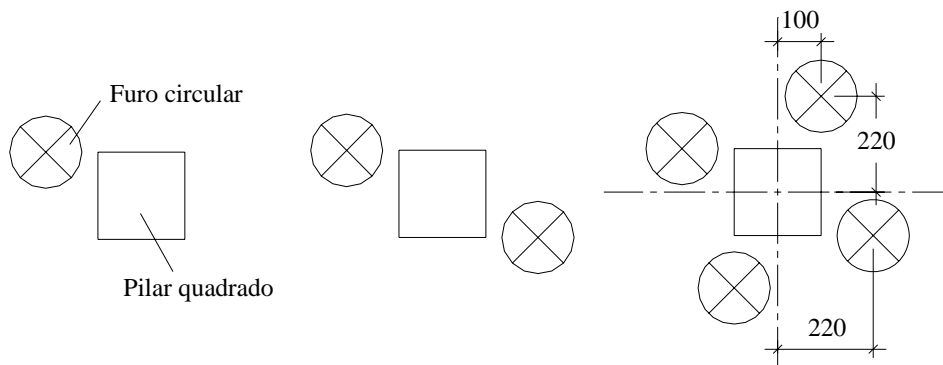


Figura 2.29 – Disposição dos furos em relação ao pilar nas lajes de GOMES e ANDRADE (1995) (mm)

As lajes com armadura de cisalhamento apresentaram uma distribuição radial em 8 e 16 linhas e “ $A_s f_y$ / camada” com cinco valores (113,1kN / 157,1kN / 201,1kN / 314,2kN / 2x314,2kN). Todas as lajes romperam por punção, com cargas variando entre 650kN e 1140kN. A resistência do concreto variou de 27,8 MPa a 36,8MPa.

Nas lajes L26 e L27, foram usados quatro tubos de aço de 202mm de diâmetro e 190mm de altura, dentro da laje, ao redor dos furos.

Segundo os autores, os resultados apresentados neste trabalho mostraram que a existência de furos reduziu a resistência à punção de uma laje lisa de concreto armado. Entretanto, a utilização da armadura de cisalhamento na presença de furos permitiu a recuperação de tal perda, mesmo em regiões onde o concreto existente era mínimo. Esta eficiência é caracterizada pelo acréscimo na carga última à punção de 20% (laje 20) a 75% (laje 16) quando comparadas com a laje 12A, sem furos e sem armadura de cisalhamento.

Os resultados sugerem que deve existir uma correlação entre a perda de resistência devido à existência de furos e a capacidade de redução da perda com o uso de armadura de cisalhamento na região ao redor do pilar. As lajes 26 e 27 mostram que pode ser possível aumentar esse limite com o uso de tubos de aço em torno dos furos.

As principais características, as cargas e os modos de ruptura das lajes estudadas por GOMES e ANDRADE (1995) estão detalhados na Tabela 2.12 e na Figura 2.30.

Tabela 2.12 – Resultados das lajes testadas por GOMES e ANDRADE (1993)

Laje	d (mm)	f _c (MPa)	Furos		Armadura de cisalhamento		V _u (kN)	Modo de ruptura
			Qt.	φ (mm)	Qt. de camadas	Barras / camada		
12A	163	36,5	-	-	-	-	650	Punção
13	153	31,4	1	90	-	-	600	Punção
14	155	31,4	1	151	-	-	556	Punção
15	148	27,8	2	166	-	-	554	Punção
16	156	34,6	-	-	4	8 φ 10mm	1140	Externa
17	166	34,1	1	90	4	8 φ 10mm	1096	Externa
18	165	36,8	1	166	4	8 φ 10mm	992	Externa
19	165	36,6	2	166	4	8 φ 10mm	1010	Externa
20	159	33,8	4	166	4	8 φ 10mm	780	Interna
21	165	36,3	2	166	6	8 φ 8mm	896	Interna
22	164	34,5	2	166	6	8 φ 6mm	832	Interna
23	160	36,4	4	166	-	-	550	Punção
24	161	35,0	4	166	4	8 φ 10mm	890	Externa
25	160	34,2	4	166	6/3	2x8 φ 10mm	900	Interna
26	169	36,7	4	166	6/3	2x8 φ 10mm	985	Externa
27	169	30,7	4	166	10/5	2x8 φ 10mm	985	Flexão

Interna: superfície de ruptura à punção interna à região de AC;

Externa: superfície de ruptura à punção externa à região de AC.

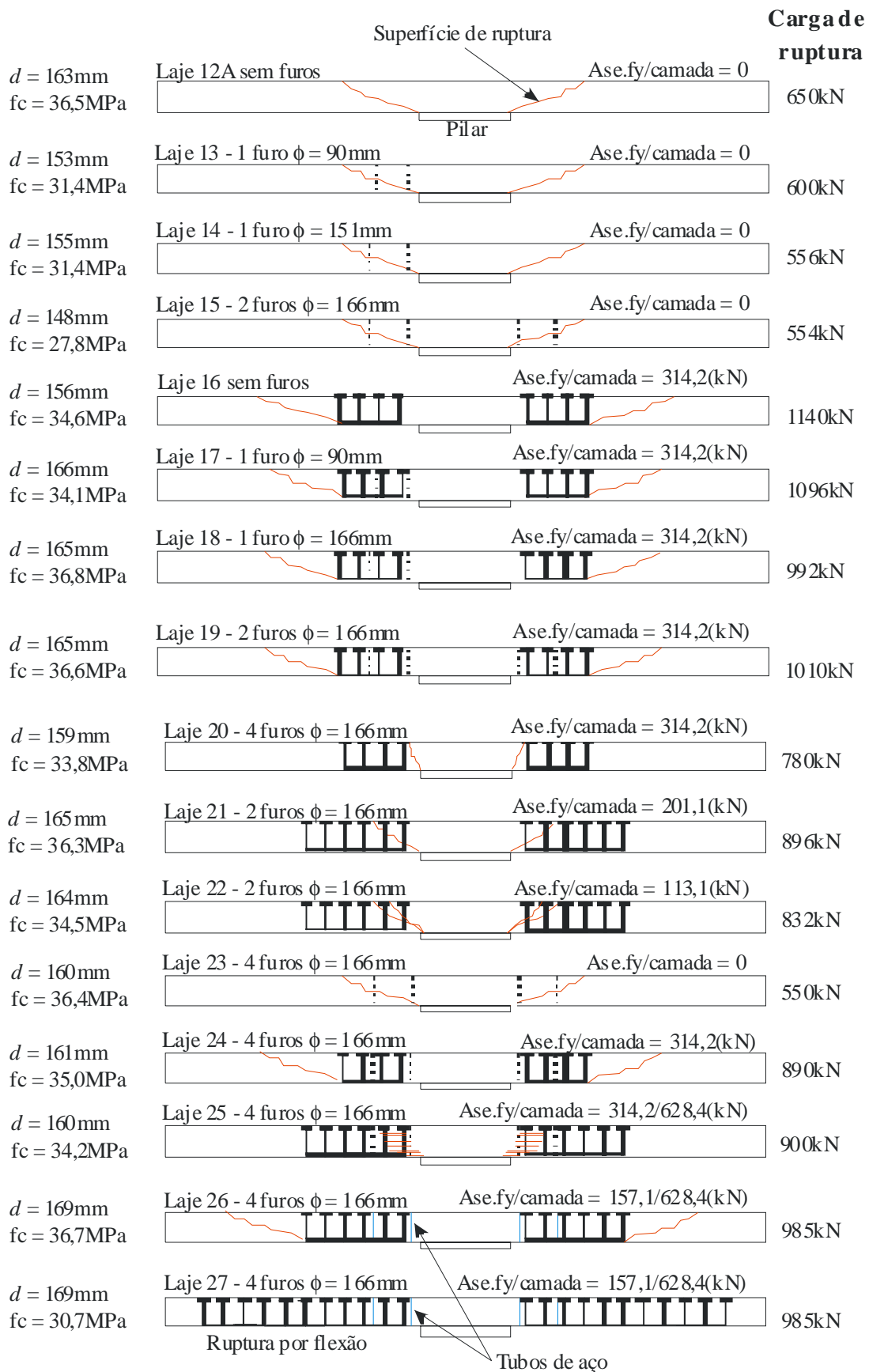


Figura 2.30 – Lajes de GOMES e ANDRADE (1993)

SILVA (2003), na Universidade Federal de Goiás, estudou a influência da utilização de furos, armadura de cisalhamento e pilares retangulares na resistência à punção de lajes lisas. Ensaiou doze lajes com dimensões de 1800x1800x130mm. Sete lajes não apresentaram armadura de cisalhamento, tendo como variação a geometria do pilar e, três delas, apresentaram dois furos de 150x150mm adjacentes ao pilar. Em três lajes foram utilizadas armaduras de cisalhamento tipo “stud” e houve mudança na geometria do pilar, mas sem a utilização de furos. Nas outras duas, com armadura de cisalhamento tipo “stud”, houve a variação da geometria dos pilares e a utilização de furos. A resistência do concreto variou entre 39,1MPa e 50,2MPa.

O autor dividiu as lajes em quatro grupos: Grupo 1 – lajes sem furos (L1, L2, L3 e L12); Grupo 2 – lajes com furos (L4, L5 e L6); Grupo 3 – lajes com armadura de cisalhamento (L7, L8 e L9); e, Grupo 4 – lajes com furos e armadura de cisalhamento (L10 e L11).

A armadura de cisalhamento tipo “stud” foi fabricada com vergalhões de aço de 8mm de diâmetro e 105mm de comprimento, formando linhas de armadura. Tiveram soldadas, em suas extremidades, chapas de aço de 30mm de largura e 10mm de espessura, como mostrado na Figura 2.31. Na laje L8 também foi utilizado “stud” com duas camadas.

O sistema de ensaio utilizado pelo autor é mostrado na Figura 2.32.

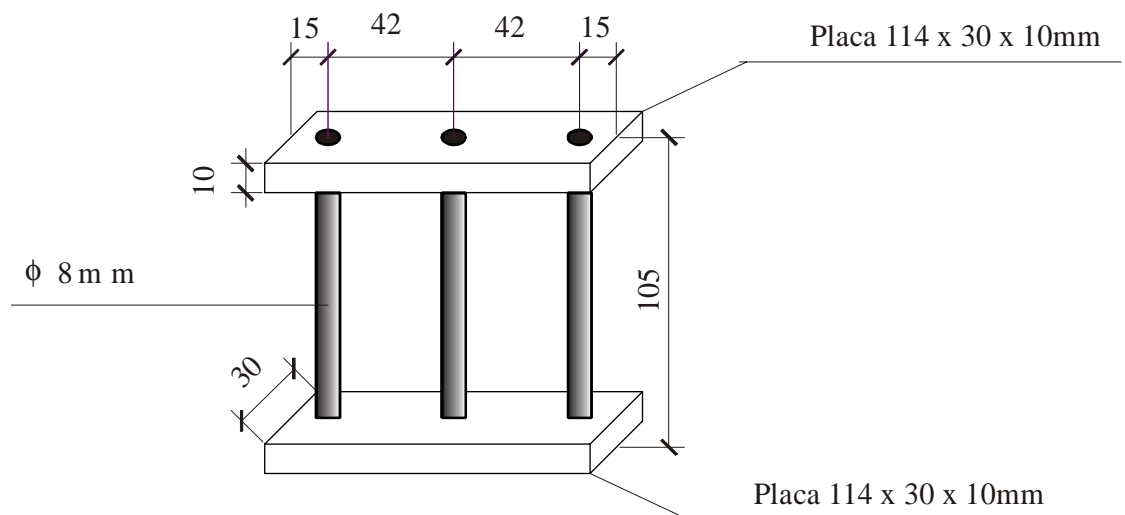


Figura 2.31 – Armadura de cisalhamento utilizada por SILVA (mm)

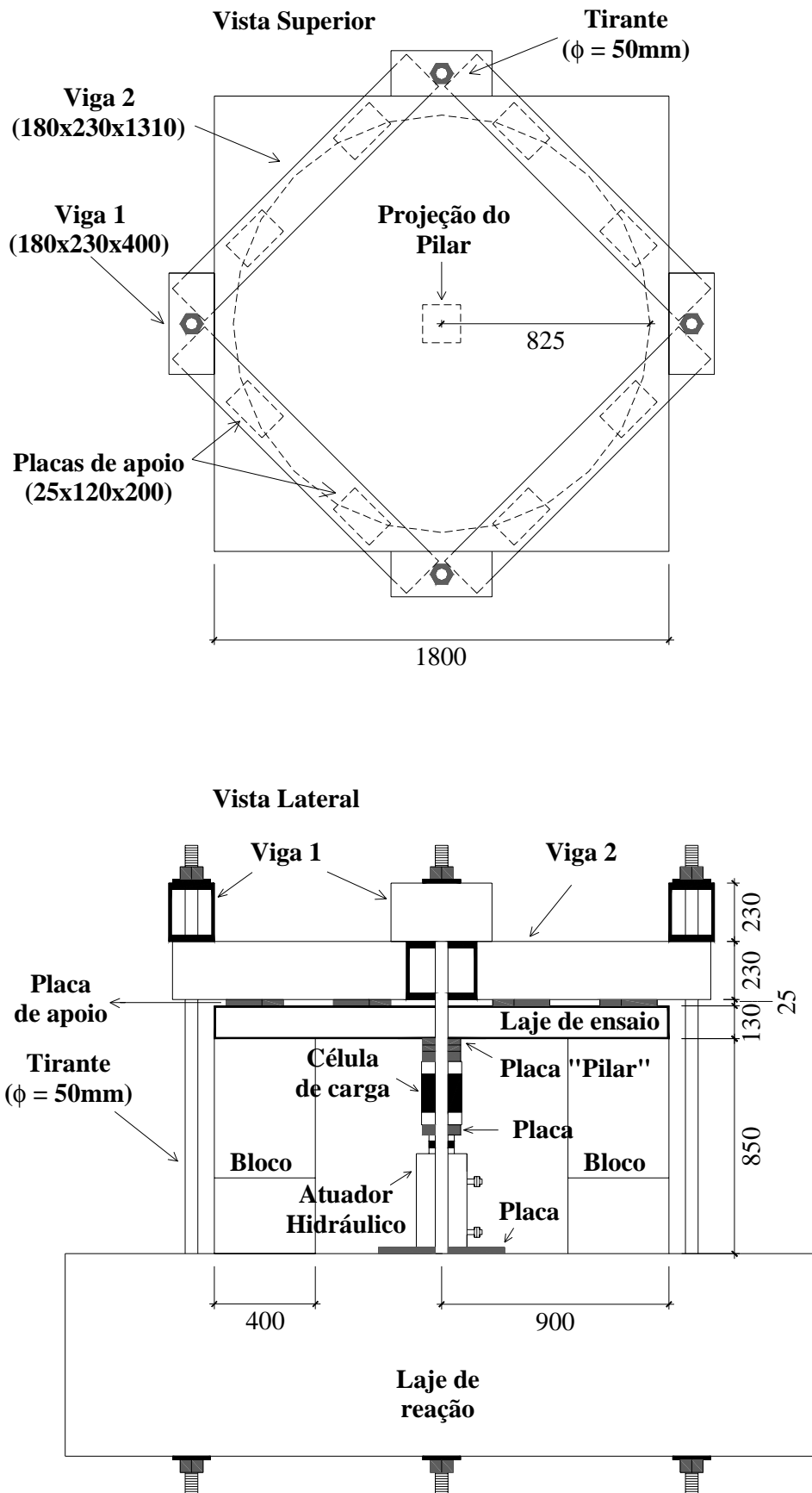


Figura 2.32 – Sistema de ensaio utilizado por SILVA (2003) (mm)

As principais características das lajes ensaiadas e as cargas de ruptura são mostradas na Tabela 2.13 e na Figura 2.33.

Tabela 2.13 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por SILVA (2003)

GRUPO	LAJE	f_c (MPa)	ρ (%)	PILAR	FURO	A.C.	V_u (kN)
1	L1	39,6	1,45	150x150	-	-	273
	L2	40,4	1,45	150x300	-	-	401
	L3	40,8	1,45	150x450	-	-	469
2	L4	39,4	1,57	150x150	2	-	225
	L5	39,6	1,57	150x300	2	-	350
	L6	39,1	1,57	150x450	2	-	375
3	L7	49,0	1,45	150x150	-	sim	420
	L8	49,4	1,45	150x300	-	sim	452
	L9	50,2	1,45	150x450	-	sim	452
4	L10	40,0	1,57	150x150	2	sim	325
	L11	40,8	1,57	150x300	2	sim	350
1	L12	42,3	1,45	402*	-	-	525

Obs: altura útil, d, para todas as lajes foi de 90mm;

* dimensão do diâmetro do pilar circular

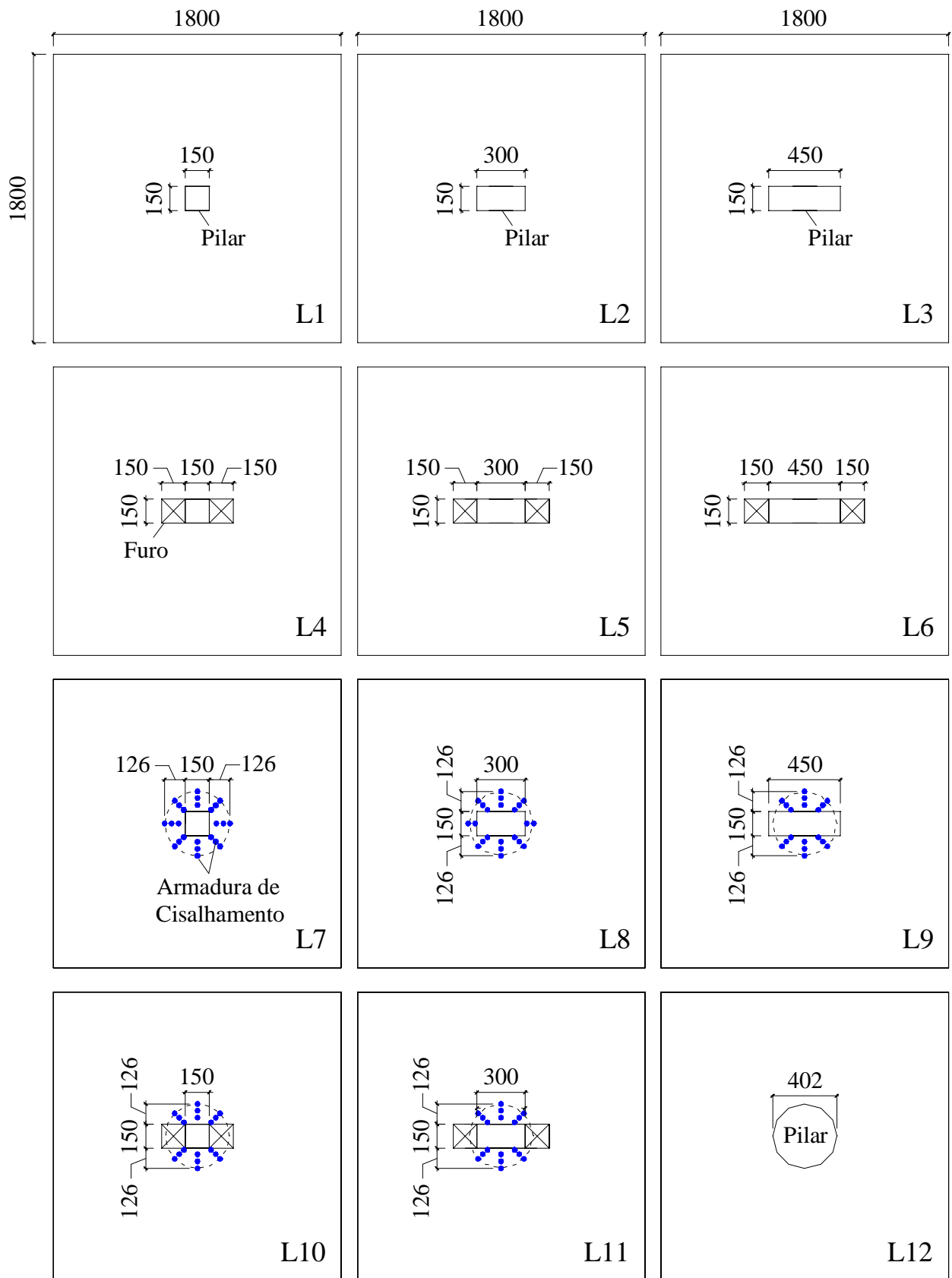


Figura 2.33 – Características das lajes ensaiadas por SILVA (mm)

O autor concluiu que, com o aumento de uma das dimensões do pilar, ocorre um acréscimo na carga de ruptura, porém, na medida em que se aumenta a relação entre os lados do pilar, o acréscimo na carga de ruptura vai sendo menor.

Quanto à existência de furos, adjacentes aos menores lados do pilar, concluiu que a carga última à punção pode diminuir em até 20% em relação à laje sem furo com o mesmo pilar. Também definiu que o uso de armadura de cisalhamento em lajes sem furos apresenta resultados bastante satisfatórios e que pode ser uma possibilidade de se aumentar resistência ao puncionamento em lajes lisas com furos.

Comparando a laje com furos e pilar quadrado, L4, e a laje L10, com os mesmos furos, pilar quadrado e armadura de cisalhamento, houve acréscimo de carga, superando até mesmo a carga de ruptura da laje sem furo e sem armadura de cisalhamento, L1, em 19%. A utilização da armadura de cisalhamento foi ineficiente para o caso de laje com dois furos adjacentes aos menores lados de um pilar retangular (com relação do maior lado pelo menor lado igual a dois), analisando as cargas de ruptura de L5 e L11.

SOUZA (2004), com a colaboração entre a Universidade de Brasília e a Universidade Federal de Goiás (UFG), investigou, no laboratório de estruturas da UFG, o efeito da utilização de furos adjacentes ou distantes de um pilar interno em oito lajes lisas de concreto armado de 1800x1800x130mm.

Em nenhuma laje foi utilizada armadura de cisalhamento. Em cada laje foram feitos dois furos com dimensões variadas, que foram situados em relação ao pilar quadrado, com 150mm de lado, adjacentes (L2, L5 e L6) ou distantes aproximadamente $2d$ (L3, L7 e L9) ou $4d$ (L4), conforme mostrado na Figura 2.34. As características e as cargas de rupturas das lajes são apresentadas na Tabela 2.14. O sistema de ensaio utilizado por SOUZA (2004) foi o mesmo utilizado por SILVA (2003).

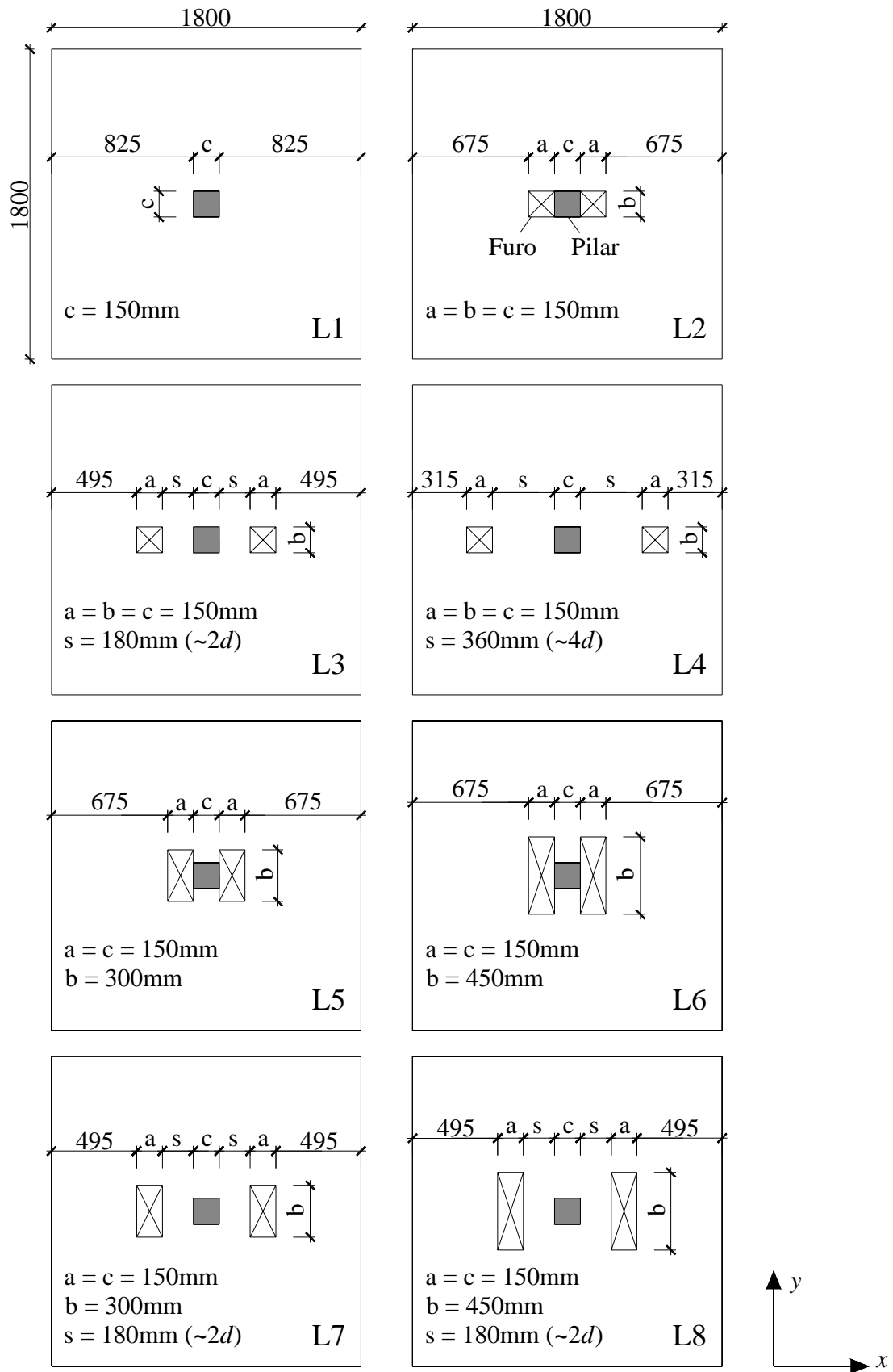


Figura 2.34 – Características das lajes ensaiadas por SOUZA (2004) – mm

Tabela 2.14 – Características e cargas de ruptura das lajes ensaiadas por SOUZA (2004)

Laje	f_c (MPa)	ρ_x (%)	ρ_y (%)	ρ (%)	d (mm)	Furos (mm)	s⁽¹⁾ (mm)	V_u (kN)
L1	35,5	1,27	1,46	1,36	91	-	-	274
L2	35,7	2,29	1,27	1,71	90	150x150	0	205
L3	36,0	1,77	1,52	1,64	89	150x150	180	275
L4	36,2	1,63	1,46	1,54	91	150x150	360	300
L5	31,9	2,23	0,83	1,36	91	150x300	0	140
L6	32,0	2,23	0,42	0,96	91	150x450	0	101
L7	32,1	1,71	1,43	1,56	92	150x300	180	225
L8	32,2	1,71	1,43	1,56	92	150x450	180	210

(1) – distância entre os furos e as faces do pilar.

SOUZA (2004) concluiu que furos em lajes lisas, de qualquer dimensão, situados adjacentes ao perímetro do pilar, reduzem significativamente a resistência ao funcionamento.

As lajes com furos apresentaram cargas inferiores em média 36% em relação à laje de referência (excetuando-se nesta média as lajes L3 e L4 que apresentaram cargas superiores).

As lajes com furos adjacentes ao pilar (L2, L5 e L6) apresentaram cargas inferiores em 25%, 48% e 63%, em relação à laje de referência (L1).

As lajes L7 e L8, com furos situados a 2d da face do pilar e com dimensões maiores que o lado do pilar, apresentaram cargas inferiores em 18% e 23%, em relação à laje de referência (L1). A laje L3, com furos à mesma distância mas com a mesma dimensão do lado do pilar, teve carga igual à de L1.

A superfície de ruptura na laje com furos situados a 4d da face do pilar (L4) não alcançou os furos, indicando que furos posicionados a essa distância não precisariam ser considerados.

BORGES (2004), em sua tese de doutoramento pela UnB, analisou experimentalmente vinte lajes lisas de concreto armado, quadradas, com 3000mm de lado e 200mm de espessura, com o objetivo de investigar o comportamento de lajes com pilares

retangulares, com algumas relações entre os lados, furos e armadura de cisalhamento. Foi estudada à influência de furos, sendo esses adjacentes a um pilar interno retangular (dimensões 200mm x 600mm) e a contribuição da armadura de cisalhamento tipo “stud” (a mesma utilizada por GOMES e ANDRADE (1995), mas com dimensões e espaçamentos diferentes), na resistência à punção de lajes lisas com furos. Foi investigado também o detalhamento da armadura de flexão das lajes na região do furo, com barras sendo adicionadas e, com adição, em algumas lajes, de ganchos utilizados como ancoragem nas barras interceptadas pelos furos.

Na Tabela 2.15 e na Figura 2.35 são apresentadas as principais características das lajes ensaiadas por BORGES (2004).

Tabela 2.15 – Características e cargas de ruptura das lajes de BORGES (2004)

Laje	Pilar (mm)		d (mm)	f _c (MPa)	ρ (%)	Qt. furo	Gancho Ancorag.	Armadura cisalhamento		V _u (kN)
	c ₁	c ₂						Qt Cam	φ (mm)	
L45	200	600	154	40,5	1,28	0	Não	(b)	(b)	798
L45FS_CG	200	600	154	40,5	1,14	1	Sim	(b)	(b)	742
L45FD	200	600	154	41,4	1,38	1	Não	(b)	(b)	726
L45FD_CG	200	600	154	39,0	1,38	1	Sim	(b)	(b)	700
L45FFS_CG	200	600	154	41,6	1,00	2	Sim	(b)	(b)	700
L45FFD	200	600	144	37,0	1,38	2	Não	(b)	(b)	635
L45FFD_CG	200	600	164	40,6	1,24	2	Sim	(b)	(b)	800
L45FFD_AC2	200	600	154	43,8	1,38	2	Não	4	10,0	1180
L45FFD_AC3	200	600	154	39,6	1,38	2	Não	3	8,0	1000
L45FFD_AC4	200	600	154	43,2	1,38	2	Não	3	8,0	835
L45FFD_AC5	200	600	154	40,7	1,38	2	Não	2	8,0	787

(a) laje sem furo – sem gancho de ancoragem

(b) laje sem armadura de cisalhamento

F – um furo; FF – dois furos; S – sem acréscimo de barra, D – com acréscimo de barra;

CG – com gancho de ancoragem; AC_i – armadura de cisalhamento do tipo “i”.

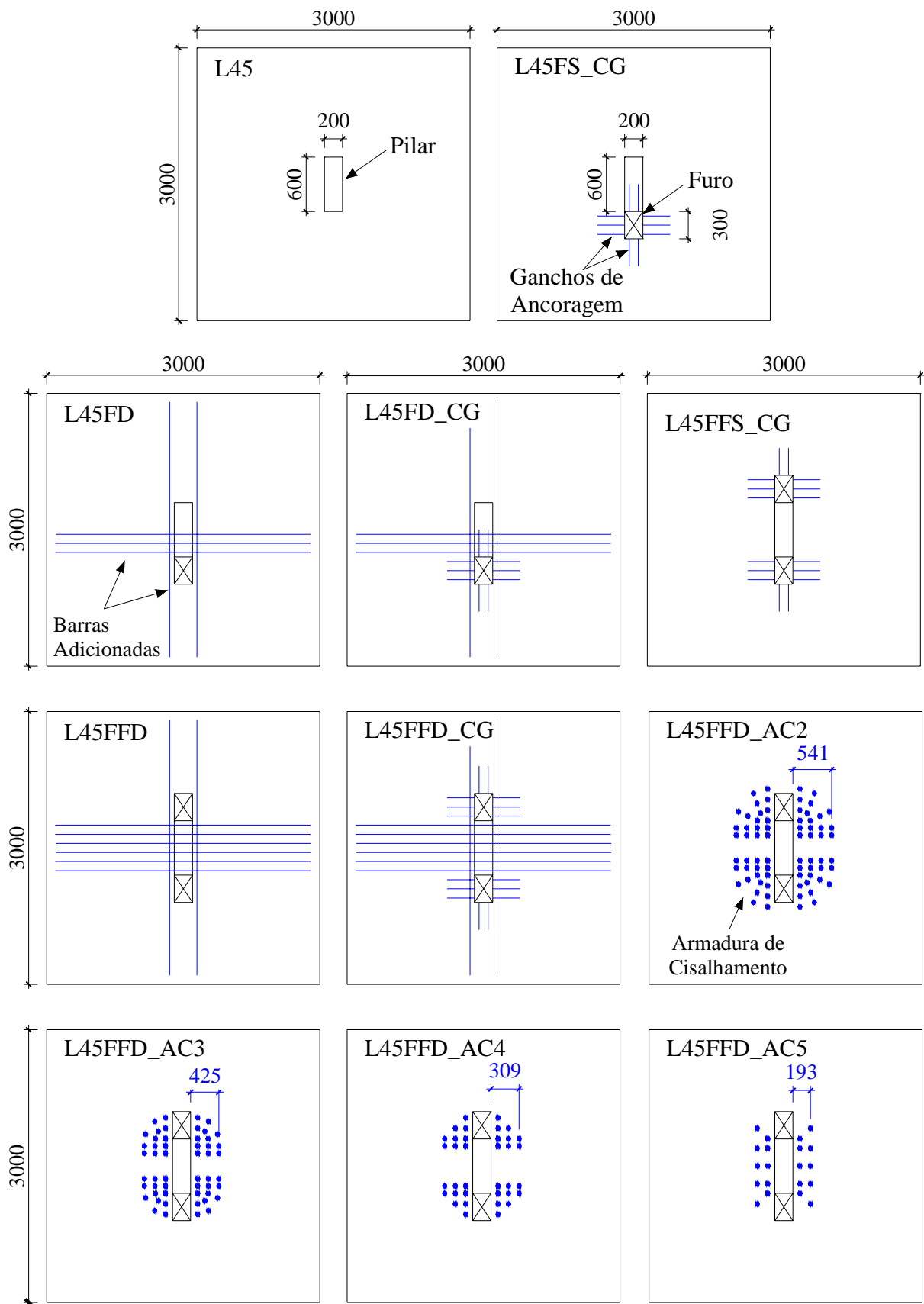


Figura 2.35 – Características das lajes ensaiadas por BORGES (2004) – mm

O esquema de ensaio consistiu na fixação das bordas das lajes por 16 (dezesseis) tirantes de aço com diâmetro de 25mm, sendo 4 (quatro) tirantes em cada borda, ancorados em uma laje de reação, por meio de um sistema constituído de vigas metálicas. A carga foi aplicada no centro da face inferior da laje, com um macaco hidráulico alimentado por uma bomba manual. Na Figura 2.36 é apresentado o esquema de ensaio utilizado por BORGES (2004).

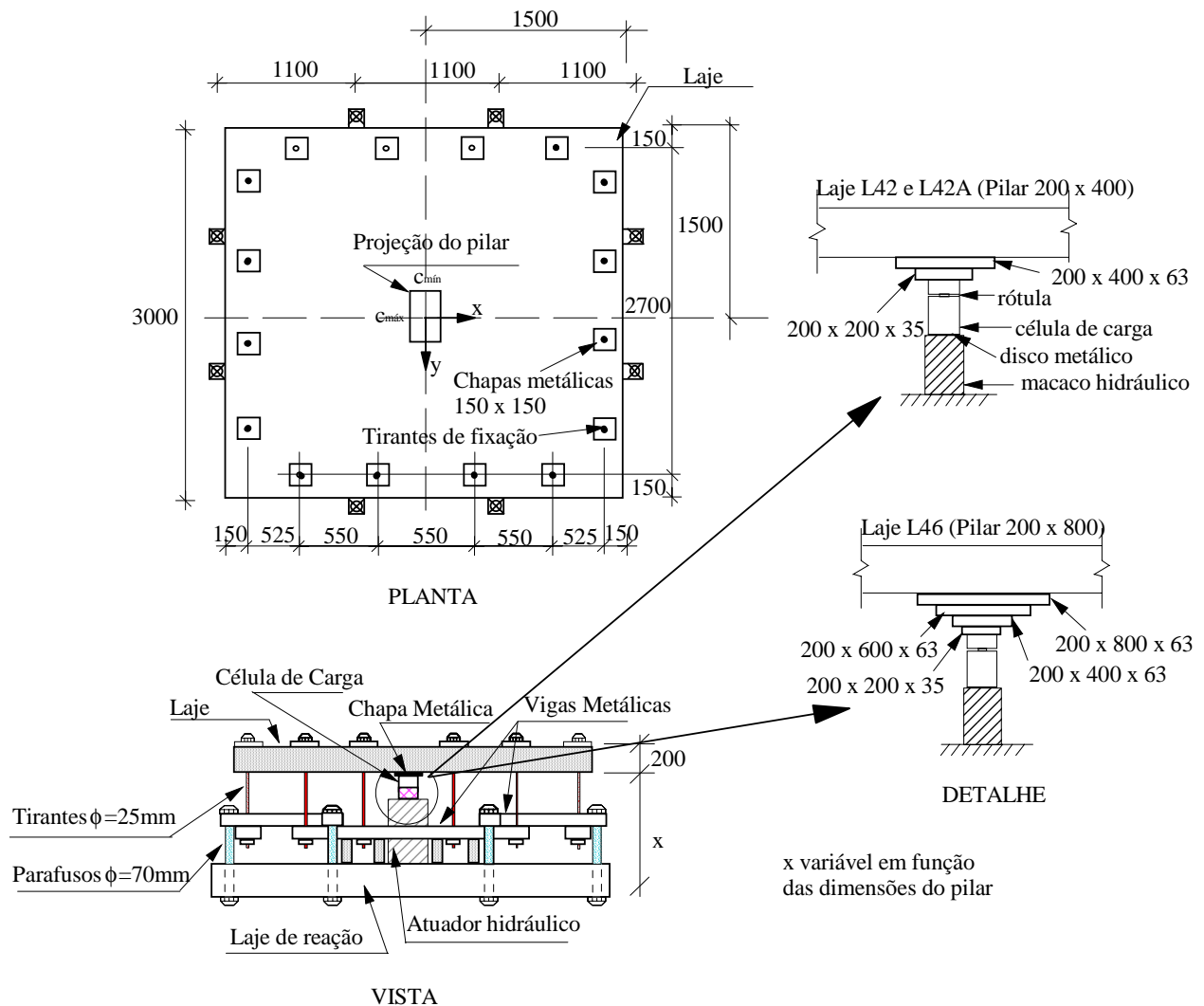


Figura 2.36 – Esquema de ensaio utilizado por BORGES (2004) – mm

BORGES (2004) concluiu que a armadura de cisalhamento utilizada, constituída de “studs”, posicionada de forma a envolver a armadura de flexão das lajes, apresentou um adequado desempenho, conduzindo à formação de uma superfície de ruptura externa à região com armadura, e que a resistência de lajes com furos e armadura de cisalhamento pode atingir e até superar a resistência de lajes similares sem furos.

A utilização de armadura de cisalhamento nas lajes com furos possibilitou um aumento de até 86% em relação à laje similar com furos e sem tal armadura, e, permitiu à laje alcançar resistência à punção, no mínimo, igual à da laje similar sem furo.

Relatou, ainda, que a utilização de barras adicionais de armadura de flexão na região em torno dos furos não provocou acréscimo de resistência ao puncionamento das lajes, embora tenha conduzido a deslocamentos verticais semelhantes à laje de referência sem furo. E, os ganchos utilizados como ancoragem da armadura principal de flexão, que foi interceptada pelos furos, não alteraram as cargas de ruptura das lajes com furos.

A autora também sugeriu uma proposta para alteração na norma brasileira NBR6118:2003, que trata da mudança do cálculo do perímetro efetivo de controle utilizando o método proposto por REGAN (1974). Pela sugestão, o perímetro continua sendo estimado a uma distância de $2d$ do pilar, mas passa a ser subtraído por projeções paralelas às faces do furo e que partem do pilar, como mostrado na Figura 2.37.

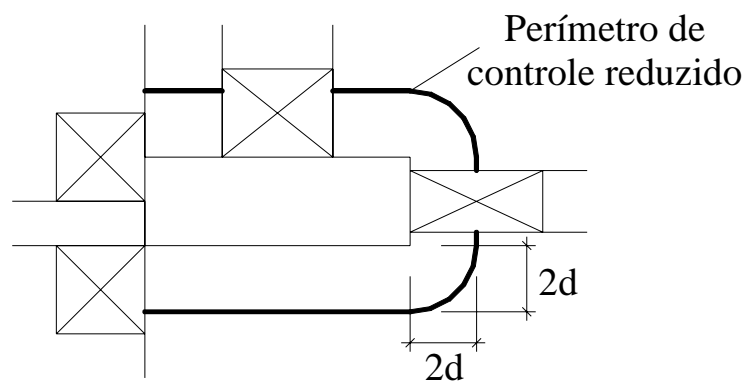


Figura 2.37 – Perímetro efetivo de controle proposto por BORGES (2004) para NBR6118:2003

Um estudo aprofundado de comparação entre as estimativas das normas de projeto, as propostas dos autores encontrados na literatura e a proposta da autora para a NBR6118:2003 foi realizado utilizando, além das lajes ensaiadas por BORGES (2004), várias outras presentes na literatura. Este estudo levou a autora a concluir que a sugestão forneceu melhores estimativas que as normas atuais de projeto, além de ter estimado, para as lajes com armadura de cisalhamento, mecanismos de ruptura coincidentes com os experimentais. Nas Tabelas 2.16 e 2.17 são apresentadas as comparações para as lajes com furo sem armadura de cisalhamento e com armadura de cisalhamento.

Tabela 2.16 – Comparações entre as médias das estimativas das normas ACI/02, EC2/01, NBR6118:2003, as propostas dos autores TENG et al.(1999), IOANNOU (2001), ROLL et al. (1977) e a proposta de BORGES (2004) para a NBR6118:2003 para lajes com furo e sem armadura de cisalhamento

Métodos	Coefficientes	50 lajes
ACI/02	V_{Exp} / V_{calc}	1,92
	Desvio padrão	0,86
	Coefficiente de variação	44,9
EC2/01	V_{prev} / V_{exp}	1,52
	Desvio padrão	0,46
	Coefficiente de variação	30,1
NBR6118:2003	V_{Exp} / V_{calc}	1,19
	Desvio padrão	0,32
	Coefficiente de variação	27,0
TENG et al. (1999)	V_{Exp} / V_{calc}	1,37
	Desvio padrão	0,39
	Coefficiente de variação	28,4
Handbook do BS8110/85 – proposto por REGAN (1974)	V_{Exp} / V_{calc}	1,13
	Desvio padrão	0,24
	Coefficiente de variação	21,4
IOANNOU (2001)	V_{Exp} / V_{calc}	1,20
	Desvio padrão	0,28
	Coefficiente de variação	23,2
ROLL et al. (1977)	V_{Exp} / V_{calc}	1,27
	Desvio padrão	0,38
	Coefficiente de variação	30,0
NBR6118:2003 com proposta da autora	V_{Exp} / V_{calc}	1,03
	Desvio padrão	0,24
	Coefficiente de variação	23,4

V_{Exp} : carga obtida experimentalmente;

V_{calc} : carga prevista pelo cálculo.

Tabela 2.17 – Comparações entre as médias das estimativas das normas ACI/02, EC2/01, NBR6118:2003 e a proposta de BORGES (2004) para a NBR6118:2003 para lajes com furo e armadura de cisalhamento

Métodos	Coefficientes	29 lajes
ACI/02	V_{Exp} / V_{calc}	1,92
	Desvio padrão	0,57
	Coefficiente de variação	29,7
EC2/01	V_{prev} / V_{exp}	1,35
	Desvio padrão	0,27
	Coefficiente de variação	20,1
NBR6118:2003	V_{Exp} / V_{calc}	1,22
	Desvio padrão	0,24
	Coefficiente de variação	19,5
Handbook do BS8110/85 – proposto por REGAN (1974)	V_{Exp} / V_{calc}	1,04
	Desvio padrão	0,17
	Coefficiente de variação	16,0
NBR6118:2003 com proposta da autora	V_{Exp} / V_{calc}	1,11
	Desvio padrão	0,14
	Coefficiente de variação	12,3

V_{Exp} : carga obtida experimentalmente;
 V_{calc} : carga prevista pelo cálculo.

É importante ressaltar que, para as lajes sem armadura de cisalhamento, a proposta da autora chegou a um valor médio da relação V_{Exp} / V_{calc} próximo de 1,0 (média igual a 1,03) e com desvio padrão e coeficiente de variação iguais a 0,24 e 23,4%, respectivamente, que levam a entender que houve vários resultados contra a segurança. E, observando os dados individualmente, percebe-se que uma parte representativa das relações V_{Exp} / V_{calc} teve resultados menores que 1,0, contra a segurança (22 resultados entre 0,63 e 0,99, sendo cinco de lajes com pilares de borda); enquanto que, as estimativas do ACI/02, mais conservadoras, indicaram poucos resultados contra a segurança (apenas cinco, sendo todos estes referentes a lajes com pilares de borda). A norma brasileira NBR6118:2003

apresentou 12 resultados contra a segurança, com dois deles relativos a lajes com pilar de borda.

Para as lajes com furo e armadura de cisalhamento, a proposta da autora teve resultados que foram realmente melhores, com a menor média de V_{Exp} / V_{calc} , comparando com as normas, e com poucos resultados contra a segurança (apenas 3, e com valores de 0,92, 0,98 e 0,94, que foram relativamente próximos de 1,0). A norma americana ACI/02, mais conservadora, não indicou nenhum valor da relação V_{Exp} / V_{calc} contra a segurança. A norma brasileira NBR6118:2003 apontou dois valores contra a segurança (0,92 e 0,97).

2.4 ESTUDOS SOBRE LAJES COM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO PARA O PILAR

2.4.1 Trabalhos realizados no exterior

MOE (1961) apud HANSON & HANSON (1964) foi um dos pioneiros em pesquisas experimentais sobre o assunto de transferência de momento de uma laje lisa ao pilar. Em meio a sua extensa investigação sobre lajes lisas, experimentou doze lajes de concreto armado quadradas, com 1829mm (6ft) de lado e com 152mm (6in) de espessura. As principais variáveis em sua pesquisa foram as excentricidades dos momentos aplicados.

As lajes foram simplesmente apoiadas e as extremidades estavam livres para levantar. O carregamento foi aplicado em diferentes excentricidades em relação a um pilar quadrado. Os resultados de 10 lajes são apresentados na Tabela 2.18. Os resultados de dois ensaios (M4 e M5) não foram incluídos porque houve ruptura por flexão e não por punção.

Tabela 2.18 – Lajes testadas por MOE (1961)

Laje	d (mm)	Pilar (mm)	Fc (MPa)	ρ (%)	Mu (kN.m)	Vu (kN)
M1A	124	305 x 305	20,8	1,29	0	433
M2A	124	305 x 305	15,5	1,29	39,4	213
M4A	124	305 x 305	17,7	1,29	62,5	144
M2	124	305 x 305	25,7	1,29	57,2	292
M3	124	305 x 305	22,7	1,29	70,2	207
M6	122	254 x 254	26,5	1,17	40,2	239
M7	122	254 x 254	25,0	1,17	19,0	311
M8	122	254 x 254	24,6	1,17	65,3	150
M9	122	254 x 254	23,2	1,17	33,9	267
M10	122	254 x 254	21,1	1,17	54,8	178

MOE (1961), baseado em seus experimentos, concluiu que a seção crítica para o cisalhamento estava localizada diretamente adjacente ao perímetro do pilar. Para conexões laje-pilar submetidas à combinação de cisalhamento e transferência de momento da laje para o pilar, a tensão vertical de cisalhamento, v_1 , foi definida pela seguinte expressão:

$$v_1 = \frac{V}{A_c} + \frac{KM_c}{J_c} \quad (2.56)$$

onde:

K é o fator de redução do momento que leva em consideração a quantidade de momento resistida por flexão nas faces perpendiculares à direção do momento aplicado, e, outra parte é resistida por momentos torsores devido a tensões horizontais, agindo nas faces paralelas ao momento;

V é a carga de cisalhamento aplicada;

M é o momento aplicado;

c é distância do centróide do pilar até a seção crítica, na direção paralela à direção do momento.

Para um pilar interno, quadrado, com lado igual a “r”, temos: $A_c = 4rd$, e $J_c = \frac{2r^3d}{3}$.

O autor determinou experimentalmente o coeficiente K, assumindo que a máxima tensão vertical na ruptura fosse igual à tensão vertical de ruptura se a laje fosse carregada concentricamente. Ele concluiu que a tensão última de ruptura poderia ser determinada pela Equação 2.56, para todas suas lajes, com desvio padrão de 0,103, utilizando um coeficiente K igual a 1/3. MOE (1961) recomendou que o limite para tensão vertical fosse $(9,23 - 1,12r/d)\sqrt{f'_c}$, para lajes com relações r/d menores que 3, e que fosse igual a $(2,5 - 10d/r)\sqrt{f'_c}$, para relações r/d maiores que 3.

HANSON & HANSON (1964) desenvolveram pesquisa experimental em que ensaiaram dezessete lajes. Dezesseis destas simularam um pilar interno, com formato retangular de 2134x1219mm. A outra laje simulou uma ligação característica de pilar de borda e teve dimensões de 1007x1219mm. A espessura das lajes foi de 76mm.

Todas as lajes tiveram um pilar concretado monoliticamente. Os pilares foram apoiados nas suas extremidades por sistemas articulados, a uma distância de 762mm para cima e para baixo da laje, configurando apoios do 2º gênero, permitindo o giro na direção da aplicação de momento. Na parte de cima, pinos de aço foram soldados à armadura do pilar antes da concretagem.

Anteriormente ao ensaio, os pinos foram fixados (de maneira a permitir o giro) em barras inclinadas, comprimidas, de aço, ancoradas na laje de reação. Na parte de baixo, o pilar foi fixado em um apoio que permitia o giro na direção da aplicação de carga, como mostrado nas Figuras 2.38 e 2.41. O carregamento foi aplicado nas extremidades dos maiores lados de cada laje, a uma distância de 914mm do centro do pilar.

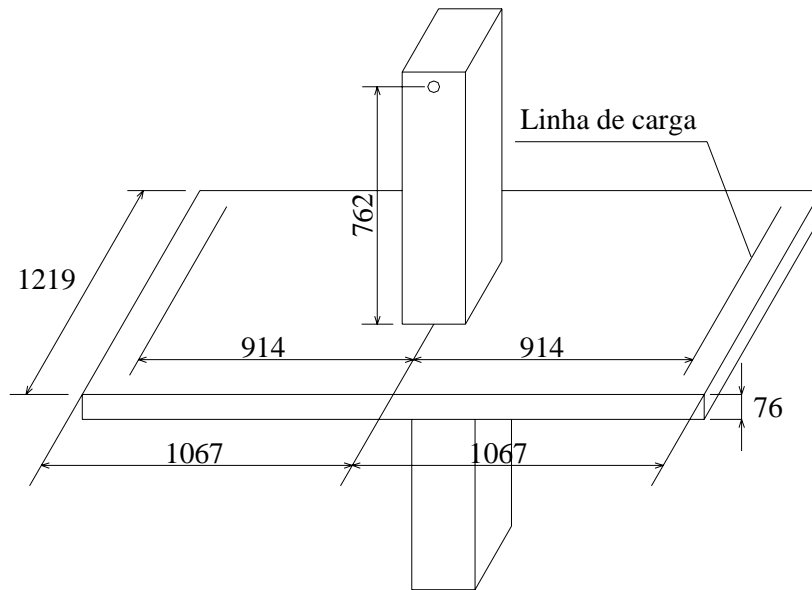


Figura 2.38 – Dimensões e linha de carga das lajes de HANSON & HANSON (1964) (mm)

As lajes tiveram quatro configurações de geometria, que foram denominadas de A, B, C e D, como mostrado na Figura 2.39. Os pilares nas configurações A, B e C foram locados no centro da laje e na configuração D, na borda do lado de 1219mm.

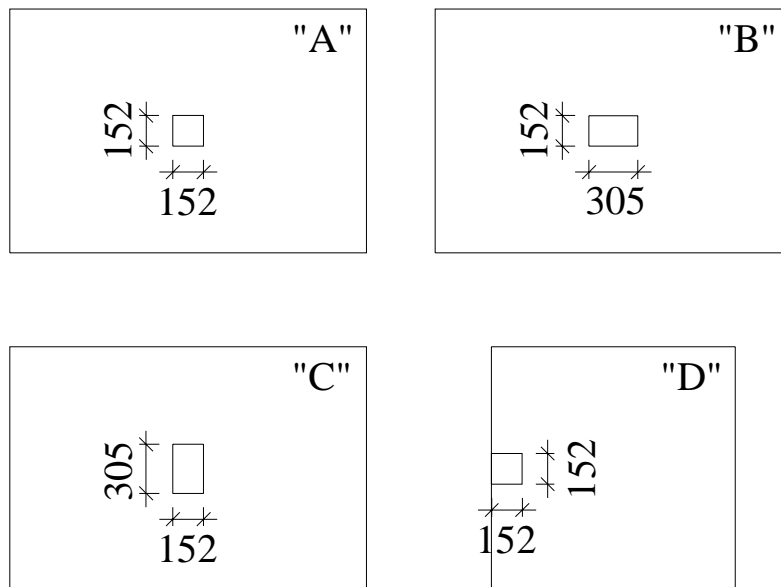


Figura 2.39 – Configurações das lajes de HANSON & HANSON (1964) (mm)

Doze lajes tiveram a configuração do tipo A, com pilar quadrado de 152mm de lado. Oito, das doze lajes, levaram dois furos de 25x152mm adjacentes ao pilar, sendo quatro com os furos paralelos ao maior lado da laje, tipo L, e quatro com os furos paralelos aos menores lados da laje, tipo C, conforme mostrado na Figura 2.40. A armadura de flexão das lajes com furos não foram cortadas e passaram através dos furos.

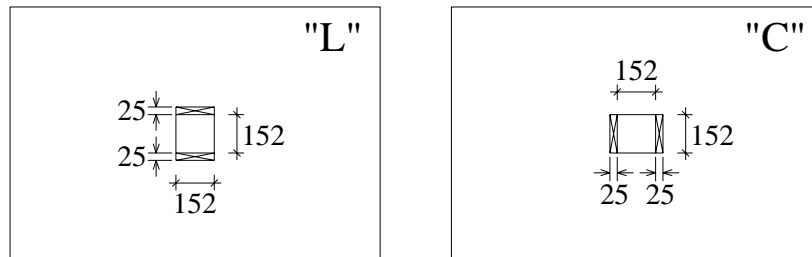


Figura 2.40 – Furos nas lajes de HANSON & HANSON (1964) (mm)

Dois lajes tiveram a configuração do tipo B, com pilar retangular de 152x305mm. Outras duas lajes foram do tipo C, com pilar retangular de 305x152mm. E, uma laje foi testada na configuração D.

As lajes foram armadas apenas à flexão. A armadura de flexão foi composta por uma malha ortogonal com barras de 10mm de diâmetro, espaçadas a cada 76mm em cada direção. As barras foram colocadas de maneira que as barras paralelas aos maiores lados da laje ficaram em cima, havendo sobre elas apenas uma cobertura de concreto de 10mm.

Os pilares foram armados com quatro barras longitudinais com 19mm de diâmetro, postadas nas extremidades dos pilares, com cobrimento de 13mm de cada lado. Os estribos, feitos com barras de 6,3mm, foram espaçados a cada 102mm e foram usados apenas nas regiões externas à ligação com a laje.

As lajes tiveram três métodos de carregamento, tipos: I, II e III, como mostrado na Figura 2.41.

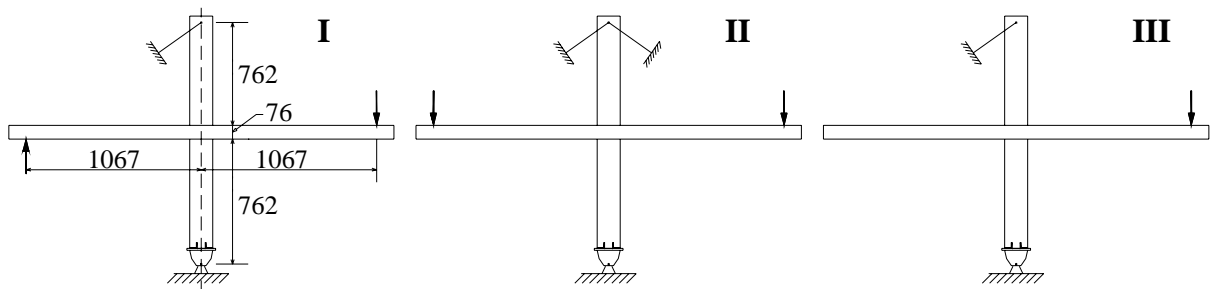


Figura 2.41 – Métodos de carregamento de HANSON & HANSON (1964) (mm)

O primeiro método, tipo I, foi destinado a representar o caso de carregamentos laterais agindo em um edifício, causados por vento ou terremoto. Cargas inversas iguais foram aplicadas de maneira que apenas momento foi transferido ao pilar, não havendo transferência de carga vertical.

O segundo método, tipo II, representa a carga gravitacional, com as cargas aplicadas iguais nos dois lados da laje, produzindo momento e cisalhamento na laje sem transferência de momento ao pilar (houve transferência apenas de carga vertical).

O terceiro método, tipo III, representa o carregamento combinado de cargas laterais e gravitacionais. A carga foi aplicada em apenas um lado da laje, produzindo momento e cisalhamento combinado na junção laje-pilar.

Três lajes submetidas ao carregamento tipo I ainda foram submetidas a inversões dos carregamentos. Nesses testes, o sentido das cargas aplicadas foi invertido depois de alcançar 25%, 50% e 75% da carga esperada de ruptura.

As características, as cargas e os momentos de ruptura das lajes ensaiadas por HANSON & HANSON (1964) são mostrados na Tabela 2.19. Na numeração das lajes, a primeira letra indica a configuração geométrica, como mostrado na Figura 2.39. A última letra, quando usada, indica que a laje possui furo, como indicado na Figura 2.40.

Tabela 2.19 – Lajes ensaiadas por HANSON & HANSON (1964)

Laje ^a	Carregamento Método ^b	Pilar (mm)	f _c (MPa)	f _y (MPa)	Mu (kN.m)	Vu (kN)
A1	I	152 x 152	30,3	365,4	22,3	5,7
A2	I ^c	152 x 152	31,3	375,8	24,3	4,8
A3L	I	152 x 152	37,0	364,0	24,1	4,1
A4L	I ^c	152 x 152	33,4	373,7	23,8	4,8
A5C	I	152 x 152	35,0	371,6	15,8	5,1
A6C	I ^c	152 x 152	34,9	368,2	17,0	4,6
B7	I	152 x 305	33,0	354,4	35,7	4,9
C8	I	305 x 152	32,8	410,9	31,4	5,6
A9	II	152 x 152	34,7	368,9	0,7	62,9
A10L	II	152 x 152	30,9	354,4	0,6	57,5
A11C	II	152 x 152	33,4	348,2	0,4	57,7
A12	III	152 x 152	33,2	372,3	20,5	26,9
A13L	III	152 x 152	32,8	370,3	19,9	26,2
A14C	III	152 x 152	35,6	372,3	13,4	19,1
D15	III	152 x 152	31,1	365,4	9,9	12,1
B16	III	152 x 305	30,4	340,6	27,3	34,4
C17	III	305 x 152	36,0	341,3	24,7	31,5

d = 57mm , ρ = 1,71% para todas as lajes;

^a A primeira letra indica a configuração geométrica mostrada na Figura 2.1. E, a última letra, quando usada, indica que a laje possui furo como indicado na Figura 2.2;

^b Ver Figura 2.3;

^c Sentido do carregamento invertido depois de 25%, 50% e 75% da carga última estimada.

Os autores relatam que o Committee 326, ASCE-ACI, após uma revisão do trabalho realizado por MOE (1961), adotou um limite para a tensão de cisalhamento igual a $4(d/r+1)\sqrt{f'_c}$, para uma seção situada na periferia do pilar. Esta definição foi significativa para uma equivalente recomendação do ACI Building Code (1963), que adotou um limite para a tensão de cisalhamento igual a $4\sqrt{f'_c}$ na seção crítica, que foi locada a uma distância de $d/2$, externa ao perímetro do pilar. O Committee 326 usou a seguinte expressão para avaliar o resultado de 25 ensaios:

$$v_1 = \frac{V}{A_c} + \frac{KM_c}{J_c} \quad (2.57)$$

onde, para um pilar interno:

$$A_c = 2d(x + y) \quad (2.58)$$

sendo: $x = (r_1 + d)$ e $y = (r_2 + 3t)$ – onde: r_1 é o lado do pilar paralelo à direção do momento; r_2 é o lado do pilar perpendicular à direção do momento; t é a espessura total da laje.

$$J_c = \frac{x^3d}{6} + \frac{xd^3}{6} + \frac{x^3yd}{2} \quad (2.59)$$

Baseado nessa avaliação o Committee 326 recomendou o limite para a tensão de cisalhamento igual a $4\sqrt{f'_c}$ para uma seção crítica de projeto distante $d/2$ do pilar e assumindo $K=0,2$.

Os autores, com uma examinação feita de seus resultados obtidos e com os resultados obtidos por MOE (1961), concluíram que o método recomendado por MOE (1961), para determinação da tensão resistente última, tem uma aplicabilidade simples e forneceu bons resultados. Também concluíram que o método recomendado pelo ACI-ASCE Committee 316, para determinação da tensão última, forneceu boas previsões da tensão de ruptura de ligações laje-pilar apenas quando o fator de redução de momento, K , foi modificado de 0,2 para 0,4.

E, finalizaram, concluindo que a investigação feita tem uma aplicabilidade prática para ser utilizada em conjunto com a Seção 1707 do ACI Building Code (1963), descrita da seguinte maneira:

“Quando cargas gravitacionais desbalanceadas, vento ou terremoto causar transferência de momento entre a coluna e a laje, 60% do momento pode ser considerado transferido por flexão através do perímetro crítico definido na Seção 1707(b) – distante $d/2$ do perímetro do pilar – e, 40% por excentricidade do cisalhamento ao redor do centróide da seção crítica. A variação das tensões de cisalhamento pode ser considerada linear ao longo da seção crítica e, a tensão de cisalhamento máxima não pode exceder $4\phi\sqrt{f'_c}$ ”.

ISLAM & PARK (1976) ensaiaram oito lajes numa escala reduzida de 50%, em relação à real. As lajes tiveram carregamento gravitacional associado com carregamento típico de abalo sísmico.

Segundo os autores, durante um terremoto, a estrutura é submetida a repetidos momentos desbalanceados e reversos que podem levar uma laje lisa à ruptura por cisalhamento ao redor do pilar, devido à degradação da resistência ao cisalhamento. Ainda afirmam que existe uma escassez de informação do comportamento e da performance de conexões laje-pilar, com e sem armadura de cisalhamento, sob carregamentos sísmicos. Comentam que os códigos de projeto analisados pelo autor consideravam que, em caso de terremoto, as estruturas tinham ductilidade para absorver e dissipar a energia sem colapso. Com o objetivo de investigar tais problemas, os autores desenvolveram esse programa experimental.

As lajes tiveram formato retangular de 3050x2288mm, com um pilar de seção quadrada com lados de 229mm, concretado monoliticamente à laje, como mostrado na Figura 2.42. O carregamento gravitacional foi aplicado em 24 pontos, simbolizados com sinais de cruz na Figura 2.42. Foram utilizados blocos de concreto de 0,89kN pendurados em cada uma dessas posições da laje, somando-se ao carregamento gravitacional o peso próprio da laje. O carregamento gravitacional total, incluindo o peso próprio, em todas as lajes, foi de 35,8kN. Carregamentos inversos foram aplicados, com a utilização de atuadores hidráulicos, nos menores lados da laje, em quatro pontos, indicados com um círculo na Figura 2.42, transferindo momento da laje para o pilar. Um carregamento axial de 500kN (50ton) foi aplicado sobre o pilar, com a utilização de um atuador hidráulico.

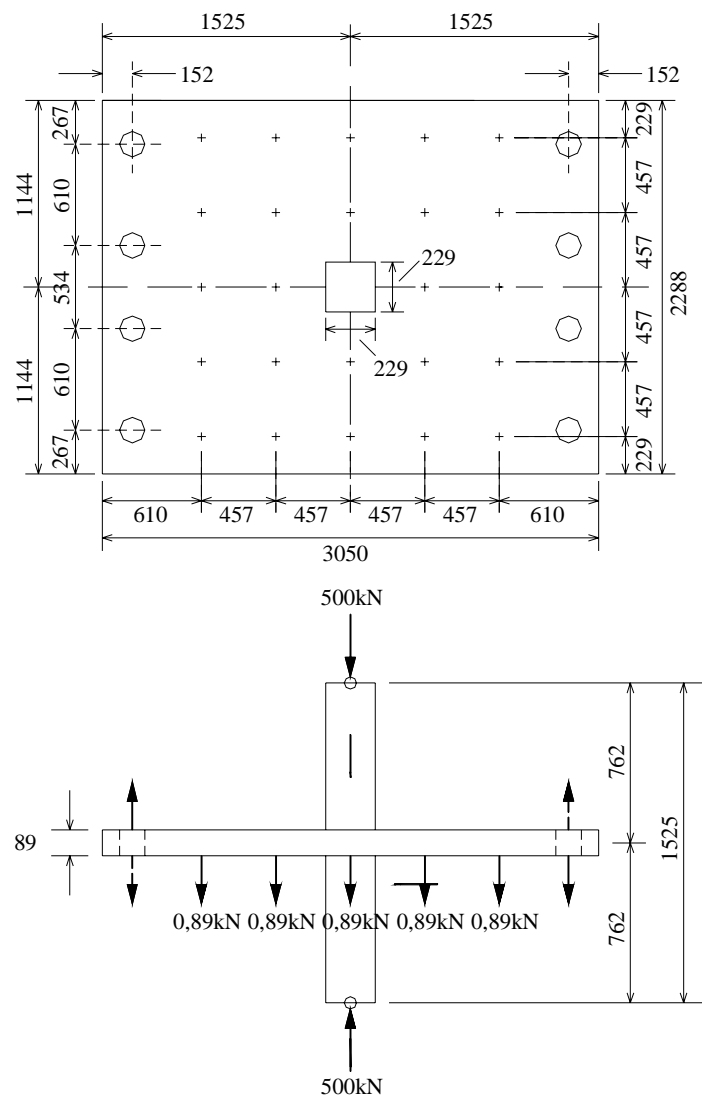


Figura 2.42 – Dimensões e carregamento das lajes de ISLAM & PARK (1976) (mm)

Os pesquisadores investigaram o comportamento quanto à ductilidade e a carga de ruptura de ligações laje-pilar, sem armadura de cisalhamento e com armadura de cisalhamento, constituída de barras dobradas, de perfil U laminado e de estribos.

Na Tabela 2.20 são apresentados os dados experimentais das lajes ensaiadas. As lajes 1, 2 e 3C não possuíram armadura de cisalhamento. A laje 4S teve armadura de cisalhamento constituída de quatro barras dobradas em cada direção. A laje 5S também teve armadura de cisalhamento formada por dois perfis U em cada direção. Nas lajes 6CS, 7CS e 8CS foram utilizados 28 estribos em cada direção, em forma de cruz, com um pequeno espaçamento de 38mm entre eles, como armadura de cisalhamento. Na laje 6CS os estribos

foram duplos com 6,3mm de diâmetro. Nas lajes 7CS e 8CS os estribos foram simples com 6,3mm e 4,8mm de diâmetro, respectivamente.

Carregamentos estáticos cíclicos, que causam momentos desbalanceados, simulando efeitos de terremoto, foram aplicados nas lajes com a letra C após os números. Lajes sem a letra C foram carregadas monoliticamente com acréscimo de momento desbalanceado. A letra S indica que a laje possui armadura de cisalhamento.

Nas lajes 1, 2, 4S e 5S, os carregamentos inversos foram aplicados gradualmente, na mesma direção, até a ruptura das lajes.

Para as lajes 3C, 6CS, 7CS e 8CS, o sentido das cargas aplicadas nas bordas era invertido diversas vezes, simulando carregamentos cíclicos de terremoto. O deslocamento imposto na borda durante a aplicação do carregamento cíclico era aproximadamente acima de 50mm e, após o carregamento era de aproximadamente 130mm em cada direção.

Tabela 2.20 – Lajes ensaiadas por ISLAM & PARK (1976)

Laje	Arm. de Cisalham.	f_c (Mpa)	f_y (Mpa)	f_y^* (Mpa)	M_u (kN.m)	V_u (kN)
1	não	27,3	356	-	30,5	35,8
2	não	31,9	374	-	37,7	35,8
3C	não	29,7	316	-	35,8	35,8
4S	sim	31,9	329	329	41,4	35,8
5S	sim	30,5	284	293	39,5	35,8
6CS	sim	28,2	290	378	38,4	35,8
7CS	sim	29,7	304	365	41,7	35,8
8CS	sim	22,1	293	388	34,9	35,8

$d = 70\text{mm}$, $\rho = 1,72\%$ para todas as lajes;

*tensão de escoamento da armadura de cisalhamento

Os autores tiveram as seguintes conclusões:

1 – Uma ligação laje-pilar sem nenhum tipo de armadura de cisalhamento tem uma pequena ductilidade e a ruptura ocorre repentinamente por uma tensão diagonal de ruptura, ocorrendo o fendilhamento do concreto ao longo das barras na parte superior da laje;

2 – O uso de barras dobradas como armadura de cisalhamento resultou em um acréscimo de resistência da ligação, mas não causou acréscimo de ductilidade;

3 – O uso de perfis “U” laminados resultou em um acréscimo de resistência da ligação e causou apenas um acréscimo limitado da ductilidade;

4 – A utilização de estribos com pequenos espaçamentos resultou em um acréscimo da resistência e num substancial acréscimo de ductilidade da conexão, quando submetida a momentos desbalanceados cíclicos. Os estribos simples mostraram-se tão efetivos quanto os estribos duplos.

HAWKINS, BAO & YAMASAKI (1989) conduziram um estudo experimental, onde ensaiaram 36 lajes quadradas, com 2100mm de lado, moldadas monoliticamente a um pilar. A maioria das lajes tiveram pilar com seção transversal quadrada, com 305mm de lado. O carregamento foi aplicado em 12 pontos nos bordos da laje, espaçados a cada 610mm, de maneira que a resultante gerou um momento. A reação ao momento foi realizada por força horizontal aplicada por um atuador hidráulico, entre a face superior do pilar e uma estrutura de reação independente. O pilar foi protendido contra a laje de reação através de um tirante que atravessava pelo seu centro. O sistema de aplicação de carga e as dimensões são mostrados na Figura 2.43.

Carregamento L: AV = 0,107; BV = 0,072; M/V = 130mm

Carregamento H: AV = 0,188; BV = 0,031; M/V = 577mm

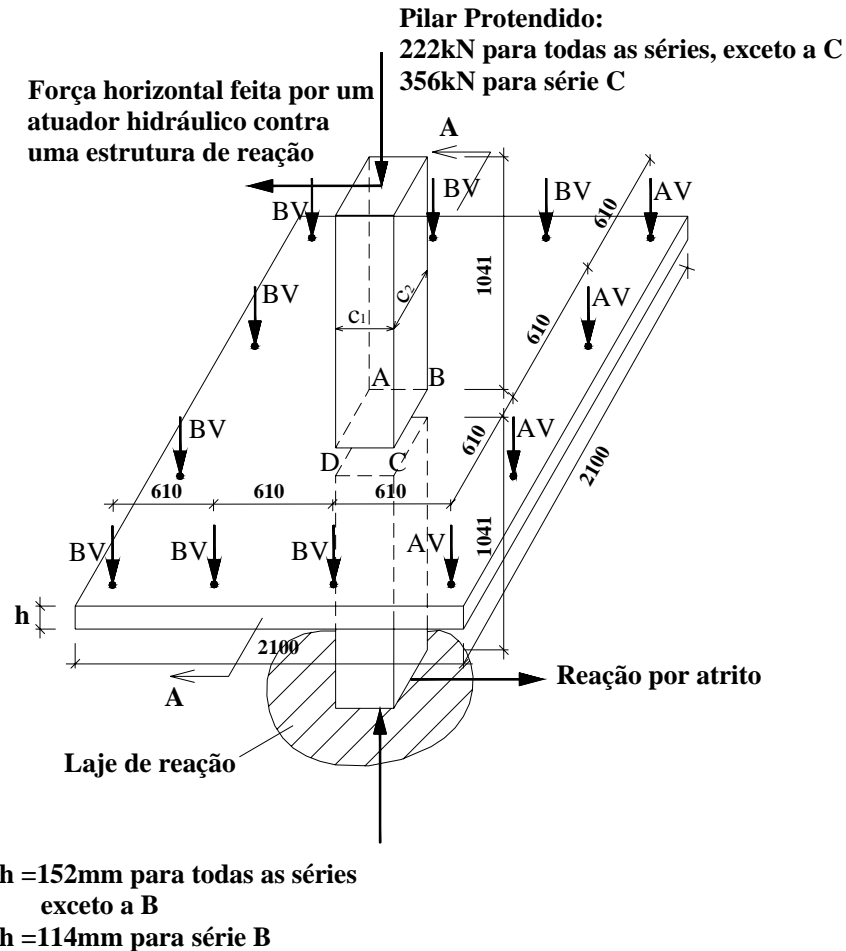
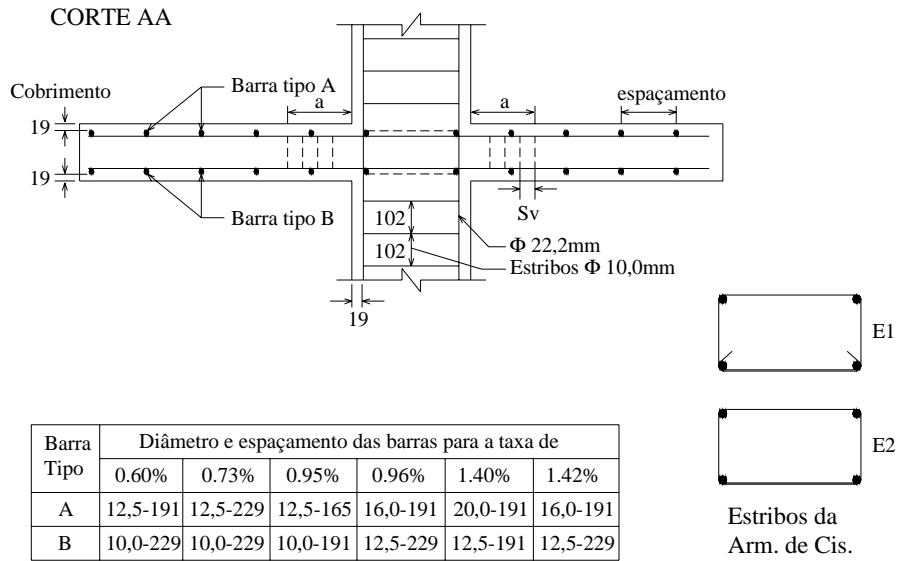
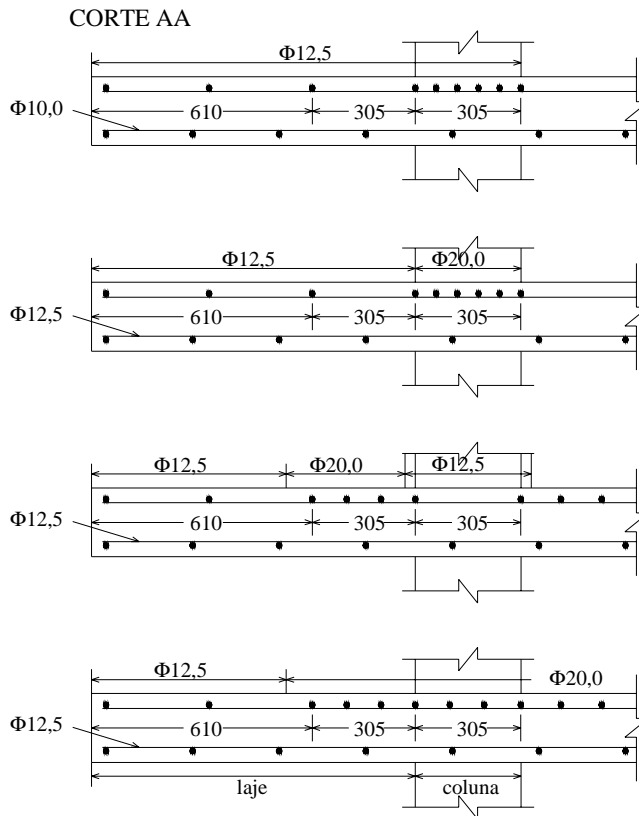


Figura 2.43 – Sistema de aplicação de carga e dimensões das lajes de HAWKINS, BAO & YAMASAKI (1989) (mm)

As lajes ensaiadas foram divididas em sete séries, A até G. As lajes da série A (6 lajes) foram tratadas como as lajes de referência. As principais variáveis foram: a altura das lajes, na série B (6 lajes); maiores resistências do concreto, série C (5 lajes); concreto estrutural leve, na série D (4 lajes); armadura de cisalhamento composta por estribos, na série E (6 lajes) – Figura 2.44(a); padrões de distribuição da armadura de flexão, na série F (6 lajes) – Figura 2.44(b); e, retangularidade de pilar, na série G (6 lajes) – o perímetro dos pilares foi mantido constante, com 1219mm, e a taxa de retangularidade (c_1/c_2 , c_1 é a dimensão do pilar paralela à direção do momento aplicado, c_2 é a perpendicular) variou de 0,5 a 3.



(a) Armadura de flexão e cisalhamento



(b) Armadura de flexão - Lajes da Série F, mesma armação nas duas direções

Figura 2.44 – Armaduras de flexão e cisalhamento das lajes de HAWKINS, BAO & YAMASAKI (1989) (mm)

As características das lajes, as cargas e momentos de ruptura são apresentados na Tabela 2.21. Dentro das séries, exceto na série G, as taxas de armadura foram variadas. Também, houve laje com carregamento tipo L e tipo H – as frações de carga aplicada em cada ponto de carregamento são mostradas na Figura 2.43. Para todas as séries, exceto para a série B, a altura total da laje foi de 152mm. Na série B, a altura total foi de 114mm. Todas as lajes tiveram um cobrimento da armadura superior de flexão de 19mm.

Nas lajes da série E, com armadura de cisalhamento, o comprimento “a” (Figura 2.1) foi de 762mm, para as lajes 14EH-0,49 e 9,6EL-0,56, e 457mm para as demais. Foram utilizados estribos de 10mm de diâmetro nas lajes 14EH-0,49 e 14EL-0,49, nas demais os estribos tiveram 8,0mm de diâmetro. O espaçamento entre os estribos, s_v , foi de: 95mm para as lajes 14EH-0,49 e 14EL-0,49; 64mm para 9,6EH-0,34 e 9,6EL-0,34; 44mm para 9,6EH-0,48; e 38mm para 9,6EL-0,56. O detalhe do estribo E1 foi utilizado em todas as lajes, exceto na laje 14EL-0,59, que utilizou o detalhe E2. Devido ao diâmetro do estribo exceder a armadura de flexão, o cobrimento dessas lajes foi igual ao cobrimento da laje menos o diâmetro do estribo.

Tabela 2.21 – Lajes ensaiadas por HAWKINS, BAO & YAMASAKI (1989)

Laje ⁽¹⁾	d (mm)	Pilar $c_1 \times c_2$ (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	f_y (MPa)	M_u (kN.m)	V_u (kN)
6AH	120	305 x 305	0,60	31,3	472	90,4	169
9,6AH	117	305 x 305	0,96	30,7	415	97,7	187
14AH	113	305 x 305	1,40	30,3	420	100,2	205
6AL	120	305 x 305	0,60	22,7	472	32,7	244
9,6AL	117	305 x 305	0,96	28,9	415	34,6	257
14AL	113	305 x 305	1,40	27,0	420	43,4	319
7,3BH	82	305 x 305	0,73	22,2	472	39,0	80
9,5BH	82	305 x 305	0,95	19,8	472	45,4	94
14,2BH	79	305 x 305	1,42	29,5	415	51,0	102
7,3BL	82	305 x 305	0,73	18,1	472	12,8	130
9,5BL	82	305 x 305	0,95	20,0	472	16,6	142
14,2BL	79	305 x 305	1,42	20,5	415	20,9	162
6CH	120	305 x 305	0,60	52,4	472	95,1	186
9,6CH	117	305 x 305	0,96	57,2	415	113,1	218

Tabela 2.21 – Lajes ensaiadas por HAWKINS, BAO & YAMASAKI (continuação)

14CH	113	305 x 305	1,40	54,7	420	133,3	252
6CL	120	305 x 305	0,60	49,5	472	36,8	273
14CL	113	305 x 305	1,40	47,7	420	49,4	362
6DH	120	305 x 305	0,60	30,0	472	65,8	134
14DH	113	305 x 305	1,40	31,7	420	98,8	195
6DL	120	305 x 305	0,60	28,7	472	24,4	232
14DL	113	305 x 305	1,40	24,3	420	34,8	282
14EH-0,49	113	305 x 305	1,40	25,1	420	117,9	226
9,6EH-0,34	117	305 x 305	0,96	25,5	472	99,8	199
9,6EH-0,48	117	305 x 305	0,96	25,8	472	86,2	226
14EL-0,49	113	305 x 305	1,40	26,9	420	44,4	354
9,6EL-0,34	117	305 x 305	0,96	23,4	472	33,3	290
9,6EL-0,56	117	305 x 305	0,96	28,5	472	43,1	345
10,2FHI	121	305 x 305	1,02	25,9	472/420	74,0	153
10,2FHO	121	305 x 305	1,02	33,8	472/420	89,9	183
14FH	113	305 x 305	1,40	31,2	420	102,5	206
6FLI	120	305 x 305	0,60	25,9	472	27,1	227
10,2FLI	121	305 x 305	1,02	18,1	472/420	26,9	240
10,2FLO	121	305 x 305	1,02	26,5	472/420	35,0	290
9,6GH-2	117	203 x 406	0,96	24,7	472	82,3	165
9,6GH-0,5	117	406 x 203	0,96	26,3	472	89,6	182
9,6GH-3	117	457 x 152	0,96	27,0	472	83,4	165

⁽¹⁾ Os numerais indicam a taxa de armadura da laje multiplicada por 1000. A primeira letra indica a série, a segunda indica o carregamento. Os numerais e letras adicionais indicam: para a série E, a porcentagem de armadura de cisalhamento em uma seção com 305mm de largura; para a série F, se a posição da concentração de armadura de flexão se encontra dentro, letra I, ou fora, letra O, do pilar, como mostrado na Figura 2.44b; para a série G, a taxa de retangularidade (c_1/c_2).

Os autores fizeram comparações entre os resultados experimentais de carga última e deslocamento das lajes ensaiadas e os obtidos, utilizando as recomendações do ACI318-83. Também compararam os resultados de rigidez de rotação da placa não-fissurada e fissurada, obtidos com os ensaios e com a utilização da mesma norma.

Os autores chegaram às seguintes conclusões:

1 – As prescrições do ACI318-83 para determinação da resistência em conexões laje-pilar interior, com transferência de momento, são razoáveis para propósito de cálculo. O conservadorismo das previsões aumenta à medida que a taxa de armadura aumenta. Contudo, o aviso para uma iminente ruptura decresce. Para lajes com taxas de armadura inferiores a 0,7% as previsões não se mostraram conservadoras;

2 – O fendilhamento do concreto e o efeito de pino para lajes com armadura de flexão passando dentro do pilar podem reduzir a capacidade de transferência de momento. Relatam que ficou claro que o espaçamento entre as barras não pode exceder três vezes o diâmetro das mesmas, adotando um cobrimento de 19mm;

3 – A resistência em conexões feitas com concreto estrutural leve não pode ser maior que 85% de uma feita com concreto de peso normal, sem considerar os valores de resistência à tração (f_{ct}) para o concreto estrutural leve;

4 – A rigidez rotacional das ligações laje-pilar diminui continuamente com o acréscimo de carga. Para lajes não fissuradas, as previsões de rigidez rotacional dadas pelo ACI 318-83 foram realísticas. Os autores chegaram a uma equação para determinação da rigidez rotacional em função da taxa de armadura, para as lajes fissuradas testadas:

$$(K_{ec})_{test} = (17\rho + 0,085)(K_{ec})_{calc} \quad (2.60)$$

onde:

$(K_{ec})_{test}$ é a rigidez rotacional para a laje fissurada;

$(K_{ec})_{calc}$ é a rigidez de cálculo dada pelo ACI 318-83.

2.4.2 Trabalhos realizados no Brasil

CORDOVIL (1995) ensaiou dez lajes quadradas com 1540mm de lado. As principais variáveis foram o uso de armadura de cisalhamento e a transferência de momento do pilar para a laje.

No sistema de ensaio utilizado, a carga foi aplicada de baixo para cima por meio de um atuador hidráulico (macaco hidráulico). As lajes foram apoiadas em um pórtico de alta rigidez ancorado na laje de reação, nas bordas, de maneira que o vão livre foi de 1340mm. O carregamento excêntrico foi aplicado com a utilização de um dispositivo, criado pelo autor,

chamado de “trans-moment”, com distâncias de 200mm ou 400mm do centro do pilar, transmitindo momento para a laje, como mostrado na Figura 2.45. Com o dispositivo, as cargas foram transmitidas à placa por meio de barras de aço comprimidas e tracionadas, formando um binário em contato com a laje.

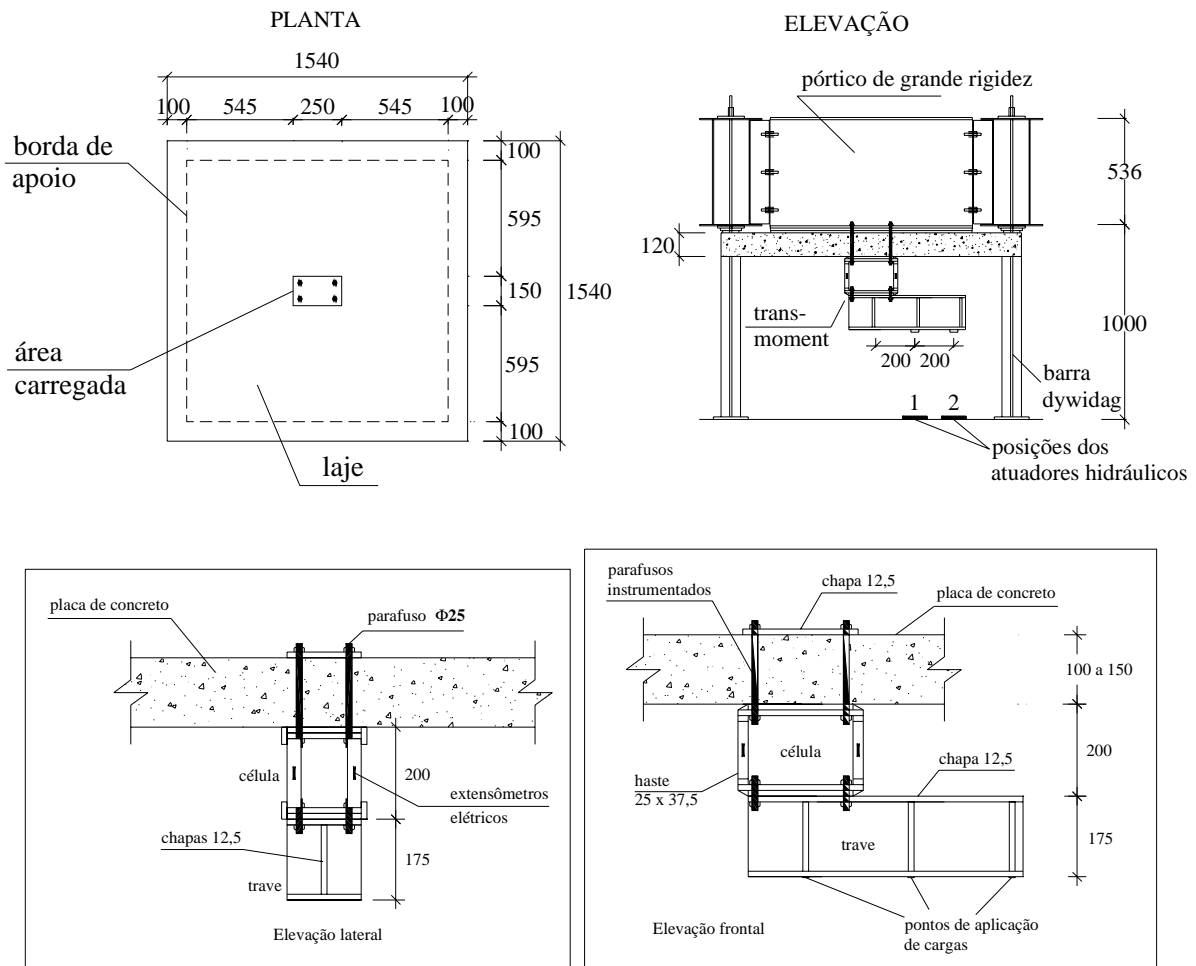


Figura 2.45 – Sistema de aplicação de carga e dimensões das lajes e detalhe do “trans-moment” utilizado por CORDOVIL (1995) (mm)

O autor dividiu o estudo das lajes em duas séries: série de “carga centrada” e série de “cargas excêntricas”.

Na série de “carga centrada”, foram ensaiadas três lajes: lajes 7, 8 e 11. O carregamento foi centrado e as lajes tiveram espessura total de 150mm. A laje 7 foi a laje de referência, sem armadura de cisalhamento. As lajes 8 e 11 tiveram armadura de cisalhamento, tipo pino, com 6,3mm de diâmetro, como mostrado na Figura 2.46. O carregamento foi

aplicado no centro da laje, de baixo para cima, por meio de um macaco hidráulico, sobre uma chapa metálica quadrada com 100mm de lado, simulando o pilar.

A armadura de flexão das lajes 7, 8 e 11 foi composta por malha ortogonal com barras de 12,5mm de diâmetro, com 14 barras nas duas direções paralelas aos lados da laje. A taxa de armadura, ρ , foi de 0,85%. A altura útil das lajes, d , foi igual a 131mm.

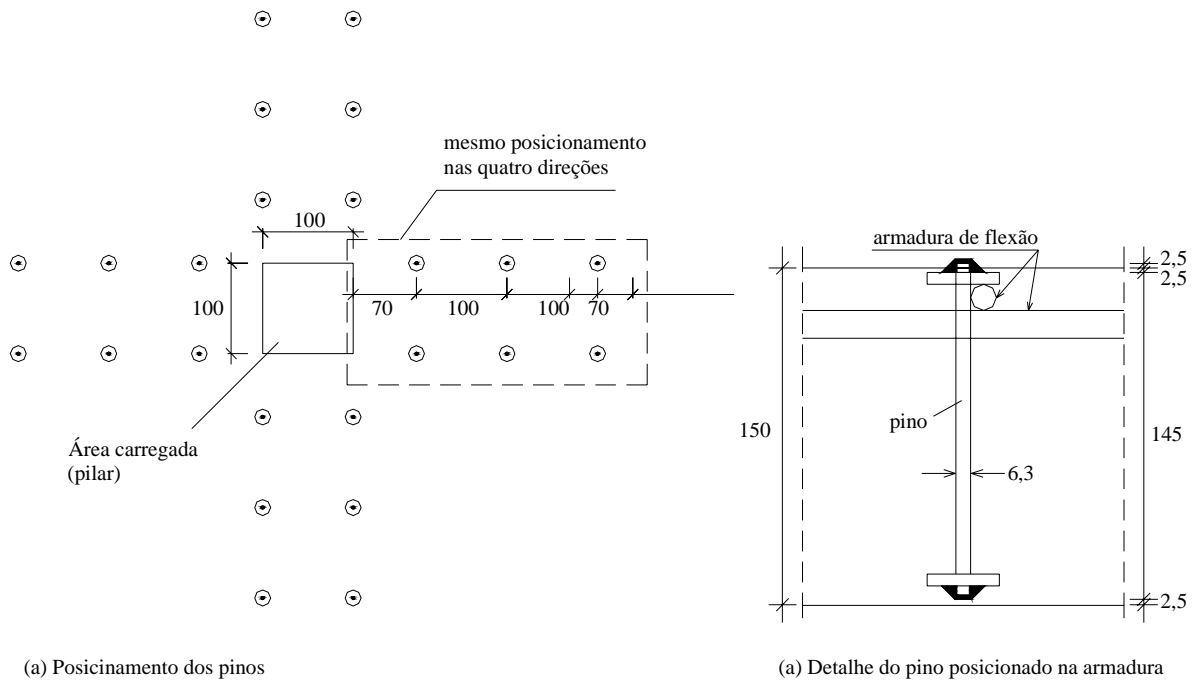


Figura 2.46 – Armadura de cisalhamento utilizada nas lajes 8 e 11 (mm)

Na série de “cargas excêntricas”, foram ensaiadas sete lajes, das quais duas tiveram cargas centradas, lajes 14 e 15; e cinco tiveram cargas excêntricas, lajes 9, 10, 12, 13 e 16, duas com excentricidade igual 200mm (lajes 10 e 12) e três com excentricidade igual a 400mm (lajes 9, 13 e 16). As lajes tiveram espessura de 120mm. Três lajes, lajes 10, 14 e 16, levaram armadura de cisalhamento, tipo pino, com 6,3mm de diâmetro, como mostrado na Figura 2.47. A área carregada, com a utilização do “trans-moment” simulando o pilar, foi retangular de lados 250x150mm. As lajes que tiveram carregamento centrado foram carregadas sem a utilização do “trans-moment” e foi utilizada uma chapa metálica retangular de 250x150mm, simulando o pilar.

Nas lajes 9, 10, 12, 13, 14, 15 e 16, a armadura de flexão foi composta de malha ortogonal, com 15 barras de 10,0mm de diâmetro na direção paralela ao maior lado do pilar, e

14 barras de 10,0mm de diâmetro na direção perpendicular. A taxa de armadura, ρ , foi de 0,88%. A altura útil das lajes, d , foi de 104mm.

As características das lajes ensaiadas são mostradas na Tabela 2.22.

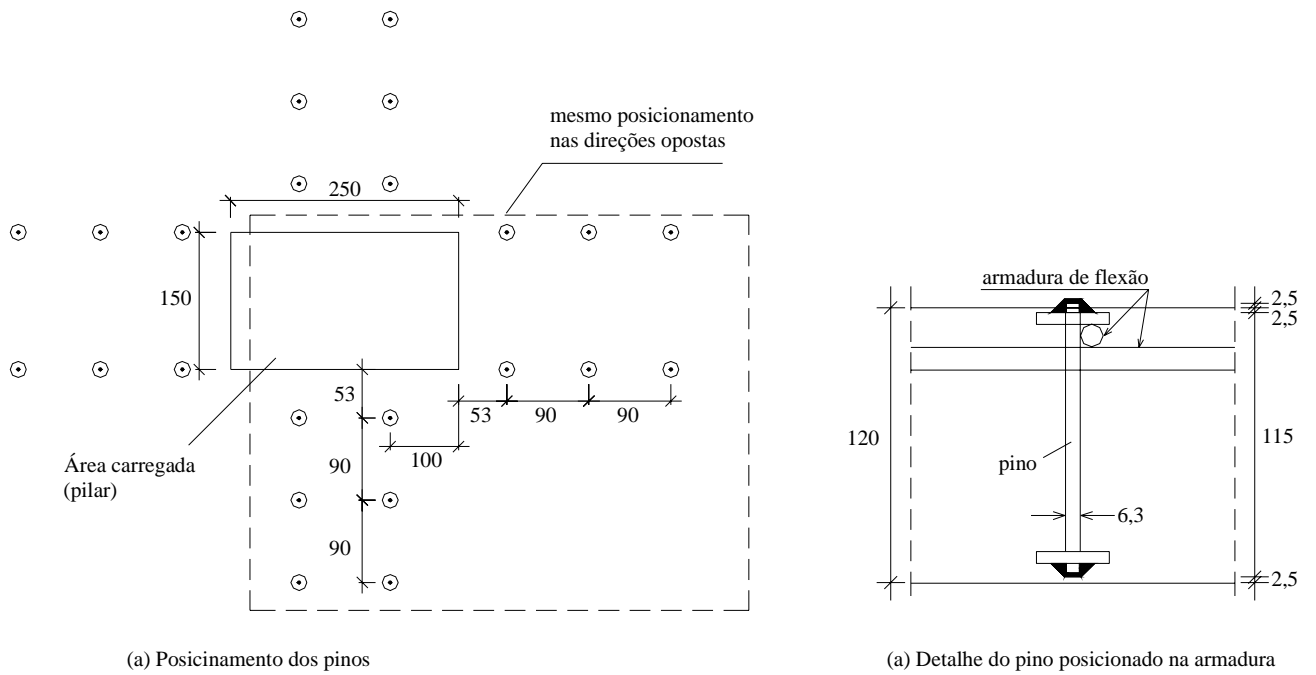


Figura 2.47 – Armadura de cisalhamento utilizada nas lajes 10, 14 e 16 (mm)

Tabela 2.22 – Lajes ensaiadas por CORDOVIL (1995)

Laje	d (mm)	Arm. De cis.	e (mm)	Pilar (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	M_u (kN.m)	V_u (kN)	Modo de ruptura ⁽²⁾
7	131	Não	0	100x100	0,85	33,8	0	169	Simétrico, adjacente ao pilar
8	131	Sim	0	100x100	0,85	34,3	0	187	Simétrico, adjacente ao pilar
11	131	Sim	0	100x100	0,85	33,5	0	205	Simétrico, adjacente ao pilar
9	104	Não	400	250x150	0,88	32,7	42,4	106	adjacente, irregular
13	104	Não	400	250x150	0,88	30,1	40,4	101	adjacente, irregular
16	104	Sim	400	250x150	0,88	31,1	62,4	156	adjacente, irregular
12	104	Não	200	250x150	0,88	30,8	32,2	161	adjacente, irregular
10	104	Sim	200	250x150	0,88	33,1	43,8	219	adjacente, simétrica
15	104	Não	0	250x150	0,88	29,9	0	258	adjacente, irregular
14	104	Sim	0	250x150	0,88	29,8	0	302	adjacente, irregular

⁽¹⁾ simétrico, adjacente ao pilar – indica que romperam adjacentes à área carregada, deslocando um sólido quase simétrico;

adjacente irregular – indica que a ruptura foi adjacente à área carregada com o deslocamento de um sólido irregular;

adjacente simétrico – indica que a ruptura foi adjacente à área carregada com o deslocamento de um sólido quase simétrico.

O autor, baseado em resultados de seus experimentos, fez uma proposta para alteração do Código Modelo CEB-FIP/90 que consiste basicamente na mudança da distância do perímetro crítico em relação ao perímetro do pilar, alterando de $2,0d$ para $1,25d$, como mostrado na Figura 2.48. Para lajes com armadura de cisalhamento, o CEB-FIP/90 especifica o perímetro de controle externo a $2,0d$ da última camada de armadura de cisalhamento. Em sua proposta, o perímetro de controle externo é verificado a uma distância de $2,5d$ das bordas

da área carregada, como mostrado na Figura 2.49. Assim sendo, o perímetro de controle externo depende somente das dimensões da área carregada e da altura útil, d , da laje. O detalhamento da armadura de cisalhamento deve atender aos espaçamentos mostrados na Figura 2.49. No entanto, o autor esclarece que a proposta é válida para as lajes ensaiadas.

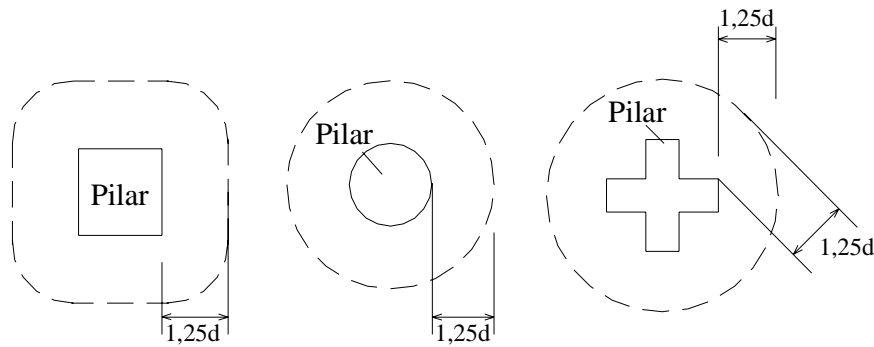


Figura 2.48 – Perímetro de controle sugerido por CORDOVIL (1995)

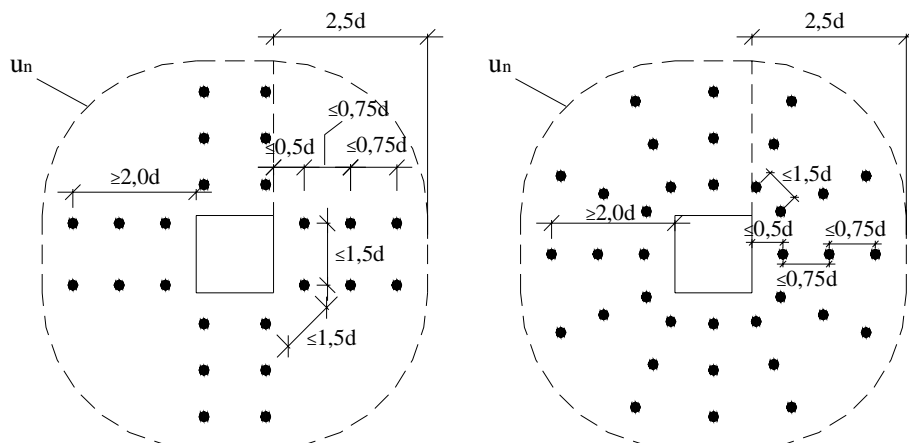


Figura 2.49 – Perímetro de controle u_n sugerido por CORDOVIL (1995)

Também sugeriu como acréscimo nas prescrições do CEB-FIP/90, que a distribuição da armadura de cisalhamento com o espaçamento circunferencial deve ser de, no máximo, $1,5d$ na primeira camada. Ainda acrescentou que a armadura de cisalhamento deve ter uma extensão mínima de $2,0d$ das bordas do pilar.

Concluiu, ainda, que a utilização do “trans-moment” é o método de ensaio mais adequado para placa sob carga excêntrica de punção, porque tem condições de medir a excentricidade da carga efetiva. Por meio da análise das parcelas de carga em cada haste do equipamento, medida por extensômetros elétricos, chega-se ao conhecimento da

excentricidade real da carga aplicada, além da avaliação da pressão exercida pelo equipamento metálico contra a superfície de concreto. Estas informações são fundamentais para que se saiba o que ocorre verdadeiramente na placa.

O autor da presente Tese discorda da última conclusão de CORDOVIL (1995). A utilização de tal aparelho induz a configuração de tensões na região carregada da placa, o que pode ser diferente daquelas causadas pela distribuição dos esforços da placa nas regiões próximas ao pilar, quando uma laje lisa é carregada normalmente por cargas gravitacionais desbalanceadas.

2.5 CONCLUSÕES SOBRE OS ESTUDOS REALIZADOS

Sobre trabalhos envolvendo lajes com furos, com linhas de pesquisa investigando influência do posicionamento de furos em relação ao pilar (retangular ou quadrado) e a utilização de armadura de cisalhamento, as conclusões comuns entre os autores são o enfraquecimento da região em torno dos furos e a necessidade de reforço, principalmente com armadura de combate ao cisalhamento. Existem várias sugestões de como deve ser feito esse reforço, mas, ainda, sem uma orientação por parte das normas. Outro tema que provoca bastante divergência é o perímetro crítico a ser considerado na existência do furo.

Quanto ao estudo de lajes lisas associadas a pilares internos com efeito de momento, o assunto já tem uma maior clareza quanto ao equacionamento, tendo um entendimento entre os autores que a carga de ruptura é inversamente proporcional ao momento aplicado no pilar. As divergências surgem na parcela de momento que é transmitida ao pilar por cisalhamento, diminuindo a capacidade resistente da ligação laje-pilar.

Porém, há uma grande lacuna a ser preenchida. Trata-se do estudo de lajes com furos e com descontinuidade de momento fletor no pilar. Em apenas um trabalho, HANSON & HANSON (1964), foram encontrados experimentos envolvendo tal assunto, embora com algumas limitações, como: a aplicação de carga em apenas uma direção, sempre dois furos ao lado do pilar, apenas um tamanho dos furos e com armadura de flexão passando através do furo, não havendo o corte da barra, que é uma situação comum encontrada em projetos estruturais. Os códigos não tratam especificamente do assunto. Podemos enumerar algumas perguntas tocantes ao assunto:

1 – A parcela de momento transmitida ao pilar por cisalhamento em uma laje monolítica é a mesma em uma laje com furo?

2 – A presença de furos agrava a descontinuidade de momento?

3 – Em um carregamento simétrico, a presença de um furo adjacente ao pilar implica em uma descontinuidade de momento fletor?

O presente trabalho tem o objetivo de investigar o comportamento de lajes lisas com furos, associadas à transferência de momento a um pilar interno.

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

O sistema de ensaio e os modelos das peças ensaiadas foram concebidos com o intuito de simular a punção na região próxima ao pilar, para lajes com simetria de carregamento e com falta de simetria, transferindo momento fletor da laje para o pilar (descontinuidade de momento fletor na laje), problema freqüentemente encontrado na engenharia de projetos em lajes lisas (quando da existência de vãos diferentes ou carregamentos diferenciados a cada lado do pilar).

Outro problema bastante relevante e de muita preocupação por parte de engenheiros projetistas, quando se trata de lajes lisas, são furos adjacentes ou próximos a pilares. Este problema pode ser agravado com a existência de descontinuidade de momento fletor no pilar. O presente programa prevê ensaios para investigação de furos adjacentes a pilares com descontinuidade de momento fletor no pilar.

Ainda sobre a existência de furos adjacentes a pilares, tendo furo apenas em um lado do pilar, este pode inserir descontinuidade de momento fletor em lajes com carregamento simétrico, ou acentuar o momento transferido ao pilar, em lajes com a existência de descontinuidade. Este assunto será investigado através da instrumentação dos ensaios.

O programa experimental deste trabalho compreendeu ensaios, até a ruptura, de 19 (dezenove) lajes quadradas com 2400mm de lado e com 150mm de espessura, ligadas monoliticamente a um pilar central de seção retangular, com lados de 500x200mm e com 850mm de altura (300mm acima da laje, 400mm abaixo e 150mm coincidente com a laje).

As principais variáveis envolvidas nesta investigação experimental são:

- Quantidade, dimensão e posicionamento do(s) furo(s) adjacente(s) ao pilar;
- Taxa e a distribuição da armadura de flexão;
- Armadura de cisalhamento;
- Carregamento, com diferentes transferências de momento fletor da laje para o pilar.

Em função do carregamento, as lajes foram divididas em 2 (duas) séries. As lajes que não tiveram transferência de momento da laje para o pilar (dez lajes) formam a série 1, são elas: L1 a L7, L9, L16 e L19. A Série 2 é formada pelas lajes que tiveram transferência de momento da laje ao pilar (nove lajes): L8, L10, L11 a L15, L17 e L18.

Todo o programa experimental foi realizado no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Os ensaios de caracterização do concreto foram executados pela empresa Carlos Campos Consultoria Ltda. Os ensaios de caracterização de aço foram executados pelo Laboratório de Concreto do Centro Tecnológico de Engenharia Civil do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

3.1 DEFINIÇÃO DAS SÉRIES DE LAJES E PRINCIPAIS VARIÁVEIS

Como mencionado anteriormente, as lajes foram divididas em duas séries, Série 1 e Série 2. O critério da divisão foi o carregamento aplicado nas lajes. As lajes da Série 1 não tiveram momento transferido ao pilar. As lajes da Série 2 tiveram momento transferido ao pilar. A numeração das lajes seguiu a ordem de concretagem.

Dentro de cada série há uma separação das lajes em grupos, quanto à existência dos furos: lajes sem furo, lajes com 1 furo e lajes com 2 furos.

Nas lajes da Série 1, ainda houve uma divisão dentro do grupo das lajes com 1 furo: lajes sem armadura de cisalhamento e lajes com armadura de cisalhamento.

Nas lajes da Série 2, os carregamentos foram diferenciados, transferindo intensidades de momento diferentes, em direções e sentidos diferentes, mas não houve divisão quanto ao carregamento.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as lajes da Série 1 e Série 2. Nas lajes da Série 2, foram inseridas as intensidades das cargas aplicadas nos bordos das lajes.

Os detalhes quanto às características das lajes, carregamentos, sistema de ensaio, instrumentação e procedimento de ensaio serão mostrados a seguir.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIDAS

3.2.1 Características geométricas

As lajes apresentaram dimensões constantes e iguais a 2400mm x 2400mm x 150mm. Foram ligadas monoliticamente a um pilar retangular com lados de 500mm x 200mm e com altura de 850mm (300mm acima da lajes, 400mm abaixo e 150mm coincidente com a laje).

Foram executados seis modelos padrões de lajes, diferenciados pela existência e posicionamento de furos, como mostrado na Figura 3.1. O primeiro modelo (modelo 1), das lajes L1, L14 e L15, trata-se de uma laje maciça sem furo. O segundo (modelo 2) é composto por exemplares com um furo quadrado de 400mm de lado adjacente ao menor lado do pilar: lajes L2, L3, L4, L5 e L6. O terceiro modelo (modelo 3), lajes L7, L8, L11 e L12, também possui apenas um furo quadrado, mas com 200mm de lado adjacente ao menor lado do pilar. O quarto modelo (modelo 4), lajes L9, L10 e L13, possui dois furos quadrados com 200mm de lado adjacentes aos menores lados do pilar. O quinto modelo (modelo 5), apresenta um furo retangular de 300x200mm adjacente ao maior lado do pilar: lajes L16 e L17. O sexto modelo (modelo 6), tem dois furos retangulares de 300x200mm adjacentes aos maiores lados do pilar: lajes L18 e L19.

Os modelos representam um modelo discreto de laje lisa, simulando um trecho com momento negativo de um pilar interno. O modelo discreto representa localmente a região do pilar e da laje a ser analisada, adequado para análise isolada de punção, não abrangendo os esforços de membrana existentes num painel de laje.

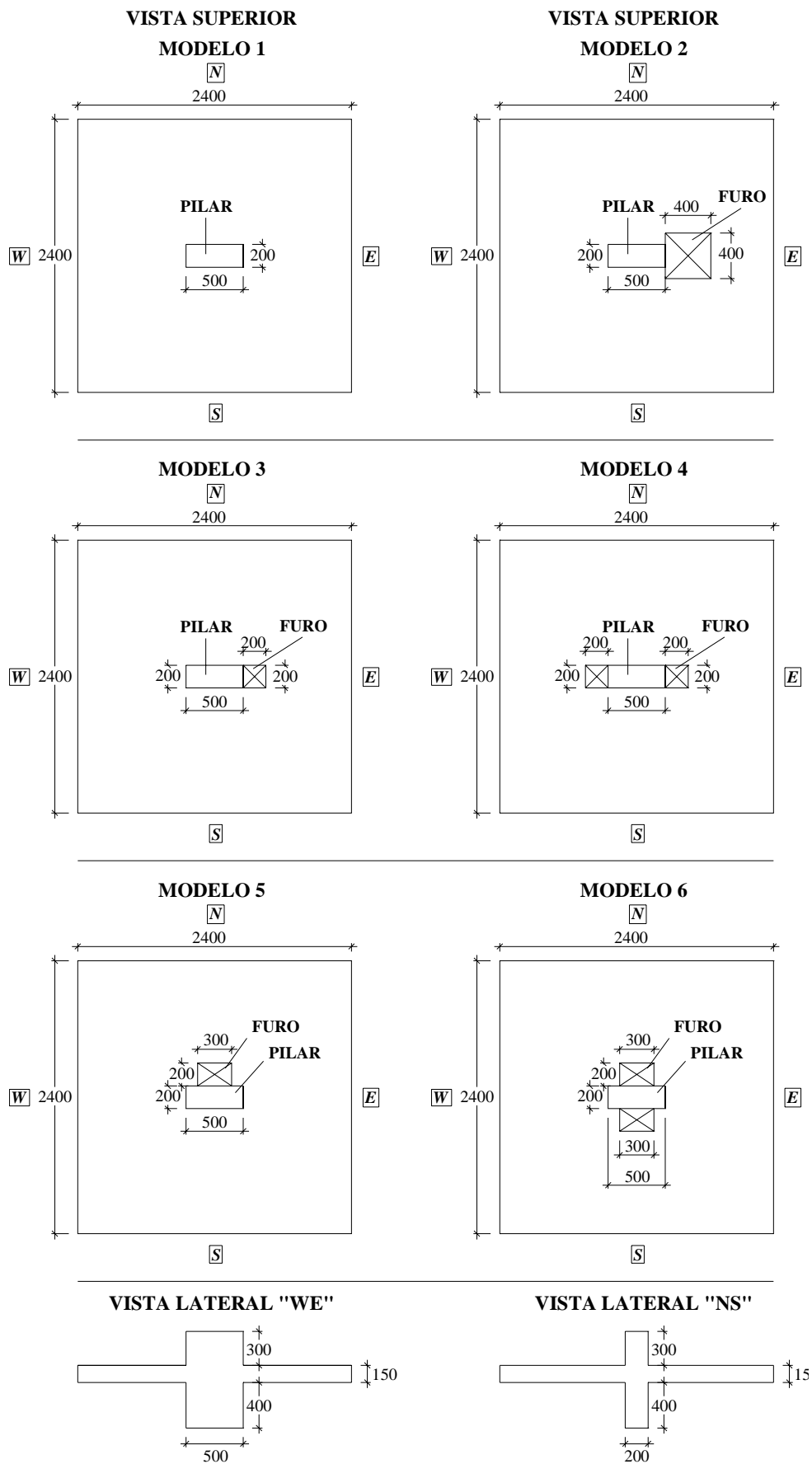


Figura 3.1 – Características das lajes ensaiadas – Modelos 1 ao 6

3.2.2 Carregamento

Foram utilizados cinco tipos de carregamento, que foram criados de maneira que, para cada passo de carga, se tivesse o mesmo carregamento vertical aplicado em todas as lajes, podendo mudar a intensidade ou o sentido do momento fletor transferido da laje para o pilar. As cargas foram aplicadas com cilindros hidráulicos apoiadas sobre vigas metálicas de distribuição que se apoiavam sobre placas de aço de 100mm x 200mm x 20mm colocadas sobre a laje, como mostram as Figuras 3.2 e 3.34.

3.2.2.1 Carregamento das lajes da Série 1 – sem transferência de momento

As lajes da série 1, L1 a L7, L9, L16 e L19, tiveram carregamento simétrico com a mesma intensidade em todas as bordas da laje. Na Figura 3.2 é mostrada a intensidade da carga aplicada nas duas placas de distribuição de cada borda da laje. A somatória dessas duas cargas totaliza a intensidade de carga aplicada em cada borda.

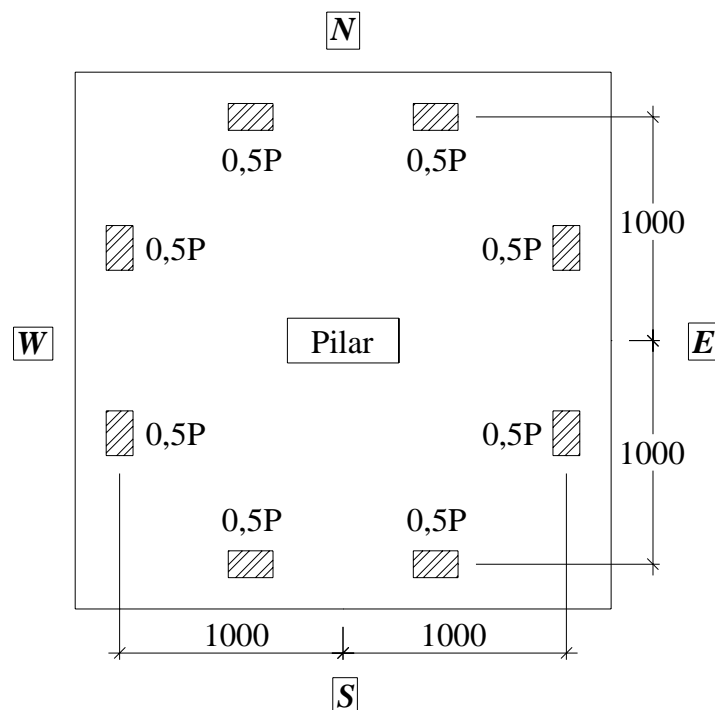


Figura 3.2 – Carregamento das lajes da Série 1: L1 a L7, L9, L16 e L19 (dimensões em mm)

3.2.2.2 Carregamento das lajes da Série 2 – com transferência de momento

As lajes da série 2, L8, L10 a L15, L17 e L18, tiveram carregamento assimétrico com momento aplicado sendo transferido ao pilar em apenas uma direção de cada laje.

Na Figura 3.3 pode ser visto o carregamento utilizado nas lajes L8, L10 e L14, com momento fletor na direção do maior lado do pilar, no sentido horário, onde: na direção *W* não foi aplicada carga e na direção *E* foi aplicada carga com intensidade duas vezes maior que nas direções *N* e *S*. Na figura é mostrada a intensidade da carga aplicada nas duas placas de distribuição de cada borda da laje, de maneira que a intensidade de carga total aplicada em cada borda é a somatória das duas.

A excentricidade de carga foi de 0,500m ($e = \text{Momento}/\text{Carga}$, onde: $\text{Momento} = 2P \times 1\text{m}$, e $\text{Carga} = 4P$).

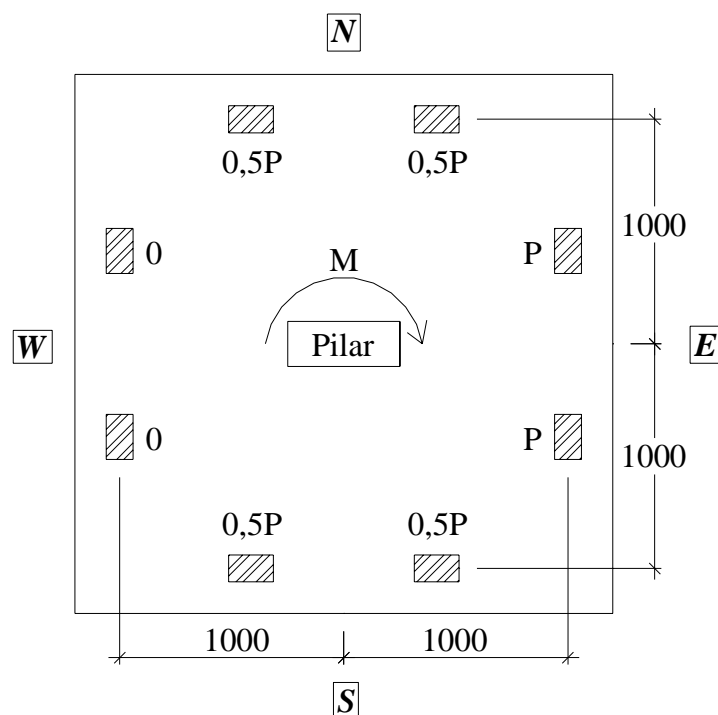


Figura 3.3 – Carregamento das lajes L8, L10 e L14 (dimensões em mm)

O carregamento da laje L11, assimétrico, com momento na direção do maior lado do pilar e no sentido anti-horário, é mostrado na Figura 3.4. Na direção *E* não foi aplicada carga. Na direção *W*, a carga aplicada foi o dobro da aplicada nas direções *N* e *S*.

A excentricidade de carga também foi de 0,500m.

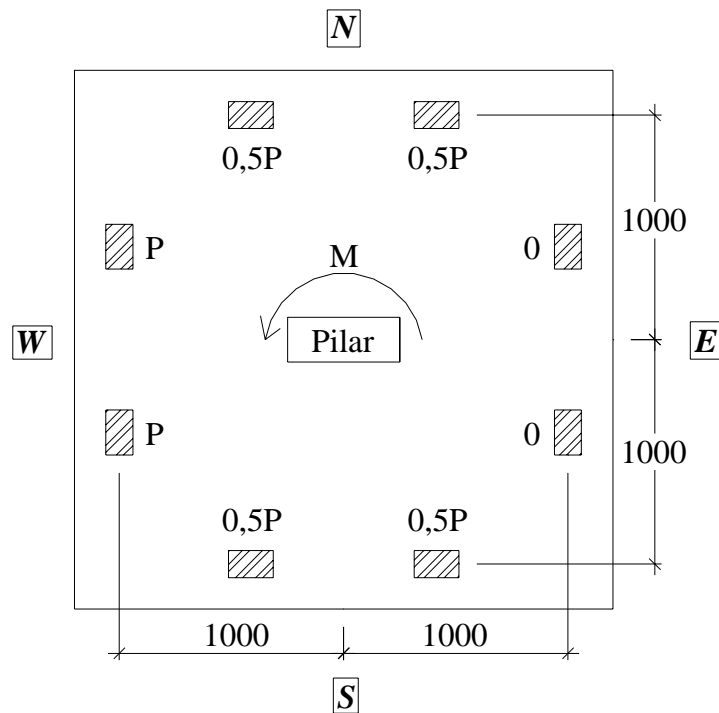


Figura 3.4 – Carregamento da laje L11 (dimensões em mm)

Na Figura 3.5 é mostrado o carregamento das lajes L12 e L13. Houve momento transferido na direção do maior lado do pilar no sentido horário, porém com menor intensidade que o mostrado na Figura 3.5. Na direção *W* foi aplicada uma carga com a metade da intensidade da carga aplicada nas direções *N* e *S*, e, na direção *E*, essa intensidade foi 1,5 vez maior que nas direções *N* e *S*.

A excentricidade de carga foi de 0,250m ($e = \text{Momento}/\text{Carga}$, onde: $\text{Momento} = (1,5P - 0,5P) \times 1\text{m}$, e $\text{Carga} = 4P$).

Nas lajes L15, L17 e L18, o momento foi aplicado na direção do menor lado do pilar, como pode ser visto na Figura 3.6. Na direção *S* foi aplicada uma carga com a metade da intensidade da aplicada nas direções *W* e *E*, e, na direção *N*, essa intensidade foi 1,5 vez maior que nas direções *W* e *E*. A excentricidade de carga foi de 0,250m.

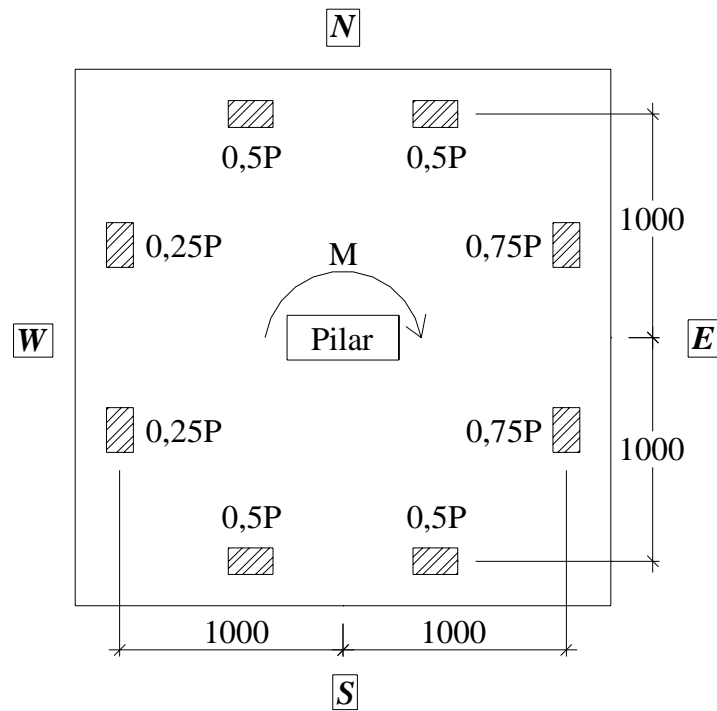


Figura 3.5 – Carregamento das lajes L12 e L13 (dimensões em mm)

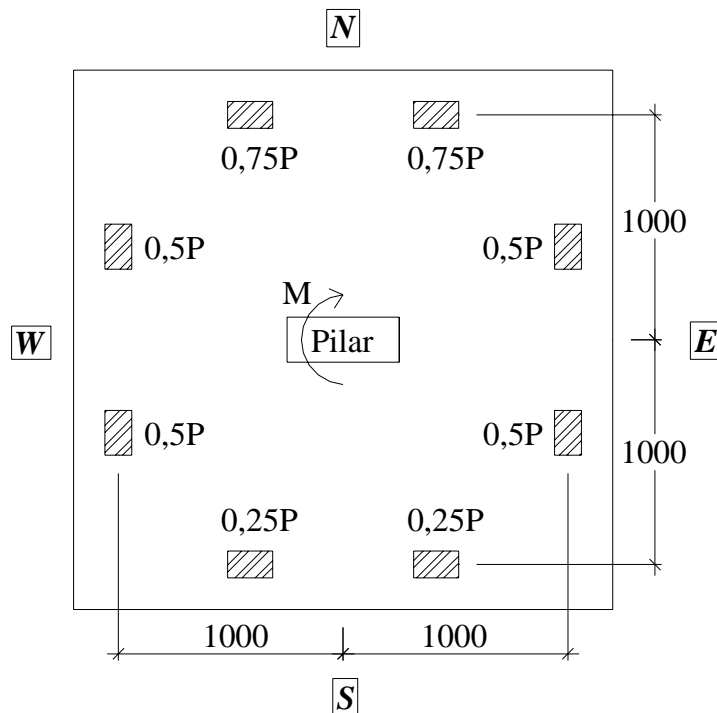


Figura 3.6 – Carregamento das lajes L15, L17 e L18 (dimensões em mm)

Na Tabela 3.2 é mostrado um resumo dos carregamentos de cada laje, das séries 1 e 2. Também é mostrada a intensidade de carga total aplicada em cada borda das lajes.

Tabela 3.2 – Carregamento das lajes das séries 1 e 2

Laje	Carregamento	Laje	Carregamento		
Série 1	L1		L8		
	L2		L10		
	L3		L11		
	L4		L12		
	L5		Série 2	L13	
	L6			L14	
	L7			L15	
	L9		L17		
	L16		L18		
L19					

3.2.3 Armadura de flexão

As armaduras de flexão negativa foram compostas por malhas ortogonais, com barras de 12,5mm de diâmetro, e posicionadas próximas ao bordo superior das lajes (cobrimento de 15mm). As Figuras 3.7 a 3.15 apresentam as armaduras de flexão utilizadas em todas as lajes.

Na Figura 3.7 é mostrado o detalhamento da armadura de flexão negativa das lajes sem furo, L1, L14 e L15, composta de malha ortogonal com 18 barras na direção x (EW) e 22 na direção y (NS). Tal diferenciação ocorreu pelo fato das barras na direção x se situarem acima das barras na direção y , provocando um braço de alavanca maior (d maior), deixando essa direção mais resistente, daí o número maior de barras na direção y , para que as resistências à flexão em ambas as direções fossem próximas. As medidas relativas aos distanciamentos das barras da armadura estão em cm , apenas os diâmetros das mesmas se encontram em mm . O cobrimento da armadura de flexão negativa foi de 15mm. Na mesma figura, também é mostrado o detalhamento da armadura do pilar, que foi o mesmo para todas as lajes ensaiadas. A ancoragem das barras se deu pela continuidade das mesmas, em suas extremidades, dobradas dentro da laje, com o comprimento de ancoragem mínimo de 42cm, calculado pelas recomendações da NBR 6118:2003.

A armadura de flexão positiva foi composta por uma malha ortogonal com 10 barras de 6,3mm de diâmetro, nas duas direções, espaçadas a cada 24cm. Nas lajes com furos, as barras que coincidiram com a posição do furo foram cortadas para que o mesmo fosse inserido, não havendo reposição de barras.

Nas Figuras 3.8 a 3.10 são mostrados os detalhamentos da armadura de flexão das lajes L2, L3, e L4, respectivamente. Esses detalhamentos foram propostos para averiguação de qual deles teria um melhor comportamento para a configuração de furo adotado para essas lajes (quadrado, com 400mm de lado, adjacente ao menor lado do pilar). O carregamento dessas lajes foi simétrico e será mostrado no item posterior.

Na Figura 3.8, laje L2, a armadura de flexão consistiu-se de malha ortogonal com 20 barras na direção x e 23 na direção y . As barras cortadas, devido à existência do furo, foram colocadas ao lado deste, agrupadas duas a duas junto com as barras existentes. Uma barra a mais foi adicionada na direção y devido à mudança no espaçamento entre as barras para o agrupamento duas a duas.

Na Figura 3.9, laje L3, a armadura de flexão consistiu-se de malha ortogonal com 22 barras na direção x e 21 na direção y . Foi mais concentrada nas regiões da laje próximas ao furo e da ligação com o pilar, com barras agrupadas duas a duas.

A Figura 3.10, laje L4, apresenta a proposta mais simples, com malha ortogonal com 14 barras na direção x e 18 na direção y . Foi efetuada simplesmente a retirada sem reposição das barras que seriam cortadas devido ao furo.

Todas as barras, mesmo as interrompidas pelo furo, tiveram ancoragem em suas extremidades com o comprimento mínimo de 42cm.

A laje L5 teve o mesmo detalhamento da armadura de flexão da laje L3. A laje L6 teve o detalhamento semelhante ao da laje L3, com a retirada de duas barras de reforço próximas ao furo, na direção y , para colocação da armadura de cisalhamento, mostrado na Figura 3.11.

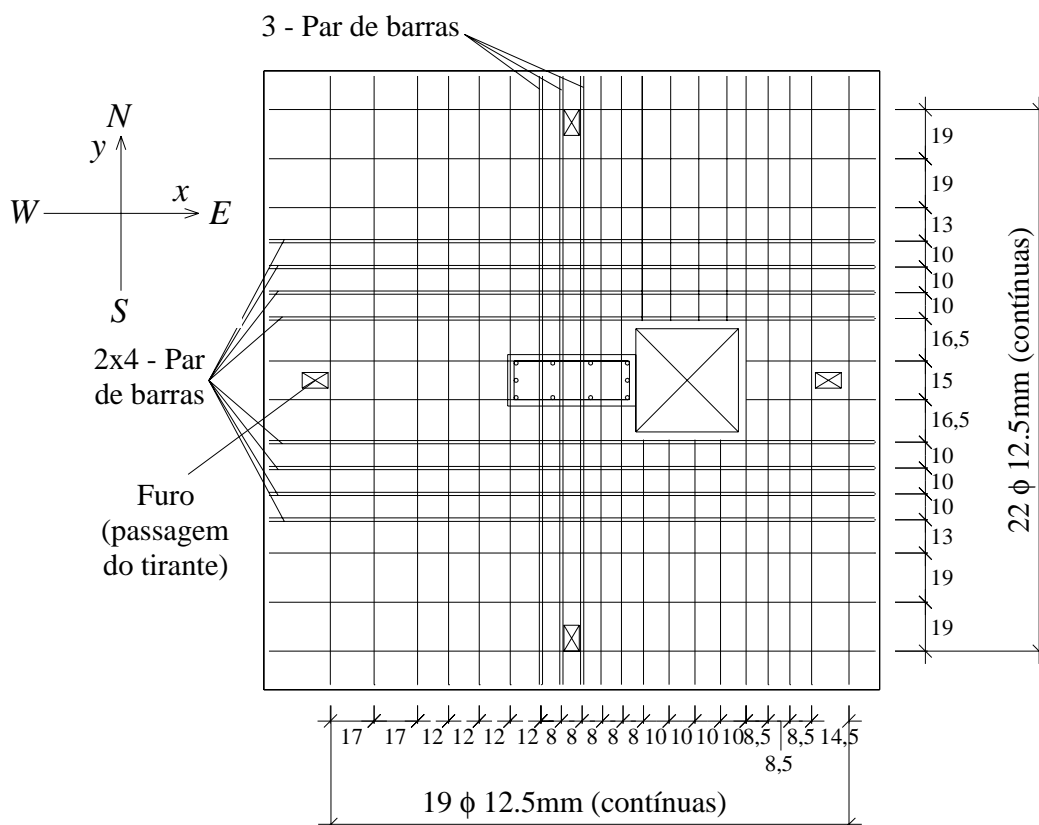
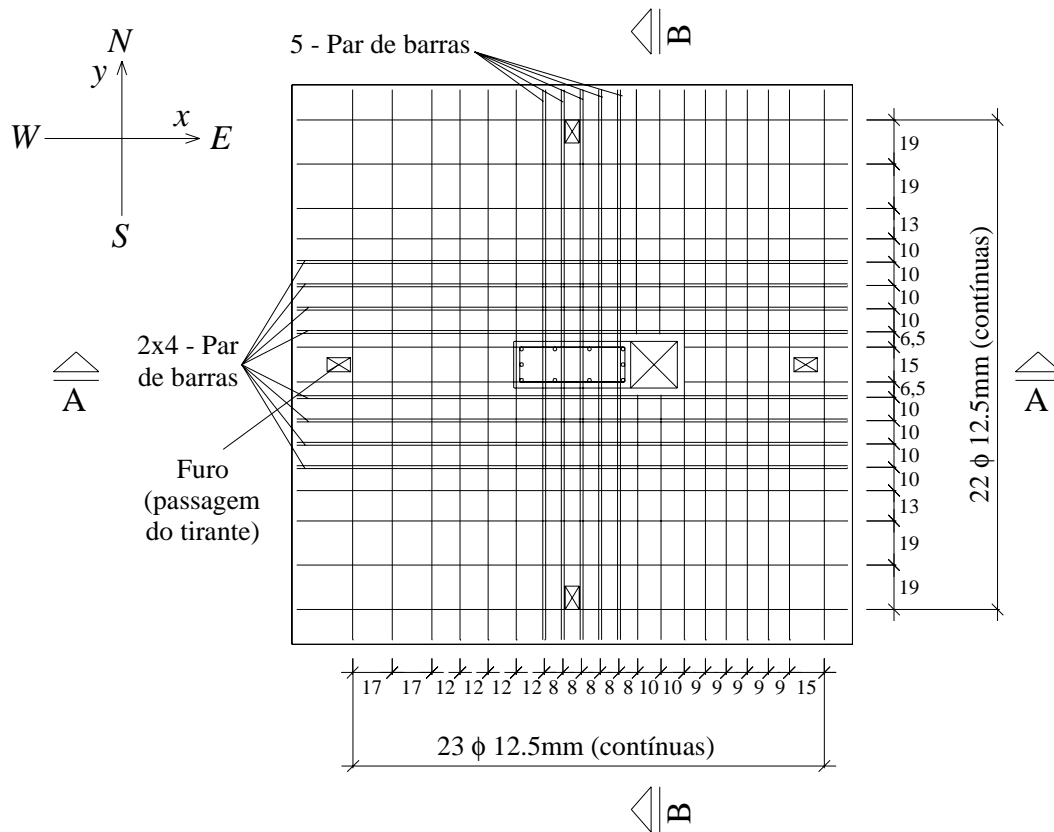


Figura 3.11 – Armadura de flexão da laje L6 (cm)

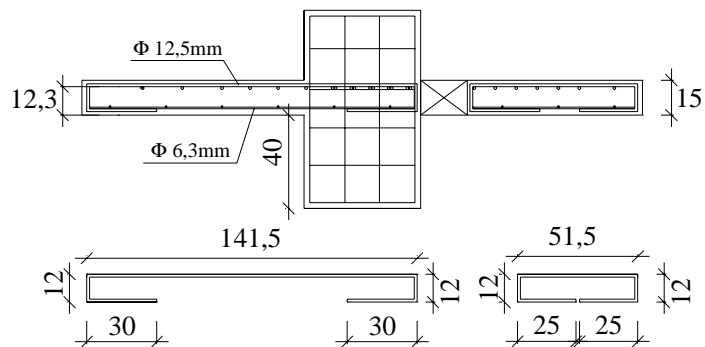
Na Figura 3.12 é mostrado o detalhamento da armadura de flexão das lajes L7, L8, L11 e L12. A armadura consistiu-se de malha ortogonal com 22 barras na direção x e 23 na direção y e foi concebida baseada na disposição da armadura de flexão da laje L3, que apresentou melhores resultados em relação às armaduras das lajes L2 e L4. Houve uma adição de barras na região da laje próxima a ligação com o pilar e com o furo (quadrado, com 200mm de lado, adjacente ao menor lado do pilar). Tais barras foram agrupadas duas a duas nessa região.

Na Figura 3.13 é apresentado o detalhamento da armadura de flexão das lajes L9, L10, e L13. A armadura foi composta de uma malha ortogonal com 22 barras na direção x e 26 na direção y . Também foi feito o reforço da armadura de flexão na região da laje próxima a ligação do pilar com os furos. As barras foram agrupadas duas a duas.

A Figura 3.14 contém o detalhamento da armadura de flexão das lajes L16 e L17. A armadura foi composta de malha ortogonal com 19 barras na direção x e 22 na direção y . Houve reforço da armadura de flexão, composta por barras agrupadas duas a duas, na direção y , próximo ao furo, e, na direção x , após o furo.



CORTE AA



CORTE BB

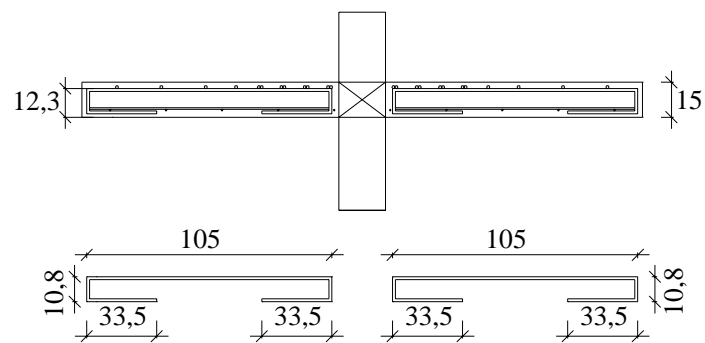


Figura 3.12 – Armadura de flexão das lajes L7 e L8, L11 e L12 (cm)

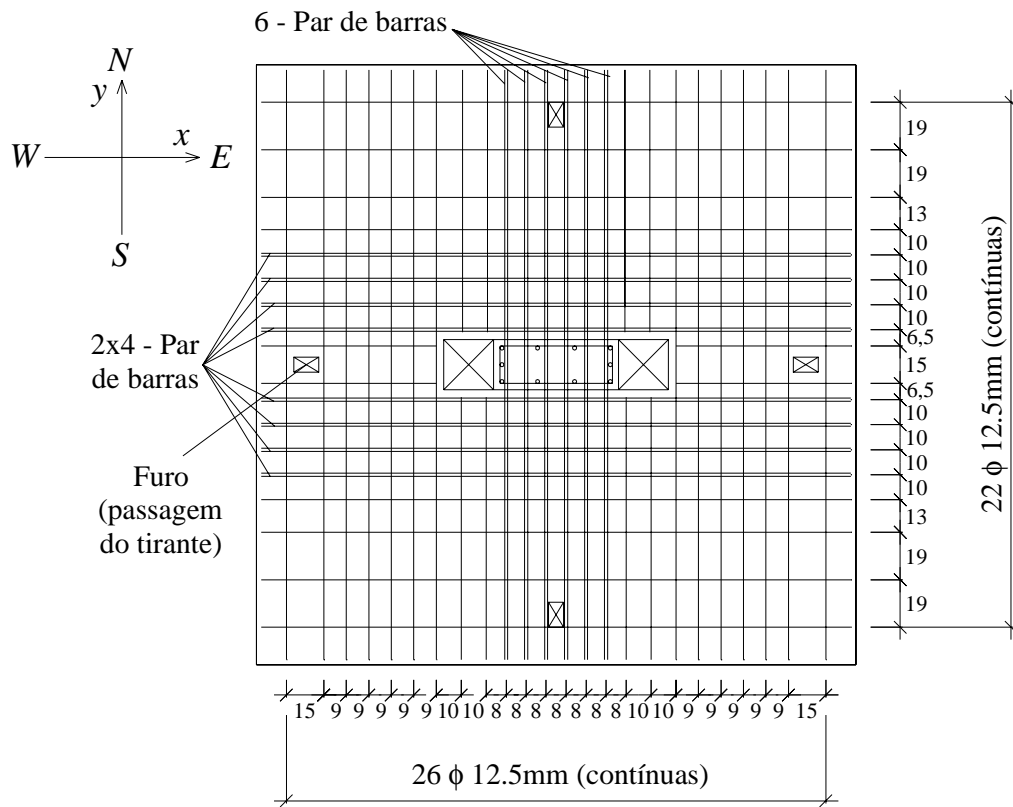


Figura 3.13 – Armadura de flexão das lajes L9 e L10, L13 (cm)

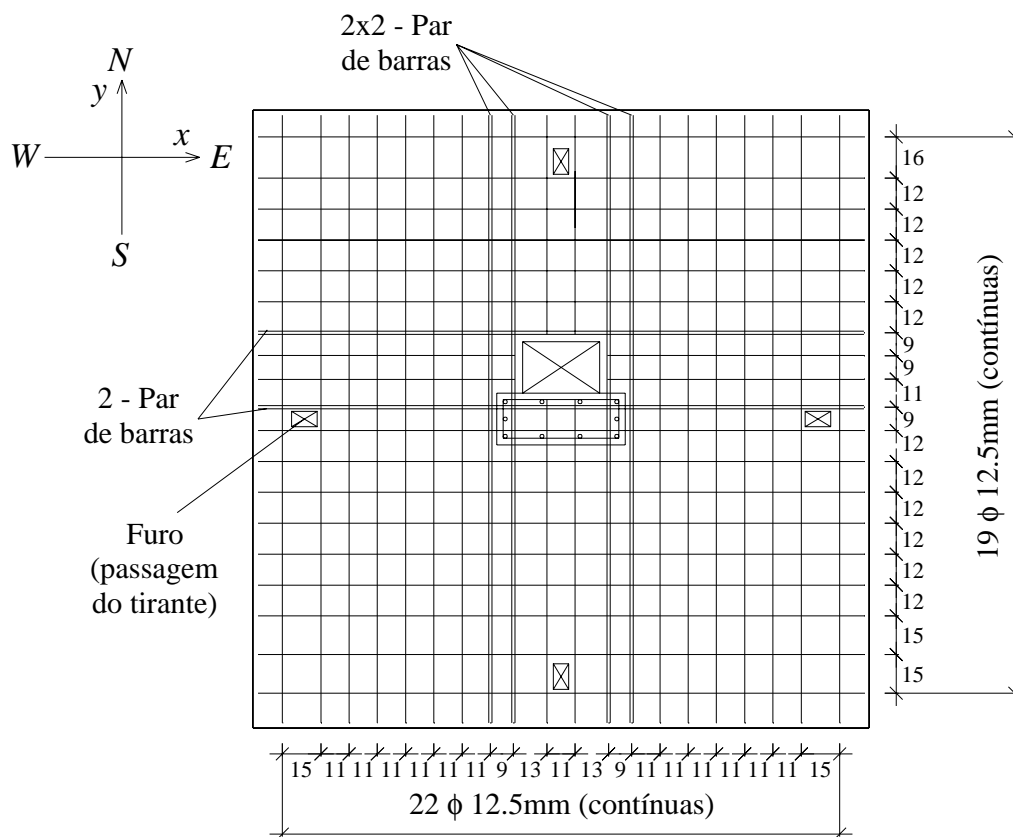


Figura 3.14 – Armadura de flexão das lajes L16 e L17 (cm)

Na Figura 3.15 pode ser visto o detalhamento da armadura de flexão das lajes L18 e L19. A armadura foi composta de malha ortogonal com 20 barras na direção x e 22 na direção y . Houve reforço da armadura de flexão, na direção y da laje próxima à ligação com o pilar e com os furos, e, na direção x , após os furos. No reforço, barras foram agrupadas duas a duas.

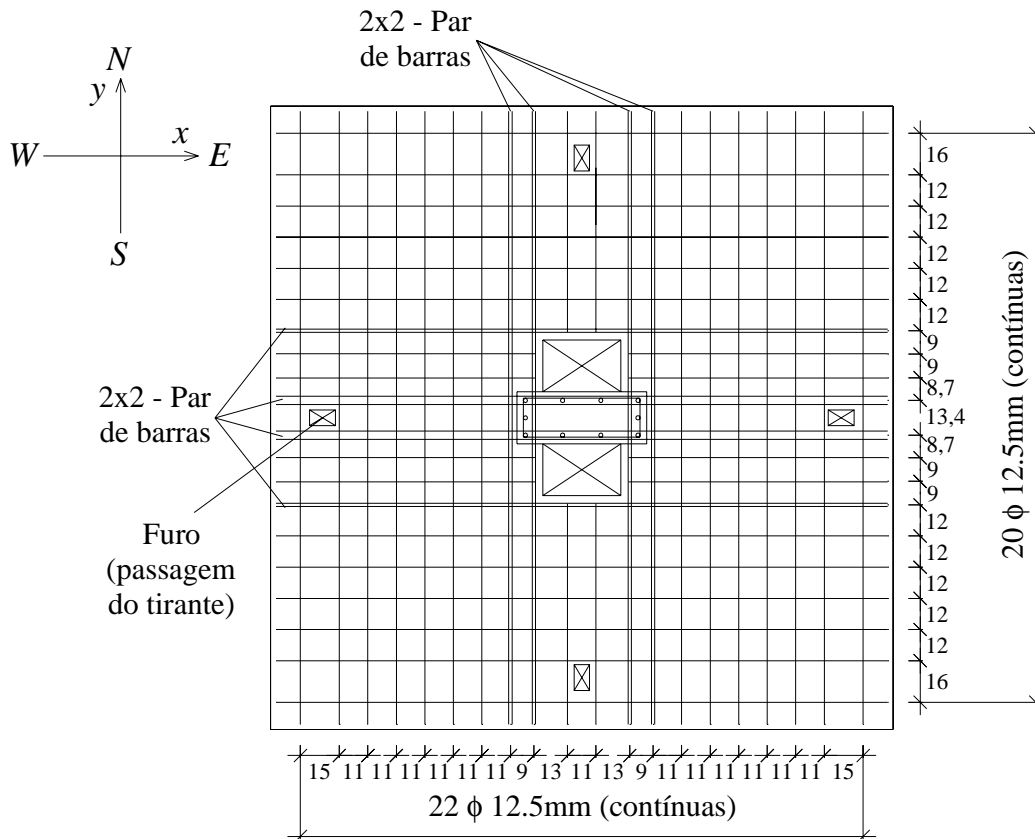


Figura 3.15 – Armadura de flexão das lajes L18 e L19 (cm)

A altura efetiva, d , foi conferida antes da concretagem das lajes, em diversos pontos próximos ao pilar. As medidas foram sempre iguais ou próximas da altura efetiva de projeto, 123mm. A altura efetiva medida tem uma precisão de 2mm, para mais ou para menos.

Na Tabela 3.3 é apresentado um resumo das características das lajes quanto a: geometria (modelo 1 ao 6), armadura (taxas de armadura – ρ_x , ρ_y e ρ , alturas efetivas – d_x , d_y e d) e carregamento.

As taxas de armadura foram calculadas conforme indicado pelo EUROCODE 2 (EC2/2006), a uma largura igual à dimensão do pilar mais “3d” para cada um dos lados.

Tabela 3.3 – Caracterização das lajes

Laje	Modelo	d_y (mm)	d_x (mm)	$d^{(1)}$ (mm)	$\rho_y^{(2)}$ (%)	$\rho_x^{(2)}$ (%)	$\rho^{(3)}$ (%)	
Série 1	L1	1	115	127	121	1,05	0,83	0,93
	L2	2	116	129	123	0,93	0,81	0,87
	L3	2	119	131	125	1,16	1,18	1,17
	L4	2	118	130	124	0,67	0,40	0,52
	L5	2	116	128	122	1,20	1,23	1,22
	L6	2	115	127	121	1,05	1,25	1,14
	L7	3	116	129	123	1,36	1,62	1,48
	L9	4	116	129	123	1,36	1,62	1,48
	L16	5	118	131	125	1,16	0,89	1,01
	L19	6	120	132	126	1,14	0,97	1,05
Série 2	L8	3	116	129	123	1,36	1,62	1,48
	L10	4	116	129	123	1,36	1,62	1,48
	L11	3	119	131	125	1,32	1,57	1,44
	L12	3	116	129	123	1,36	1,62	1,48
	L13	4	118	123	124	1,34	1,60	1,46
	L14	1	115	127	121	1,05	0,83	0,93
	L15	1	116	129	123	1,02	0,81	0,91
	L17	5	118	131	125	1,16	0,89	1,01
L18	6	120	132	126	1,14	0,97	1,05	

$$^{(1)} d = (d_x + d_y)/2$$

$$^{(2)} \rho_x = 100.(A_{s_x})/(d_x.(500+6d)); \rho_y = 100.(A_{s_y})/(d_y.(200+6d))$$

$$^{(3)} \rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$$

3.2.4 Armadura de cisalhamento

Apenas duas lajes tiveram armadura de cisalhamento, as lajes L5 e L6. As armaduras de cisalhamento foram constituídas de duas barras dobradas, bent bar, com uma inclinação de 45°, iniciando na altura da malha de flexão, da direção y, e chegando a uma profundidade vertical de 95mm, como mostrado na Figura 3.16.

A diferença entre as armaduras de cisalhamento das lajes se deu pela localização. Na laje L5, uma barra dobrada estava situada a 2cm do furo e a outra a 10cm deste – Figura 3.17 e 3.18. Na laje L6, uma barra dobrada distanciava-se 4,4cm e a outra 12,4cm do furo – Figura 3.19 e 3.20.

A armadura de cisalhamento foi utilizada devido aos resultados de carga de ruptura das lajes, com furo de 400x400mm e sem armadura de cisalhamento, terem sido muito baixos.

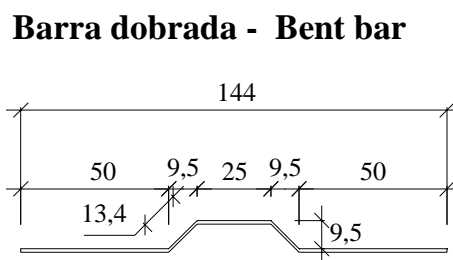


Figura 3.16 – Armadura de cisalhamento das lajes L5 e L6 – barra dobrada

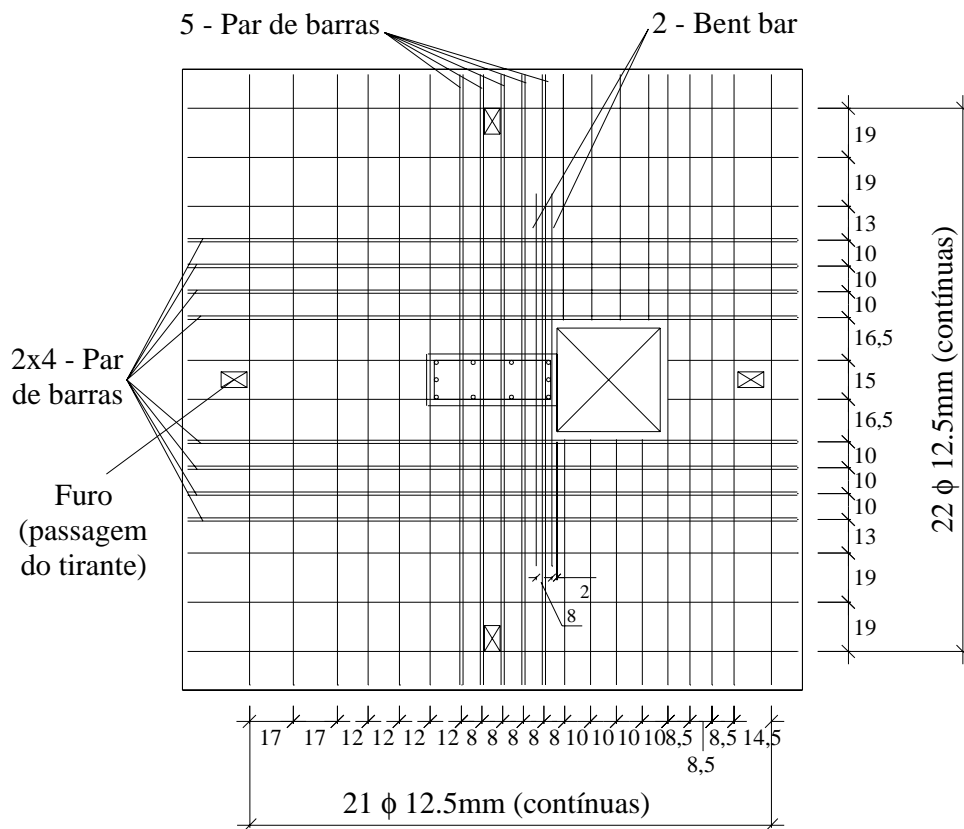


Figura 3.17 – Posicionamento da armadura de cisalhamento da laje L5 (cm)



Figura 3.18 – Fotografia da armadura de cisalhamento da laje L5

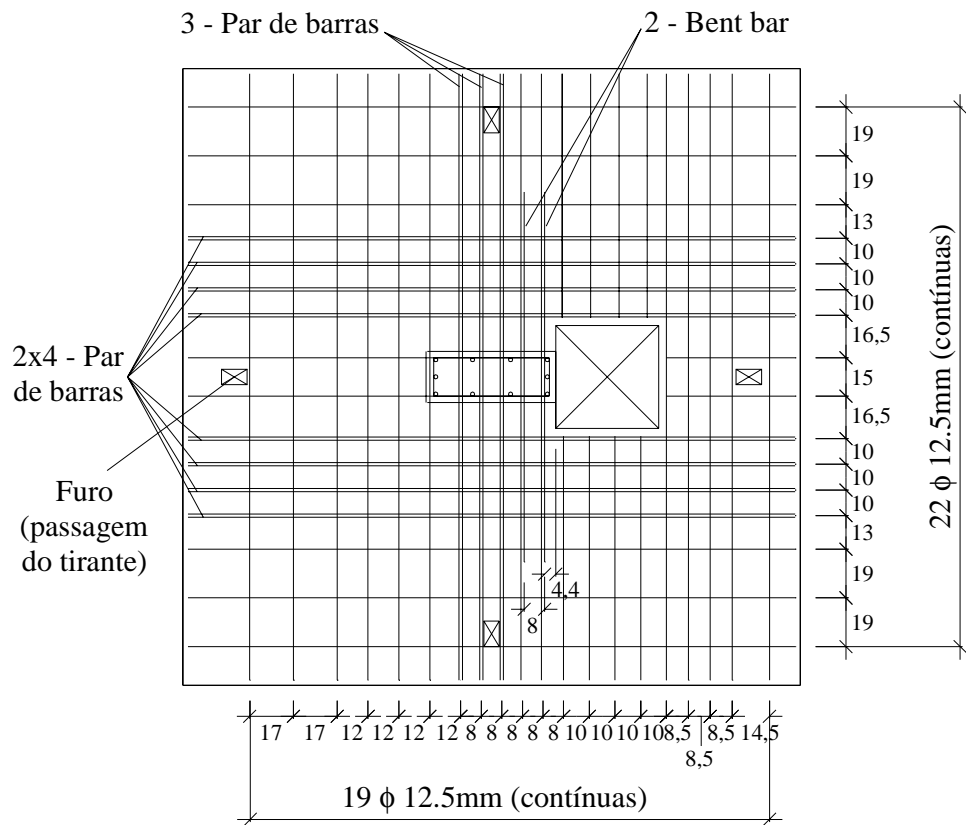


Figura 3.19 – Posicionamento da armadura de cisalhamento da laje L5 (cm)



Figura 3.20 – Fotografia da armadura de cisalhamento da laje L6

3.2.5 Materiais

3.2.5.1 Aço

O aço utilizado foi do tipo CA-50. Para obtenção das propriedades mecânicas desse material, foram ensaiadas amostras conforme a NBR 6152:1992. Na Tabela 3.4 são apresentadas as propriedades mecânicas dos aços utilizados em todas as lajes.

Os aços com diâmetros de 16,0mm e 5,0mm, para todas as lajes, foram de um mesmo lote.

O aço com diâmetro de 12,5mm teve origem de três lotes diferentes: lote 1 para as lajes L1 a L12, lote 2 para as lajes L13 e L14 e lote 3 para as lajes L15 a L19.

O aço com diâmetro de 6,3 mm teve origem de dois lotes distintos: lote 1 para as lajes L1 a L14 e lote 2 para as lajes L15 a L19.

No Apêndice A são mostrados os gráficos “Tensão x Deformação” dos aços utilizados.

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados

Lote	Diâmetro (mm)	f_y (MPa)	f_u (Mpa)	ϵ_y (mm/m)	E_s (GPa)	Utilização das barras
1	5,0	704	736	5,4	208	Estribos dos pilares de todas as lajes
1	6,3	649	766	2,2	273	Armadura inferior de flexão das lajes L1 a L14
2	6,3	673	807	2,9	213	Armadura inferior de flexão das lajes L15 a L19
1	12,5	595	739	2,7	200	Armadura superior de flexão das lajes L1 a L12 Armadura de cisalhamento das lajes L5 e L6
2	12,5	623	770	2,4	205	Armadura superior de flexão das lajes L13 e L14
3	12,5	583	710	2,4	236	Armadura superior de flexão das lajes L15 a L19
1	16,0	595	739	2,7	200	Armadura longitudinal dos pilares de todas as lajes

3.2.5.2 Concreto

O concreto utilizado para todas as lajes foi dosado para atingir 30MPa de resistência característica à compressão. O concreto foi usinado e fornecido pela empresa REALMIX CONCRETO Ltda. A composição por metro cúbico do concreto está discriminado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Composição do concreto por m³

Material	Peso (kg)
Cimento (CPII F32)	405
Areia natural (dimensão máxima de 4,8mm)	410
Areia artificial (dimensão máxima de 4,8mm)	270
Brita 0 (dimensão máxima de 12,5mm)	510
Brita 1 (dimensão máxima de 19,0mm)	510
Água	200
Aditivo superplastificante - 2,43 litros	

Foram realizados os seguintes ensaios, para as idades de 7, 14, 21, 28, 60 e/ou 90 dias: resistência à compressão simples, segundo a NBR 5739:1994, (f_c); resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222:2004, (f_t); e módulo de elasticidade secante entre as tensões iguais a 0,5MPa e 30% da resistência à compressão do concreto, segundo a NBR 8522:1984, (E_c). Para cada ensaio foram testados dois corpos de prova. O resultado considerado é a média dos resultados de cada um deles. Os resultados dos ensaios para cada grupo de lajes concretadas na mesma data estão dispostos nas Tabelas 3.6 a 3.8.

As lajes foram ensaiadas após atingir resistência à compressão simples maior ou igual a 30MPa e módulo de elasticidade secante maior ou igual a 21GPa.

A laje, com a data de seu ensaio coincidente com o dia de ensaio do concreto, teve considerada sua resistência à compressão, a mesma daquela obtida no dia do ensaio do concreto. A determinação da resistência à compressão do concreto, para lajes com datas de seus ensaios diferentes das datas dos ensaios de concreto, foi feita pela interpolação entre os resultados de resistência à compressão das datas anterior e posterior a cada ensaio. A resistência à compressão do concreto, de cada laje, na data de seus respectivos ensaios, pode

ser vista nos gráficos, resistência à compressão x tempo (dias), das Figuras 3.21 a 3.28 e na Tabela 3.9.

Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas do concreto das lajes L1 a L4

Tempo (dias)	Grupo de lajes								
	L1			L2 e L3			L4		
	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)
7	25,0	23,6	2,7	28,4	21,0	2,6	31,9	21,9	-
14	28,9	23,0	3,1	29,4	23,0	3,0	33,3	-	-
21	32,1	23,3	2,9	30,5	21,6	3,0	34,2	24,9	3,7
28	33,7	24,0	3,1	32,3	23,3	3,4	35,9	26,4	3,9
60	-	-	-	39,5	-	-	40,0	-	-
78 (ensaio da laje L1)	37,8	25,2	3,6	-	-	-	-	-	-

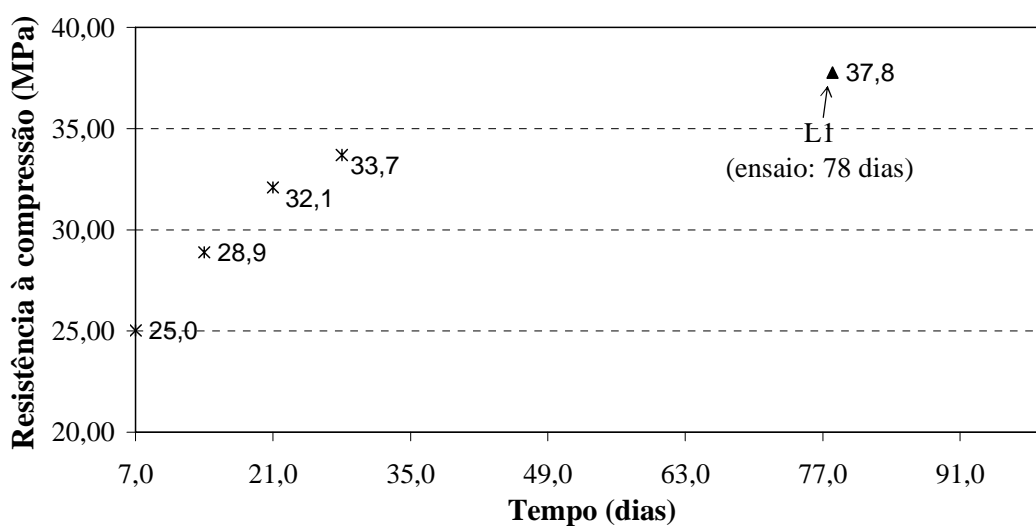


Figura 3.21 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto da laje L1

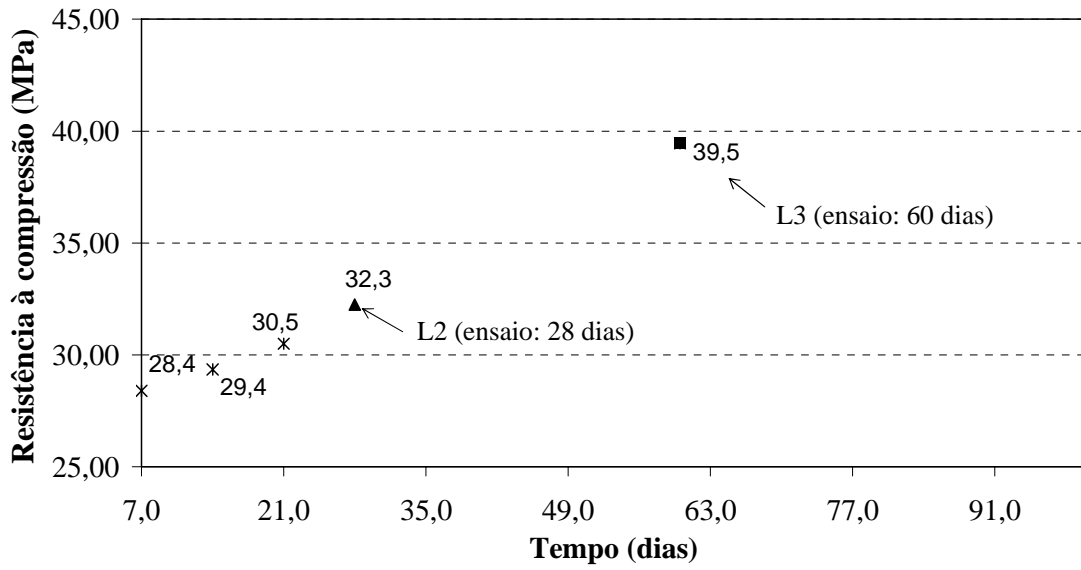


Figura 3.22 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L2 e L3

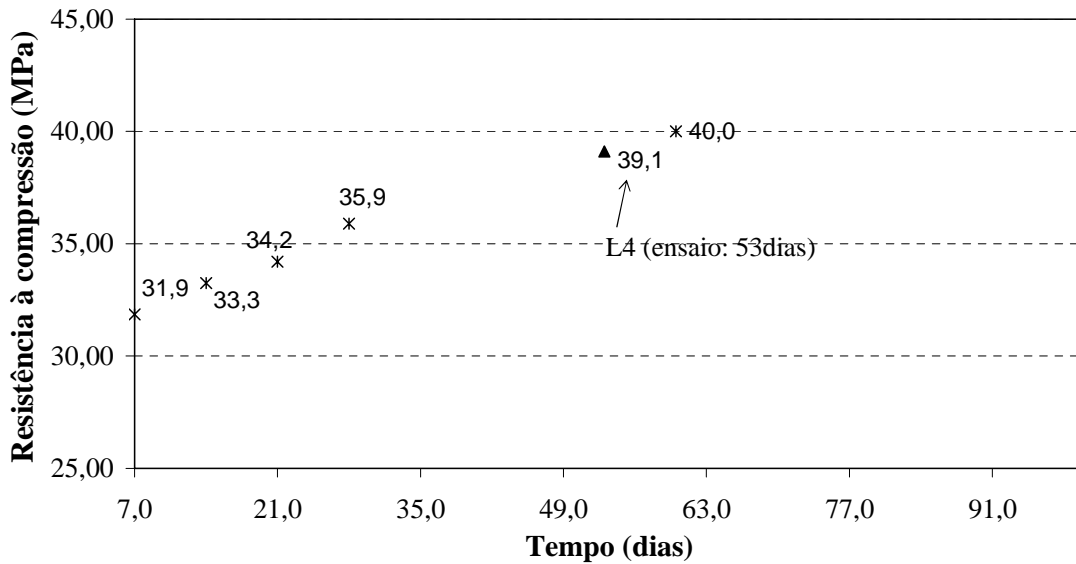


Figura 3.23 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto da laje L4

A laje L1 teve ensaios de caracterização do concreto aos 78 dias, coincidindo com a data do ensaio da laje.

Tabela 3.7– Propriedades mecânicas do concreto das lajes L5 a L13

Tempo (dias)	Grupo de lajes								
	L5 a L7			L8 e L10			L11 a L13		
	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)
7	27,1	20,9	3,0	25,8	18,7	2,4	34,7	23,1	2,6
14	32,0	22,0	3,2	27,7	21,3	2,8	35,7	24,9	3,1
21	35,0	23,5	3,0	28,9	22,1	3,0	36,0	24,3	3,4
28	36,8	25,3	3,3	30,9	21,8	3,6	36,2	24,7	3,3
60	36,7	27,0	4,1	34,2	24,4	3,7	-	-	-
90	38,7	27,5	3,8	-	-	-	37,8	24,7	3,4
133 (ensaio da laje L10)	-	-	-	34,2	25,3	3,1	-	-	-

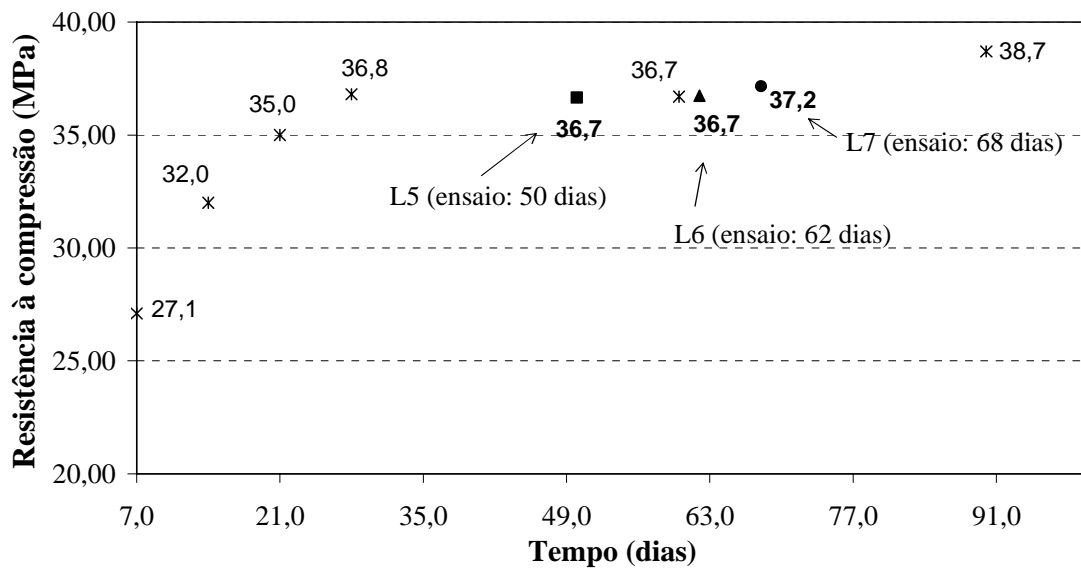


Figura 3.24 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L5 a L7

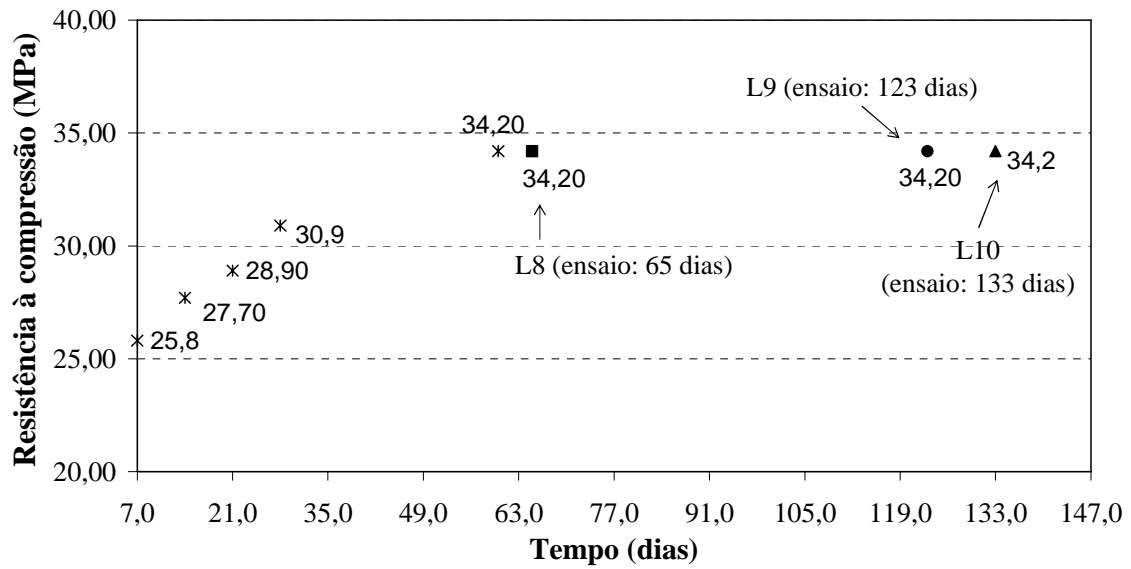


Figura 3.25 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L8 a L10

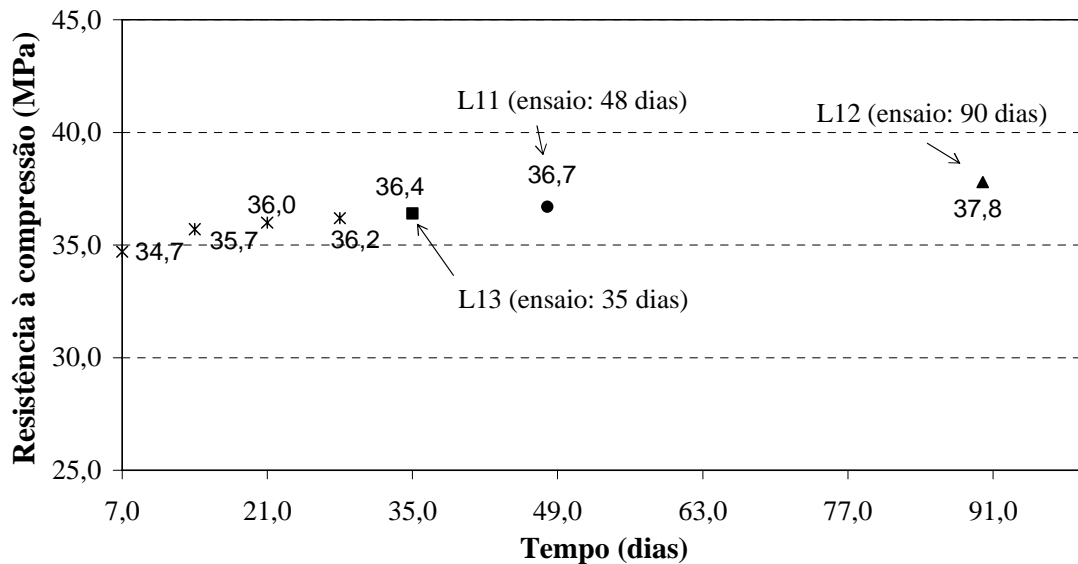


Figura 3.26 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L11 a L13

Para o grupo de lajes L8 a L10, foram feitos ensaios de caracterização 133 dias após a concretagem, coincidindo com a data de ensaio da laje L10.

Tabela 3.8– Propriedades mecânicas do concreto das lajes L14 a L19

Tempo (dias)	Grupo de lajes					
	L14 a L16			L17 a L19		
	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)	E_c (GPa)	f_t (MPa)
7	36,3	24,2	2,7	31,3	21,0	3,1
14	38,3	25,5	3,0	34,7	21,7	3,3
21	39,9	23,8	3,2	35,7	21,7	3,2
28	41,5	27,5	3,5	36,0	23,4	3,4
60	-	-	-	39,2	24,0	3,5
90	48,3	28,5	3,8	-	-	-

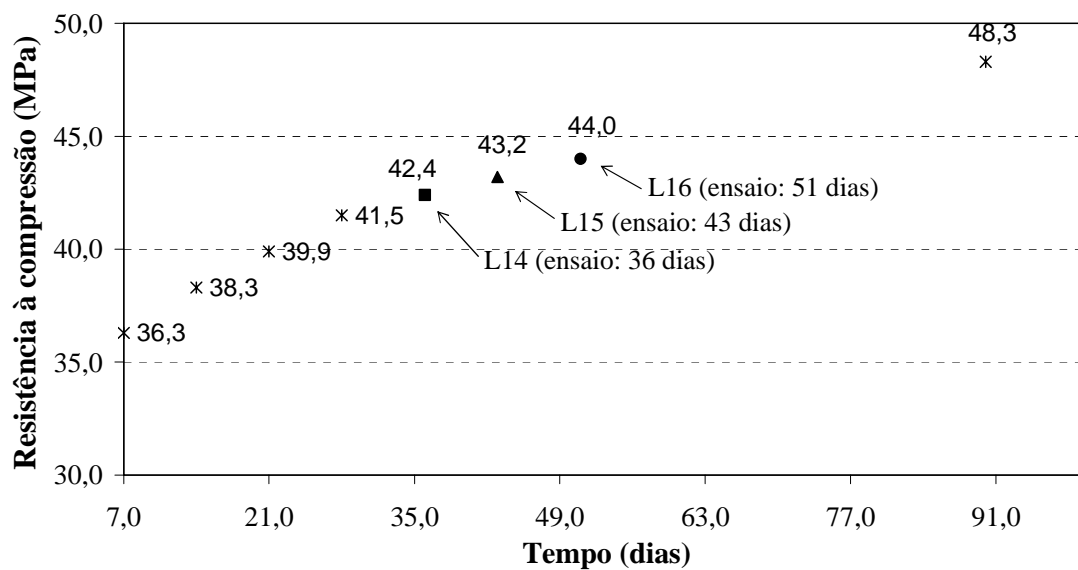


Figura 3.27 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L14 a L16

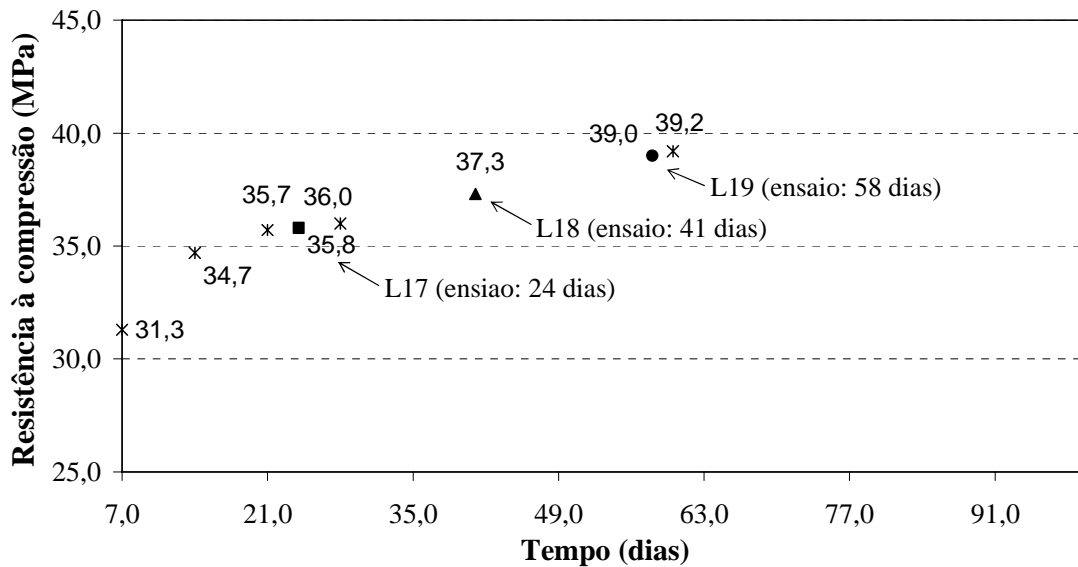


Figura 3.28 – Gráfico resistência à compressão x tempo, do concreto das lajes L17 a L19

Tabela 3.9– Resistência à compressão de cada laje na data dos ensaios

Série 1										
Laje	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L9	L16	L19
Tempo da data do ensaio (dias)	78	28	60	53	50	62	68	123	51	58
Resistência à Compressão, f_c (MPa)	37,8	32,3	39,5	39,1	36,7	36,7	37,2	34,2	44,0	39,0

Série 2									
Laje	L8	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L17	L18
Tempo da data do ensaio (dias)	65	133	48	90	35	36	43	24	41
Resistência à Compressão, f_c (MPa)	34,2	34,2	36,7	37,8	36,4	42,4	43,2	35,8	37,3

3.2.6 Moldagem e cura

As lajes foram moldadas em formas metálicas. Em cada forma foi encaixado um tubo metálico, com 830mm de comprimento e 75mm de diâmetro, no centro do pilar, para posterior passagem do tirante central; e quatro tubos metálicos retangulares com medidas externas de 60mm x 100mm, para posterior passagem dos tirantes laterais.

Para a moldagem das lajes com furos, foram feitos moldes com Poliestireno Expandido (isopor) com as dimensões dos furos, que foram colocados nos locais desses. Sobre os moldes foram colocados pesos para que não se deslocassem durante a concretagem.

As Figuras 3.29 a 3.33 mostram fotografias das formas metálicas e das armaduras antes da concretagem.



Figura 3.29 – Fotografia das lajes L3 e L4 prontas para moldagem



Figura 3.30 – Fotografia das lajes L9 e L10 antes da moldagem



Figura 3.31 – Fotografia das lajes L11, L12 e L13 prontas para moldagem



Figura 3.32 – Fotografia das lajes L14 antes da moldagem



Figura 3.33 – Fotografia das lajes L17 e L18 antes da moldagem

Após início da pega do concreto, foi colocada água sobre as lajes e estas foram cobertas por lonas durante 7 (sete) dias. A água foi reabastecida duas vezes por dia, durante os três primeiros dias, e uma vez nos restantes.

3.3 SISTEMA DE ENSAIO

O sistema de ensaio pode ser visto nas Figuras 3.34 e 3.35.

As lajes foram carregadas de cima para baixo por meio de quatro ou três atuadores hidráulicos vazados, conforme o carregamento. Os atuadores hidráulicos, da marca YELLOW POWER, com capacidade de 300kN, foram posicionados em cima de vigas de distribuição metálicas (aço SAC1045), dispostas nas bordas da laje. Cada viga estava apoiada em duas placas metálicas (aço SAC1045) de distribuição, assentadas na laje, por onde o carregamento foi transmitido.

Os atuadores foram ancorados em quatro tirantes metálicos, com 29mm de diâmetro (aço encruado, $f_y = 750\text{MPa}$ – dado do fabricante), da marca ROCSOLO, fabricado pela empresa ESTE ENGENHARIA S.A.. Os tirantes atravessaram a laje e as vigas metálicas através de furos previamente feitos. Na laje, esses furos foram encamisados por tubos metálicos. Os tirantes foram ancorados na laje de reação.

A reação ao carregamento ocorreu no pilar central, ligado monoliticamente à laje. O pilar foi apoiado sobre um bloco de concreto armado de formato cúbico, com arestas de 600mm. O bloco foi inserido para facilitar o deslocamento embaixo da laje e teve a função de transmitir a reação da peça de ensaio à laje de reação.

Anteriormente à aplicação de carga, foi feita a protensão do pilar central. A protensão foi efetuada por um atuador hidráulico vazado, com capacidade de 1500kN, apoiado numa caixa metálica de protensão (aço SAC1045). Este atuador foi ancorado por um tirante, com 44mm de diâmetro, ROCSOLO, que atravessa a caixa metálica de protensão, o pilar e o bloco (furos encamisados por tubos de aço no pilar e no bloco).

Devido ao momento transferido ao pilar, foi decidida pela introdução da protensão no pilar para prevenir a rotação e, também, simular o carregamento do pilar por laje superior.

Após a aplicação da carga de protensão utilizando o atuador, uma porca, ROCSOLO, rosqueada no tirante central até que estivesse dentro da caixa metálica de protensão, foi apertada junto ao pilar e uma placa metálica (aço SAC1045). Depois desse procedimento, o atuador hidráulico foi descarregado, mas a carga permaneceu no pilar, ancorada pelo sistema de porca e arruela situado dentro da caixa metálica (com uma perda inicial de protensão de aproximadamente 13%).

Foi utilizado um sistema de proteção para a protensão do pilar, que constitui em uma caixa de madeira preenchida com espuma de poliuretano e fixada por correntes presas a dois tirantes laterais. A caixa foi colocada sobre o tirante de maneira que, se houvesse ruptura do tirante, o sistema não permitisse que o mesmo seguisse projeção para cima, evitando um possível acidente.

Durante a protensão da última laje, o tirante se rompeu e o sistema de proteção teve desempenho conforme esperado. A ruptura ocorreu na região próxima à ancoragem, embaixo da laje de reação. O conjunto porca-arruela, da ancoragem, não ficou perfeitamente posicionado e o tirante foi tracionado de maneira irregular nessa região, o que provavelmente levou à ruptura. O problema foi solucionado com a colocação de uma arruela metálica (aço SAC1045), com 62,5mm de espessura, com o furo mais justo no tirante, entre a porca e a arruela existente. Desta maneira, o tirante foi tracionado de maneira regular.

Para constatação dos carregamentos aplicados na laje foram utilizadas quatro células de carga vazadas, da marca KRATOS, com capacidade de 500kN, situadas entre os atuadores hidráulicos e a ancoragem dos tirantes.

Para verificação da protensão foi utilizada outra célula de carga vazada, da marca MSI, com capacidade de 1500kN, localizada embaixo da laje de reação, entre a ancoragem do tirante central e a laje de reação – Figura 3.36.

Para o acionamento dos atuadores hidráulicos foram utilizadas bombas hidráulicas manuais YELLOW POWER e AIR POWER.

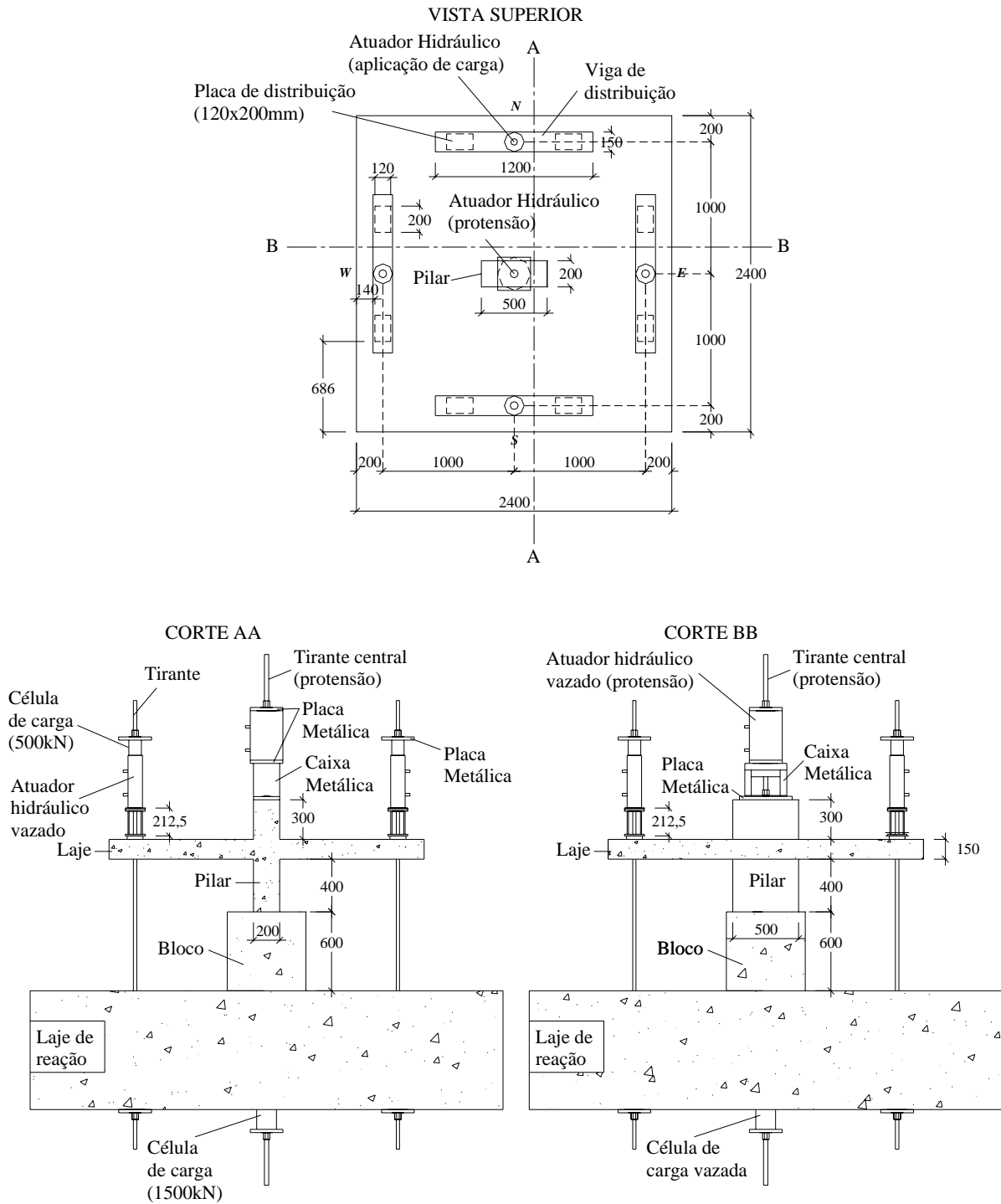


Figura 3.34 – Sistema de ensaio, vista superior e cortes (mm)



Figura 3.35 – Fotografias do sistema de ensaio



Figura 3.36 – Célula de carga - protensão

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1 Deslocamento vertical da laje

Para medir os deslocamentos verticais em pontos específicos, na face superior da laje, foram utilizados relógios comparadores digitais da marca Mitutoyo, com cursor de 14mm e com precisão de 0,01mm.

Os defletômetros, também conhecidos por relógios comparadores, foram acoplados a uma base também da marca Mitutoyo, que tem um suporte magnético, ou por bases fixas fabricadas para esse fim.

Estas bases foram fixadas em um sistema auxiliar. Para as lajes L1 a L4, foi utilizado um sistema de fixação composto de vigas metálicas auxiliares, como mostrado na Figura 3.37. Para as demais lajes foi concebido um novo sistema auxiliar de apoio possibilitando um melhor deslocamento sobre as lajes durante o ensaio, Figura 3.38.

Os posicionamentos dos pontos de leitura nas lajes são mostrados nas Figuras 3.39 a 3.44. Nas lajes sem furos, foram utilizados 12 defletômetros. Nas lajes com furo, não foram utilizados os relógios que ficariam na região do furo.



Figura 3.37 – Fotografia da estrutura para fixação dos defletômetros utilizados nas lajes L1 a L4

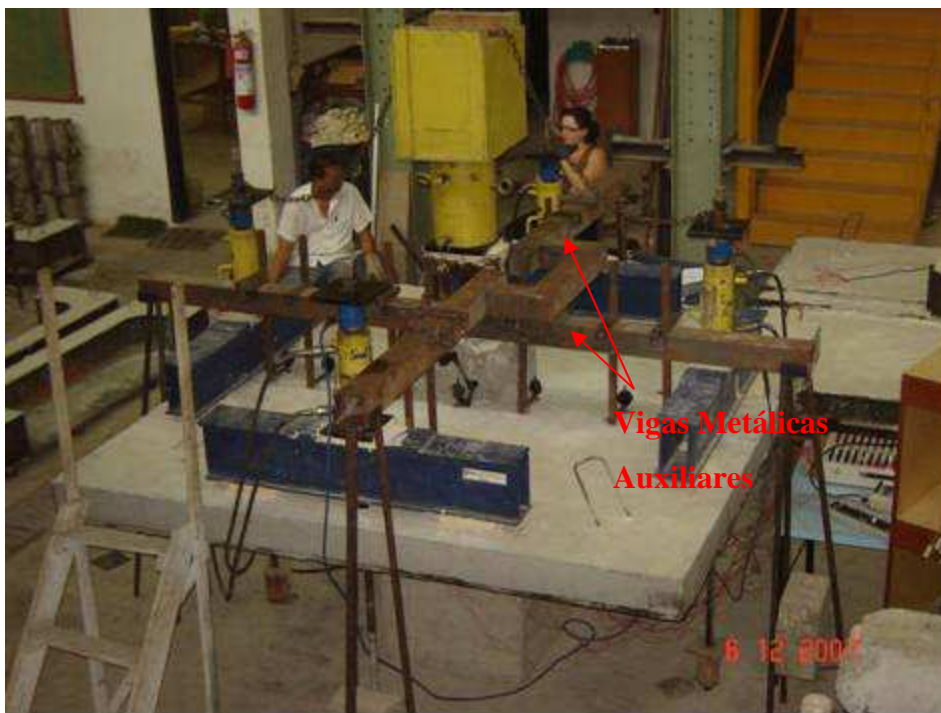


Figura 3.38 – Fotografia da estrutura para fixação dos defletômetros utilizados nas lajes L5 a L19

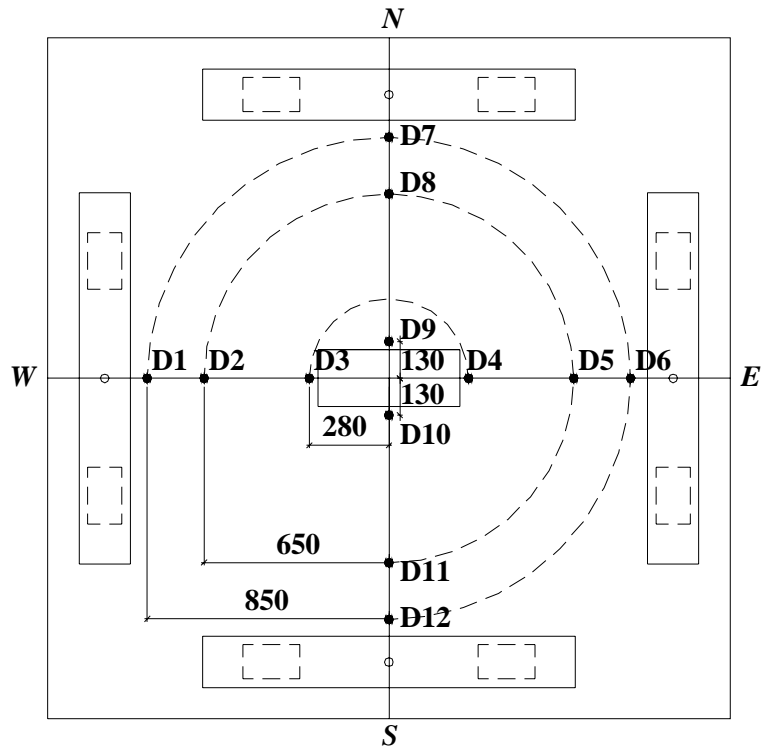


Figura 3.39 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 1 (mm)

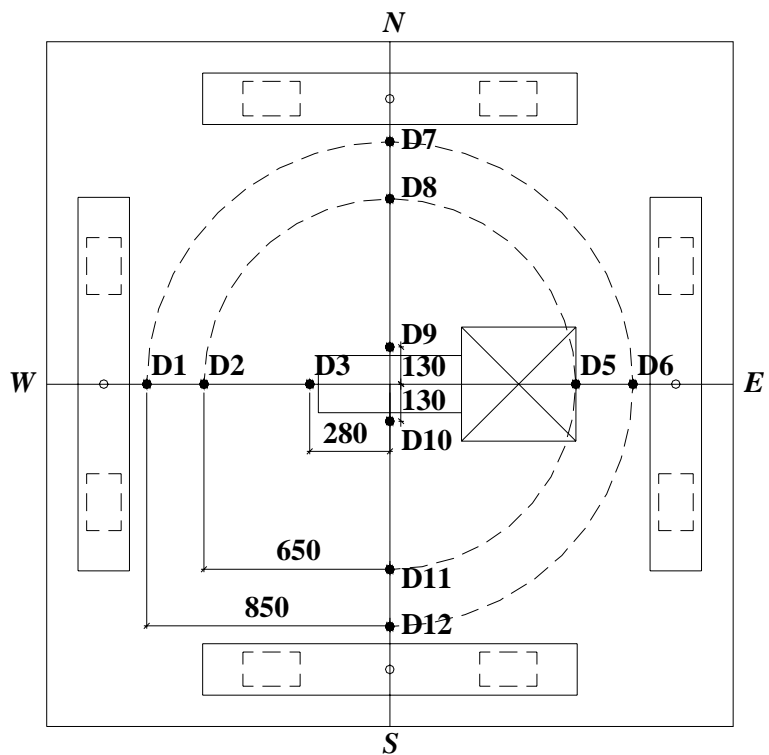


Figura 3.40 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 2 (mm)

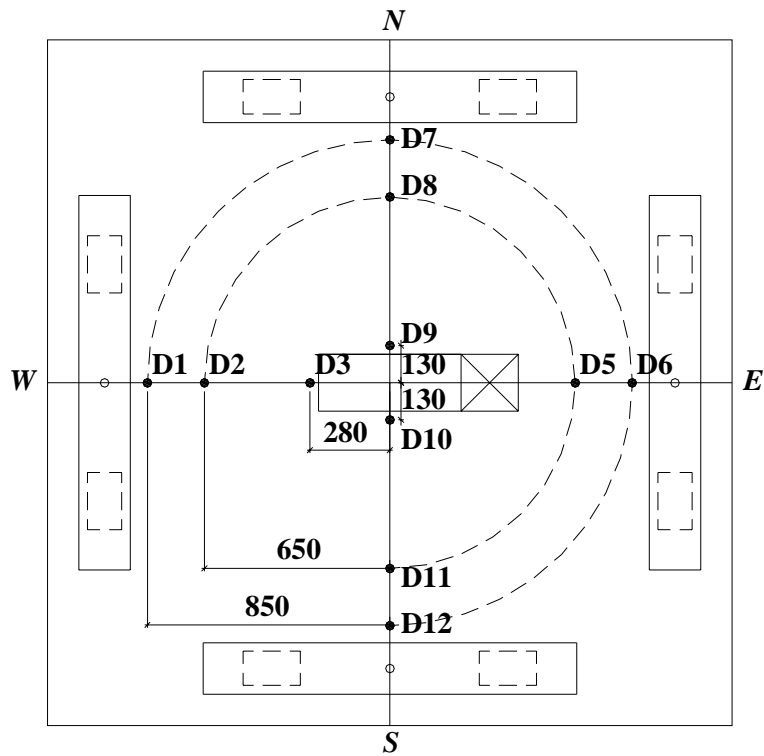


Figura 3.41 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 3 (mm)

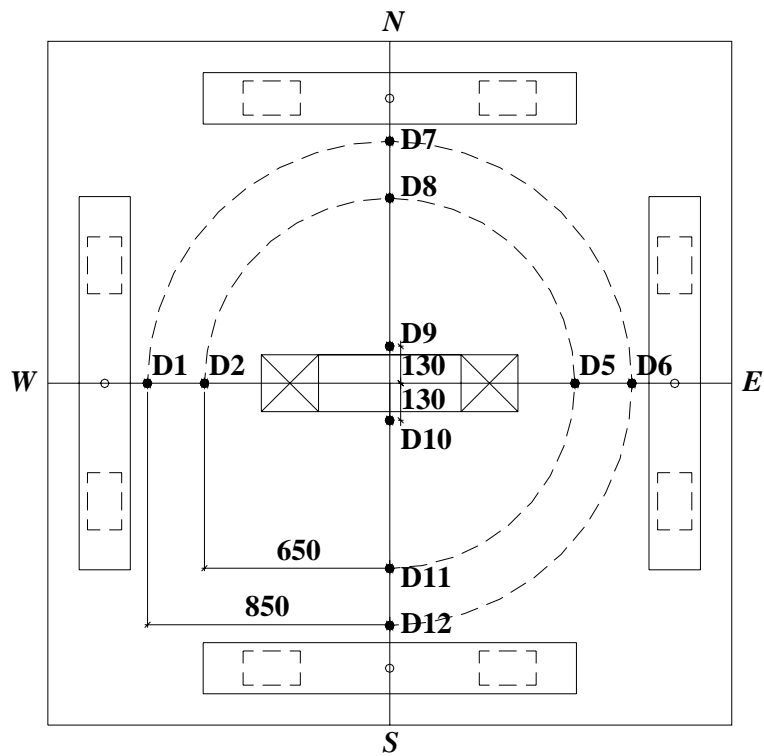


Figura 3.42 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 4 (mm)

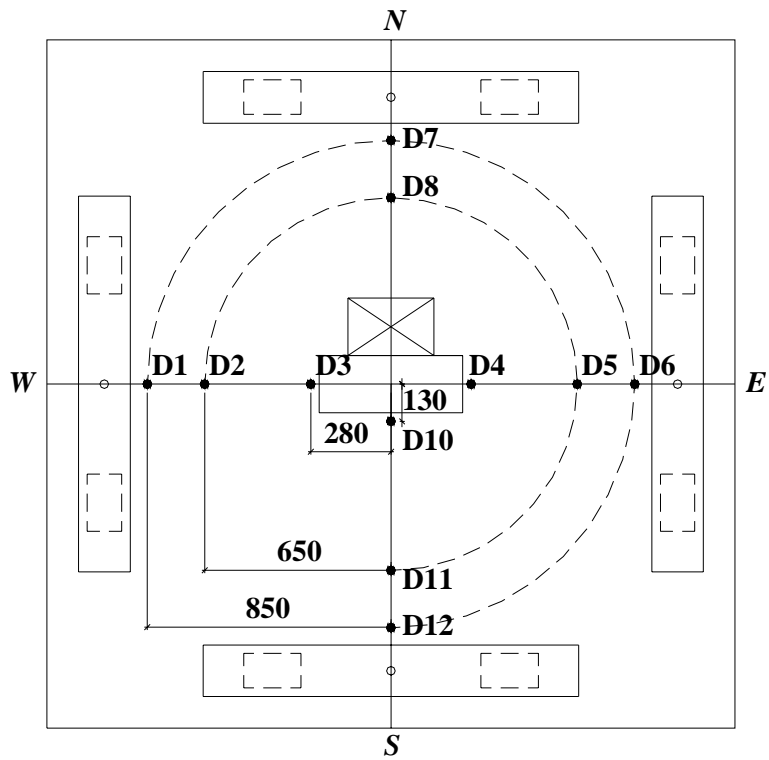


Figura 3.43 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 5 (mm)

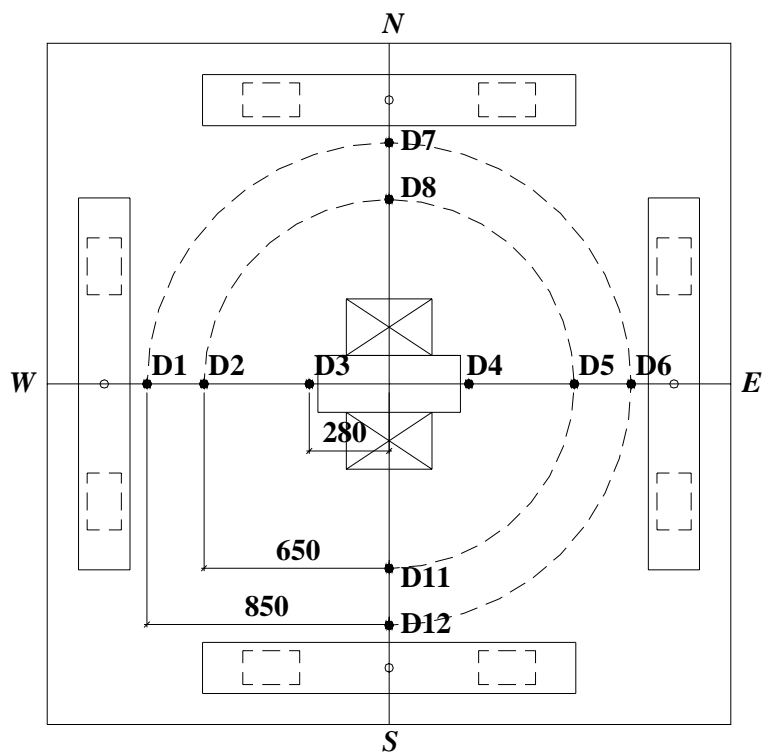


Figura 3.44 – Pontos de leitura dos defletômetros nas lajes do Modelo 6 (mm)

3.4.2 Deformação específica

Para medir a deformação específica das armaduras e do concreto foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER), da marca EXCEL Engenharia de Sensores Ltda, tipo PA-06-250BA-120L (aço) e PA-06-201BA-120L (concreto).

Os EERs foram ligados a dois sistemas de leitura. Um deles foi uma caixa comutadora e balanceadora, com 24 canais modelo NS-24H, acoplada a um medidor analógico (lajes L1 a L4) ou a um digital modelo SMD-20A, todos equipamentos fabricados pela KYOWA ELECTRONICS INSTRUMENTS CO., LTD. O outro sistema foi uma caixa de aquisição de dados de 15 canais, interligada a um terminal da NATIONAL INSTRUMENTS, modelo SCXI-1001, controlada pelo software LABVIEW 6.0.

3.4.2.1 Instrumentação da armadura

A instrumentação obedeceu aos seguintes procedimentos: regularização da superfície, limpeza da superfície, fixação dos extensômetros e proteção mecânica.

A regularização da superfície implicou em esmerilhar e lixar as barras, procurando não diminuir muito a seção transversal. Para esmerilhar, foram utilizados rebolos de desgaste, e, para lixar, lixas de mão nº 100, 160 e 200, nesta ordem. Na Figura 3.45 é mostrado um extensômetro colado, sem a proteção mecânica.

Anteriormente a fixação dos extensômetros, foi feita a limpeza das barras, utilizando álcool isopropílico, condicionador e neutralizador. Os extensômetros foram fixados (colados) utilizando o adesivo de éster de cianoacrilato (Super Bonder). Em seguida foi feita a proteção mecânica utilizando fita elétrica de alta tensão.

Em cada ponto da armadura monitorada, foram usados dois extensômetros posicionados em lados opostos, na superfície superior e inferior da barra (os EERs com numeração ímpar estão situados na superfície superior da barra). Nas Figuras 3.46 a 3.58 são mostrados o posicionamento e a numeração dos extensômetros utilizados em todas as lajes.

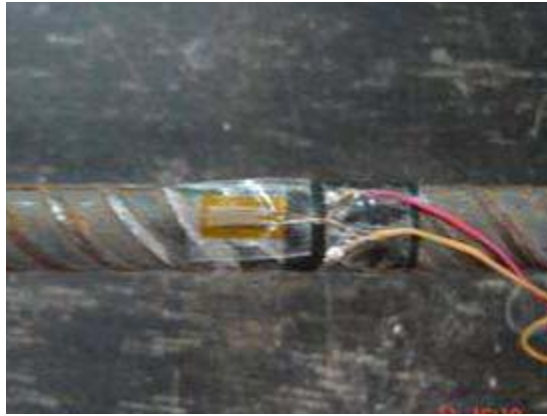


Figura 3.45 – Extensômetro colado

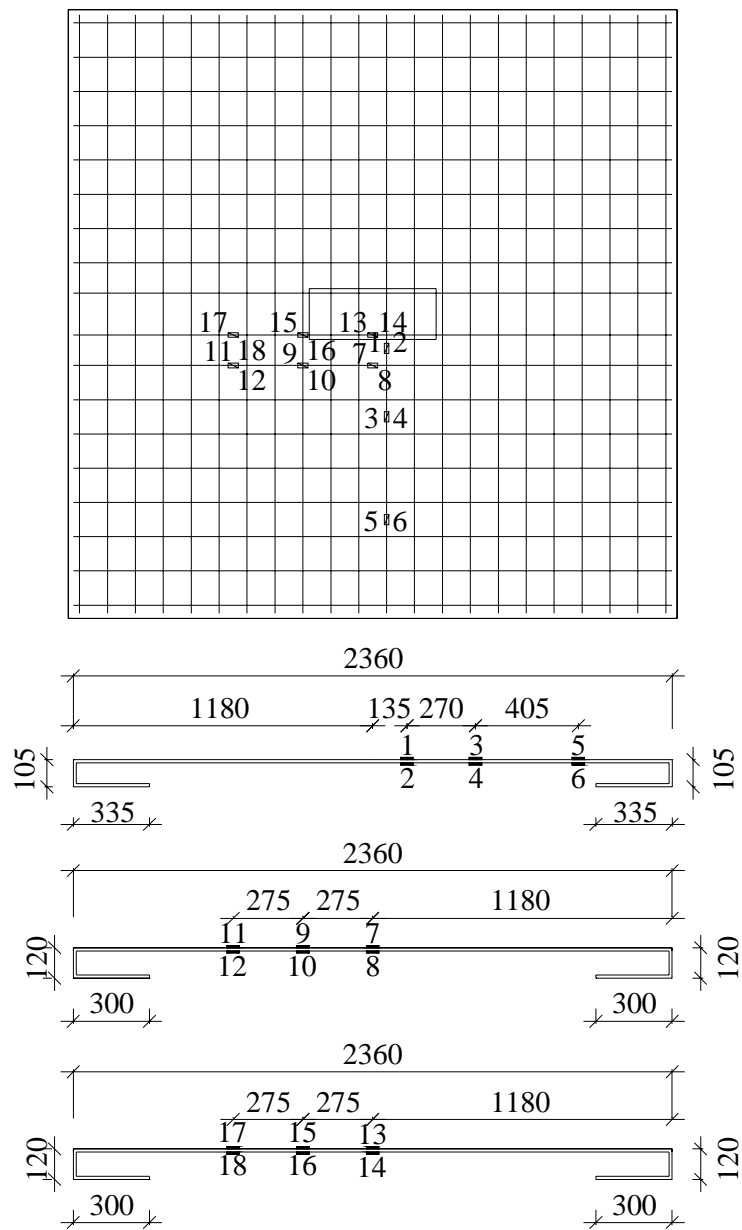


Figura 3.46 – Posicionamento dos extensômetros das lajes L1 (mm)

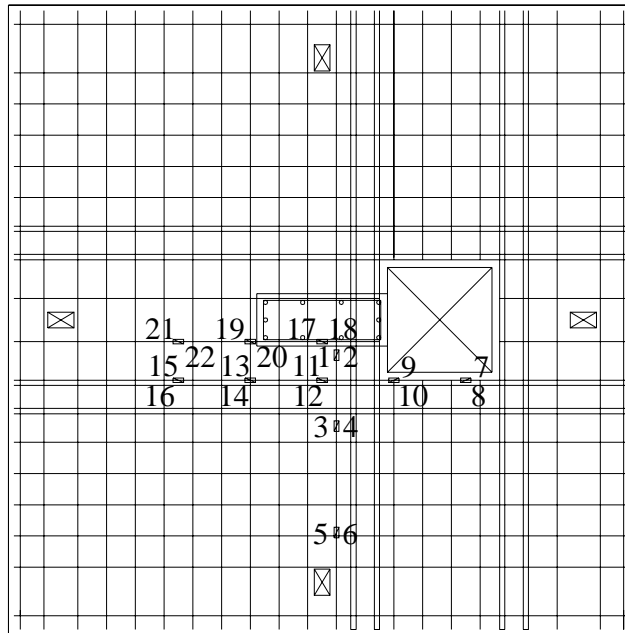


Figura 3.47 – Posicionamento dos extensômetros da laje L2

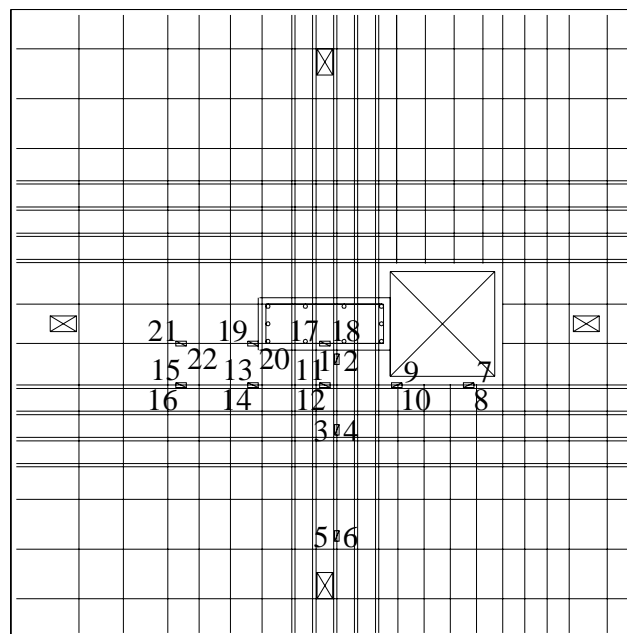


Figura 3.48 – Posicionamento dos extensômetros da laje L3

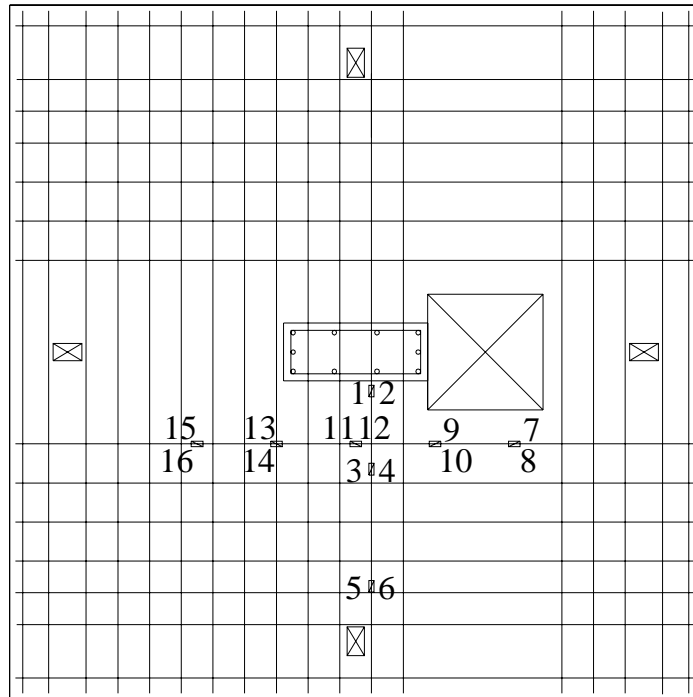


Figura 3.49 – Posicionamento dos extensômetros da laje L4

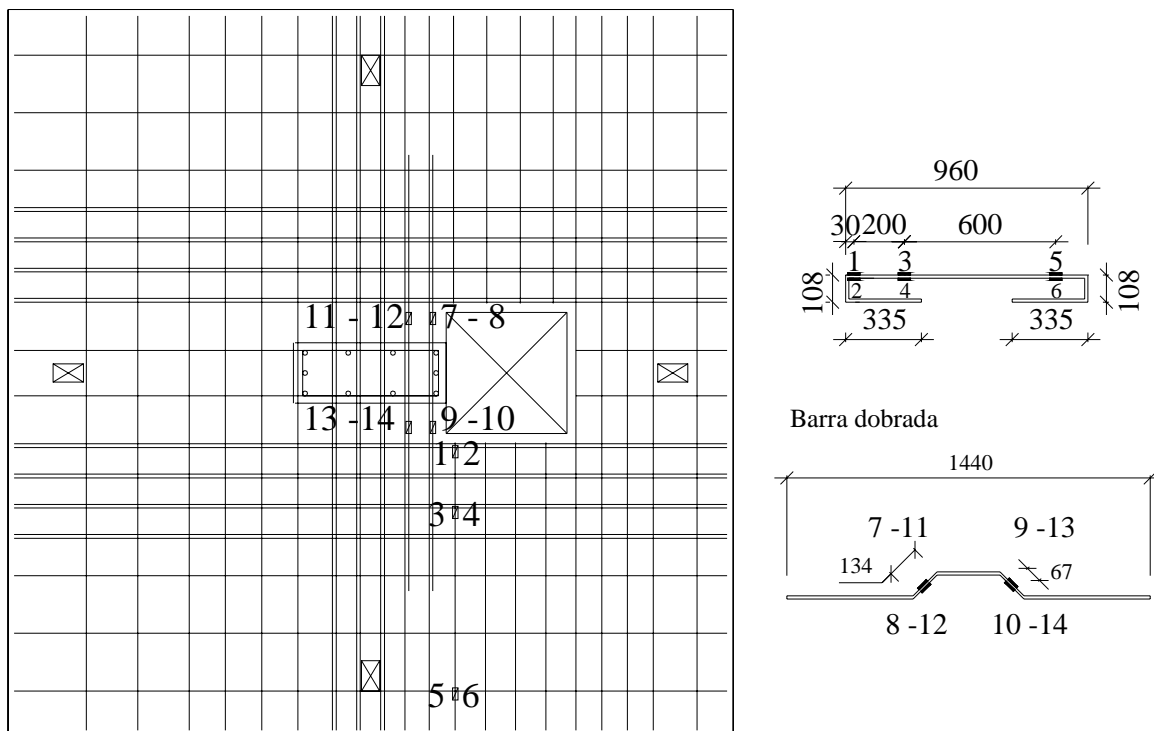


Figura 3.50 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L5 (mm)

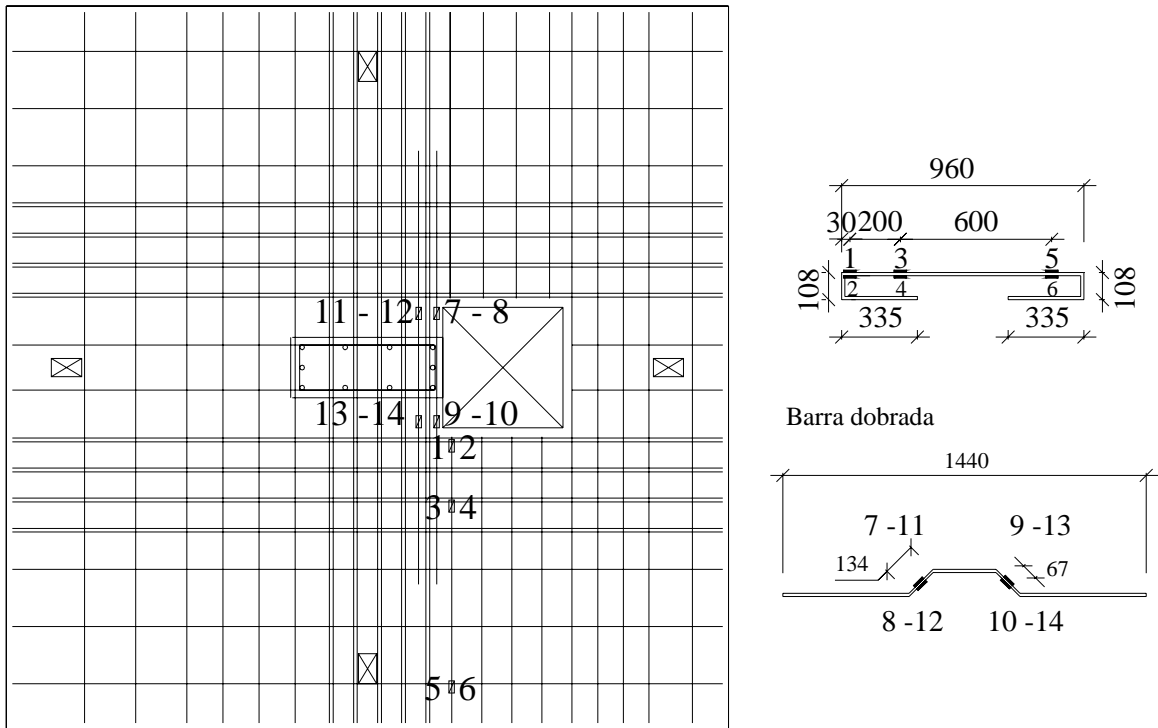


Figura 3.51 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L6 (mm)

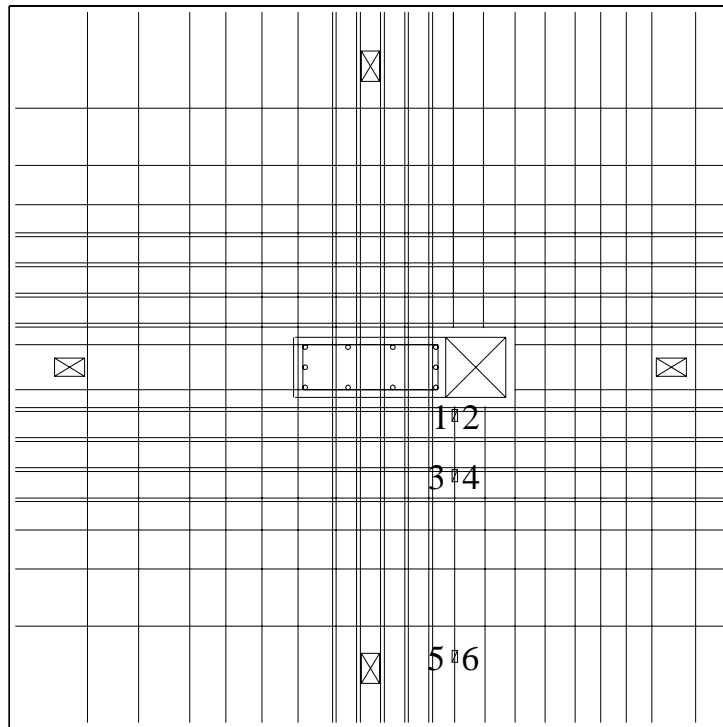


Figura 3.52 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L7, L8, L11 e L12 (mm)

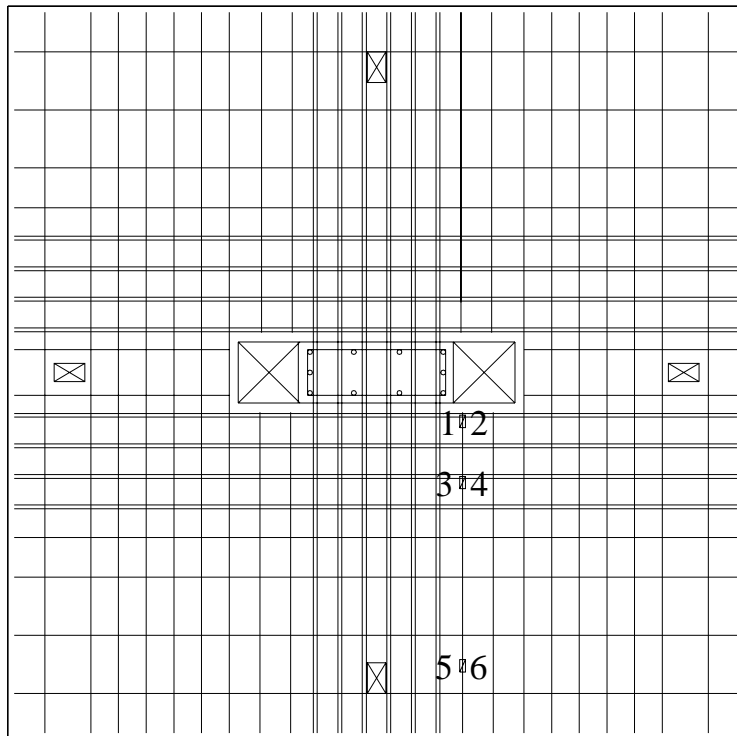


Figura 3.53 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L9, L10, L13 (mm)

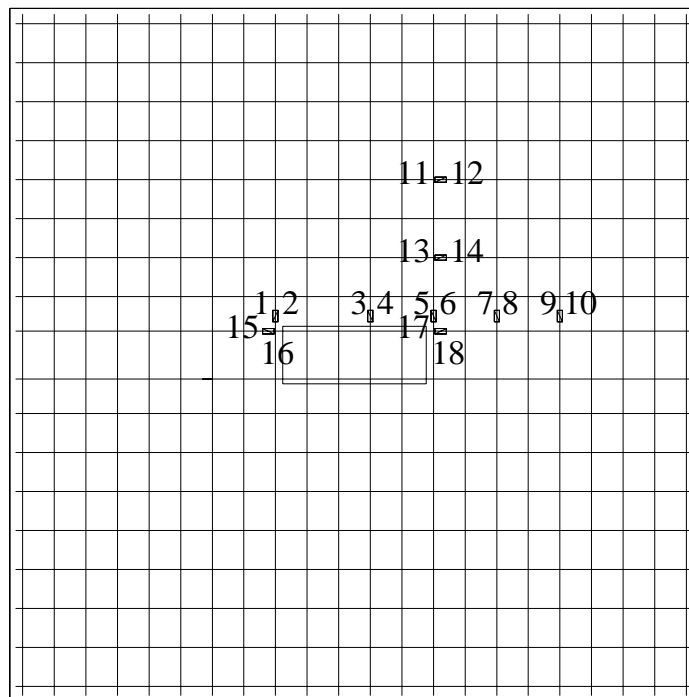


Figura 3.54 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L14 (mm)

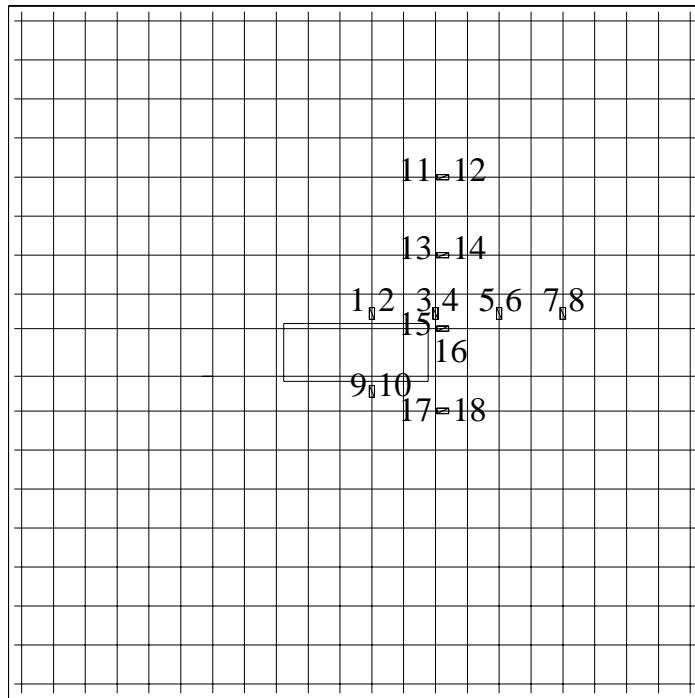


Figura 3.55 - Posicionamento dos EERs no aço para a laje L15 (mm)

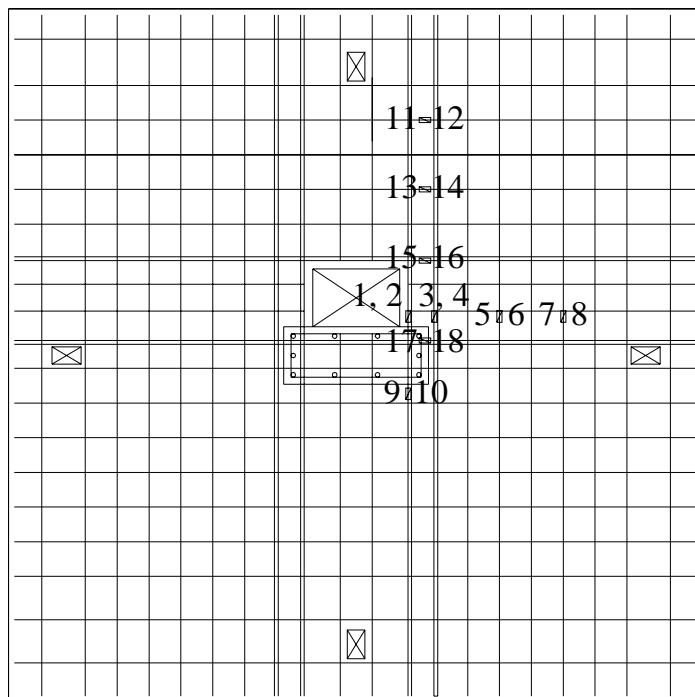


Figura 3.56 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L16 a L17 (mm)

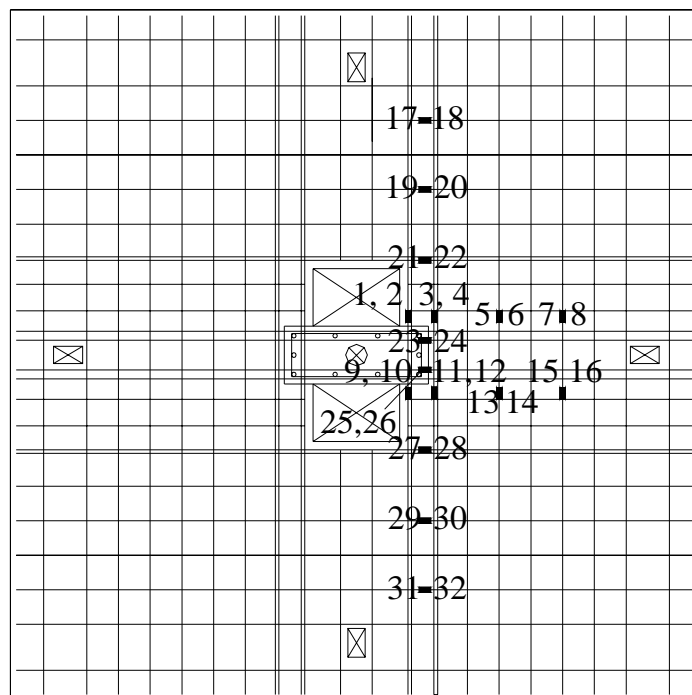


Figura 3.57 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L18 (mm)

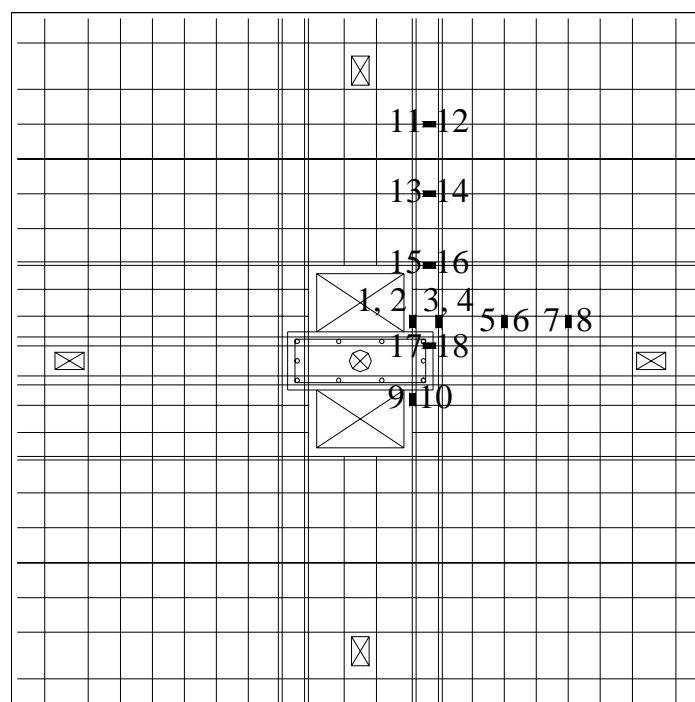


Figura 3.58 - Posicionamento dos EERs no aço para as lajes L19 (mm)

3.4.2.2 Instrumentação do concreto

A instrumentação obedeceu a seguinte seqüência: limpeza da superfície, regularização da superfície com adesivo epóxi (ARALDITE – 10min), regularização da superfície após o endurecimento do adesivo epóxi, limpeza da superfície e fixação dos extensômetros.

A regularização da superfície com adesivo epóxi foi feita com lixas de mão de grana 100, 160 e 200, respectivamente. As limpezas foram executadas com algodão, utilizando álcool isopropílico, condicionador e neutralizador. Na Figura 3.59 são mostrados dois extensômetros de concreto colados.



Figura 3.59 – Extensômetros de concreto colados

Para as lajes L1 a L4, a instrumentação foi toda feita no pilar ligado monoliticamente à laje. Na Figura 3.60 é mostrado o posicionamento esquemático dos extensômetros segundo as direções *N*, *S*, *W* e *E*.

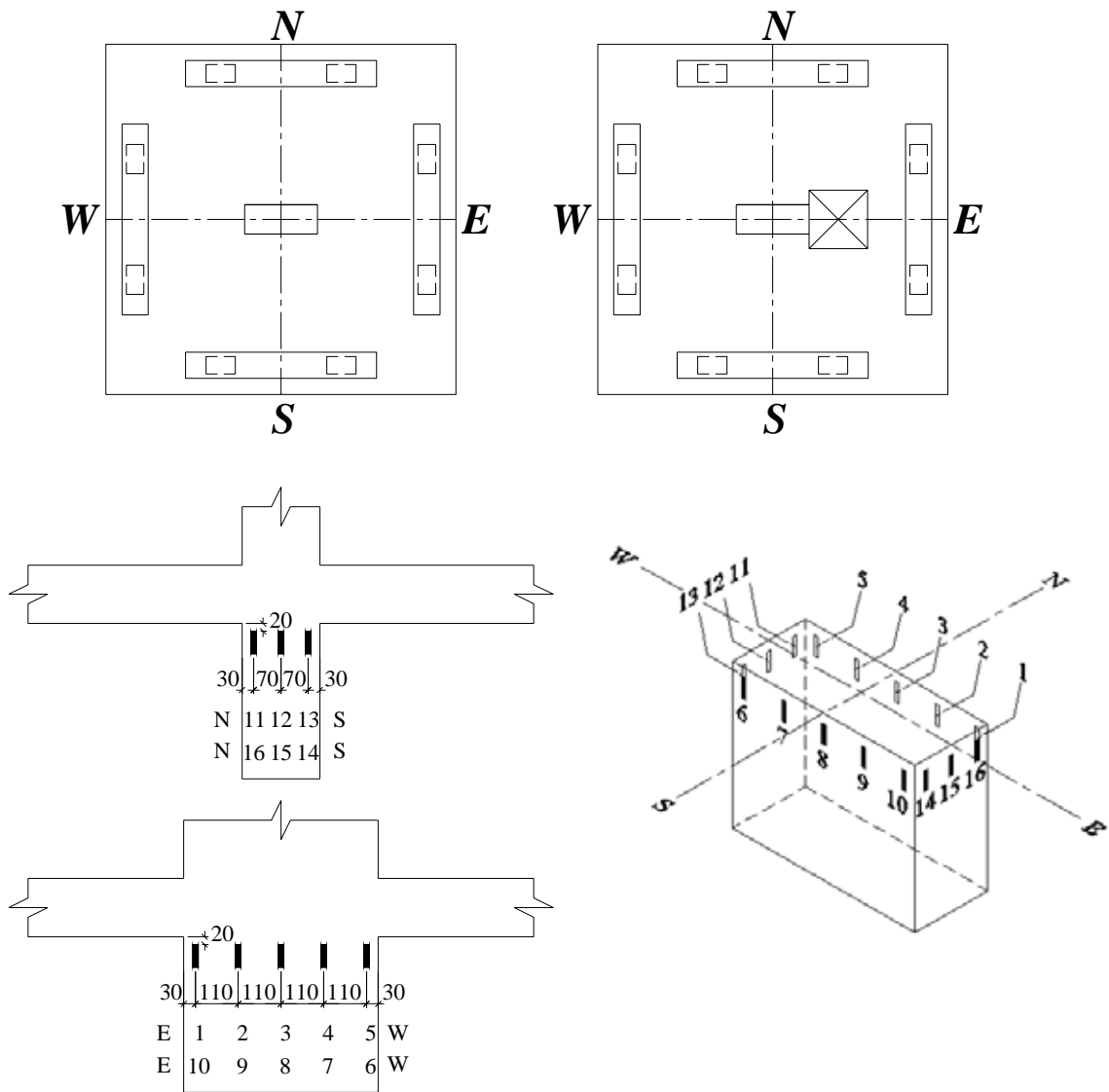


Figura 3.60 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L1 a L4 (mm)

Para as lajes L5 a L13, a instrumentação se deu na face inferior da laje. Para essas lajes, os posicionamentos dos extensômetros foram os mesmos. O posicionamento e numeração dos extensômetros são mostrados na Figura 3.61.

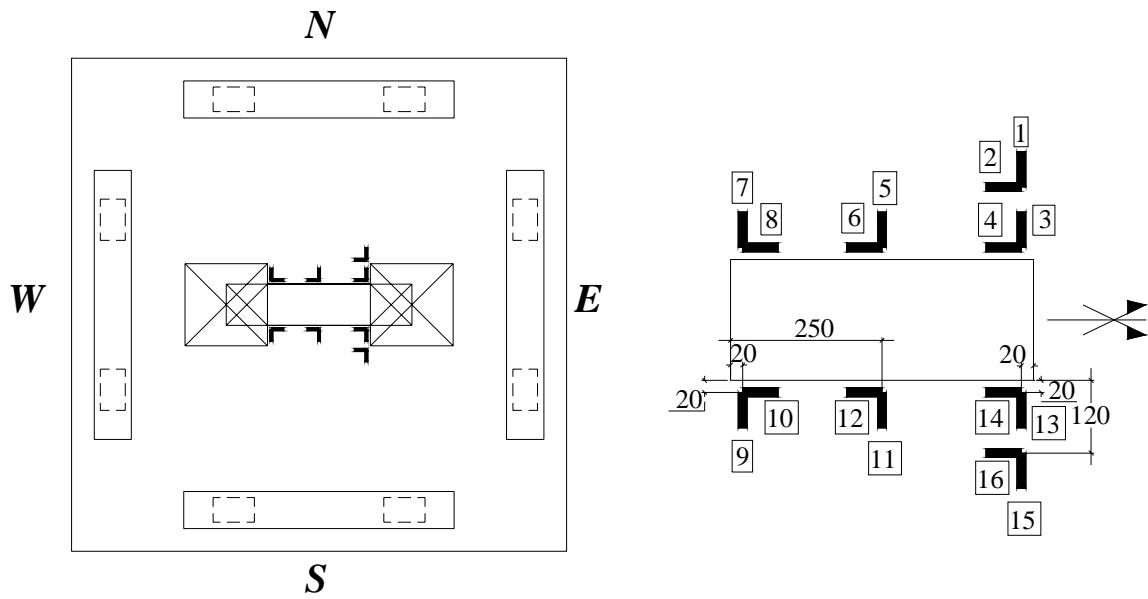


Figura 3.61 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L5 a L13 (mm)

Nas lajes L14 e L15, a instrumentação também foi a mesma, na face inferior da laje, como mostrado na Figura 3.62.

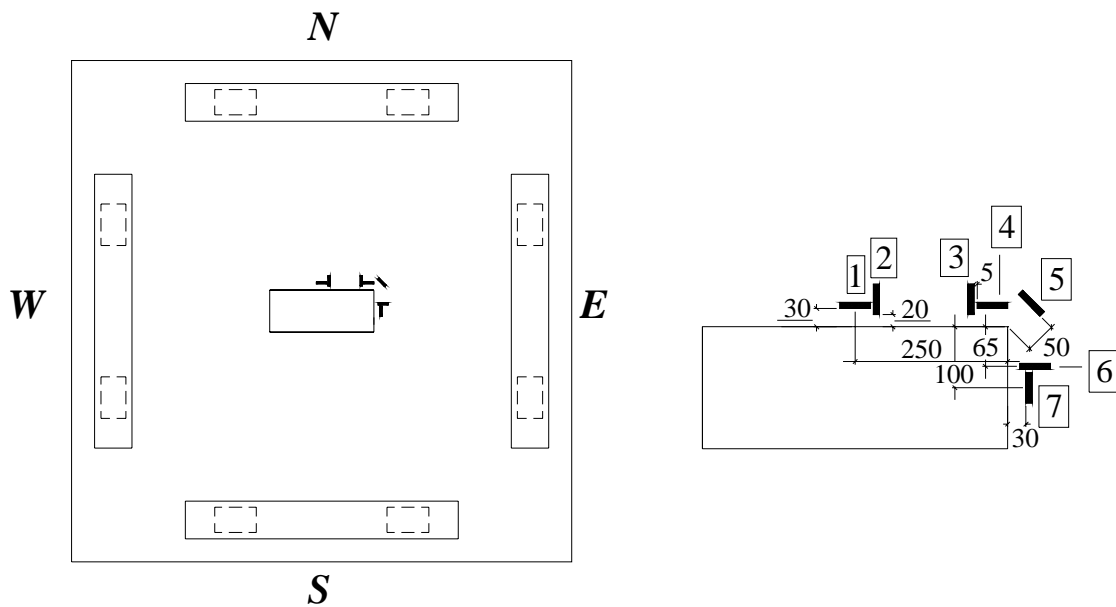


Figura 3.62 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L14 e L15 (mm)

A instrumentação das lajes L16, L17 e L19, na face inferior da laje, foi igual para as três lajes e é mostrada na Figura 3.63.

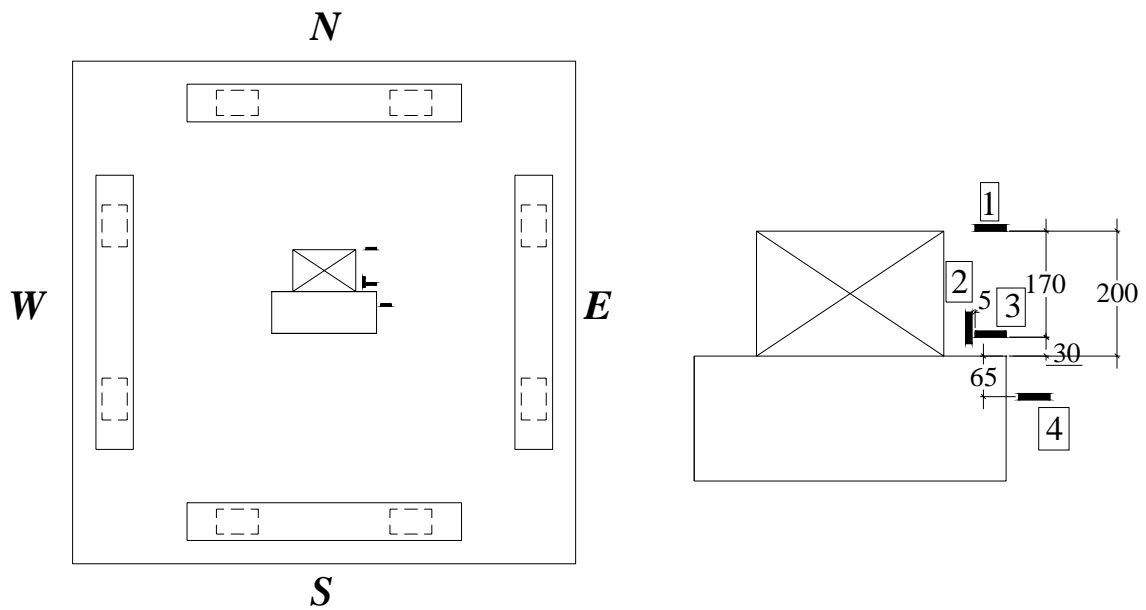


Figura 3.63 – Posicionamento dos EERs do concreto nas lajes L16, L17 e L19 (mm)

A laje L18 foi instrumentada na face inferior da laje e é mostrada na Figura 3.64.

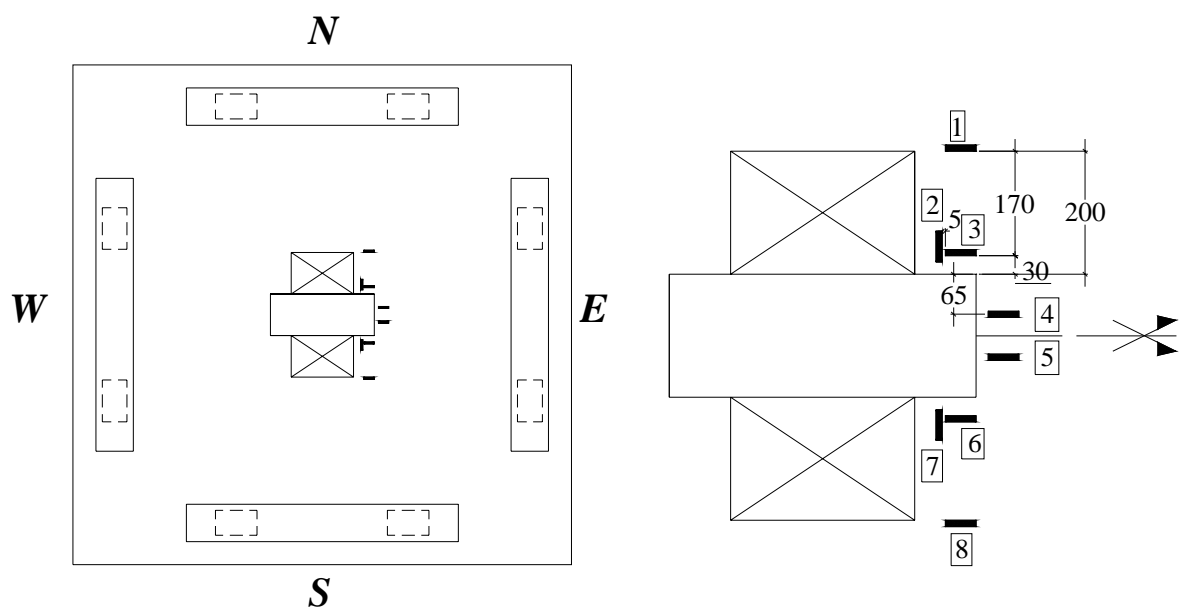


Figura 3.64 – Posicionamento dos EERs do concreto na laje L18 (mm)

3.5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Após a colocação da laje no local de ensaio, esta foi nivelada utilizando gesso pedra, entre a face inferior do pilar e o bloco de apoio. O nivelamento foi feito utilizando

cunhas de madeira sobre apoios nas bordas da laje. Após pelo menos 24h do nivelamento, era feita a protensão.

Na realização da protensão do pilar da laje L1, foi utilizada uma caixa metálica, produzida para este fim, mostrada na Figura 3.65. Mas, a perda de carga inicial estava muito grande, 36%. Isto estava ocorrendo pois a chapa de aço localizada embaixo da caixa metálica, com 19mm de espessura, estava fletindo durante a aplicação de carga. O problema foi solucionado colocando, no lugar da chapa de 19mm, uma arruela e outra chapa, ambas com 62,5mm de espessura, mostrado na Figura 3.66. A perda de carga inicial passou a ser, em média, de 13%.

Após a protensão eram fixadas as placas de distribuição com gesso pedra e colocados os demais equipamentos do sistema de ensaio.

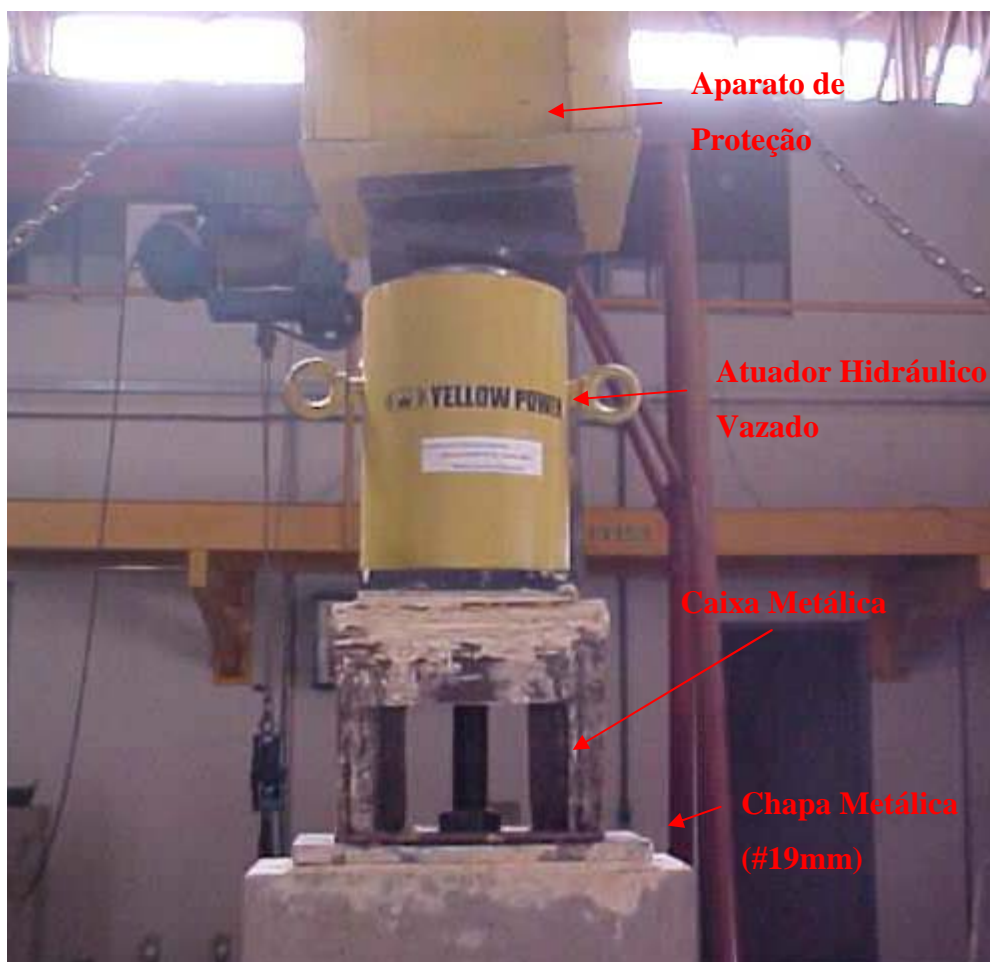


Figura 3.65 – Equipamento utilizado para protensão na laje L1

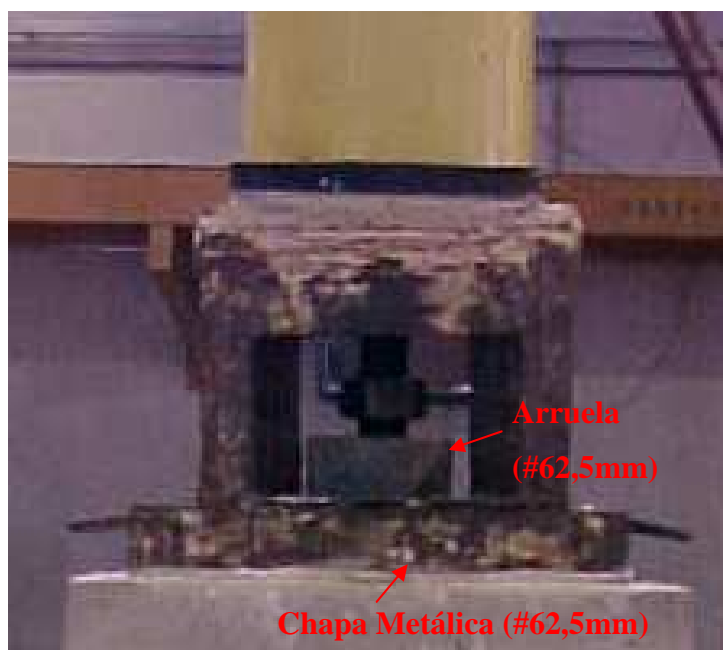


Figura 3.66 – Chapa e arruela com 62,5mm de espessura

Na realização da aplicação de carga, os tirantes laterais foram fixados manualmente, com aferição da carga e do prumo de cada um. As cargas iniciais aplicadas em cada tirante, nas lajes com carregamento simétrico, foram iguais, com intensidade de 2,5kN. Assim, o ensaio iniciou-se com o carregamento de 10kN. Nas lajes com carregamento assimétrico, os bordos com carregamentos iguais iniciaram o carregamento com 2,5kN. Os outros bordos, somados, tiveram carregamento igual a 5kN, totalizando 10kN para o início do ensaio.

Em todas as lajes foi feito um pré-carregamento para conferir o funcionamento de todos os equipamentos. Para a laje L1, o pré-carregamento teve continuidade até 100kN, com intervalos de carga de 25kN.

Nas lajes L2, L3 e L4, o pré-carregamento durou até 40kN, com intervalos de carga de 20kN.

Nas demais lajes, o pré-carregamento teve continuidade até 30kN, com intervalos de carga de 10kN.

Após o pré-carregamento, descarregaram-se os atuadores hidráulicos e iniciou-se o carregamento. Os passos e intervalos de carga foram de 25kN ou 50kN. Todas as lajes foram levadas à ruptura.

A cada intervalo de carga, foram realizadas leituras dos extensômetros e dos defletômetros. A duração dos ensaios foi de aproximadamente 2 horas (ensaio de curta duração).

A aplicação de carga para cada atuador hidráulico foi feita com a utilização de: acionador hidráulico (bomba hidráulica), mangueiras, manifold de quatro saídas (para carregamento simétrico), manifold de duas saídas (carregamento assimétrico) e válvulas (para regular a pressão em cada atuador). O equipamento utilizado está exposto na Figura 3.67.

Após o ensaio foi feita a desprotensão do pilar.

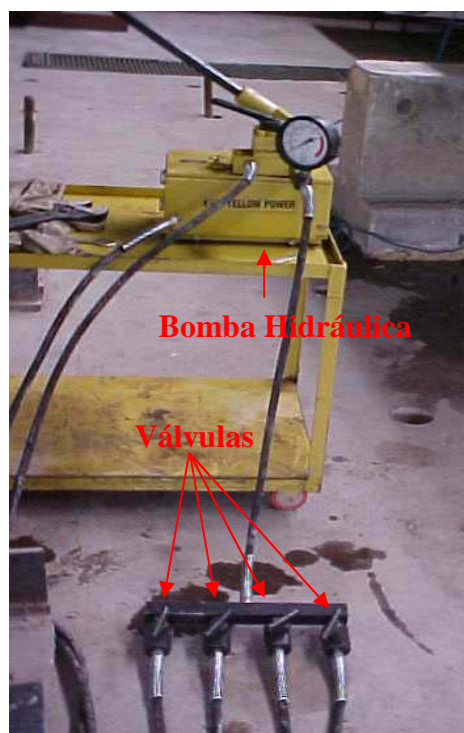


Figura 3.67 – Equipamento utilizado para aplicação de carga

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES SEM TRANSFERÊNCIA MOMENTO (SÉRIE 1)

4.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta os resultados experimentais, obtidos nos ensaios das lajes, sem transferência de momento fletor da laje ao pilar (Série 1). São mostrados e discutidos os resultados de cargas e modos de ruptura, fissuração e superfície de ruptura, deslocamentos verticais, deformações específicas das armaduras e deformações específicas do concreto das lajes.

4.2 CARGA E MODO DE RUPTURA

A carga considerada de ruptura (V_u), ou carga última, foi igual à somatória das maiores cargas observadas nas leitoras das células de carga, situadas nas bordas da laje no momento da ruptura, do peso próprio da laje e dos equipamentos posicionados sobre a mesma. Na Figura 4.1 é apresentado o posicionamento das células de carga em relação ao centro do pilar e suas respectivas numerações.

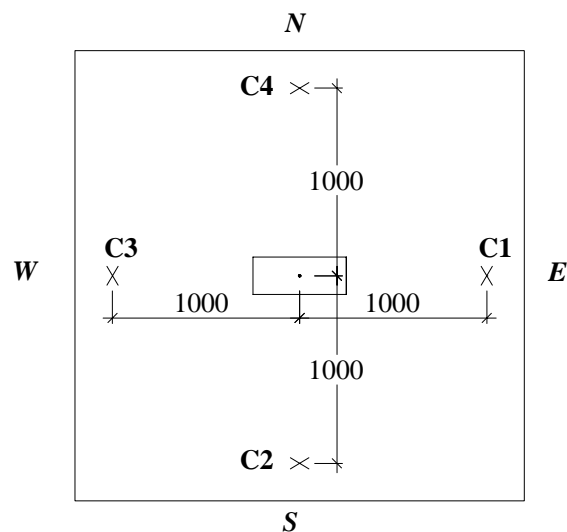


Figura 4.1 – Posicionamento das células de carga

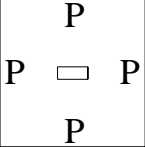
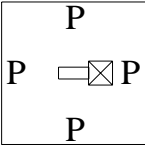
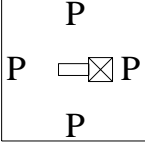
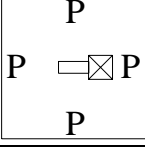
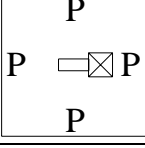
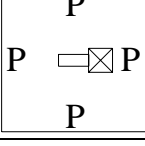
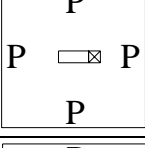
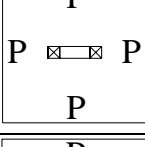
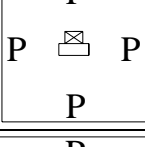
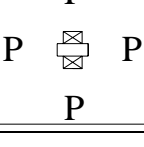
Na Tabela 4.1 são apresentadas as cargas e modos de ruptura de todas as lajes da Série 1, com carregamento simétrico. Também é mostrada a resistência à compressão do concreto utilizado nas lajes (f_c) e suas principais características geométricas (furo, d – altura útil) e de armadura (ρ – taxa de armadura e existência de armadura de cisalhamento).

A determinação do modo de ruptura foi feita através da observação do comportamento das lajes durante os ensaios, levando-se em consideração a fissuração, a superfície de ruptura próxima ao pilar e ao furo, as deformações na armadura e no concreto, e comparando-se com a carga última resistente por flexão, calculada através do método das linhas de ruptura, mostrado no Apêndice C.

Todas as lajes romperam por punção de maneira brusca e repentina, mas houve diferentes maneiras de ruptura. Houve lajes em que a ruptura ocorreu com a superfície de ruptura se iniciando na superfície superior da laje, e terminando na ligação laje-pilar, na superfície inferior da laje. Esse modo de ruptura foi chamado de punção “adjacente”. Em algumas lajes, com furo(s), a ruptura ocorreu de maneira diferente: parte da superfície de ruptura teve o mesmo comportamento da maneira punção “adjacente”; e o restante da superfície de ruptura terminou, na superfície inferior da laje, afastada do pilar. Esse tipo de ruptura foi chamada de punção “adjacente e afastada”. Na Tabela 4.6, são indicadas as direções onde ocorreu cada modo de ruptura.

Nas Tabelas 4.2 a 4.11 são apresentados: as leituras dos carregamentos em cada célula de carga (em cada estágio de carregamento), suas somatórias, média entre as leituras, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Também é mostrada a carga de protensão (N) no pilar. A carga considerada de ruptura, última carga nas tabelas, é igual a soma das maiores cargas aplicadas, lidas nas células de carga, mais o peso próprio da laje e peso dos equipamentos. O peso da laje foi calculado adotando o peso específico do concreto igual a 2500kgf/m^3 (peso total igual a 2120kgf), sendo desconsiderado o volume da laje dentro do pilar. Desta maneira, cada coluna que compõe a última carga de ruptura foi composta de: valor da última leitura da respectiva célula de carga (maior leitura); 530kgf referente ao peso próprio de $1/4$ de laje; e, 100kg referente ao peso dos equipamentos em cada borda (total de 630kgf , ou $6,3\text{kN}$, adicionados em cada borda, referentes ao peso próprio da laje e dos equipamentos).

Tabela 4.1 – Carga e modo de ruptura das lajes da Série 1

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	Arm. de cis.	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	Modo de Ruptura por Punção ⁽¹⁾
L1	37,8	-	-	121	0,93		475	Adjacente
L2	32,3	1 400x400	-	123	0,87		240	Adjacente
L3	39,5	1 400x400	-	125	1,17		250	Adjacente
L4	39,1	1 400x400	-	124	0,52		237	Adjacente
L5	36,7	1 400x400	Duas barras dobradas	122	1,22		416	Adjacente em W e S; e Afastada em N
L6	36,7	1 400x400	Duas barras dobradas	121	1,14		425	Adjacente em W e S; e Afastada em N
L7	37,2	1 200x200	-	123	1,48		455	Adjacente em W e S; e Afastada em N
L9	34,2	2 200x200	-	123	1,48		375	Adjacente em S; e Afastada em N
L16	44,0	1 300x200	-	125	1,01		474	Adjacente
L19	39,0	2 300x200	-	126	1,05		411	Adjacente

⁽¹⁾Todas as lajes romperam de maneira brusca

* Ver item 4.3.2, para visualização das superfícies de ruptura

Tabela 4.2 – Quadro de cargas da laje L1

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,45	2,75	2,50	2,60	10	2,58	0,13	5,1	399
50	12,45	13,95	12,55	13,75	53	13,18	0,78	6,0	399
100	24,85	27,05	24,85	26,50	103	25,81	1,13	4,4	397
125	30,80	32,00	30,90	31,00	125	31,18	0,56	1,8	396
150	37,15	37,50	36,80	36,65	148	37,03	0,38	1,0	396
175	43,15	44,25	42,80	43,00	173	43,30	0,65	1,5	395
200	48,55	50,90	48,85	49,45	198	49,44	1,04	2,1	394
250	63,40	61,25	63,40	61,15	249	62,30	1,27	2,0	393
300	73,65	75,30	72,65	74,35	296	73,99	1,12	1,5	391
350	86,85	87,30	87,75	86,25	348	87,04	0,64	0,7	389
400	98,90	101,50	97,60	99,90	398	99,48	1,65	1,7	388
450	112,30	112,80	112,50	112,60	450	112,55	0,21	0,2	392
475* (total)	118,60	119,10	118,80	118,90	475	-	-	-	-

d = 121mm; $f_c = 37,8\text{MPa}$; $\rho = 0,92\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Tabela 4.3 – Quadro de cargas da laje L2

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,85	2,80	2,65	2,50	11	2,70	0,16	5,9	513
25	6,35	6,80	6,40	7,00	27	6,64	0,31	4,7	513
50	12,75	12,60	12,40	12,00	50	12,44	0,32	2,6	512
75	18,65	18,55	18,10	17,90	73	18,30	0,36	2,0	512
100	24,50	24,55	24,10	24,05	97	24,30	0,26	1,1	511
125	31,50	31,45	31,00	30,55	125	31,13	0,44	1,4	510
150	37,20	37,40	36,90	36,30	148	36,95	0,48	1,3	510
200	50,00	50,40	49,80	49,60	200	49,95	0,34	0,7	508
215	54,50	53,80	53,00	53,55	215	53,71	0,62	1,2	509
240* (total)	60,80	60,10	59,30	59,85	240	-	-	-	-

d = 123mm; $f_c = 32,3\text{MPa}$; $\rho = 0,87\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Tabela 4.4 – Quadro de cargas da laje L3

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,45	2,60	2,75	2,60	10	2,60	0,12	4,7	550
25	6,45	6,45	6,30	6,45	26	6,41	0,08	1,2	550
50	12,20	12,45	12,40	12,90	50	12,49	0,30	2,4	549
75	18,25	18,55	18,40	18,75	74	18,49	0,21	1,2	548
100	24,50	24,95	24,45	24,85	99	24,69	0,25	1,0	547
125	32,60	31,30	31,40	31,65	127	31,74	0,59	1,9	547
150	37,20	37,85	37,40	37,30	150	37,44	0,29	0,8	546
200	49,10	48,75	49,60	49,80	197	49,31	0,48	1,0	545
225	54,25	55,45	56,30	55,00	221	55,25	0,86	1,6	544
225	55,50	55,45	57,00	56,80	225	56,19	0,83	1,5	546
250* (total)	61,80	61,75	63,30	63,10	250	-	-	-	-

d = 125mm; $f_c = 39,5\text{MPa}$; $\rho = 1,17\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Tabela 4.5 – Quadro de cargas da laje L4

Passo de carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Carga total (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,75	2,50	2,60	2,45	10	2,58	0,13	5,1	520
25	8,65	6,90	7,60	8,55	32	7,93	0,83	10,5	520
50	12,30	12,30	12,50	12,70	50	12,45	0,19	1,5	519
75	18,30	17,90	18,00	18,50	73	18,18	0,28	1,5	519
100	24,80	24,65	24,70	24,60	99	24,69	0,09	0,3	519
125	29,70	31,10	30,70	31,10	123	30,65	0,66	2,2	518
150	36,90	37,90	37,45	37,35	150	37,40	0,41	1,1	517
175	43,60	42,95	43,40	43,00	173	43,24	0,31	0,7	517
200	49,00	50,05	49,65	49,20	198	49,48	0,47	0,9	516
212	53,45	52,00	53,00	53,45	212	52,98	0,68	1,3	519
237* (total)	59,75	58,30	59,30	59,28	237	-	-	-	-

d = 124mm; $f_c = 39,1\text{MPa}$; $\rho = 0,52\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Para a laje L1, o desvio padrão máximo das cargas aplicadas foi de 1,65kN, na carga de 400kN, com coeficiente de variação de 1,7%. O maior coeficiente de variação, 6,0%, ocorreu na carga de 50kN e o mais baixo, 0,2%, na carga de 450kN. Esses dados indicam a satisfatoriedade do sistema de aplicação de carga, que atingiu o objetivo previsto para este carregamento (carregamento simétrico).

Na laje L2, o desvio padrão máximo foi de 0,62kN, na carga de ruptura 215kN, com coeficiente de variação de 1,2%. O maior coeficiente de variação, 5,9%, ocorreu na carga de 10kN e o mais baixo, 0,7%, na carga de 200kN. Para a laje L3, o maior coeficiente de variação, 4,7%, ocorreu na carga de 10kN e o mais baixo, 0,8%, na carga de 150kN.

Na laje L4, o desvio padrão máximo foi de 0,83kN, na carga de 25kN, com coeficiente de variação, também máximo, de 10,5%. Para os demais carregamentos, apresentou o maior coeficiente de variação na carga de 125kN, 2,2%.

Tabela 4.6 – Quadro de cargas da laje L5

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,60	2,45	2,35	2,25	10	2,41	0,15	6,2	502
25	6,50	6,30	6,30	6,45	26	6,39	0,10	1,6	501
50	12,55	12,45	12,40	12,30	50	12,43	0,10	0,8	501
75	18,25	18,80	18,65	18,65	74	18,59	0,24	1,3	501
100	24,70	24,85	24,65	24,70	99	24,73	0,09	0,4	500
125	31,40	30,85	31,30	31,00	125	31,14	0,26	0,8	499
150	36,40	37,80	36,30	38,00	149	37,13	0,90	2,4	497
175	43,95	43,20	44,20	43,50	175	43,71	0,45	1,0	497
200	50,25	49,55	50,30	49,70	200	49,95	0,38	0,8	496
225	56,15	56,55	56,40	56,85	226	56,49	0,29	0,5	495
250	63,30	61,95	62,40	61,95	250	62,40	0,64	1,0	494
275	69,00	68,15	68,70	70,00	276	68,96	0,78	1,1	493
300	76,00	75,00	75,00	74,70	301	75,18	0,57	0,8	492
325	82,60	81,25	82,00	81,70	328	81,89	0,57	0,7	491
350	87,90	87,15	88,80	87,75	352	87,90	0,68	0,8	490
390	97,50	97,00	98,00	97,85	390	97,59	0,44	0,5	494
416* (total)	103,80	103,30	104,30	104,15	416	-	-	-	-

d = 122mm; $f_c = 36,7\text{MPa}$; $\rho = 1,22\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Tabela 4.7 – Quadro de cargas da laje L6

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,90	2,70	2,85	2,85	11	2,83	0,09	3,1	527
25	6,45	6,25	6,80	6,55	26	6,51	0,23	3,5	526
50	12,50	12,80	12,45	12,50	50	12,56	0,16	1,3	525
75	18,35	18,80	18,35	19,05	75	18,64	0,35	1,9	524
100	25,60	24,50	25,30	24,90	100	25,08	0,48	1,9	524
150	37,50	37,80	37,20	37,45	150	37,49	0,25	0,7	521
200	49,20	50,30	49,10	50,40	199	49,75	0,70	1,4	520
250	63,70	62,00	63,10	62,75	252	62,89	0,71	1,1	518
300	75,95	75,25	75,25	75,15	302	75,40	0,37	0,5	518
325	80,80	82,05	80,30	83,05	326	81,55	1,24	1,5	515
350	80,15	88,15	87,60	87,65	344	85,89	3,83	4,5	514
375	93,00	93,85	93,30	93,05	373	93,30	0,39	0,4	513
400	101,00	98,80	100,45	99,90	400	100,04	0,94	0,9	512
425* (total)	107,30	105,10	106,75	106,20	425	-	-	-	-

d = 121mm; $f_c = 36,7\text{MPa}$; $\rho = 1,14\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

A laje L5 apresentou desvio padrão máximo de 0,90kN, na carga de 150kN. O maior coeficiente de variação, 6,2%, ocorreu no início do ensaio, carga de 10kN. No restante do ensaio, o coeficiente de variação teve uma variação entre 0,4% e 2,4%.

Na laje L6, o desvio padrão e o coeficiente de variação máximos ocorreram na última carga referente a 350kN (4,5% e 3,83kN, respectivamente). Nas outras cargas, o coeficiente de variação máximo, 3,5%, foi observado com 25kN.

Tabela 4.8 – Quadro de cargas da laje L7

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,70	3,15	2,40	2,90	11	2,79	0,32	11,4	502
25	6,35	6,35	6,45	6,50	26	6,41	0,08	1,2	501
50	12,65	12,30	12,60	12,50	50	12,51	0,15	1,2	501
75	18,75	18,60	18,80	18,85	75	18,75	0,11	0,6	501
100	25,00	25,15	25,05	25,00	100	25,05	0,07	0,3	500
125	31,45	31,35	31,35	31,25	125	31,35	0,08	0,3	499
150	37,40	37,33	37,40	37,20	149	37,33	0,09	0,3	497
200	50,10	49,40	50,00	49,50	199	49,75	0,35	0,7	497
250	62,20	62,25	62,60	62,25	249	62,33	0,18	0,3	496
300	75,40	75,35	74,50	75,10	300	75,09	0,41	0,6	495
350	88,10	86,80	87,35	87,00	349	87,31	0,57	0,7	494
400	99,00	100,45	99,75	100,00	399	99,80	0,61	0,6	493
430	107,50	107,90	107,20	107,50	430	107,53	0,29	0,3	492
455* (total)	113,80	114,20	113,50	113,80	455	-	-	-	-

d = 123mm; $f_c = 37,2\text{MPa}$; $\rho = 1,48\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

A laje L7, no início do carregamento, teve um coeficiente de variação de 11,4%. Depois, ao longo do carregamento, chegou ao máximo de 1,2%. O desvio padrão máximo foi de 0,61, na carga de 400kN.

Tabela 4.9 – Quadro de cargas da laje L9

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,80	2,60	2,70	2,95	11	2,76	0,15	5,4	545
25	6,60	6,30	6,50	6,80	26	6,55	0,21	3,2	545
50	12,25	12,55	12,25	12,75	50	12,45	0,24	2,0	545
75	18,85	18,70	18,55	18,40	75	18,63	0,19	1,0	544
100	24,90	25,55	25,30	24,85	101	25,15	0,33	1,3	543
150	37,90	37,80	37,65	37,50	151	37,71	0,17	0,5	541
200	50,50	50,40	50,15	49,50	201	50,14	0,45	0,9	539
250	62,85	62,70	62,40	62,20	250	62,54	0,29	0,5	538
300	75,40	75,55	74,55	75,00	301	75,13	0,45	0,6	536
325	81,00	81,05	81,25	81,90	325	81,30	0,41	0,5	535
350	87,50	87,90	87,40	87,00	350	87,45	0,37	0,4	537
375* (total)	93,80	94,20	93,70	93,30	375	-	-	-	-

d = 123mm; $f_c = 34,2\text{MPa}$; $\rho = 1,48\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

A laje L9, Tabela 4.9, teve pouca variação das cargas lidas nas células de carga durante cada passo de carga. Teve desvio padrão máximo de 0,45kN com 200kN e com 300kN, e o coeficiente de variação máximo foi de 5,4% para 10kN.

Tabela 4.10 – Quadro de cargas da laje L16

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,65	2,50	2,60	2,55	10	2,58	0,06	2,5	554
25	6,40	6,25	6,25	6,30	25	6,30	0,07	1,1	554
50	12,50	12,50	12,55	12,40	50	12,49	0,06	0,5	553
75	18,60	18,80	18,60	18,75	75	18,69	0,10	0,6	552
100	25,30	25,10	24,90	25,05	100	25,09	0,17	0,7	551
125	31,35	31,20	31,15	31,20	125	31,23	0,09	0,3	551
150	37,80	37,70	37,75	37,50	151	37,69	0,13	0,3	550
200	50,00	50,15	50,00	50,20	200	50,09	0,10	0,2	548
250	62,55	62,50	62,45	62,65	250	62,54	0,09	0,1	546
300	74,90	75,25	75,50	74,90	301	75,14	0,29	0,4	543
350	87,35	87,60	87,45	87,35	350	87,44	0,12	0,1	541
400	100,30	100,00	100,25	99,95	401	100,13	0,18	0,2	539
449	112,50	112,20	112,30	112,05	449	112,26	0,19	0,2	538
474* (total)	118,80	118,50	118,60	118,35	474	-	-	-	-

d = 125mm; $f_c = 44,0\text{MPa}$; $\rho = 1,01\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

A laje L16 teve a execução do carregamento atendendo ao esperado, com desvio padrão e coeficiente de variação máximos (baixos) de 0,29kN e 2,5%, respectivamente.

Tabela 4.11 – Quadro de cargas da laje L19

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	Coef. Var. (%)	N (kN)
10	2,65	2,50	2,55	2,55	10	2,56	0,06	2,5	514
25	6,35	6,35	6,30	6,35	25	6,34	0,02	0,4	514
50	12,75	12,50	12,90	12,55	51	12,68	0,18	1,5	513
75	18,70	18,85	18,65	18,85	75	18,76	0,10	0,5	513
100	24,90	25,00	25,25	24,90	100	25,01	0,17	0,7	512
150	37,85	37,70	37,50	37,55	151	37,65	0,16	0,4	509
200	51,05	50,80	50,55	50,80	203	50,80	0,20	0,4	507
250	62,40	62,85	62,70	62,90	251	62,71	0,23	0,4	505
300	75,00	75,00	74,80	75,05	300	74,96	0,11	0,1	503
350	87,95	87,20	87,80	87,20	350	87,54	0,39	0,5	501
385	97,50	96,40	94,90	96,50	385	96,33	1,07	1,1	500
411* (total)	103,80	102,70	101,20	102,80	411	-	-	-	-

d = 126mm; $f_c = 39,0\text{MPa}$; $\rho = 1,05\%$; Carregamento: C1=C2=C3=C4;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

A laje L19 teve carregamento simétrico e cargas nas células de carga com pequena variação em relação ao previsto. Teve desvio padrão máximo de 1,07kN, na carga de 385kN; no restante, variou entre 0,06kN e 0,39kN. O coeficiente de variação foi máximo no início do carregamento, 2,5%; depois, variou entre 0,1% e 1,1%.

4.3 FISSURAÇÃO E SUPERFÍCIE DE RUPTURA

4.3.1 Fissuração

Nas lajes L1 a L4, não foi possível acompanhar visualmente a evolução da fissuração devido à localização das vigas de apoio para fixação dos defletômetros, que impossibilitou o deslocamento em cima da laje durante o ensaio. Portanto, nessas lajes, as fissuras foram marcadas após a ruptura. Nas demais lajes, como o novo sistema de vigas de apoio para os defletômetros, foi possível acompanhar a evolução da fissuração.

As cargas, sem adição do peso próprio da laje e dos equipamentos, V_{rad} e V_{circ} , referentes à verificação visual das primeiras fissuras radiais e circunferenciais, respectivamente, nas lajes da Série 1 são mostradas na Tabela 4.12.

Nas lajes L5 e L16, as fissuras radiais iniciaram no pilar. As lajes L6 e L19 tiveram as fissuras radiais iniciando nos vértices dos furos. As lajes L7 e L9 tiveram fissuras radiais surgindo no pilar e no vértice do furo. As fissuras se desenvolveram em direção às bordas das lajes. Posteriormente, ou no mesmo carregamento, surgiram as fissuras circunferenciais ao redor do pilar.

Os panoramas de fissuração das lajes da Série 1 são mostrados nas Figuras 4.2 a 4.11.

Tabela 4.12 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 1

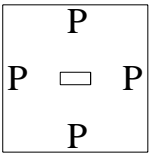
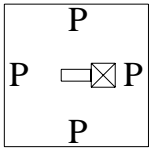
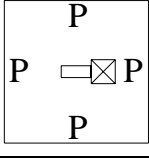
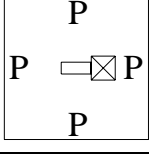
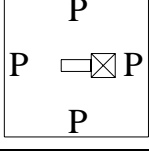
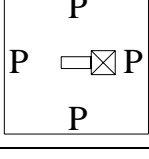
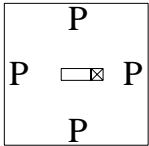
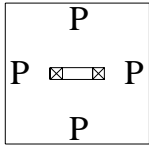
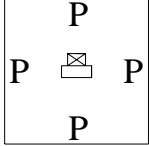
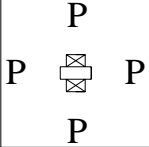
Laje	Furo (mm)	Arm. de cisalham.	Geometria e carregam.	V_u (kN)	V_{rad} (kN)	V_{circ} (kN)
L1	-	-		475	-	-
L2	1 400x400	-		240	-	-
L3	1 400x400	-		250	-	-
L4	1 400x400	-		237	-	-
L5	1 400x400	Duas barras dobradas		416	50	150
L6	1 400x400	Duas barras dobradas		425	75	150

Tabela 4.12 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 1 (continuação)

Laje	Furo (mm)	Arm. de cisalham.	Geometria e carregam.	V_u (kN)	V_{rad} (kN)	V_{circ} (kN)
L7	1 200x200	-		455	100	100
L9	2 200x200	-		375	100	150
L16	1 300x200	-		474	125	125
L19	2 300x200	-		411	75	100

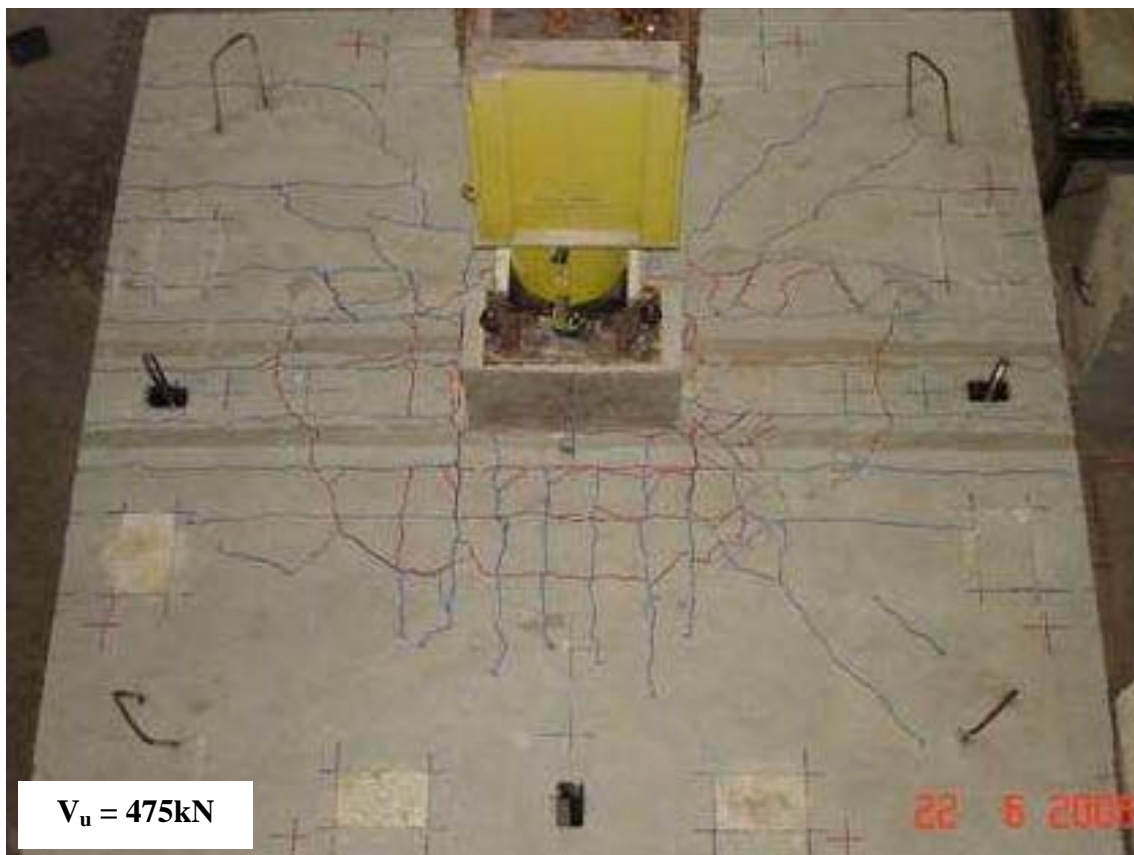


Figura 4.2 – Fissuração na laje L1

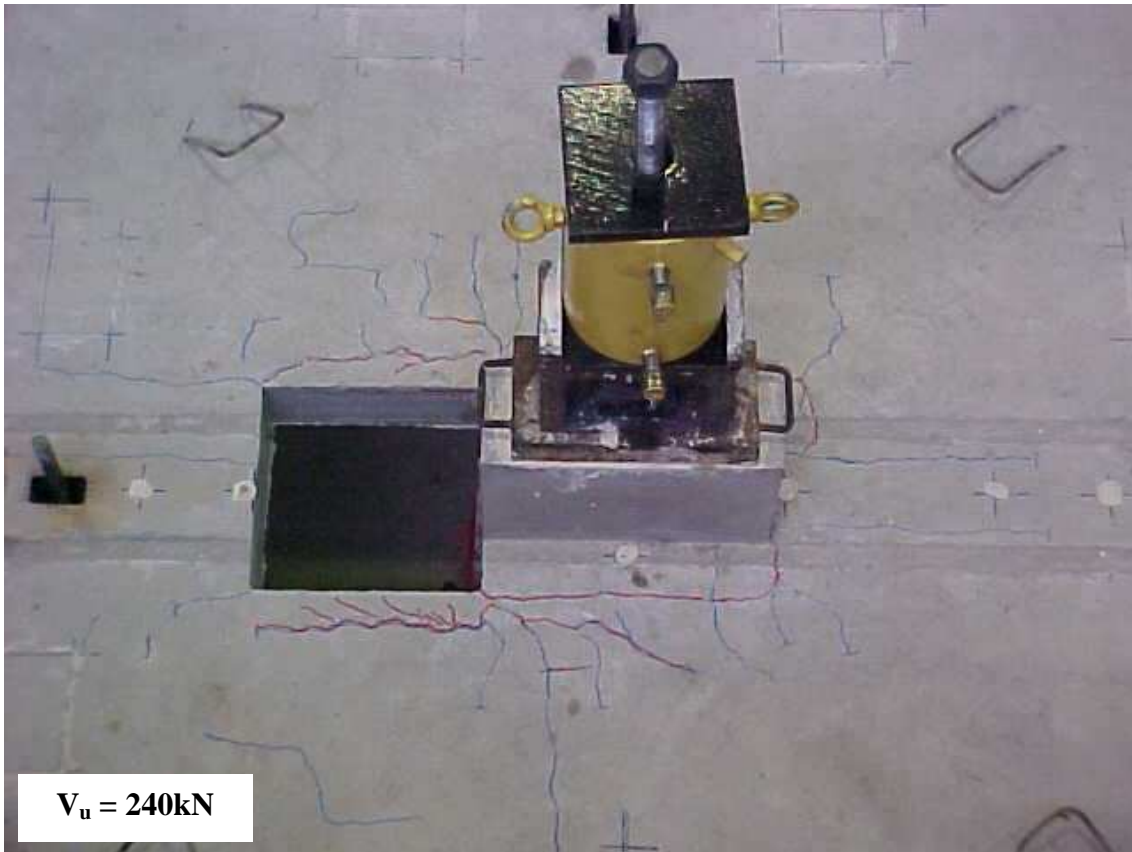


Figura 4.3 – Fissuração na laje L2

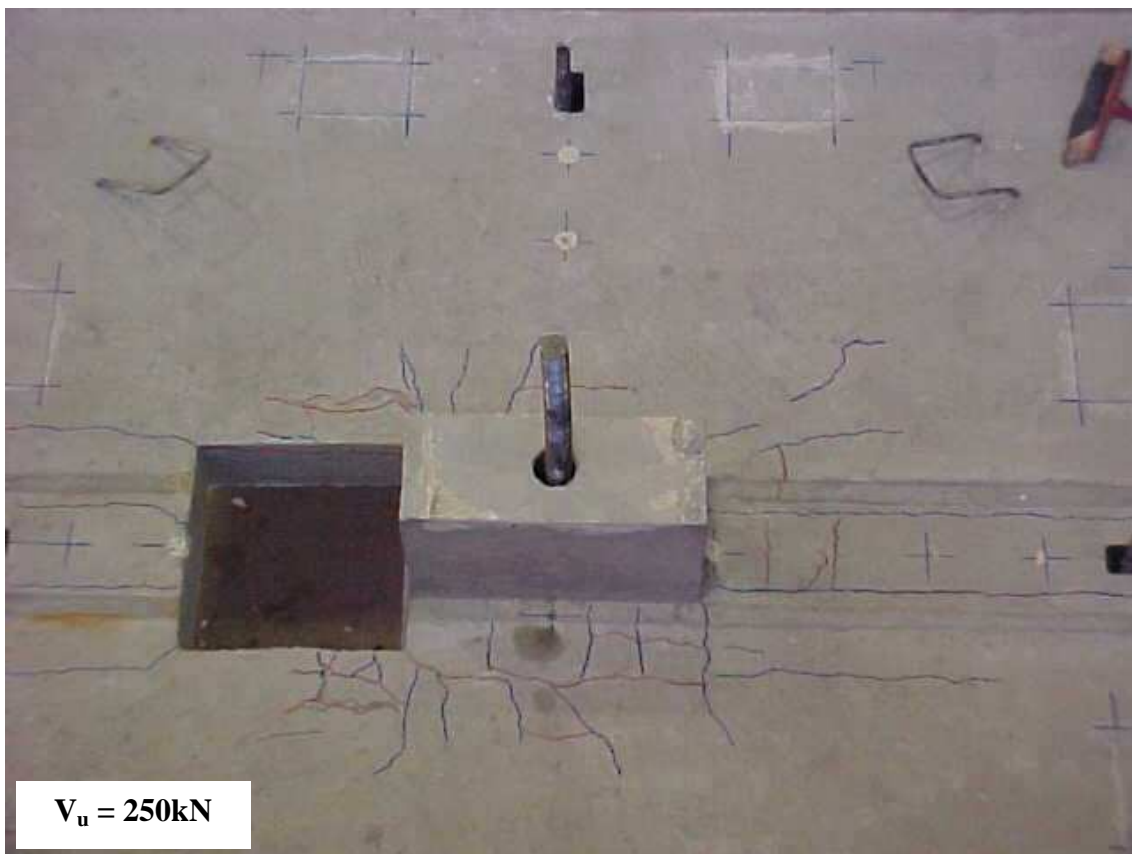


Figura 4.4 – Fissuração na laje L3

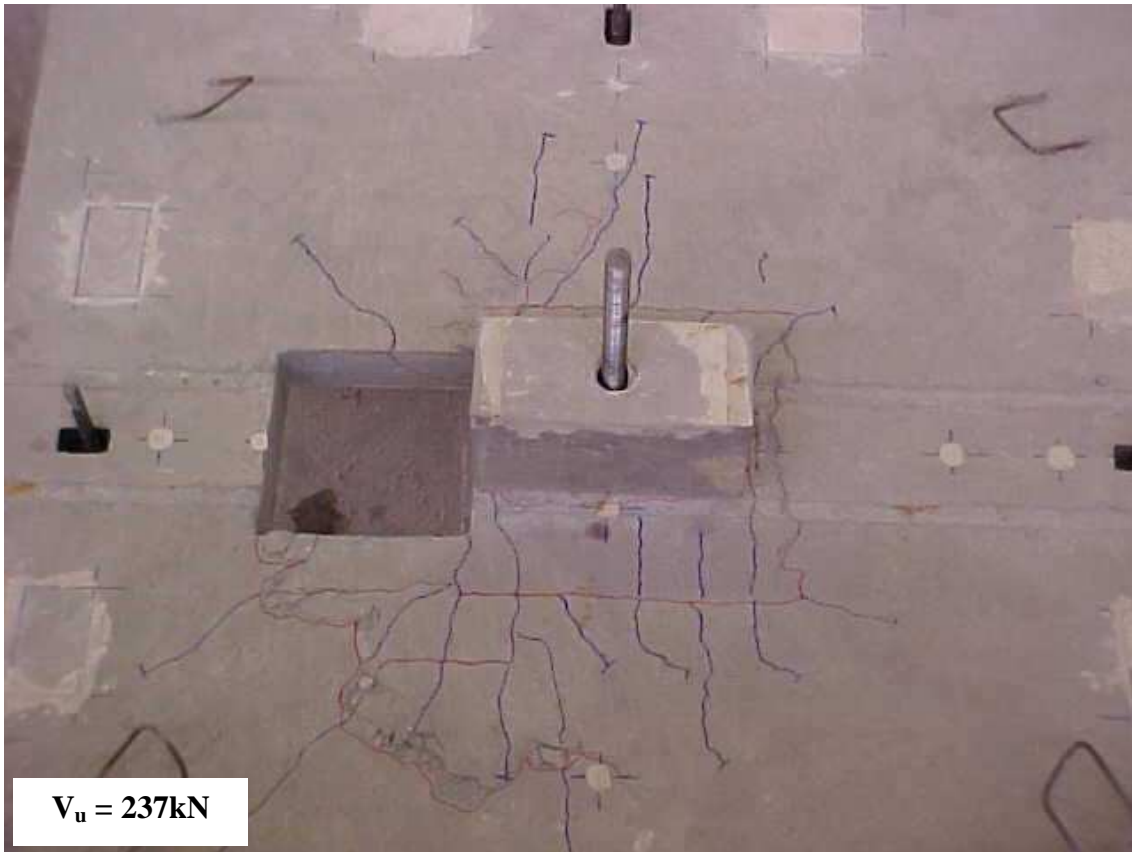


Figura 4.5 – Fissuração na laje L4

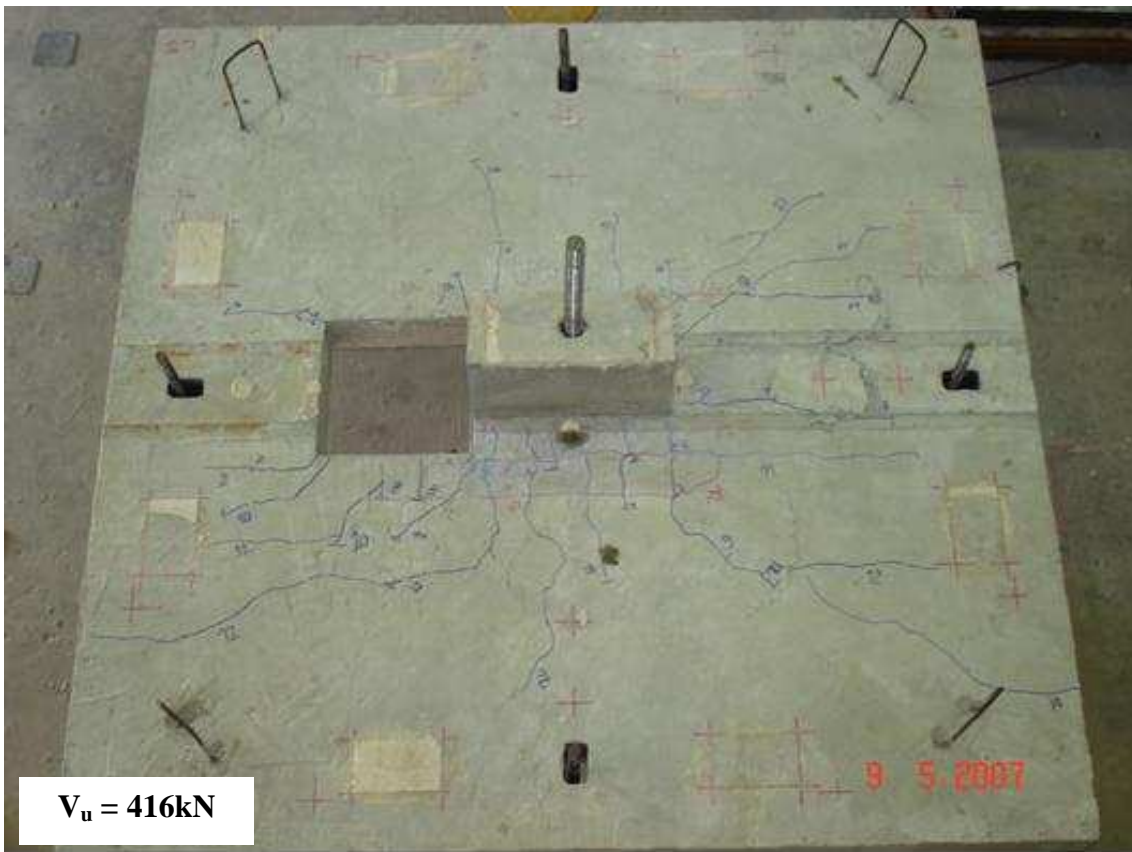


Figura 4.6 – Fissuração na laje L5

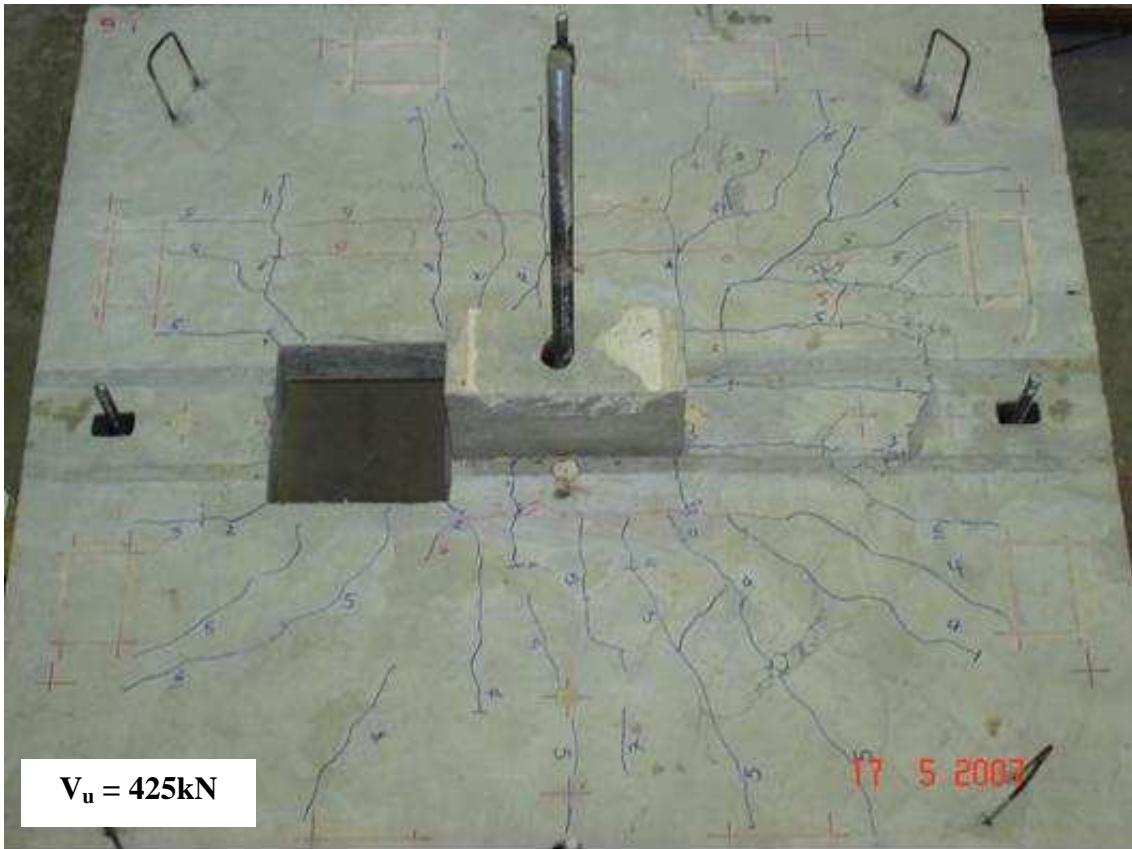


Figura 4.7 – Fissuração na laje L6



Figura 4.8 – Fissuração na laje L7

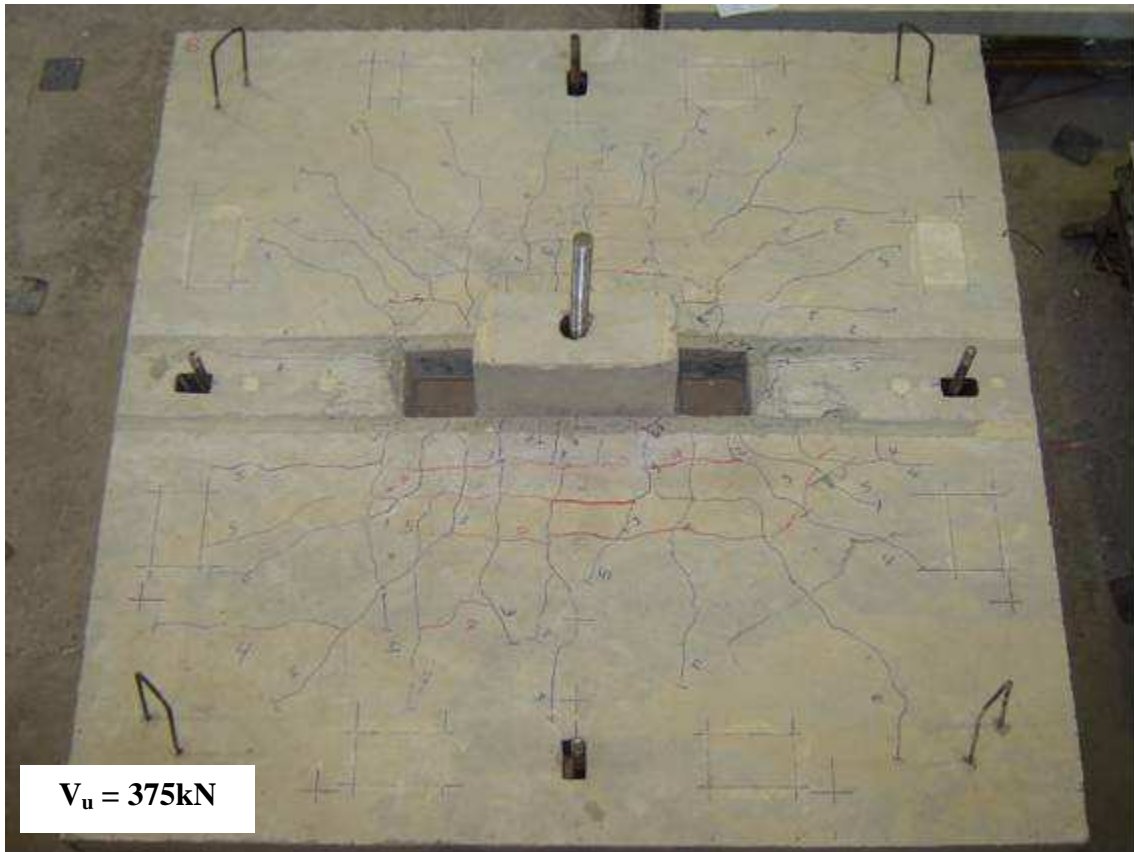


Figura 4.9 – Fissuração na laje L9



Figura 4.10 – Fissuração na laje L16



Figura 4.11 – Fissuração na laje L19

4.3.2 Superfície de ruptura

A superfície de ruptura, nas lajes L1 a L4, L16 e L19, surgiu na face superior da laje (face tracionada) e se estendeu em direção da junção da laje com o pilar na face inferior da laje (face comprimida), formando inclinações variadas, que originaram o “cone” de punção. A inclinação da superfície de ruptura em relação à face inferior na laje L1 variou entre 25° e 43°; nas lajes L2 a L4, houve variações entre 22° e 85°; na laje L16, o mínimo observado foi 25° e o máximo foi 38°; a laje L19 teve inclinações variando entre 18° e 31°.

Nas lajes L5, L6, L7 e L9, a superfície de ruptura no bordo situado na direção N (norte) terminou distante do pilar no bordo inferior da laje. A inclinação da superfície de ruptura em relação à face inferior, das lajes L5 e L6, variou entre 29° e 60°; nas lajes L7 e L9, variou entre 24° e 68°.

Nas lajes com furo, foi possível ver a formação da superfície de ruptura através do furo. A determinação da inclinação das superfícies de ruptura foi feita através da escarificação do cobrimento do concreto, visualizando onde a superfície de ruptura cruzou a armadura de

flexão e fazendo a medição com trena, tendo as faces do pilar como referência. As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam, respectivamente, a configuração das superfícies de ruptura e a fotografia das superfícies de ruptura dentro dos furos, das lajes da Série 1.

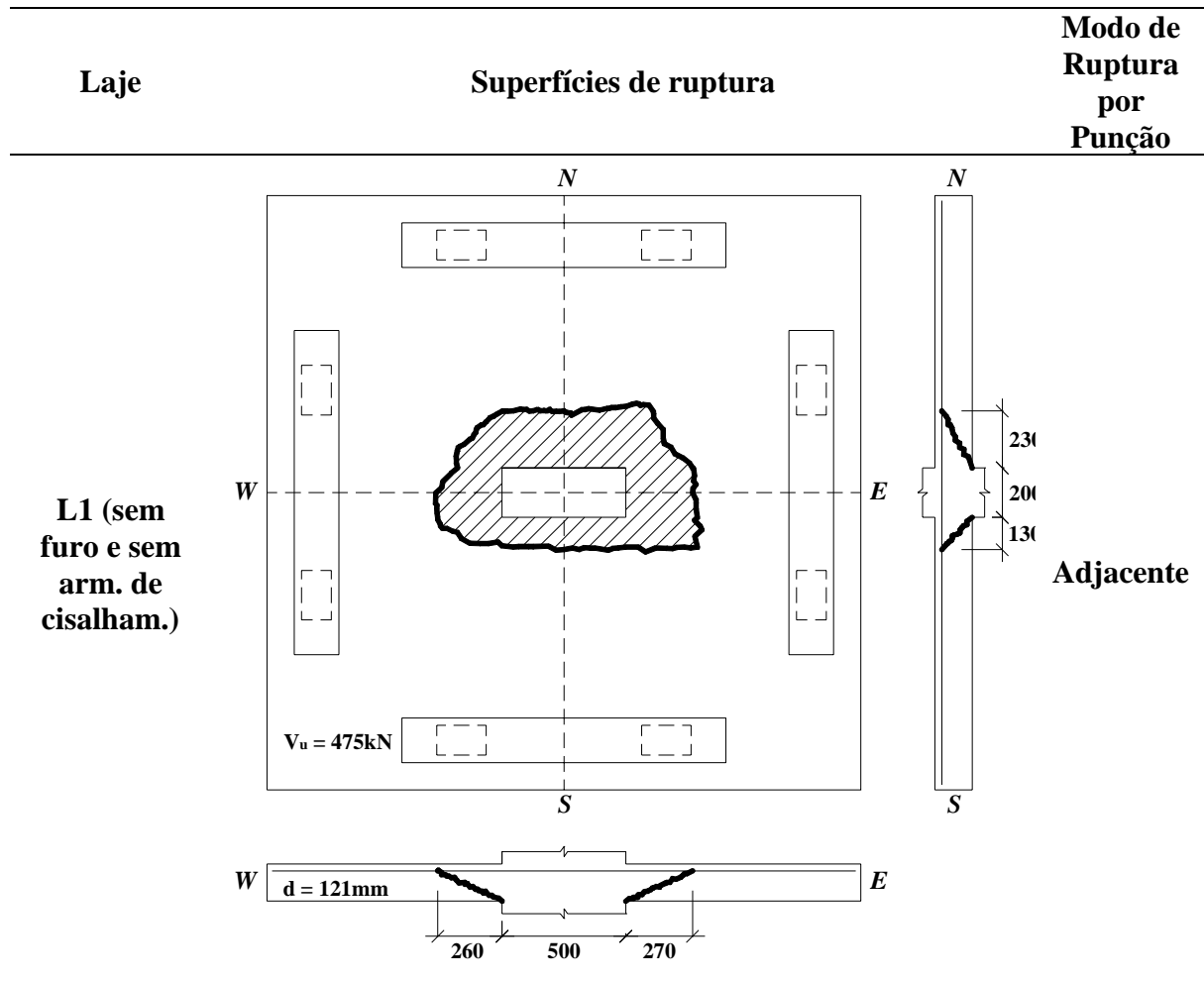


Figura 4.12 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 1

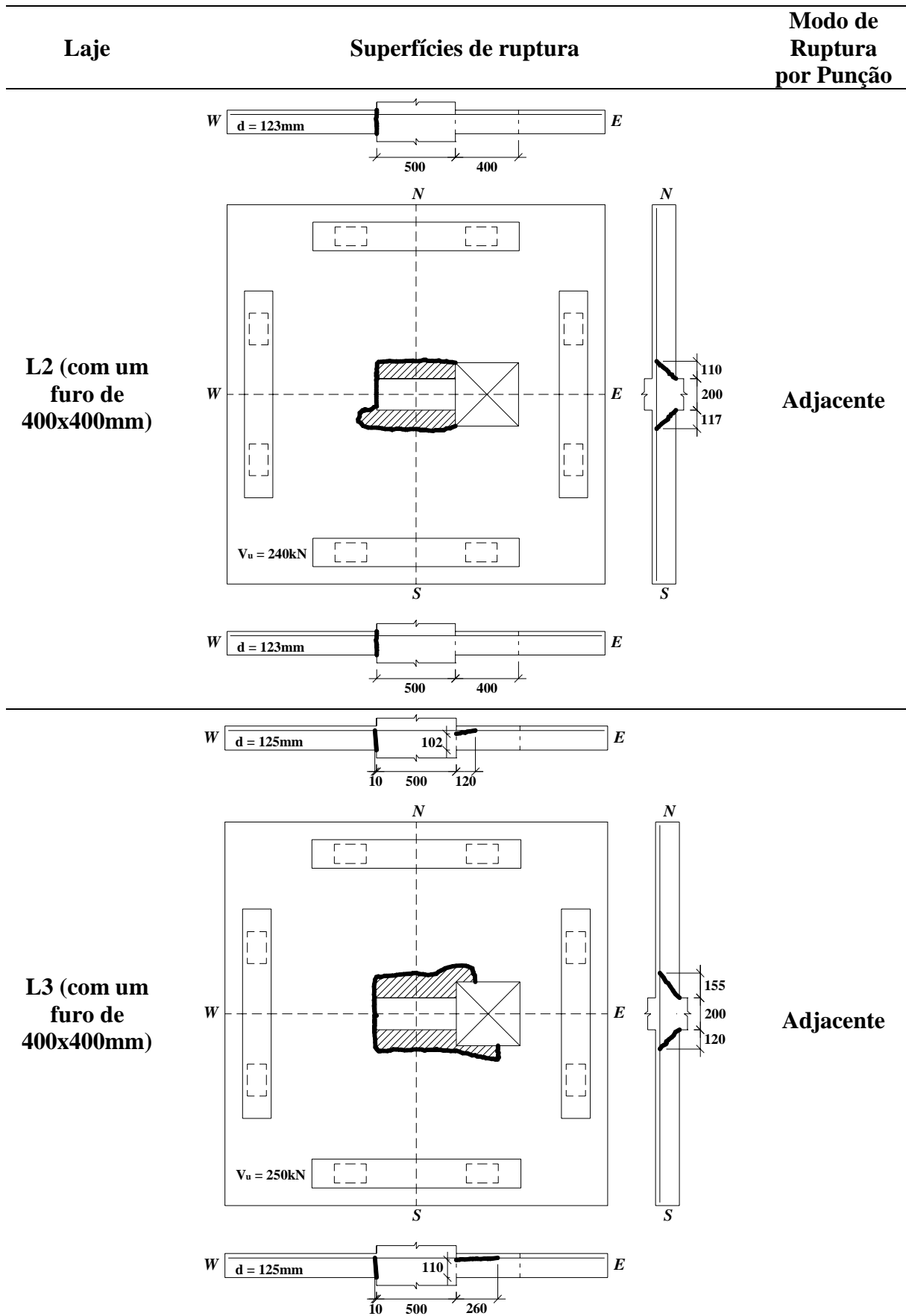


Figura 4.12 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)

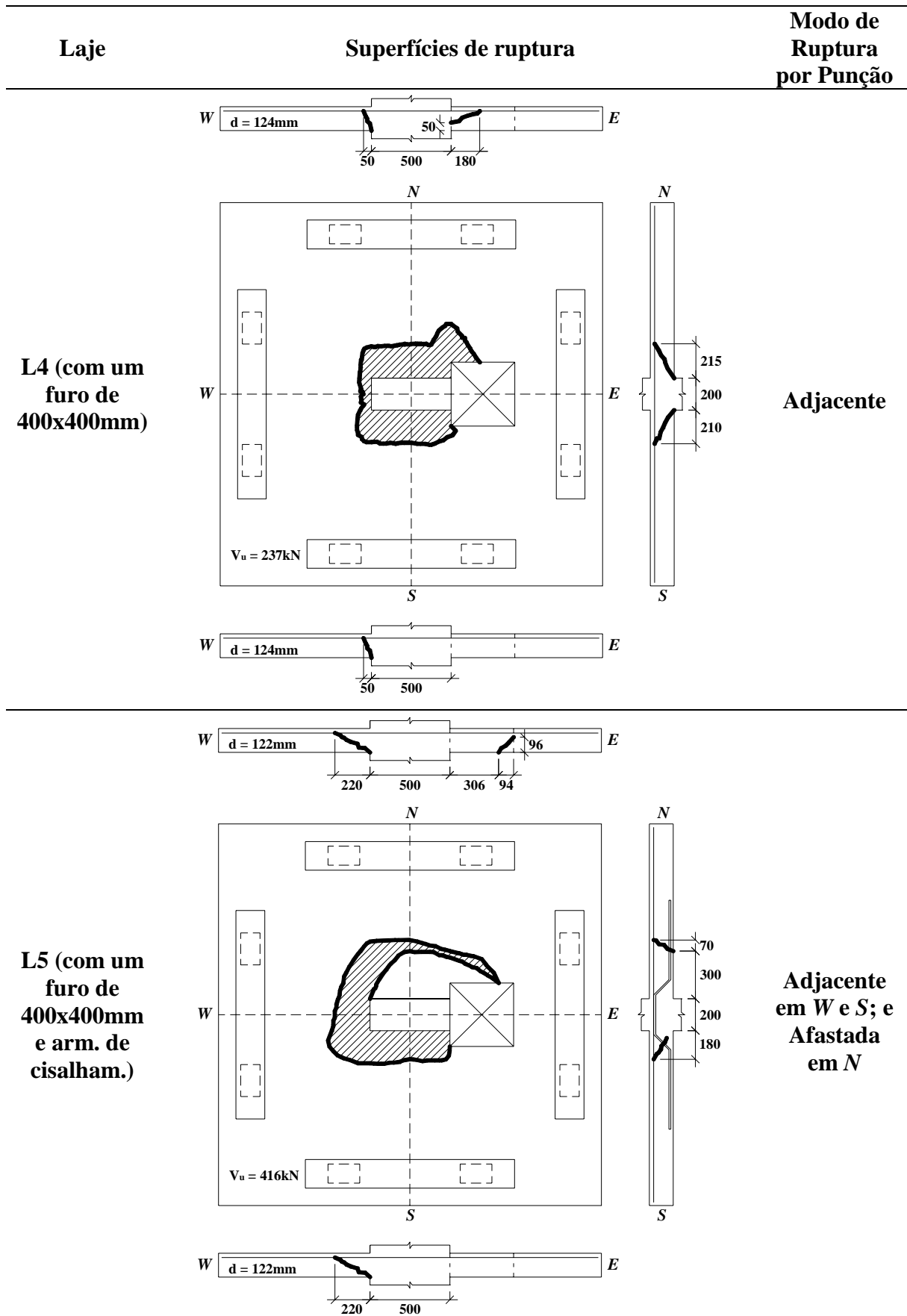


Figura 4.12 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)

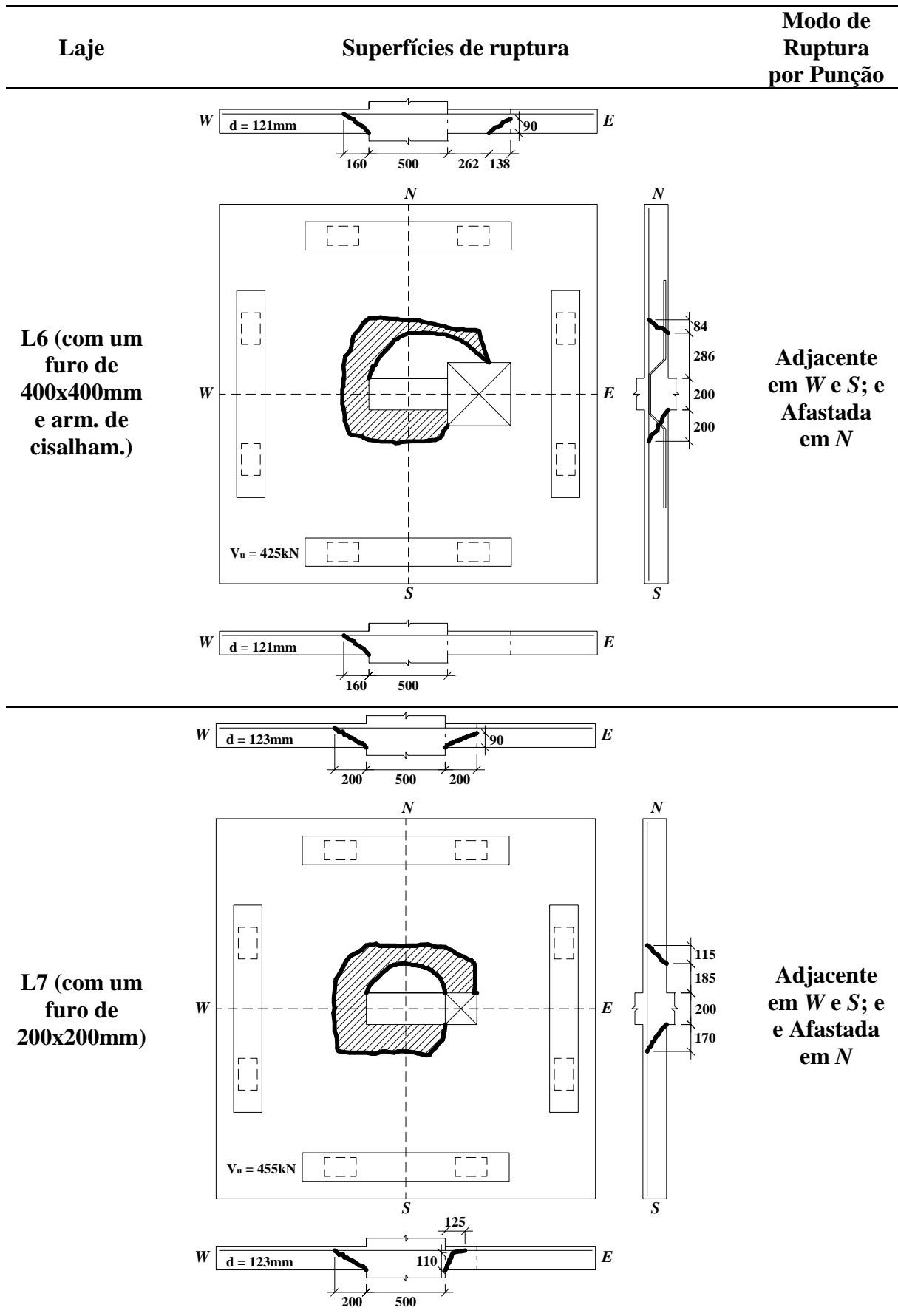


Figura 4.12 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)

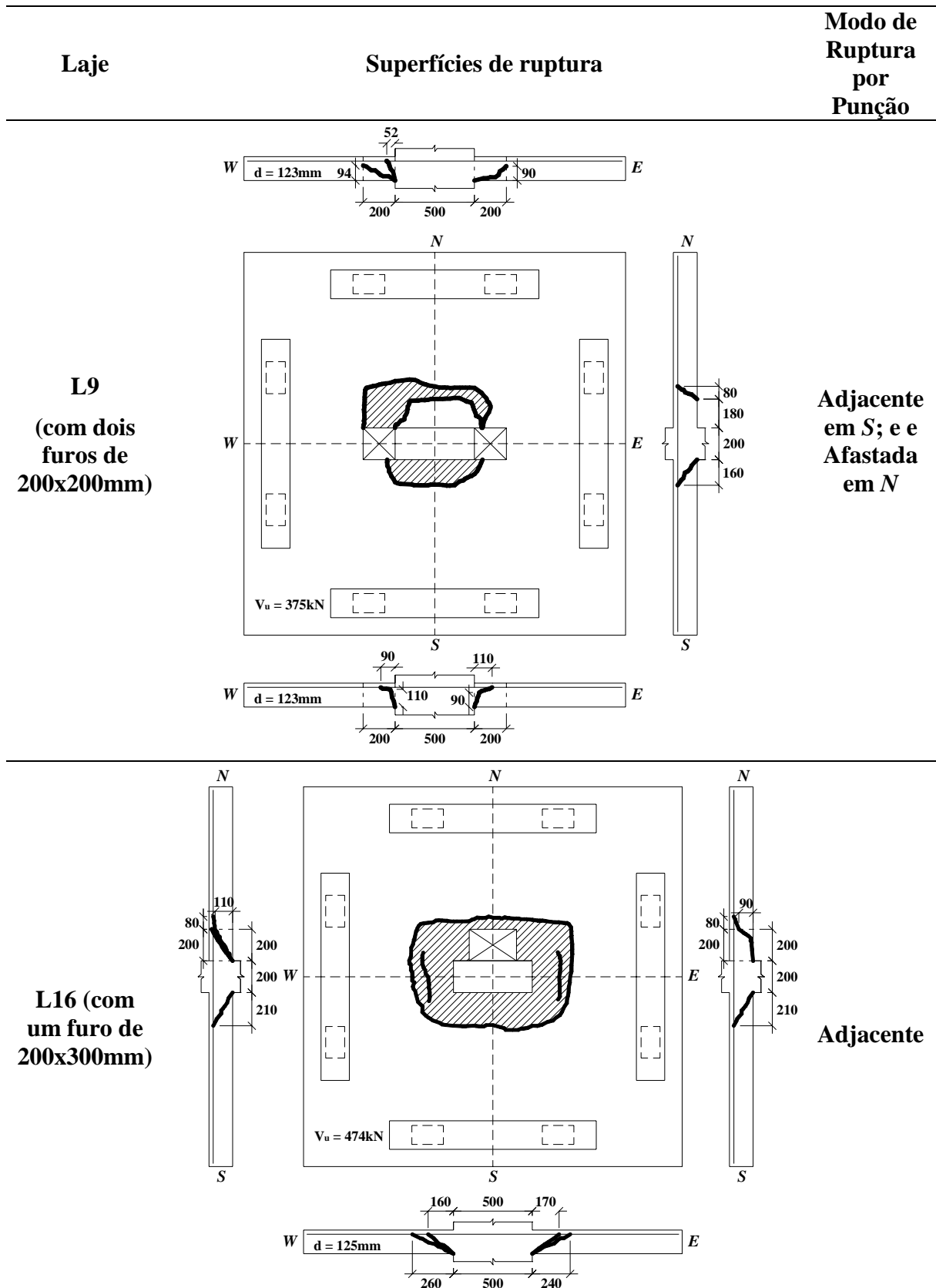


Figura 4.12 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)

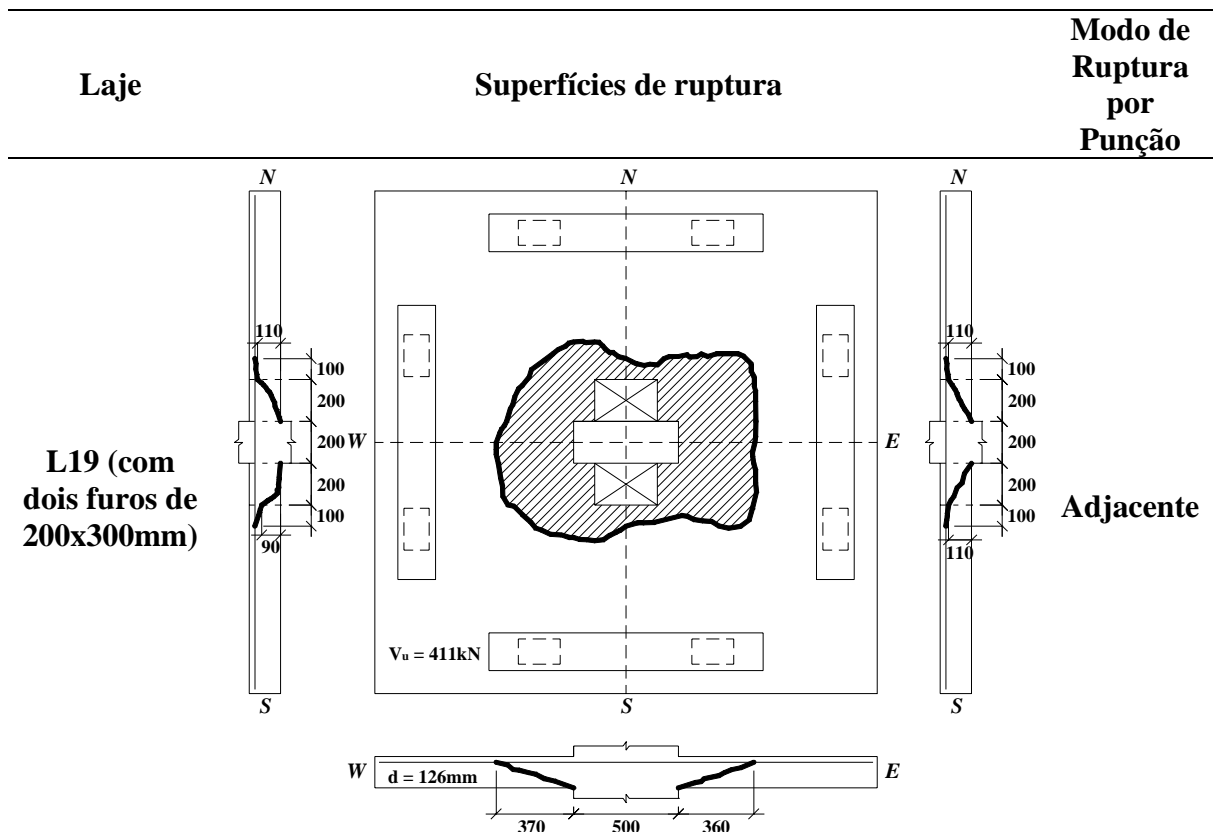


Figura 4.12 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)



Figura 4.13 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 1

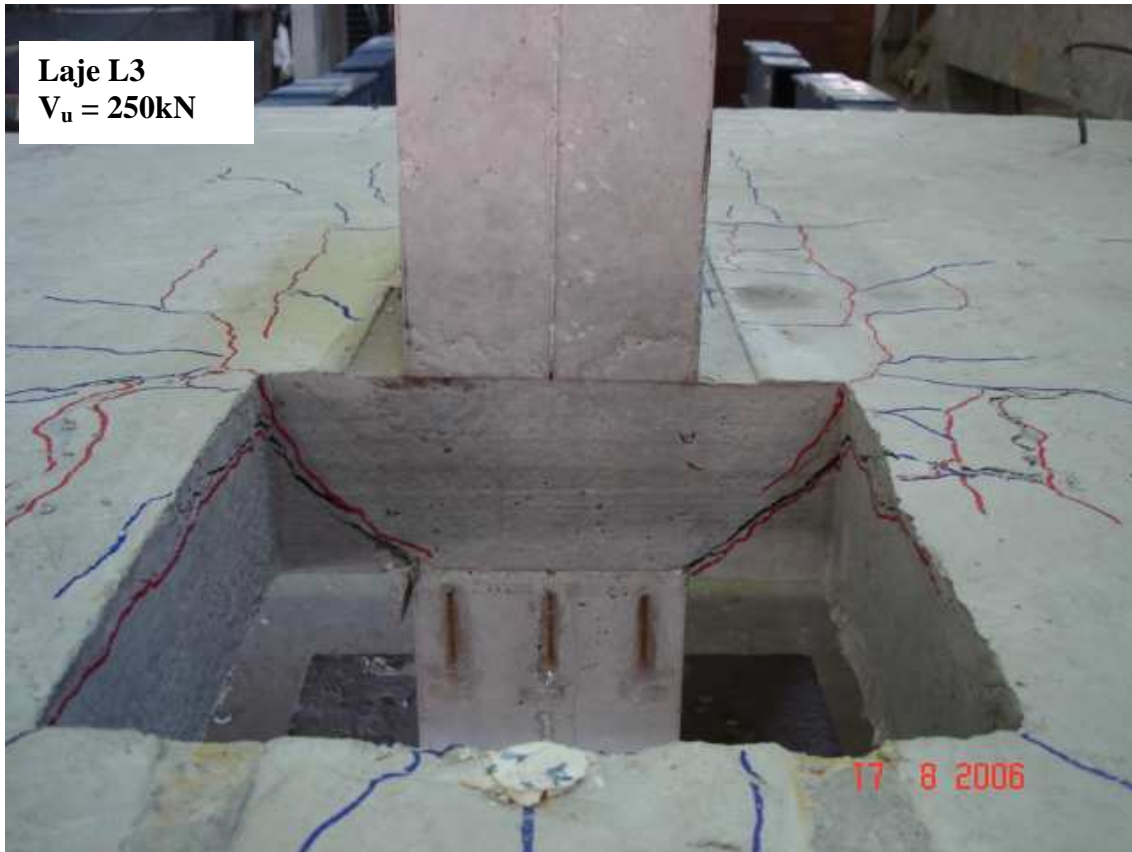


Figura 4.13 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)



Figura 4.13 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)



Figura 4.13 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)



Figura 4.13 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 1 (continuação)

4.4 DESLOCAMENTO VERTICAL

Nas Figuras 4.14 e 4.33 são apresentados os gráficos de *Deslocamento vertical x Posição em relação ao centro da laje*, em cada eixo, dos defletômetros instalados, para todas as lajes da Série 1.

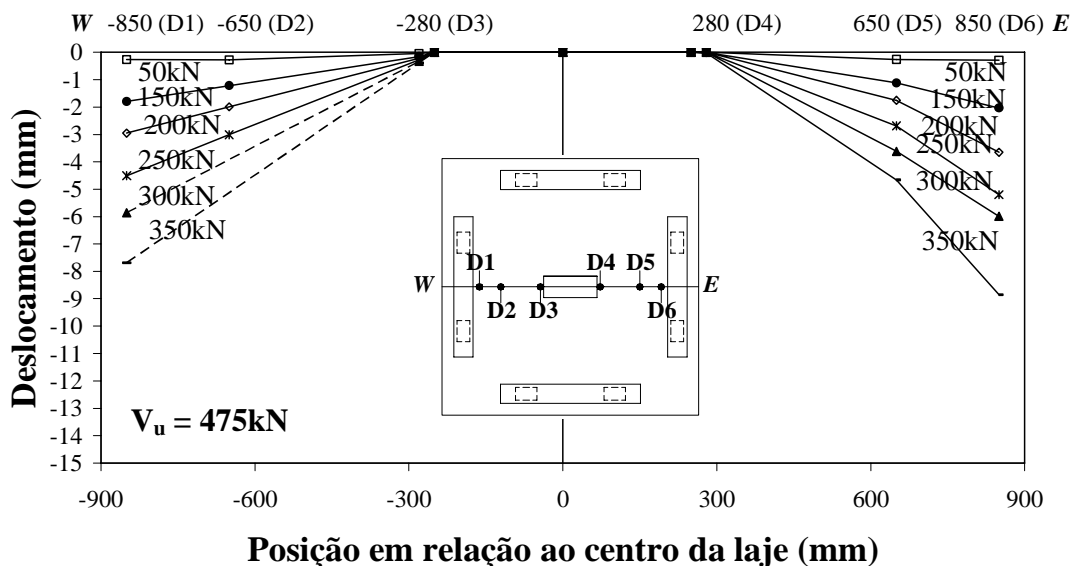


Figura 4.14 – Deslocamentos verticais medidos na laje L1, eixo WE

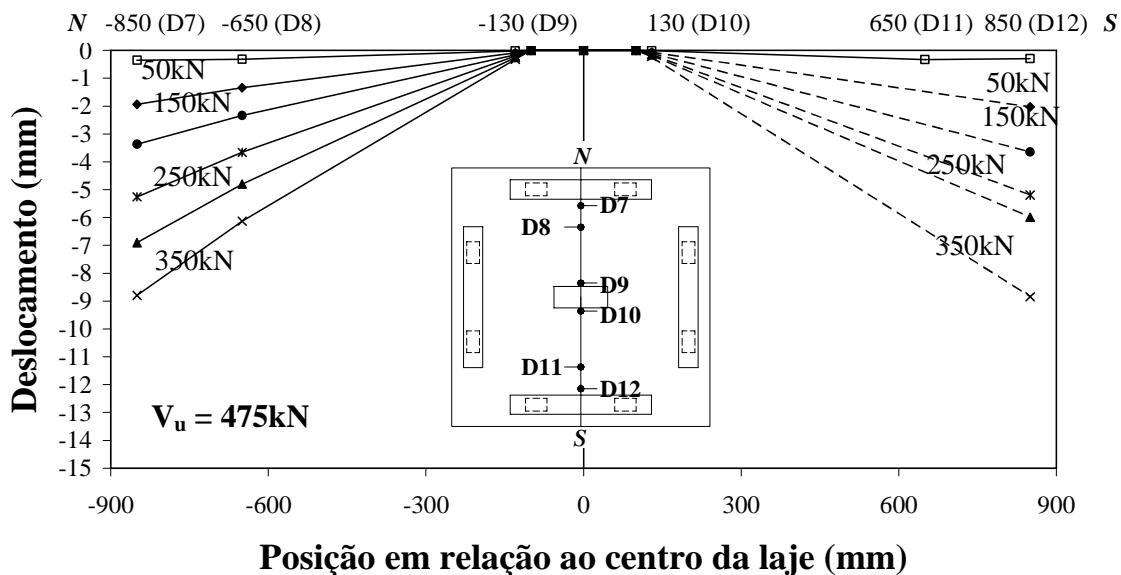


Figura 4.15 – Deslocamentos verticais medidos na laje L1, eixo NS

Na laje L1, o defletômetro D2 não teve leitura a partir da carga de 250kN e o defletômetro D11 não teve leitura a partir da carga de 100kN. Nos gráficos, a ligação entre os pontos anterior e posterior a esses sem leituras foi representada por uma linha tracejada. O

comportamento da laje nas duas direções foi simétrico, com pouca variação em relação ao previsto.

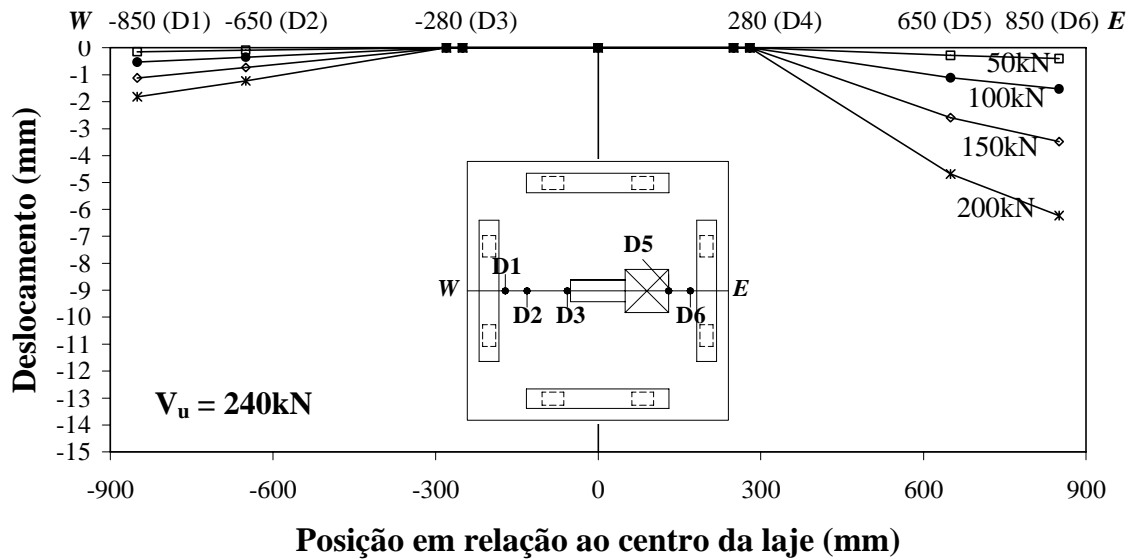


Figura 4.16 – Deslocamentos verticais medidos na laje L2, eixo WE

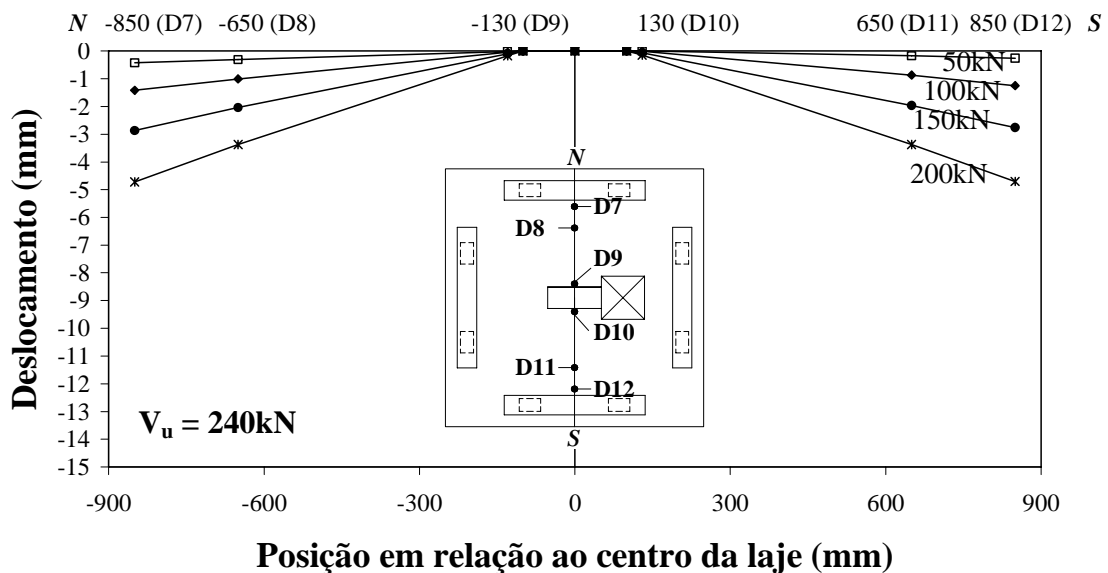


Figura 4.17 – Deslocamentos verticais medidos na laje L2, eixo NS

Na laje L2, devido ao furo estar situado na direção E, os deslocamentos máximos nessa direção foram bastante superiores (aproximadamente o triplo) em relação aos máximos apresentados na direção W. Na direção NS, a laje apresentou um comportamento simétrico.

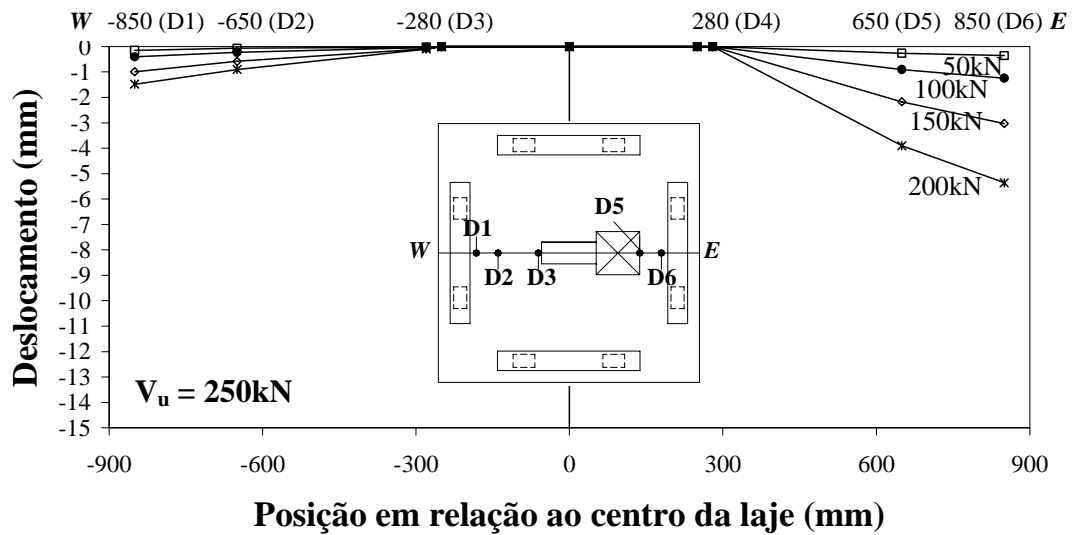


Figura 4.18 – Deslocamentos verticais medidos na laje L3, eixo WE

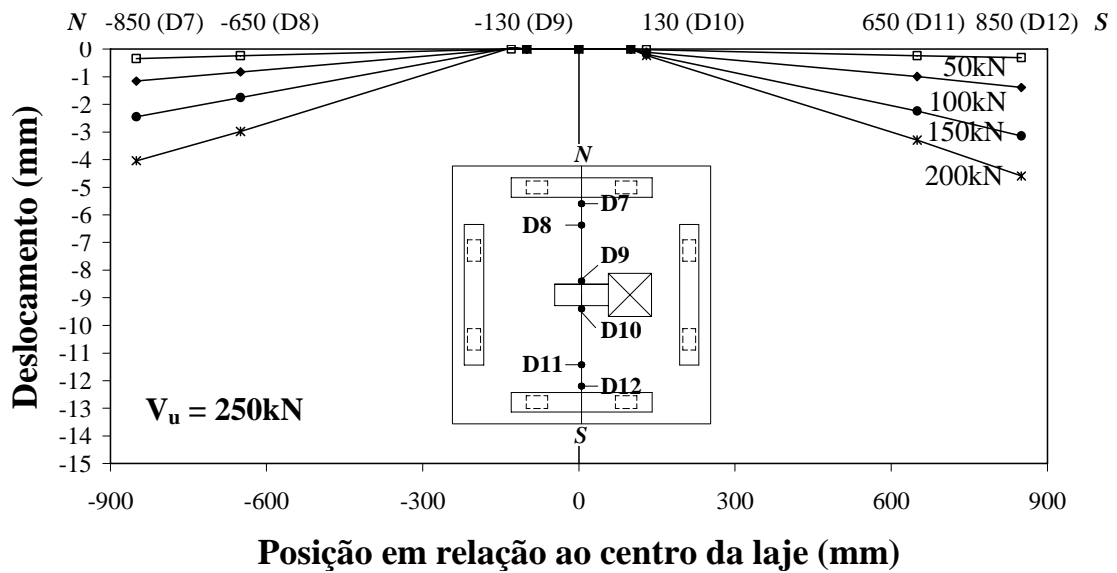


Figura 4.19 – Deslocamentos verticais medidos na laje L3, eixo NS

Na laje L3, assim como na laje L2, os deslocamentos máximos na direção E foram aproximadamente o triplo dos máximos apresentados na direção W. Na direção NS, teve comportamento simétrico.

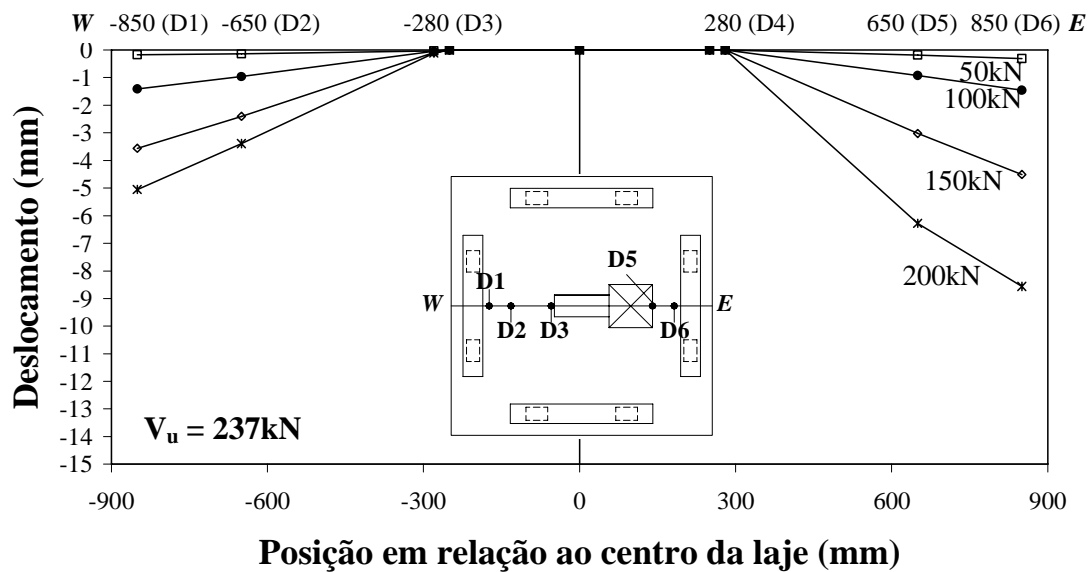


Figura 4.20 – Deslocamentos verticais medidos na laje L4, eixo WE

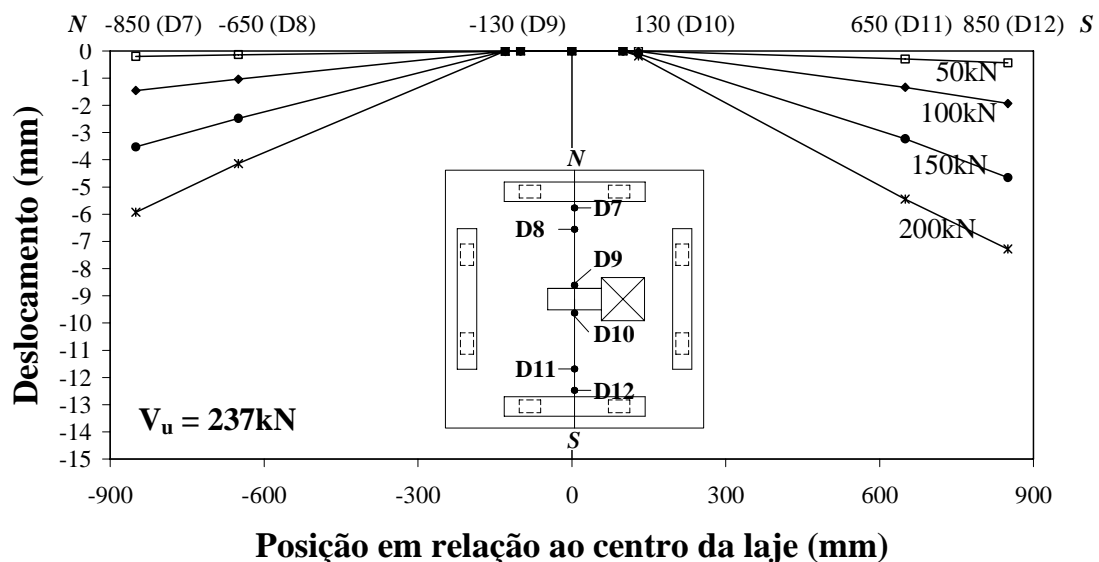


Figura 4.21 – Deslocamentos verticais medidos na laje L4, eixo NS

A laje L4 apresentou deslocamentos máximos na direção E, superiores em aproximadamente 50% em relação aos da direção W. Na direção NS, nas três últimas cargas surgiram disparidades, em média, de aproximadamente 1,15mm entre os deslocamentos máximos registrados nos dois lados, sendo que no lado S foi sempre superior.

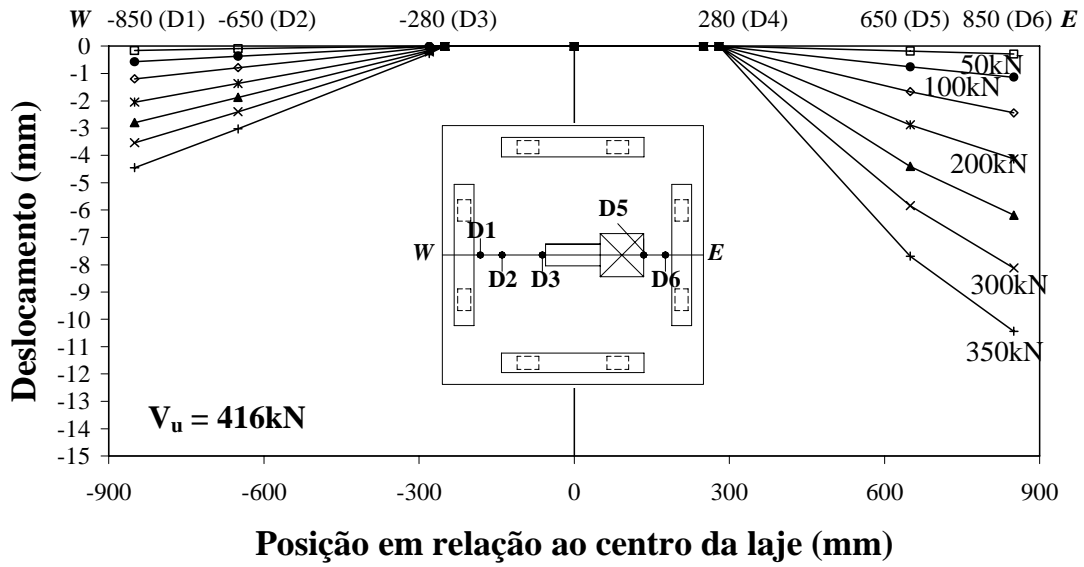


Figura 4.22 – Deslocamentos verticais medidos na laje L5, eixo WE

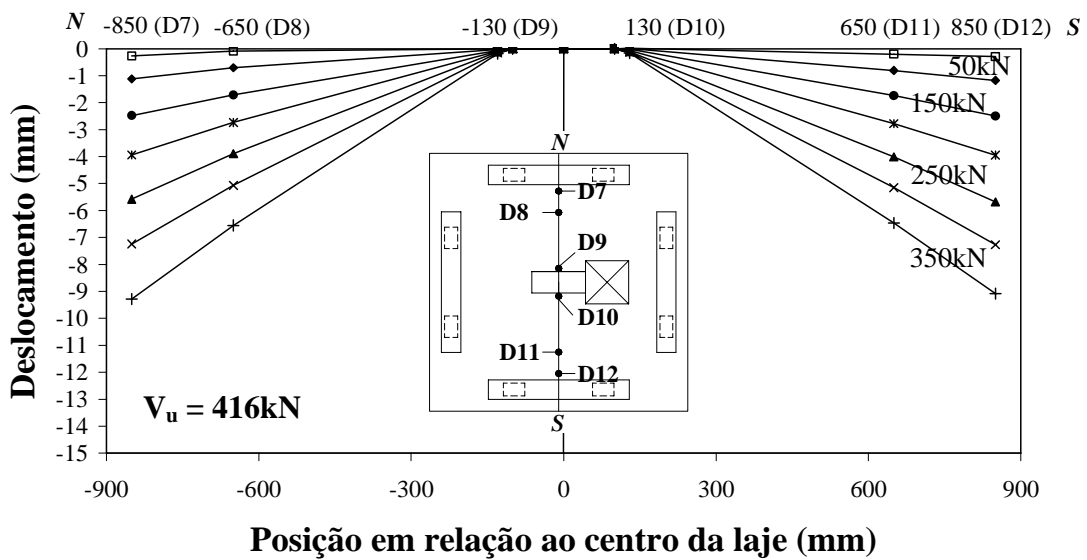


Figura 4.23 – Deslocamentos verticais medidos na laje L5, eixo NS

Na laje L5, os deslocamentos na direção E foram superiores em aproximadamente duas vezes os deslocamentos na direção W. Na direção NS, os carregamentos máximos foram simétricos.

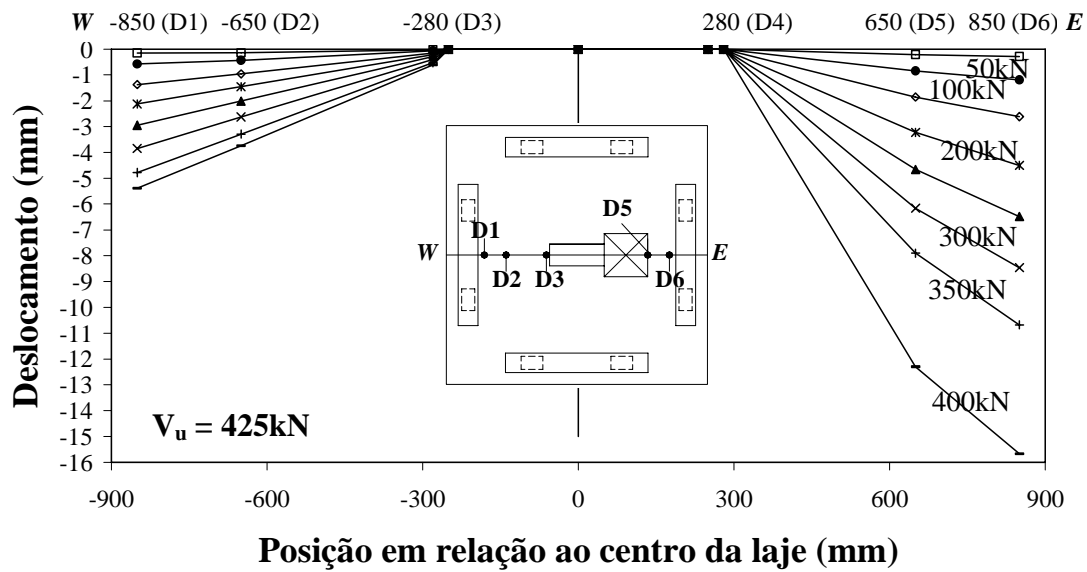


Figura 4.24 – Deslocamentos verticais medidos na laje L6, eixo WE

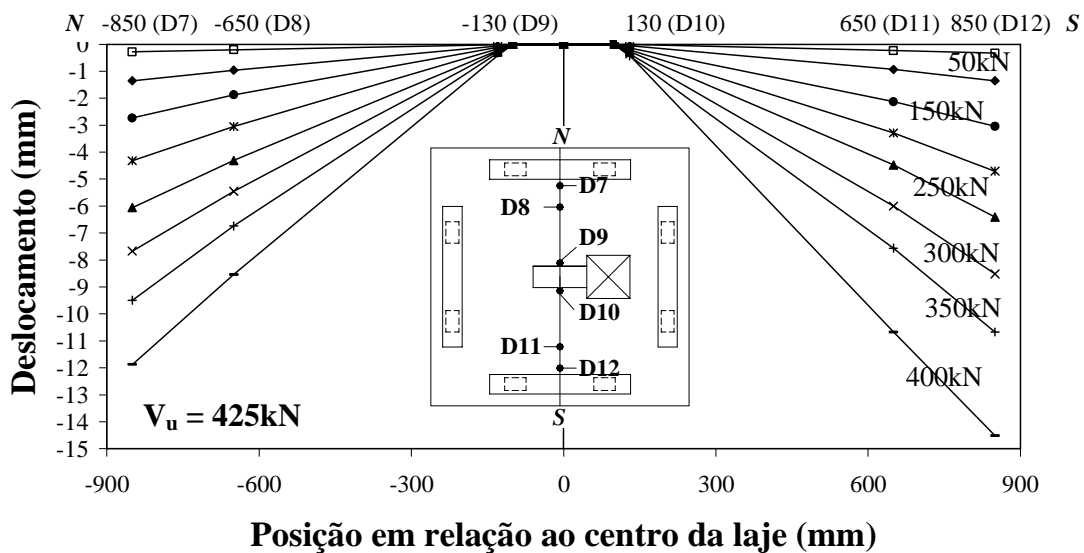


Figura 4.25 – Deslocamentos verticais medidos na laje L6, eixo NS

A laje L6, assim como a L5, teve deslocamentos na direção *E* superiores em aproximadamente duas vezes os deslocamentos na direção *W*. Na direção *NS*, os carregamentos máximos foram simétricos, com uma ressalva: nas últimas três cargas, surgiram disparidades começando com 1,18mm e terminando com uma diferença de 2,64mm entre os dois lados, sendo que no lado *S* foi sempre superior.

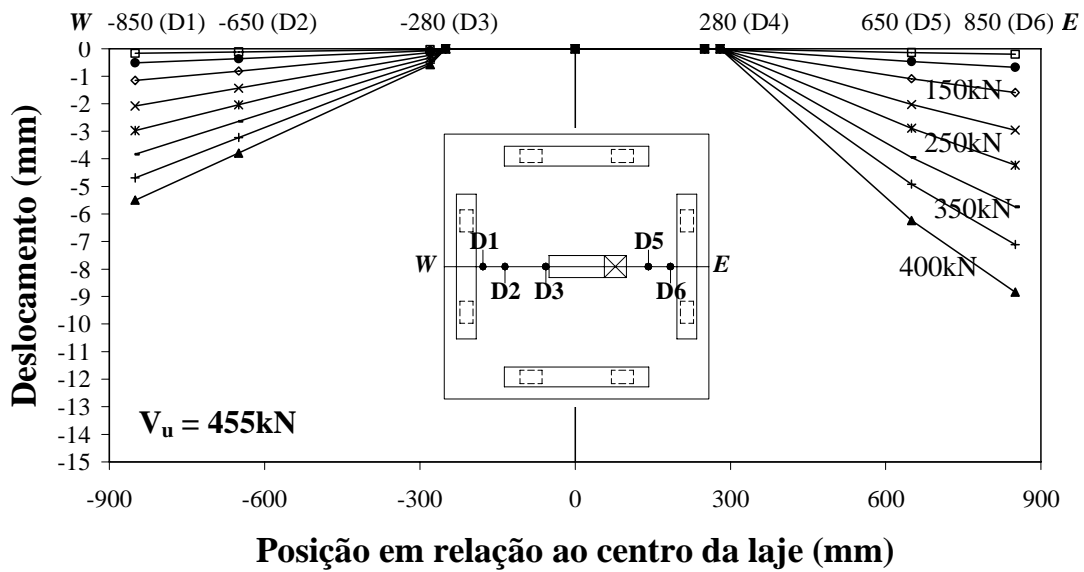


Figura 4.26 – Deslocamentos verticais medidos na laje L7, eixo WE

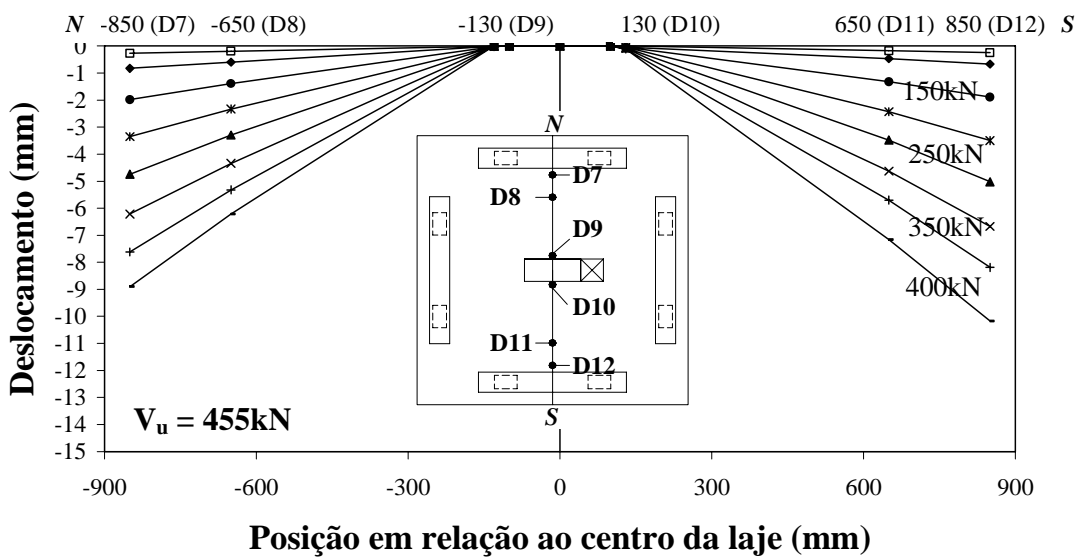


Figura 4.27 – Deslocamentos verticais medidos na laje L7, eixo NS

Na laje L7, na direção E, onde está situado o furo, os deslocamentos foram superiores aos deslocamentos na direção W em 40%, em média. Na direção NS, a laje apresentou um comportamento simétrico.

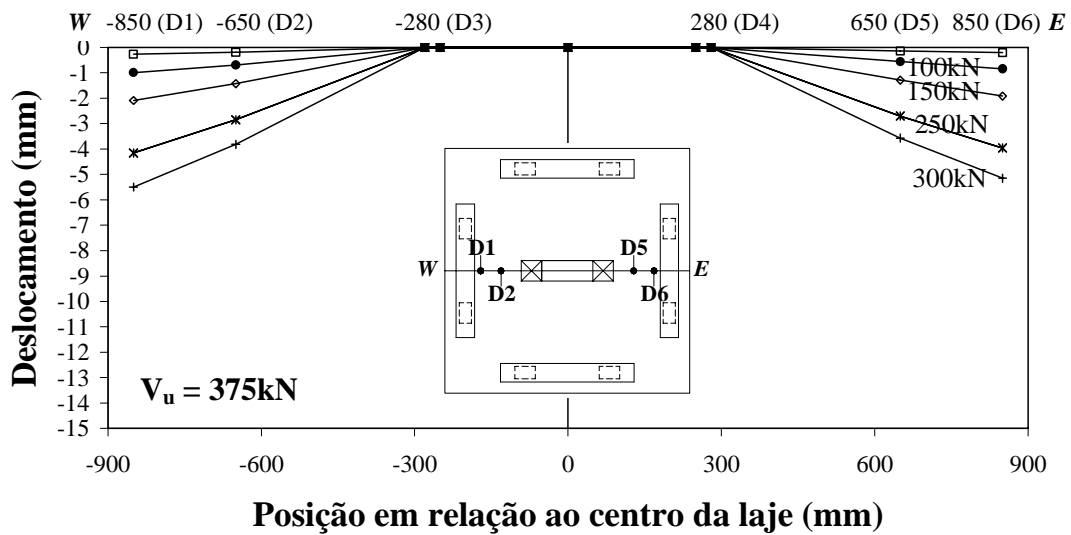


Figura 4.28 – Deslocamentos verticais medidos na laje L9, eixo WE

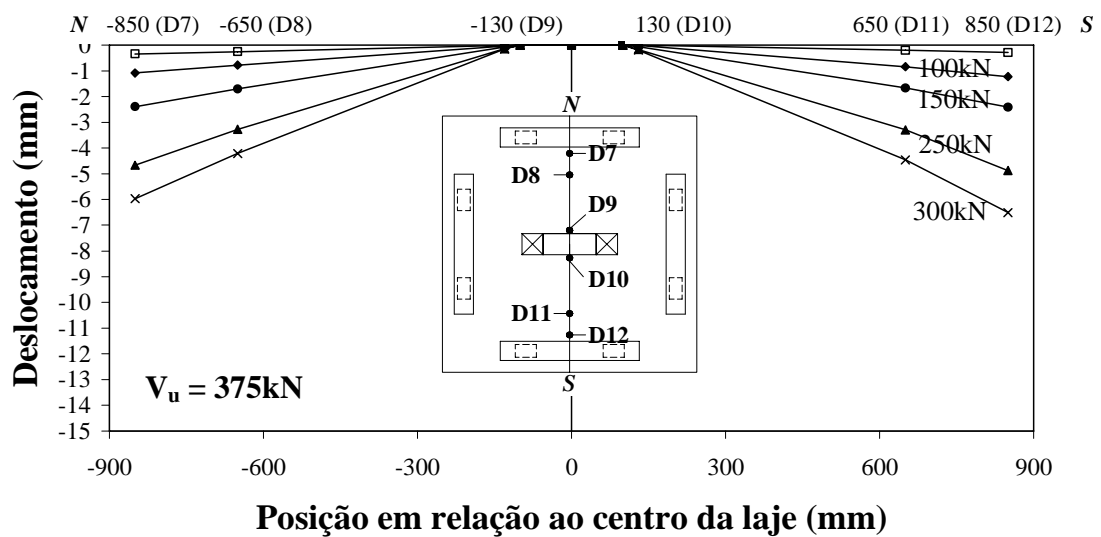


Figura 4.29 – Deslocamentos verticais medidos na laje L9, eixo NS

A laje L9 teve carregamento simétrico, conforme esperado, nas duas direções.

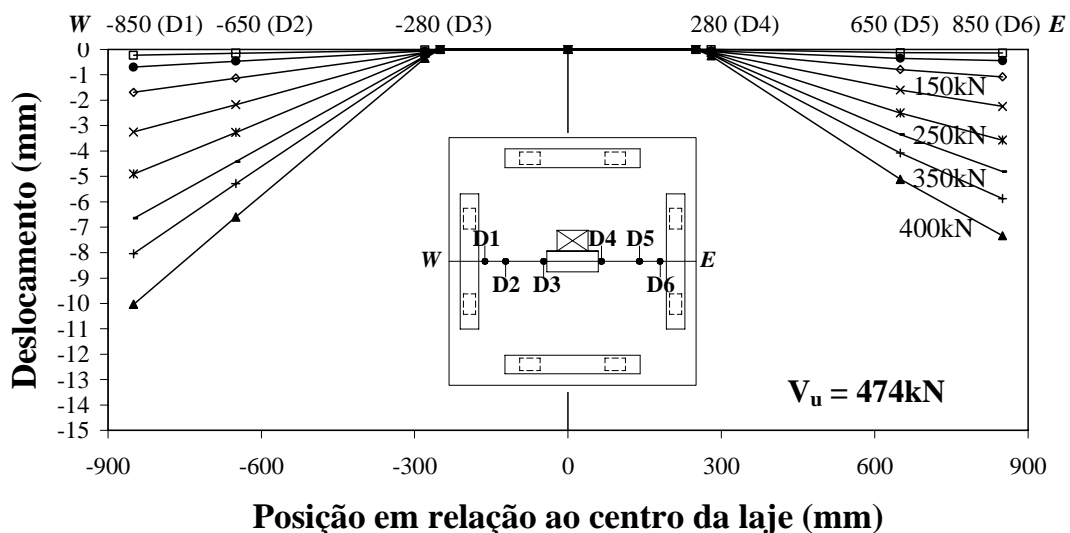


Figura 4.30 – Deslocamentos verticais medidos na laje L16, eixo WE

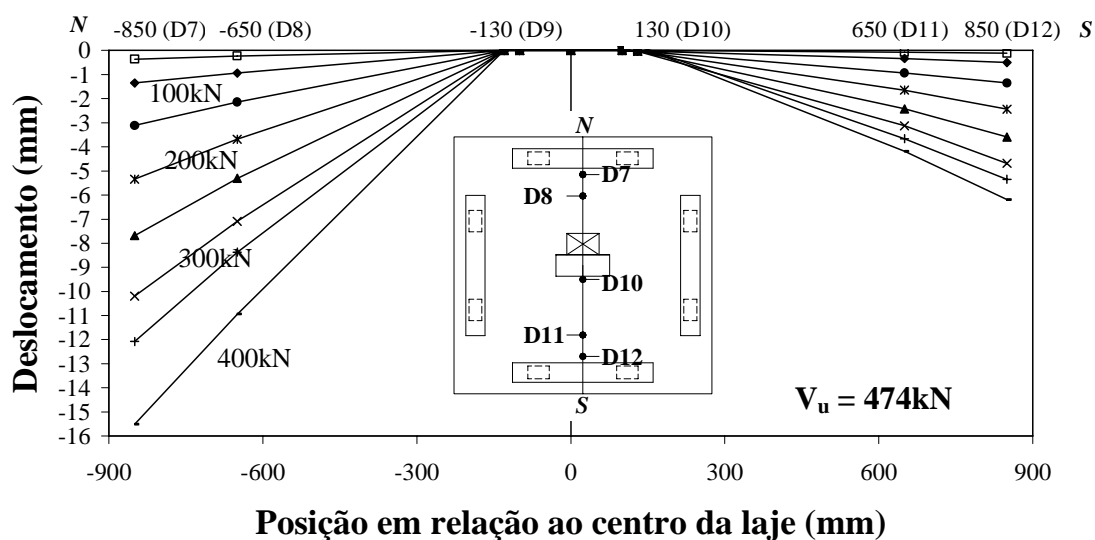


Figura 4.31 – Deslocamentos verticais medidos na laje L16, eixo NS

Na laje L16, o carregamento foi simétrico, mas na direção WE, sem furo, o lado W apresentou, desde o início do ensaio, deslocamentos superiores aos registrados em E. No início, o deslocamento máximo era 0,04mm superior e no final foi 2,70mm superior. Na direção NS, devido ao furo, os deslocamentos máximos em N foram, em média, 2,85 vezes superiores aos observados em S.

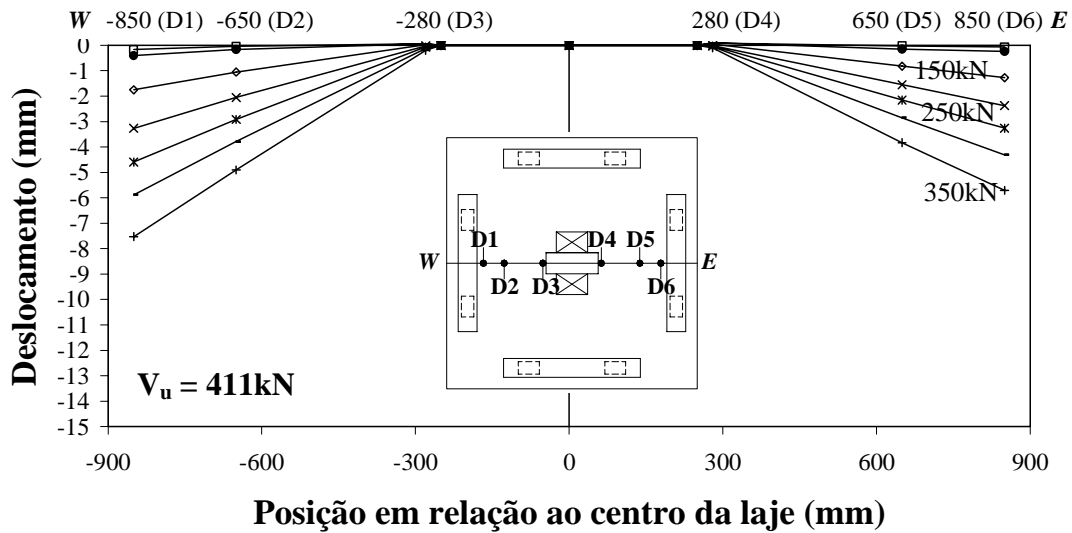


Figura 4.32 – Deslocamentos verticais medidos na laje L19, eixo WE

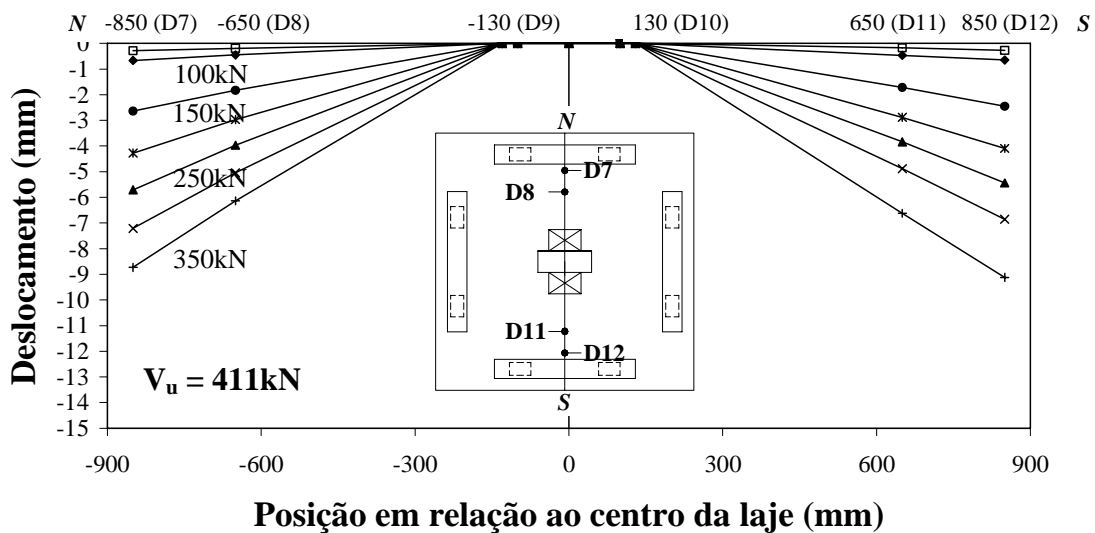


Figura 4.33 – Deslocamentos verticais medidos na laje L19, eixo NS

A laje L19 teve carregamento simétrico, porém, na direção WE, os deslocamentos em W, foram superiores. Na carga de 50kN, o deslocamento máximo em W foi 0,02mm maior que o apresentado em E; na carga de 350kN, foi 1,82mm superior. Na direção NS, a laje teve comportamento simétrico.

4.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DA ARMADURA DE FLEXÃO

Nas Figuras 4.34 a 4.43 são apresentados os gráficos *Carga x Deformação*, das barras instrumentadas nas armaduras de flexão, de todas as lajes da Série 1. Foram apresentadas as médias dos pares de extensômetros situados num mesmo ponto. Nas localizações em que houve falha do extensômetro, foi apresentado apenas o resultado do extensômetro que funcionou.

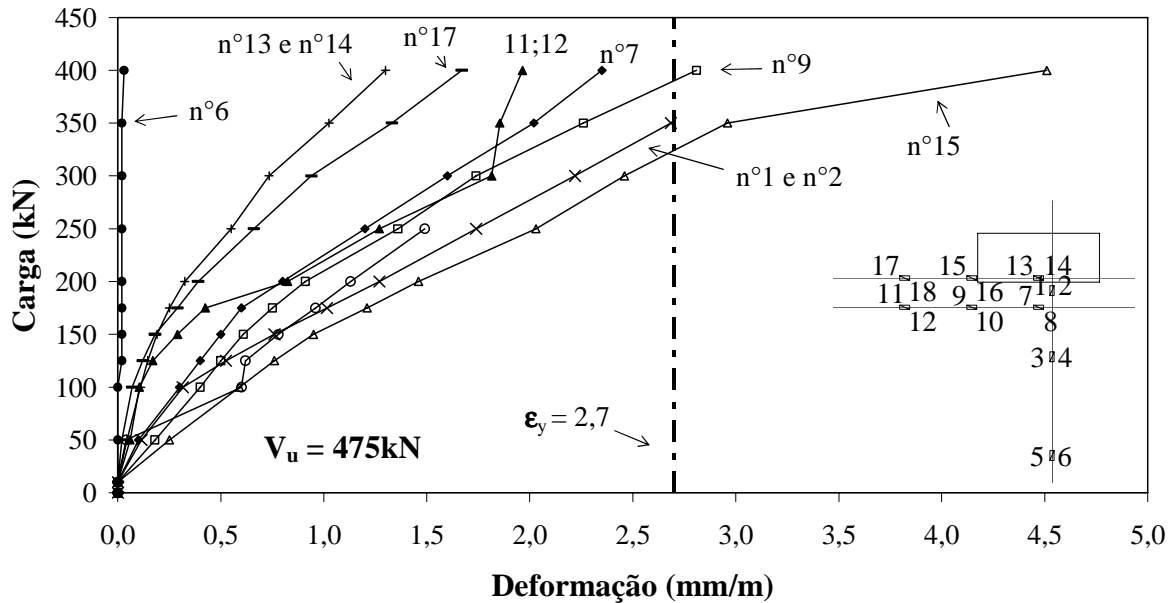


Figura 4.34 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1 extensômetros 1 ao 18

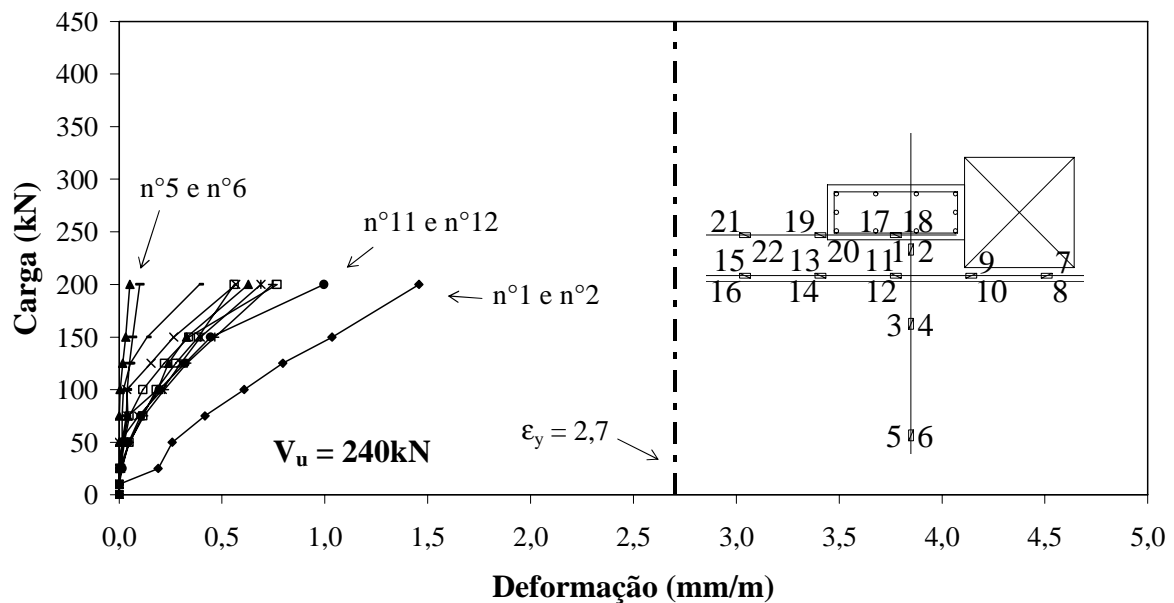


Figura 4.35 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 1 ao 22

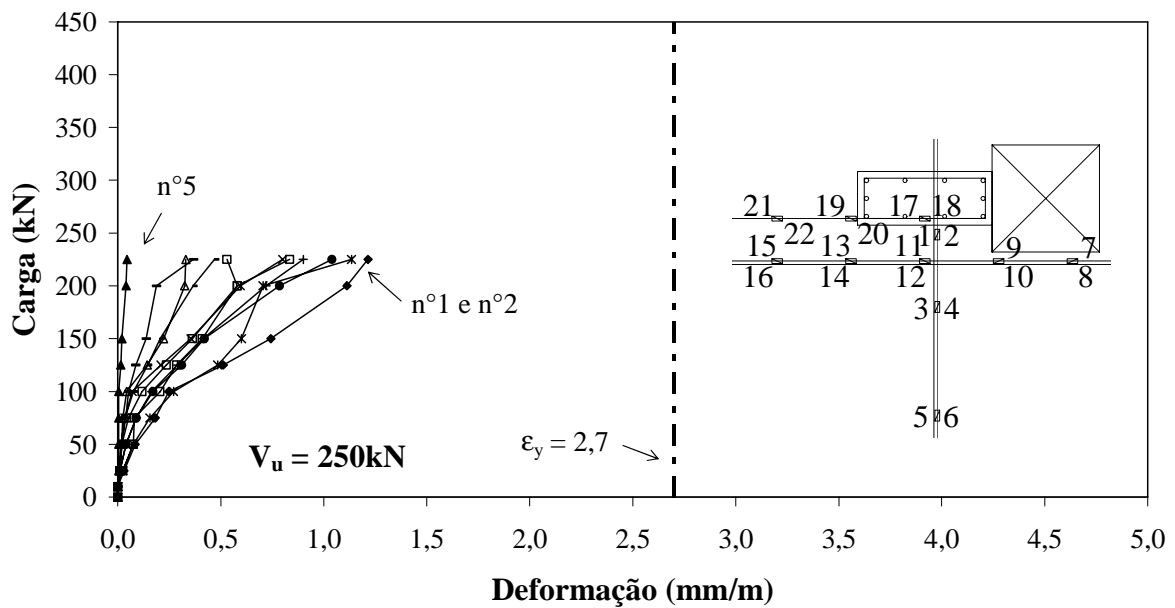


Figura 4.36 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 1 ao 22

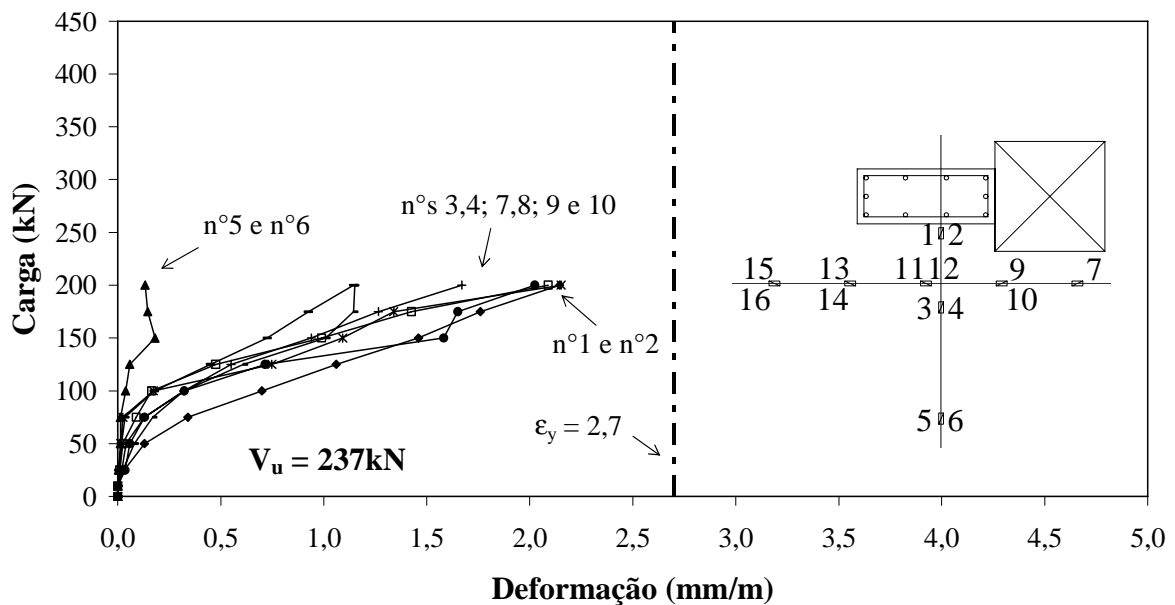


Figura 4.37 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 1 ao 16

Nas lajes L1 a L4, os extensômetros situados próximos ao pilar, de uma maneira geral, apresentaram valores de deformação maiores que os demais para um mesmo carregamento. Nas lajes L3 e L4, o acréscimo de carga até 50kN não indicou aumento considerável de deformação. Após este carregamento observa-se maior incremento das

deformações. Este fato pode estar relacionado com o surgimento das primeiras fissuras. Na laje L1, essa mudança de comportamento das deformações ocorreu após a carga de 150kN.

Com os carregamentos próximos às cargas de ruptura das lajes, as deformações em alguns pontos se aproximaram ou ultrapassaram a deformação de escoamento do aço utilizado.

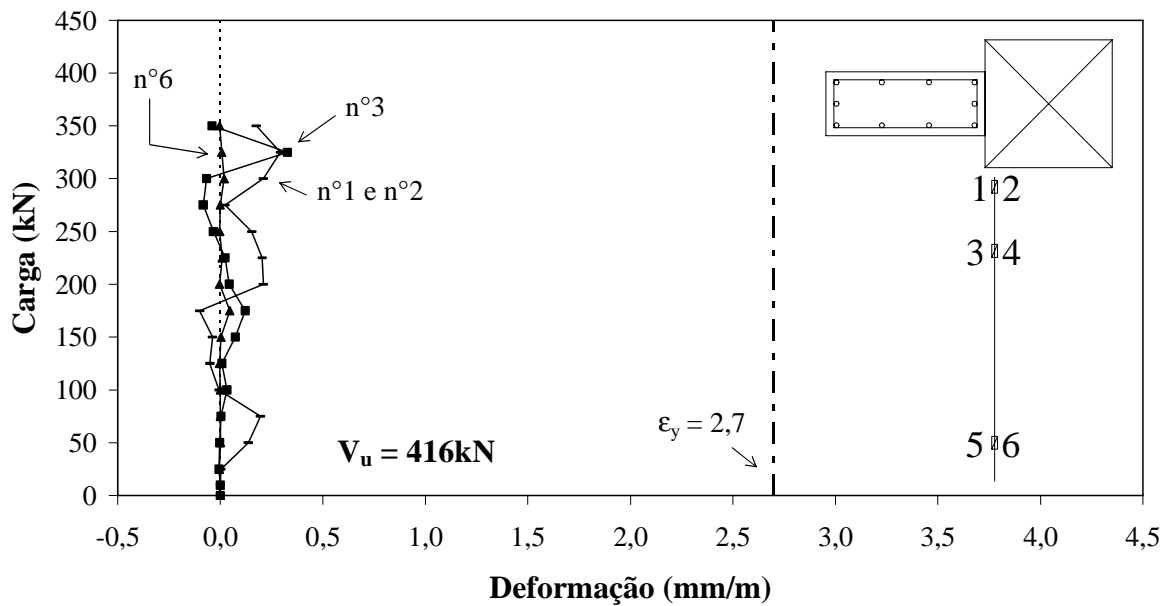


Figura 4.38 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensômetros 1 a 6

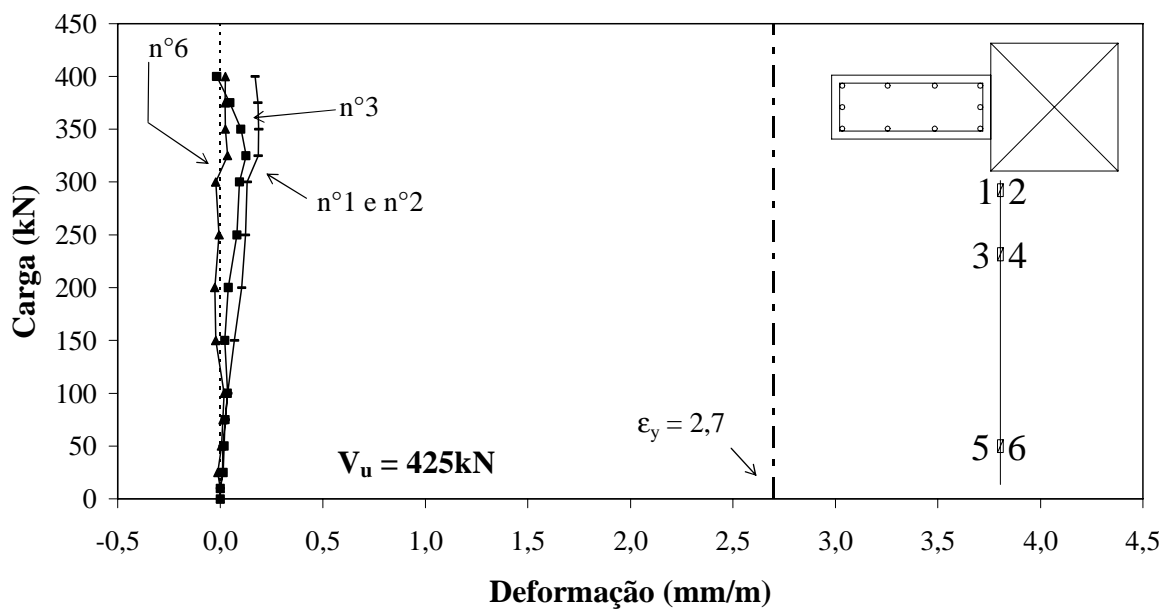


Figura 4.39 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensômetros 1 a 6

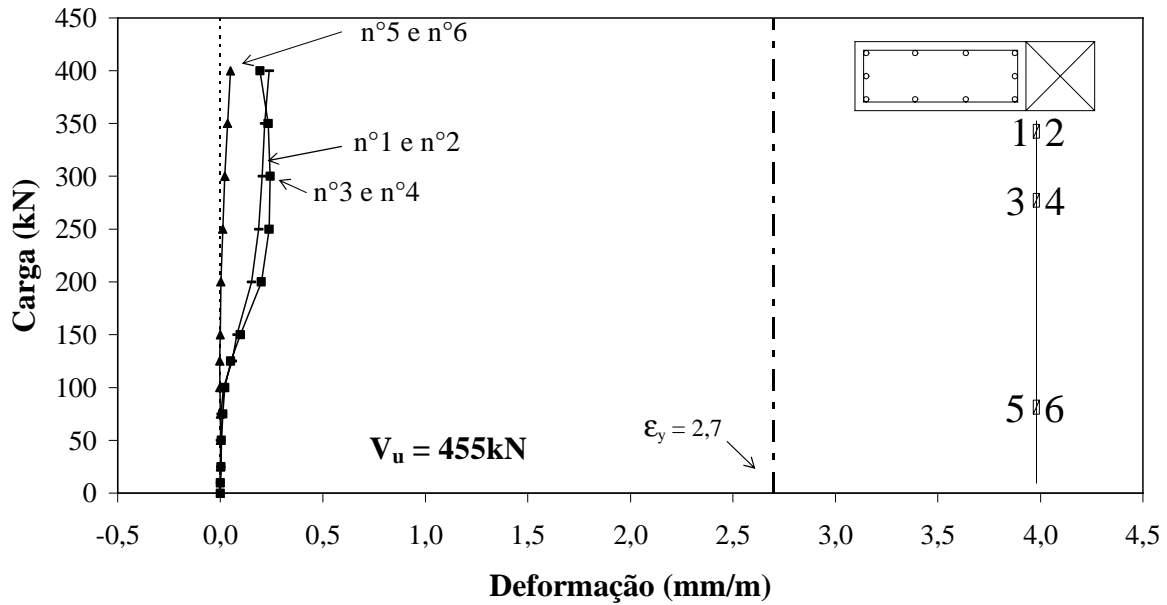


Figura 4.40 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L7, extensômetros 1 a 6

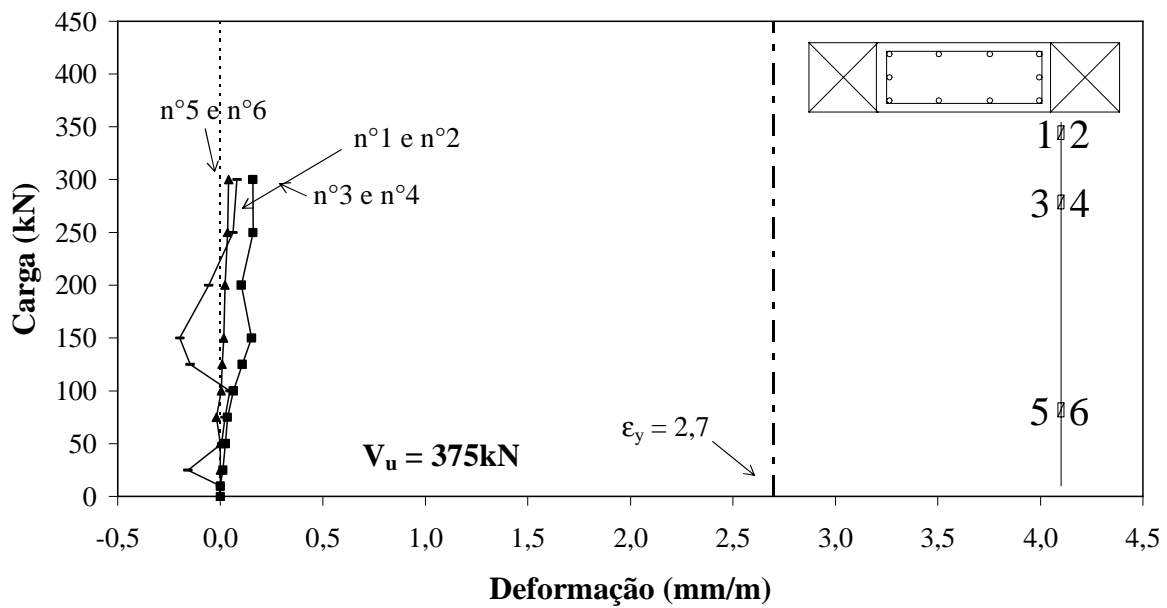


Figura 4.41 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L9, extensômetros 1 a 6

Nas lajes L5 a L9, as barras instrumentadas não apresentaram deformações significantes, indicando que as barras cortadas por furos podem não exercer função de combate à flexão.

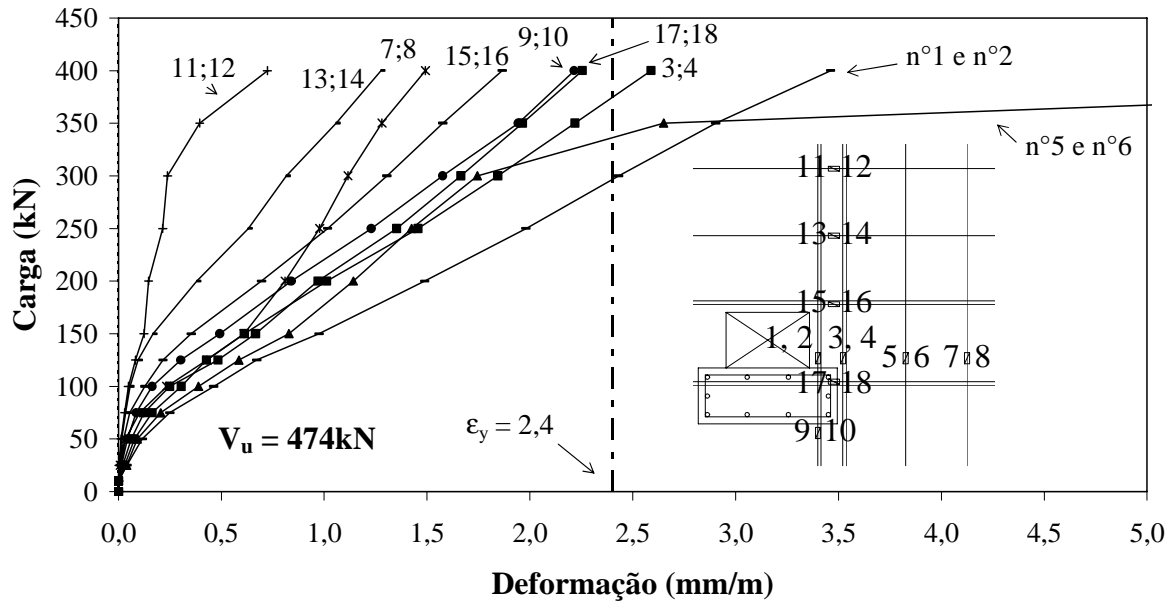


Figura 4.42 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L16, extensômetros 1 ao 18

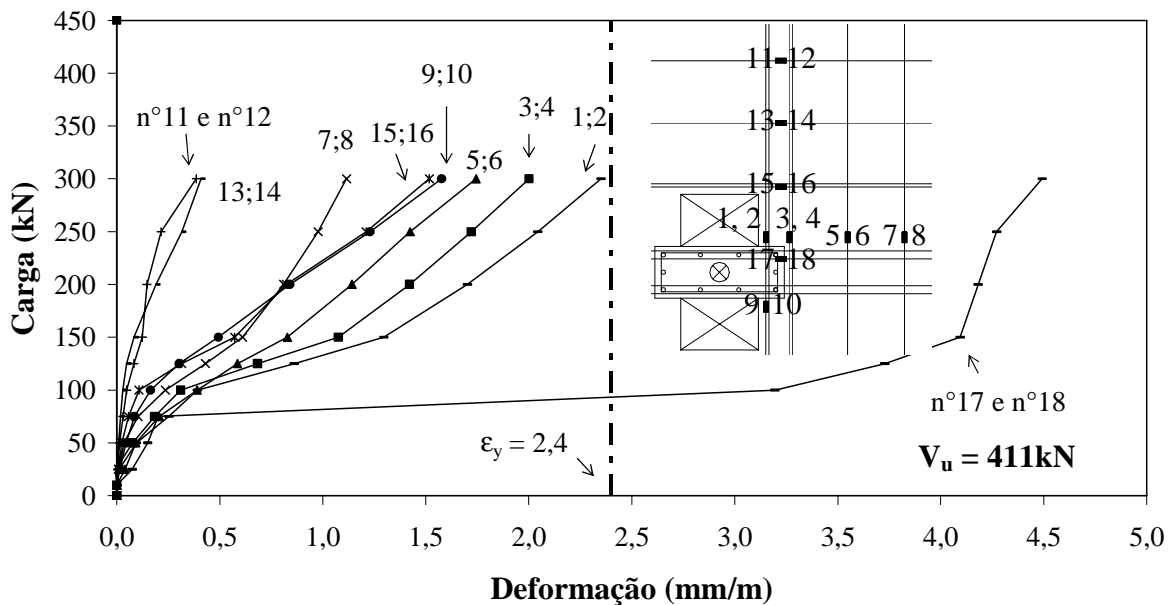


Figura 4.43 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L19, extensômetros 1 ao 18

Nas lajes L16 e L19, os extensômetros situados próximos ao pilar também apresentaram valores de deformação maiores que os demais para um mesmo carregamento. Até a carga de 75kN, o acréscimo de deformação foi pequeno. A partir dessa carga, os incrementos de deformações foram maiores, fato relacionado ao surgimento das primeiras

fissuras. Nas últimas cargas, as deformações próximas ao pilar se aproximaram ou ultrapassaram a deformação de escoamento do aço utilizado.

4.6 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DA ARMADURA DE CISALHAMENTO

Nas Figuras 4.44 a 4.47 são apresentados os gráficos *Carga x Deformação*, dos extensômetros utilizados nas armaduras de cisalhamento das lajes L5 e L6.

As deformações são referentes a cada extensômetro colado nas armaduras de cisalhamento.

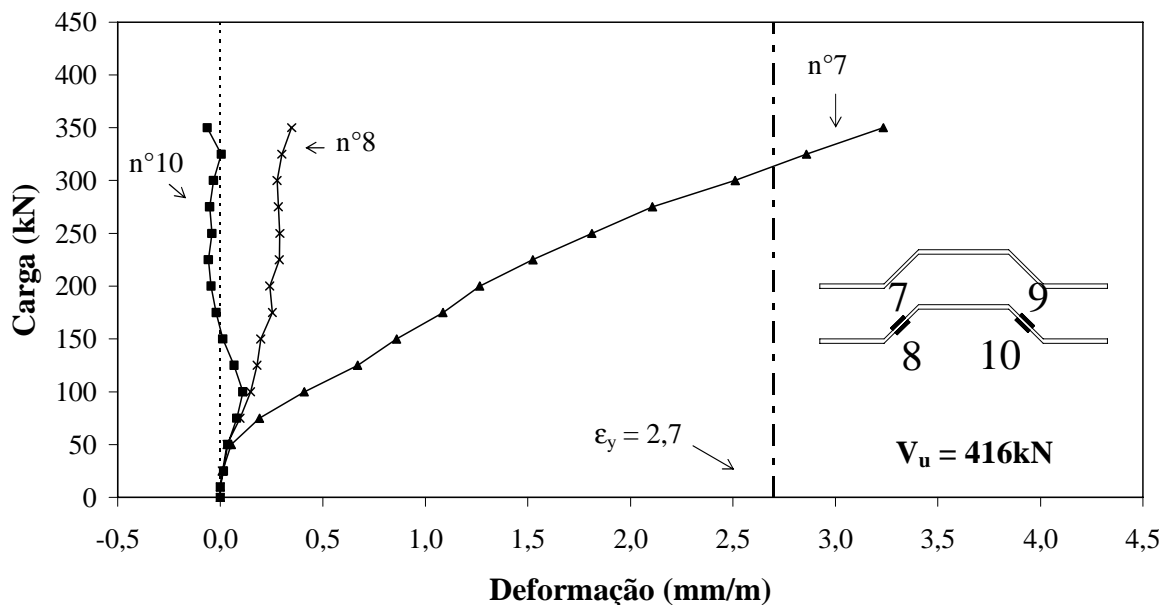


Figura 4.44 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensômetros 7 ao 10, bent bar 1

O extensômetro número 9 da laje L5 foi perdido.

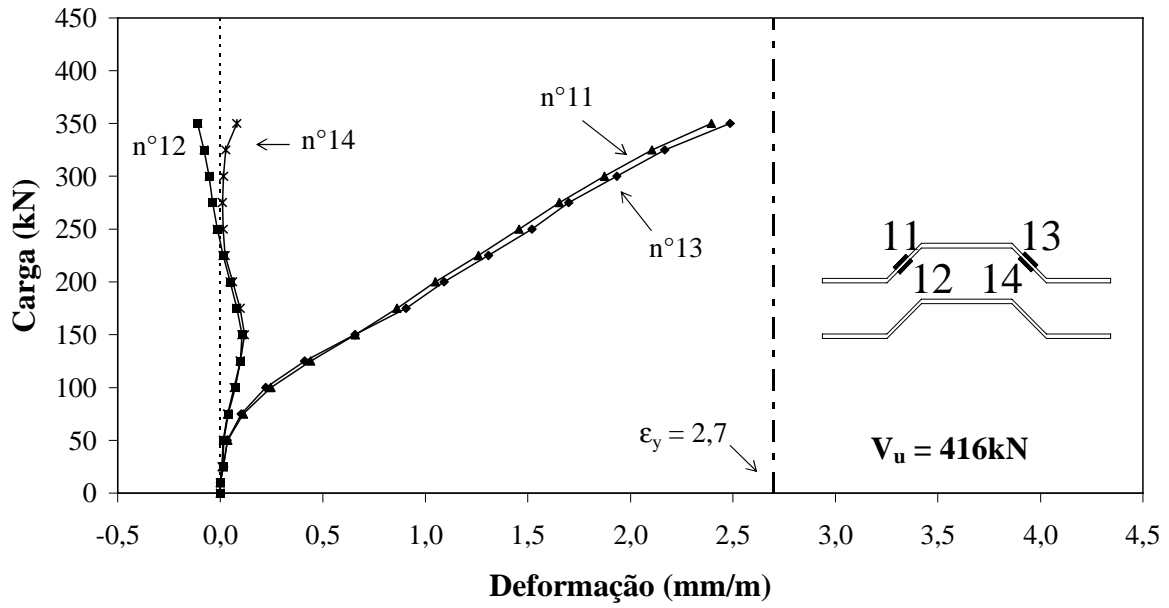


Figura 4.45 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensôm. 11 ao 14, bent bar 2

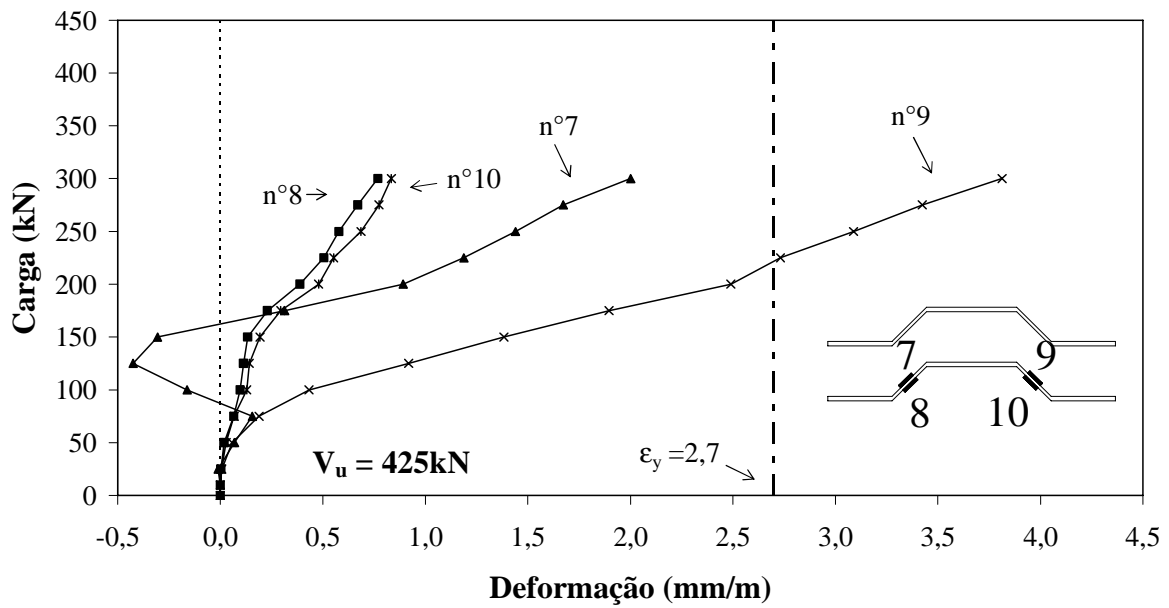


Figura 4.46 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensômetros 7 ao 10, bent bar 1

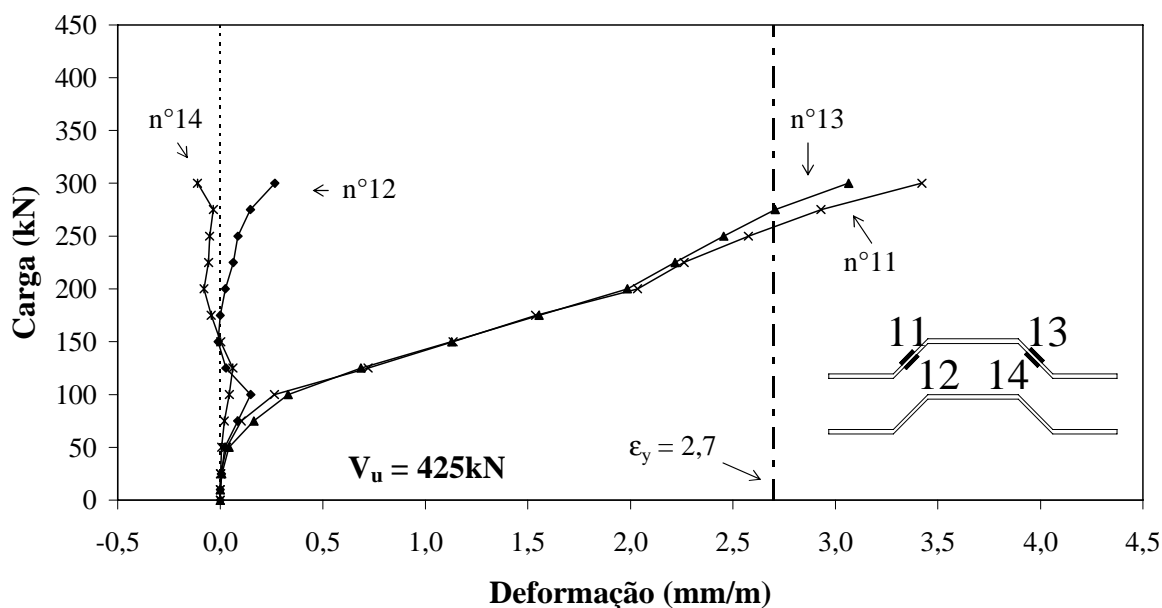


Figura 4.47 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensôm. 11 ao 14, bent bar 2

Os extensômetros com numeração ímpar, situados na face superior das barras dobradas (bent bars), das laje L5 e L6, tiveram uma maior deformação, chegando ao escoamento ou próximo dele quando a carga se encontrava próxima da carga de ruptura. Foram tracionados com maior intensidade, nas duas lajes, a partir da carga de 50kN.

Os extensômetros com numeração par, na parte inferior das barras, apresentaram pouca deformação, indicando pouca tração naqueles pontos e, em alguns momentos, apresentando compressão.

Esse comportamento sugere que as barras tiveram uma “flexão localizada”, com as fibras superiores tracionadas e as inferiores pouco tracionadas ou comprimidas.

4.7 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DO CONCRETO

Nas Figuras 4.48 a 4.65, são mostrados os gráficos *Carga x Deformação* dos diversos pontos instrumentados no pilar, ligado monoliticamente à laje, para as lajes L1 a L4; e, dos pontos instrumentados no bordo inferior, para as demais lajes.

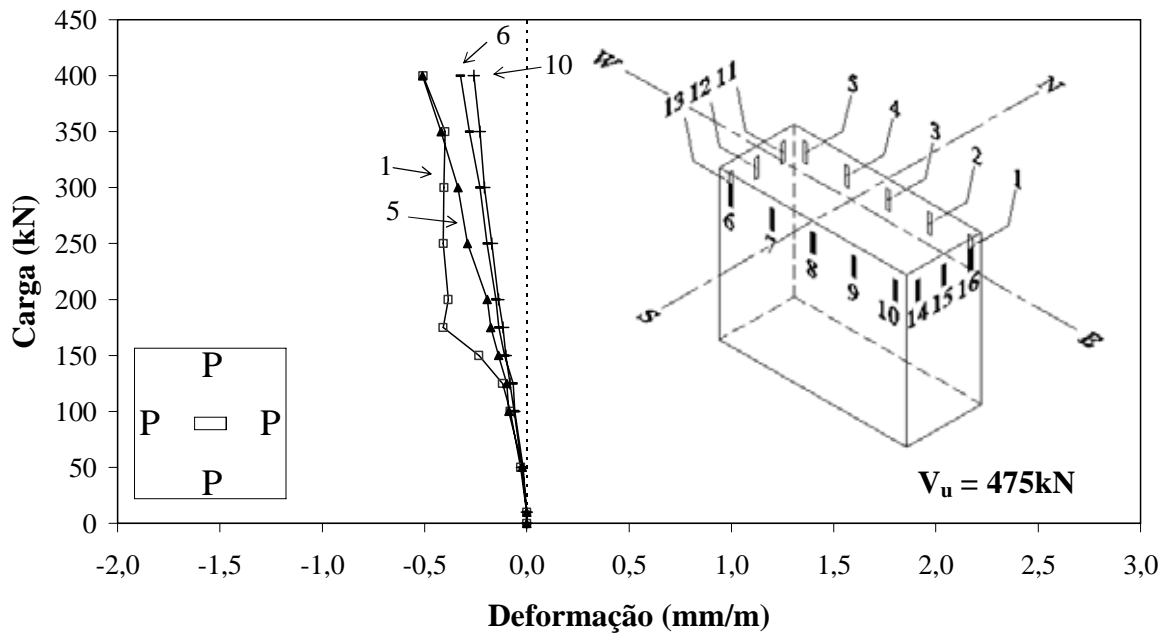


Figura 4.48 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1, extensômetros 1, 5, 6 e 10

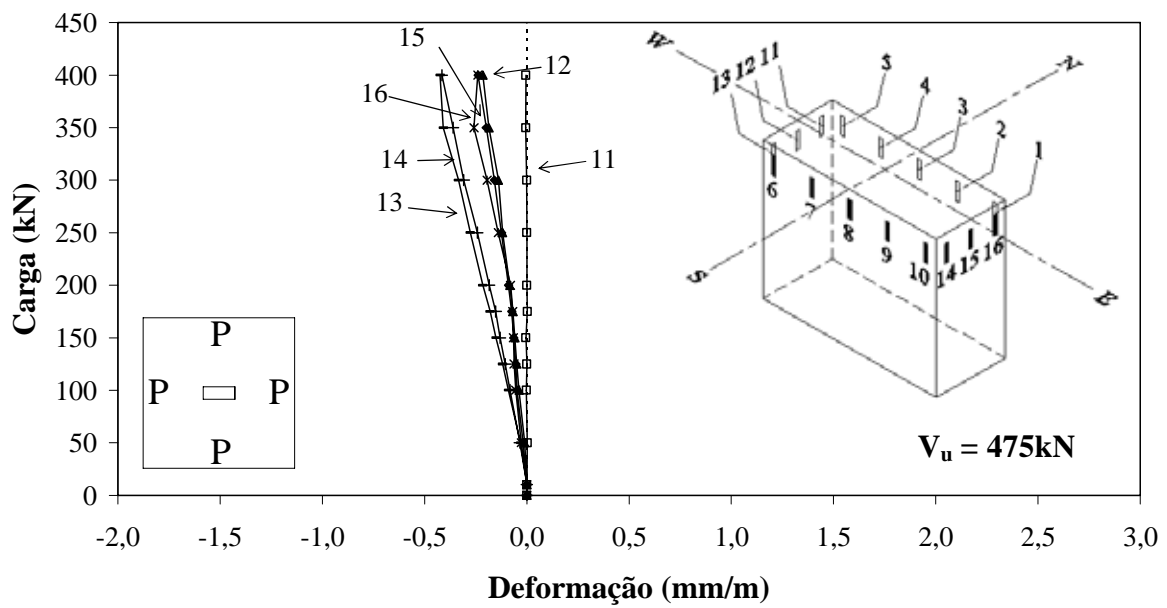


Figura 4.49 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1, extensômetros 11 a 16

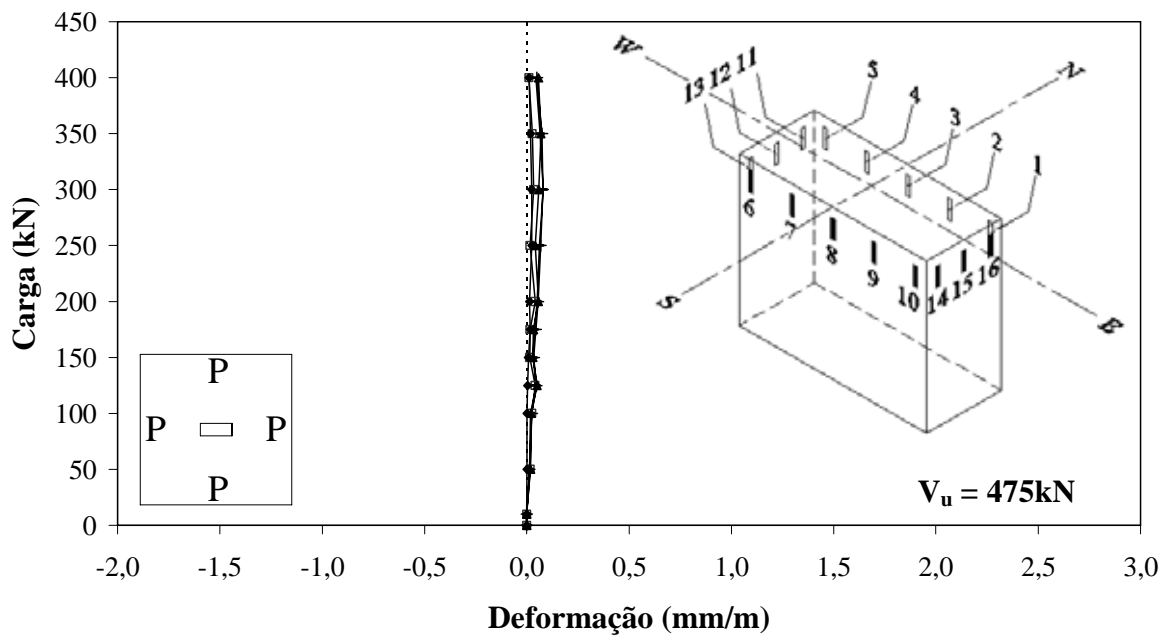


Figura 4.50 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L1, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9

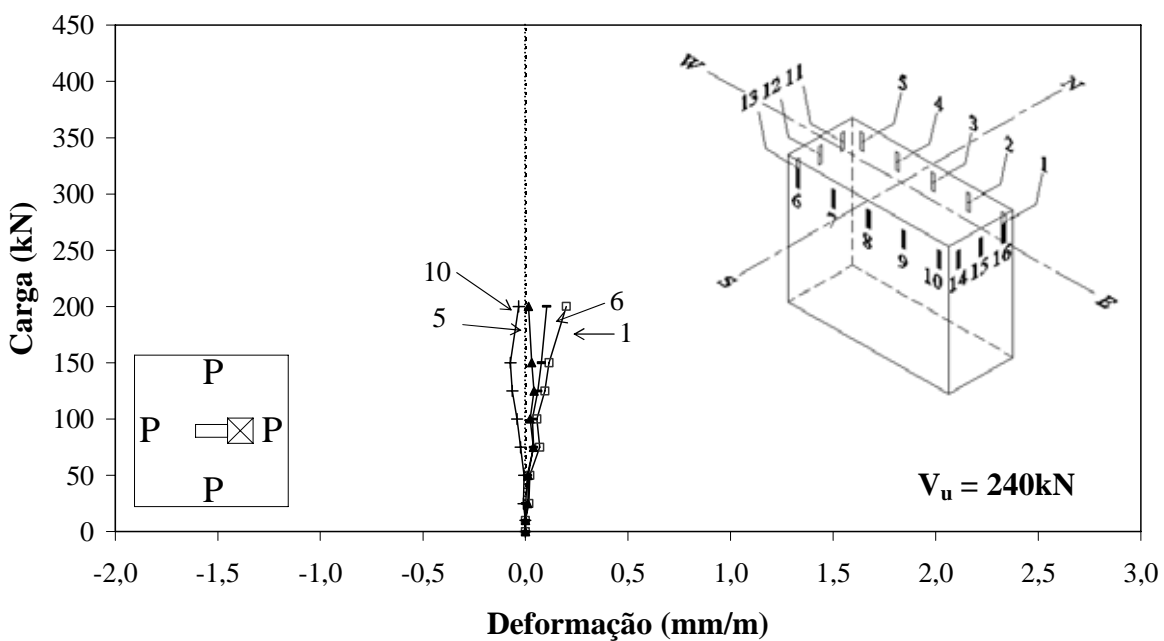


Figura 4.51 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 1, 5, 6 e 10

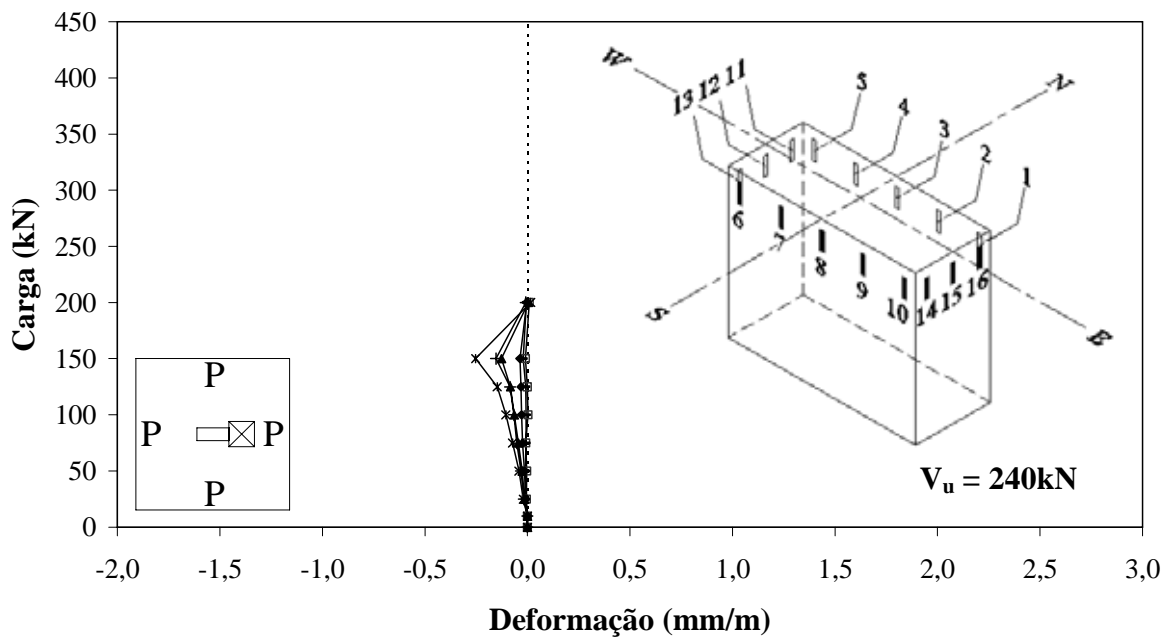


Figura 4.52 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 11 a 16

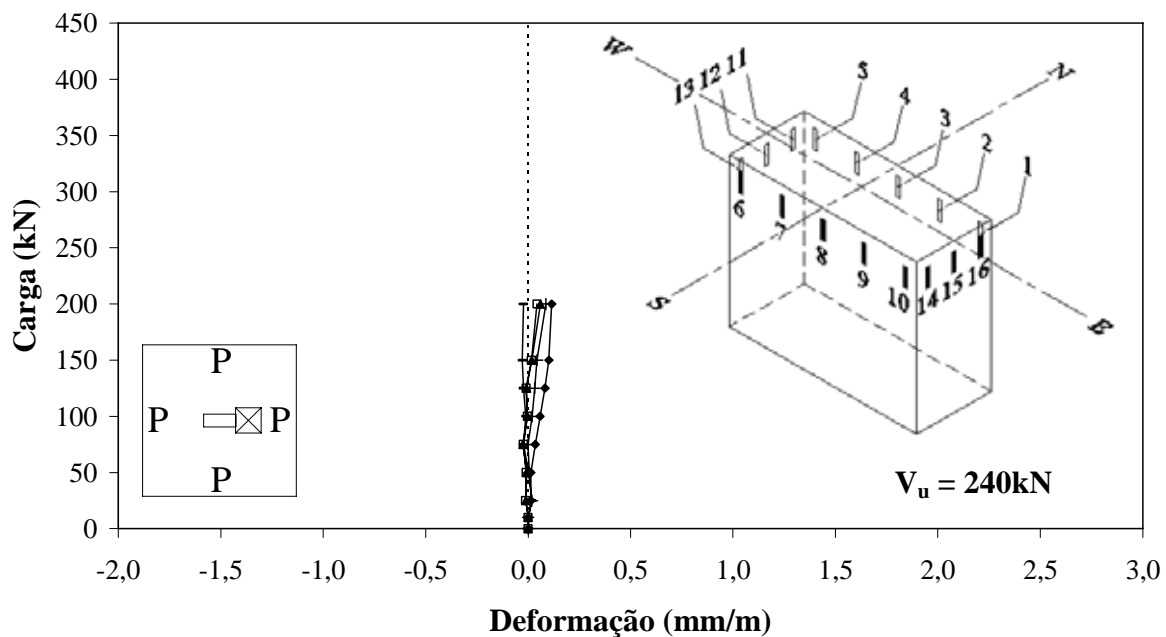


Figura 4.53 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L2, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9

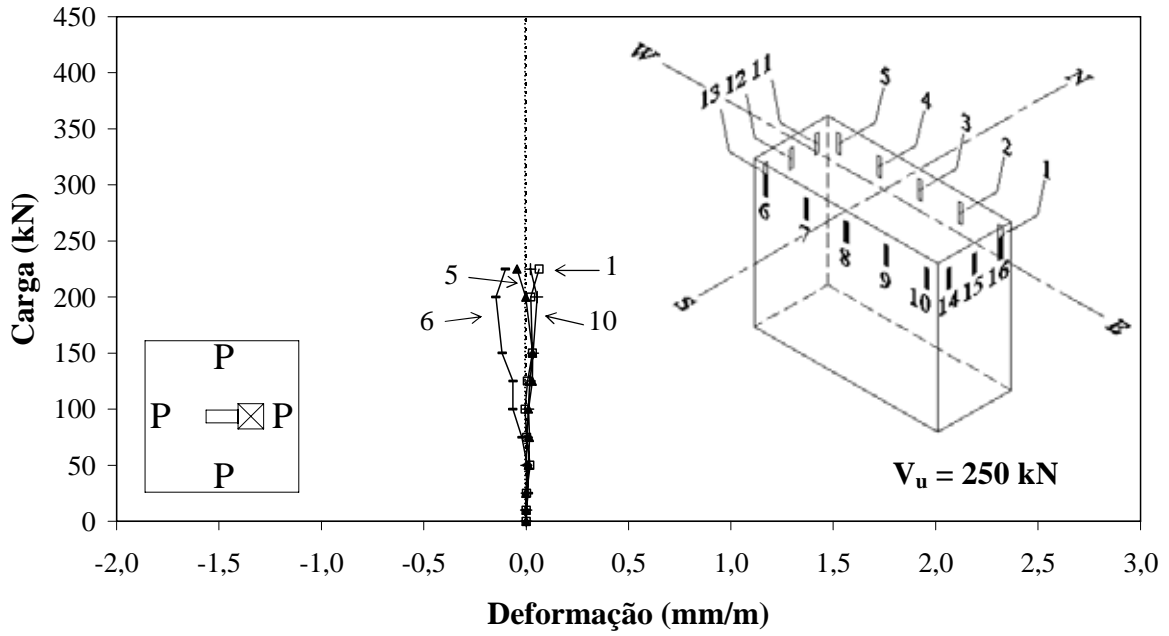


Figura 4.54 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 1, 5, 6 e 10

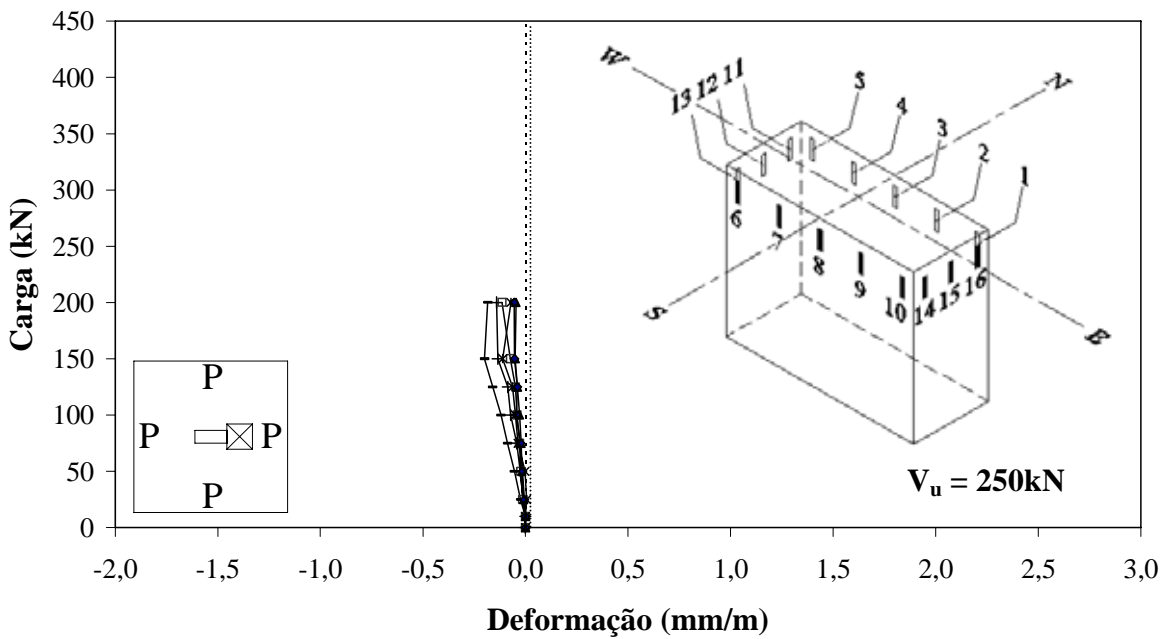


Figura 4.55 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 11 a 16

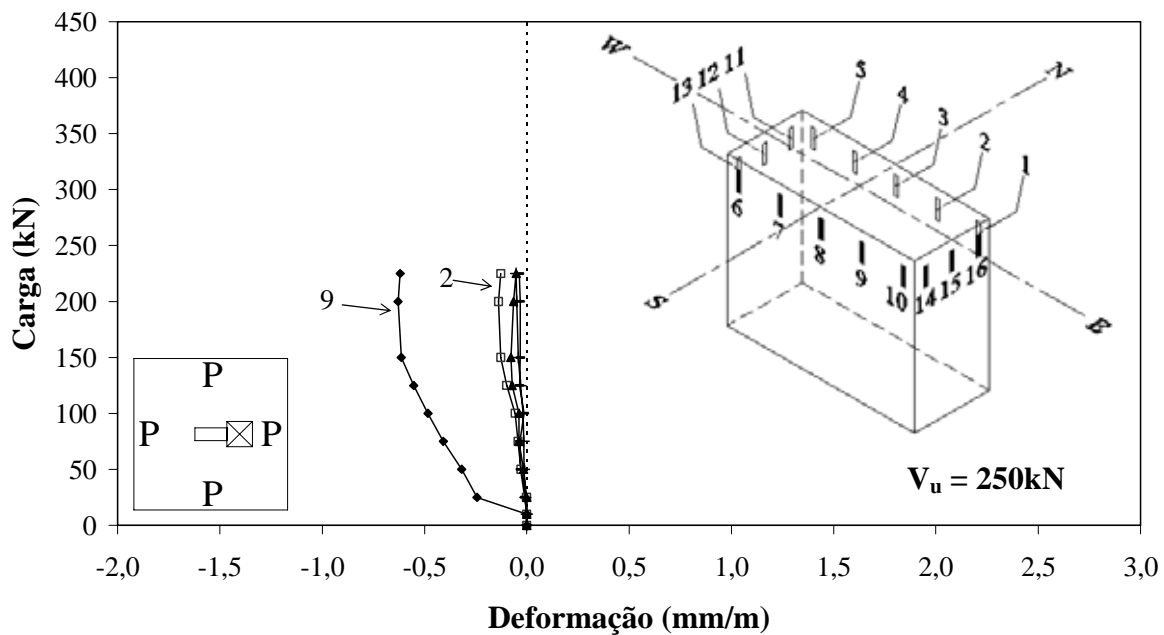


Figura 4.56 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L3, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9

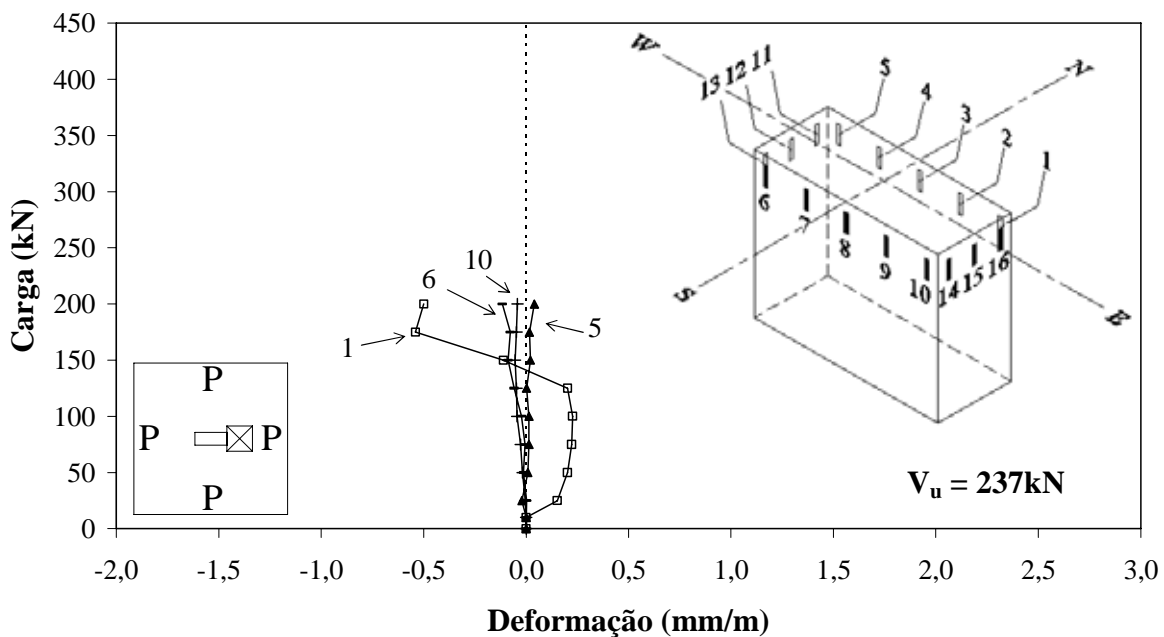


Figura 4.57 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 1, 5, 6 e 10

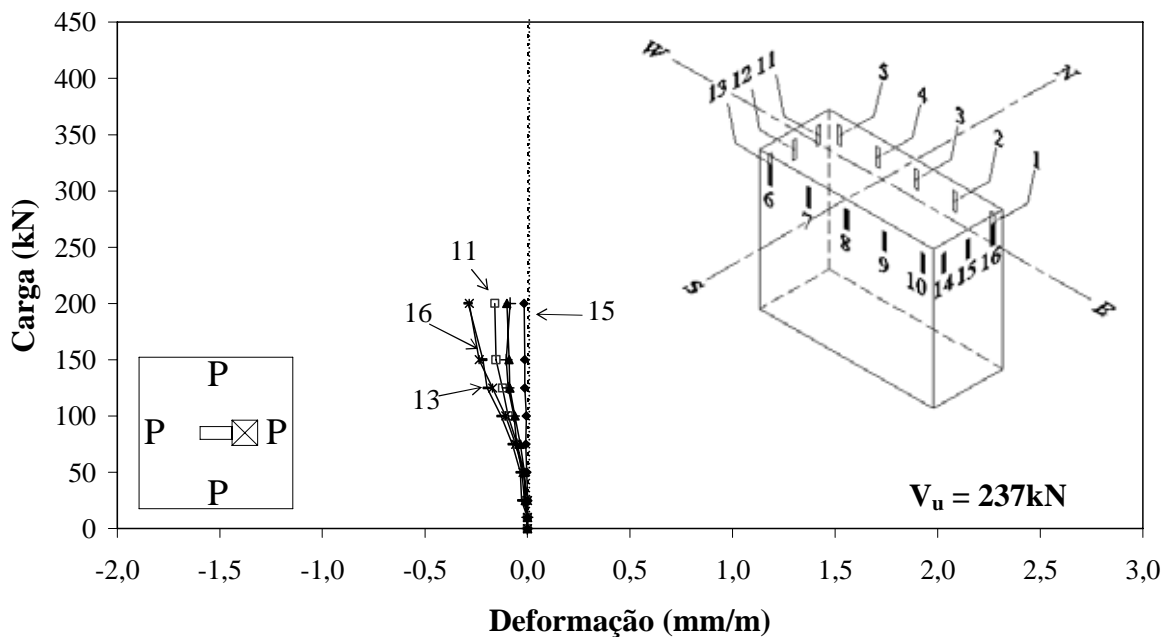


Figura 4.58 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 11 ao 16

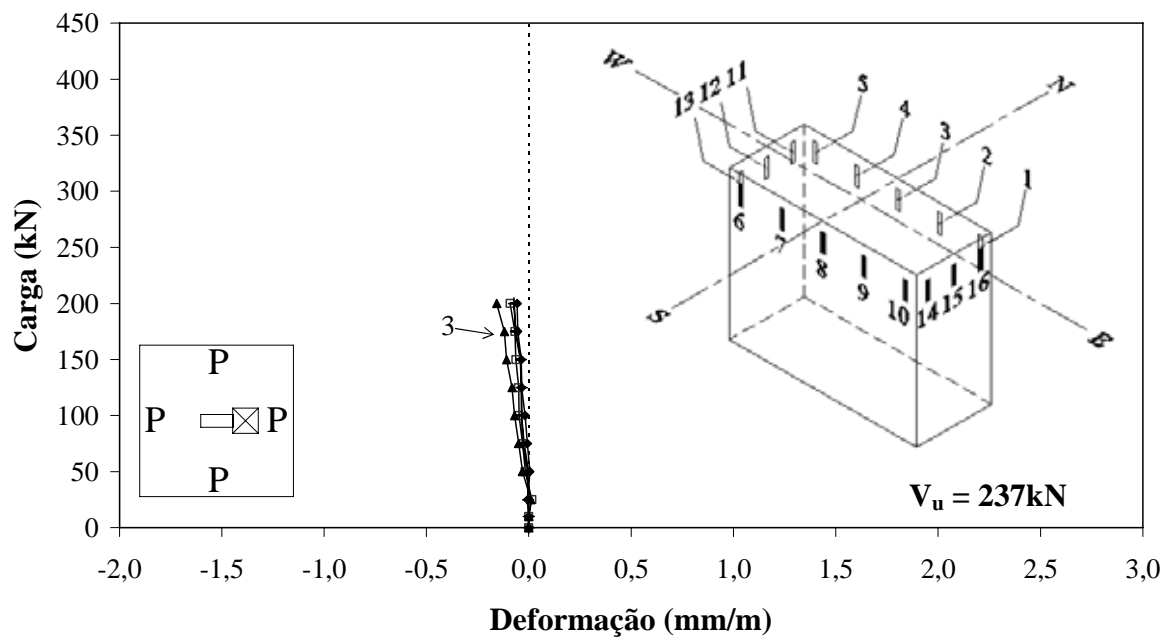


Figura 4.59 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L4, extensômetros 2, 3, 4, 7, 8, 9

Nas lajes com a instrumentação no pilar, de maneira geral, os extensômetros situados próximos às extremidades do pilar apresentaram maior compressão. As deformações se mostraram pequenas devido às dimensões do pilar, que propiciaram pequeno encurtamento diante do carregamento solicitado.

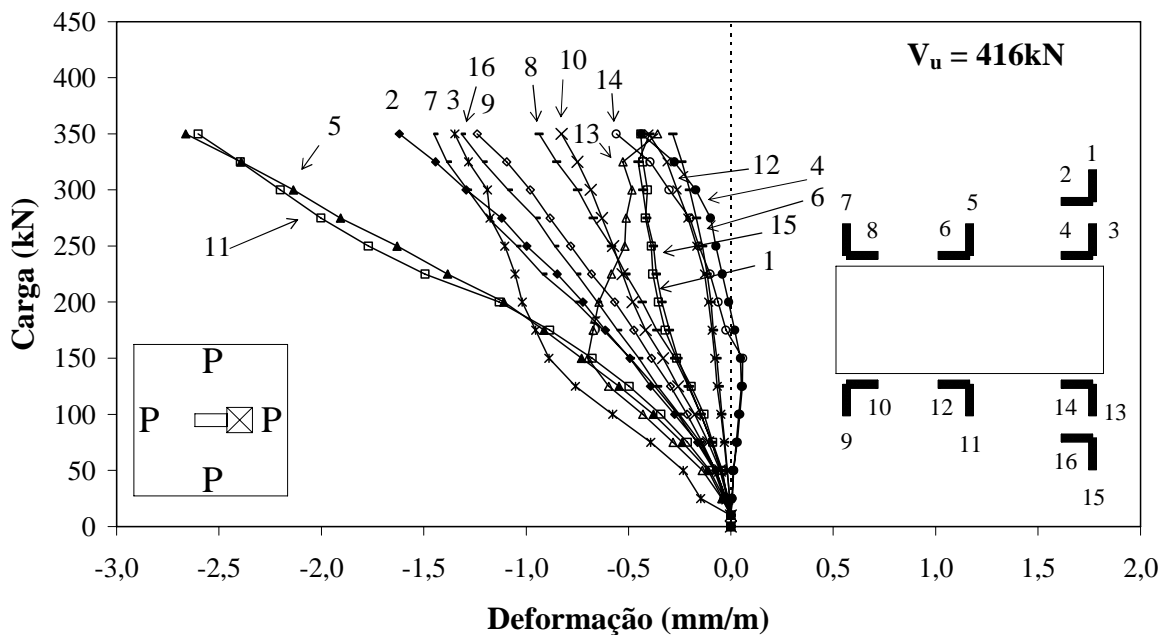


Figura 4.60 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L5, extensômetros 1 ao 16

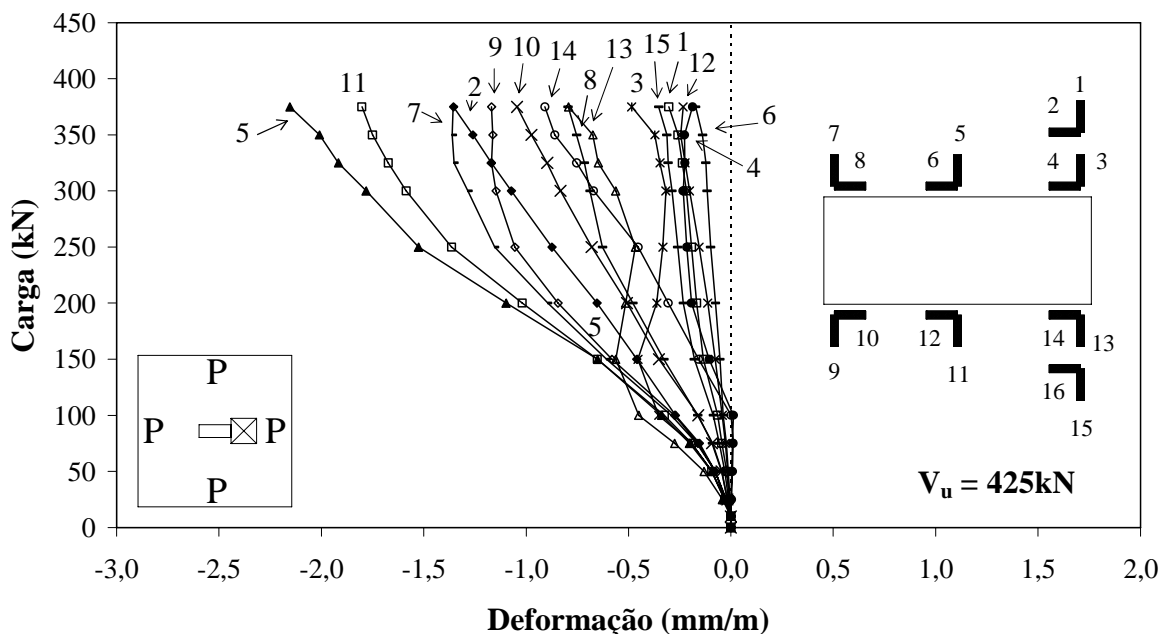


Figura 4.61 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L6, extensômetros 1 ao 16

Nas lajes L5 e L6, os extensômetros que indicaram maior compressão foram os posicionados próximos ao centro do pilar, extensômetros 5 e 11. Os extensômetros 1 e 15 apresentaram pouca compressão, porém, os de números 2 e 16 tiveram grandes compressões, indicando que a tensão “circulou” o furo na direção destes extensômetros.

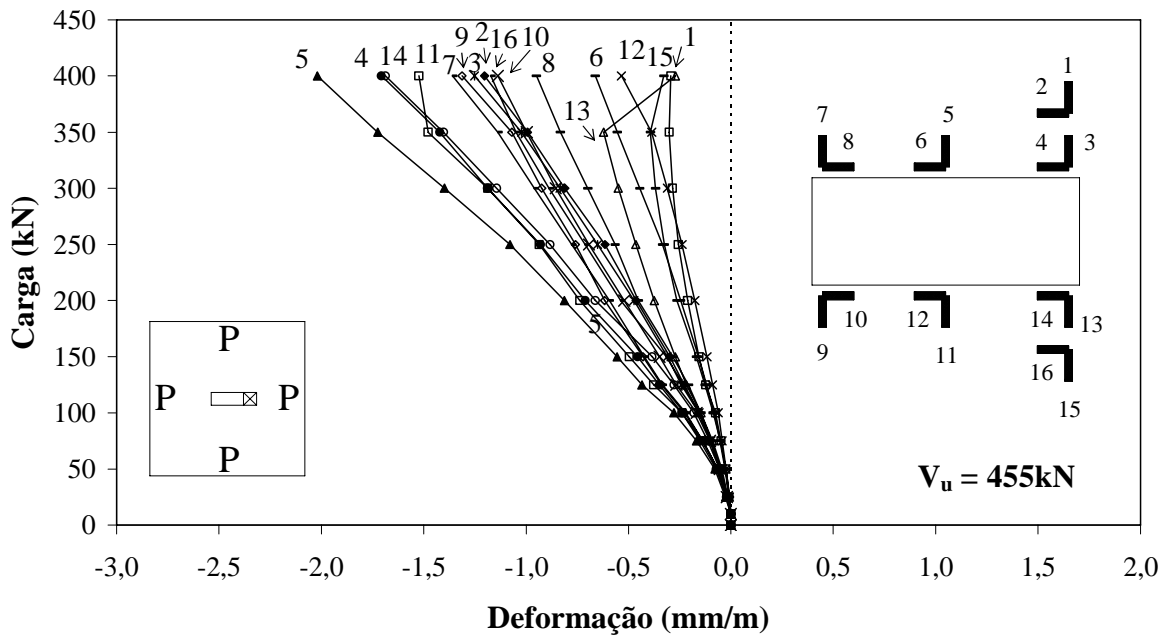


Figura 4.62 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L7, extensômetros 1 ao 16

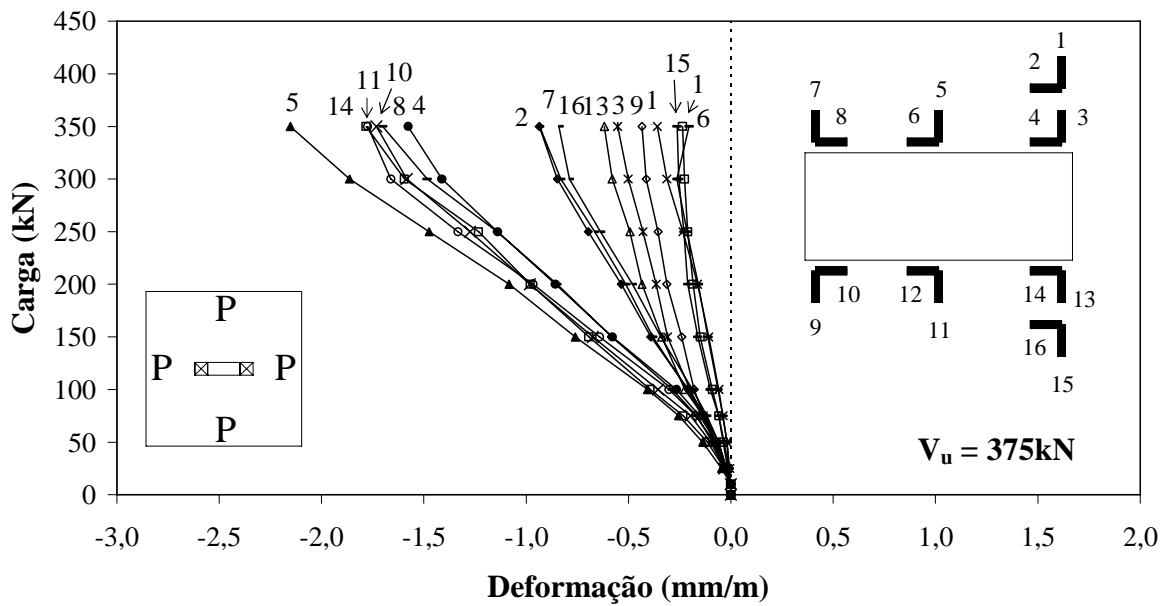


Figura 4.63 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L9, extensômetros 1 ao 16

Nas lajes L7 e L9, os extensômetros 5 e 11 apresentaram grandes compressões. Os extensômetros 4 e 14 também indicaram altas compressões, enquanto que os de número 3 e 13 apresentaram pouca compressão. Esse comportamento, assim como nas lajes L5 e L6, pode indicar a direção da tensão “circulando” o furo, nas localidades destes extensômetros.

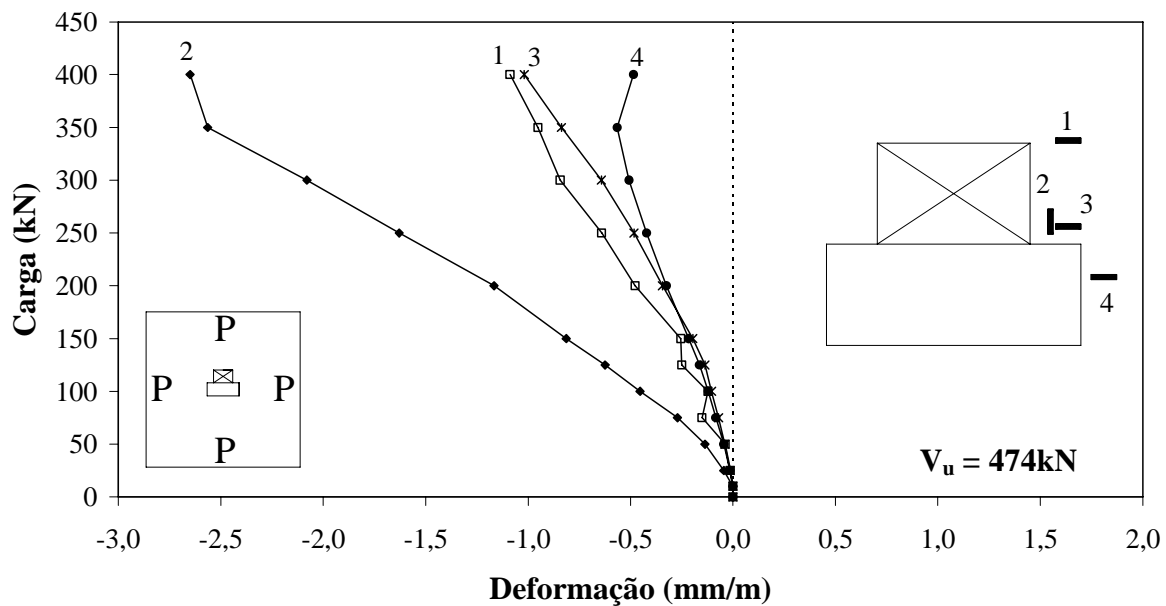


Figura 4.64 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L16, extensômetros 1 ao 4

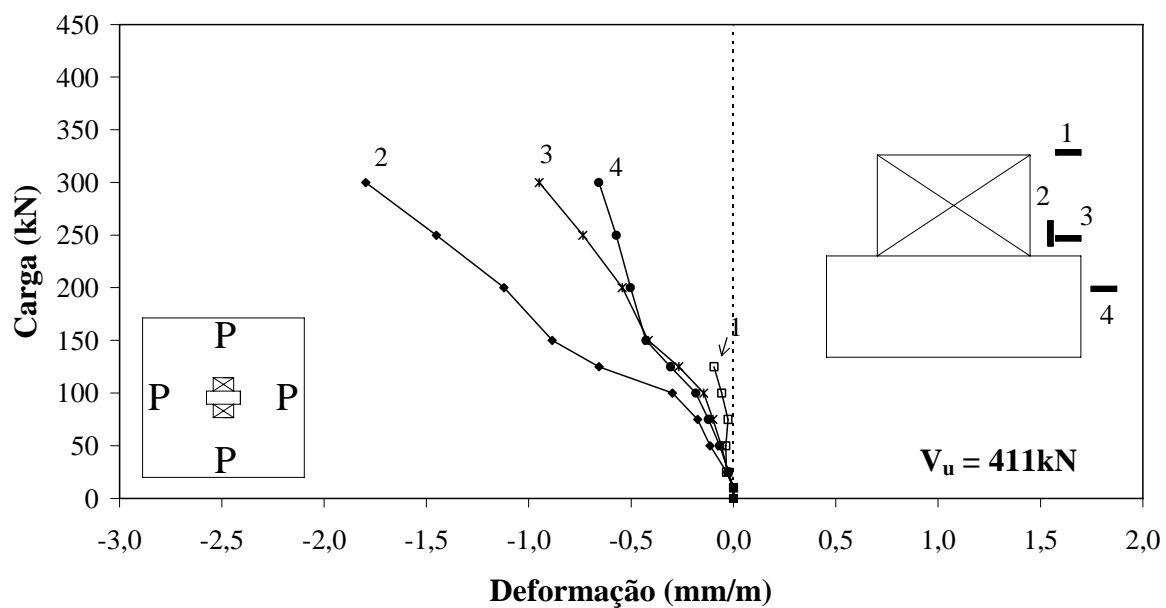


Figura 4.65 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L19, extensômetros 1 ao 4

Nas lajes L16 e L19, os extensômetros de número 2 apresentaram uma compressão muito mais acentuada em relação aos demais, indicando região muito exigida quanto à compressão em lajes com furos nesse posicionamento.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES COM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO (SÉRIE 2)

5.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos nos ensaios das lajes com transferência de momento fletor da laje ao pilar (Série 2). São mostrados e discutidos resultados de cargas, momentos e modos de ruptura, fissuração e superfície de ruptura, deslocamentos verticais, deformações específicas das armaduras e deformações específicas do concreto das lajes.

5.2 CARGA E MODO DE RUPTURA

A carga considerada de ruptura (V_u), ou carga última, foi igual à somatória das maiores cargas observadas nas leitoras das células de carga situadas nas bordas da laje no momento da ruptura, adicionada ao peso próprio da laje e dos equipamentos em cima da mesma. O momento de ruptura (M_u) foi calculado em relação ao centro do pilar e foi obtido pela diferença entre as leituras nas células de carga, adicionadas do peso próprio da laje e dos equipamentos, na direção de aplicação do momento, multiplicada por 1m (distância entre a aplicação da carga e o centro do pilar). Na Figura 5.1 é apresentado o posicionamento das células de carga em relação ao centro do pilar e suas respectivas numerações.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as cargas, modos e momentos de ruptura, a excentricidade resistente última (M_u/V_u) de todas as lajes da Série 2, com carregamento assimétrico. Também é mostrada a resistência à compressão do concreto utilizado nas lajes (f_c), suas principais características geométricas (furo, d – altura útil), de armadura (ρ - taxa de armadura) e de carregamento.

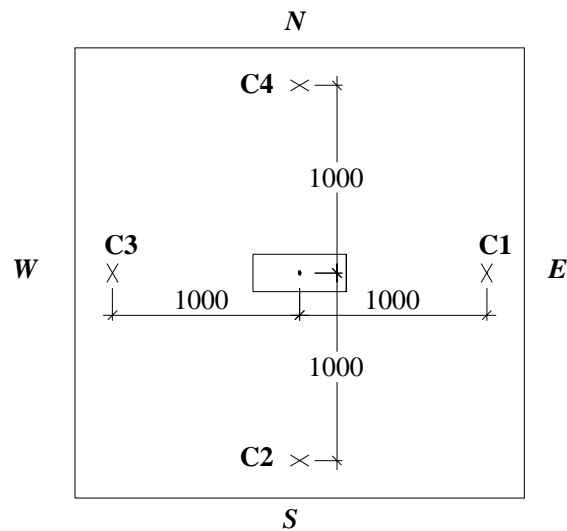


Figura 5.1 – Posicionamento das células de carga

A determinação do modo de ruptura foi feita através da observação do comportamento das lajes durante os ensaios, levando-se em consideração a fissuração, a superfície de ruptura próxima ao pilar e ao furo, as deformações na armadura e no concreto, e comparando-se com a carga última resistente por flexão, calculada utilizando o método das linhas de ruptura, mostrado no Apêndice C.

Todas as lajes da Série 2 romperam por punção, de maneira brusca ou não. Quanto aos modos de ruptura, foram semelhantes aos que ocorreram na Série 1, com punção “Adjacente” e “Adjacente e Afastada”.

Porém, houve uma particularidade quanto ao modo de ruptura em algumas lajes ensaiadas com momento aplicado, em que o lado do maior carregamento coincidiu com o lado onde existia o furo. Nestas lajes a ruptura iniciou-se com a superfície de ruptura propagando da superfície superior da laje, no lado mais carregado, um pouco externa ao furo, propagando dentro do furo até encontrar-se com o pilar na superfície inferior da laje, ocorrendo a ruptura na ligação laje-furo-pilar. A partir dessa ruptura, com a continuação do carregamento, ocorreu a ruptura de maneira frágil, embora mais suave, de toda ligação da laje ao longo da superfície do pilar, ajudada pela rotação da laje. As lajes com esse tipo de ruptura foram consideradas como de ruptura por punção de maneira não brusca.

Tabela 5.1 – Carga e modo de ruptura das lajes da Série 2

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	$e_u^{(1)}$ (m)	Modo de Ruptura por Punção	Ruptura brusca
L8	34,2	1 200x200	123	1,48	P	192	86,3	0,449	Adjacente	Sim
					0 □□ 2P P					
L10	34,2	2 200x200	123	1,48	P	189	83,0	0,439	Adjacente	Não
					0 □□□ 2P P					
L11	36,7	1 200x200	125	1,44	P	299	139,1	0,465	Adjacente	Sim
					2P □□ 0 P					
L12	37,8	1 200x200	123	1,48	P	319	74,4	0,233	Adjacente	Não
					0,5P □□□1,5P P					
L13	36,4	2 200x200	124	1,46	P	277	61,9	0,224	Adjacente	Não
					0,5P□□□1,5P P					

Tabela 5.1 – Carga e modo de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	$e_u^{(1)}$ (m)	Modo de Ruptura por Punção	Ruptura brusca
L14	42,4	-	121	0,93	P 0 □ 2P P	274	125,9	0,459	Adjacente	Sim
L15	43,2	-	123	0,91	1,5P P □ P 0,5P	364	66,5	0,183	Adjacente	Sim
L17	35,8	1 300x200	125	1,01	1,5P P ⊠ P 0,5P	279	59,3	0,213	Adjacente	Sim
L18	37,3	2 300x200	126	1,05	1,5P P ⊠ P 0,5P	322	53,1	0,165	Adjacente em N, W e E; e Afastada em S	Não

⁽¹⁾ excentricidade de carga última: $e_u = M_u/V_u$

* Ver item 5.3.2, para visualização das superfícies de ruptura

Obs.: o modo de ruptura da laje L8 foi definido utilizando a configuração de linhas de ruptura “a” (vide Apêndice C). Se fosse definido utilizando a configuração “b”, o modo de ruptura seria por flexão.

Nas Tabelas 5.2 a 5.10 são apresentados: as leituras dos carregamentos em cada célula de carga, em cada estágio de carregamento; suas somatórias; média entre as leituras; e as principais relações referentes a cada carregamento. Também é mostrada a carga de protensão (N) no pilar. A carga considerada de ruptura, última carga nas tabelas, é igual à soma das maiores cargas aplicadas, lidas nas células de carga, e o peso próprio da laje e peso dos equipamentos. O peso da laje foi calculado adotando o peso específico do concreto igual a 2500kg/m³ (peso total igual a 2120kg), sendo desconsiderado o volume da laje dentro do pilar. Desta maneira, cada coluna que compõe a última carga de ruptura foi composta de: valor da última leitura da respectiva célula de carga (maior leitura); 530kg referente ao peso próprio de 1/4 de laje; e, 100kg referente ao peso dos equipamentos em cada borda (total de 630kg, ou 6,3kN, adicionados em cada borda, referentes ao peso próprio da laje e dos equipamentos). Nos bordos que não foi aplicado carregamento, não foi adicionado o peso dos equipamentos (100kg).

O momento de ruptura (M_u) ou momento último, como mencionado anteriormente, foi obtido pela diferença entre as leituras nas células de carga, adicionada do peso próprio da laje e dos equipamentos em cima da mesma, na direção de aplicação do momento.

Tabela 5.2 – Quadro de cargas da laje L8

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C1/ (C2+C4)/2	C2/C4	N (kN)
10	5,10	2,75	0	2,25	10	5,1	0,505	2,04	1,22	526
25	12,40	6,85	0	6,10	25	12,4	0,489	1,92	1,12	526
50	25,00	12,95	0	12,70	51	25,0	0,494	1,95	1,02	525
75	37,75	19,05	0	18,60	75	37,8	0,501	2,01	1,02	525
100	50,05	24,30	0	25,45	100	50,1	0,502	2,01	0,95	524
125	62,85	32,10	0	30,75	126	62,9	0,500	2,00	1,04	523
150	75,10	37,40	0	37,90	150	75,1	0,499	1,99	0,99	521
168	85,30	41,20	0	41,50	168	85,3	0,508	2,06	0,99	520
192* (total)	91,60	47,50	5,30	47,80	192	86,3	0,449	-	-	-

d = 123mm; $f_c = 34,2\text{MPa}$; $\rho = 1,48\%$; Carregamento: $C1=2*C2$; $C2=C4$; $C3=0$;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Na laje L8, foi aplicado o primeiro carregamento assimétrico, não foi utilizada a célula de carga C3 e a carga aplicada na célula C1 foi o dobro das utilizadas nas células C2 e C4. No início do carregamento as cargas aplicadas nas células C2 e C4 tiveram uma disparidade de 22% e 12%, no restante do carregamento chegou ao máximo a 5%. O carregamento aplicado em C1 manteve-se sempre próximo do dobro da média entre os valores de C2 e C4. A excentricidade de carga (M/V) ficou sempre próxima de 0,500m, como planejado (com a adição do peso próprio a excentricidade diminuiu um pouco).

Tabela 5.3 – Quadro de cargas da laje L10

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C1/(C2+C4)/2	C2/C4	N (kN)
10	5,33	2,80	0	2,25	10	5,3	0,513	2,11	1,24	521
25	12,50	6,30	0	6,20	25	12,5	0,500	2,00	1,02	521
50	25,20	13,20	0	13,10	52	25,2	0,489	1,92	1,01	520
75	37,50	18,95	0	18,90	75	37,5	0,498	1,98	1,00	520
100	50,10	25,00	0	23,20	98	50,1	0,510	2,08	1,08	518
125	62,80	30,63	0	31,00	124	62,8	0,505	2,04	0,99	517
150	75,10	37,45	0	37,95	151	75,1	0,499	1,99	0,99	516
165	82,00	41,00	0	42,00	165	82,0	0,497	1,98	0,98	516
189* (total)	88,30	47,30	5,30	48,30	189	83,0	0,439	-	-	-

d = 123mm; $f_c = 34,2\text{MPa}$; $\rho = 1,48\%$; Carregamento: C1=2*C2; C2=C4; C3=0;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Na laje L10, assim como na laje L8, não foi utilizada a célula de carga C3 e a carga aplicada na célula C1 foi o dobro das utilizadas nas células C2 e C4. As cargas aplicadas nas células C2 e C4 começaram o ensaio com uma diferença de 24% e depois a variação máxima foi de 8%. A carga em C1 esteve sempre próxima do dobro da média das cargas de C2 e C4 (variação máxima no início do ensaio de 2,11). A excentricidade de carga (M/V) ficou sempre próxima de 0,500m, como planejado (com a adição do peso próprio a excentricidade diminuiu um pouco).

Tabela 5.4 – Quadro de cargas da laje L11

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C3/ (C2+C4)/2	C2/C4	N (kN)
10	0	3,15	5,15	2,80	11	5,2	0,464	1,73	1,13	502
50	0	12,80	25,40	12,50	51	25,4	0,501	2,01	1,02	501
75	0	18,60	37,50	19,20	75	37,5	0,498	1,98	0,97	501
100	0	25,10	50,10	25,60	101	50,1	0,497	1,98	0,98	500
150	0	37,70	74,70	37,85	150	74,7	0,497	1,98	1,00	497
200	0	50,05	100,05	50,35	200	100,1	0,499	1,99	0,99	496
225	0	52,15	112,40	56,40	221	112,4	0,509	2,07	0,92	495
250	0	62,65	125,00	62,75	250	125,0	0,499	1,99	1,00	494
275	0	68,65	138,10	68,00	275	138,1	0,503	2,02	1,01	493
299* (total)	5,30	74,95	144,40	74,30	299	139,1	0,465	-	-	-

d = 125mm; $f_c = 36,7\text{MPa}$; $\rho = 1,44\%$; Carregamento: C1=0; C2=C4; C3=2*C2;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Na laje L11, a célula de carga não utilizada foi a C1 e a carga aplicada em C3 foi o dobro das aplicadas em C2 e C4. O carregamento previsto foi executado com uma carga inicial nas células C2 e C4 um pouco acima do previsto, 2,50kN. Daí a diferença grande do valor em C3 para o dobro da média entre as cargas C2 e C4 no início do ensaio. Depois, os valores de C3 estiveram sempre próximos do dobro. E, as cargas entre C2 e C4 tiveram variação máxima de 3%. A excentricidade de carga (M/V) ficou sempre próxima de 0,500m, como planejado (com a adição do peso próprio a excentricidade diminuiu um pouco).

Tabela 5.5 – Quadro de cargas da laje L12

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C2/C4	C1/(C2+C4)/2	C3/(C2+C4)/2	N (kN)
10	3,65	3,00	1,30	2,70	11	2,4	0,221	1,11	1,28	0,46	525
25	9,45	6,55	3,20	6,30	26	6,3	0,245	1,04	1,47	0,50	525
50	18,40	12,60	6,35	12,55	50	12,1	0,241	1,00	1,46	0,50	524
75	28,10	18,90	9,50	18,80	75	18,6	0,247	1,01	1,49	0,50	524
100	37,55	24,95	12,65	25,00	100	24,9	0,249	1,00	1,50	0,51	523
150	56,10	37,50	19,00	37,50	150	37,1	0,247	1,00	1,50	0,51	521
200	75,00	50,20	25,30	49,90	200	49,7	0,248	1,01	1,50	0,51	519
225	84,50	56,65	28,20	56,00	225	56,3	0,250	1,01	1,50	0,50	518
250	93,80	62,55	31,40	62,50	250	62,4	0,249	1,00	1,50	0,50	517
275	103,15	68,70	34,95	68,50	275	68,2	0,248	1,00	1,50	0,51	517
294	112,00	72,00	37,60	72,70	294	74,4	0,253	0,99	1,55	0,52	518
319* (total)	117,30	78,30	43,90	79,00	319	74,4	0,233	-	-	-	-

d = 123mm; $f_c = 37,8\text{MPa}$; $\rho = 1,48\%$; Carregamento: $C1=1,5*C2$; $C2=C4$; $C3=0,5*C2$;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Tabela 5.6 – Quadro de cargas da laje L13

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C2/C4	C1/(C2+C4)/2	C3/(C2+C4)/2	N (kN)
10	3,65	2,90	1,40	2,60	11	2,3	0,213	1,12	1,33	0,51	532
25	9,30	6,35	3,25	6,20	25	6,1	0,241	1,02	1,48	0,52	531
50	18,65	12,50	6,55	12,30	50	12,1	0,242	1,02	1,50	0,53	531
75	28,05	18,45	9,75	18,50	75	18,3	0,245	1,00	1,52	0,53	530
100	37,60	25,25	12,65	25,00	101	25,0	0,248	1,01	1,50	0,50	529
125	47,00	31,65	16,00	31,40	126	31,0	0,246	1,01	1,49	0,51	528
150	56,75	38,00	18,80	37,55	151	38,0	0,251	1,01	1,50	0,50	527
175	65,60	43,20	21,75	43,45	174	43,9	0,252	0,99	1,51	0,50	526
200	75,00	50,70	25,40	50,90	202	49,6	0,246	1,00	1,48	0,50	525
225	84,80	56,20	28,85	55,60	225	56,0	0,248	1,01	1,52	0,52	524
251	94,00	62,30	32,15	63,00	251	61,9	0,246	0,99	1,50	0,51	523
277* (total)	100,30	68,60	38,45	69,30	277	61,9	0,224	-	-	-	-

d = 124mm; $f_c = 36,4\text{MPa}$; $\rho = 1,46\%$; Carregamento: $C1=1,5*C2$; $C2=C4$; $C3=0,5*C2$

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

O carregamento previsto para as lajes L12 e L13 foi o mesmo. Na célula de carga C1, a carga foi 1,5 vez maior que as praticadas nas células C2 e C4. Na célula C3, a carga foi a metade daquelas das células C2 e C4. Os carregamentos foram executados satisfatoriamente.

No início do ensaio, houve variações entre C2 e C4, de 11% em L12 e 12% em L13. Também tiveram, no início, proporções de C1 um pouco distantes de 1,5 da média aplicada em C2 e C4, 1,28 em L12 e 1,33 em L13. No restante dos ensaios, as proporções estiveram sempre próximas de 1,5 para C1 e 0,5 para C3. A excentricidade de carga (M/V), excetuando o início dos ensaios, ficou sempre próxima de 0,250m, como planejado (com a adição do peso próprio a excentricidade diminuiu um pouco).

Tabela 5.7 – Quadro de cargas da laje L14

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C1/ (C2+C4)/2	C2/C4	N (kN)
10	5,05	2,65	0	2,65	10	5,1	0,488	1,91	1,00	526
25	12,60	6,25	0	6,30	25	12,6	0,501	2,01	0,99	526
50	25,30	12,50	0	12,45	50	25,3	0,503	2,03	1,00	526
75	37,35	18,85	0	18,60	75	37,4	0,499	1,99	1,01	525
100	50,15	25,20	0	24,90	100	50,2	0,500	2,00	1,01	524
150	75,00	37,60	0	37,45	150	75,0	0,500	2,00	1,00	523
200	100,15	50,20	0	50,05	200	100,2	0,500	2,00	1,00	522
250	124,90	62,70	0	62,30	250	124,9	0,500	2,00	1,01	523
274* (total)	131,20	69,00	5,30	68,60	274	125,9	0,459	-	-	-

d = 120mm; $f_c = 42,4\text{MPa}$; $\rho = 0,93\%$; Carregamento: $C1=2*C2$; $C2=C4$; $C3=0$

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Na laje L14, assim como nas lajes L8 e L10, não foi utilizada a célula de carga C3 e a carga aplicada na célula C1 foi o dobro das utilizadas nas células C2 e C4. Na execução desse carregamento, apenas na primeira carga em que C1 teve uma pequena variação em relação ao dobro da média entre os valores de C2 e C4, a relação foi de 1,91. No restante do carregamento, a carga em C3 esteve muito próxima do dobro praticado em C2 e C4. As cargas em C2 e C4 apresentaram sempre variação entre elas de no máximo 1%. A

excentricidade de carga também ficou sempre próxima de 0,500m, com a introdução do peso próprio a relação M/V diminuiu um pouco.

Tabela 5.8 – Quadro de cargas da laje L15

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C1/ C3	C2/ (C1+C3)/2	C4/ (C1+C3)/2	N (kN)
10	2,60	1,25	2,50	3,90	10	2,7	0,259	1,04	0,49	1,53	540
25	6,70	3,20	6,70	9,40	26	6,2	0,238	1,00	0,48	1,40	540
50	12,85	6,25	12,50	18,75	50	12,5	0,248	1,03	0,49	1,48	538
75	18,80	9,15	18,50	27,80	74	18,7	0,251	1,02	0,49	1,49	537
100	25,45	12,10	24,90	37,55	100	25,5	0,255	1,02	0,48	1,49	536
150	37,85	18,85	37,60	55,75	150	36,9	0,246	1,01	0,50	1,48	535
200	50,25	26,65	50,85	75,00	203	48,4	0,238	0,99	0,53	1,48	536
250	62,35	31,15	60,95	93,80	248	62,7	0,252	1,02	0,51	1,52	546
300	75,05	43,80	74,90	112,90	307	69,1	0,225	1,00	0,58	1,51	557
339	81,25	55,00	81,25	121,50	339	66,5	0,196	1,00	0,68	1,50	559
364* (total)	87,55	61,30	87,55	127,80	364	66,5	0,183	-	-	-	-

d = 123mm; $f_c = 43,2\text{MPa}$; $\rho = 0,91\%$; Carregamento: C1=C3; C2=0,5*C1; C4=1,5*C1;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

Na laje L15, foi aplicado um carregamento em que se previu a mesma carga nas células de carga C1 e C3; em C2, a metade da aplicada em C1; e, em C4, superior em 1,5 vez a carga de C1.

Todas as cargas previstas se confirmaram, com pouca variação, exceto nos carregamentos de 300kN e 339kN. A carga obtida na célula C2 foi superior à planejada, com intensidades de 0,58 (carga de 300kN) e 0,68 (carga de 339kN) em relação às aplicadas em C1. Isto ocorreu devido à rotação da laje ter sido muito grande nesses carregamentos e ao curso deixado no macaco hidráulico, que estava carregando C2, ter sido pequeno. Assim, não teve possibilidade de deixar a laje rotacionar e apoiou na borda onde estava a célula C2, aumentando as cargas aplicadas na célula. Este problema ocasionou, nas últimas cargas, um momento e uma excentricidade menores que o planejado.

Tabela 5.9 – Quadro de cargas da laje L17

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C1/C3	C2/(C1+C3)/2	C4/(C1+C3)/2	N (kN)
10	2,60	1,15	2,50	3,75	10	2,6	0,260	1,04	0,45	1,47	524
25	6,25	3,20	6,25	9,65	25	6,5	0,254	1,00	0,51	1,54	524
50	12,65	6,35	12,60	18,95	51	12,6	0,249	1,00	0,50	1,50	523
75	18,90	9,65	18,60	28,05	75	18,4	0,245	1,02	0,51	1,50	522
100	25,10	12,80	25,05	37,30	100	24,5	0,244	1,00	0,51	1,49	521
150	37,55	18,60	37,45	56,35	150	37,8	0,252	1,00	0,50	1,50	519
200	50,50	25,10	50,60	75,60	202	50,5	0,250	1,00	0,50	1,50	520
254	62,50	34,60	62,80	93,90	254	59,3	0,234	1,00	0,55	1,50	530
279* (total)	68,80	40,90	69,10	100,20	279	59,3	0,213	-	-	-	-

d = 125mm; $f_c = 35,8\text{MPa}$; $\rho = 1,01\%$; Carregamento: $C1=C3$; $C2=0,5*C1$; $C4=1,5*C1$;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

A laje L17, com o mesmo carregamento previsto da laje L15 ($C1=C3$; $C2=0,5*C1$; $C4=1,5*C1$) teve a execução a contento, com pequena variação das cargas esperadas. Com isso, a excentricidade ficou sempre próxima do planejado, 0,250m (com o acréscimo do peso próprio houve uma diminuição da excentricidade).

Tabela 5.10 – Quadro de cargas da laje L18

Carga (kN)	C1 (kN)	C2 (kN)	C3 (kN)	C4 (kN)	Soma (kN)	M (kNm)	M/V (m)	C1/C3	C2/(C1+C3)/2	C4/(C1+C3)/2	N (kN)
10	2,65	1,30	2,75	3,80	11	2,5	0,238	0,96	0,48	1,41	524
25	6,50	3,20	6,45	9,55	26	6,4	0,247	1,01	0,49	1,47	524
50	12,45	6,20	12,80	18,40	50	12,2	0,245	0,97	0,49	1,46	523
75	19,15	9,30	18,80	28,15	75	18,9	0,250	1,02	0,49	1,48	522
100	25,40	12,60	24,95	37,35	100	24,8	0,247	1,02	0,50	1,48	521
150	37,70	18,75	37,75	56,40	151	37,7	0,250	1,00	0,50	1,50	519
200	50,40	26,50	50,00	75,15	202	48,7	0,241	1,01	0,53	1,50	520
250	62,55	38,60	61,50	94,15	257	55,6	0,216	1,02	0,62	1,52	530
297	74,00	48,00	73,60	101,10	297	53,1	0,179	1,01	0,65	1,37	540
322* (total)	80,30	54,30	79,90	107,40	322	53,1	0,165	-	-	-	-

d = 126mm; $f_c = 37,3\text{MPa}$; $\rho = 1,05\%$; Carregamento: $C1=C3$; $C2=0,5*C1$; $C4=1,5*C1$;

N – força na barra protendida (compressão centrada no pilar);

***carga aplicada mais o peso próprio da laje e dos equipamentos.**

A laje L18 teve o mesmo carregamento das lajes L15 e L17 ($C1=C3$; $C2=0,5*C1$; $C4=1,5*C1$). O carregamento foi executado com pequenas variações perante o previsto, até o carregamento de 200kN. Após este carregamento, ocorreu o mesmo problema da laje L15: a laje teve uma rotação muito grande que transferiu carga para a célula C2. E, no carregamento de 250kN, C2 teve carga com intensidade 0,62 vez a carga de C1. No carregamento de 297kN (ruptura), C2 teve carga com intensidade 0,65 vez a carga de C1 e a célula C4 teve carga 1,37 vez superior a C1 (enquanto deveria de ser 1,5). O momento aplicado e a excentricidade nestes passos de carga foram menores que o planejado.

5.3 FISSURAÇÃO E SUPERFÍCIE DE RUPTURA

5.3.1 Fissuração

Nas lajes L8 e L10 a L15, as fissuras radiais iniciaram no pilar. As lajes L17 e L18 tiveram as fissuras radiais iniciando nos vértices dos furos. As fissuras radiais se ampliaram em direção às bordas das lajes. Posteriormente ou no mesmo carregamento surgiram as fissuras circunferenciais.

As cargas, sem adição do peso próprio da laje e dos equipamentos, V_{rad} e V_{circ} , referentes à verificação visual das primeiras fissuras radiais e circunferenciais, respectivamente, são mostradas na Tabela 5.11.

Os panoramas de fissuração das lajes da Série 2 são mostrados nas Figuras 5.2 a 5.10.

Tabela 5.11 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 2

Laje	Furo (mm)	Geometria e carregamento	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_{rad} (kN)	V_{circ} (kN)
L8	1 200x200	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0 2P P </div>	192	86,3	50	75
L10	2 200x200	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0 2P P </div>	189	83,0	25	25
L11	1 200x200	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 2P 0 P </div>	299	139,1	50	100
L12	1 200x200	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0,5P 1,5P P </div>	319	74,4	75	100
L13	2 200x200	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0,5P 1,5P P </div>	277	61,9	75	100
L14	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0 2P P </div>	274	125,9	50	50
L15	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 1,5P P P 0,5P </div>	364	66,5	50	150
L17	1 200x300	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 1,5P P P 0,5P </div>	279	59,3	75	100
L18	2 200x300	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 1,5P P P 0,5P </div>	322	53,1	75	100

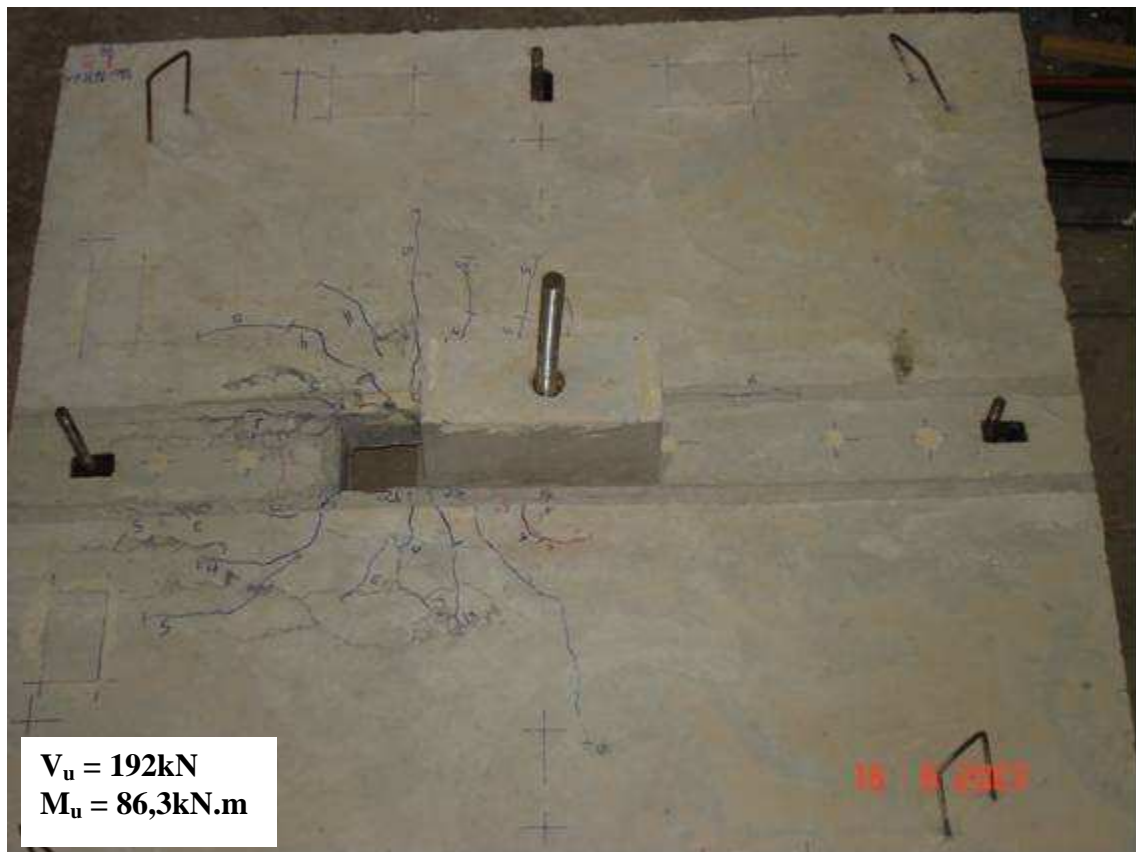


Figura 5.2 – Fissuração na laje L8



Figura 5.3 – Fissuração na laje L10



Figura 5.4 – Fissuração na laje L11



Figura 5.5 – Fissuração na laje L12

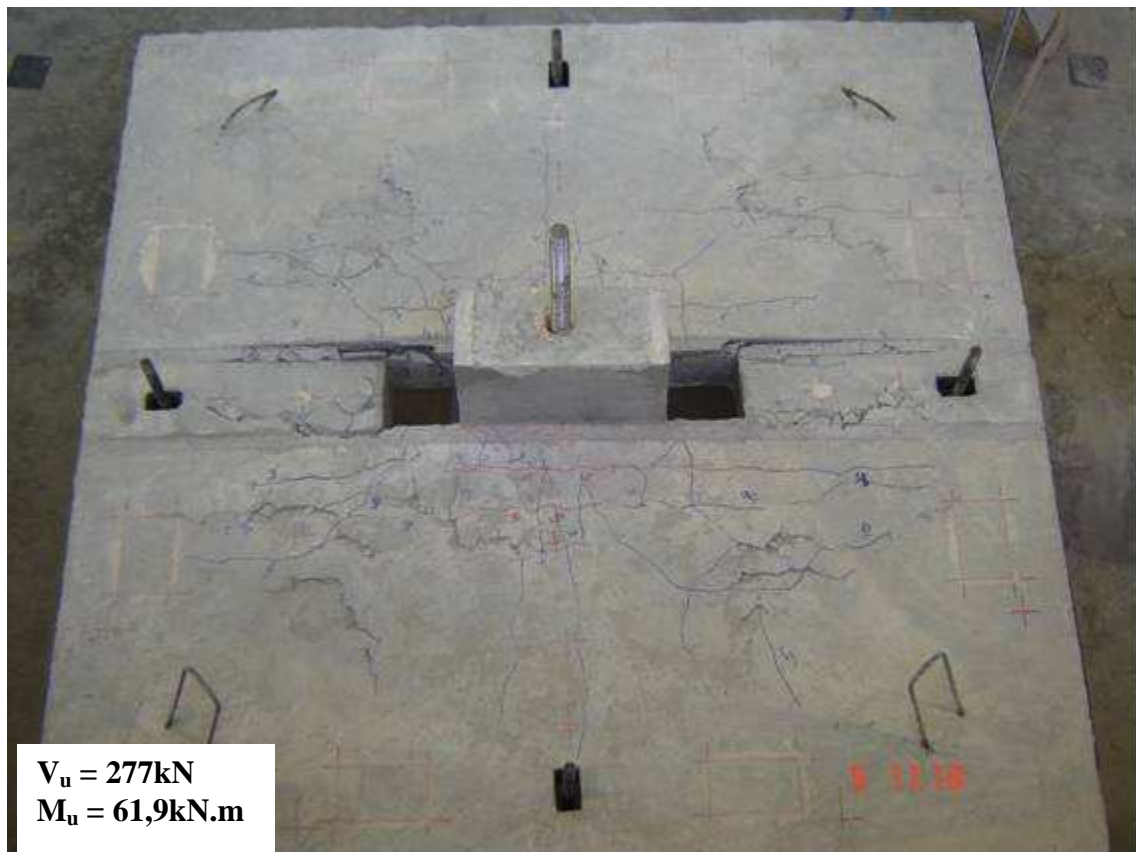


Figura 5.6 – Fissuração na laje L13



Figura 5.7 – Fissuração na laje L14

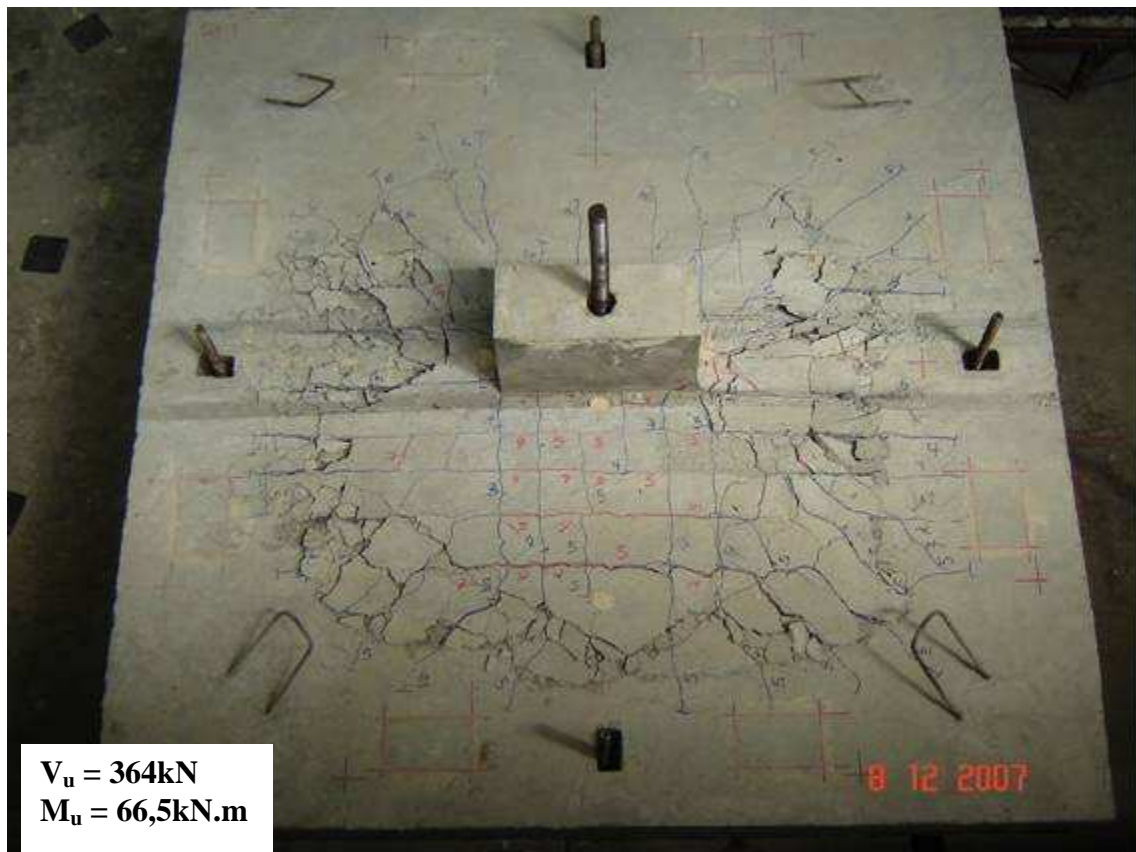


Figura 5.8 – Fissuração na laje L15

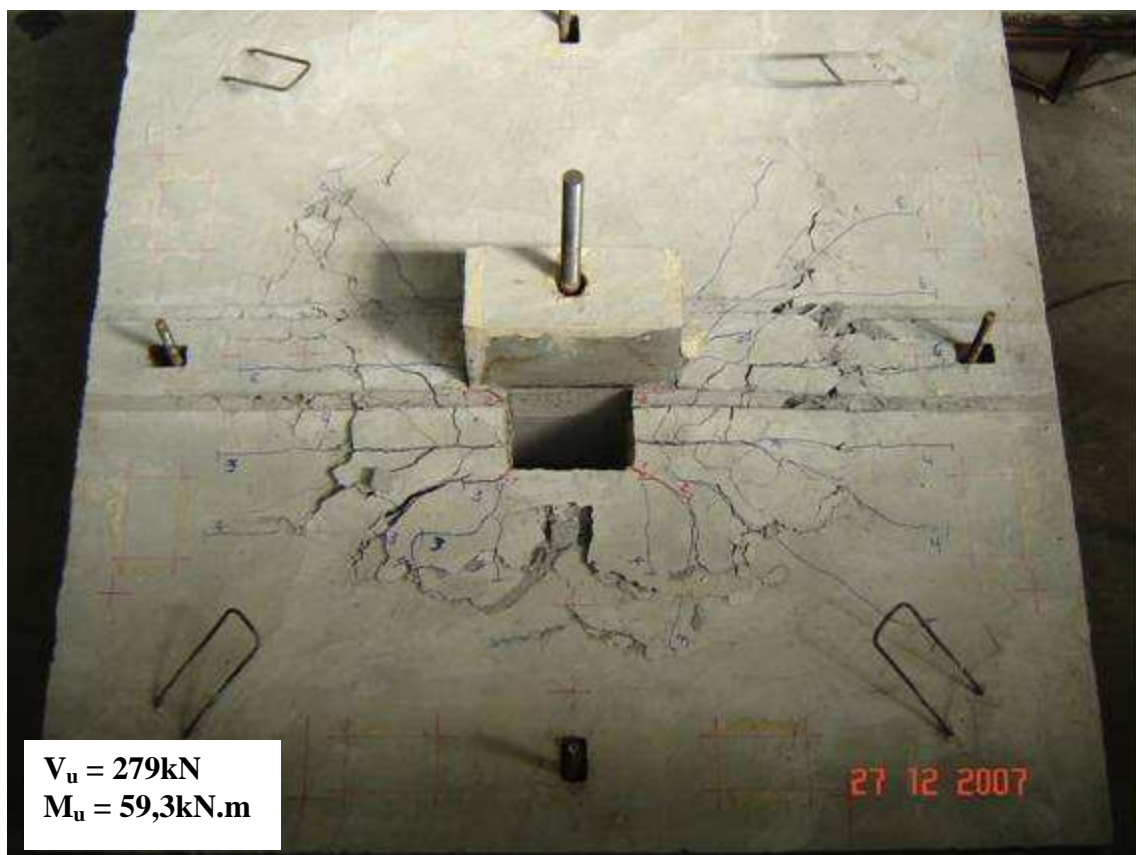


Figura 5.9 – Fissuração na laje L17



Figura 5.10 – Fissuração na laje L18

5.3.2 Superfície de ruptura

As superfícies de ruptura, das lajes da Série 2, surgiram no bordo superior e se estenderam em direção a junção da laje com o pilar no bordo inferior da laje (bordo comprimido), formando o “cone” de punção.

Nas lajes com furo, assim como nas lajes da Série 1, também foi possível ver a formação da superfície de ruptura através do mesmo.

As superfícies de ruptura das lajes L8 e L10 se desenvolveram com inclinações que variaram de 22° a 85° em relação ao bordo inferior da laje. Na laje L11, essa variação foi de 26° a 41°. As lajes L12 e L13 tiveram variações entre 26° e 51°. Nas lajes L14 e L15, as variações estiveram entre 16° e 54°. Nas lajes L17 e L18, variaram entre 32° e 46°.

Nas lajes L10, L11 e L14, no lado tracionado devido ao momento não foi detectada superfície de ruptura inclinada em relação ao bordo inferior, sugerindo a existência de uma superfície aproximadamente paralela ao pilar.

A estimativa da inclinação das superfícies de ruptura foi feita com o mesmo procedimento utilizado nas lajes da Série 1.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam, respectivamente, a configuração das superfícies de ruptura e a fotografia das superfícies de ruptura dentro dos furos, das lajes da Série 2.

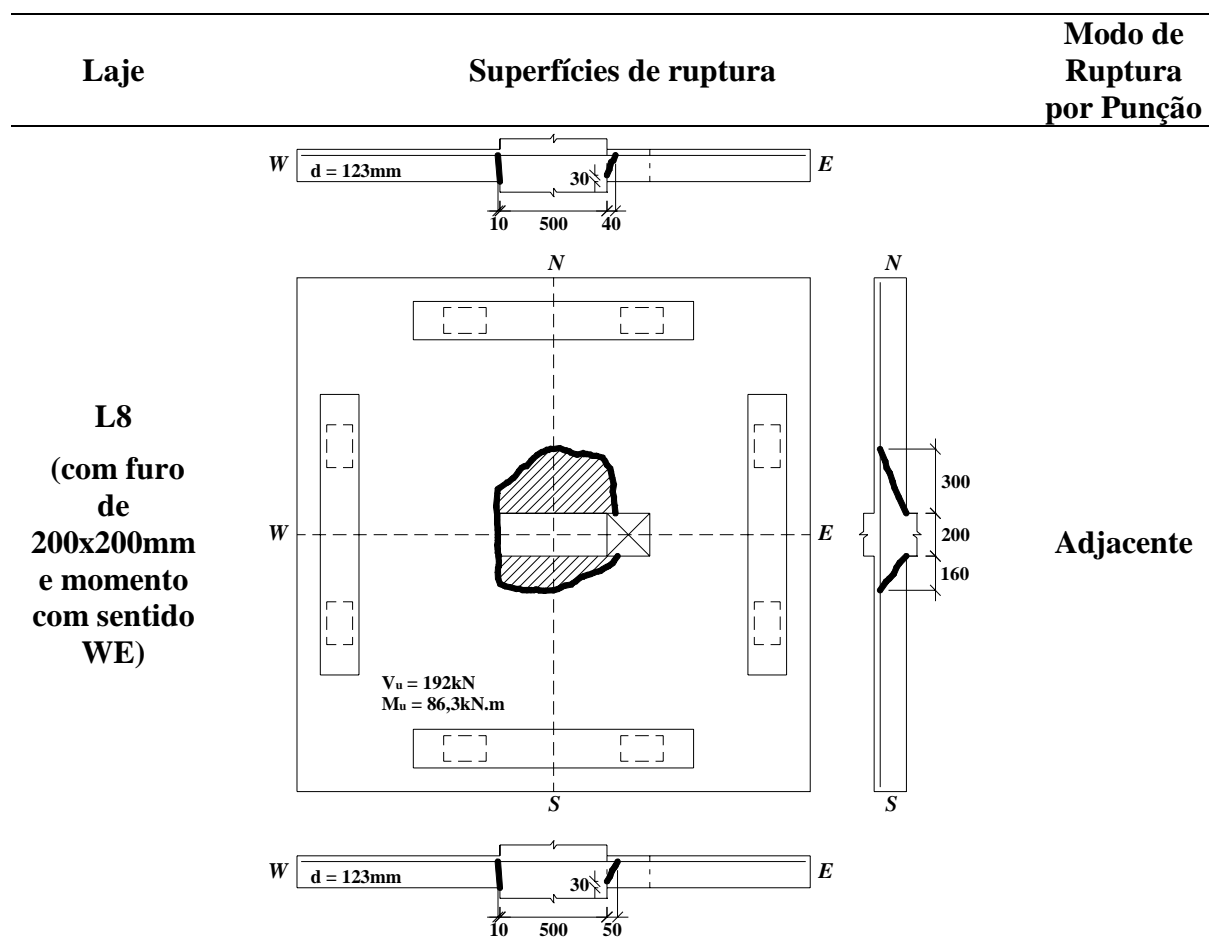


Figura 5.11 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2

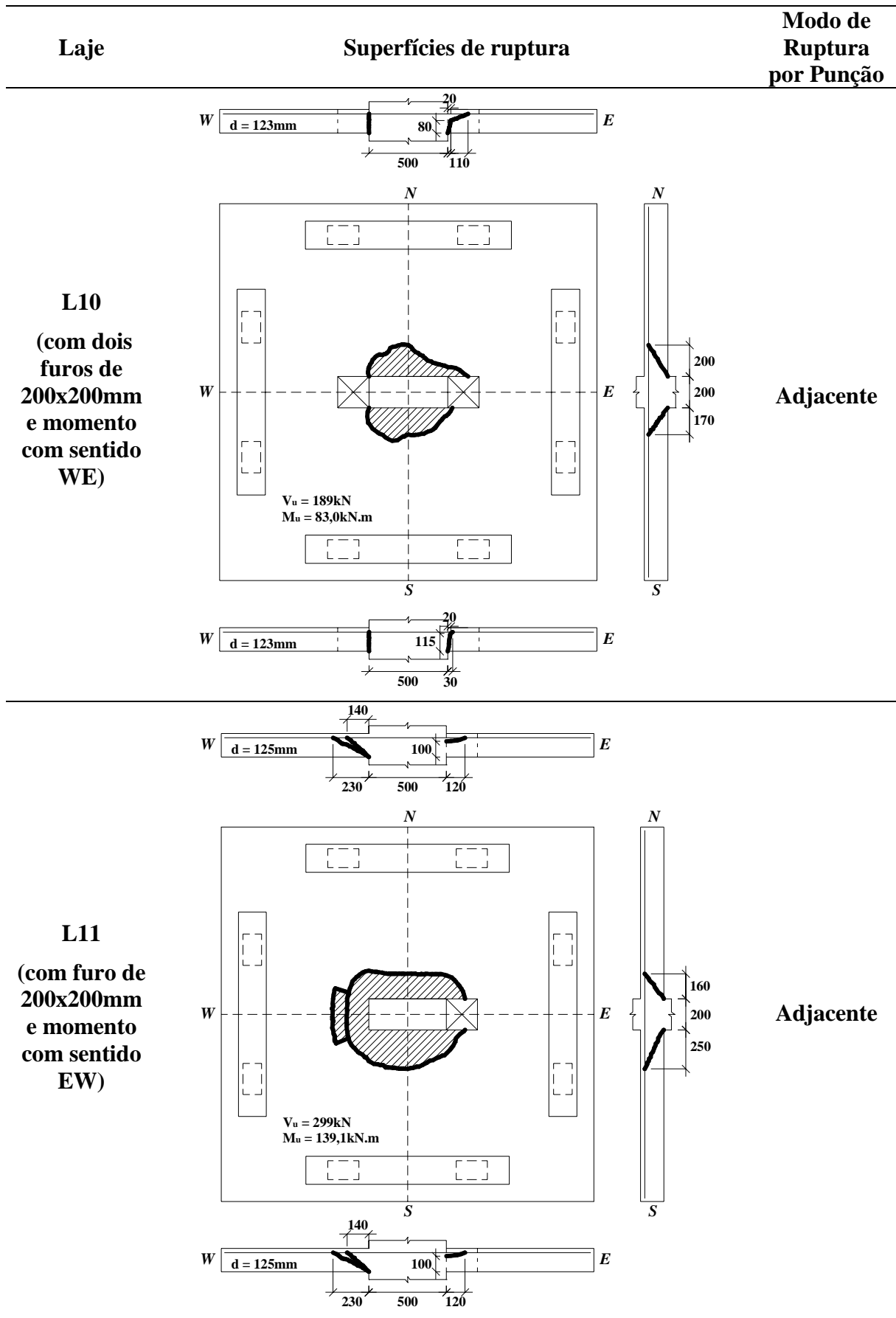


Figura 5.11 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

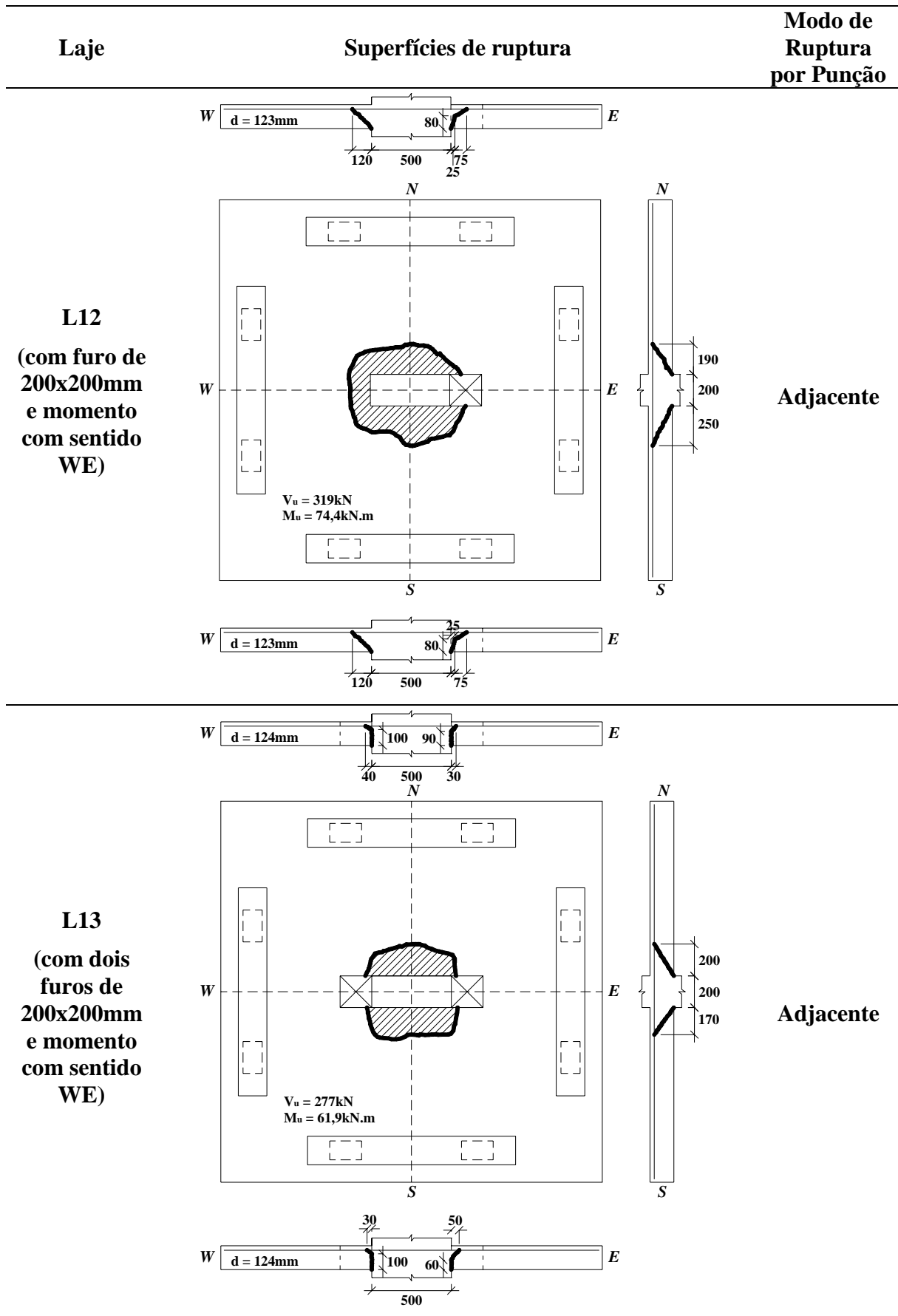


Figura 5.11 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

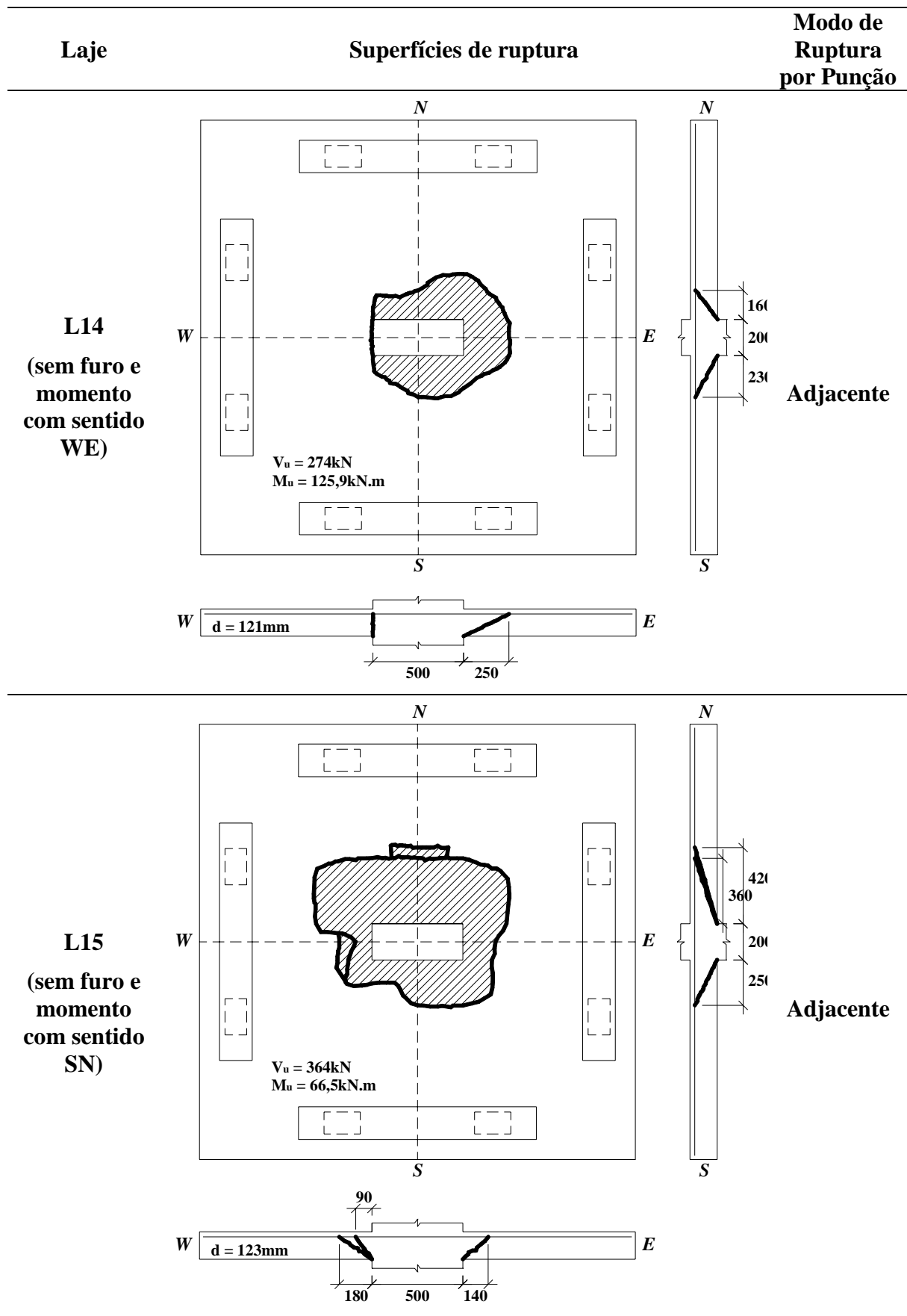


Figura 5.11 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

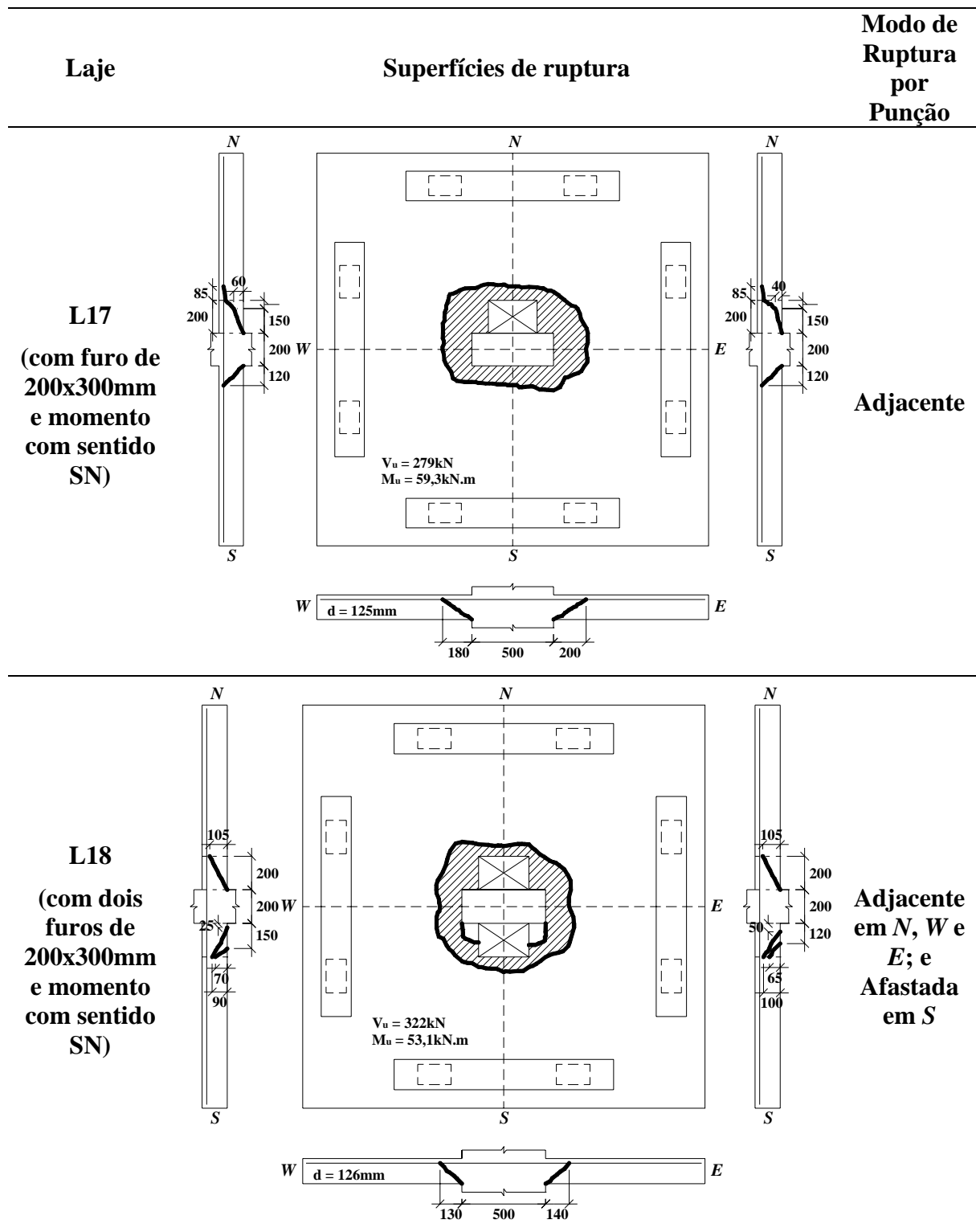


Figura 5.11 – Configuração das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)



Figura 5.12 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 2



Figura 5.12 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)



Figura 5.12 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

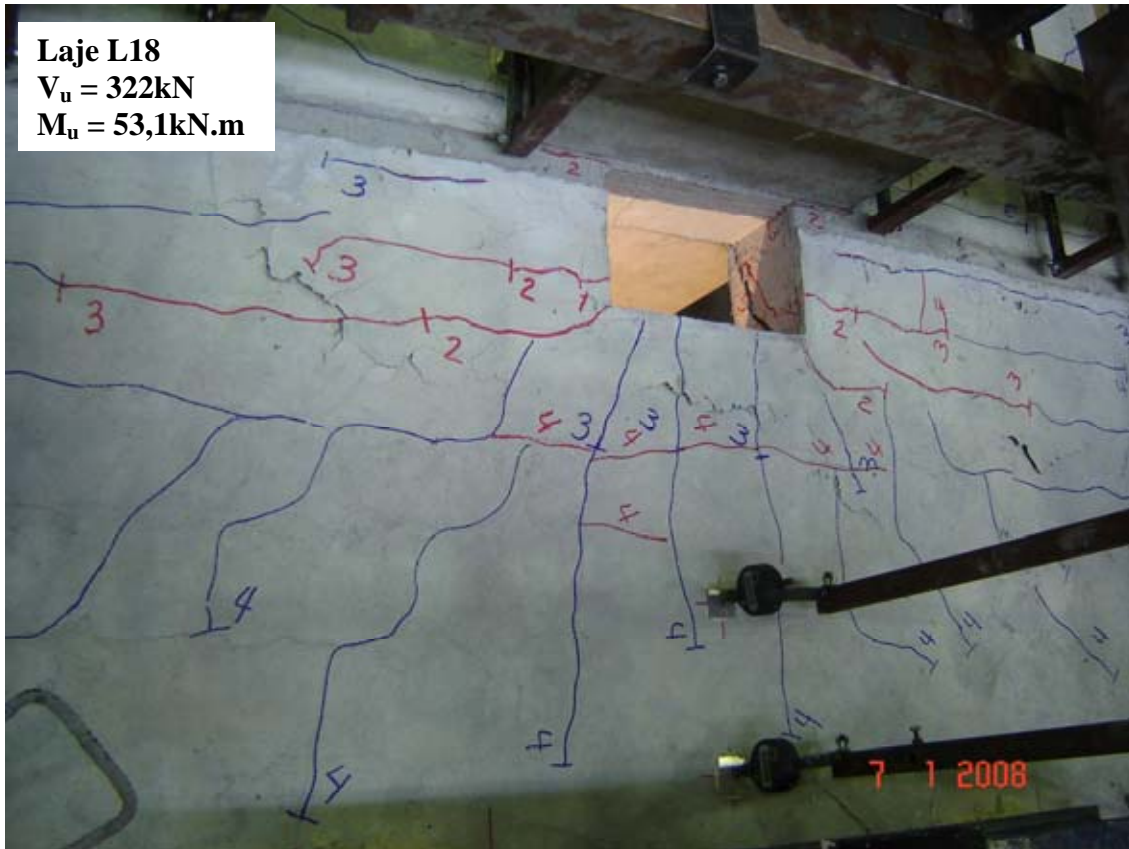


Figura 5.12 – Fotografia das superfícies de ruptura das lajes da Série 2 (continuação)

5.4 DESLOCAMENTO VERTICAL

Nas Figuras 5.13 e 5.30 são apresentados os gráficos de *Deslocamento vertical x Posição em relação ao centro da laje*, em cada eixo, dos defletômetros instalados, para todas as lajes da Série 2.

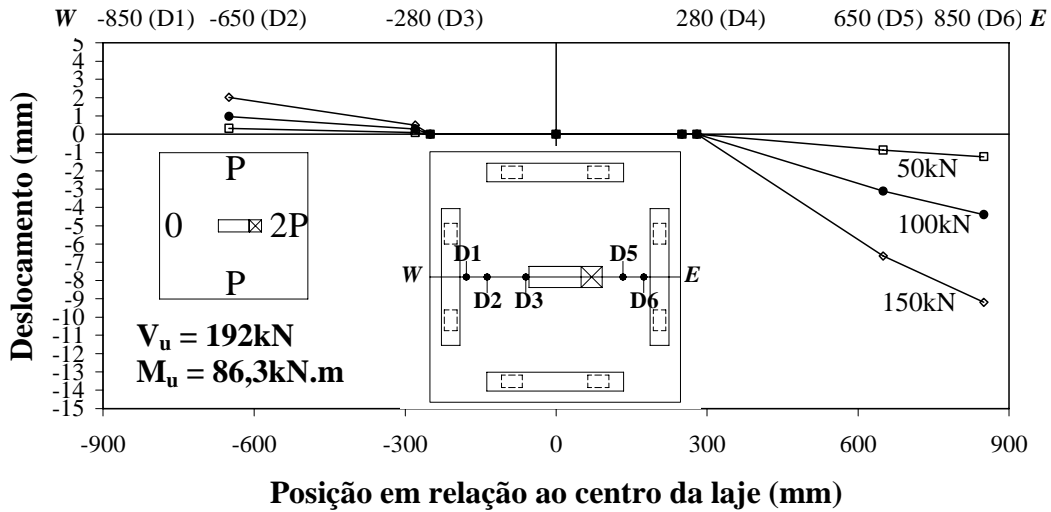


Figura 5.13 – Deslocamentos verticais medidos na laje L8, eixo WE

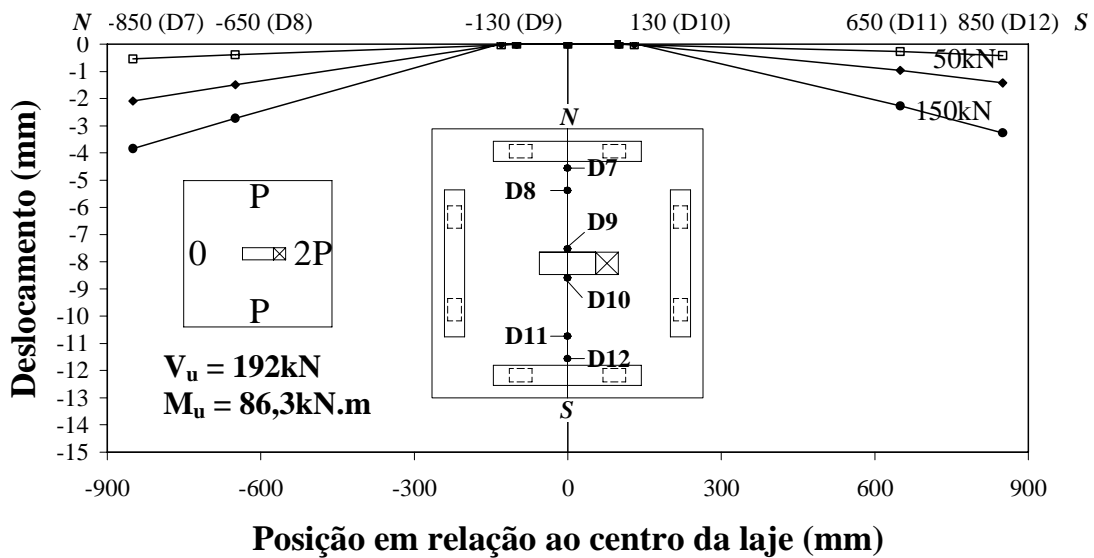


Figura 5.14 – Deslocamentos verticais medidos na laje L8, eixo NS

A laje L8, no eixo *EW*, apresentou a seguinte rotação: na direção *E* se deslocou para baixo e na direção *W* se deslocou no sentido contrário (para cima). Devido a esse comportamento, as leituras no defletômetro D1 foram perdidas (esse comportamento não estava previsto e o defletômetro estava preparado para um deslocamento para baixo). Na direção *NS*, apresentou um comportamento simétrico.

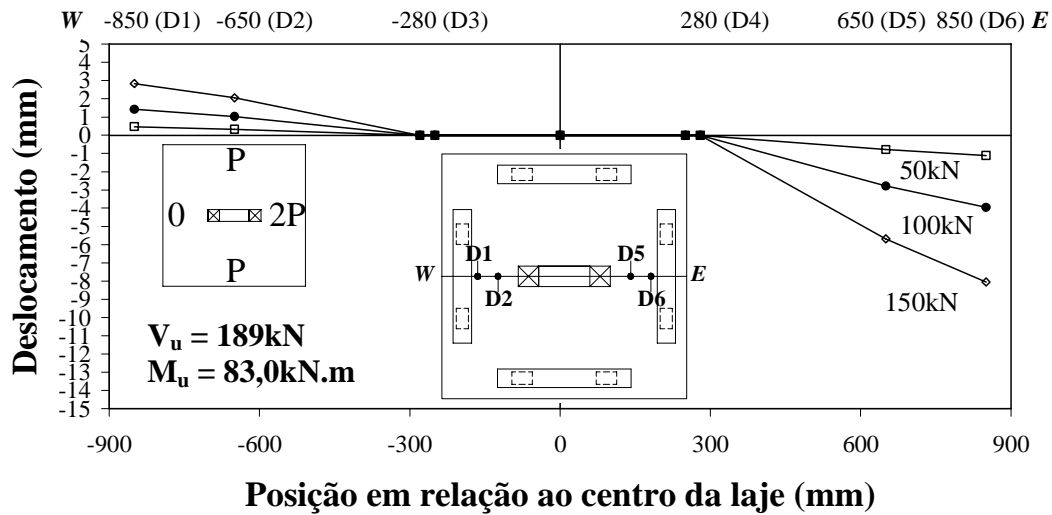


Figura 5.15 – Deslocamentos verticais medidos na laje L10, eixo WE

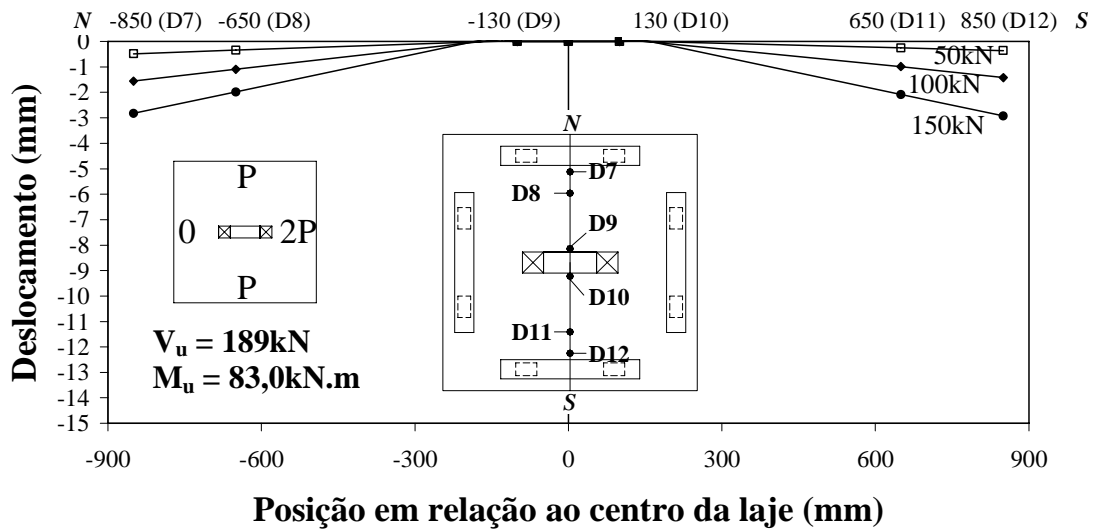


Figura 5.16 – Deslocamentos verticais medidos na laje L10, eixo NS

A laje L10 teve uma rotação na direção WE em que os deslocamentos nos lados foram contrários (em E deslocamento para baixo e em W para cima). Os deslocamentos máximos em E foram superiores, em média, 2,3 vezes os máximos em W. Na direção NS, teve comportamento simétrico.

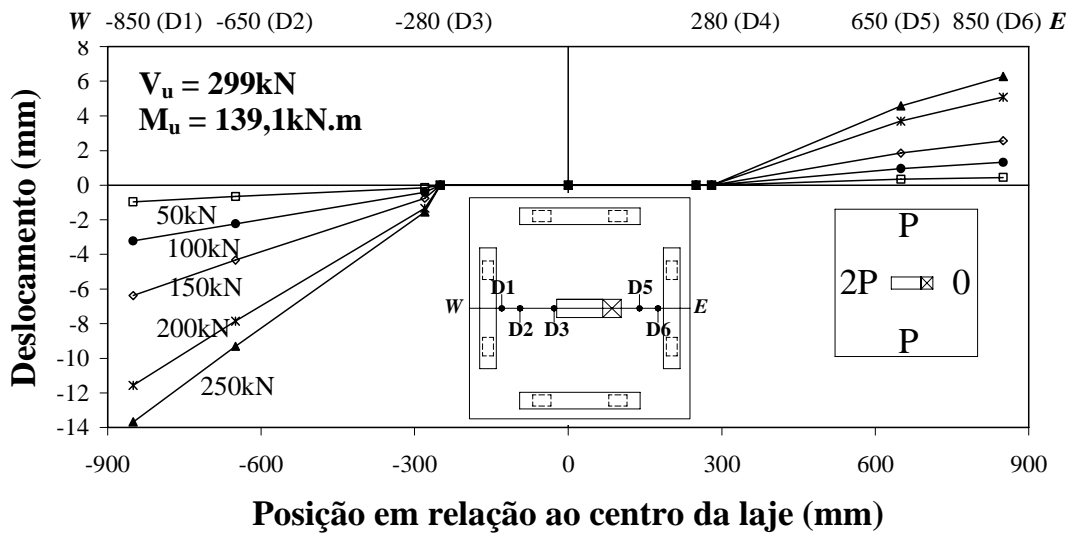


Figura 5.17 – Deslocamentos verticais medidos na laje L11, eixo WE

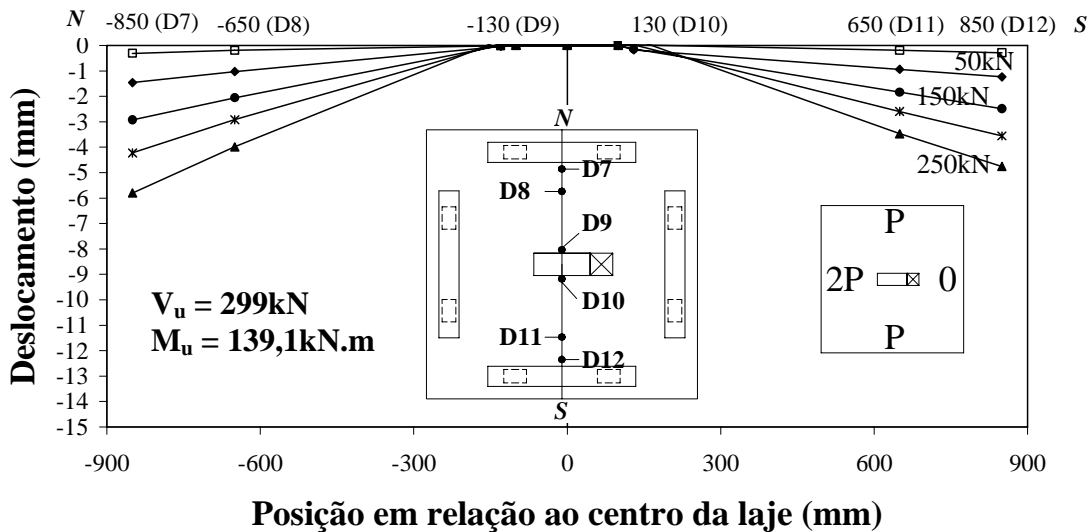


Figura 5.18 – Deslocamentos verticais medidos na laje L11, eixo NS

Na laje L11, também houve uma rotação na direção WE onde os deslocamentos nos lados foram contrários, porém, em W houve deslocamento para baixo e em E para cima. Os deslocamentos máximos em W foram superiores, em média, 2,3 vezes os deslocamentos máximos em E. Na direção NS, os deslocamentos máximos em N foram ligeiramente superiores, maiores em 0,02mm na carga de 50kN e, na carga de 250kN, em 1,04mm.

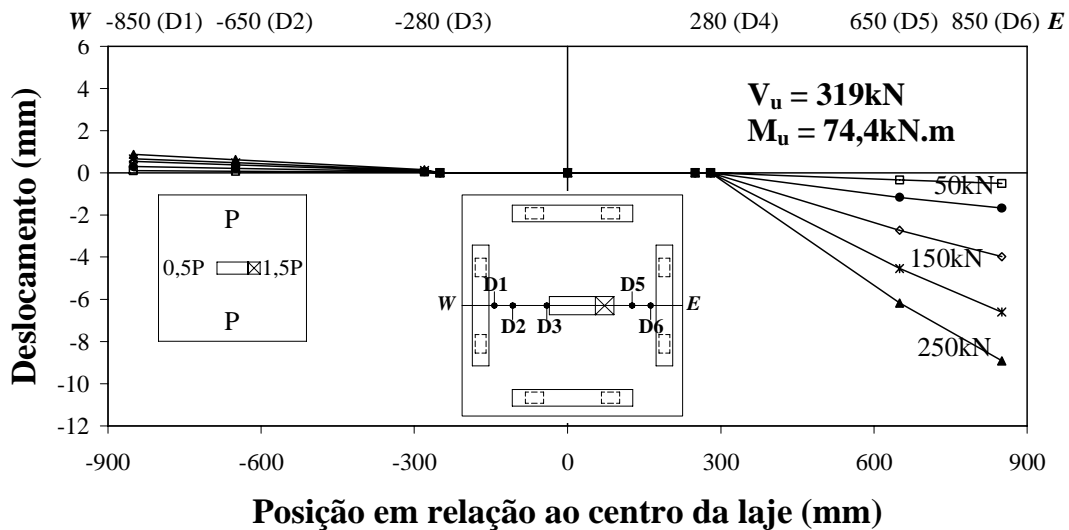


Figura 5.19 – Deslocamentos verticais medidos na laje L12, eixo WE

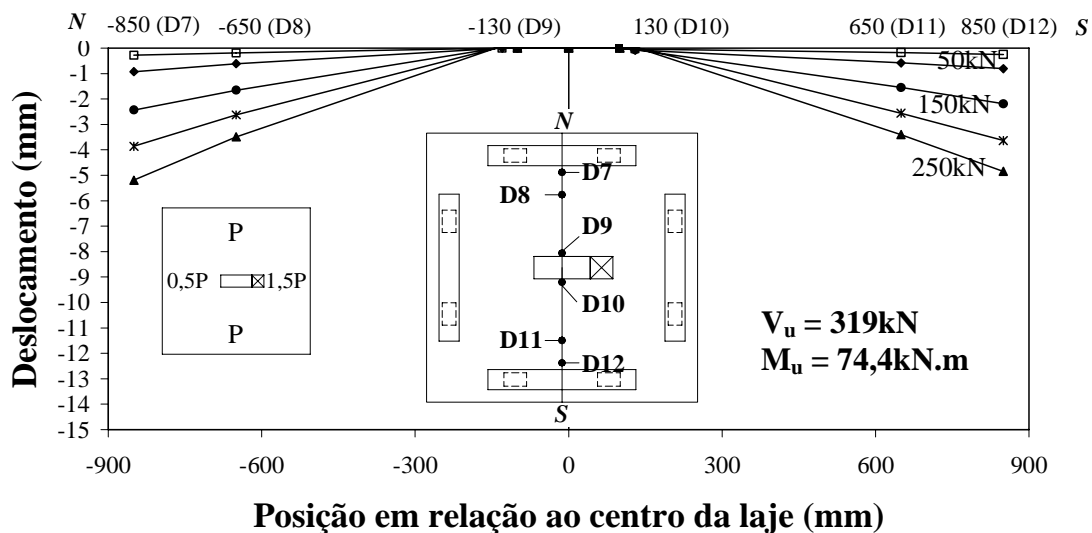


Figura 5.20 – Deslocamentos verticais medidos na laje L12, eixo NS

Na laje L12, assim como em L10, houve uma rotação na direção WE onde os deslocamentos em E foram para baixo e em W para cima. Os deslocamentos máximos em E foram superiores, em média, 7,7 vezes os máximos registrados em W. Na direção NS, o comportamento foi simétrico.

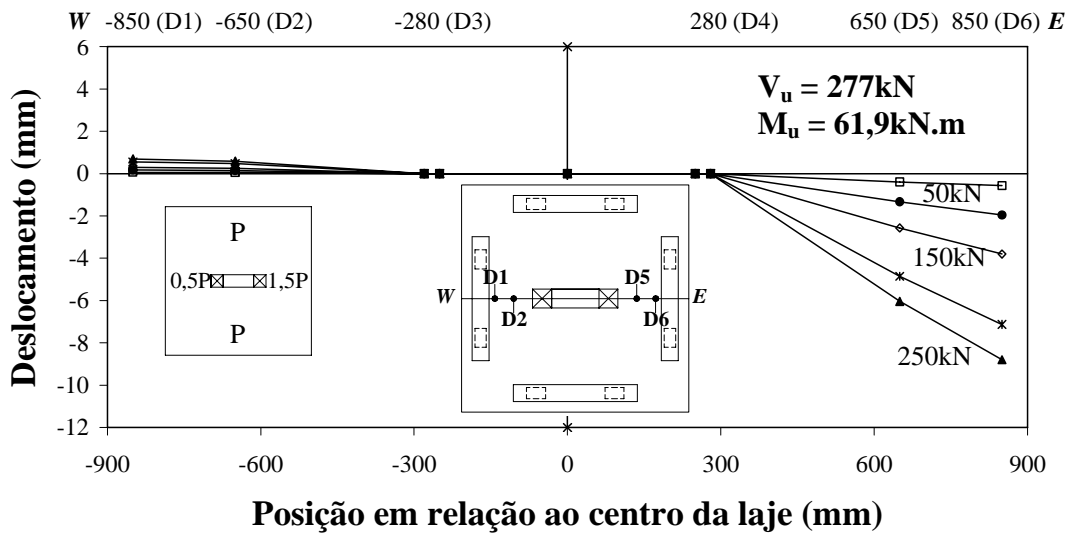


Figura 5.21 – Deslocamentos verticais medidos na laje L13, eixo WE

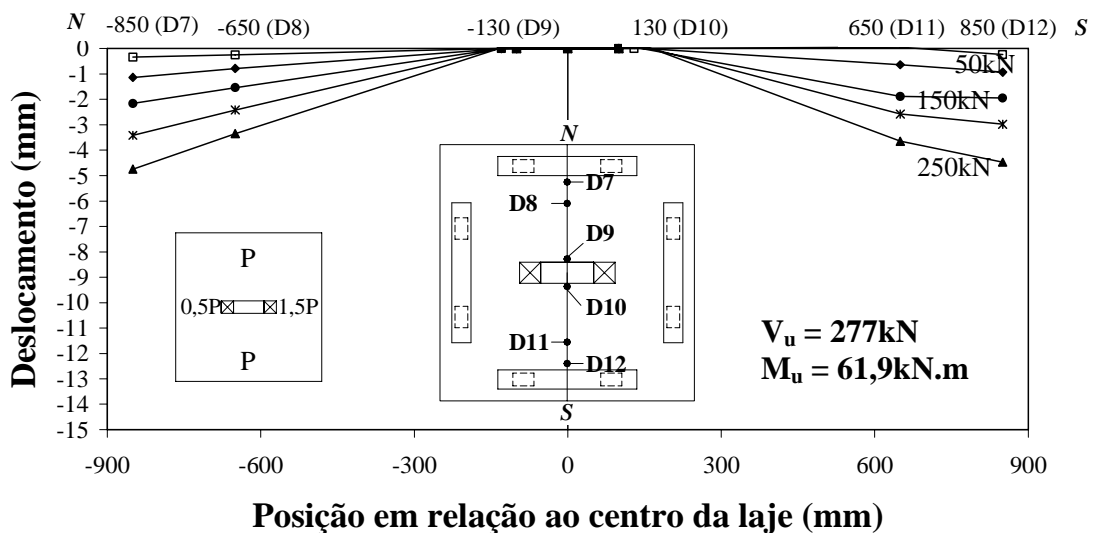


Figura 5.22 – Deslocamentos verticais medidos na laje L13, eixo NS

Na laje L13, assim como em L10 e L12, na direção WE, houve rotação e os deslocamentos em E e W foram contrários, em E para baixo e em W para cima. Os deslocamentos máximos em E foram superiores, em média, 11,6 vezes os deslocamentos máximos em W. Na direção NS, o comportamento foi simétrico.

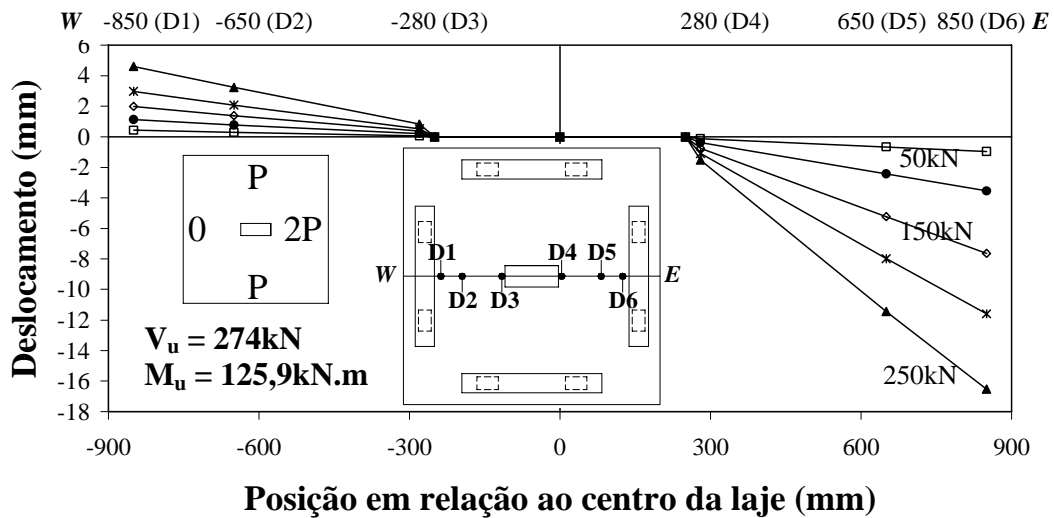


Figura 5.23 – Deslocamentos verticais medidos na laje L14, eixo WE

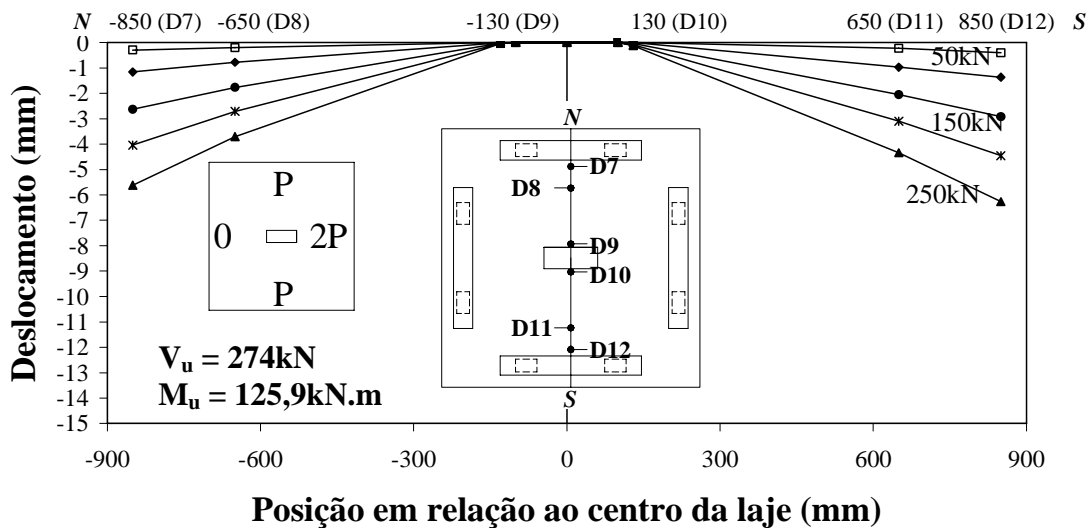


Figura 5.24 – Deslocamentos verticais medidos na laje L14, eixo NS

A laje L14, assim como a L10, L12 e L13, apresentou, na direção WE, rotação com os deslocamentos em E e W contrários, em E foram para baixo e em W para cima. Os deslocamentos máximos em E foram superiores, em média, em três (3,0) vezes os deslocamentos máximos em W. Na direção NS, mostrou comportamento simétrico.

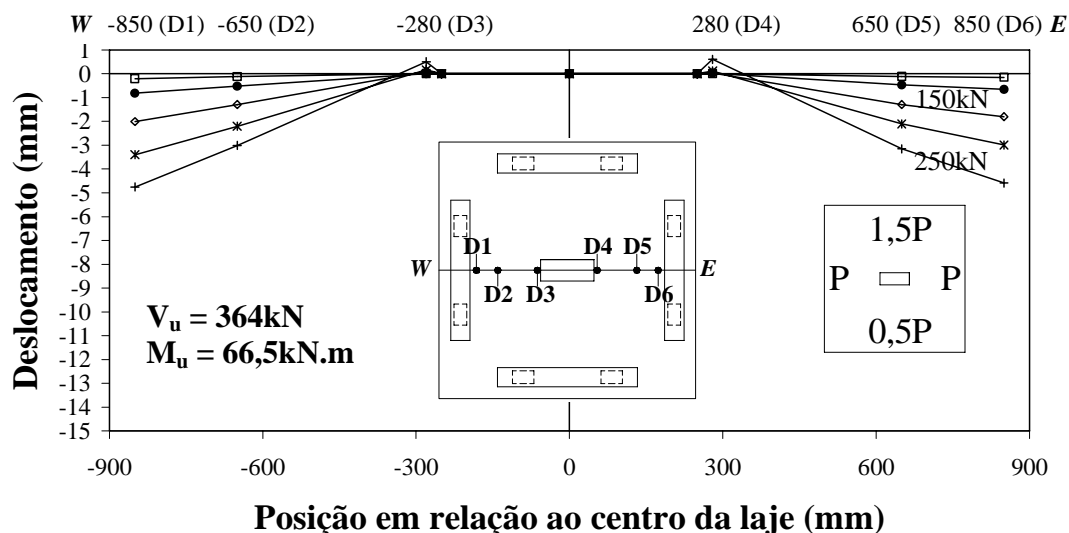


Figura 5.25 – Deslocamentos verticais medidos na laje L15, eixo WE

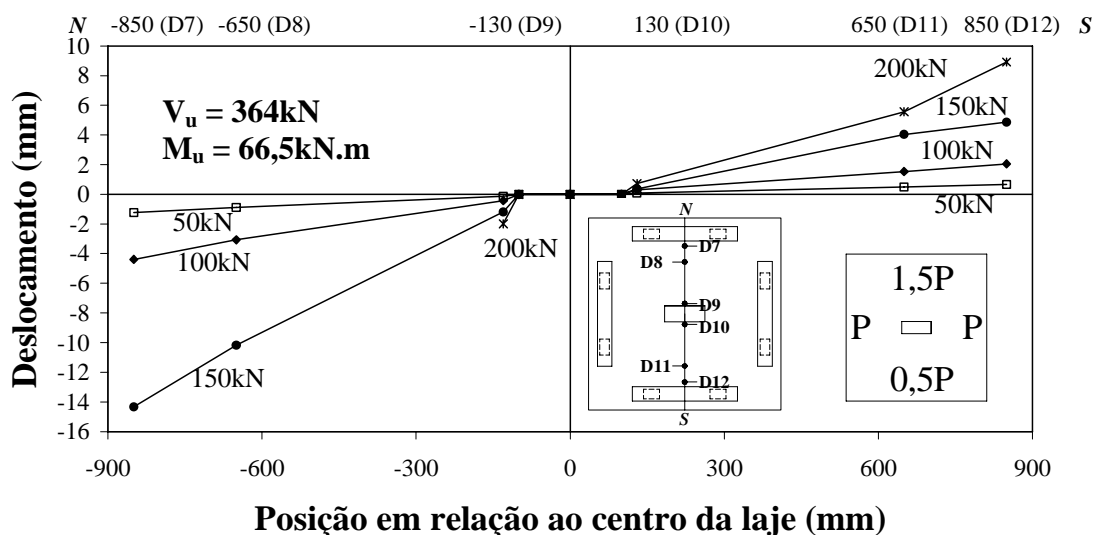


Figura 5.26 – Deslocamentos verticais medidos na laje L15, eixo NS

Na laje L15, direção WE, o comportamento dos deslocamentos foram simétricos (nos pontos próximos ao pilar houve um deslocamento para cima). Na direção NS, houve rotação e os deslocamentos em N e S foram contrários, em N para baixo e em S para cima. Os deslocamentos máximos em N foram superiores, em média 2,4 vezes os deslocamentos em S. Na carga de 200kN, a leitura do defletômetros D7 e D8 foram perdidas. Na direção NS o comportamento foi simétrico.

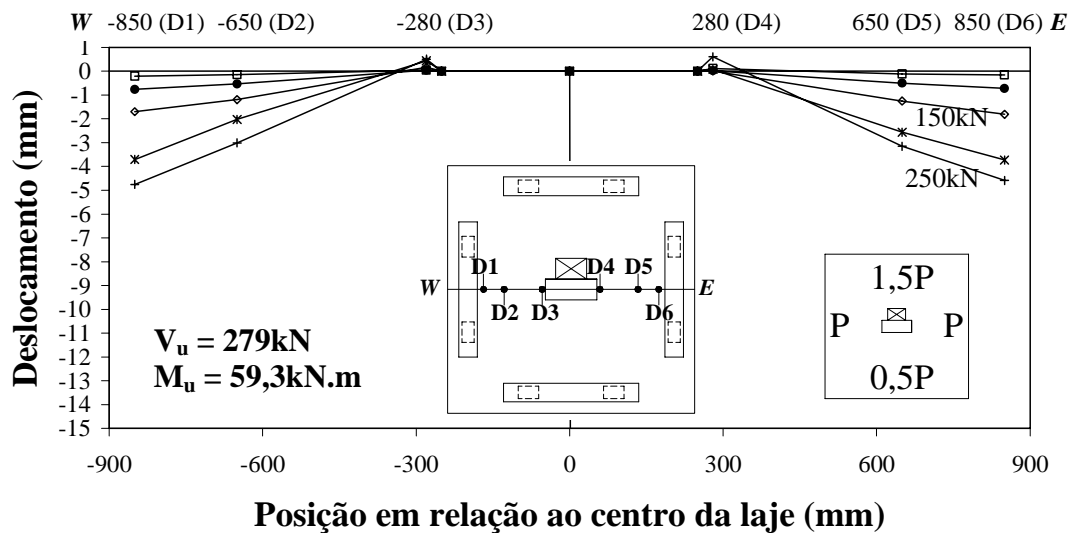


Figura 5.27 – Deslocamentos verticais medidos na laje L17, eixo WE

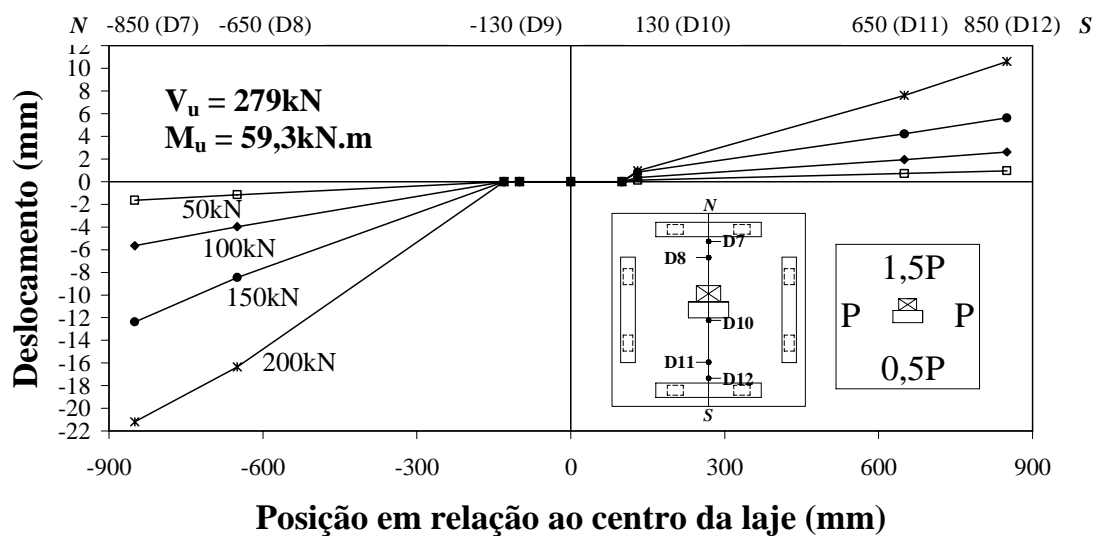


Figura 5.28 – Deslocamentos verticais medidos na laje L17, eixo NS

Na laje L17, assim como na laje L15, na direção WE, o comportamento dos deslocamentos foi simétrico (nos pontos próximos ao pilar houve um deslocamento para cima). Na direção NS, houve rotação e os deslocamentos em N e S foram contrários, em N para baixo e em S para cima. Os deslocamentos máximos em N foram superiores, em média 1,9 vez os deslocamentos em S.

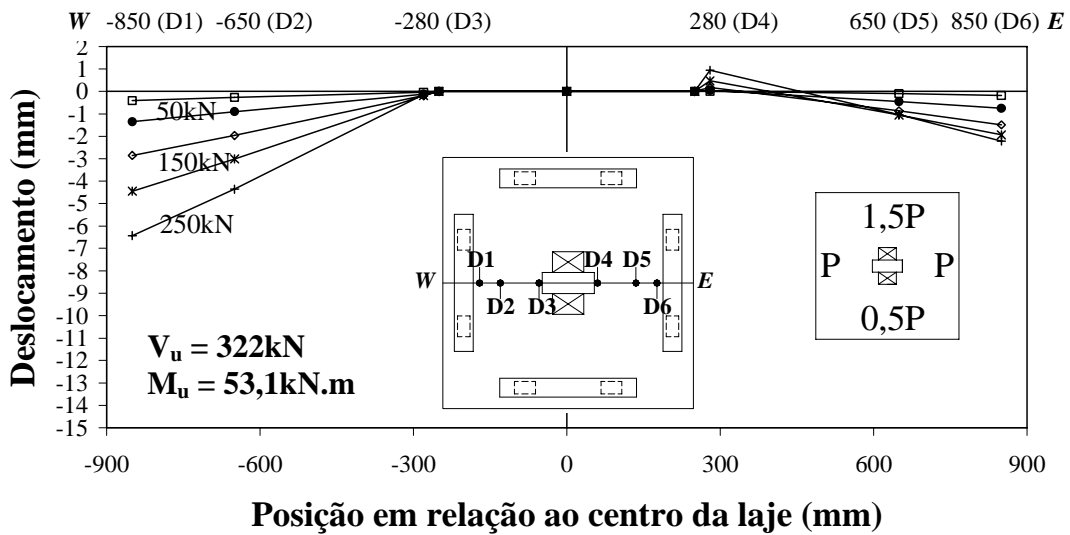


Figura 5.29 – Deslocamentos verticais medidos na laje L18, eixo WE

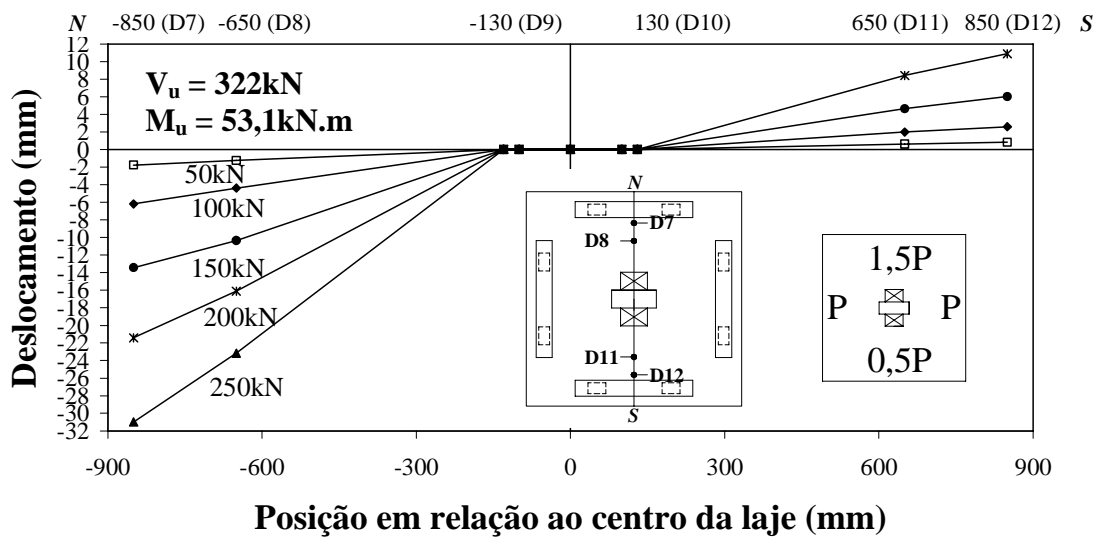


Figura 5.30 – Deslocamentos verticais medidos na laje L18, eixo NS

Na laje L18, na direção WE, sem furo, o lado W apresentou, desde o início do ensaio, deslocamentos superiores aos registrados em E. No início o deslocamento máximo era 0,13mm superior e no final foi 4,21mm superior. Na direção NS, assim como nas lajes L15 e L17, houve rotação. Os deslocamentos em N e S foram contrários, em N para baixo e em S para cima. Os deslocamentos máximos em N foram superiores, em média 2,1 vezes os deslocamentos em S. As leituras do defletômetro D11 e D12 na carga de 250kN foram perdidas.

5.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DA ARMADURA DE FLEXÃO

Nas Figuras 5.31 a 5.40 são apresentados os gráficos *Carga x Deformação*, das barras instrumentadas nas armaduras de flexão de todas as lajes da Série 2. Foram colocadas as médias dos pares de extensômetros situados num mesmo ponto. Onde um extensômetro não funcionou, o resultado de apenas um deles foi representado.

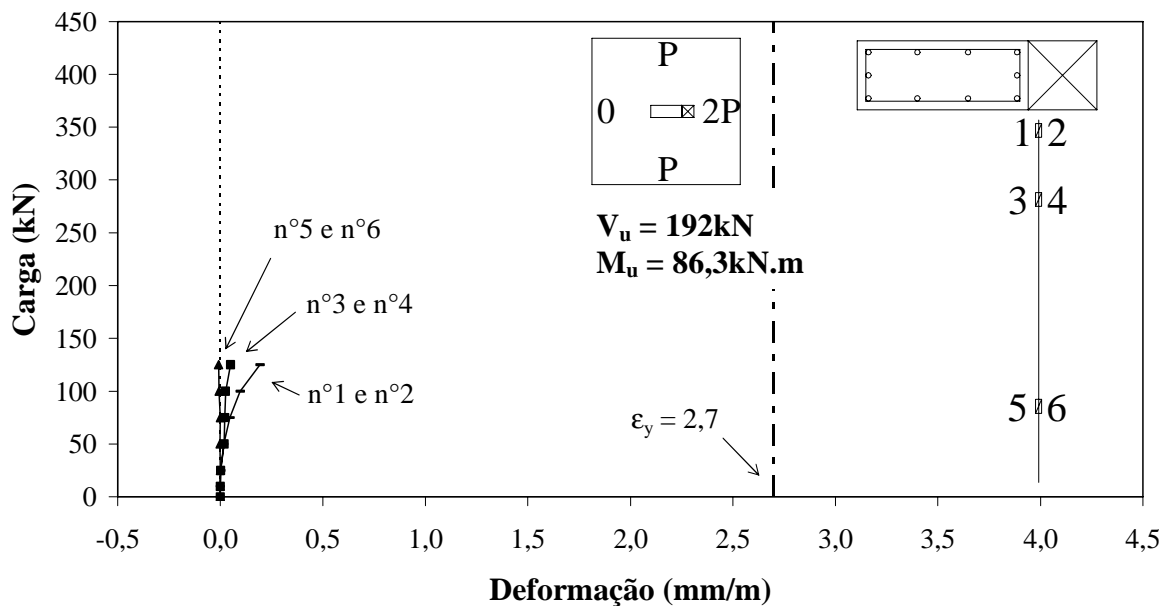


Figura 5.31 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L8, extensômetros 1 ao 6

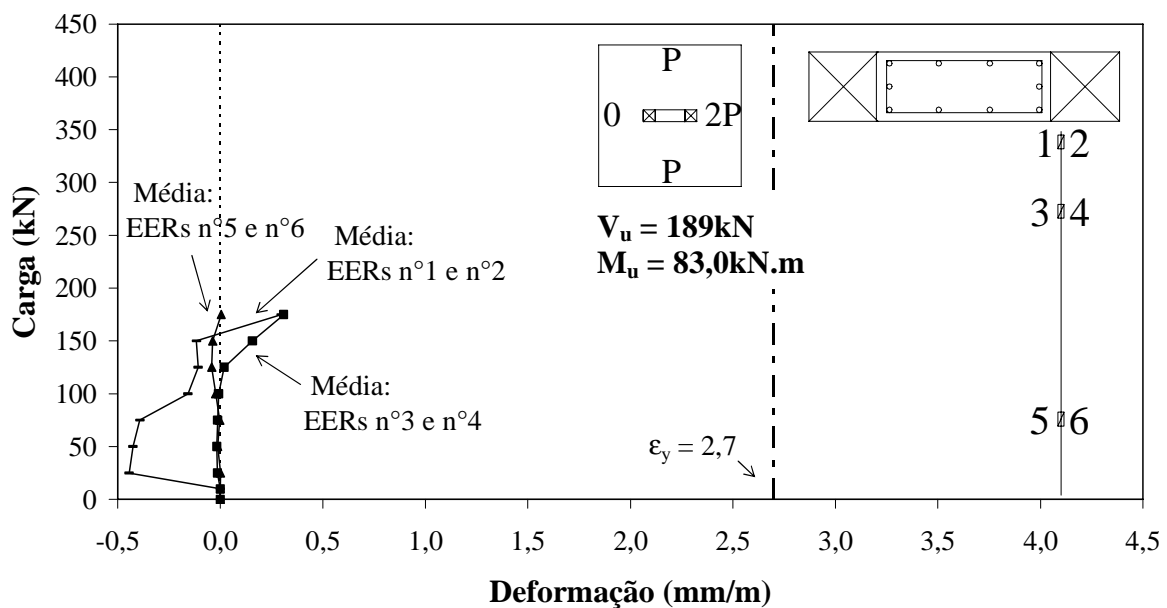


Figura 5.32 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L10, extensômetros 1 ao 6

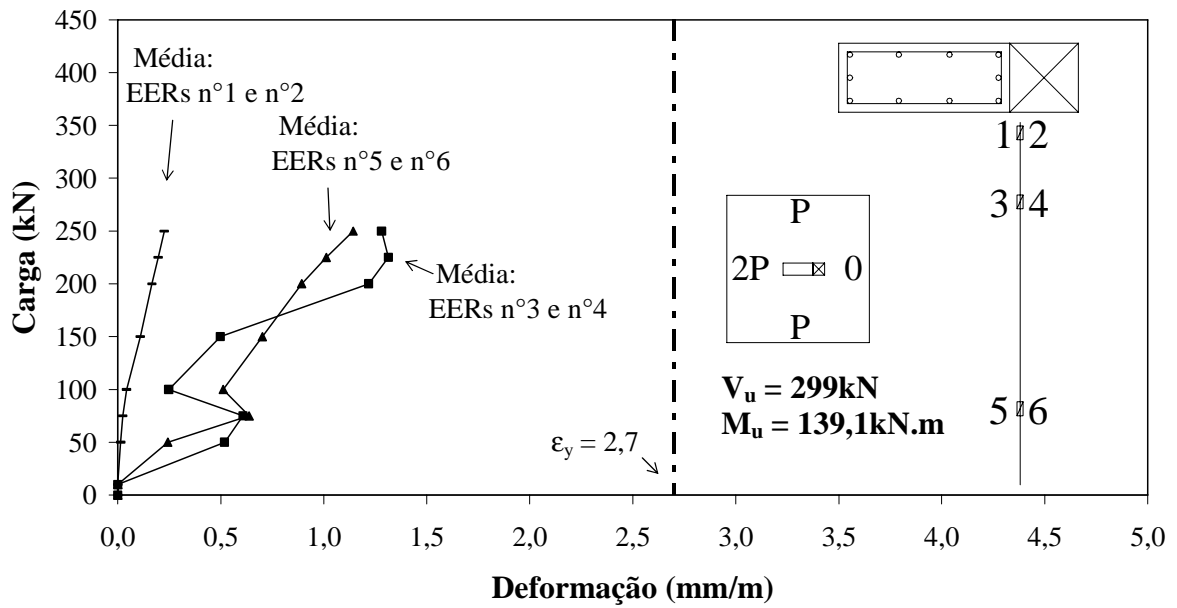


Figura 5.33 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L11, extensômetros 1 ao 6

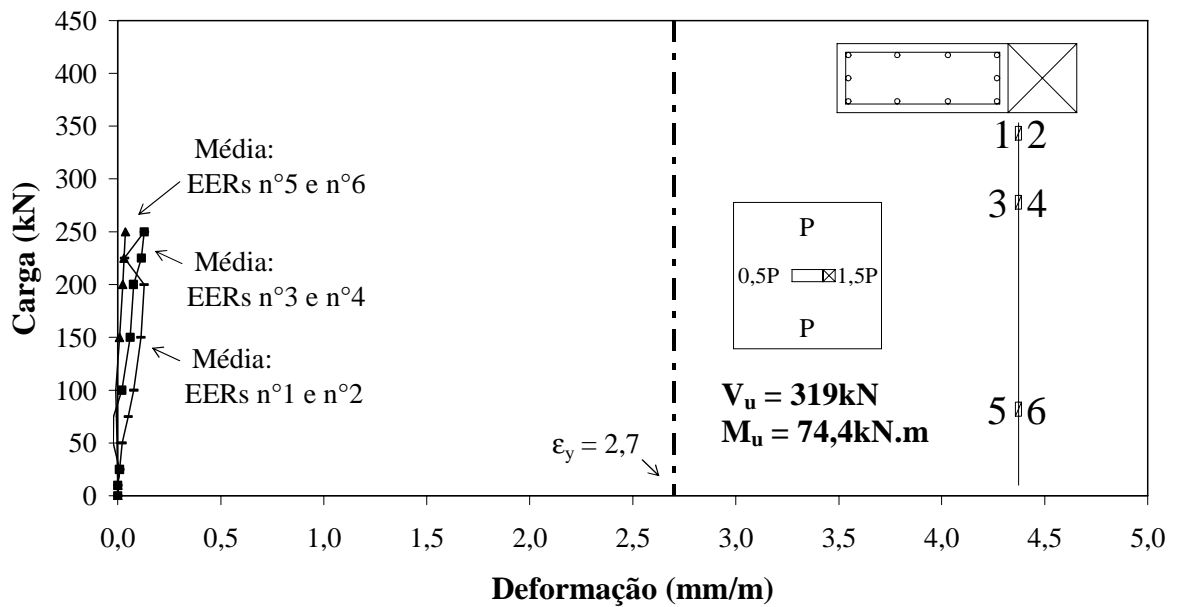


Figura 5.34 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L12, extensômetros 1 ao 6

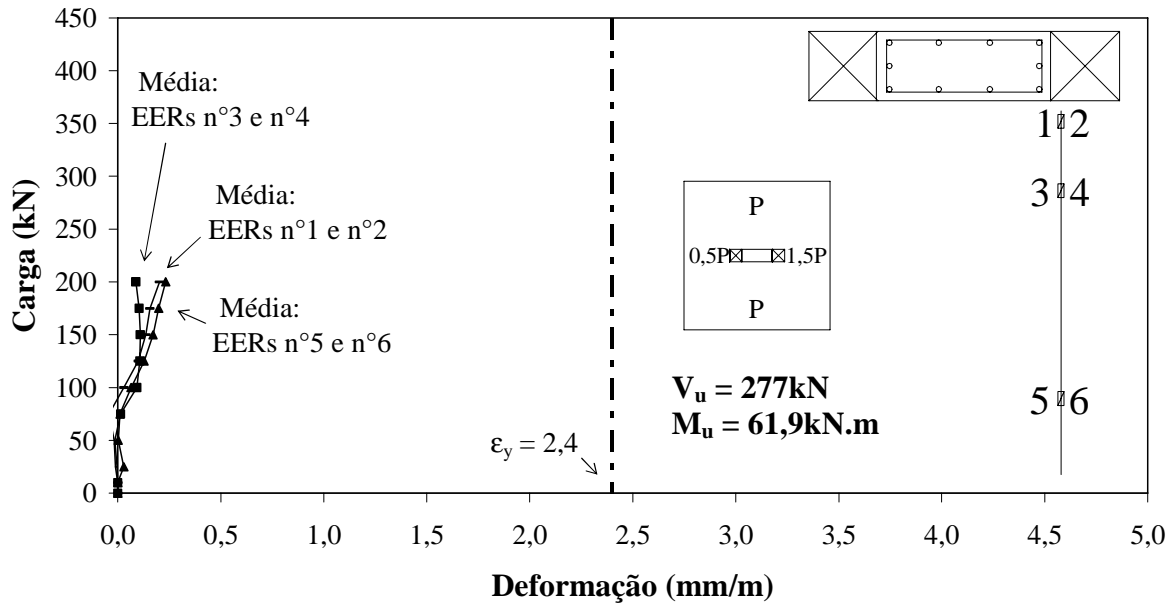


Figura 5.35 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L13, extensômetros 1 a 6

Nas lajes L8 a L13, as barras instrumentadas não apresentaram deformações significantes, indicando que as barras cortadas por furos podem não exercer função de combate à flexão e ao cisalhamento.

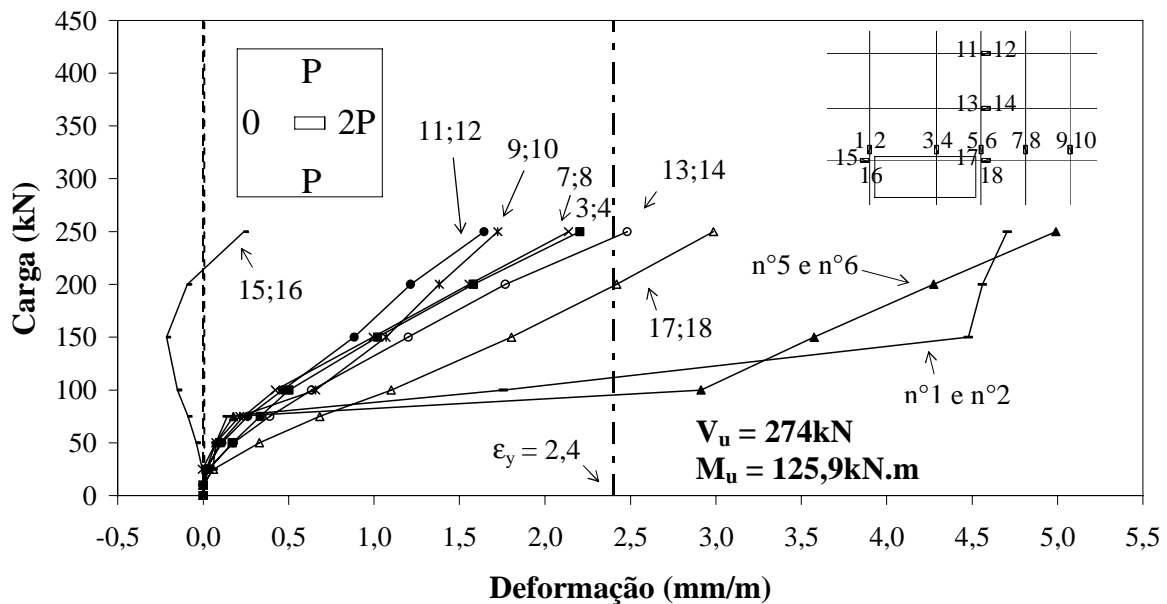


Figura 5.36 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L14, extensômetros 1 a 18

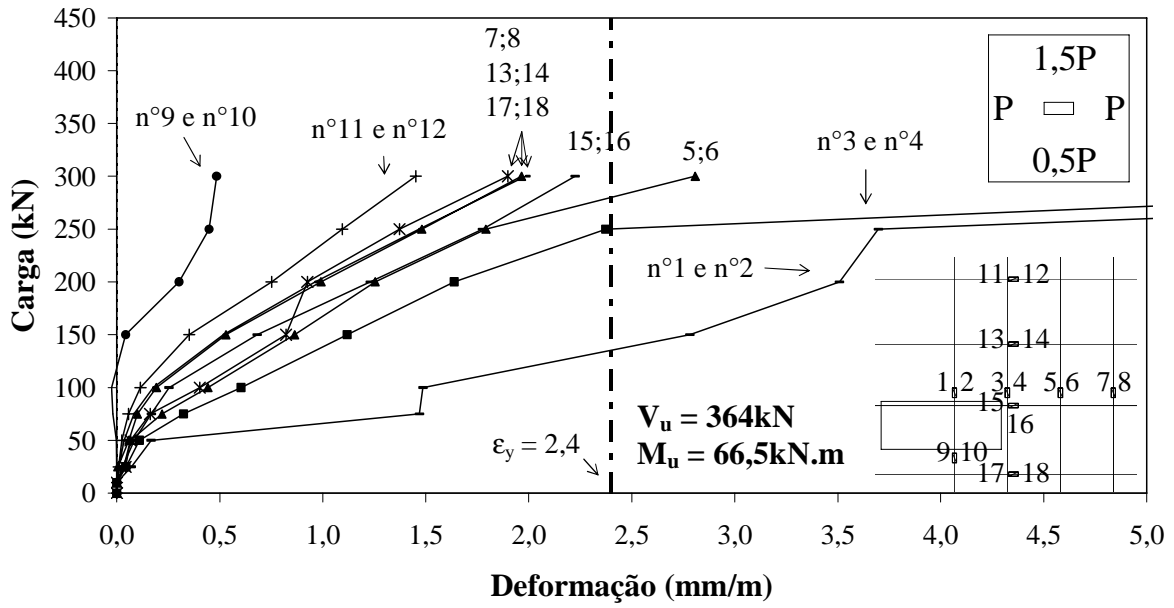


Figura 5.37 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L15, extensômetros 1 ao 18

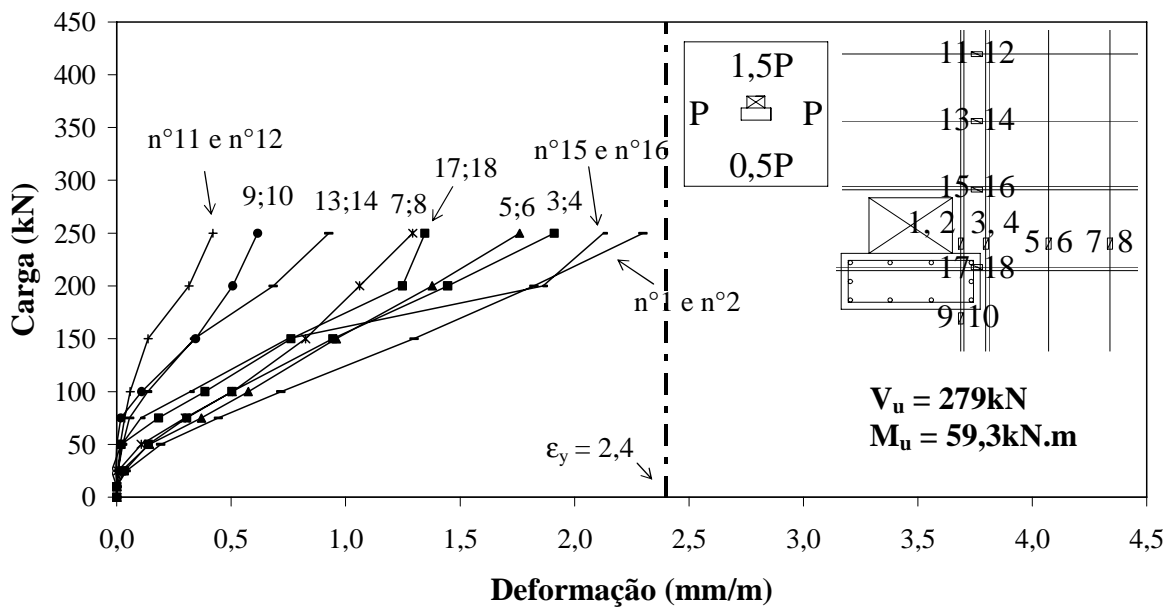


Figura 5.38 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L17, extensômetros 1 ao 18

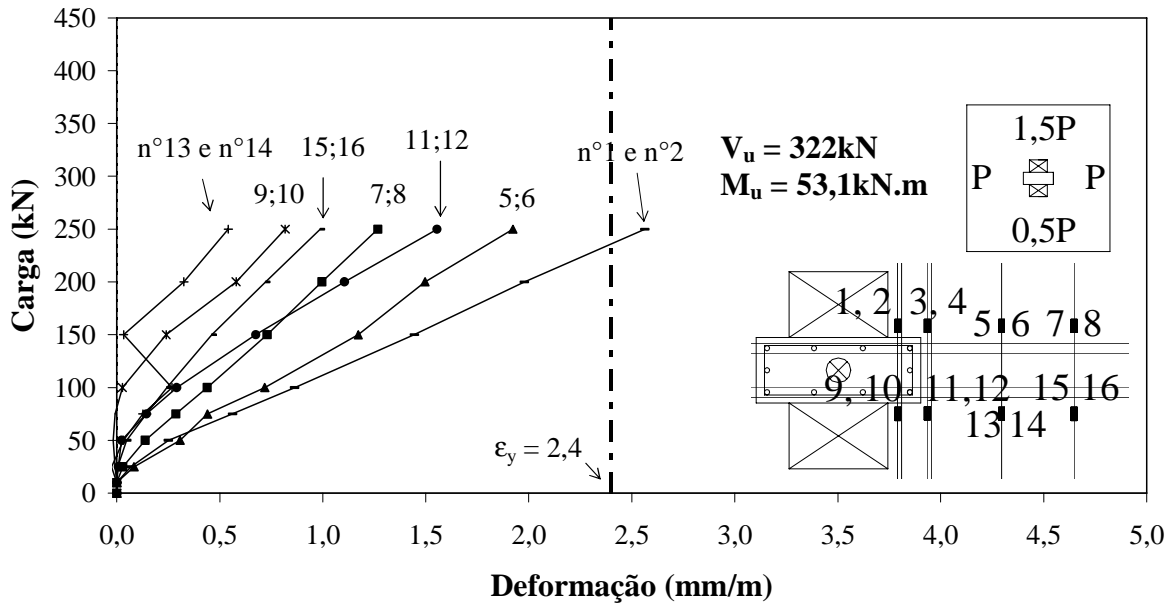


Figura 5.39 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L18, extensômetros 1 ao 16

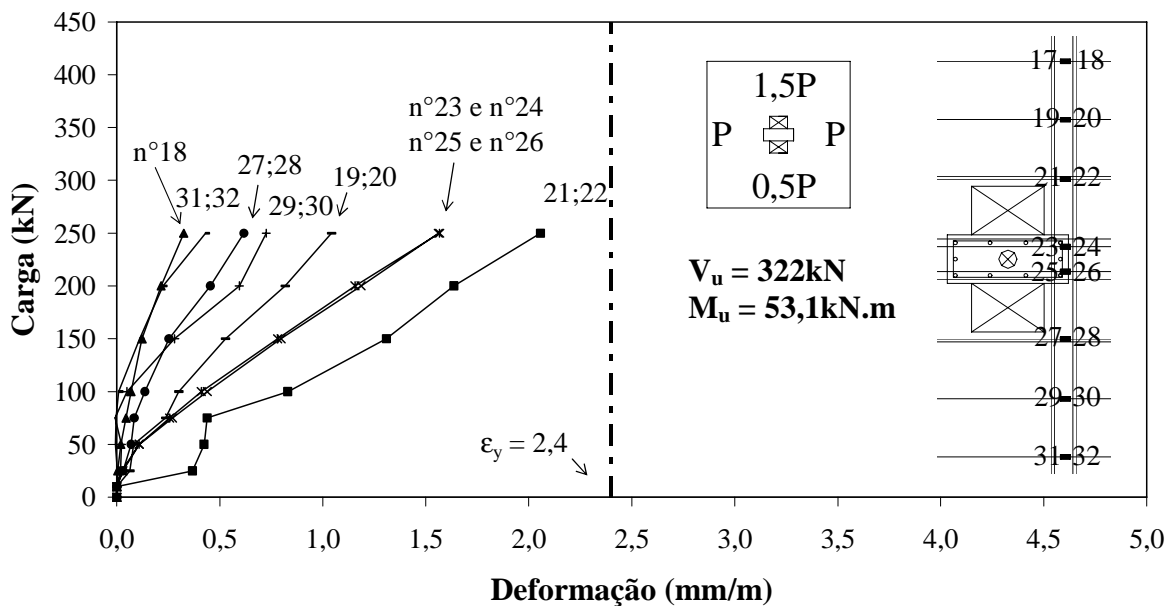


Figura 5.40 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L18, extensômetros 17 ao 32

Nas lajes L14 a L18, de uma maneira geral, os extensômetros situados próximos ao pilar e do lado mais carregado da laje apresentaram valores de deformação maiores que os demais para um mesmo carregamento.

5.6 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DO CONCRETO

Nas Figuras 5.41 a 5.49 são mostrados os gráficos *Carga x Deformação* dos diversos pontos instrumentados no bordo inferior das lajes da Série 2.

Os gráficos indicam que os extensômetros, situados no lado mais carregado e com direção paralela a direção do momento aplicado, tiveram deformações maiores que os demais para um mesmo carregamento.

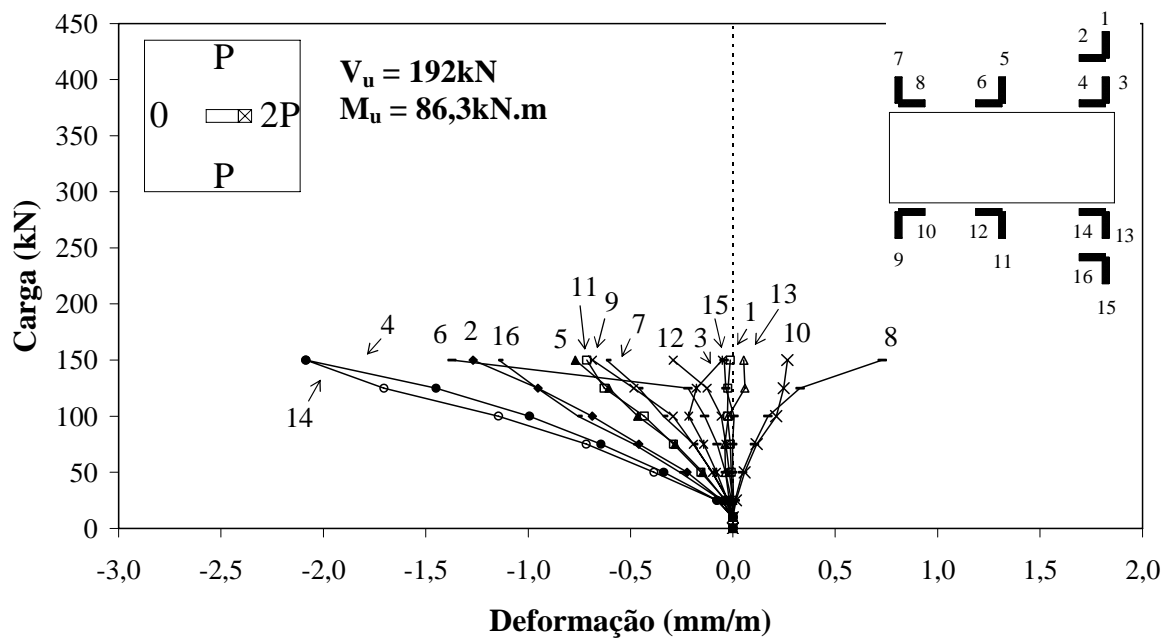


Figura 5.41 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L8, extensômetros 1 ao 16

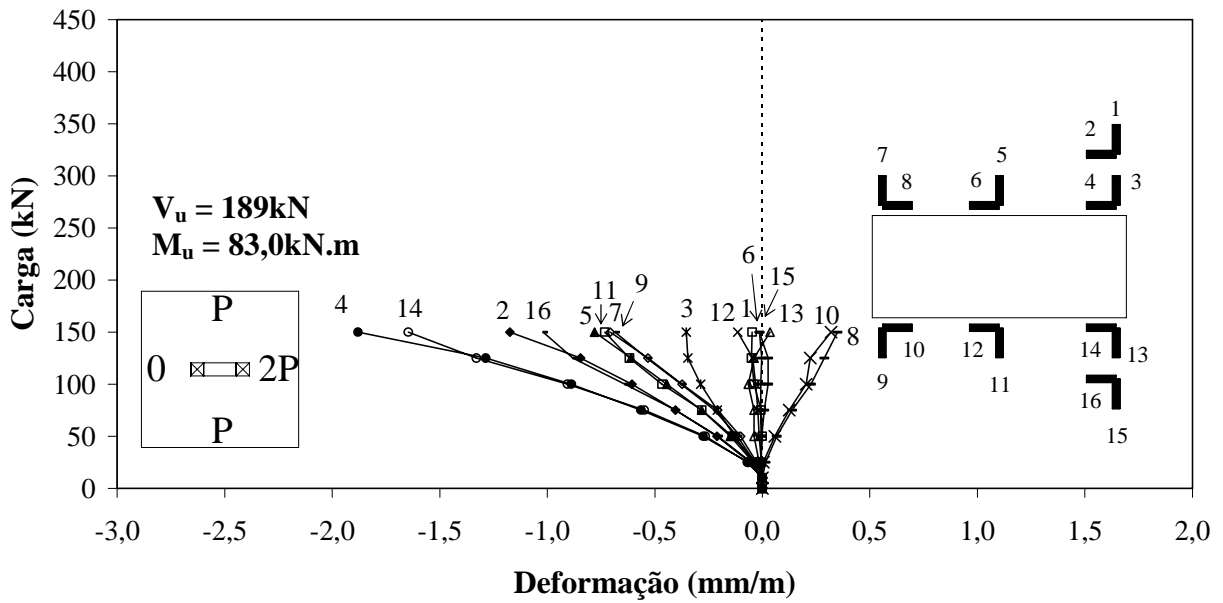


Figura 5.42 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L10, extensômetros 1 ao 16

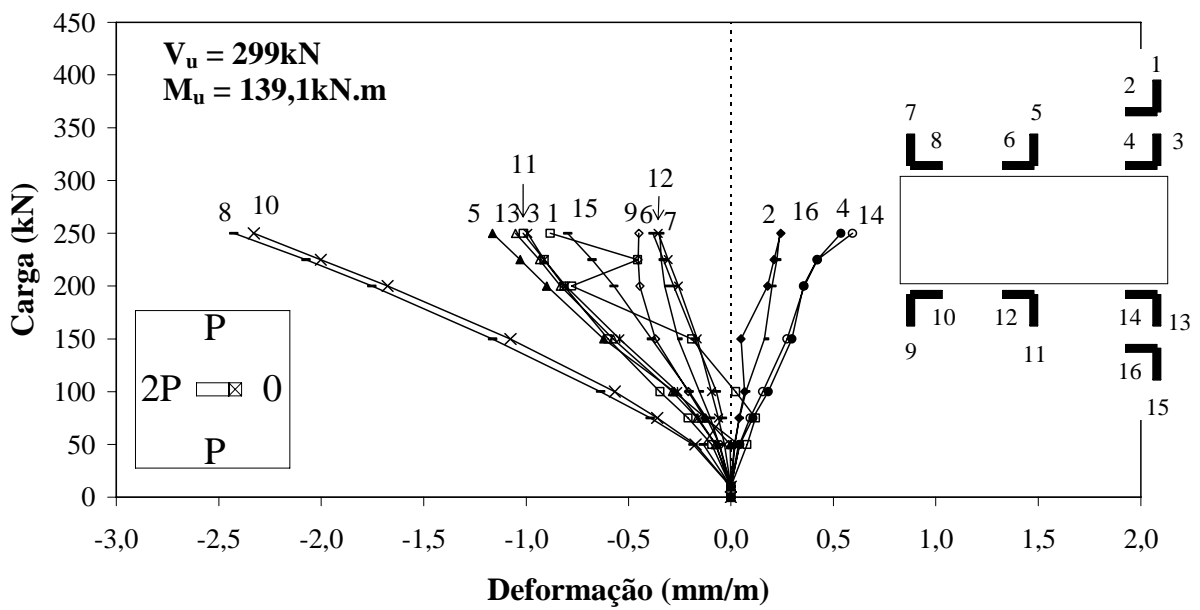


Figura 5.43 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L11, extensômetros 1 ao 16

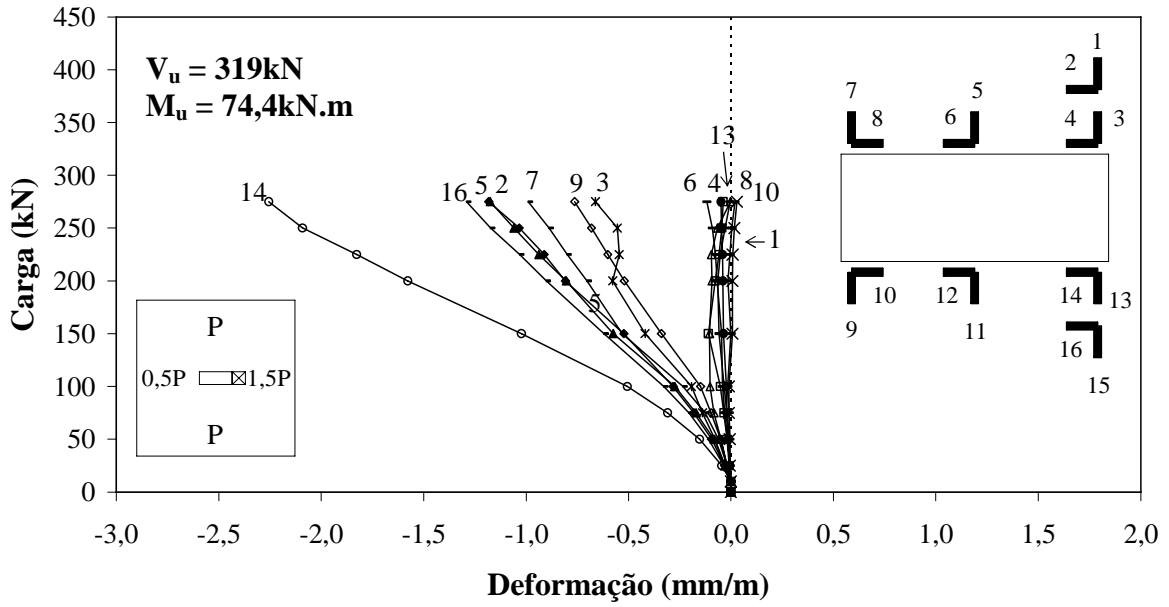


Figura 5.44 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L12, extensômetros 1 ao 16

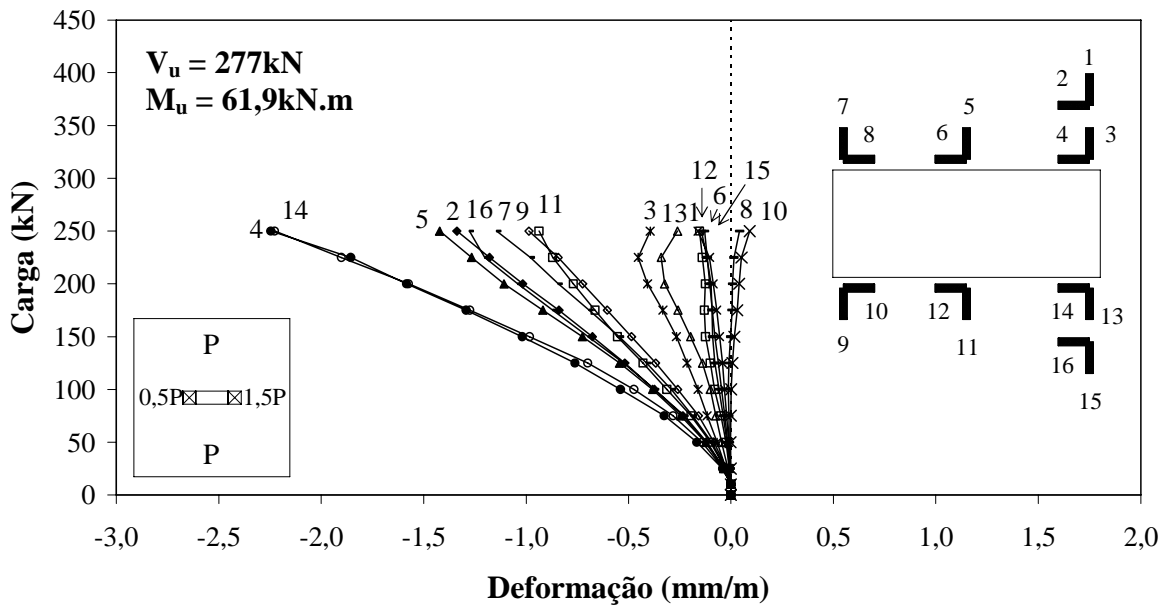


Figura 5.45 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L13, extensômetros 1 ao 16

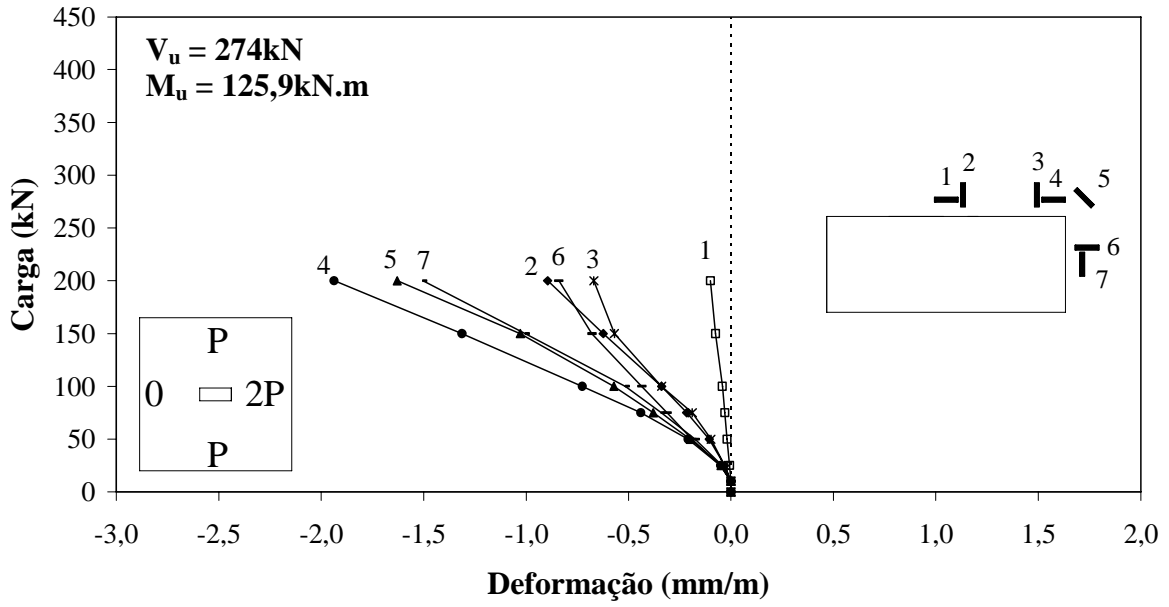


Figura 5.46 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L14, extensômetros 1 a 7

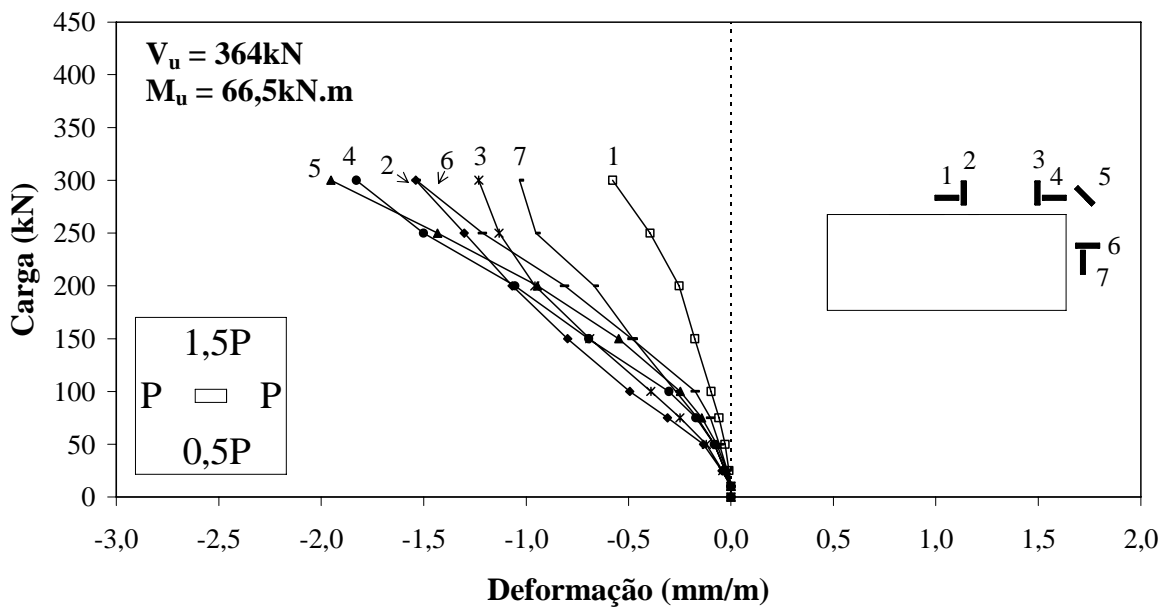


Figura 5.47 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L15, extensômetros 1 a 7

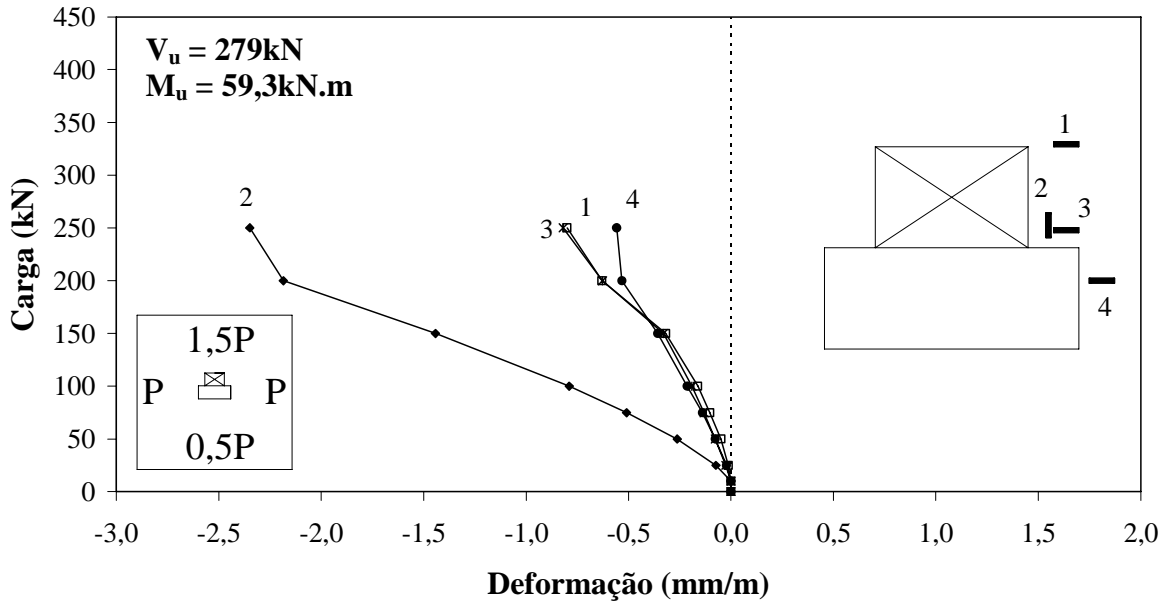


Figura 5.48 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L17, extensômetros 1 ao 4

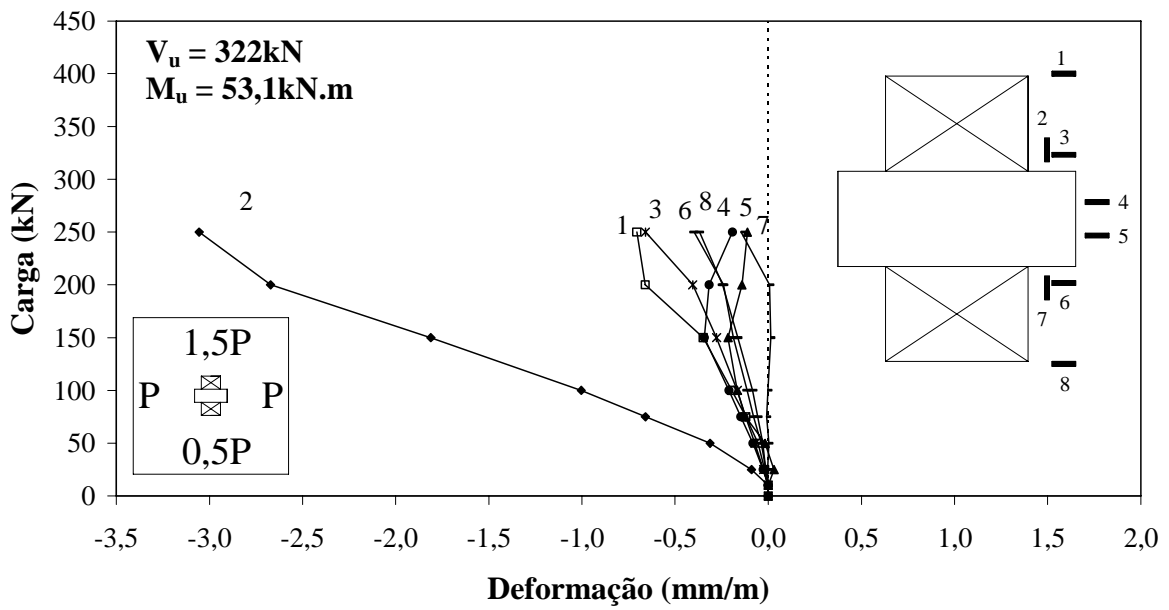


Figura 5.49 – Gráfico Carga x Deformação – Laje L18, extensômetros 1 ao 8

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios referentes a carga e modo de ruptura, fissuração e superfície de ruptura, deslocamento vertical, deformação das armaduras de flexão, de cisalhamento e do concreto, apresentados nos Capítulos 4 e 5, estão analisados neste capítulo.

6.1 LAJES DA SÉRIE 1

6.1.1 Carga de ruptura

A Tabela 6.1 contém a carga de ruptura das lajes da Série 1 e sua comparação com a carga de ruptura da laje de referência L1 – sem furo e sem momento aplicado – $V_u = 475\text{kN}$.

As lajes L2 ($V_u = 240\text{kN}$), L3 ($V_u = 250\text{kN}$) e L4 ($V_u = 237\text{kN}$), com um furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar e com carregamento simétrico, apresentaram cargas de ruptura 49%, 47% e 50% inferiores, respectivamente, a da laje L1.

As lajes L5 ($V_u = 416\text{kN}$) e L6 ($V_u = 425\text{kN}$), com um furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar e carregamento simétrico e armadura de cisalhamento, tiveram cargas inferiores a da laje L1 em 12% e 11%, nessa ordem.

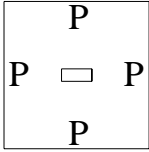
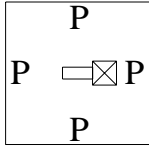
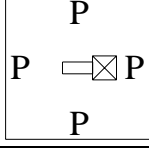
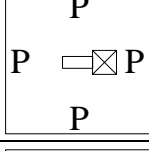
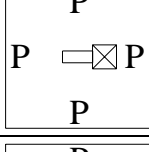
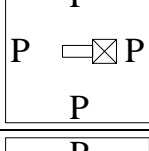
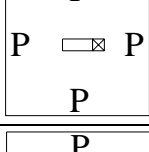
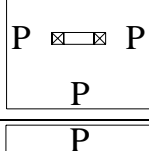
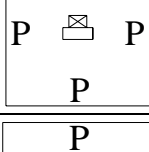
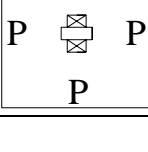
Com um furo adjacente ao menor lado do pilar, porém menor, 200x200mm, a laje L7 ($V_u = 455\text{kN}$) teve carga de ruptura semelhante a da laje L1, com variação para menos de 4%. A taxa de armadura da laje L7 foi 59% superior a da laje L1.

Com dois furos adjacentes aos menores lados pilar, de 200x200mm, e com carregamento simétrico, a laje L9 ($V_u = 375\text{kN}$) teve carga inferior a da laje L1 em 21%. A taxa de armadura da laje L9 foi 59% superior a da laje L1.

A laje L16 ($V_u = 474\text{kN}$), com um furo de 200x300mm adjacente ao maior lado do pilar, teve carga de ruptura próxima a da laje L1, menor em menos de 1%.

A laje L19 ($V_u = 411\text{kN}$), com dois furos de 200x300mm adjacentes ao maior lado do pilar, teve carga de ruptura inferior em 13% relacionada à de L1.

Tabela 6.1 – Lajes da Série 1 – comparação entre as cargas de ruptura

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	Arm. de cisalh.	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	V_u/V_{uL1}
L1	37,8	-	-	121	0,93		475	1,00
L2	32,3	1 400x400	-	123	0,87		240	0,51
L3	39,5	1 400x400	-	125	1,17		250	0,53
L4	39,1	1 400x400	-	124	0,52		237	0,50
L5	36,7	1 400x400	Duas barras dobradas	122	1,22		416	0,88
L6	36,7	1 400x400	Duas barras dobradas	121	1,14		425	0,89
L7	37,2	1 200x200	-	123	1,48		455	0,96
L9	34,2	2 200x200	-	123	1,48		375	0,79
L16	44,0	1 300x200	-	125	1,01		474	1,00
L19	39,0	2 300x200	-	126	1,05		411	0,87

As lajes L2 ($V_u = 240\text{kN}$), L3 ($V_u = 250\text{kN}$) e L4 ($V_u = 237\text{kN}$), com um furo de $400 \times 400\text{mm}$ adjacente ao menor lado do pilar, tiveram cargas semelhantes. A laje L3 apresentou carga levemente superior, mas teve uma maior altura efetiva (d) e maior taxa de armadura (ρ) que as demais. Comparando com a laje L7 ($V_u = 455\text{kN}$), com um furo de $200 \times 200\text{mm}$ adjacente ao menor lado do pilar, as cargas destas lajes foram inferiores em 47%, 45% e 48%, respectivamente. Esse fato mostra que um furo, adjacente ao menor lado de um pilar retangular e que ultrapassa o perímetro desse lado, é mais prejudicial para a carga de ruptura que um furo que tenha o mesmo perímetro do lado adjacente, para as variáveis utilizadas nesta pesquisa.

O acréscimo da armadura de cisalhamento nas lajes L5 ($V_u = 416\text{kN}$) e L6 ($V_u = 425\text{kN}$) fizeram com que suas cargas de ruptura fossem superiores à da laje L3 ($V_u = 250\text{kN}$), com taxa de armadura de flexão semelhante, em 66% e 70%, respectivamente. Esse acréscimo de carga, associado à baixa área de armadura transversal utilizada (347mm^2), indica que a escolha do tipo de armadura de cisalhamento foi satisfatória para a restauração da carga de ruptura, conclusão também encontrada por REGAN (1999). A laje L6 teve carga ligeiramente superior à de L5, mas o fato de não haver deslocamento da camada de cobertura de concreto, como mostrado na Figura 4.13, demonstra que o posicionamento da armadura de L6 teve melhor eficiência.

Com dois furos de $200 \times 200\text{mm}$ adjacentes aos menores lados do pilar, a carga de ruptura de L9 ($V_u = 375\text{kN}$) foi inferior à de L7 ($V_u = 455\text{kN}$), com apenas um furo de $200 \times 200\text{mm}$ adjacente ao menor lado do pilar, em 18%.

E, também, com dois furos de $300 \times 200\text{mm}$, sendo estes adjacentes aos maiores lados do pilar, L19 ($V_u = 411\text{kN}$) apresentou carga de ruptura inferior em 13% à da laje L16 ($V_u = 474\text{kN}$), com um furo de $300 \times 200\text{mm}$ adjacente ao maior lado do pilar.

6.1.2 Fissuração

As fissuras radiais foram as primeiras a surgir, podendo ter iniciado a partir do pilar ou a partir do furo em algumas lajes. As fissuras circunferenciais apareceram depois. A Tabela 6.2 mostra o carregamento correspondente ao aparecimento das primeiras fissuras visíveis e a relação com a carga de ruptura de cada laje. Para fazer a relação, foi adicionado às cargas de fissuração, o peso próprio da laje e dos equipamentos. Nas lajes L1 a L4, não houve observação visual (motivos explanados no capítulo 3).

Tabela 6.2 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 1 – relações com as cargas de ruptura

Laje	Furo (mm)	Arm. de cis.	Geometria e carregamento	V _u (kN)	V _{rad} (kN)	V _{circ} (kN)	V _{rad} /V _u	V _{circ} /V _u
L1	-	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P □ P P </div>	475	-	-	-	-
L2	1 400x400	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P □ ⊗ P P </div>	240	-	-	-	-
L3	1 400x400	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P □ ⊗ P P </div>	250	-	-	-	-
L4	1 400x400	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P □ ⊗ P P </div>	237	-	-	-	-
L5	1 400x400	Duas barras dobradas	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P □ ⊗ P P </div>	416	50	150	0,18	0,42
L6	1 400x400	Duas barras dobradas	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P □ ⊗ P P </div>	425	75	150	0,24	0,41
L7	1 200x200	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P □ ⊗ P P </div>	455	100	100	0,28	0,28
L9	2 200x200	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P ⊗ ⊗ P P </div>	375	100	150	0,33	0,47
L16	1 300x200	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P ⊗ P P </div>	474	125	125	0,32	0,32
L19	2 300x200	-	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> P P ⊗ ⊗ P P </div>	411	75	100	0,24	0,30

Nas lajes L5 ($V_u = 416\text{kN}$) e L16 ($V_u = 474\text{kN}$), as fissuras radiais iniciaram no pilar sob carga equivalente a 18% e 32%, respectivamente, da carga de ruptura e, com o aumento do carregamento, se estenderam em direção às bordas da laje. As lajes L6 ($V_u = 425\text{kN}$) e L19 ($V_u = 411\text{kN}$) tiveram as fissuras radiais iniciando nos vértices dos furos e se desenvolveram em direção às bordas das lajes, com cargas equivalentes a 24% da carga de ruptura. As lajes L7 ($V_u = 455\text{kN}$) e L9 ($V_u = 375\text{kN}$) tiveram fissuras radiais surgindo no pilar e no vértice do furo, sob carga igual a 28% de suas respectivas cargas de ruptura.

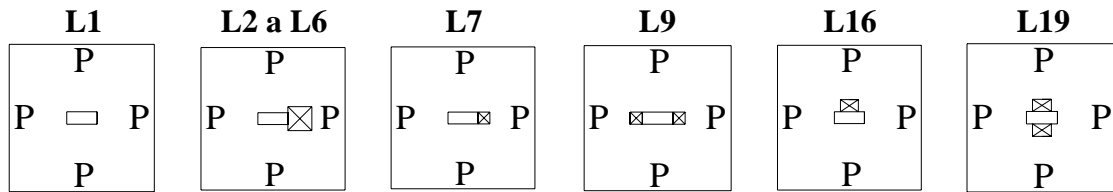
As fissuras circunferenciais surgiram posteriormente às fissuras radiais, em torno do pilar. Nas lajes L5 ($V_u = 416\text{kN}$), L6 ($V_u = 425\text{kN}$), L9 ($V_u = 375\text{kN}$) e L19 ($V_u = 411\text{kN}$), estas fissuras ocorreram com carga correspondente entre 30% a 47% da carga de ruptura. As lajes L7 ($V_u = 455\text{kN}$) e L16 ($V_u = 474\text{kN}$) tiveram as fissuras circunferenciais iniciando na mesma carga das fissuras radiais.

6.1.3 Deslocamento vertical

Nas Figuras 6.1 a 6.4 são apresentados gráficos das lajes da Série 1 com os deslocamentos verticais nos pontos mais distantes do centro do pilar (850mm), na direções *W* (registrados pelo defletômetro D1), *E* (D6), *N* (D7) e *S* (D12).

Podemos verificar que para um mesmo carregamento, temos distintos comportamentos de deslocamentos das lajes, chamando a atenção, nas lajes L2, L3, L5, L6 e L16, com apenas um furo, os maiores deslocamentos nas bordas da direção do furo, inclusive maiores que os observados em L1. No entanto, nas bordas opostas aos furos, os deslocamentos foram menores, em relação à L1.

A laje L4, também com um furo, teve comportamento diferente, apresentando em todas as bordas deslocamentos superiores aos de L1. Esse fato certamente ocorreu pela associação do furo de grande dimensão (400x400mm) adjacente ao menor lado do pilar com a baixa taxa de armadura de flexão utilizada nessa laje, 44% inferior à utilizada em L1.



Laje	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L9	L16	L19
V_u (kN)	475	240	250	237	416	425	455	375	474	411

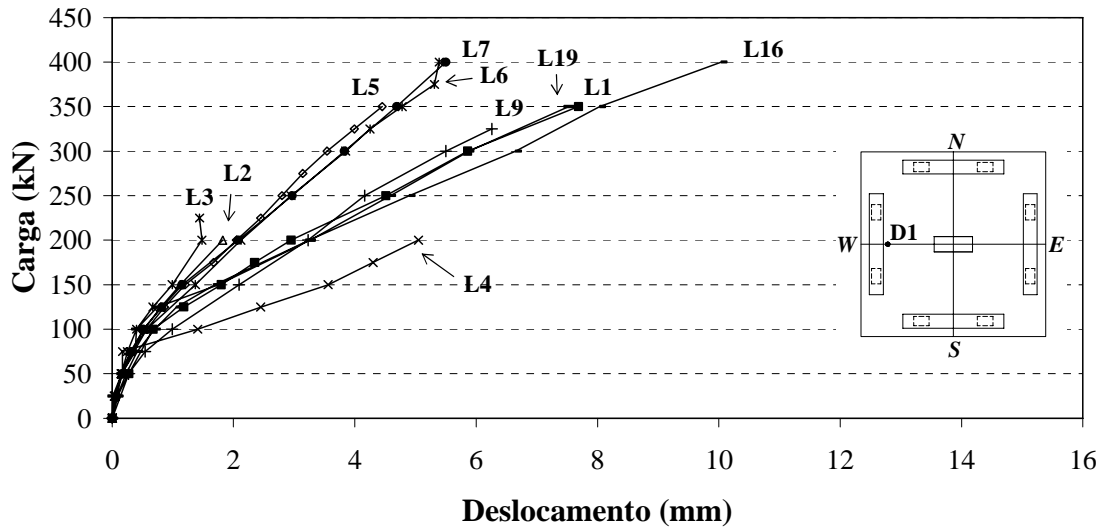


Figura 6.1 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1 – Direção W

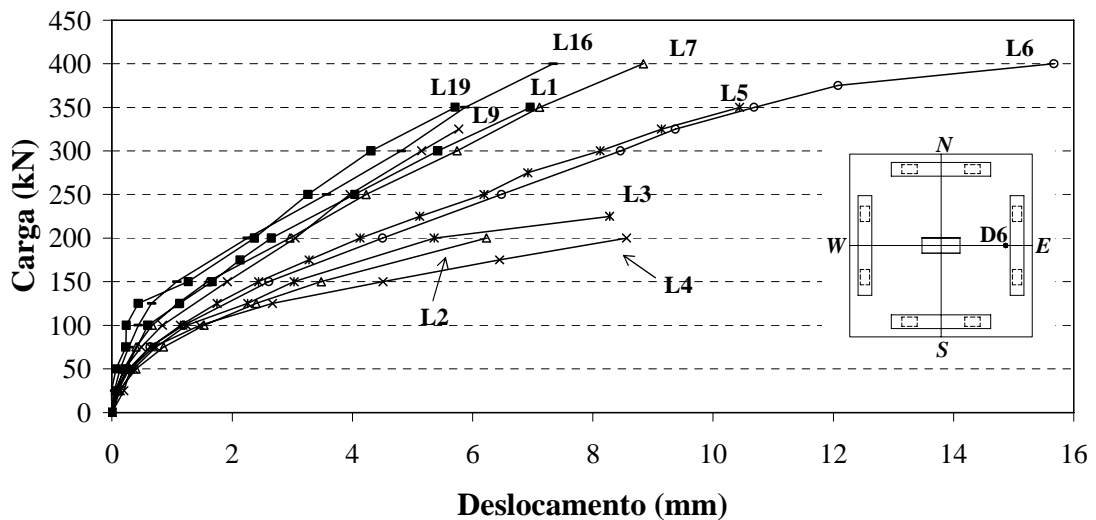
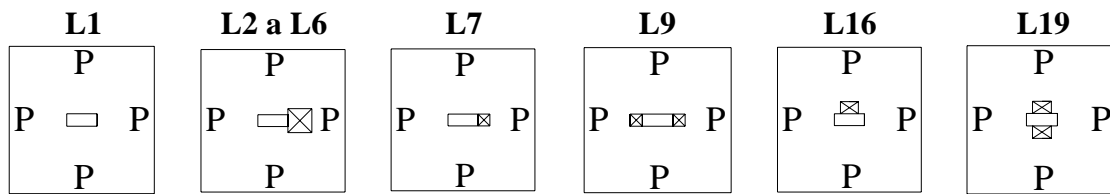


Figura 6.2 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1 – Direção E



Laje	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L9	L16	L19
V_u (kN)	475	240	250	237	416	425	455	375	474	411

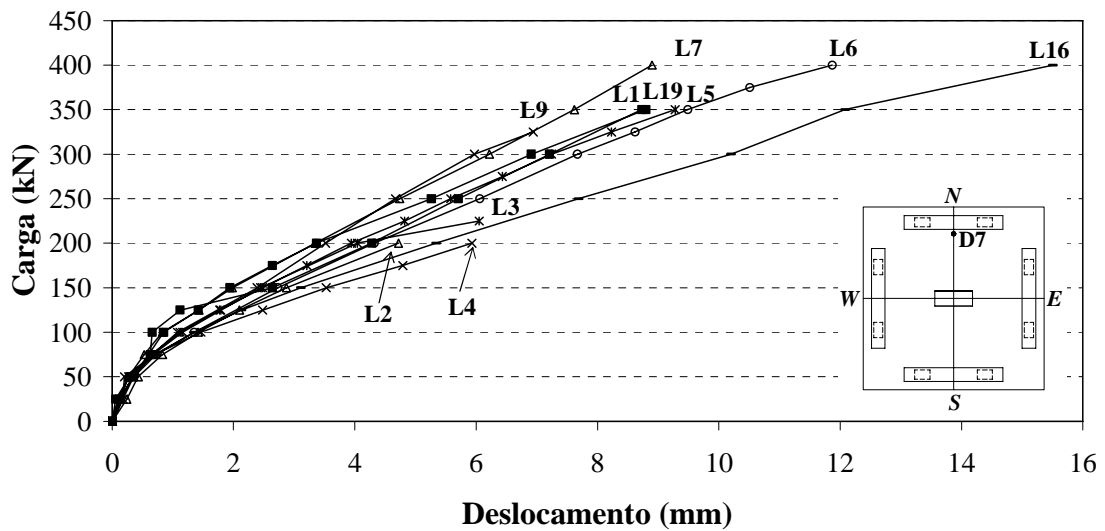


Figura 6.3 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1 – Direção N

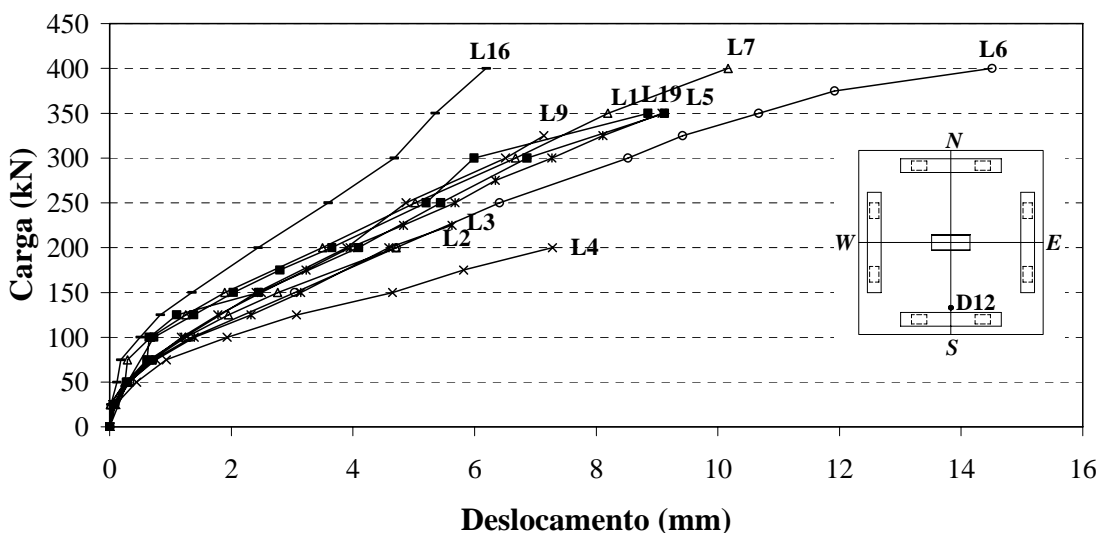


Figura 6.4 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 1 – Direção S

Nas lajes com um furo, o lado oposto ao furo apresentou deslocamentos inferiores aos que ocorreram em L1, exceto em L4; e, nos lados com o furo, os deslocamentos foram superiores aos de L1, exceto em L7. Nos outros lados, exceto L2, L3 e L4, os deslocamentos foram semelhantes ao apresentado por L1.

A laje L7, com um furo de 200x200mm, e as lajes com dois furos, L9 e L19 tiveram comportamento bem próximo do apresentado pela laje L1, em todas as bordas. Este fato pode ser explicado pelo acréscimo de armadura de flexão e pela menor dimensão dos furos nas lajes L7 e L9 e pela largura dos furos na laje L19 ser inferior à largura adjacente do pilar. As lajes L7 e L9 tiveram taxa de armadura 59% superior à da laje L1 e a L19 apresentou taxa superior à de L1 em 13%.

6.1.4 Deformação das armaduras

6.1.4.1 Armadura de flexão

Conforme mostrado nos gráficos das Figuras 4.34 a 4.43, nas lajes da Série 1, sem momento aplicado, nas barras contínuas (que atravessavam toda extensão da laje), existe uma tendência de crescimento das deformações semelhante para todas as lajes. Numa faixa inicial de carregamento, as deformações são menores e seguem uma determinada inclinação. Depois, essa curva modifica sua inclinação apresentando maiores deformações para os mesmos incrementos de carga. Essa mudança de inclinação da curva ocorre devido ao surgimento das primeiras fissuras do concreto, transferindo uma maior tensão para a armadura de flexão, que por sua vez, mais solicitada, eleva sua deformação para um mesmo acréscimo de carga que ocorria antes da fissuração do concreto.

Na laje L1, três pontos instrumentados próximos ao pilar indicaram deformações de escoamento. Desses três pontos, os dois que tiveram maiores deformações após o escoamento estavam situados próximos a um vértice do pilar.

Não foram observados escoamentos no aço utilizado nas lajes L2, L3 e L4. Alguns pontos instrumentados tinham tendência ao escoamento, principalmente os próximos ao pilar. Porém, com as baixas cargas de ruptura destas lajes, isso não ocorreu.

Nas lajes L5, L6, L7 e L9, as barras instrumentadas, que terminavam no furo, apresentaram deformações pequenas e sem tendência ao escoamento, as curvas não tiveram uma seqüência de deformações que indicava crescimento das deformações ao longo do

ensaio. Isso pode indicar que essas armaduras não foram efetivas quanto ao combate à flexão naquele local.

Nas lajes L16 e L19, o comportamento dos pontos instrumentados é similar ao da laje L1. Extensômetros situados próximos ao pilar mostraram maiores deformações, enquanto que, os mais distantes, menores. Na laje L16, três pontos indicaram deformação de escoamento, enquanto que em L19, apenas um. Os extensômetros colocados próximos dos furos indicaram deformações menores, semelhantes aos dos extensômetros mais distantes do pilar em regiões sem o furo.

6.1.4.2 Armadura de cisalhamento

Nos gráficos das Figuras 4.44 a 4.47 são mostrados, para os estágios de carregamento, as deformações das armaduras de cisalhamento utilizadas nas lajes L5 e L6.

As barras dobradas utilizadas apresentaram um comportamento de “flexão localizada” enquanto foram carregadas. As fibras superiores da parte inclinada da barras apresentaram altos alongamentos, com escoamento ou deformações próximas do escoamento, enquanto que as fibras inferiores tiveram pouco alongamento e, em alguns estágios de carregamento, foram observados encurtamentos.

Este comportamento certamente ocorreu devido às barras dobradas estarem situadas em região de grande momento fletor e, assim, a compressão da face inferior da laje comprimiu a barra e provocou flexão na região instrumentada para o cisalhamento.

6.1.5 Deformação do concreto

Os gráficos das Figuras 4.48 a 4.59 mostram as deformações do concreto no pilar das lajes L1 a L4, onde acontecia a reação ao carregamento da laje.

As deformações observadas, de uma maneira geral, mostraram uma maior intensidade nos pontos próximos aos vértices do pilar. Devido ao pequeno carregamento de compressão para as dimensões do pilar, todas as deformações se mostraram baixas em relação às obtidas instrumentando as lajes nos outros ensaios.

As Figuras 4.60 a 4.63 mostram as deformações do concreto em posições próximas ao pilar e aos furos das lajes L5, L6, L7 e L9. Os extensômetros de números 5 e 11,

posicionados próximos ao centro do maior lado do pilar, com direção perpendicular ao maior lado, apresentaram maiores deformações. E, nessas lajes, devido ao comportamento observado nos outros extensômetros, foi notado que as deformações tiveram um comportamento de circular o furo em direção ao centro do pilar.

Nos gráficos das Figuras 4.64 e 4.65 são mostradas as deformações em alguns pontos das lajes L16 e L19. O ponto de maior deformação dentre os instrumentados, nas duas lajes, foi o situado próximo ao vértice formado pelo furo e o pilar, medido pelo extensômetro 2, indicando uma concentração de compressão nessa região, para lajes com furo de mesmo posicionamento que os utilizados em L16 e L19. O extensômetro 4 nessas duas lajes, situado próximo à extremidade do pilar mas na outra direção, apresentou pequeno encurtamento, a causa provável foi a grande compressão na outra direção, resultando um efeito Poisson de alongamento na direção do extensômetro.

6.2 LAJES DA SÉRIE 2

6.2.1 Carga de ruptura

A Tabela 6.3 contém a carga de ruptura das lajes da Série 2 e sua comparação com a carga de ruptura da laje de referência L1.

A laje L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$), com um furo de 200x200mm adjacente ao menor lado e com momento de ruptura aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar, no sentido do furo, teve carga de ruptura 60% inferior à da laje de referência L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

A laje L11 ($V_u = 299\text{kN}$, $M_u = 139,1\text{kN.m}$), com a mesma geometria da laje L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$) e com momento de ruptura aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar, porém no sentido contrário ao furo, teve carga de ruptura reduzida em 37% relativa à L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

A laje L12 ($V_u = 319\text{kN}$, $M_u = 74,4\text{kN.m}$), que também teve a mesma geometria da laje L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$), momento de ruptura aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar, no sentido do furo, teve carga de ruptura 33% menor que a da laje L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

A laje L10 ($V_u = 189\text{kN}$, $M_u = 83,0\text{kN.m}$), com dois furos de 200x200mm adjacentes aos menores lados do pilar e com momento de ruptura aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar, teve carga de ruptura 60% inferior à da L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

A laje L13 ($V_u = 277\text{kN}$, $M_u = 61,9\text{kN.m}$), com mesma geometria da laje L10 ($V_u = 189\text{kN}$, $M_u = 83,0\text{kN.m}$) e com momento de ruptura aplicado na mesma direção, apresentou carga de ruptura inferior à laje L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$) em 42%.

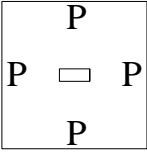
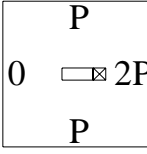
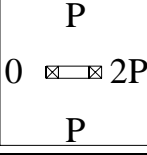
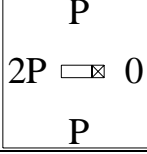
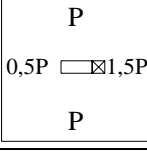
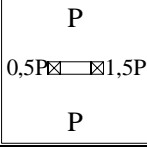
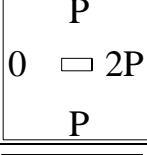
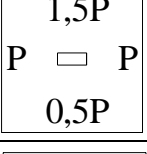
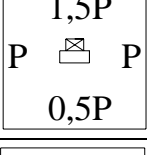
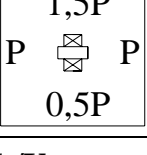
Foi observada, na laje L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$), carga de ruptura inferior em 42% em relação à L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$), que ocorreu devido ao momento de ruptura aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar.

A laje L15 ($V_u = 364\text{kN}$, $M_u = 66,5\text{kN.m}$), sem furo e com momento de ruptura aplicado na direção paralela ao menor lado do pilar, apresentou carga de ruptura 23% inferior à da laje L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

A laje L17 ($V_u = 279\text{kN}$, $M_u = 59,3\text{kN.m}$), com um furo de 300x200mm adjacente ao maior lado do pilar, com momento de ruptura aplicado na direção paralela ao menor lado do pilar, no sentido do furo, teve carga de ruptura 41% inferior à da laje L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

E, a laje L18 ($V_u = 322\text{kN}$, $M_u = 53,1\text{kN.m}$), com dois furos de 300x200mm adjacentes aos maiores lados do pilar, momento de ruptura aplicado na direção paralela ao menor lado do pilar, teve carga de ruptura 32% inferior à da L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

Tabela 6.3 – Lajes da Série 2 – comparação entre as cargas de ruptura

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carreg.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	$e_u^{(1)}$ (m)	V_u/V_{uL1}
L1	37,8	-	121	0,93		475	-	-	1,00
L8	34,2	1 200x200	123	1,48		192	86,3	0,449	0,40
L10	34,2	2 200x200	123	1,48		189	83,0	0,439	0,40
L11	36,7	1 200x200	125	1,44		299	139,1	0,465	0,63
L12	37,8	1 200x200	123	1,48		319	74,4	0,233	0,67
L13	36,4	2 200x200	124	1,46		277	61,9	0,224	0,58
L14	42,4	-	121	0,93		274	125,9	0,459	0,58
L15	43,2	-	123	0,91		364	66,5	0,183	0,77
L17	35,8	1 300x200	125	1,01		279	59,3	0,213	0,59
L18	37,3	2 300x200	126	1,05		322	53,1	0,165	0,68

⁽¹⁾ excentricidade de carga última: $e_u = M_u/V_u$

A laje L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$ no sentido do furo, $e_u = 0,449\text{m}$), com um furo de $200 \times 200\text{mm}$, em relação à laje sem furo L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$, $e_u = 0,459\text{m}$), com excentricidade de carga última (e_u) semelhante, teve carga de ruptura e momento de ruptura 30% e 31% inferiores, respectivamente.

Comparando a laje L8 com a laje L10 ($V_u = 189\text{kN}$, $M_u = 83,0\text{kN.m}$ na direção paralela ao maior lado do pilar, $e_u = 0,430\text{m}$), com dois furos de $200 \times 200\text{mm}$ adjacentes aos maiores lados do pilar, com excentricidade de carga semelhante, percebe-se que a carga de ruptura e o momento de ruptura foram muito próximos: os de L8 foram 2% e 4% superiores, respectivamente. Estes resultados demonstram que, para este caso, o perímetro total da ligação laje-pilar não foi determinante para o resultado da resistência à punção das lajes. O que determinou com que a laje rompesse foi a fragilidade da ligação, com a existência de furo na região mais carregada, com o momento no sentido do furo.

Se compararmos L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$ no sentido do furo, $e_u = 0,449\text{m}$) com a laje L13 ($V_u = 277\text{kN}$, $M_u = 61,9\text{kN.m}$ na direção paralela ao maior lado do pilar, $e_u = 0,244\text{m}$), com dois furos de $200 \times 200\text{mm}$ adjacentes aos menores lados do pilar, podemos reparar que o maior perímetro de L8 também não resultou em uma maior carga de ruptura, pelo contrário, foi 31% inferior. Tal redução deve-se ao momento de ruptura em L8 que, devido à maior excentricidade de carga, foi 39% superior ao de L13. Com um momento superior e, portanto, com maior carga na região da ligação laje-pilar-furo, e com momento no sentido do furo, a ruptura se deu mais rapidamente, sob carga inferior.

A perda de carga de 32% observada em L10 ($V_u = 189\text{kN}$, $M_u = 83,0\text{kN.m}$ na direção paralela ao maior lado do pilar, $e_u = 0,430\text{m}$) em relação à L13 ($V_u = 277\text{kN}$, $M_u = 61,9\text{kN.m}$ na direção paralela ao maior lado do pilar, $e_u = 0,244\text{m}$), com os mesmos furos, se deu devido a maior excentricidade de carga, 76% superior.

Em relação à L11 ($V_u = 299\text{kN}$, $M_u = 139,1\text{kN.m}$ na direção contrária ao furo, $e_u = 0,465\text{m}$), com mesmo furo, L8 teve carga de ruptura e momento de ruptura 36% e 38% inferiores, respectivamente. Indicando, para esses carregamentos que, com uma excentricidade de carga semelhante, o momento aplicado no sentido da região com o furo é mais prejudicial para a carga de ruptura que aquele no sentido contrário à região com o furo.

Apesar da laje L11 ($V_u = 299\text{kN}$; $M_u = 139,1\text{kN.m}$, $e_u = 0,465\text{m}$) ter o momento de ruptura aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar, assim como a laje L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$, $e_u = 0,459\text{m}$) e excentricidade de carga semelhante à de L14, e ter

um furo de 200x200mm, com momento no sentido contrário ao furo, sua carga e momento de ruptura foram 9% e 10% superiores aos de L14, respectivamente. A laje L11 teve altura efetiva e taxa de armadura de 125mm e 1,44%, enquanto que em L14 foram de 120mm e 0,93%. Estes resultados indicam, para as variáveis envolvidas, que a redução do perímetro da ligação laje-pilar não resulta em perda de carga quando o momento de ruptura não estiver no sentido da região com furo.

A laje L12 ($V_u = 319\text{kN}$, $M_u = 74,4\text{kN.m}$ no sentido do furo de 200x200mm, $e_u = 0,233\text{m}$), em relação à laje sem furo L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$, $e_u = 0,459\text{m}$), teve carga de ruptura 16% superior e momento de ruptura 41% inferior.

Em relação à L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$ no sentido do furo, $e_u = 0,499\text{m}$), a laje L12 teve carga de ruptura 66% superior e momento de ruptura 14% inferior, devido à menor excentricidade de carga. Em relação à L11 ($V_u = 299\text{kN}$, $M_u = 139,1\text{kN.m}$ no sentido contrário ao furo), a carga de ruptura de L12 foi 7% superior e o momento de ruptura 47% inferior.

Comparando L12 com a laje L10 ($V_u = 189\text{kN}$, $M_u = 83,0\text{kN.m}$ na direção paralela ao maior lado do pilar, $e_u = 0,439\text{m}$), com dois furos de 200x200mm adjacentes aos menores lados do pilar, e e_u aproximadamente o dobro, temos que a carga de ruptura de L12 foi 69% superior e que o momento de ruptura foi 10% inferior.

As lajes L12 ($V_u = 319\text{kN}$, $M_u = 74,4\text{kN.m}$ no sentido do furo, $e_u = 0,233\text{m}$) e L13 ($V_u = 277\text{kN}$, $M_u = 61,9\text{kN.m}$ na direção paralela ao maior lado do pilar, $e_u = 0,244\text{m}$), com dois furos de 200x200mm adjacentes aos menores lados do pilar, tiveram carregamentos com excentricidade de carga semelhantes. A carga de ruptura e o momento de ruptura de L12 foram 15% e 20% superiores aos apresentados por L13. Para este carregamento o perímetro da ligação laje-pilar teve maior influência, embora deixando uma suspeita de que a fragilidade da região mais carregada com furo, com momento no sentido do furo, também seja determinante, pois as cargas e momentos de ruptura não tiveram grandes diferenças. Além disso, na laje L13, foi suprimido o perímetro dos menores lados do pilar onde, segundo TENG, KUANG, & CHEONG (1999), se concentra mais tensão. Ou seja, com perímetro reduzido nas partes mais críticas, L13 teve carga de ruptura próxima à de L12, que teve uma maior concentração de carga na região da laje com furo e momento no sentido do furo.

A laje sem furo L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$, $e_u = 0,459\text{m}$), em relação a laje também sem furo L15 ($V_u = 364\text{kN}$, $M_u = 66,5\text{kN.m}$, $e_u = 0,183\text{m}$), teve carga de ruptura

25% inferior e momento de ruptura 89% superior. Este fato ocorreu devido à excentricidade de carga de L14 ter sido maior que a de L15, levando a uma transferência de momento maior, porém, um carregamento vertical menor. Tal excentricidade foi mais determinante para a carga de ruptura que a maior inércia da ligação em relação ao esforço, visto que na laje L14 o momento foi aplicado na direção da maior inércia da ligação, enquanto que na laje L15 foi aplicado na direção de menor inércia.

Com um furo de 300x200mm adjacente ao maior lado do pilar, a laje L17 ($V_u = 279\text{kN}$, $M_u = 59,3\text{kN.m}$ no sentido da região com furo, $e_u = 0,213\text{m}$), em relação à laje sem furo L15 ($V_u = 364\text{kN}$, $M_u = 66,5\text{kN.m}$, $e_u = 0,183\text{m}$), teve carga 23% inferior.

Apesar de ter apenas um furo de 300x200mm, L17 teve carga de ruptura 13% inferior à da laje L18 ($V_u = 322\text{kN}$, $M_u = 53,1\text{kN.m}$ na direção paralela ao menor lado do pilar, $e_u = 0,165\text{m}$), com dois furos de 300x200mm adjacentes aos menores lados do pilar. O momento e a excentricidade de carga da laje L17 foram superiores, 12% e 29% respectivamente, em relação à L18. Este fato indica como pode ser prejudicial para a carga de ruptura o momento no sentido do furo, em lajes com apenas um furo.

6.2.2 Fissuração

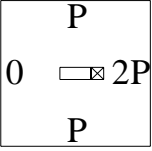
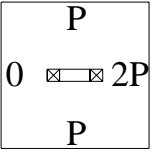
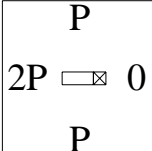
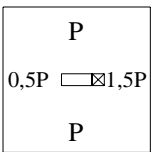
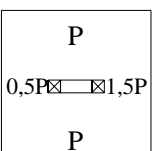
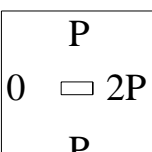
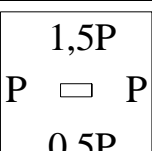
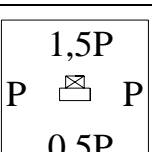
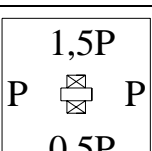
Na Tabela 6.4 são mostrados os carregamentos correspondentes ao aparecimento das primeiras fissuras visíveis e a relação com a carga de ruptura de cada laje. Para fazer a relação, foi adicionado às cargas de fissuração o peso próprio da laje e dos equipamentos.

As fissuras radiais foram as primeiras a surgir, podendo ter iniciado a partir do pilar ou a partir do furo em algumas lajes. As fissuras circunferências apareceram depois.

Nas lajes L8, e L10 a L15, as fissuras radiais iniciaram no pilar a uma carga variando entre 21% e 39% da carga de ruptura e, com o aumento do carregamento, se estenderam em direção às bordas da laje. As lajes L17 e L18 tiveram as fissuras radiais iniciadas nos vértices dos furos, e que se ampliaram em direção às bordas das lajes com cargas equivalentes a 36% e 31%, respectivamente, da carga de ruptura.

Nas lajes L10 e L14, as primeiras fissuras circunferenciais surgiram ao redor do pilar na mesma carga das fissuras radiais. Nas lajes L8, L11, L12, L13, L15, L17 e L18, as fissuras circunferenciais iniciaram posteriormente às fissuras radiais, em torno do pilar, com carga correspondente entre 34% a 52% da carga de ruptura.

Tabela 6.4 – Cargas de fissuração visual das lajes da Série 2 – relações com as cargas de ruptura

Laje	Furo	Geometria e carregamento	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_{rad} (kN)	V_{circ} (kN)	V_{rad}/V_u	V_{circ}/V_u
L8	1 200x200		192	86,3	50	75	0,39	0,52
L10	2 200x200		189	83,0	25	25	0,26	0,26
L11	1 200x200		299	139,1	50	100	0,25	0,42
L12	1 200x200		319	74,4	75	100	0,26	0,34
L13	2 200x200		277	61,9	75	100	0,36	0,45
L14	-		274	125,9	50	50	0,27	0,27
L15	-		364	66,5	50	150	0,21	0,48
L17	1 300x200		279	59,3	75	100	0,36	0,45
L18	2 300x200		322	53,1	75	100	0,31	0,39

De uma maneira geral, o surgimento de fissuras, nas lajes da Série 2 (com transferência de momento), ocorreu em cargas inferiores às observadas nas lajes da Série 1 (sem transferência de momento).

6.2.3 Deslocamento vertical

Nas Figuras 6.5 a 6.8 são apresentados gráficos das lajes da Série 2, adicionados da laje de referência L1, com os deslocamentos verticais nos pontos mais distantes do centro do pilar (850mm), nas direções *W* (registrados pelo defletômetro D1), *E* (D6), *N* (D7) e *S* (D12).

Nas lajes com transferência de momento ao pilar, na direção que foi aplicado o momento, houve rotação em que a borda mais carregada se deslocou no sentido de aplicação da carga, enquanto a borda oposta se deslocou em sentido contrário ao da aplicação da carga.

Na direção onde não foi aplicado o momento, os deslocamentos apresentados por todas as lajes foram semelhantes ao obtido na laje de referência L1, sem furo e sem momento, com pequenas variações, para mais ou para menos.

Nas direções com aplicação de momento, as bordas mais carregadas de todas as lajes apresentaram deformações bastante superiores às de L1. Nas bordas contrárias, como mencionado, os deslocamentos foram contrários ao sentido de aplicação de carga, o que não ocorreu em L1.

A existência de furo, nas lajes com furo(s) e momento aplicado paralelo ao maior lado do pilar, não implicou em grandes diferenças de deslocamentos, no lado com furo, em relação à laje sem furo, com momento aplicado na mesma direção e excentricidade de carga semelhante. Nos casos em que a excentricidade de carga foi menor (lajes L13 e L12), foram apresentados deslocamentos nos lados com furos, inferiores aos da laje sem furo (L14).

Quando o momento aplicado foi paralelo ao menor lado do pilar, a existência de furo (lajes L17 e L18), implicou em diferenças de deslocamentos significativas, no lado com furo, em relação à laje sem furo, com momento aplicado na mesma direção e excentricidade de carga semelhante (L15).

	L1	L8	L10	L11	L12					
	P	P	P	P	P					
	P □ P	0 □ 2P	0 □ 2P	2P □ 0	0,5P □ 1,5P					
	P	P	P	P	P					
	L13	L14	L15	L17	L18					
	P	P	1,5P	1,5P	1,5P					
	0,5P □ 1,5P	0 □ 2P	P □ P	P □ P	P □ P					
	P	P	0,5P	0,5P	0,5P					
Laje	L1	L8	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L17	L18
V_u (kN)	475	192	189	299	319	277	274	364	279	322
M_u (kN.m)	0	86,3	83,0	139,1	74,4	61,9	125,9	66,5	59,3	53,1

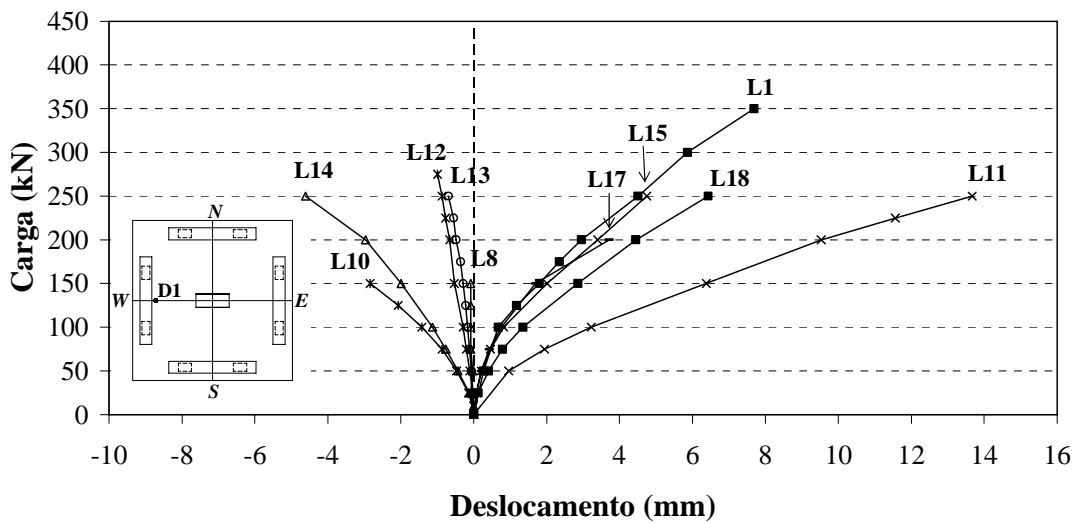


Figura 6.5 – Deslocamentos verticais a 850 mm do centro do pilar das lajes da Série 2 – Direção *W*

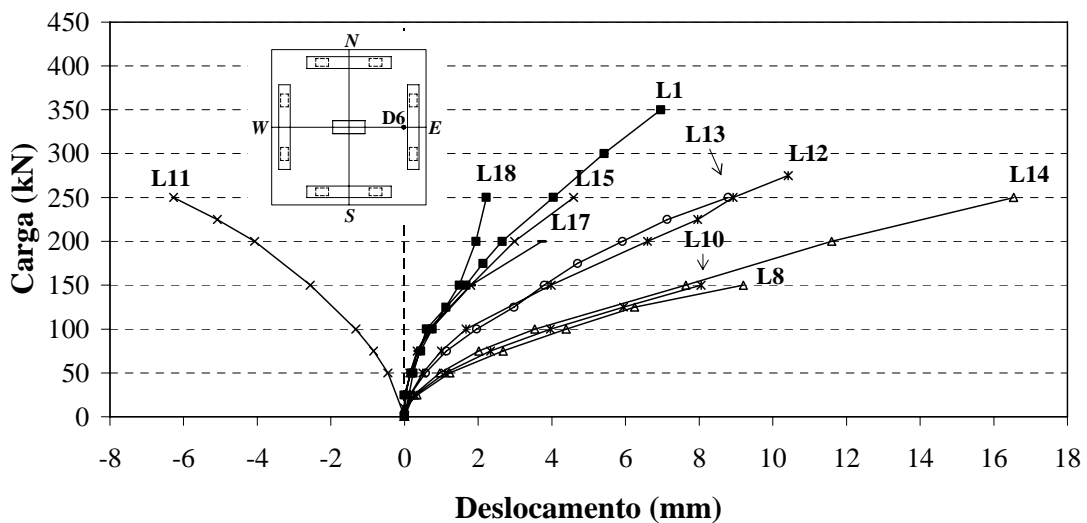


Figura 6.6 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 2 – Direção *E*

	L1	L8	L10	L11	L12					
	L13	L14	L15	L17	L18					
Laje	L1	L8	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L17	L18
V_u (kN)	475	192	189	299	319	277	274	364	279	322
M_u (kN.m)	0	86,3	83,0	139,1	74,4	61,9	125,9	66,5	59,3	53,1

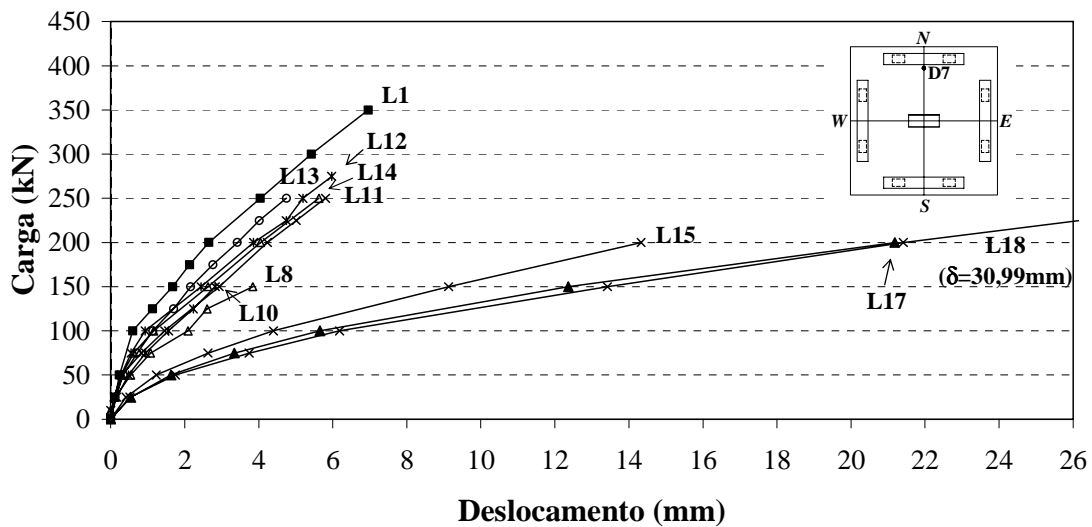


Figura 6.7 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 2 – Direção N

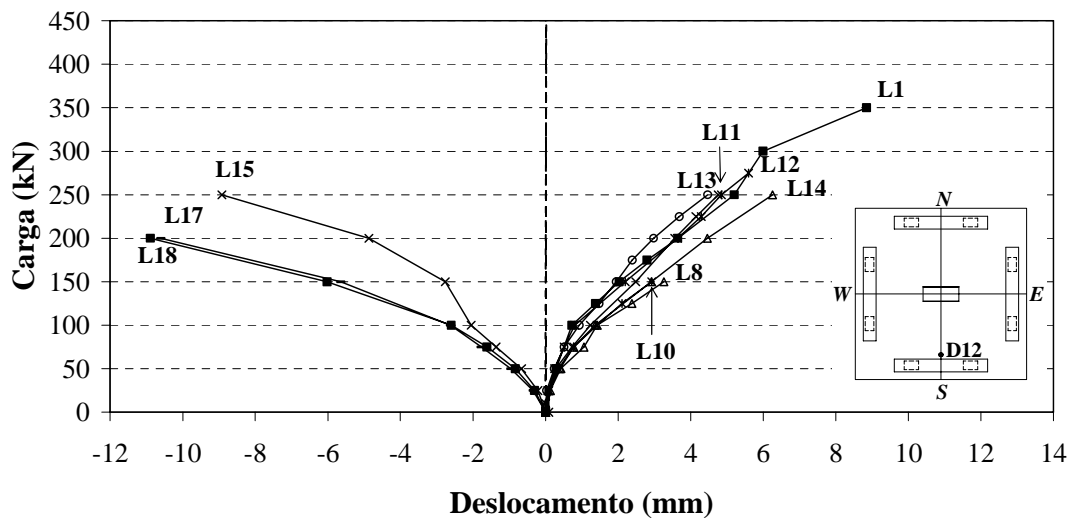


Figura 6.8 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes da Série 2 – Direção S

A provável causa da diferença de comportamento entre as lajes com aplicação de momento paralelo ao maior e menor lado do pilar é a inércia da ligação laje-pilar, sendo esta maior na direção paralela ao maior lado do pilar. A introdução do furo não foi, para os deslocamentos, algo determinante para diminuir a rigidez à rotação nas lajes com momento aplicado paralelo ao maior lado do pilar. Nas lajes com momento aplicado paralelo ao menor lado do pilar, a introdução do furo foi bastante determinante.

6.2.4 Deformação da armadura de flexão

As Figuras 5.30 a 5.39 mostram a deformação em determinados pontos da armadura de flexão, em vários estágios de carregamento, das lajes com momento aplicado. Nas barras contínuas instrumentadas as deformações apresentaram uma tendência de crescimento semelhante às das lajes sem momento aplicado.

Nas lajes L14, L15, L17 e L18, os pontos instrumentados próximos ao pilar e do lado mais carregado da laje apresentaram deformações maiores que os demais, para um mesmo carregamento. Os pontos situados nos lados menos carregados, inclusive os mais próximos do vértice do pilar, tiveram deformações pequenas. Apenas na laje L14 houve exceção, entre os quatro pontos que apresentaram deformação correspondente ao escoamento, um deles estava situado próximo ao pilar e no lado menos carregado; dos outros três, dois estavam próximos ao vértice do pilar.

Na laje L15, foram verificadas três posições com escoamento, duas delas próximas às faces do pilar. Na laje L17 não foi observado escoamento e na laje L18, em apenas uma localização, próxima ao pilar, houve escoamento.

6.2.5 Deformação do concreto

Os gráficos com as deformações no concreto das lajes com momento aplicado para os vários estágios de carregamento são mostrados nas Figuras 5.40 a 5.48.

Nas lajes L8, L10, L11, L12 e L13, os extensômetros situados na mesma direção do momento aplicado e no lado mais carregado, de uma maneira geral, mostraram as maiores deformações.

Na direção do momento aplicado, alguns extensômetros que estavam situados nos lados menos carregados indicaram que houve tração e no lado mais carregado, compressão, indicando a rotação da laje (lajes L8, L10, L11, L13).

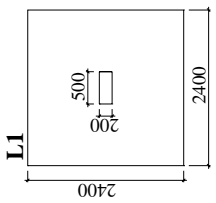
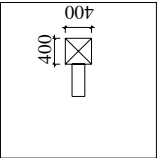
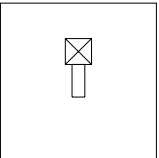
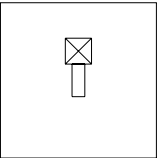
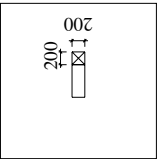

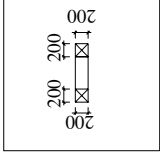
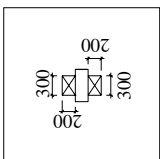
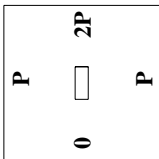
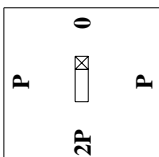
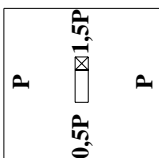
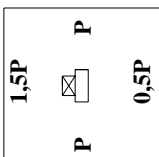
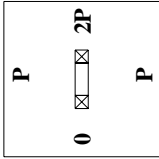
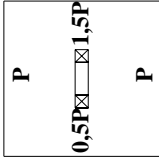
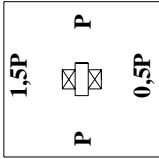
Nas lajes L14, L15, L17 e L18, os extensômetros posicionados no lado mais carregado, na mesma direção do momento aplicado e próximos às faces o pilar, apresentaram maiores compressões.

6.3 COMPARAÇÃO DAS CARGAS DE RUPTURA ENTRE AS SÉRIES

Na Tabela 6.5 são mostradas as cargas e momentos de ruptura das lajes da Série 1 e da Série 2.

Nos itens 6.3.1 a 6.3.4 serão feitas as comparações entre as cargas de ruptura das lajes da Série 1 e da Série 2.

Tabela 6.5 – Cargas e momentos de ruptura das lajes das Séries 1 e 2 (mm)

	SEM FURO		COM 1 FURO						COM 2 FUROS									
SÉRIE 1 - SEM MOMENTO	<p>Unidades: $V_u \rightarrow$ kN $M_u \rightarrow$ kN.m $f_c \rightarrow$ MPa $d \rightarrow$ mm $\rho \rightarrow$ %</p>  <p>L1 $V_u = 475$ $M_u = 0$ $f_c = 37,8$ $d = 121$ $\rho = 0,93$</p>		<p>L2 $V_u = 240$ $M_u = 0$ $f_c = 32,3$ $d = 123$ $\rho = 0,87$</p> 		<p>L3 $V_u = 250$ $M_u = 0$ $f_c = 39,5$ $d = 125$ $\rho = 1,17$</p> 		<p>L4 $V_u = 237$ $M_u = 0$ $f_c = 39,1$ $d = 124$ $\rho = 0,52$</p> 		<p>L7 $V_u = 455$ $M_u = 0$ $f_c = 37,2$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 		<p>L16 $V_u = 474$ $M_u = 0$ $f_c = 44,0$ $d = 125$ $\rho = 1,01$</p> 		<p>L9 $V_u = 375$ $M_u = 0$ $f_c = 34,2$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 			<p>L19 $V_u = 411$ $M_u = 0$ $f_c = 39,0$ $d = 126$ $\rho = 1,05$</p> 		
	SÉRIE 2 - COM MOMENTO	<p>L14 $V_u = 274$ $M_u = 125,9$ $f_c = 42,4$ $d = 121$ $\rho = 0,93$</p> 		<p>L11 $V_u = 299$ $M_u = 139,1$ $f_c = 36,7$ $d = 125$ $\rho = 1,44$</p> 		<p>L12 $V_u = 319$ $M_u = 74,4$ $f_c = 37,8$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 		<p>L17 $V_u = 279$ $M_u = 59,3$ $f_c = 35,8$ $d = 125$ $\rho = 1,01$</p> 		<p>L10 $V_u = 189$ $M_u = 83,0$ $f_c = 34,2$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 			<p>L13 $V_u = 277$ $M_u = 61,9$ $f_c = 36,4$ $d = 124$ $\rho = 1,46$</p> 			<p>L18 $V_u = 322$ $M_u = 53,1$ $f_c = 37,3$ $d = 126$ $\rho = 1,05$</p> 		

6.3.1 Lajes sem furo

Na Tabela 6.6 é apresentada uma comparação entre as cargas de ruptura das lajes sem furo, da Série 1 e Série 2, e a carga de ruptura da laje de referência L1.

Tabela 6.6 – Comparação entre as cargas de ruptura das lajes sem furos

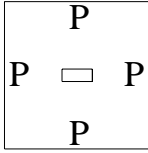
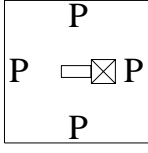
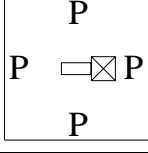
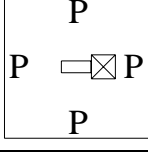
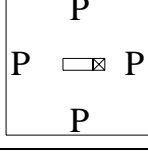
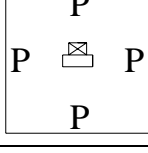
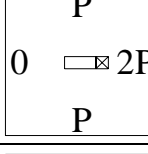
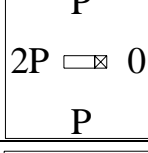
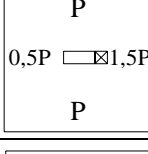
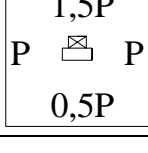
Laje	f_c (MPa)	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_u/V_{uL1}
L1	37,8	121	0,93	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P P □ P P </div>	475	-	1,00
L14	42,4	121	0,93	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0 □ 2P P </div>	274	125,9	0,58
L15	43,2	123	0,91	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 1,5P P □ P 0,5P </div>	364	66,5	0,77

Como mostrado no item 6.2.1, a laje L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$), com momento de ruptura aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar, teve carga de ruptura 42% inferior à da laje L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$). A laje L15 ($V_u = 364\text{kN}$, $M_u = 66,5\text{kN.m}$), sem furo e com momento de ruptura na direção paralela ao menor lado do pilar, apresentou carga de ruptura 23% inferior à da laje L1 ($V_u = 475\text{kN}$, $M_u = 0$).

6.3.2 Lajes com um furo

Na Tabela 6.7 é apresentada uma comparação entre as cargas de ruptura das lajes com um furo, da Série 1 e da Série 2, e a carga de ruptura da laje de referência L1.

Tabela 6.7 – Comparação entre as lajes com um furo e a laje L1

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	Arm. de cis.	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_u/V_{uL1}
L1	37,8	-	-	121	0,93		475	-	1,00
L2	32,3	1 400x400	-	123	0,87		240	-	0,51
L3	39,5	1 400x400	-	125	1,17		250	-	0,53
L4	39,1	1 400x400	-	124	0,52		237	-	0,50
L7	37,2	1 200x200	-	123	1,48		455	-	0,96
L16	44,0	1 300x200	-	125	1,01		474	-	1,00
L8	34,2	1 200x200	-	123	1,48		192	86,3	0,40
L11	36,7	1 200x200	-	125	1,44		299	139,1	0,63
L12	37,8	1 200x200	-	123	1,48		319	74,4	0,67
L17	35,8	1 300x200	-	125	1,01		279	59,3	0,59

Analisando as lajes, com um furo de 200x200mm, L7 ($V_u = 455\text{kN}$, $M_u = 0$), L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$ no sentido do furo) e L11 ($V_u = 299\text{kN}$, $M_u = 139,1\text{kN.m}$ com sentido contrário ao furo), pode-se observar que o momento no sentido da região com o furo é mais prejudicial para a carga de ruptura que aquele com sentido contrário ao furo. O momento no sentido do furo faz com que a placa nessa região tenha sua camada superior tracionada enquanto a camada inferior é comprimida. Como a camada inferior já é comprimida devido ao mecanismo da punção, o acréscimo de compressão aumenta a fragilidade da ligação, que pela presença do furo tem pouca quantidade de concreto para resistir a esse esforço. O momento no sentido contrário ao furo provoca tração na camada inferior da placa, o que alivia as tensões de compressão existentes nessa camada causadas pelo mecanismo da punção. A perda de carga das lajes L8 e L11, em relação à L7, foi de 58% e 34% respectivamente.

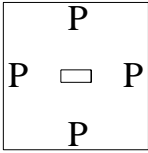
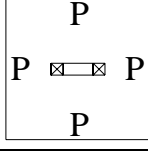
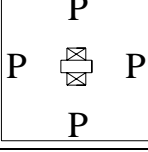
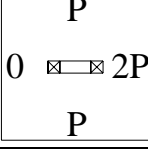
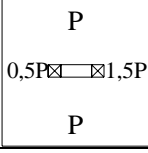
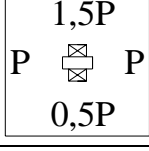
A laje L12 ($V_u = 319\text{kN}$, $M_u = 74,4\text{kN.m}$ no sentido do furo) apresentou perda de carga em relação à L7 ($V_u = 455\text{kN}$, $M_u = 0$) de 30%. Como comentado anteriormente, em relação à laje L8 ($V_u = 192\text{kN}$, $M_u = 86,3\text{kN.m}$ no sentido do furo), com excentricidade de carga maior, a carga de ruptura de L12 foi 56% superior e o momento de ruptura foi 14% inferior.

A laje L17 ($V_u = 279\text{kN}$, $M_u = 59,3\text{kN.m}$ no sentido do furo) teve uma perda de carga em relação à laje L16 ($V_u = 474\text{kN}$, $M_u = 0$) de 41%. As duas lajes tiveram um furo de 300x200mm adjacente ao maior lado do pilar.

6.3.3 Lajes com dois furos

Na Tabela 6.8 é apresentada uma comparação entre as cargas de ruptura das lajes com dois furos, da Série 1 e da Série 2, e a carga de ruptura da laje de referência L1.

Tabela 6.8 – Comparação entre as lajes com dois furos e a laje L1

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_u/V_{uL1}
L1	37,8	-	121	0,93		475	-	1,00
L9	34,2	2 200x200	123	1,48		375	-	0,79
L19	39,0	2 300x200	126	1,05		411	-	0,87
L10	34,2	2 200x200	123	1,48		189	83,0	0,40
L13	36,4	2 200x200	124	1,46		277	61,9	0,58
L18	37,3	2 300x200	126	1,05		322	53,1	0,68

O momento aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar fez com que as lajes L10 ($V_u = 189\text{kN}$, $M_u = 83,0\text{kN.m}$) e L13 ($V_u = 277\text{kN}$, $M_u = 61,9\text{kN.m}$) tivessem 50% e 26% de perda de carga em relação à L9 ($V_u = 375\text{kN}$, $M_u = 0$), respectivamente.

A laje L18 ($V_u = 322\text{kN}$, $M_u = 53,1\text{kN.m}$ com direção paralela ao menor lado do pilar), com dois furos de 300x200mm adjacentes aos maiores lados do pilar, teve perda de carga de 22% em relação à laje L19 ($V_u = 474\text{kN}$, $M_u = 0$), com os mesmos furos, mas sem transferência de momento.

6.3.4 Lajes com furo e/ou momento na direção EW

Na Tabela 6.9 é apresentada a comparação entre as lajes com furo e/ou momento de ruptura aplicado na direção EW e a carga de ruptura da laje de referência L1.

Tabela 6.9 – Comparação entre as cargas de ruptura das lajes com furo e/ou momento na direção EW

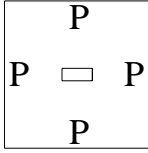
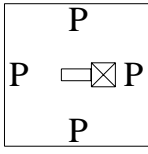
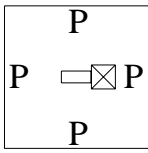
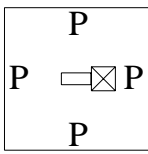
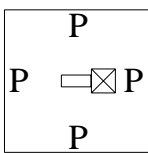
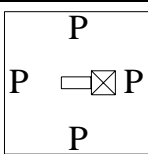
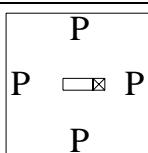
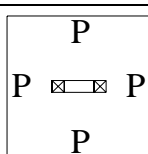
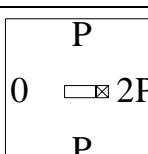
Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	Arm. de cis.	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_u/V_{uL1}
L1	37,8	-	-	121	0,93		475	-	1,00
L2	32,3	1 400x400	-	123	0,87		240	-	0,51
L3	39,5	1 400x400	-	125	1,17		250	-	0,53
L4	39,1	1 400x400	-	124	0,52		237	-	0,50
L5	36,7	1 400x400	Duas barras dobradas	122	1,22		416	-	0,88
L6	36,7	1 400x400	Duas barras dobradas	121	1,14		425	-	0,89
L7	37,2	1 200x200	-	123	1,48		455	-	0,96
L9	34,2	2 200x200	-	123	1,48		375	-	0,79
L8	34,2	1 200x200	-	123	1,48		192	86,3	0,40

Tabela 6.9 – Comparação entre as cargas de ruptura das lajes com furo e/ou momento na direção EW (continuação)

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	Arm. de cis.	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_u/V_{uL1}
L10	34,2	2 200x200	-	123	1,48	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0 2P P </div>	189	83,0	0,40
L11	36,7	1 200x200	-	125	1,44	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 2P 0 P </div>	299	139,1	0,63
L12	37,8	1 200x200	-	123	1,48	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0,5P 1,5P P </div>	319	74,4	0,67
L13	36,4	2 200x200	-	124	1,46	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0,5P 1,5P P </div>	277	61,9	0,58
L14	42,4	-	-	121	0,93	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P 0 2P P </div>	274	125,9	0,58

Com um furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar, as lajes L2 ($V_u = 240\text{kN}$, $M_u = 0$), L3 ($V_u = 250\text{kN}$, $M_u = 0$) e L4 ($V_u = 237\text{kN}$, $M_u = 0$) tiveram, em relação à laje L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$ aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar), carga de ruptura inferiores em 12%, 9% e 14%, respectivamente.

As lajes L12 ($V_u = 319\text{kN}$, $M_u = 74,4\text{kN.m}$) e L13 ($V_u = 277\text{kN}$, $M_u = 61,9\text{kN.m}$), com momento aplicado na direção paralela ao pilar, tiveram carga de ruptura 28% e 11% superiores à da laje L3 ($V_u = 250\text{kN}$, $M_u = 0$), com um furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar.

Tais relações, mostradas nos dois parágrafos anteriores, indicam o quanto prejudicial, sob o ponto de vista da resistência à punção, pode ser um furo adjacente ao menor lado de um pilar retangular interno e com as dimensões ultrapassando as dimensões do pilar.

Com um furo menor (200x200mm) adjacente ao menor lado do pilar, a laje L7 ($V_u = 455\text{kN}$, $M_u = 0$) teve carga de ruptura 66% superior à de L14 ($V_u = 274\text{kN}$, $M_u = 125,9\text{kN.m}$ aplicado na direção paralela ao maior lado do pilar).

6.3.5 Lajes com furo e/ou momento na direção NS

Na Tabela 6.10 é apresentada a comparação entre as lajes com furo e/ou momento de ruptura aplicado na direção NS e a carga de ruptura da laje de referência L1.

Tabela 6.10 – Comparação entre as cargas de ruptura das lajes com furo e/ou momento na direção NS

Laje	f_c (MPa)	Furo (mm)	d (mm)	ρ (%)	Geometria e carregam.	V_u (kN)	M_u (kN.m)	V_u/V_{uL1}
L1	37,8	-	121	0,93	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P P □ P P </div>	475	-	1,00
L15	43,2	-	123	0,91	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 1,5P P □ P 0,5P </div>	364	66,5	0,77
L16	44,0	1 300x200	125	1,01	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P P ⊠ P P </div>	474	-	1,00
L17	35,8	1 300x200	125	1,01	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 1,5P P ⊠ P 0,5P </div>	279	59,3	0,59
L19	39,0	2 300x200	126	1,05	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> P P ⊠ P P </div>	411	-	0,87
L18	37,3	2 300x200	126	1,05	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 1,5P P ⊠ P 0,5P </div>	322	53,1	0,68

Comparada à laje L16 ($V_u = 474\text{kN}$, $M_u = 0$), com um furo de 300x200mm adjacente a um maior lado do pilar, a carga de ruptura de L15 foi 23% inferior. E, comparada à laje L19 ($V_u = 411\text{kN}$, $M_u = 0$), sem momento e com dois furos de 300x200mm adjacentes aos maiores lados do pilar, a carga de ruptura foi 11% inferior.

6.4 COMPARAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS ENTRE AS SÉRIES

6.4.1 Lajes com furo e/ou momento na direção *EW*

Na Figura 6.9 são mostrados os deslocamentos obtidos no defletômetro D6 das lajes: L1, sem furo e sem momento aplicado; L3, L5, L7, L9, sem momento aplicado e com furo na direção *E*; e L8, L10, L12, L13 e L14, com momento aplicado, carregando com mais intensidade na direção *E*. As lajes L2 e L4 não foram colocadas na comparação, por terem tido comportamento semelhante à L3; e, a laje L6, por ter apresentado deslocamentos semelhantes à L5. A laje L11 teve momento na mesma direção, porém com sentido contrário, por isso não foi incluída na comparação.

A laje L8, com um furo de 200x200mm, a L10, com dois furos de 200x200mm, e a L14, sem furo, todas com momento aplicado na mesma direção, apresentaram maiores deslocamentos na direção *E* que a laje de referência L1, sem furo e sem momento aplicado, e maiores que as lajes com furo e sem momento aplicado, L3, L5, L7, L9. Este fato indica que não podemos, para as variáveis utilizadas nestas lajes, associar esses momentos utilizados com a introdução de um furo, sob o ponto de vista dos deslocamentos. E, também, não podemos afirmar que a utilização dos furos nas lajes, associados à transferência de momento ao pilar, provocaram deslocamentos superiores aos de uma laje sem furo com uma transferência de momento ao pilar semelhante.

As lajes L12, com um furo de 200x200mm, e L13, com dois furos de 200x200mm e momento aplicado com excentricidade de 0,25m, mostraram um comportamento, na direção *E*, semelhante ao ocorrido com a laje L3. As taxas de armadura das lajes L12 e L13 foram superiores em 26% e 25% à da laje L3, respectivamente.

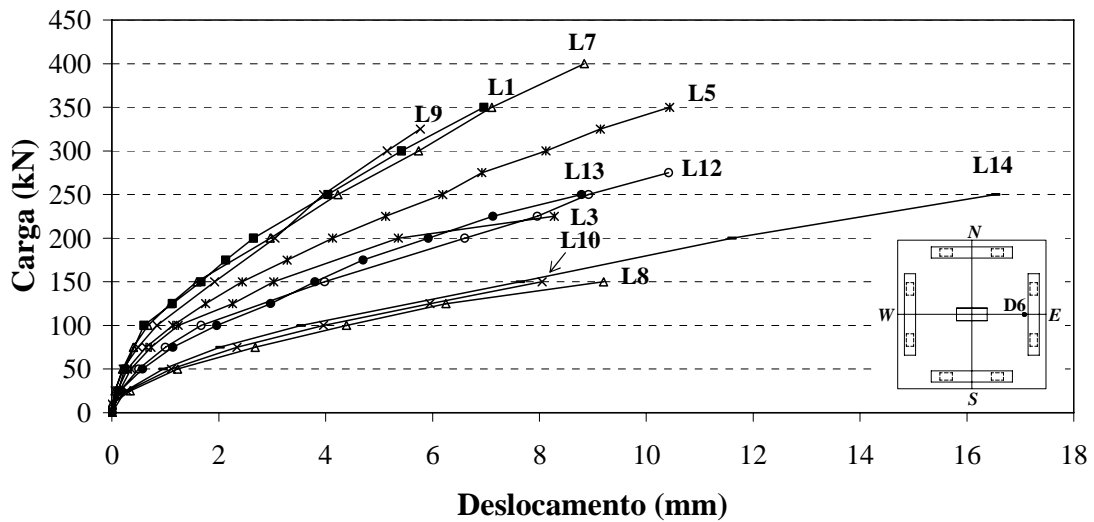
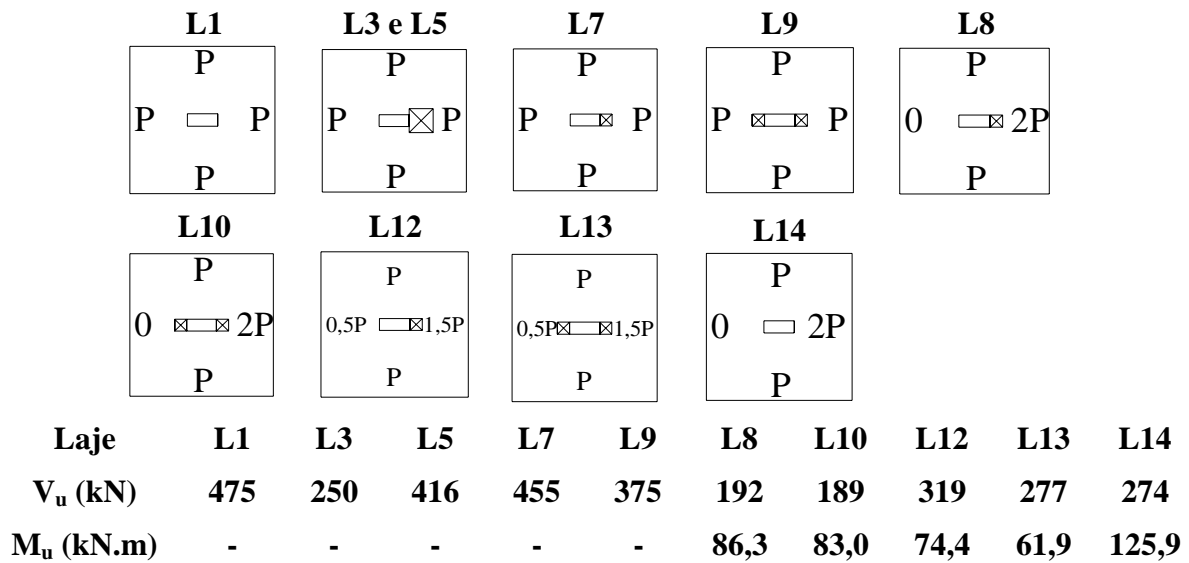


Figura 6.9 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes L1, L3, L5, L7, L9, L8, L10, L12, L13 e L14 – Direção E

6.4.2 Lajes com furos e/ou momento na direção NS

Na Figura 6.10 são mostrados os deslocamentos obtidos no defletômetro D7 das lajes: L1, sem furo e sem momento aplicado; L16 e L19, sem momento e com furo de 200x300mm no lado da direção N; e L15, L17 e L18, com momento aplicado, carregando com mais intensidade na direção N.

L1	L16	L19	L15	L17	L18	
P P □ P P	P P ⊠ P P	P P ⊠ P P	1,5P P □ P 0,5P	1,5P P ⊠ P 0,5P	1,5P P ⊠ P 0,5P	
Laje	L1	L16	L19	L15	L17	L18
V_u (kN)	475	474	411	364	279	322
M_u (kN.m)	-	-	-	66,5	59,3	53,1

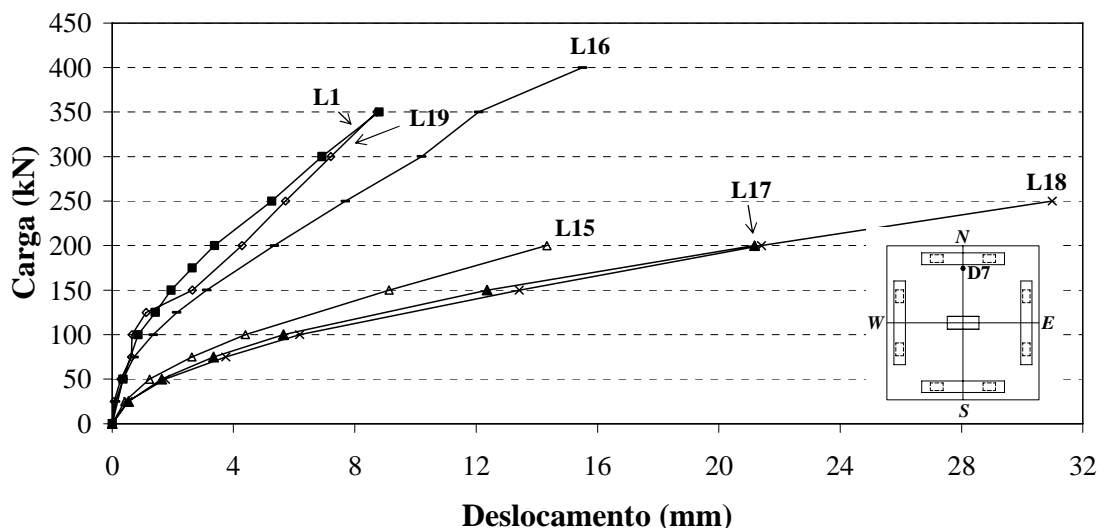


Figura 6.10 – Deslocamentos verticais a 850mm do centro do pilar das lajes L1, L16, L19, L15, L17 e L18 – Direção N

As lajes com momento aplicado, L15, L17 e L18 apresentaram deslocamentos bastante superiores aos das lajes sem momento, L1, L16 e L19. A partir desses resultados podemos concluir que a introdução deste momento, com excentricidade de carga próxima de 0,250m, proporcionou deslocamentos na direção *N* bastante superiores aos de uma laje com furo adjacente de 200x300mm e sem momento aplicado no mesmo lado.

Podemos observar, ainda, na laje L16, que a falta de simetria de geometria, com apenas um furo, levou a um maior deslocamento da laje na direção *N*, em relação à laje L19. Isto pode se relacionar a uma transferência de momento para a laje devido à excentricidade do centro de gravidade da ligação em relação ao eixo do pilar, mas que indica ser inferior aos momentos aplicados neste trabalho.

CAPÍTULO 7

COMPARAÇÃO COM NORMAS E PROPOSTAS PARA CÁLCULO DE LAJES LISAS COM FURO ADJACENTE A UM PILAR INTERNO E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as comparações dos resultados experimentais das lajes das Séries 1 e 2, da presente pesquisa e das lajes com furo(s), encontradas na literatura, com os estimados pelas normas CEB-FIP/MC1990, EUROCODE 2/2004, ACI-318:2005 e NBR 6118:2003. Para o caso de lajes com furo sem transferência de momento, da Série 1 e da literatura, também foram feitas comparações com os resultados estimados pelas proposições de BORGES (2004). As normas e as proposições da autora foram apresentadas no Capítulo 2.

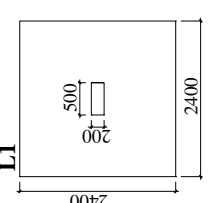
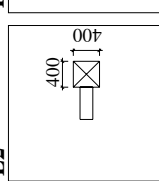
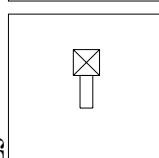
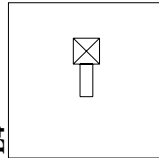
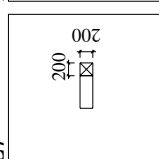
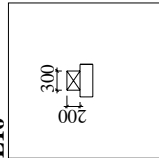
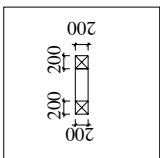
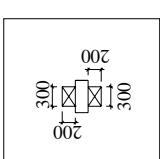
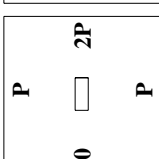
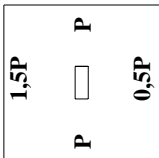
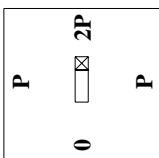
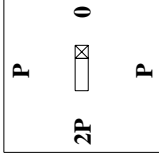
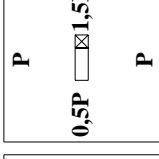
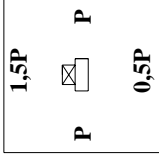
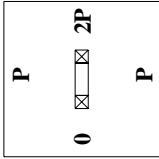
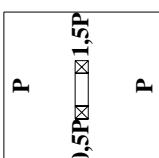
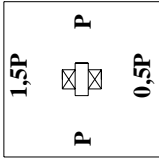
Por se tratar de uma verificação de resultados experimentais, não foi adotado nenhum coeficiente de segurança e foram utilizadas as propriedades dos materiais (concreto e aço) determinadas experimentalmente. As propriedades dos materiais das lajes das Séries 1 e 2 encontram-se nas Tabelas 3.3 e 3.8 e as das lajes da literatura encontram-se no Capítulo 2.

Também contém neste capítulo, propostas de cálculo para as normas quanto à resistência ao puncionamento em ligações laje-pilar, que contenham furo adjacente a um pilar interno, associado de transferência de momento fletor da laje ao pilar.

7.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM NORMAS

Na Tabela 7.1 são apresentados os dados geométricos necessários para o cálculo das lajes, além das cargas e momentos de ruptura.

Tabela 7.1 – Dados geométricos, cargas e momentos de ruptura das lajes das Séries 1 e 2 (mm)

	SEM FURO		COM 1 FURO						COM 2 FUROS											
SÉRIE 1 - SEM MOMENTO	<p>Unidades: $V_u \rightarrow$ kN $M_u \rightarrow$ kN.m $f_c \rightarrow$ MPa $d \rightarrow$ mm $\rho \rightarrow$ %</p>  <p>L1 $V_u = 475$ $M_u = 0$ $f_c = 37,8$ $d = 121$ $\rho = 0,93$</p>		<p>L2 $V_u = 240$ $M_u = 0$ $f_c = 32,3$ $d = 123$ $\rho = 0,87$</p> 		<p>L3 $V_u = 250$ $M_u = 0$ $f_c = 39,5$ $d = 125$ $\rho = 1,17$</p> 		<p>L4 $V_u = 237$ $M_u = 0$ $f_c = 39,1$ $d = 124$ $\rho = 0,52$</p> 		<p>L7 $V_u = 455$ $M_u = 0$ $f_c = 37,2$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 		<p>L16 $V_u = 474$ $M_u = 0$ $f_c = 44,0$ $d = 125$ $\rho = 1,01$</p> 		<p>L9 $V_u = 375$ $M_u = 0$ $f_c = 34,2$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 				<p>L19 $V_u = 411$ $M_u = 0$ $f_c = 39,0$ $d = 126$ $\rho = 1,05$</p> 			
	SÉRIE 2 - COM MOMENTO	<p>L14 $V_u = 274$ $M_u = 125,9$ $f_c = 42,4$ $d = 121$ $\rho = 0,93$</p> 		<p>L15 $V_u = 364$ $M_u = 66,5$ $f_c = 43,2$ $d = 123$ $\rho = 0,91$</p> 		<p>L8 $V_u = 192$ $M_u = 86,3$ $f_c = 34,2$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 		<p>L11 $V_u = 299$ $M_u = 139,1$ $f_c = 36,7$ $d = 125$ $\rho = 1,44$</p> 		<p>L12 $V_u = 319$ $M_u = 74,4$ $f_c = 37,8$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 		<p>L17 $V_u = 279$ $M_u = 59,3$ $f_c = 35,8$ $d = 125$ $\rho = 1,01$</p> 		<p>L10 $V_u = 189$ $M_u = 83,0$ $f_c = 34,2$ $d = 123$ $\rho = 1,48$</p> 				<p>L13 $V_u = 277$ $M_u = 61,9$ $f_c = 36,4$ $d = 124$ $\rho = 1,46$</p> 		<p>L18 $V_u = 322$ $M_u = 53,1$ $f_c = 37,3$ $d = 126$ $\rho = 1,05$</p> 

7.2.1 Lajes da Série 1 – sem transferência de momento

7.2.1.1 CEB-FIP/MC1990

7.2.1.1.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento

Esta norma não traz, em suas recomendações, especificações sobre a utilização de furos em lajes lisas e, em razão disto, a carga de ruptura foi calculada apenas para a laje L1. A Tabela 7.2 apresenta a estimativa calculada pelo CEB-FIP/MC1990 e a comparação com o resultado experimental.

O resultado estimado para a laje L1 foi praticamente o mesmo do experimental, indicando ser apropriado para a situação de geometria e carregamento desta laje.

Tabela 7.2 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo CEB-FIP/MC1990

Laje	u_0 (mm)	u_1 (mm)	$F_S^{(1)}$ (kN)	$F_S^{(2)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_{calc}
L1	1400	2921	2446	476	476	475	1,00

$$^{(1)}F_S = 0,60.1,5 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) f_c u_0 d$$

$$^{(2)}F_S = 0,12.1,5 \cdot (1 + \sqrt{200/d}) (100\rho f_{ck})^{1/3} u_1 d$$

7.2.1.2 EUROCODE 2/2004

7.2.1.2.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento

O perímetro crítico das lajes com furo foi determinado com a subtração sugerida pela norma, sendo retirada a porção de perímetro interna a projeções radiais, partindo do eixo do pilar até as extremidades do furo, sendo prolongadas até o perímetro crítico, como mostrado na Figura 7.1.

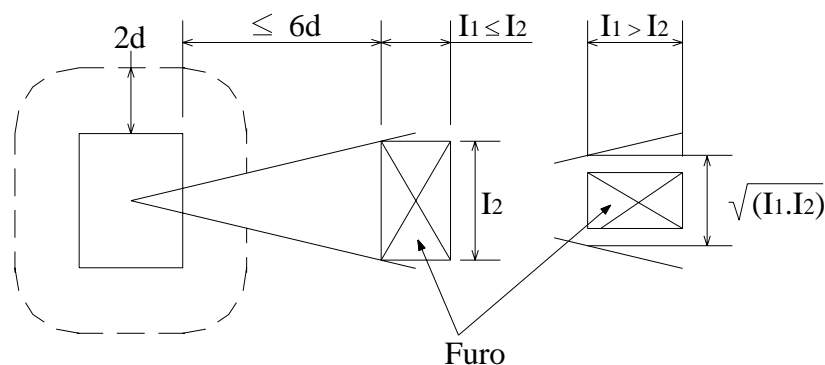


Figura 7.1 – Perímetro crítico com a existência de furo, segundo o EC2/2004

As Tabelas 7.3 e 7.4 e a Figura 7.2 apresentam os resultados estimados pela norma EC2/2004 para as lajes da Série 1, sem armadura de cisalhamento, e as comparações com os resultados experimentais.

Para a laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, o resultado experimental foi 14% superior ao resultado estimado, mostrando que as especificações encontram-se apropriadas para a ligação laje-pilar desta laje.

A norma mostrou-se **contra a segurança** para as lajes L2, L3 e L4, com um furo de 400x400mm, adjacente ao menor lado do pilar, com relações V_u/V_{calc} de 0,79, 0,68 e 0,86, respectivamente. Isso indica que para tais solicitações e geometria esta norma encontra-se inapropriada.

A estimativa para a laje L7, com um furo de 200x200mm adjacente ao menor lado do pilar, foi próxima do resultado experimental, com a relação V_u/V_{calc} igual a 1,06. Para a laje L16, também com um furo de 300x200mm adjacente ao maior lado do pilar, a norma indicou carga inferior à experimental com um moderado conservadorismo, com relação V_u/V_{calc} igual a 1,42.

Para a laje L9 com dois furos de 200x200mm, adjacentes aos menores lados do pilar, o resultado estimado foi próximo ao obtido experimentalmente, com V_u/V_{calc} igual a 1,05. E, para a laje L19, com dois furos de 300x200mm adjacentes aos maiores lados do pilar, a norma indicou resultados extremamente conservadores, com relação V_u/V_{calc} de 2,16.

A média das relações V_u/V_{calc} foi pouco conservadora, 1,15, porém o coeficiente de variação, 0,51, e o desvio padrão, 44,3%, indicam que houve resultados distantes em relação à média (L2, L3, L4 e L19).

Tabela 7.3 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo EC2/2004

Laje	u_0 (mm)	u_1 (mm)	$V_E^{(1)}$ (kN)	$V_E^{(2)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_{calc}
L1	1400	2921	2446	417	417	475	1,14

$$^{(1)}V_E = 0,60.1,5 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) f_c u_0 d$$

$$^{(2)}V_E = 0,18k(100\rho f_{ck})^{1/3} u_1 d, \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \quad \rho_1 = \sqrt{\rho_{1x} \cdot \rho_{1y}} \leq 0,02$$

Tabela 7.4 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo EC2/2004

Laje	u_0 (mm)	u_1 (mm)	$V_E^{(1)}$ (kN)	$V_E^{(2)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_{calc}
L2	1200	2255	1868	304	304	240	0,79
L3	1200	2275	2245	367	367	250	0,68
L4	1200	2265	2209	276	276	237	0,86
L7	1200	2558	2103	431	431	455	1,06
L9	1000	2171	1634	356	356	375	1,05
L16	1100	2091	2243	333	333	474	1,42
L19	800	1216	1493	190	190	411	2,16
Média =							1,15
Desvio padrão =							0,51
Coeficiente de variação (%) =							44,3

$$^{(1)}V_E = 0,60.1,5 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) f_c u_0 d$$

$$^{(2)}V_E = 0,18k(100\rho f_{ck})^{1/3} u_1 d, \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, \quad \rho_1 = \sqrt{\rho_{1x} \cdot \rho_{1y}} \leq 0,02$$

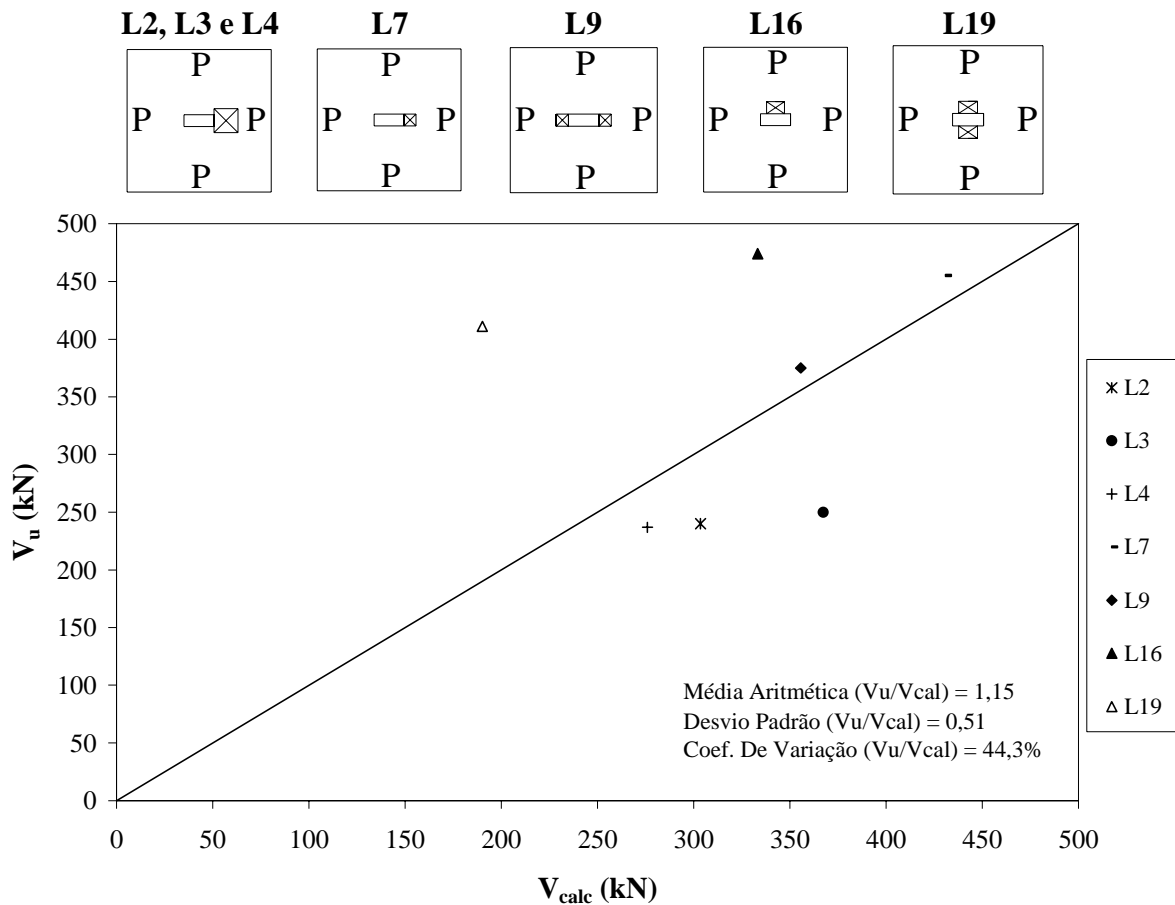


Figura 7.2 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo EC2/2004 - lajes da Série 1 com furo(s) e sem armadura de cisalhamento

7.2.1.2.2 Lajes da Série 1 com armadura de cisalhamento

A Tabela 7.5 e a Figura 7.3 mostram as estimativas para as lajes L5 e L6, com um furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar e armadura de cisalhamento, e a comparação com os resultados experimentais.

Em relação aos resultados experimentais de L5 e L6, o EC2/2004 apresentou resultados estimados próximos dos experimentais, com relações V_u/V_{calc} de 1,02 e 1,06, respectivamente.

Tabela 7.5 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e armadura de cisalhamento, e a estimada pelo EC2/2004

Laje	u_1 (mm)	$V_{R,es}^{(1)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_{calc}
L5	2245	409	409	416	1,02
L6	2235	399	399	425	1,06
Média =					1,04
Desvio padrão =					0,03
Coeficiente de variação (%) =					3,1

⁽¹⁾ $V_{R,es} = 0,75 \cdot 0,18(1 + \sqrt{200/d})(100\rho f_{ck})^{1/3} u_1 d + 1,5 A_{sw} f_{ywd,ef} \text{sen}\alpha$

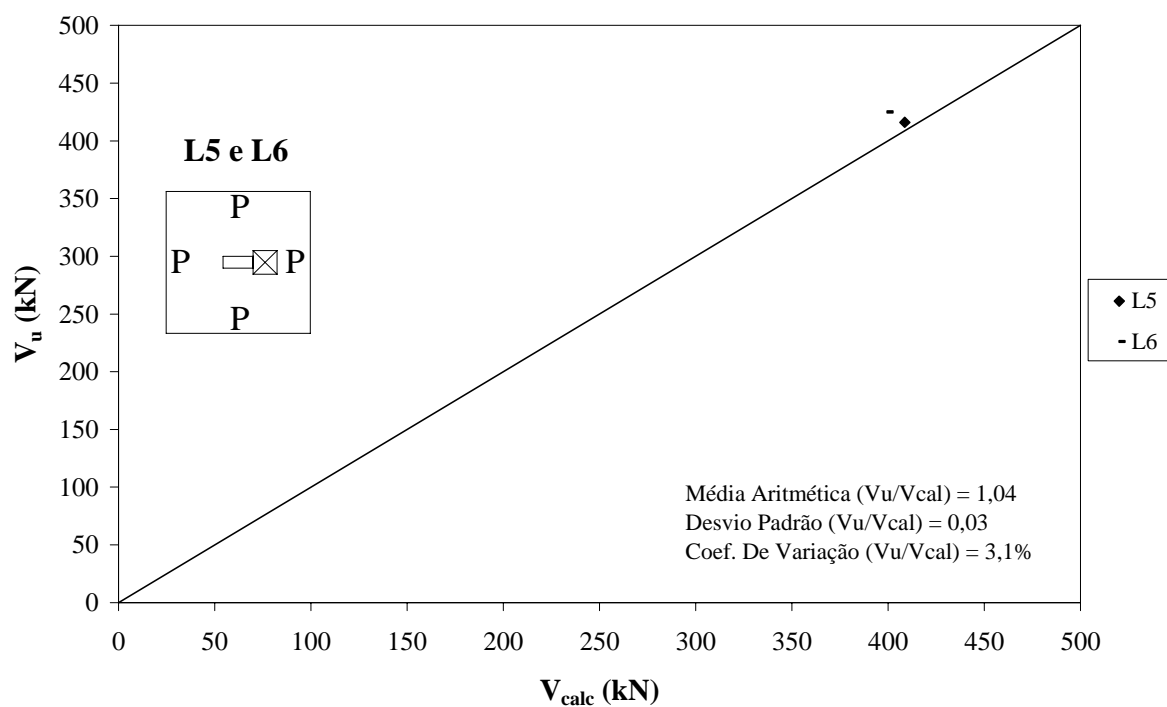


Figura 7.3 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo EC2/2004 - lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento

7.2.1.3 ACI-318:2005

7.2.1.3.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento

A determinação do perímetro crítico foi feita com a subtração indicada pela norma, mostrada na Figura 7.4.

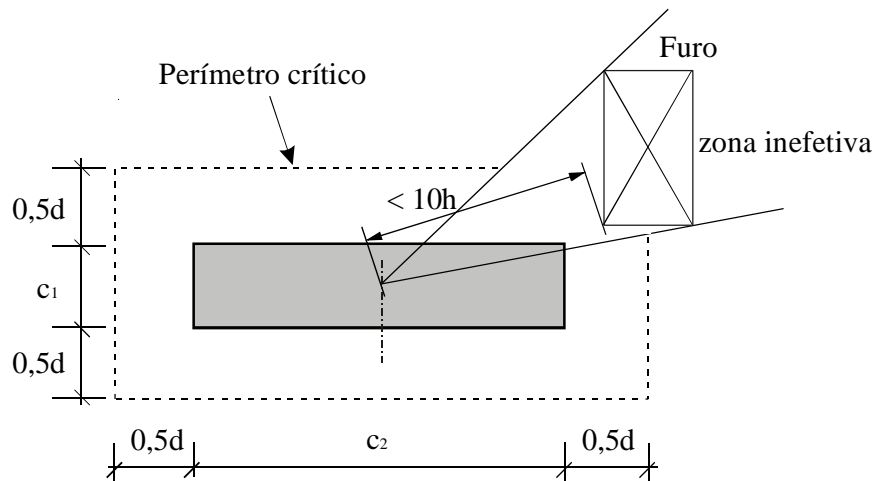


Figura 7.4 – Perímetro crítico para lajes com furos, ACI-318:2005

Os resultados estimados pelo ACI-318:2005 para as lajes da Série 1, sem armadura de cisalhamento, e suas comparações com os resultados experimentais são mostrados nas Tabelas 7.6 e 7.7 e na Figura 7.5.

Em relação aos resultados experimentais, as estimativas do ACI-318:2005 foram **contra a segurança** para as três lajes com furo quadrado, com 400mm de lado, adjacente ao menor lado do pilar. As relações V_u/V_{calc} para as lajes L2, L3 e L4 foram 0,83, 0,77 e 0,74, respectivamente.

Tabela 7.6 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo ACI-318:2005

Laje	b ₀ (mm)	V _c ⁽¹⁾ (kN)	V _c ⁽²⁾ (kN)	V _c ⁽³⁾ (kN)	V _{calc} (kN)	V _u (kN)	V _u /V _{calc}
L1	1884	429	532	463	429	475	1,11

$$^{(1)} V_c = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \beta_c = 500/200 = 2,5$$

$$^{(2)} V_c = 0,083 \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \alpha_s = 40 \text{ (pilar interno)}$$

$$^{(3)} V_c = 0,33 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

Tabela 7.7 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pelo ACI-318:2005

Laje	b ₀ (mm)	V _c ⁽¹⁾ (kN)	V _c ⁽²⁾ (kN)	V _c ⁽³⁾ (kN)	V _{calc} (kN)	V _u (kN)	V _u /V _{calc}
L2	1350	289	442	311	289	240	0,83
L3	1356	326	503	352	326	250	0,77
L4	1353	321	493	346	321	237	0,74
L7	1643	377	511	407	377	455	1,21
L9	1394	307	460	331	307	375	1,22
L16	1412	358	538	386	358	474	1,32
L19	926	223	450	240	223	411	1,84
Média =							1,13
Desvio padrão =							0,39
Coeficiente de variação (%) =							34,8

$$^{(1)} V_c = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \beta_c = 500/200 = 2,5$$

$$^{(2)} V_c = 0,083 \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \alpha_s = 40 \text{ (pilar interno)}$$

$$^{(3)} V_c = 0,33 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

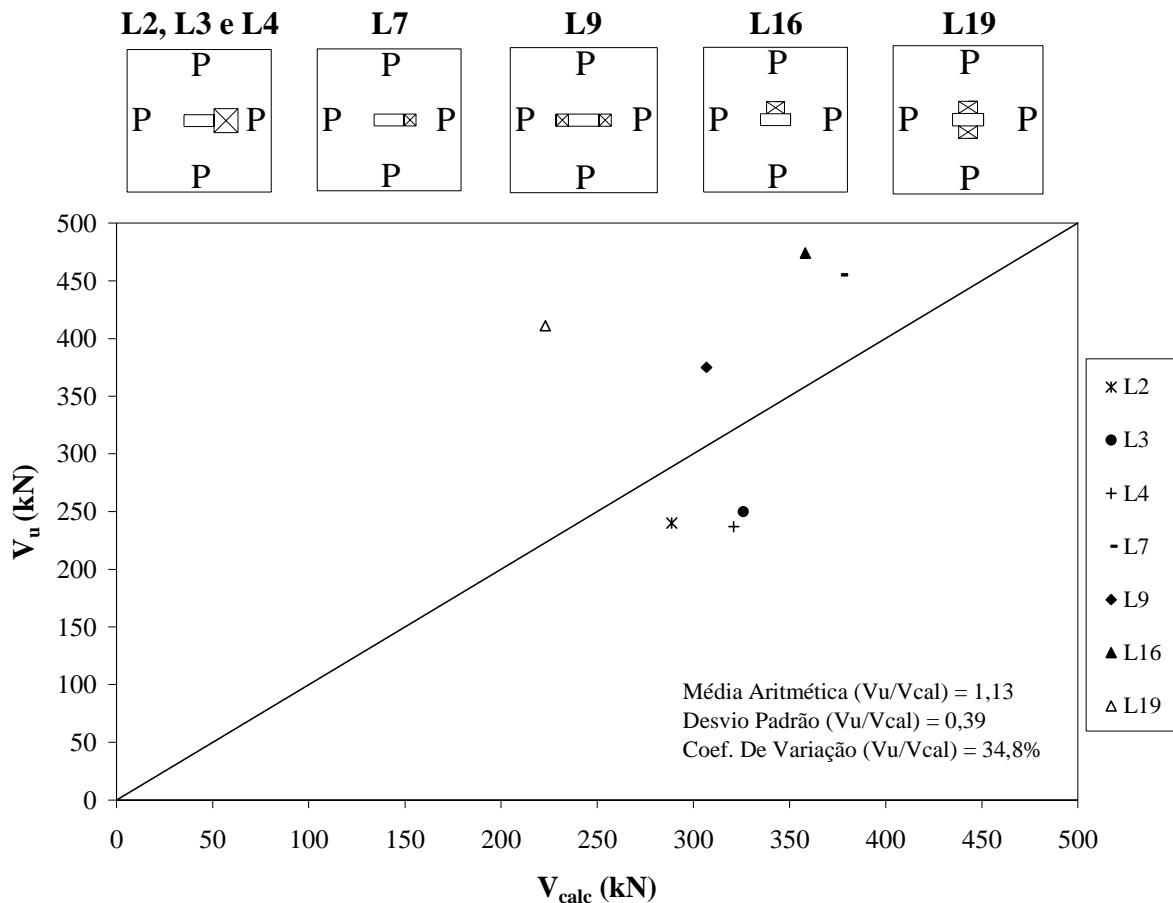


Figura 7.5 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 1 com furo(s) e sem armadura de cisalhamento

Com um furo adjacente ao menor lado do pilar mas com menores dimensões (200x200mm), laje L7, a estimativa foi a favor da segurança, levemente conservadora, com relação V_u/V_{calc} de 1,21. Para L16, com um furo adjacente, mas esse sendo encostado no maior lado do pilar e com dimensões de 300x200mm, a estimativa foi conservadora, apresentando relação V_u/V_{calc} igual a 1,32.

Para a laje, L9, com dois furos quadrados, com 200mm de lado, adjacentes aos menores lados do pilar, a estimativa do ACI-318:2005 foi, também, levemente conservadora, com relação V_u/V_{calc} de 1,22. E, para L19, com dois furos de 300x200mm adjacentes aos maiores lados do pilar, foi obtido o resultado mais conservador, com relação V_u/V_{calc} igual a 1,84.

A média aritmética das relações V_u/V_{calc} foi igual a 1,13, porém o desvio padrão e o coeficiente de variação assumiram valores altos de 0,39 e 34,8%, respectivamente, devido aos resultados obtidos para as lajes L2, L3, L4 e L19.

7.2.1.3.2 Lajes da Série 1 com armadura de cisalhamento

As estimativas e as comparações com os resultados experimentais das lajes L5 e L6, com furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar e armadura de cisalhamento, são apresentadas na Tabela 7.8 e na Figura 7.6.

Os resultados mostraram-se moderadamente conservadores, mas apropriados para as lajes comparadas. As relações V_u/V_{calc} foram de 1,32 e 1,36, respectivamente.

Tabela 7.8 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e armadura de cisalhamento, e a estimada pelo ACI-318:2005

Laje	b_0 (mm)	$V_c^{(1)}$ (kN)	$V_c^{(2)}$ (kN)	$V_s^{(3)}$ (kN)	V_c+V_s (kN)	V_{calc} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_{calc}
L5	1346	497	169	146	315	315	416	1,32
L6	1343	492	167	146	313	313	425	1,36
							Média =	1,34
							Desvio padrão =	0,03
							Coefficiente de variação (%) =	1,9

$$^{(1)} V_c = 0,5\sqrt{f'_c} b_0 d$$

$$^{(2)} V_c = 0,17\sqrt{f'_c} b_0 d$$

$$^{(3)} V_s = A_v f_y (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) d / s$$

$$\text{Obs.: } V_c + V_s \leq 0,5\sqrt{f'_c} b_0 d$$

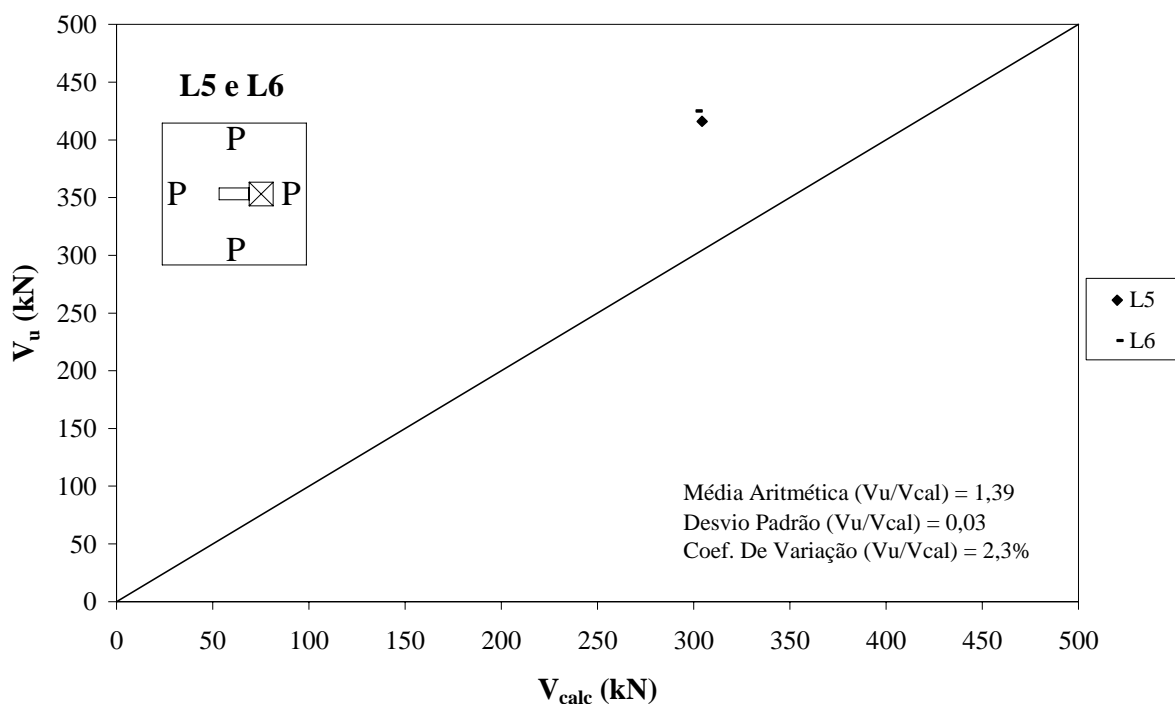


Figura 7.6 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento

7.2.1.4 NBR 6118:2003

7.2.1.4.1 Lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento

O perímetro crítico adotado pela norma brasileira quando há furos é determinado com a indicação gráfica de subtração, retirando a parte interna que cruza linhas radiais, que se iniciam no centro do pilar e tangenciam as extremidades do furo, como mostrado na Figura 7.7.

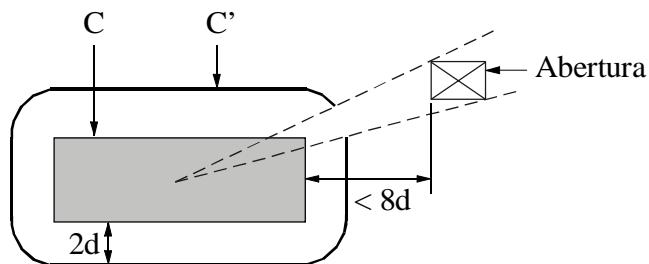


Figura 7.7 – Perímetro crítico de acordo com a NBR 6118:2003 para lajes com furos

As Tabelas 7.9 e 7.10 e a Figura 7.8 apresentam os resultados estimados pela NBR 6118:2003 para as lajes da Série 1, sem armadura de cisalhamento, e as comparações com os resultados experimentais.

Para a situação de laje lisa com pilar interno sem furo adjacente, laje L1, a estimativa da norma brasileira foi bastante próxima da experimental, com relação V_u/V_{calc} igual a 0,99.

Para situações com furo(s) situado(s) adjacente(s) aos menores lados do pilar, a NBR 6118:2003 apresentou estimativas **contra a segurança**. Para as lajes L2, L3, L4, L7 e L9 as relações V_u/V_{calc} foram iguais a 0,69, 0,59, 0,75, 0,92 e 0,92, respectivamente.

Apenas as estimativas para as lajes com furo(s) de 300x200mm, adjacente(s) ao maior lado do pilar, estiveram a favor da segurança em relação aos resultados experimentais. As relações V_u/V_{calc} das lajes L16 e L19 foram iguais a 1,24 e 1,89, respectivamente.

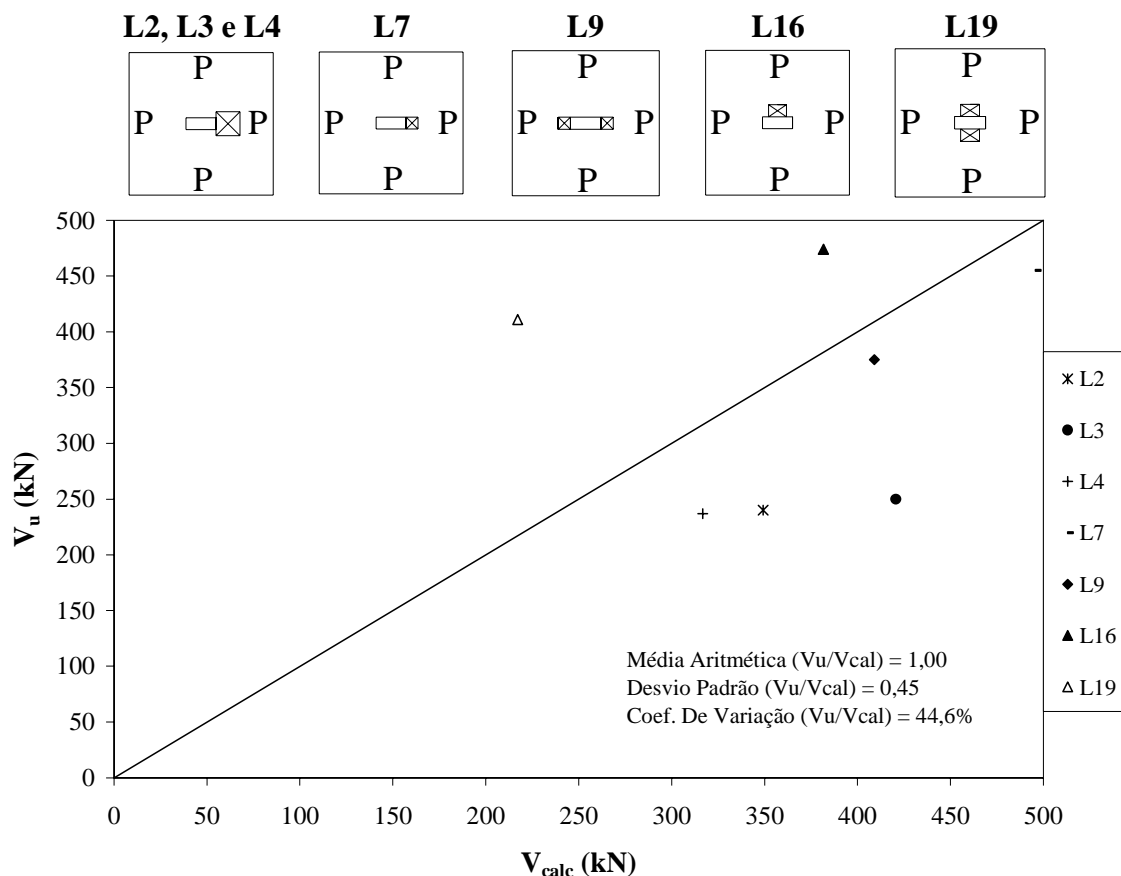


Figura 7.8 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 sem armadura de cisalhamento

Tabela 7.9 – Comparação entre a carga experimental da laje L1, sem furo e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pela NBR 6118:2003

Laje	C (mm)	C'	F _S ⁽¹⁾ (kN)	F _S ⁽²⁾ (kN)	V _{calc} (kN)	V _u (kN)	V _u /V _{calc}
L1	1400	2921	2054	482	482	475	0,99

$$^{(1)} F_S = 0,27.1,4.\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} C d$$

$$^{(2)} F_S = 0,13.1,4.(1 + \sqrt{200/d})(100\rho f_{ck})^{1/3} C' d$$

Tabela 7.10 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e sem armadura de cisalhamento, e a estimada pela NBR 6118:2003

Laje	C (mm)	C'	F _S ⁽¹⁾ (kN)	F _S ⁽²⁾ (kN)	V _{calc} (kN)	V _u (kN)	V _u /V _{calc}
L2	1200	2255	1569	349	349	240	0,69
L3	1200	2275	1886	421	421	250	0,59
L4	1200	2265	1855	317	317	237	0,75
L7	1200	2558	1767	496	496	455	0,92
L9	1000	2171	1373	409	409	375	0,92
L16	1100	2091	1884	382	382	474	1,24
L19	800	1216	1254	217	217	411	1,89
Média =							1,00
Desvio padrão =							0,45
Coeficiente de variação (%) =							44,6

$$^{(1)} F_S = 0,27.1,4.\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} C d$$

$$^{(2)} F_S = 0,13.1,4.(1 + \sqrt{200/d})(100\rho f_{ck})^{1/3} C' d$$

7.2.1.4.2 Lajes da Série 1 com armadura de cisalhamento

Na Tabela 7.11 e na Figura 7.9 são mostradas as estimativas para as lajes L5 e L6, sem momento aplicado, com furo e armadura de cisalhamento, e as comparações com suas cargas experimentais.

O resultado estimado para a laje L5 foi 6% menor que o resultado experimental. Para a laje L6, a estimativa foi praticamente igual ao resultado experimental, apenas 1% menor.

Tabela 7.11 – Comparação entre a carga experimental das lajes da Série 1, com furo(s) e armadura de cisalhamento, e a estimada pelo NBR 6118:2003

Laje	u_1 (mm)	$F_{S,es}^{(1)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_{calc}
L5	2245	441	441	416	0,94
L6	2235	431	431	425	0,99
Média =					0,97
Desvio padrão =					0,03
Coeficiente de variação (%) =					3,1

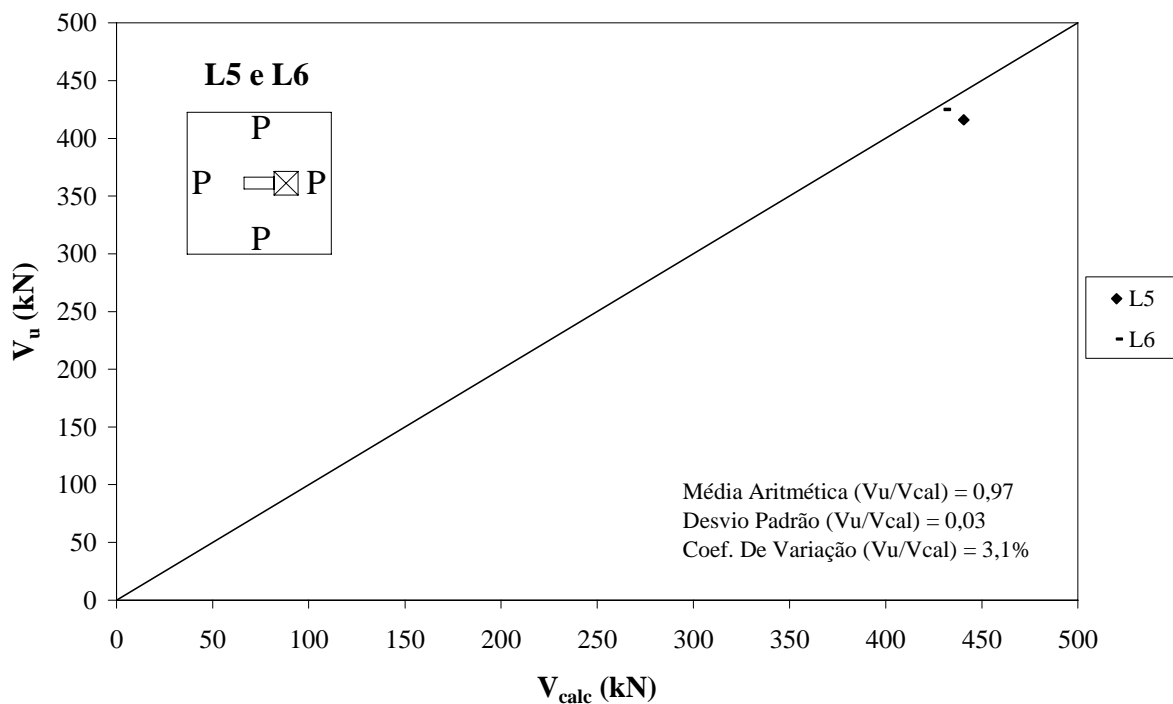
$$^{(1)} F_{S,es} = 0,10.1,4 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100\rho f_c)^{1/3} C'd + 1,5A_{sw}f_{ywd}\text{sen}\alpha$$


Figura 7.9 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento

7.2.2 Lajes da Série 2 – com transferência de momento

Nesta comparação foi feita a relação entre a tensão de ruptura no ensaio, causada pelo momento transferido último e a carga última, calculada conforme indicado por cada norma, e a tensão resistente também indicada por cada norma.

Para a determinação da tensão provocada pelo momento, as normas CEB-FIP/MC1990, EC2/2004 e NBR 6118:2003 indicam que deve ser calculado o momento plástico resistente W_1 , dado pela expressão:

$$W_1 = \int_0^{u_1} |e|.dl \quad (7.1)$$

onde:

dl é o comprimento elementar do perímetro de controle;

e é a distância de dl ao eixo em torno do qual atua o momento M_{Sd} .

A Equação 7.1 indica que devemos determinar o módulo resistente, para uma laje sem furo, com a somatória dos momentos causados pelos trechos do perímetro de controle em relação ao eixo que passa no centro do pilar, CC' , em torno do qual atua o momento M_{Sd} , como mostrado na Figura 7.10. Para as lajes sem furo, o centro de gravidade do perímetro crítico, CG_u , coincide com o centro de gravidade do pilar. A determinação da equação de W_1 para a laje sem furo L1 é mostrado a seguir.

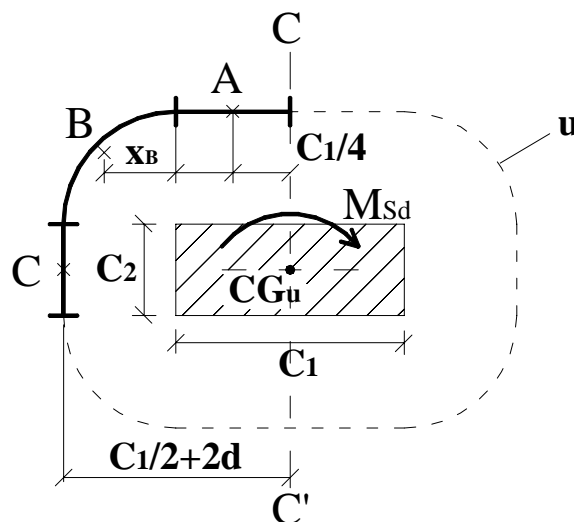


Figura 7.10 – Trechos para cálculo de W_1 para lajes sem furo, L14

W₁ para ligação laje-pilar interno:

$$W_1 = 4W_A + 4W_B + 2W_C \quad (7.2)$$

onde:

$$W_A = \frac{C_1}{2} \frac{C_1}{4} = \frac{C_1^2}{8}$$

$$W_B = \frac{\pi \cdot 2d}{2} \left(\frac{C_1}{2} + x_B \right); \text{ se } x_B \text{ (centróide do quarto de circunferência) é igual a } \frac{2 \cdot r}{\pi}$$

$$W_B = \pi \cdot d \left(\frac{C_1}{2} + \frac{2 \cdot 2d}{\pi} \right) = \frac{\pi C_1 d}{2} + 4d^2$$

$$W_C = C_2 \left(\frac{C_1}{2} + 2d \right) = \frac{C_1 C_2}{2} + 2C_2 d$$

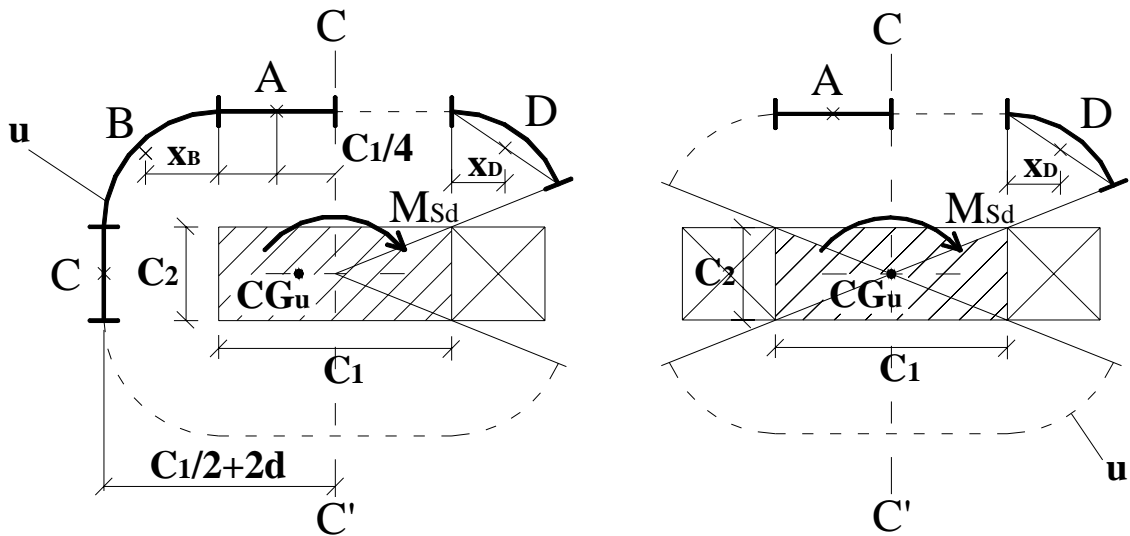
Substituindo W_A, W_B e W_C em 7.2 temos a expressão de W₁ fornecida pelas normas citadas para uma ligação laje-pilar sem furo:

$$W_1 = \frac{C_1^2}{2} + C_1 C_2 + 4C_2 d + 16d^2 + 2\pi d C_1 \quad (7.3)$$

Para lajes com furo(s), o módulo resistente W₁ é igual à somatória dos momentos causados pelos trechos do perímetro crítico, em relação ao eixo do pilar em torno do qual atua o momento, como mostrado nos exemplos a seguir, ilustrados pelas Figuras 7.11 (a) e (b) e 7.12 (a) e (b).

Para o cálculo do momento plástico W_D, foi utilizado o comprimento do trecho multiplicado pela distância do centro da corda, formada pelo arco em relação ao eixo CC', ao invés da distância do centro de gravidade do arco D em relação a CC'. Essa medida foi utilizada para simplificar o cálculo, implicando em pequena diferença em relação ao valor real.

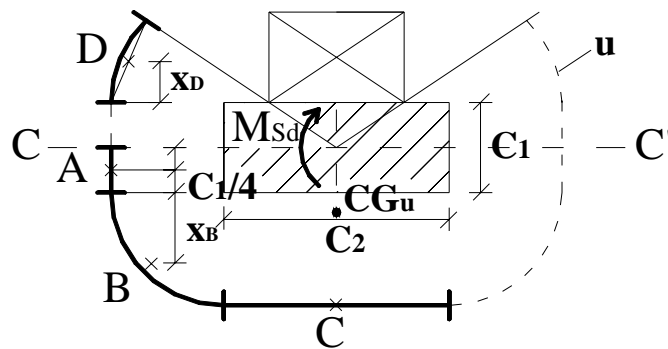
Percebe-se que, para as lajes com apenas um furo, o centro de gravidade do perímetro crítico, CG_u, não coincide com o centro de gravidade (eixo) do pilar, mas as normas indicam que o momento plástico deve ser calculado em relação ao eixo do pilar.



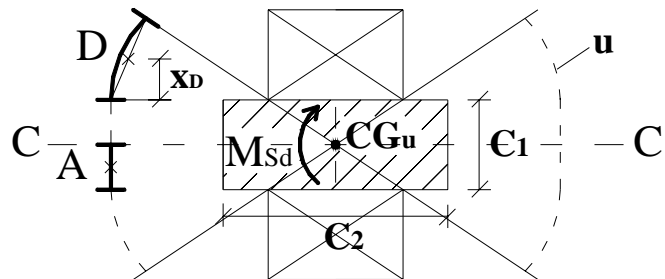
a) trechos para laje com um furo adjacente ao menor lado do pilar

b) trechos para laje com dois furos adjacentes aos menores lados do pilar

Figura 7.11 – Trechos para cálculo de W_1 – lajes com furo(s): L8, L11, L12, L10 e L13



a) trechos para laje com um furo adjacente ao maior lado do pilar



b) trechos para laje com dois furos adjacentes aos maiores lados do pilar

Figura 7.12 – Trechos para cálculo de W_1 – lajes com furo(s): L17 e L18

W₁ para uma ligação laje-pilar interno com um furo:

$$W_1 = 4W_A + 2W_B + W_C + 2W_D \quad (7.4)$$

onde:

$$W_A = \frac{C_1}{2} \frac{C_1}{4} = \frac{C_1^2}{8}$$

$$W_B = \pi \cdot d \left(\frac{C_1}{2} + \frac{2 \cdot 2d}{\pi} \right) = \frac{\pi C_1 d}{2} + 4d^2$$

$$W_C = C_2 \left(\frac{C_1}{2} + 2d \right) = \frac{C_1 C_2}{2} + 2C_2 d$$

$$W_D = D \left(\frac{C_1}{2} + x_D \right) = \frac{C_1 D}{2} + D x_D ;$$

D e x_D foram determinados graficamente utilizando o programa AutoCAD 2000.

Substituindo W_A, W_B, W_C e W_D em 7.5 temos a expressão de W₁:

$$W_1 = \frac{C_1^2}{2} + \frac{C_1 C_2}{2} + 2C_2 d + 8d^2 + \pi d C_1 + C_1 D + 2D x_D \quad (7.5)$$

W₁ para uma ligação laje-pilar interno com dois furos:

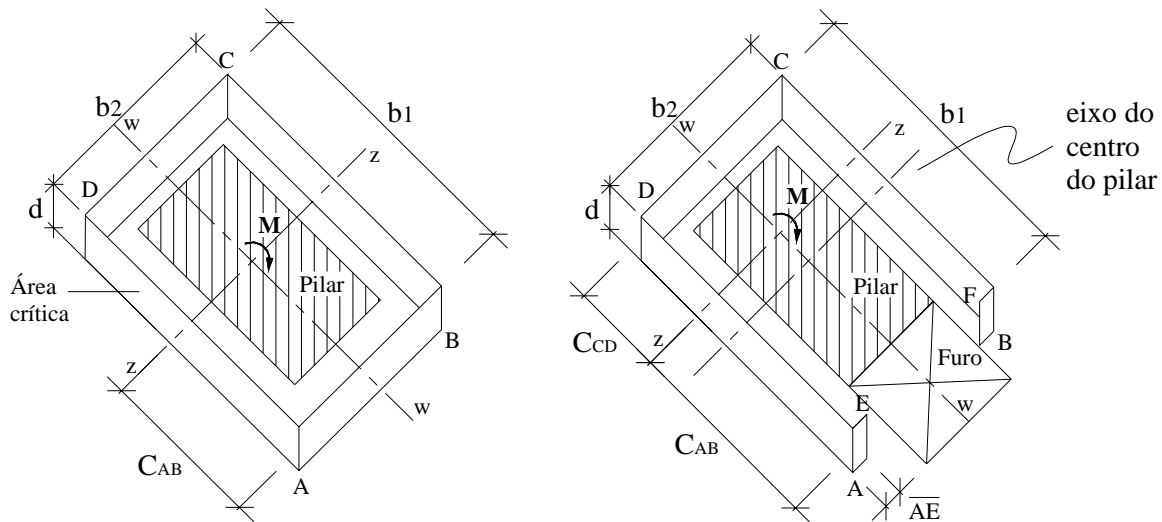
$$W_1 = 4W_A + 4W_D \quad (7.6)$$

Substituindo W_A, W_B, W_C e W_D em 7.6 temos a expressão de W₁:

$$W_1 = \frac{C_1^2}{2} + 2C_1 D + 4D x_D \quad (7.7)$$

A norma americana ACI-318:2005 indica, na equação para o cálculo das tensões atuantes devido ao momento transferido ao pilar, a utilização do momento polar de inércia, J_c, da área crítica, sempre em relação ao centro de gravidade da área crítica.

O momento polar de inércia, J_c , das faces do perímetro crítico pode ser calculado segundo a Figura 7.13 (a) e (b), para ligações laje-pilar interno sem furo e para a situação específica da figura com um furo adjacente ao pilar, semelhante à laje L7, respectivamente.



a) área crítica para laje sem furo

b) área crítica para laje com um furo adjacente ao menor lado do pilar

Figura 7.13 – Faces críticas para cálculo de J_c em ligações laje-pilar interno sem furo e com furo adjacente ao menor lado pilar

O centróide do perímetro de controle, mostrado na Figura 7.13 (a), passa pelo centróide das faces AD e BC. Desta forma, o momento polar de inércia para ligações laje-pilar interno sem furo, nas duas direções, pode ser calculado da seguinte forma:

$$J_c = I_{x_{AD}} + I_{x_{BC}} + I_{y_{AD}} + I_{y_{BC}} + A_{AB}x_{AB}^2 + A_{CD}x_{CD}^2 \quad (7.8)$$

neste caso: $I_{x_{AD}} = I_{x_{BC}}$, $I_{y_{AD}} = I_{y_{BC}}$, e $A_{AB}x_{AB}^2 = A_{CD}x_{CD}^2$

$I_{x_{AD}}$, $I_{x_{BC}}$ e $I_{y_{AD}}$, $I_{y_{BC}}$ = momento de inércia em x e y, respectivamente, das faces AD e BC

A = área da face da seção analisada

x = distância do centróide da face em relação ao eixo referente ao momento polar de inércia

assim:

$$J_c = 2 \frac{b_1 d^3}{12} + 2 \frac{d b_1^3}{12} + 2 b_2 d \left(\frac{b_1}{2} \right)^2$$

simplificando:

$$J_c = \frac{d b_1}{2} \left[\frac{(d^2 + b_1^2)}{3} + (b_1 b_2) \right]$$

onde:

$$b_1 = c_1 + d ; e, b_2 = c_2 + d$$

c_1 = dimensão do pilar paralela à direção do momento transferido ao pilar

c_2 = dimensão do pilar perpendicular à direção do momento transferido ao pilar

Para determinar o momento polar de inércia do perímetro crítico em ligações laje-pilar interno, com furo na laje adjacente ao pilar, primeiramente é necessário determinar a excentricidade do perímetro crítico, C_{CD} , como mostrado na Figura 7.13 (b), pela expressão:

$$C_{CD} = \frac{\text{Momentos que produzem as áreas das faces em CD}}{\text{Área de todas as faces}} \quad (7.9)$$

$$C_{CD} = \frac{2(b_1 \cdot d) \frac{b_1}{2} + 2(\overline{AE} \cdot d) b_1}{2(b_1 \cdot d) + b_2 \cdot d + 2 \cdot \overline{AE} \cdot d}$$

A dimensão \overline{AE} foi determinada graficamente utilizando o software AUTOCAD2000.

Assim, o momento polar de inércia para ligações laje-pilar interior, com furo na laje adjacente ao pilar, pode ser calculado da seguinte forma:

$$J_c = I_{x_{AD}} + I_{x_{BC}} + I_{y_{AD}} + I_{y_{BC}} + A_{AD} x_{AD}^2 + A_{BC} x_{BC}^2 + A_{CD} x_{CD}^2 + A_{AE} x_{AE}^2 + A_{BF} x_{BF}^2 \quad (7.10)$$

neste caso: $I_{x_{AD}} = I_{x_{BC}}$, $I_{y_{AD}} = I_{y_{BC}}$, $A_{AD} x_{AD}^2 = A_{BC} x_{BC}^2$ e $A_{AE} x_{AE}^2 = A_{BF} x_{BF}^2$

$$J_c = 2 \frac{b_1 \cdot d^3}{12} + 2 \frac{d \cdot b_1^3}{12} + 2 \cdot b_1 \cdot d \left(\frac{b_1}{2} - C_{CD} \right) + b_2 \cdot d \cdot C_{CD}^2 + 2 \cdot \overline{AE} \cdot d \cdot C_{AB}^2$$

simplificando:

$$J_c = d.b_1 \left[\frac{(d^2 + b_1^2)}{6} + 2 \left(\frac{b_1}{2} - C_{CD} \right) \right] + b_2.d.C_{CD}^2 + 2.\overline{AE}.d.C_{AB}^2 \quad (7.11)$$

Nas lajes com furo(s) diferente(s) do mostrado no exemplo, o cálculo do momento polar de inércia foi feito de maneira semelhante, respeitado o perímetro crítico de cada laje.

7.2.2.1 CEB-FIP/MC1990

Foram calculadas apenas as cargas de ruptura das lajes L14 e L15, sem furos, devido à limitação quanto à existência de furos já comentada. Os resultados e a comparação com os resultados experimentais estão mostrados na Tabela 7.12.

Para a laje sem furo, com momento paralelo ao maior lado do pilar, laje L14, a relação tensão atuante por tensão resistente, τ_u/τ_R , foi de 1,15; e para a laje com momento transferido paralelo ao na menor lado do pilar, L5, a tensão admissível foi superior à tensão última, com relação τ_u/τ_R igual a 0,95. Estes resultados, próximos dos experimentais, indicam que o CEB-FIP/MC1990 apresenta procedimento de cálculo adequado para ligações laje-pilar sem furo com as características desta pesquisa.

Tabela 7.14 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a estimada pelo CEB-FIP/MC1990

Laje	u_1 (mm)	$\tau_R^{(1)}$ (MPa)	V_u (kN)	M_u (kN.m)	$\tau_{V_u}^{(2)}$ (MPa)	$\tau_{M_u}^{(3)}$ (MPa)	$\tau_u^{(4)}$ (MPa)	τ_u/τ_R
L14	2921	1,40	274	125,9	0,79	0,85	1,63	1,15
L15	2946	1,39	364	66,5	1,00	0,32	1,32	0,95
Média =								1,05
Desvio padrão =								0,14
Coeficiente de variação (%) =								13,4

$$^{(1)} \tau_R = 0,12.1,5.(1 + \sqrt{200/d})(100\rho f_{ck})^{1/3}$$

$$^{(2)} \text{tensão provocada pela carga de ruptura: } \tau_{V_u} = \frac{V_u}{u_1 d}$$

$$^{(3)} \text{tensão provocada pelo momento de ruptura: } \tau_{M_u} = \frac{KM_u}{W_1 d}$$

$$^{(3)} \tau_u = \tau_{V_u} + \tau_{M_u}$$

7.2.2.2 EUROCODE 2/2004

Os resultados das estimativas para as lajes da Série 2, com transferência de momento, e as comparações com as cargas experimentais são mostradas nas Tabelas 7.15 e 7.16 e na Figura 7.14.

Para as lajes sem furo, as tensões resistentes foram inferiores às obtidas em ensaio, com relações $v_u/v_{R,c}$ de 1,31 para a laje L14, com transferência de momento paralela ao maior lado do pilar, e de 1,08 para a laje L15, com transferência de momento paralela ao menor lado do pilar.

Com a introdução de um furo ou dois, as tensões resistentes na maioria dos casos também foi inferior às obtidas com as cargas e momentos últimos de ensaio. Apenas para a laje L8, com um furo de 200x200mm adjacente ao menor lado do pilar, momento transferido paralelo ao maior lado e no sentido do furo, que a relação $v_u/v_{R,c}$ foi de 0,98. Para a laje L12, com a mesma geometria da L8, mas com carga última maior e momento último menor, a estimativa da tensão resistente foi pouco conservadora, com relação v_u/v_{Ed} de 1,17.

Para a laje L10, com dois furos de 200x200mm adjacentes aos menores lados do pilar e momento transferido paralelo ao maior lado, a norma também se mostrou pouco conservadora, com relação $v_u/v_{R,c}$ de 1,22. Para a laje L13, com a mesma geometria da L10, mas com carga última maior e momento último menor, a estimativa da tensão resistente foi menos conservadora, com relação $v_u/v_{R,c}$ de 1,25.

Com momento paralelo ao maior lado do pilar, mas com sentido contrário ao furo, para a laje L11 a estimativa da norma foi mais conservadora, com relação $v_u/v_{R,c}$ de 1,49.

Para a laje L17, com um furo de 300x200mm adjacente ao maior lado do pilar, com momento transferido paralelo ao menor lado do pilar e no sentido do furo, a estimativa foi moderadamente conservadora, com relação $v_u/v_{R,c}$ de 1,27. Já para a laje com dois furos adjacentes aos maiores lados e com transferência de momento paralela ao menor lado, a estimativa foi bastante conservadora, com relação $v_u/v_{R,c}$ igual a 2,34.

A média das relações $v_u/v_{R,c}$ para as lajes com furo(s) e transferência de momento foi de 1,39, com estimativas próximas dos resultados experimentais e outras distantes, a favor da segurança.

Tabela 7.15 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a resistente pelo EC/2004

Laje	u_1 (mm)	$v_{R,c}^{(1)}$ (MPa)	V_u (kN)	M_u (kN.m)	$v_{V_u}^{(2)}$ (MPa)	$v_{M_u}^{(3)}$ (MPa)	$v_u^{(4)}$ (MPa)	$v_u/v_{R,c}$
L14	2921	1,23	274	125,9	0,79	0,85	1,63	1,31
L15	2946	1,22	364	66,5	1,00	0,32	1,32	1,08
Média =								1,20
Desvio padrão =								0,16
Coeficiente de variação (%) =								13,7
$(1) v_{R,c} = 0,18k(100\rho f_{ck})^{1/3}$, $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$, $\rho_1 = \sqrt{\rho_{1x} \cdot \rho_{1y}} \leq 0,02$								
(2) tensão provocada pela carga de ruptura: $v_{V_u} = \frac{V_u}{u_1 d}$								
(3) tensão provocada pelo momento de ruptura: $v_{M_u} = \frac{KM_u}{W_1 d}$								
$(3) v_u = v_{V_u} + v_{M_u}$								

Tabela 7.16 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, com furo(s), e a estimada pelo EC/2004

Laje	u_1 (mm)	$v_{R,c}^{(1)}$ (MPa)	V_u (kN)	M_u (kN.m)	$v_{V_u}^{(2)}$ (MPa)	$v_{M_u}^{(3)}$ (MPa)	$v_u^{(4)}$ (MPa)	v_u/v_{Ed}
L8	2558	1,33	192	86,3	0,61	0,70	1,31	0,98
L10	2171	1,33	189	83,0	0,71	0,92	1,63	1,22
L11	2581	1,35	299	139,1	0,93	1,09	2,02	1,49
L12	2558	1,38	319	74,4	1,01	0,60	1,62	1,17
L13	2181	1,35	277	61,9	1,02	0,67	1,70	1,25
L17	2091	1,19	279	59,3	1,07	0,45	1,52	1,27
L18	1216	1,22	322	53,1	2,10	0,76	2,86	2,34
Média =								1,39
Desvio padrão =								0,44
Coeficiente de variação (%) =								31,9
$(1) v_{R,c} = 0,18k(100\rho f_{ck})^{1/3}$, $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$, $\rho_1 = \sqrt{\rho_{1x} \cdot \rho_{1y}} \leq 0,02$								
(2) tensão provocada pela carga de ruptura: $\tau_{V_u} = \frac{V_u}{u_1 d}$								
(3) tensão provocada pelo momento de ruptura: $\tau_{M_u} = \frac{KM_u}{W_1 d}$								
$(3) \tau_u = \tau_{V_u} + \tau_{M_u}$								

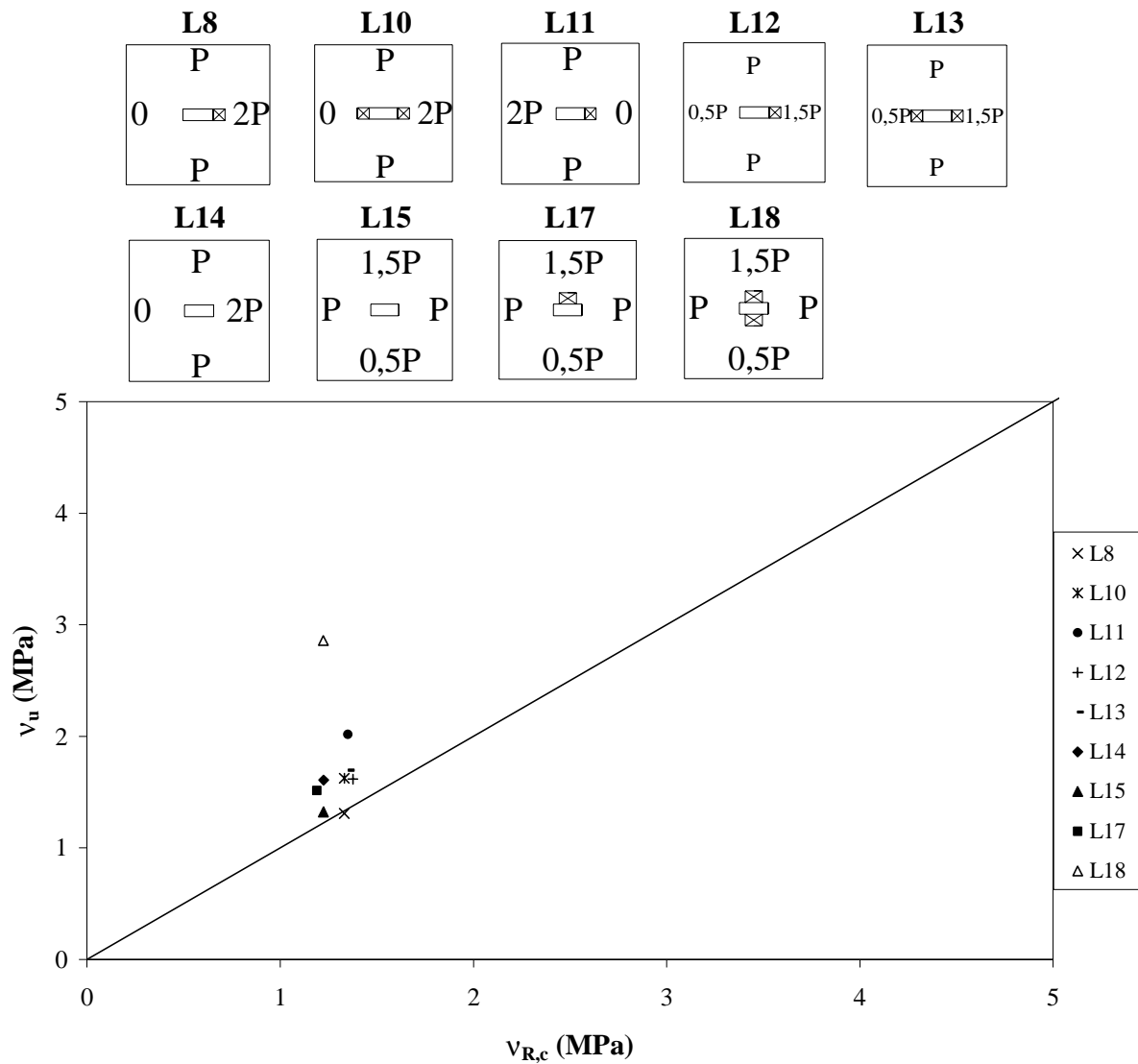


Figura 7.14 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pelo EC2/2004 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento

7.2.2.3 ACI-318:2005

Nas Tabelas 7.17 e 7.18 e na Figura 7.15 são mostrados os resultados das estimativas e as comparações com as cargas experimentais para as lajes da Série 2, com momento aplicado.

Para as lajes sem furo, a norma mostrou-se menos conservadora, com a média aritmética das relações $v_u/v_{u(AB)}$ igual a 1,25. A estimativa mais próxima da obtida experimentalmente foi para a laje L15, com momento transferido paralelo ao menor lado do pilar. A relação $v_u/v_{u(AB)}$ foi de 1,14.

A introdução de um furo adjacente ao menor lado do pilar levou a estimativas conservadoras. Para a laje L8, com momento no sentido do furo e uma excentricidade maior, aproximadamente o dobro que a da laje L12, a tensão atuante última foi 41% superior que a tensão resistente indicada pelo ACI-318:2005. Para a laje L12, a tensão última atuante foi 56% superior.

Com o momento no sentido contrário ao furo na laje L11, a estimativa foi mais conservadora com relação $v_u/v_{u(AB)}$ igual a 1,77.

A adição de outro furo, totalizando dois furos de 200x200mm adjacentes aos menores lados do pilar, levou a estimativas também conservadoras com relações $v_u/v_{u(AB)}$ iguais a 1,62 para L10 e 1,58 para L13. A laje L10 apresentou excentricidade maior em aproximadamente o dobro da L13.

Percebe-se que, para uma mesma geometria, analisando as lajes ensaiadas, a excentricidade aplicada no ensaio não trouxe grandes diferenças para as relações $v_u/v_{u(AB)}$.

Para as lajes com um furo adjacente ao maior lado do pilar e com transferência de momento paralela ao menor lado do pilar, como ocorrido na laje L17, o ACI-318:2005 também se mostrou conservador, com relação $v_u/v_{u(AB)}$ de 1,73. Com a introdução de outro furo adjacente ao outro maior lado, na laje L18, a estimativa foi ainda mais conservadora, com relação $v_u/v_{u(AB)}$ de 2,33.

A média das relações $v_u/v_{u(AB)}$ para as lajes com furo(s) e momento transferido ao pilar foi de 1,71, indicando tratar-se de uma norma conservadora para tais ligações.

Tabela 7.17 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a estimada pelo ACI-318:2005

Laje	b_0 (mm)	$V_c^{(1)}$ (kN)	$v_{u(AB)}^{(2)}$ (MPa)	V_u (kN)	M_u (kN.m)	$v_{V_u}^{(3)}$ (MPa)	$v_{M_u}^{(4)}$ (MPa)	$v_u^{(5)}$ (MPa)	$v_u/v_{u(AB)}$
L14	1884	450	1,99	274	125,9	1,21	1,52	2,74	1,36
L15	1892	468	2,01	364	66,5	1,56	0,73	2,29	1,14
Média =								1,25	
Desvio padrão =								0,15	
Coeficiente de variação (%) =								12,4	

(1) menor valor encontrado com a utilização das três equações seguintes:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \beta_c = 500/200 = 2,5$$

$$V_c = 0,083 \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \alpha_s = 40 \text{ (pilar interno)}$$

$$V_c = 0,33 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

$$(2) v_{u(AB)} = \frac{V_{cal}}{b_0 d}$$

$$(3) \text{ tensão provocada pela carga de ruptura: } v_{V_u} = \frac{V_u}{b_0 d}$$

$$(4) \text{ tensão provocada pelo momento de ruptura: } v_{M_u} = \frac{\gamma_v M_u C_{AB}}{J_c}$$

$$(5) v_u = v_{V_u} + v_{M_u}$$

Tabela 7.18 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, com furo(s), e a estimada pelo ACI-318:2005

Laje	b ₀ (mm)	V _c ⁽¹⁾ (kN)	v _{u(AB)} ⁽²⁾ (MPa)	V _u (kN)	M _u (kN.m)	v _{Vu} ⁽³⁾ (MPa)	v _{Mu} ⁽⁴⁾ (MPa)	v _u ⁽⁵⁾ (MPa)	v _u / v _{u(AB)}
L8	1643	362	1,79	192	86,3	0,95	1,64	2,59	1,41
L10	1394	307	1,79	189	83,0	1,10	1,80	2,90	1,62
L11	1650	382	1,85	299	139,1	1,45	2,23	3,68	1,77
L12	1643	380	1,88	319	74,4	1,58	1,66	3,24	1,56
L13	1397	320	1,85	277	61,9	1,60	1,32	2,92	1,58
L17	1412	323	1,83	279	59,3	1,58	2,02	3,60	1,73
L18	926	218	1,87	322	53,1	2,76	1,60	4,36	2,33
Média =									1,71
Desvio padrão =									0,30
Coeficiente de variação (%) =									17,2

⁽¹⁾ menor valor encontrado com a utilização das três equações seguintes:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \beta_c = 500/200 = 2,5$$

$$V_c = 0,083 \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d, \alpha_s = 40 \text{ (pilar interno)}$$

$$V_c = 0,33 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

$$\text{(2)} \quad v_{u(AB)} = \frac{V_{cal}}{b_0 d}$$

$$\text{(3)} \quad \text{tensão provocada pela carga de ruptura: } \tau_{V_u} = \frac{V_u}{b_0 d}$$

$$\text{(4)} \quad \text{tensão provocada pelo momento de ruptura: } \tau_{M_u} = \frac{\gamma_v M_u C_{AB}}{J_c}$$

$$\text{(5)} \quad \tau_u = \tau_{V_u} + \tau_{M_u}$$

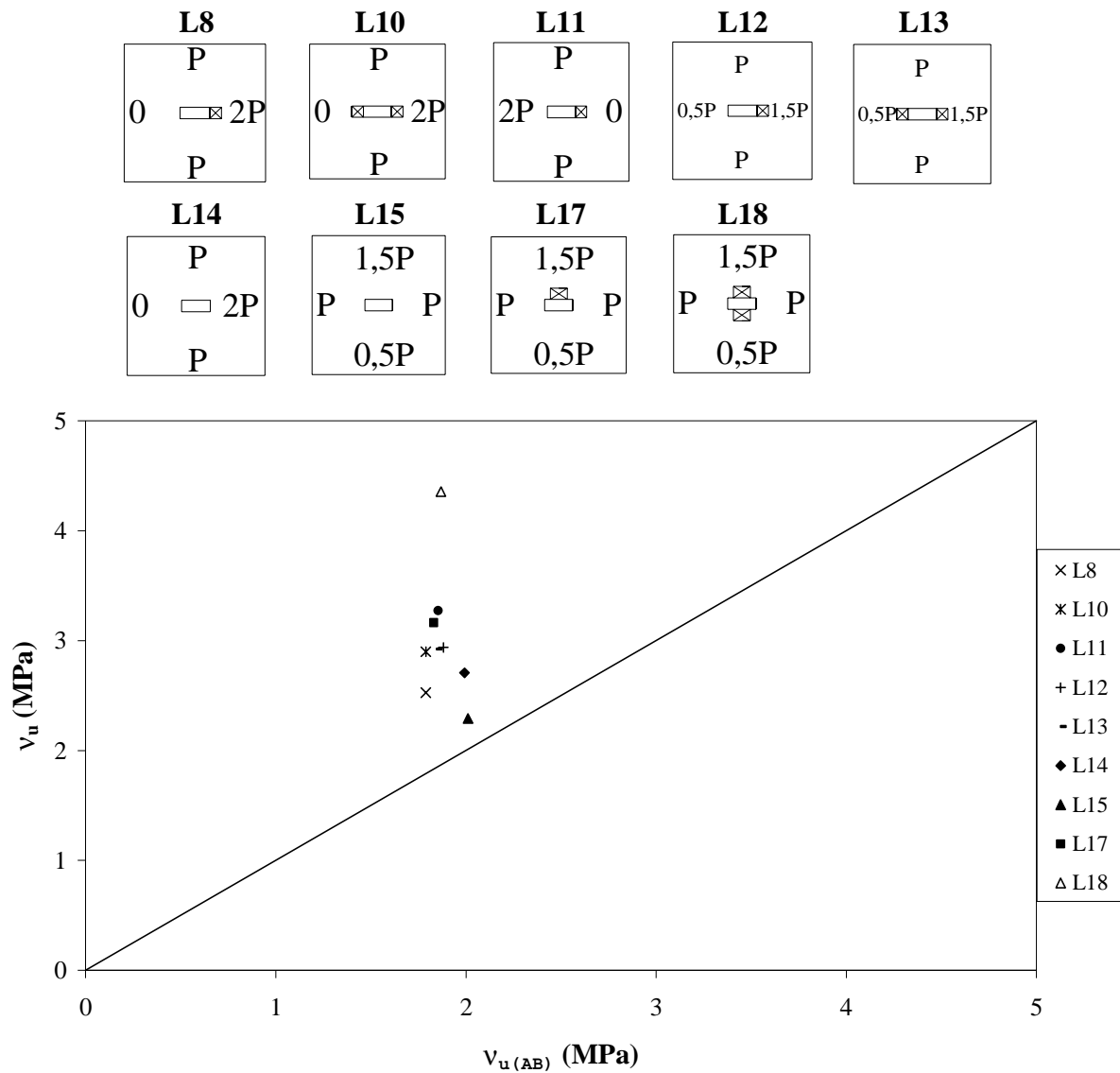


Figura 7.15 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{u(AB)}$) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento

7.2.2.4 NBR 6118:2003

Os resultados das estimativas para as lajes da Série 2, com momento aplicado, e as comparações com as cargas experimentais são mostradas nas Tabelas 7.19 e 7.20 e na Figura 7.16.

Para as lajes sem furo, quando transferido momento paralelo ao maior lado do pilar, caso da laje L14, a estimativa da norma foi inferior ao obtido experimentalmente, com relação τ_u/τ_{r1} igual a 1,14. Para a laje L15, com transferência de momento paralela ao menor

lado do pilar e com momento resistente inferior, a estimativa foi **contra a segurança**, porém não muito distante do resultado experimental, com relação τ_u/τ_{r1} de 0,94.

A introdução de um furo adjacente ao menor lado do pilar e transferência de momento paralela ao maior lado do pilar no sentido da região com furo, na laje L8, levou a uma estimativa de tensão **contra a segurança**, ou seja, superior à obtida experimentalmente, com relação τ_u/τ_{r1} de 0,86. Para a laje L12, com o mesmo furo e momento no mesmo sentido, porém com uma menor excentricidade de carga, a estimativa da tensão resistente da NBR 6118:2003 foi bastante próxima da tensão atuante, com relação τ_u/τ_{r1} de 1,02.

Para a laje L11, com o mesmo furo da laje L8, momento transferido na mesma direção e com mesma excentricidade de carga, porém no sentido contrário ao furo, a estimativa da norma foi moderadamente conservadora com relação τ_u/τ_{r1} igual a 1,30.

Com a introdução de outro furo, no outro menor lado do pilar, caso das lajes L10 e L13, as estimativas foram bastante próximas das obtidas experimentalmente, com relações τ_u/τ_{r1} iguais a 1,06 e 1,09, respectivamente.

Para a situação de um furo adjacente ao maior lado do pilar e transferência de momento paralela ao menor lado do pilar, no sentido do furo, na laje L17, a estimativa da tensão resistente foi bastante próxima da tensão atuante última, com relação τ_u/τ_{r1} de 1,11. A introdução de outro furo, na laje L18, levou a estimativa bastante conservadora, com relação τ_u/τ_{r1} igual a 1,11.

A média das relações τ_u/τ_{r1} para as lajes com furo(s) e transferência de momento foi de 1,21, com estimativas conservadoras e uma contra a segurança.

Tabela 7.19 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, sem furo, e a estimada pela NBR 6118:2003

Laje	C' (mm)	$\tau_{r1}^{(1)}$ (MPa)	V _u (kN)	M _u (kN.m)	$\tau_{V_u}^{(2)}$ (MPa)	$\tau_{M_u}^{(3)}$ (MPa)	$\tau_u^{(4)}$ (MPa)	τ_u/τ_{r1}
L14	2921	1,42	274	125,9	0,79	0,85	1,63	1,14
L15	2946	1,41	364	66,5	1,00	0,32	1,32	0,94
Média =								1,04
Desvio padrão =								0,14
Coeficiente de variação (%) =								13,4
⁽¹⁾ $\tau_{r1} = 0,13.1,4.(1 + \sqrt{200/d})(100pf_{ck})^{1/3}$								
⁽²⁾ tensão provocada pela carga de ruptura: $\tau_{V_u} = \frac{V_u}{ud}$								
⁽³⁾ tensão provocada pelo momento de ruptura: $\tau_{M_u} = \frac{KM_u}{W_p d}$								
⁽³⁾ $\tau_u = \tau_{V_u} + \tau_{M_u}$								

Tabela 7.20 – Comparação entre a tensão experimental das lajes da Série 2, com furo(s), e a estimada pela NBR 6118:2003

Laje	C' (mm)	$\tau_{r1}^{(1)}$ (MPa)	V _u (kN)	M _u (kN.m)	$\tau_{V_u}^{(2)}$ (MPa)	$\tau_{M_u}^{(3)}$ (MPa)	$\tau_u^{(4)}$ (MPa)	τ_u/τ_{r1}
L8	2558	1,53	192	86,3	0,61	0,70	1,31	0,86
L10	2171	1,53	189	83,0	0,71	0,92	1,63	1,06
L11	2581	1,55	299	139,1	0,93	1,09	2,02	1,30
L12	2558	1,58	319	74,4	1,01	0,60	1,62	1,02
L13	2181	1,55	277	61,9	1,02	0,67	1,70	1,09
L17	2091	1,36	279	59,3	1,07	0,45	1,52	1,11
L18	1216	1,40	322	53,1	2,10	0,76	2,86	2,05
Média =								1,21
Desvio padrão =								0,39
Coeficiente de variação (%) =								32,2
⁽¹⁾ $\tau_{r1} = 0,13.1,4.(1 + \sqrt{200/d})(100pf_{ck})^{1/3}$								
⁽²⁾ tensão provocada pela carga de ruptura: $\tau_{V_u} = \frac{V_u}{ud}$								
⁽³⁾ tensão provocada pelo momento de ruptura: $\tau_{M_u} = \frac{KM_u}{W_1 d}$								
⁽³⁾ $\tau_u = \tau_{V_u} + \tau_{M_u}$								

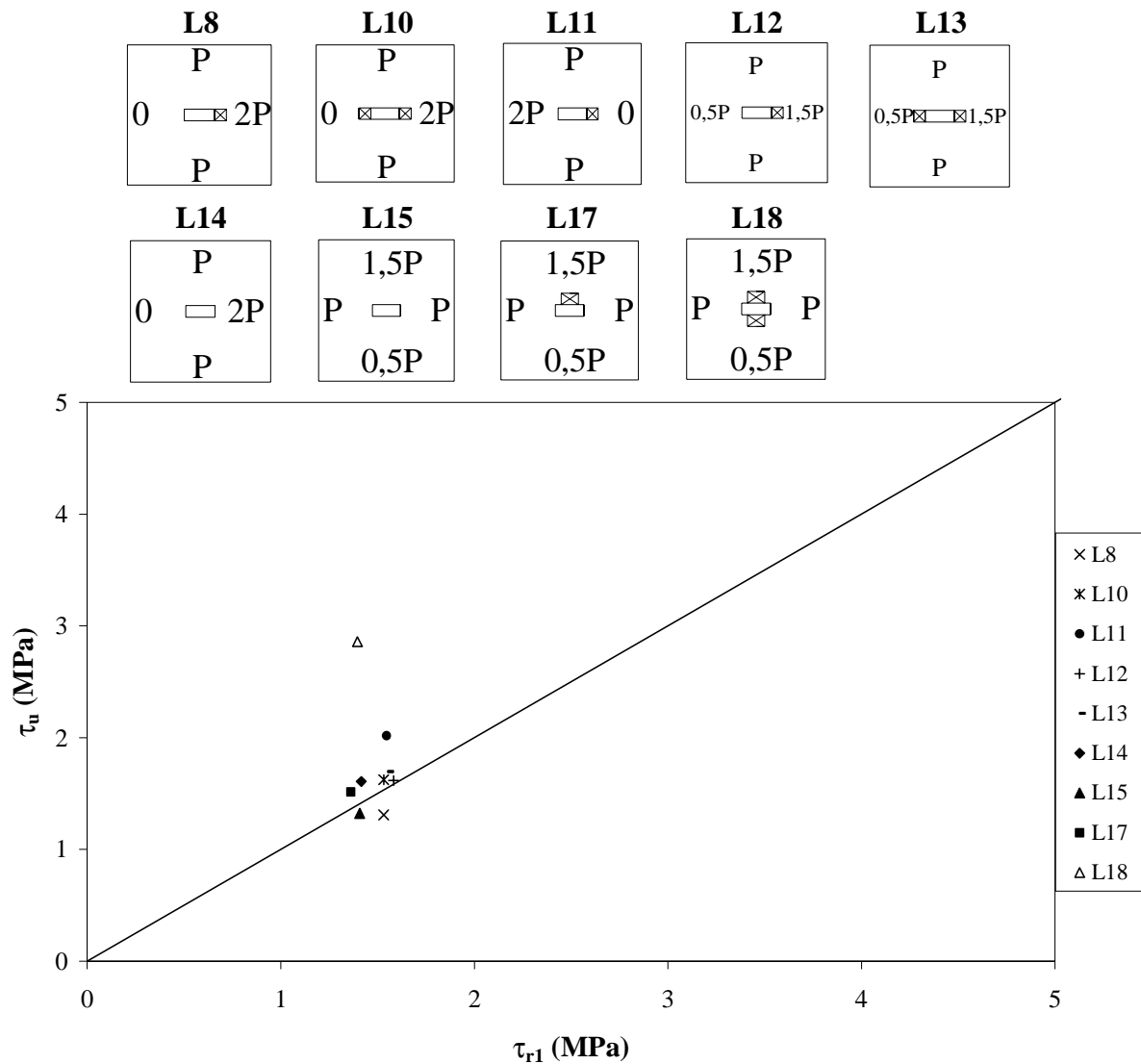


Figura 7.16 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento

7.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS ESTUDADAS

7.3.1 Lajes da Série 1 – sem transferência de momento

Com o objetivo de comparar os resultados das normas apresentadas nos itens anteriores, as Tabelas 7.21 a 7.23 apresentam uma comparação entre as normas, a partir das relações entre carga última “versus” carga calculada e tensão última atuante “versus” tensão resistente, para as lajes da Série 1. A Figura 7.17 apresenta graficamente esse resultado.

Tabela 7.21 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para a laje L1, da Série 1

Laje	V_u (kN)	CEB	EC2	ACI –318	NBR 6118
		1990	2004	2005	2003
		V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}
L1	475	1,00	1,14	1,11	0,99

Tabela 7.22 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para as lajes da Série 1 com furo(s)

Laje	V_u (kN)	EC2	ACI –318	NBR 6118
		2004	2005	2003
		V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}
L2	240	0,79	0,83	0,69
L3	250	0,68	0,77	0,59
L4	237	0,86	0,74	0,75
L7	455	1,06	1,21	0,92
L9	375	1,05	1,22	0,92
L16	474	1,42	1,32	1,24
L19	411	2,16	1,84	1,89
Média		1,15	1,13	1,00
Desvio Padrão		0,51	0,39	0,45
Coef. Var. (%)		44,3	34,8	44,6

Tabela 7.23 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para as lajes da Série 1 com furo e armadura de cisalhamento

Laje	V_u (kN)	EC2	ACI –318	NBR 6118
		2004	2005	2003
		V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}
L5	416	1,02	1,32	0,84
L6	425	1,06	1,36	0,88
Média		1,04	1,34	1,04
Desvio Padrão		0,03	0,03	0,14
Coef. Var. (%)		3,1	1,9	13,4

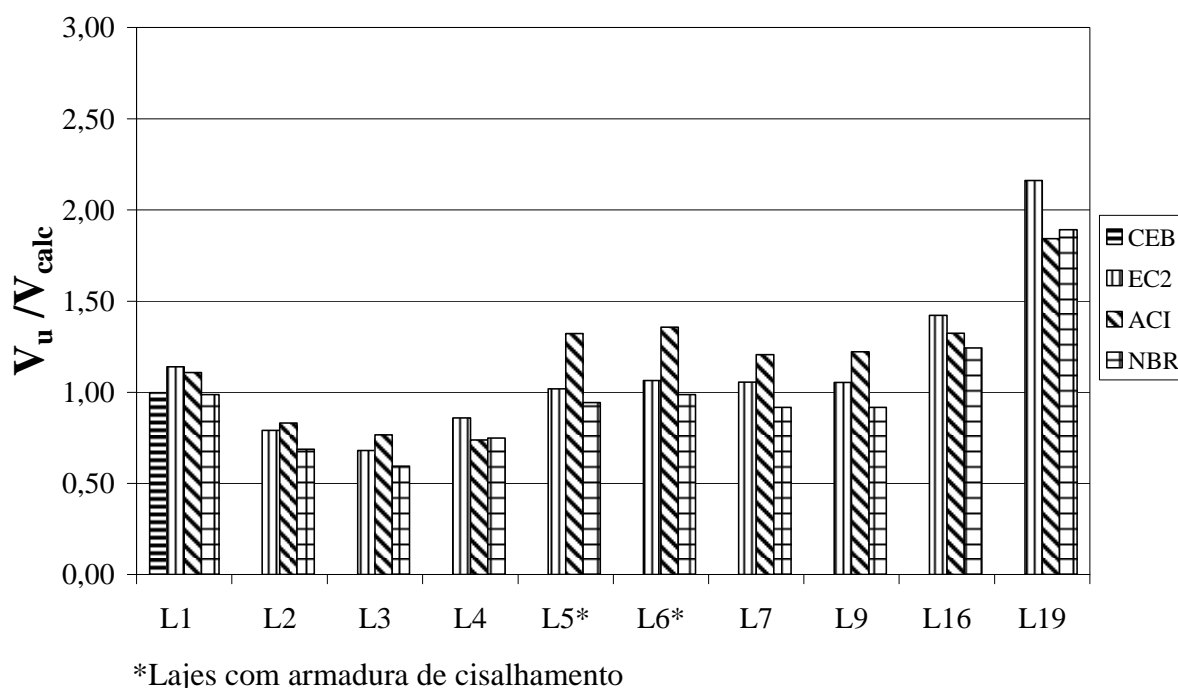


Figura 7.17 – Comparação entre as relações cargas experimentais e estimadas com as normas V_u/V_{calc} , para as lajes da Série 1

A norma americana, ACI-318:2003, mostrou-se mais conservadora para todas as lajes da Série 1, exceto para a laje com dois furos de 300x200mm adjacentes aos maiores lados do pilar, L19.

As estimativas, para a laje L1, de todas as normas foram bastante próximas do resultado experimental, mostrando que as normas estão próximas da precisão para a ligação laje-pilar retangular com as dimensões ensaiadas e sem furo adjacente ao pilar.

Todas as lajes apresentaram estimativas **contra a segurança** para as lajes com furo quadrado de 400mm de lado, adjacente ao menor lado do pilar, L2, L3 e L4. A norma brasileira apresentou relações V_u/V_{calc} menores, seguida pelo EC2/2004 e ACI-318:2005.

Para um furo quadrado menor, 200mm de lado, adjacente ao menor lado do pilar, como é o caso da L7, as estimativas do EC2/2004 e ACI-318:2005 foram próximas da carga experimental. Já a norma brasileira, NBR 6118:2003, apresentou estimativas **contra a segurança**. O mesmo ocorreu para a laje L9 com dois furos quadrados, com 200mm de lado, adjacentes aos menores lados do pilar.

A situação de um furo adjacente ao maior lado do pilar, laje L16, implicou em estimativas mais próximas do resultado experimental para todas as normas. E, a situação com dois furos de 300x200mm, adjacentes aos maiores lados do pilar, laje L19, resultou em

estimativas muito conservadoras para todas as normas. Como comentado por REGAN (1999), as normas indicam uma redução do perímetro crítico muito conservadora, para esse tipo de situação de furo.

A norma brasileira também apresentou valores ligeiramente acima dos experimentais para as lajes com furo de 400mm de lado, adjacente ao menor lado do pilar, com armadura de cisalhamento. O EC2 e o ACI apresentaram estimativas próximas dos resultados experimentais, um pouco abaixo.

As médias das relações V_u/V_{calc} de todas as normas, para lajes com furo, foram próximas da unidade ou igual a 1,00 (norma brasileira), mas os desvios padrões e os coeficientes de variação foram altos, indicando que as normas não estão apropriadas para os diferentes tipos de situações de furo.

Fazendo os cálculos, para todas as normas, retirando a laje L19 que teve resultados das relações V_u/V_{calc} muito acima das médias, temos as seguintes médias dessas relações para o EC2, ACI e NBR, respectivamente: 0,98, 1,01 e 0,85. Esses resultados indicam que as normas são muito conservadoras para as localizações de furos utilizadas nessa laje, como comentado anteriormente, porque diminuem muito o perímetro crítico. Isso demonstra que as normas deveriam ter tratamento distinto para os diversos tipos de furos e localizações.

7.3.2 Lajes da Série 2 – com transferência de momento

As Tabelas 7.24 e 7.25 apresentam uma comparação das relações entre carga última “versus” carga calculada e tensão última atuante “versus” tensão resistente, para as lajes das Séries 2, obtidas com a utilização das normas estudadas. A Figura 7.18 apresenta graficamente esse resultado.

Para as lajes sem furo, as estimativas das normas estiveram próximas das obtidas experimentalmente. Todas as normas apresentaram-se a favor da segurança quando o momento foi transferido paralelo ao maior lado do pilar, onde a ligação laje-pilar apresenta maior rigidez. No caso do momento transferido paralelo ao menor lado, a NBR 6118:2003 e o CEB-FIP/MC1990 apresentaram relações de Tensão atuante / Tensão resistente iguais a 0,95 e 0,94, respectivamente. Estas estimativas foram próximas à de ensaio, porém **contra a segurança**.

Para as lajes com furo e transferência de momento, algumas observações podem ser feitas:

- A NBR 6118:2003 teve estimativas próximas das obtidas em ensaio, com exceção das estimativas para as lajes: L8 que foi contra a segurança, com relação τ_u/τ_{r1} igual a 0,86; e da laje L18, com resultado conservador, relação τ_u/τ_{r1} igual a 2,05;
- O EC2/2004, baseado no CEB-FIP/MC1990, assim como a norma brasileira, mas com algumas limitações impostas, como a limitação do fator k (menor ou igual a 2), mostrou estimativas sempre um pouco mais conservadoras. Apenas para a laje L8 a estimativa foi um pouco superior ao resultado experimental, porém bastante próximo, com $\tau_u/\tau_{R,c}$ igual a 0,98;
- A média da relação tensão atuante última por tensão admissível para o EC2/2004 e a NBR 6118:2003 foram próximas da unidade, 1,31 e 1,21, respectivamente, porém os desvios padrões e os coeficientes de variação foram altos;
- O ACI-318:2005 mostrou-se conservador para todas as situações. A média foi alta, porém o desvio padrão e o coeficiente de variação foram moderados, indicando que esta norma está com estimativas mais uniformes, para todas as situações de furos e momentos ensaiadas nessa pesquisa.

Tabela 7.24 – Comparação entre as relações tensão última atuante e tensão admissível pelas normas, para as lajes da Série 2, sem furo

Laje	V_u (kN)	U_m (kN.m)	CEB	EC2	ACI –318	NBR 6118
			1990	2004	2005	2003
			τ_u/τ_R	$V_u/V_{R,c}$	$V_u/V_{u(AB)}$	τ_u/τ_{r1}
L14	274	125,9	1,15	1,31	1,36	1,14
L15	364	66,5	0,95	1,08	1,14	0,94
Média			1,05	1,20	1,25	1,04
Desvio Padrão			0,14	0,16	0,15	0,14
Coef. Var. (%)			13,4	13,7	12,4	13,4

Tabela 7.25 – Comparação entre as relações tensão última atuante e tensão admissível pelas normas, para as lajes da Série 2, com furo(s)

Laje	V_u (kN)	M_u (kN.m)	EC2	ACI-318	NBR 6118
			2004	2005	2003
			$V_u/V_{R,c}$	$V_u/V_{u(AB)}$	τ_u/τ_{r1}
L8	192	86,3	0,98	1,41	0,86
L10	189	83,0	1,22	1,62	1,06
L11	299	139,1	1,49	1,77	1,30
L12	319	74,4	1,17	1,56	1,02
L13	277	61,9	1,25	1,58	1,09
L17	279	59,3	1,27	1,73	1,11
L18	322	53,1	2,34	2,33	2,05
Média			1,39	1,71	1,21
Desvio Padrão			0,44	0,30	0,39
Coef. Var. (%)			31,9	17,2	32,2

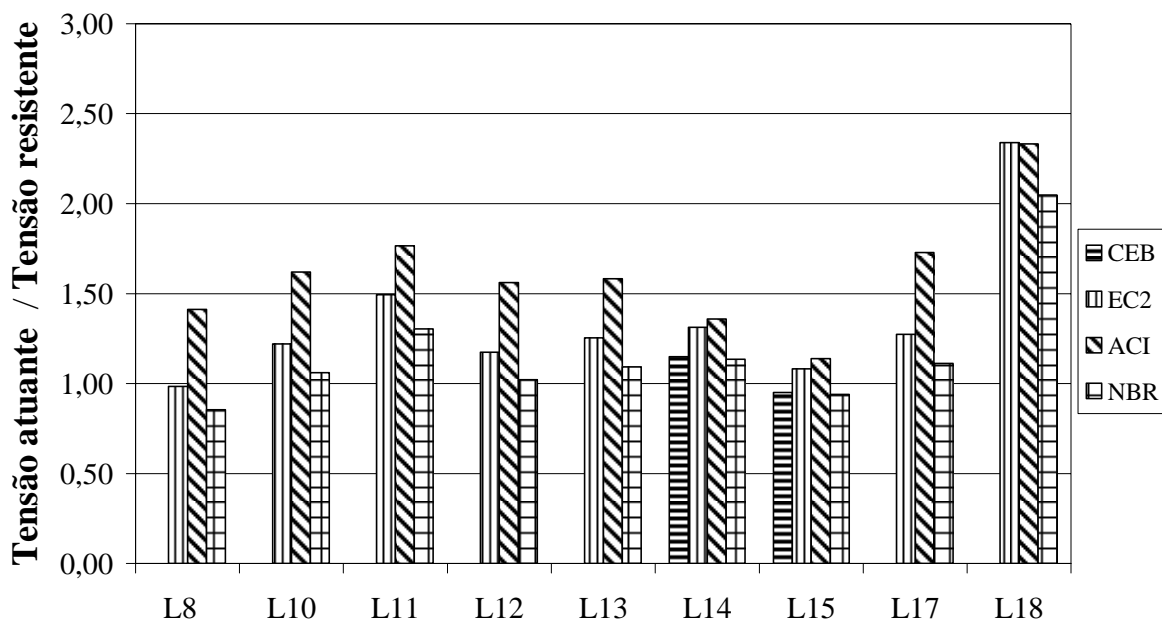


Figura 7.18 – Comparação entre as relações tensão última atuante e tensão resistente pelas normas, para as lajes da Série 2

Fazendo os cálculos, para todas as normas, retirando a laje L18 que teve resultados das relações Tensão atuante / Tensão resistente muito acima das médias, temos as seguintes médias dessas relações para o EC2, ACI e NBR, respectivamente: 1,23, 1,61 e 1,07. Esses resultados indicam que as normas são muito conservadoras para as localizações de furos utilizadas nessa laje, como comentado anteriormente, porque diminuem muito o perímetro crítico. Isso demonstra que as normas deveriam ter tratamento distinto para os diversos tipos de furos e localizações.

7.4 SUGESTÃO PARA A NBR 6118:2003 PARA O CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) SEM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO

A sugestão aqui apresentada baseia-se na indicação que a NBR 6118:2003 apresenta para o cálculo de punção em ligações laje-pilar de borda, que apresenta a mesma situação da laje com furo, em que o centro de gravidade da seção crítica não coincide com o eixo do pilar. A norma sugere que seja descontado o momento M_{sd}^* , resultante da excentricidade do perímetro crítico reduzido u^* em relação ao centro do pilar. A Figura 7.19 apresenta os perímetros crítico (u) e crítico reduzido (u^*) para as ligações laje-pilar de borda. A tensão solicitante é dada pelas Equações 7.12 e 7.13.

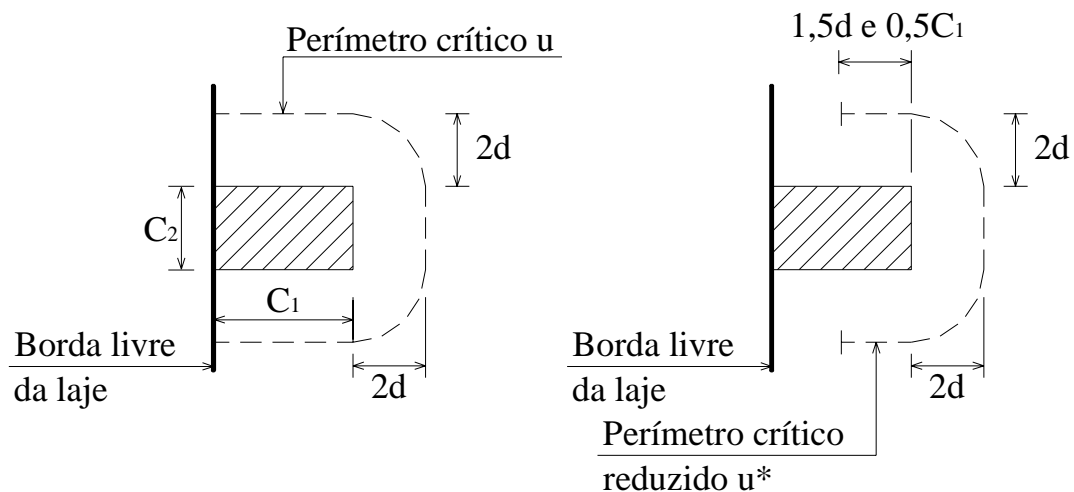


Figura 7.19 – Perímetros crítico (u) e crítico reduzido (u^*) para as ligações laje-pilar de borda

Tensões solicitantes, indicadas pela NBR 6118:2003, para ligações laje-pilar de borda quando não agir momento paralelo à borda livre:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} + \frac{K_1 M_{Sd1}}{W_{p1} d} \quad (7.12)$$

onde:

$$M_{Sd1} = (M_{Sd} - M_{Sd}^*) \geq 0$$

F_{Sd} é a reação de apoio;

u^* é o perímetro crítico reduzido;

M_{Sd} é o momento de cálculo no plano perpendicular à borda livre;

M_{Sd}^* é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico reduzido u^* em relação ao centro do pilar;

W_{p1} é o módulo de resistência plástica perpendicular à borda livre, calculado para o perímetro crítico u .

O coeficiente K_1 assume os valores estabelecidos para K na Tabela 2.2, com C_1 e C_2 de acordo com a Figura 7.19.

Tensões solicitantes, indicadas pela NBR 6118:2003, para ligações laje-pilar de borda quando agir momento paralelo à borda livre:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} + \frac{K_1 M_{Sd1}}{W_{p1} d} + \frac{K_2 M_{Sd2}}{W_{p2} d} \quad (7.13)$$

onde:

M_{Sd} é o momento de cálculo no plano paralelo à borda livre;

W_{p1} é o módulo de resistência plástica paralelo à borda livre, calculado para o perímetro crítico u .

O coeficiente K_2 assume os valores estabelecidos para K na Tabela 2.2, substituindo-se C_1/C_2 por $C_2/2C_1$ (sendo C_1 e C_2 estabelecidos na Figura 7.19).

Ao contrário da indicação da norma, que recomenda subtrair o momento resultante da excentricidade do perímetro crítico reduzido u^* em relação ao centro do pilar, M_{Sd}^* , a proposta aqui formulada indica a **adição** do momento M_{Sd}^* . Para a proposta, o momento M_{Sd}^* é o momento resultante da excentricidade do perímetro crítico u , da laje com furo, em relação ao centro do pilar. Esta excentricidade pode ser vista nas Figuras 7.11(a), 7.12(a).

Portanto, a sugestão aqui apresentada propõe que seja adicionado ao carregamento atuante, o momento provocado pela excentricidade do perímetro crítico em relação ao centro do pilar devido à introdução de furo. O momento, M_{Sd}^* , é calculado pela multiplicação da reação de apoio (F_{Sd}) pela excentricidade do centróide do perímetro crítico, u , em relação ao eixo do pilar.

A tensão solicitante para a presente sugestão deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} + \frac{KM_{Sd}^*}{W_p d} \quad (7.14)$$

onde:

F_{Sd} é a reação de apoio;

u é o perímetro crítico;

M_{Sd}^* é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico u em relação ao centro do pilar;

W_p é o módulo de resistência da seção crítica.

Quando houver excentricidade da seção crítica nas duas direções, a tensão solicitante para a presente sugestão deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} + \frac{K_1 M_{Sd1}^*}{W_{p1} d} + \frac{K_2 M_{Sd2}^*}{W_{p2} d} \quad (7.15)$$

onde:

M_{Sd1}^* é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico u em relação ao centro do pilar na direção paralela ao maior lado do pilar;

M_{Sd2}^* é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico u em relação ao centro do pilar na direção paralela ao menor lado do pilar;

W_{p1} é o módulo de resistência da seção crítica na direção paralela ao maior lado do pilar;

W_{p2} é o módulo de resistência da seção crítica na direção paralela ao menor lado do pilar.

O coeficiente K_1 assume os valores estabelecidos para K na Tabela 2.2, com C_1 e C_2 sendo as dimensões do pilar paralela e perpendicular à direção do momento transferido da laje ao pilar, respectivamente;

O coeficiente K_2 assume os valores estabelecidos para K na Tabela 2.2, substituindo-se C_1/C_2 por $C_2/2C_1$.

A Tabela 7.26 apresenta a comparação entre a tensão admissível fornecida pela NBR 6118:2003 e a tensão última obtida com a atual sugestão, considerando a carga última, V_u , e o momento causado pela excentricidade da reação de apoio em relação ao eixo do pilar, M_u^* . Na Figura 7.20 essa comparação é mostrada graficamente.

Tabela 7.26 – Comparação entre a tensão solicitante proposta para as lajes da Série 1, com furo(s), e a tensão admissível estimada pela NBR 6118:2003

Laje	C' (mm)	e* ⁽¹⁾ (mm)	τ_{r1} ⁽²⁾ (MPa)	V _u (kN)	M _u * (Kn.m)	τ_{Vu} ⁽³⁾ (MPa)	τ_{Mu} * ⁽⁴⁾ (MPa)	τ_u ⁽⁵⁾ (MPa)	τ_u/τ_{r1}
L2	2255	144	1,26	240	34,5	0,87	0,34	1,20	0,95
L3	2275	145	1,48	250	36,1	0,88	0,34	1,22	0,82
L4	2265	144	1,13	237	34,2	0,84	0,33	1,17	1,04
L7	2558	78	1,58	455	35,5	1,45	0,29	1,73	1,10
L9	2171	0	1,53	375	0,0	1,40	0,00	1,40	0,92
L16	2091	144	1,46	474	68,2	1,81	0,52	2,33	1,60
L19	1216	0	1,42	411	0,0	2,68	0,00	2,68	1,89
Média =									1,19
Desvio padrão =									0,40
Coeficiente de variação (%) =									33,5

⁽¹⁾ e* - excentricidade do centróide do perímetro crítico em relação ao eixo do pilar

⁽²⁾ $M_u^* = V_u \cdot e^*$

$$\tau_{r1} = 0,13.1,4 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100\rho f_{ck})^{1/3}$$

⁽⁴⁾ tensão provocada pela carga de ruptura: $\tau_{Vu} = \frac{V_u}{ud}$

⁽⁵⁾ tensão provocada pelo momento M_u^* : $\tau_{Mu} = \frac{KM_u^*}{W_p d}$

⁽⁶⁾ $\tau_u = \tau_{Vu} + \tau_{Mu}$

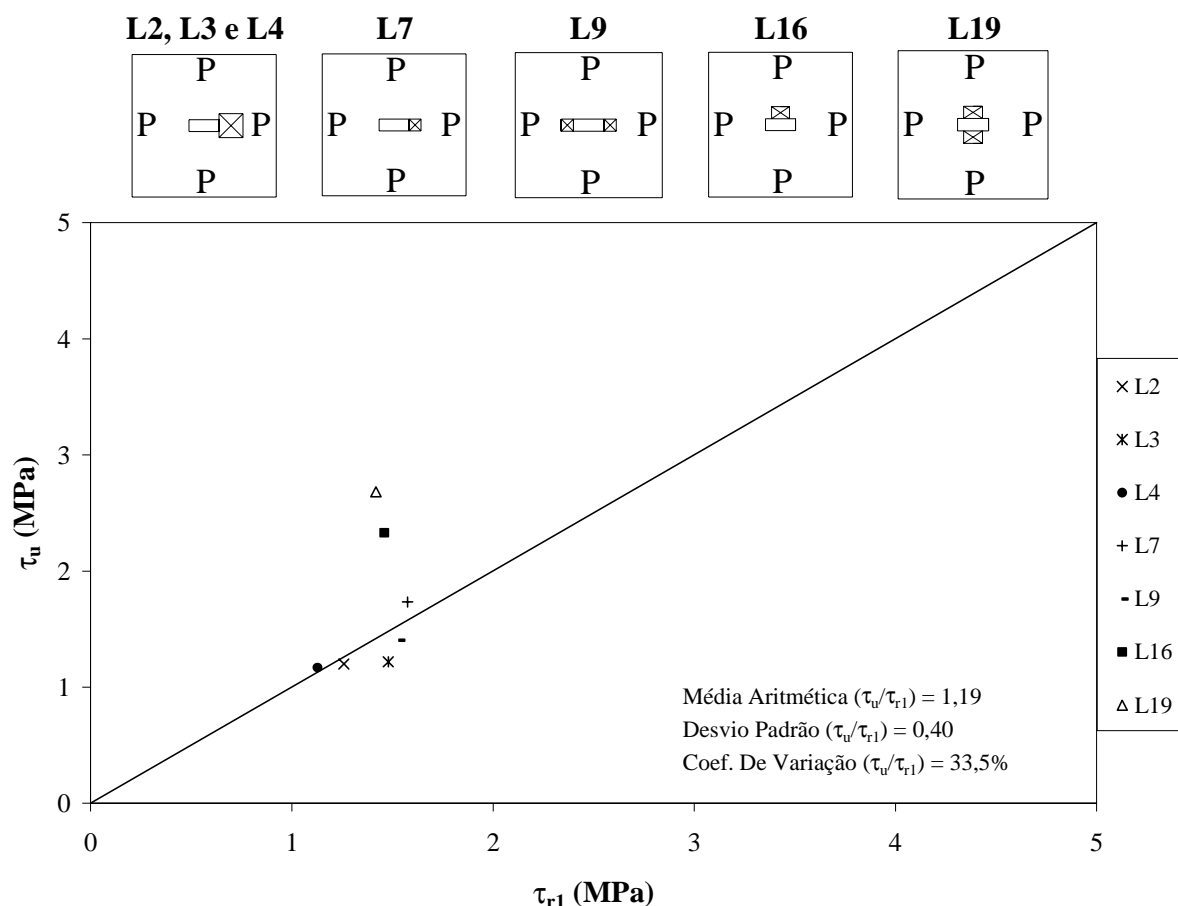


Figura 7.20 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela proposta para NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 com furo(s)

Com o centro de gravidade do perímetro crítico coincidindo com o eixo do pilar, nas lajes com dois furos da presente pesquisa, as tensões últimas atuantes foram iguais às da NBR 6118:2003, sem modificações. Mas, para as lajes com um furo, as tensões últimas atuantes aumentaram, estimando relações τ_u/τ_{r1} mais elevadas, comparando com as relações de V_u/V_{calc} para a norma sem alteração, ou seja, tornando a norma mais conservadora e segura.

Com um furo de 200x200mm adjacente ao menor lado do pilar, na laje L7, a estimativa da tensão admissível foi inferior à tensão última, com relação τ_u/τ_{r1} de 1,10. A aplicação da norma sem a sugestão descrita apresentou relação V_u/V_{calc} igual a 0,92, contra a segurança. Para a laje L16, com um furo de 300x200mm, adjacente ao maior lado do pilar, a relação τ_u/τ_{sd} foi de 1,60, mais conservadora que a aplicação da norma sem a sugestão que apresentou relação V_u/V_{calc} igual a 1,24.

Para as lajes com furo de 400mm adjacente ao menor lado do pilar, lajes L2, L3 e L4, as relações τ_u/τ_{r1} foram iguais a 0,95, 0,82 e 1,04, respectivamente. A maior diferença entre essas lajes está na taxa de armadura, ρ , igual a 0,87 para L2, 1,17 para L3 e 0,52 para L4.

Diante destes resultados, visto que a taxa de armadura não influenciou em grande ganho de resistência nos resultados experimentais entre as lajes L2, L3 e L4, e que para o equacionamento da norma, a taxa de armadura leva a uma grande alteração na resistência, **ainda será adicionada uma limitação para a tensão resistente, da taxa de armadura, ρ , de 0,50%, para todas as ligações com furo adjacente ao pilar, cujo furo ultrapasse esta dimensão adjacente do pilar.**

Na Tabela 7.27 e na Figura 7.21 são mostradas as comparações da tensão admissível fornecida pela NBR 6118:2003 com a limitação da taxa de armadura, $\rho \leq 0,50\%$, e a tensão última obtida com a atual sugestão, considerando a carga última, V_u , e o momento causado pela excentricidade da reação de apoio em relação ao eixo do pilar, M_u^* . Na Figura 7.25 essa comparação é mostrada graficamente.

Com a sugestão de adicionar o momento M_{sd}^* e com a limitação da taxa de armadura de 0,50% na tensão admissível das lajes L2, L3 e L4 (com furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar), apenas a relação τ_u/τ_{r1} para a laje L9 apresentou resultado contra a segurança, 0,92. A média das relações τ_u/τ_{r1} foi igual a 1,26, o desvio padrão 0,35 e o coeficiente de variação 27,9%.

Tabela 7.27 – Comparação entre a tensão solicitante proposta para as lajes da Série 1, com furo(s), e a tensão admissível estimada pela NBR 6118:2003 com a limitação da taxa de armadura de: $\rho \leq 0,50\%$

Laje	C' (mm)	e* ⁽¹⁾ (mm)	τ_{r1} ⁽²⁾ (MPa)	V _u (kN)	M _u * (kN.m)	τ_{Vu} ⁽³⁾ (MPa)	τ_{Mu} * ⁽⁴⁾ (MPa)	τ_u ⁽⁵⁾ (MPa)	τ_u/τ_{Sd}
L2	2255	144	1,11	240	34,5	0,87	0,34	1,20	1,15
L3	2275	145	1,05	250	36,1	0,88	0,34	1,22	1,09
L4	2265	144	1,11	237	34,2	0,84	0,33	1,17	1,05
L7	2558	78	1,11	455	35,5	1,45	0,29	1,73	1,10
L9	2171	0	1,10	375	0,0	1,40	0,00	1,40	0,92
L16	2091	144	1,07	474	68,2	1,81	0,52	2,33	1,60
L19	1216	0	1,16	411	0,0	2,68	0,00	2,68	1,89
Média =									1,26
Desvio padrão =									0,35
Coeficiente de variação (%) =									27,9

⁽¹⁾ e* - excentricidade do centróide do perímetro crítico em relação ao eixo do pilar

⁽²⁾ $M_u^* = V_u \cdot e^*$

$$\tau_{r1} = 0,13.1,4 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) (100\rho f_{ck})^{1/3}$$

⁽⁴⁾ tensão provocada pela carga de ruptura: $\tau_{Vu} = \frac{V_u}{u_1 d}$

⁽⁵⁾ tensão provocada pelo momento M_u^* : $\tau_{Mu} = \frac{KM_u^*}{W_p d}$

⁽⁶⁾ $\tau_u = \tau_{Vu} + \tau_{Mu}$

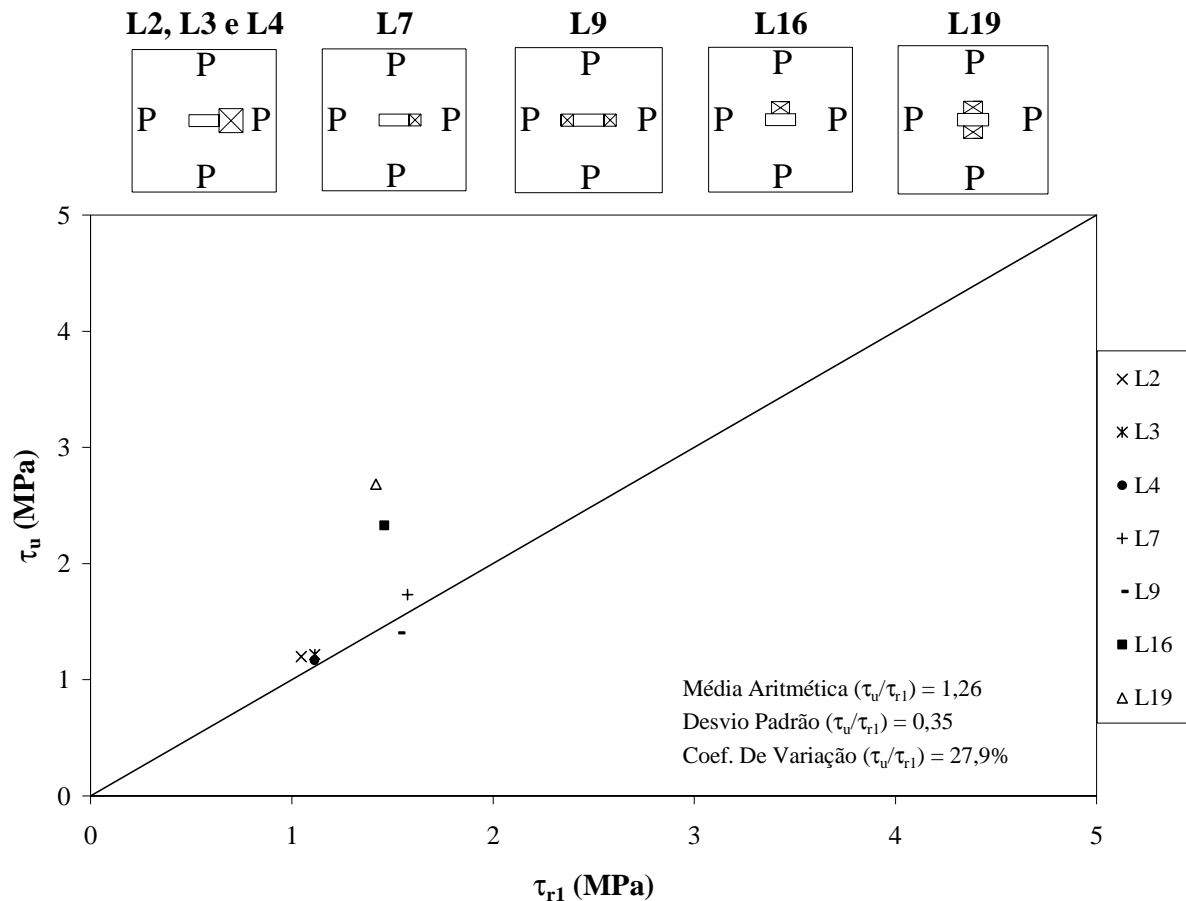


Figura 7.21 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela proposta para NBR 6118:2003 com limitação da taxa de armadura ($\rho \leq 0,50\%$) - lajes da Série 1 com furo(s)

7.5 SUGESTÃO PARA O EUROCODE 2/2004 E O ACI-318:2005 PARA O CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) SEM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO

A sugestão para o EUROCODE 2/2004 e para o ACI-318:2005 é baseada na sugestão mostrada no item anterior, 7.4. Portanto, em cada norma deve-se adicionar ao carregamento atuante, o momento resultante da excentricidade do perímetro crítico adotado por cada norma, M_{Sd}^* .

No EUROCODE 2/2004 deve-se manter, no cálculo da tensão resistente admissível, a limitação da taxa de armadura, porém, essa limitação deverá ser de 0,90%. No ACI-318:2005, como a norma não trata da taxa de armadura em suas formulações, não é necessária nenhuma limitação.

7.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS ESTUDADAS, A PROPOSTA DE BORGES, AS PROPOSTAS APRESENTADAS PARA AS NORMAS E UMA ALTERAÇÃO NA PROPOSTA DE BORGES, PARA LAJES COM FURO(S), SEM TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO E SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA

Neste item serão comparadas as relações V_u/V_{calc} e as relações Tensão atuante / Tensão resistente, obtidas com a aplicação das normas apresentadas e as obtidas com as propostas para as normas, para as lajes da presente pesquisa e para as encontradas na literatura, mostradas no Capítulo 2. Também são mostradas na comparação as estimativas, utilizando a proposta de BORGES (2004) para a NBR 6118:2003, e utilizando a proposta de BORGES (2004) com a mesma limitação da taxa de armadura de 0,50% ($\rho \leq 0,50\%$), para todas as ligações com furo adjacente ao pilar, cujo furo ultrapasse a dimensão adjacente do pilar.

Na Tabela 7.28 é apresentada a comparação das estimativas das normas estudadas com as estimativas obtidas com as propostas para as mesmas. Também são mostradas as estimativas da sugestão de BORGES (2004) (vide item 2.2.2) e a sugestão de BORGES (2004) com a limitação da taxa de armadura: $\rho \leq 0,50\%$. Nas Figuras 7.22 a 7.29 são mostrados os gráficos “Carga experimental x Carga estimada” para as normas estudadas e os gráficos “Tensão última atuante x Tensão resistente” para as propostas para as normas.

O EUROCODE 2/2004 e o ACI-318:2005 apresentaram **poucas** estimativas contra a segurança. Podemos perceber que, para as lajes L2, L3 e L4 da presente pesquisa e para a laje OC13V40, ensaiada por TENG et al., com furo adjacente ao menor lado do pilar e com as dimensões maiores que o lado do pilar, as estimativas foram contra a segurança.

A NBR 6118:2003 apresentou estimativas **contra a segurança** para diversas lajes da literatura.

Comparando-se as médias, o ACI teve a média das relações V_u/V_{calc} mais alta (1,91), seguido pelo EC2 (1,58) e pela NBR (1,17).

Para os resultados obtidos com as sugestões, podem ser feitas as seguintes observações:

- Todas as normas aumentaram o conservadorismo, como esperado;

- Para todas as normas, a média geral das relações Tensão atuante / Tensão resistente, para todas as lajes, aumentou. Mas, houve diminuição do desvio padrão e do coeficiente de variação;
- O ACI-318:2005 e o EUROCODE 2/2004 não apresentaram nenhum resultado contra a segurança;
- A NBR 6118:2003 continuou apresentando alguns resultados **contra a segurança**. Se a norma brasileira adotar a mesma limitação da parcela k ($k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$), adotada no EUROCODE 2/2004, na equação da tensão resistente, esse problema pode ser resolvido.

Sobre a sugestão de BORGES (2004), como comentado no Capítulo 2, a média geral, para todas as lajes, foi próxima da unidade, porém apresentou muitos resultados contra a segurança, inclusive mais que a NBR 6118:2003. Com a limitação da taxa de armadura quase não houve mudança. Nas 5 (cinco) lajes em que foi utilizada a limitação (L2, L3, L4 – SOUZA (2008); OC11V20 e OC13V40 – TENG et al. (1999)), em apenas 2 (duas) o resultado não foi contra a segurança (OC11V20 e OC13V40 – TENG et al. (1999)).

Tabela 7.28 – Comparação entre as relações V_u/V_{calc} e as relações Tensão atuante / Tensão resistente obtidas com a aplicação das normas apresentadas, com as propostas para as normas, com a sugestão de BORGES (2004) e com a sugestão de BORGES (2004) com a limitação: $\rho \leq 0,50\%$, para as lajes com furo da Série 1 e da literatura

Laje	ACI	EC2	NBR	Borges	ACI	EC2	NBR	Borges
	2005	2004	6118	2004	prop	prop	prop	$\rho \leq 0,50\%$
	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	$v_u/v_{u(AB)}$	$v_u/v_{R,c}$	τ_u/τ_{r1}	V_u/V_{calc}
L2	0,83	0,79	0,69	0,79	1,54	1,10	1,15	0,94
L3	0,77	0,68	0,59	0,68	1,41	1,03	1,09	0,90
L4	0,74	0,86	0,75	0,86	1,36	1,19	1,05	0,87
L7	1,21	1,06	0,92	0,86	1,42	1,27	1,10	0,86
L9	1,22	1,05	0,92	0,78	1,22	1,05	0,92	0,78
L16	1,32	1,42	1,24	0,97	1,67	1,83	1,60	0,97
L19	1,84	2,16	1,89	0,97	1,84	2,16	1,89	0,97
Média	1,13	1,15	1,00	0,84	0,84	1,38	1,26	0,90
Desv. Pad.	0,39	0,51	0,45	0,10	0,10	0,44	0,35	0,07
Coef. Var. (%)	34,8	44,3	44,6	12,4	12,4	32,1	27,9	7,7

Tabela 7.28 – (continuação)

Laje	ACI	EC2	NBR	Borges	ACI	EC2	NBR	Borges	
	2005	2004	6118	2004	prop	prop	prop	$\rho \leq 0,50\%$	
	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	$v_u/v_{u(AB)}$	$v_u/v_{R,c}$	τ_u/τ_{r1}	V_u/V_{calc}	
MOWRER & VANDERBILT (1967)	JN-1-1,7	1,99	1,60	1,06	0,91	2,83	2,11	1,40	0,91
	JN-2-1,7	3,15	2,51	1,67	1,37	3,15	2,51	1,67	1,37
	JN-3-1,7	2,17	1,72	1,14	1,09	2,26	1,83	1,21	1,09
	JN-1-2,2	2,01	1,47	0,95	0,93	2,85	1,95	1,25	0,93
	JN-2-2,2	3,31	2,32	1,75	1,75	3,31	2,32	1,49	1,75
	JN-3-2,2	2,31	1,72	1,14	1,10	2,41	1,84	1,22	1,10
	Média	2,49	1,89	1,28	1,19	1,19	2,09	1,37	1,19
Desv. Pad.	0,59	0,42	0,34	0,32	0,32	0,28	0,18	0,32	
Coef. Var. (%)	23,6	22,3	26,2	26,9	26,9	13,2	13,2	26,9	
ROLL at al. (1971)	S-121-0-0-1	1,55	1,45	0,93	0,84	1,71	1,71	1,10	0,84
	S-121-0-0-2	1,40	1,30	0,83	0,75	1,54	1,53	0,98	0,75
	S-122-0-0-1 ^b	1,67	1,61	1,03	0,82	1,67	1,61	1,03	0,82
	S-122-0-0-2 ^b	1,54	1,47	0,94	0,75	1,54	1,47	0,94	0,75
	S-122-0-0-1a ^c	1,15	1,10	0,71	0,56	1,40	1,32	0,88	0,56
	S-122-0-0-2a ^c	1,54	1,46	0,94	0,75	1,88	1,75	1,16	0,75
	S-123-0-0-1	1,51	1,52	0,97	0,66	1,66	1,65	1,06	0,66
	S-123-0-0-2	1,68	1,71	1,09	0,74	1,84	1,85	1,19	0,74
	S-124-0-0-1	1,68	1,80	1,16	0,63	1,68	1,80	1,16	0,63
	S-124-0-0-2	1,85	2,02	1,29	0,69	1,85	2,02	1,29	0,69
	S-224-9-0-1	1,88	1,51	0,97	1,34	1,88	1,51	0,97	1,34
	S-121-0-0-1	1,59	1,26	0,75	0,67	1,76	1,48	0,88	0,67
	S-121-0-0-2	1,86	1,46	0,86	0,78	2,06	1,71	1,02	0,78
	S-122-0-0-1 ^b	2,07	1,67	0,99	0,79	2,07	1,67	0,99	0,79
	S-122-0-0-1a ^c	2,02	1,64	0,97	0,77	2,25	1,86	1,10	0,77
	S-123-0-0-1	2,41	2,02	1,20	0,89	2,64	2,19	1,30	0,89
	S-124-0-0-1	2,75	2,49	1,47	1,01	2,75	2,49	1,47	1,01
	S-221-0-0-1	1,92	1,49	0,88	0,92	2,26	1,55	0,93	0,92
	S-222-0-0-1 ^b	2,14	1,58	0,94	1,04	2,14	1,58	0,94	1,04
	S-222-0-0-1a ^c	2,14	1,61	0,96	1,06	2,60	1,92	1,14	1,06
	S-223-0-0-1	2,51	1,78	1,06	1,28	3,49	2,18	1,44	1,28
	S-224-0-0-1	2,72	1,86	1,10	1,53	2,72	1,86	1,10	1,53
	S-241-9-0-1	1,74	1,31	0,78	0,77	2,16	1,34	0,80	0,77
	S-242-9-0-1 ^b	1,92	1,44	0,86	0,84	1,92	1,44	0,86	0,84
	S-242-9-0-2 ^b	2,02	1,50	0,89	0,87	2,02	1,50	0,89	0,87
	S-242-9-0-1a ^c	2,13	1,60	0,95	0,93	2,95	2,09	1,24	0,93
	S-243-9-0-1	2,50	1,73	1,02	0,99	4,25	2,20	1,39	0,99
	S-244-9-0-1	3,83	2,46	1,46	1,36	3,83	2,46	1,46	1,36
	S-244-9-0-2	3,45	2,33	1,38	1,29	3,45	2,33	1,38	1,29
	S-214-9-0-1	1,84	1,98	1,27	1,77	1,84	1,98	1,27	1,77
S-234-9-0-1	2,31	1,84	1,18	1,33	2,31	1,84	1,18	1,33	
S-254-9-0-1	3,08	2,40	1,54	1,24	3,08	2,40	1,54	1,24	
S-264-9-0-1	3,22	2,57	1,65	1,16	3,22	2,57	1,65	1,16	

Tabela 7.28 – (continuação)

Laje	ACI	EC2	NBR	Borges	ACI	EC2	NBR	Borges	
	2005	2004	6118	2004	prop	prop	prop	$\rho \leq 0,50\%$	
	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	$v_u/v_{u(AB)}$	$v_u/v_{R.c}$	τ_u/τ_{r1}	V_u/V_{calc}	
S-214-9-0-1	2,68	2,39	1,42	1,98	2,68	2,39	1,42	1,98	
S-234-9-0-1	3,29	2,18	1,29	1,45	3,29	2,18	1,29	1,45	
S-254-9-0-1	3,84	2,50	1,48	1,19	3,84	2,50	1,48	1,19	
S-264-9-0-1	4,11	2,73	1,62	1,14	4,11	2,73	1,62	1,14	
Média	2,26	1,80	1,10	1,02	2,44	1,91	1,18	1,02	
Desv. Pad.	0,75	0,43	0,26	0,33	0,79	0,39	0,23	0,33	
Coef. Var. (%)	33,1	23,7	23,3	32,5	32,4	20,3	19,9	32,5	
TENGG at al. (1999)	OC11H30	1,82	1,55	1,20	0,99	2,56	2,18	1,59	0,99
	OC11V23	1,76	1,39	1,15	1,13	2,29	1,69	1,42	1,13
	OC11V20	1,26	0,99	0,82	0,89	2,22	1,83	1,85	1,35
	OC13H50	1,12	1,13	0,91	0,86	1,52	1,42	1,07	0,86
	OC13V43	1,20	1,14	0,97	0,93	1,76	1,39	1,22	0,93
	OC13V23	1,34	1,30	1,07	0,95	1,93	1,59	1,34	0,95
	OC13V40	0,97	0,89	0,74	0,84	2,06	1,50	1,53	1,26
	OC13H02	1,48	1,53	1,30	1,00	3,78	2,03	1,72	1,00
	OC15H70	1,00	1,02	0,82	0,80	1,43	1,19	0,92	0,80
	OC15V43	1,25	1,27	1,06	0,94	2,14	1,63	1,35	0,94
	OC13H50, $\alpha=1,6$	1,08	1,07	0,87	0,83	1,45	1,34	1,03	0,83
	OC13V43, $\alpha=1,6$	1,07	1,00	0,84	0,81	1,57	1,21	1,06	0,81
	OC13H02, $\alpha=1,6$	1,28	1,29	1,10	0,84	3,27	1,71	1,46	0,84
	OC13H50, $\beta=0,63$	1,24	1,27	1,02	0,96	1,67	1,54	1,20	0,96
	OC13V43, $\beta=0,63$	1,33	1,25	1,05	1,01	1,95	1,52	1,33	1,01
	Média	1,28	1,21	0,99	0,92	2,11	1,59	1,34	0,98
Desv. Pad.	0,248	0,20	0,16	0,09	0,67	0,28	0,26	0,16	
Coef. Var. (%)	19,3	16,3	16,0	10,1	31,9	17,6	19,7	16,4	
REGAN (1999)	2	1,81	1,80	1,57	0,93	1,81	1,80	1,57	0,93
	6	2,19	2,44	2,12	0,79	2,19	2,44	2,12	0,79
	7	2,17	2,42	2,11	0,79	2,17	2,42	2,11	0,79
	Média	2,06	2,22	1,93	0,83	2,06	2,22	1,93	2,06
Desv. Pad.	0,21	0,37	0,32	0,08	0,21	0,37	0,32	0,21	
Coef. Var. (%)	10,3	16,5	16,5	9,8	10,3	16,5	16,5	10,3	
IOANNOU (2001)	PSSCH4b	1,53	2,02	1,41	0,84	1,53	2,02	1,41	0,84
	Média	1,53	2,02	1,41	0,84	1,53	2,02	1,41	0,84
	Desv. Pad.	-	-	-	-	-	-	-	-
	Coef. Var. (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
GOMES e ANDRADE (1993)	13	1,59	1,22	1,12	1,27	1,68	1,32	1,21	1,27
	14	1,52	1,16	1,07	1,19	1,69	1,31	1,21	1,19
	15	2,00	1,49	1,36	1,68	2,00	1,49	1,36	1,68
	23	2,19	1,70	1,59	3,63	2,19	1,70	1,59	3,63

Tabela 7.28 – (continuação)

Laje	ACI	EC2	NBR	Borges	ACI	EC2	NBR	Borges	
	2005	2004	6118	2004	prop	prop	prop	$\rho \leq 0,50\%$	
	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	V_u/V_{calc}	$v_u/v_{u(AB)}$	$v_u/v_{R.c}$	τ_u/τ_{r1}	V_u/V_{calc}	
Média	1,83	1,39	1,29	1,94	1,89	1,46	1,34	1,94	
Desv. Pad.	0,32	0,25	0,24	1,14	0,25	0,18	0,18	1,14	
Coef. Var. (%)	17,7	18,1	18,5	59,0	13,3	12,6	13,5	59,0	
SILVA (2003)	L4	2,51	2,03	1,61	0,97	2,51	2,03	1,61	0,97
	L5	2,15	1,95	1,55	1,25	2,15	1,95	1,55	1,25
	L6	1,68	1,63	1,30	1,15	1,68	1,63	1,30	1,15
	Média	2,12	1,87	1,49	1,12	2,12	1,87	1,49	1,12
Desv. Pad.	0,42	0,21	0,17	0,14	0,42	0,21	0,17	0,14	
Coef. Var. (%)	19,7	11,3	11,3	12,4	19,7	11,3	11,3	12,4	
SOUZA (2004)	L2	2,41	1,86	1,47	0,92	2,41	1,86	1,47	0,92
	L3	1,91	1,55	1,23	1,23	1,91	1,55	1,23	1,23
	L4	1,88	1,53	1,22	1,32	1,88	1,53	1,22	1,32
	L5	3,42	2,42	1,93	3,23	3,42	2,42	1,93	3,23
	L6	3,69	2,88	2,29	2,61	3,69	2,88	2,29	2,61
	L7	1,92	1,57	1,26	1,28	1,92	1,57	1,26	1,28
	L8	2,25	1,81	1,45	1,82	2,25	1,81	1,45	1,82
	Média	2,50	1,95	1,55	1,77	2,50	1,95	1,55	1,77
Desv. Pad.	0,75	0,51	0,41	0,85	0,75	0,51	0,41	0,85	
Coef. Var. (%)	30,2	26,4	26,5	47,7	30,2	26,4	26,5	47,7	
BORGES (2004)	L45FS_CG	1,25	1,27	1,15	1,08	1,67	1,55	1,36	1,08
	L45FD	1,21	1,20	1,09	1,02	1,61	1,47	1,29	1,02
	L45FD_CG	1,20	1,19	1,07	1,01	1,61	1,45	1,27	1,01
	L45FFS_CG	1,34	1,44	1,26	1,10	1,56	1,44	1,26	1,10
	L45FFD	1,41	1,42	1,22	1,07	1,64	1,42	1,22	1,07
	L45FFD_CG	1,41	1,45	1,29	1,12	1,64	1,45	1,29	1,12
	Média	1,30	1,33	1,18	1,07	1,62	1,46	1,28	1,07
Desv. Pad.	0,10	0,12	0,09	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	
Coef. Var. (%)	7,4	9,1	7,7	4,2	2,4	3,2	3,7	4,2	
HANSON & HANSON (1964)	A10L	1,32	1,13	0,78	0,50	1,32	1,13	0,78	0,50
	A11C	1,27	1,10	0,76	0,49	1,27	1,10	0,76	0,49
	Média	1,29	1,12	0,77	0,50	1,29	1,12	0,77	0,50
	Desv. Pad.	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01
Coef. Var. (%)	2,5	1,6	1,6	1,6	2,5	1,6	1,6	1,6	
Média Geral	1,92	1,62	1,16	1,08	2,20	1,77	1,29	1,10	
Desv. Pad. Geral	0,75	0,48	0,33	0,48	0,72	0,42	0,30	0,48	
Coef. Var. Geral (%)	39,1	29,8	28,5	44,7	32,8	23,6	23,3	43,9	

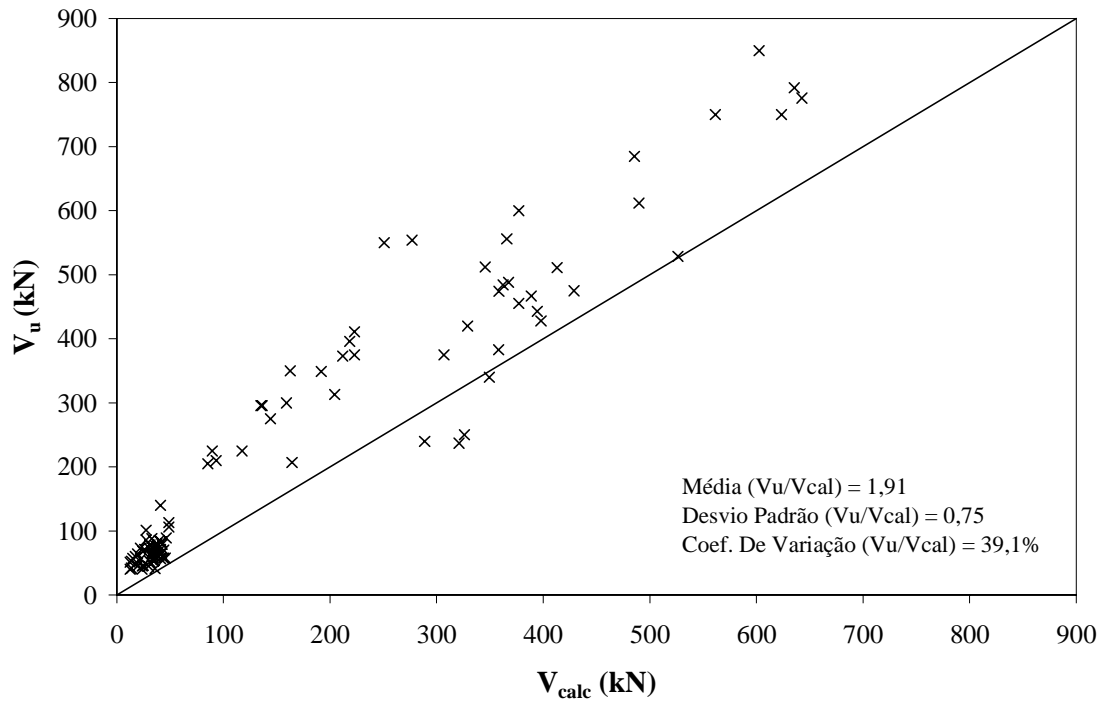


Figura 7.22 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

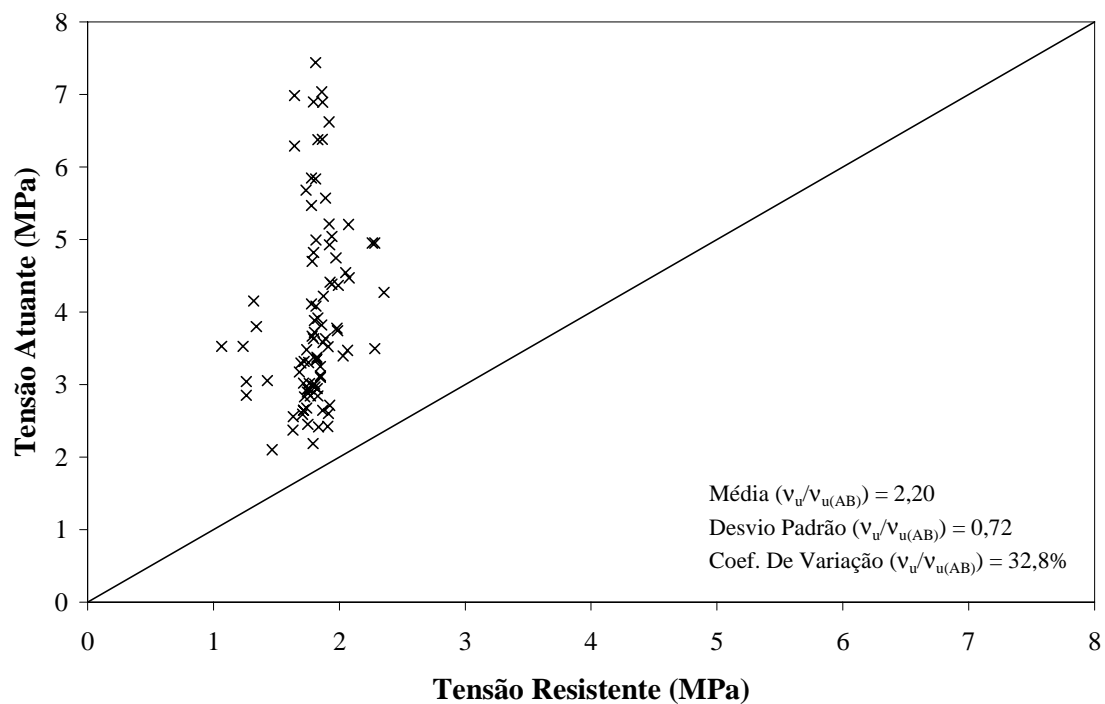


Figura 7.23 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{u(AB)}$) pela Proposta para o ACI-318:2005 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

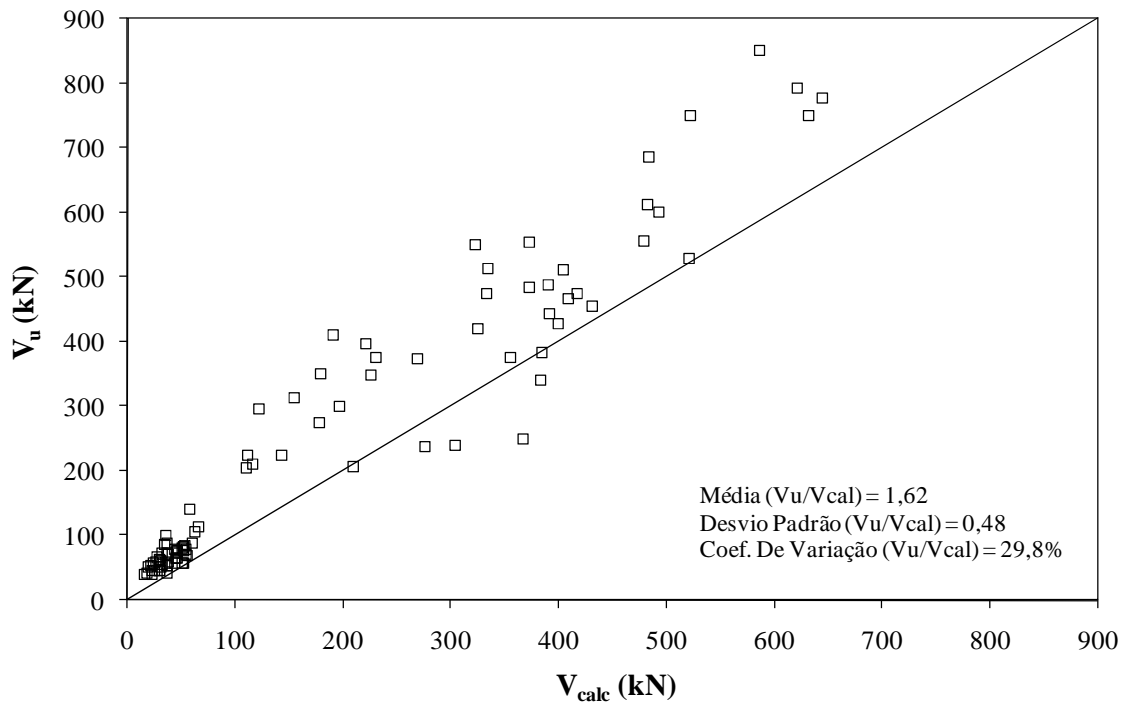


Figura 7.24 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo EUROCODE 2/2004 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

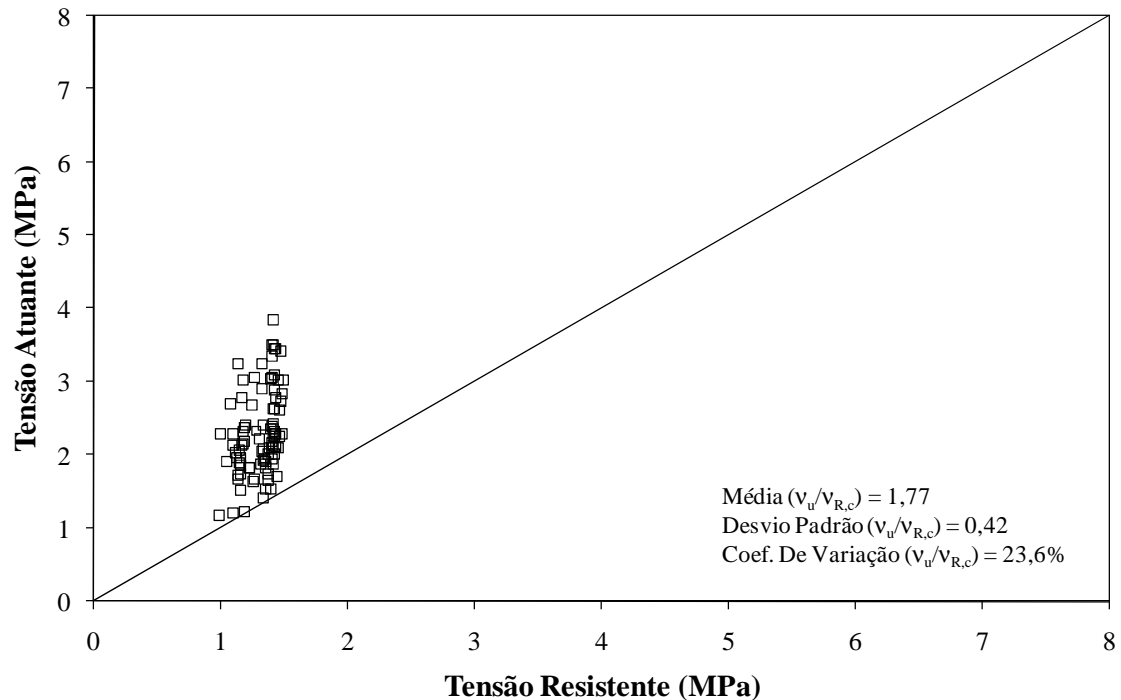


Figura 7.25 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pela Proposta para o EUROCODE 2/2004 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

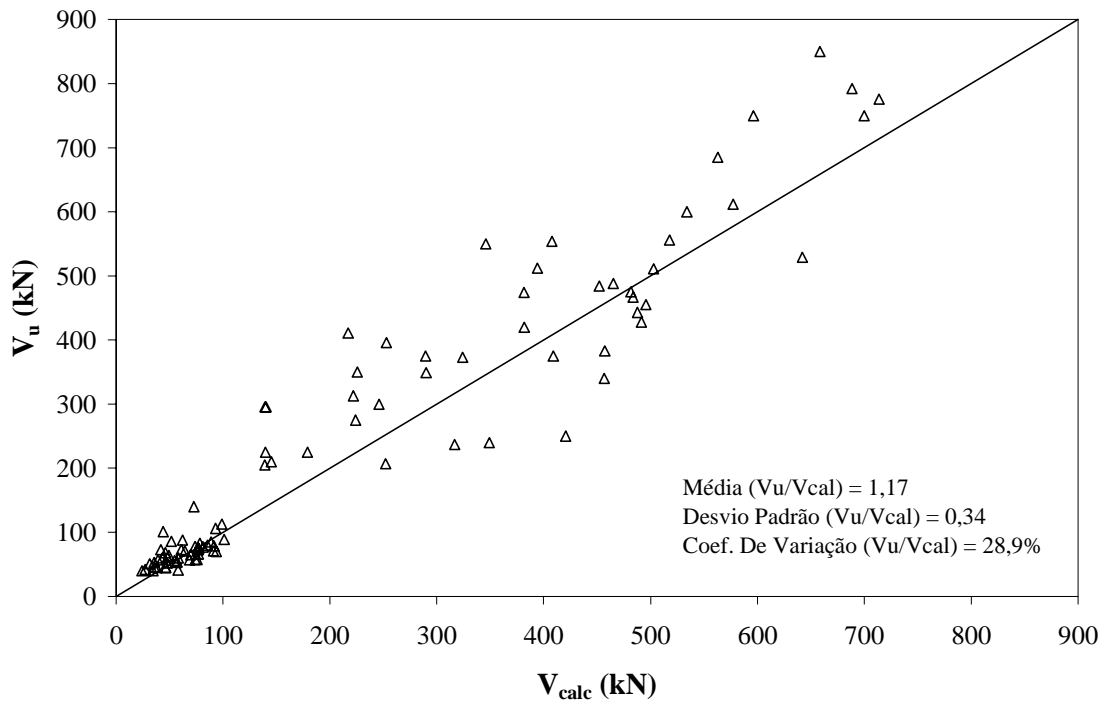


Figura 7.26 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) pelo NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

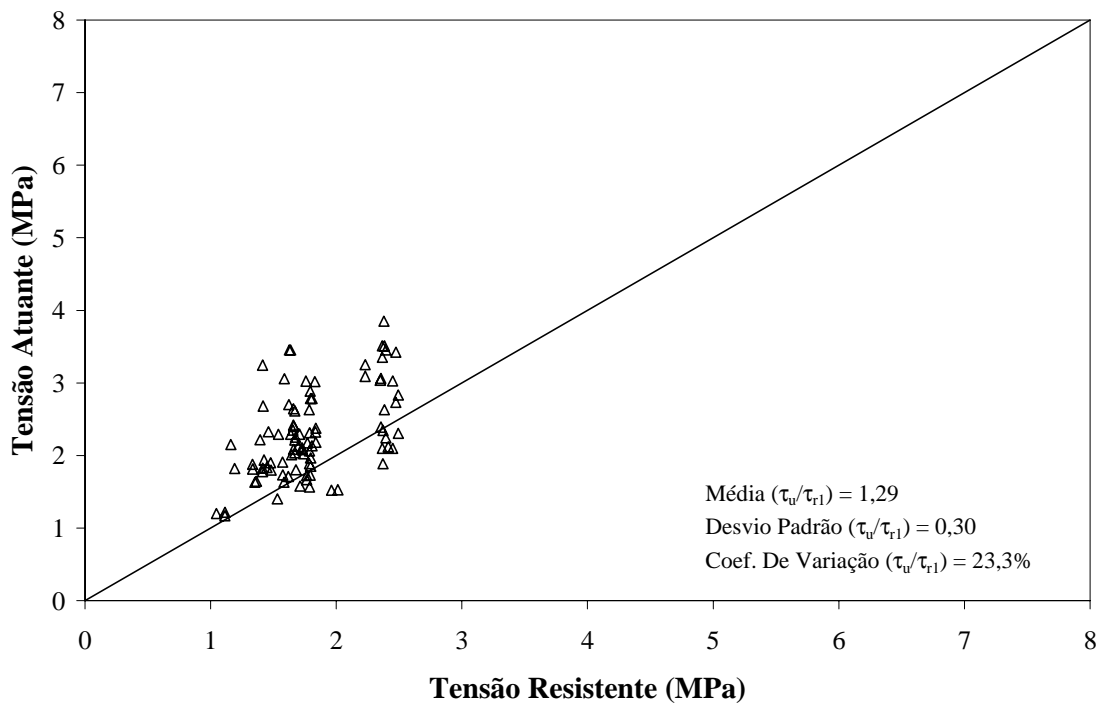


Figura 7.27 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela Proposta para o NBR 6118:2003 - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

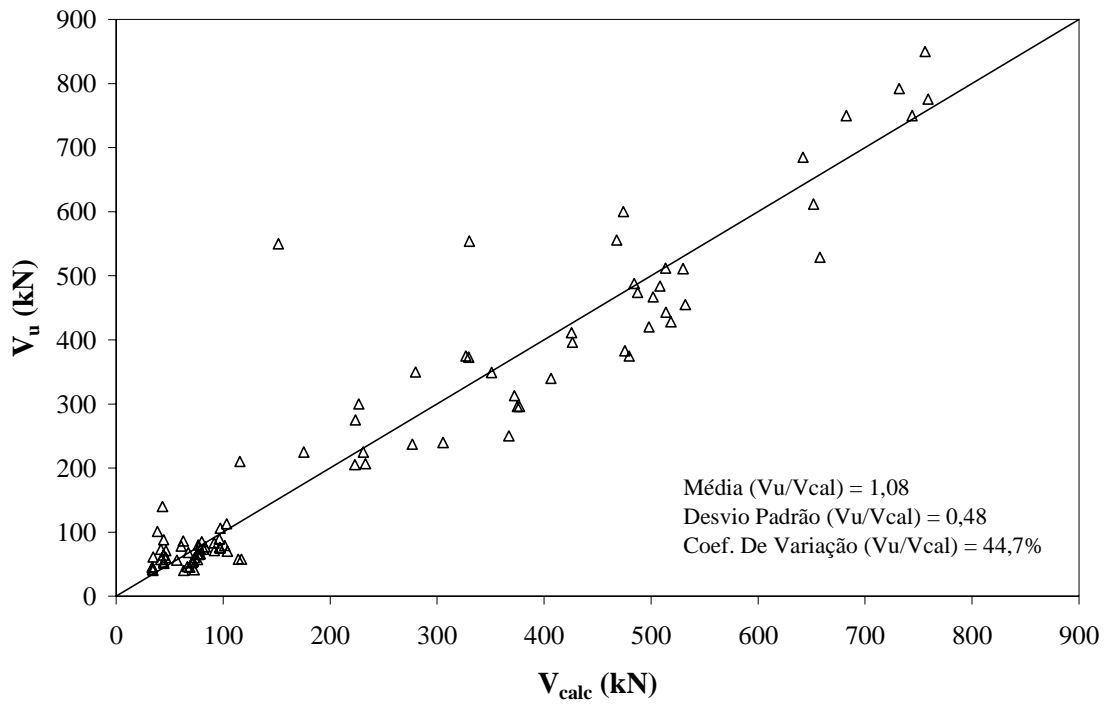


Figura 7.28 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) por BORGES (2004) - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

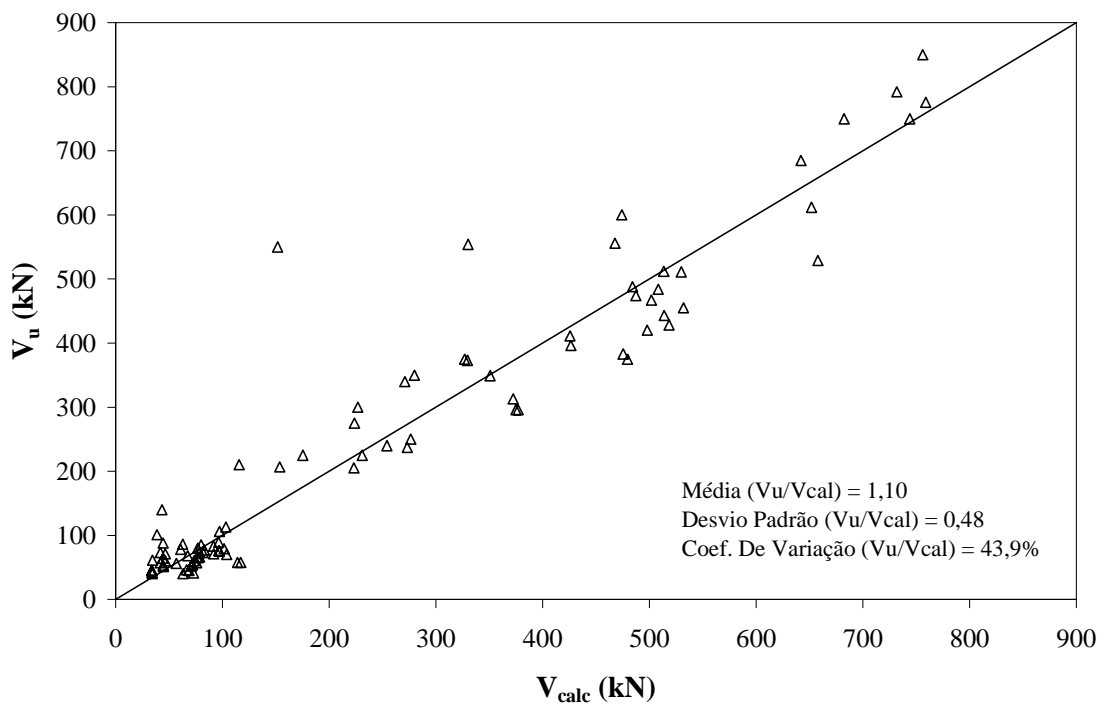


Figura 7.29 – Carga experimental (V_u) x Carga estimada (V_{calc}) por BORGES (2004) com limitação da taxa de armadura ($\rho \leq 0,50\%$) - lajes da Série 1 e da literatura com furo(s)

7.7 SUGESTÃO PARA A NBR 6118:2003 PARA O CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO

Esta sugestão também é baseada na indicação da NBR 6118:2003 para o cálculo de punção em ligações laje-pilar de borda, como comentado no item anterior.

Em lajes com furo e com o centróide do perímetro crítico excêntrico em relação ao eixo do pilar, quando o momento estiver no sentido contrário à região com o furo, como na laje L11, o cálculo deve ser feito como o indicado para pilares de borda, **subtraindo** o momento M_{Sd}^* , resultante da excentricidade do perímetro crítico reduzido u^* em relação ao centro do pilar.

Quando o momento estiver no sentido da região com o furo, como nas lajes L8, L12, e L17, o momento M_{Sd}^* deve ser **adicionado** ao momento transferido. A limitação da taxa de armadura também deve ser de 0,50% quando o lado adjacente do furo ultrapassar a dimensão adjacente do pilar.

A tensão solicitante para a presente sugestão deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} + \frac{KM_{Sd}^{**}}{W_p d} \quad (7.16)$$

onde:

F_{Sd} é a reação de apoio;

u é o perímetro crítico;

$M_{Sd}^{**} = (M_{Sd} + M_{Sd}^*)$ é o momento total de cálculo quando o momento atuante estiver no sentido da região com o furo;

$M_{Sd}^{**} = (M_{Sd} - M_{Sd}^*)$ é o momento total de cálculo quando o momento atuante estiver no sentido contrário à região com o furo;

M_{Sd} é o momento transferido da laje ao pilar;

M_{Sd}^* é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico u em relação ao centro do pilar;

W_p é o módulo de resistência da seção crítica.

Quando houver excentricidade da seção crítica nas duas direções, a tensão solicitante para a presente sugestão deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u \cdot d} + \frac{K_1 M_{Sd1}^{**}}{W_{p1} \cdot d} + \frac{K_2 M_{Sd2}^{**}}{W_{p2} \cdot d} \quad (7.17)$$

onde:

$M_{Sd1}^{**} = (M_{Sd1} + M_{Sd1}^*)$ é o momento total de cálculo quando o momento atuante na direção paralela ao maior lado do pilar estiver no sentido da região com o furo;

$M_{Sd1}^{**} = (M_{Sd1} - M_{Sd1}^*)$ é o momento total de cálculo quando o momento atuante na direção paralela ao maior lado do pilar estiver no sentido contrário à região com o furo;

M_{Sd1} é o momento transferido da laje ao pilar na direção paralela ao maior lado do pilar;

M_{Sd1}^* é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico u em relação ao centro do pilar na direção paralela ao maior lado do pilar;

$M_{Sd2}^{**} = (M_{Sd2} + M_{Sd2}^*)$ é o momento total de cálculo quando o momento atuante na direção paralela ao menor lado do pilar estiver no sentido da região com o furo;

$M_{Sd2}^{**} = (M_{Sd2} - M_{Sd2}^*)$ é o momento total de cálculo quando o momento atuante na direção paralela ao maior lado do pilar estiver no sentido contrário à região com o furo;

M_{Sd2}^* é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico u em relação ao centro do pilar na direção paralela ao menor lado do pilar;

W_{p1} é o módulo de resistência da seção crítica na direção paralela ao maior lado do pilar;

W_{p2} é o módulo de resistência da seção crítica na direção paralela ao menor lado do pilar.

O coeficiente K_1 assume os valores estabelecidos para K na Tabela 2.2, com C_1 e C_2 sendo as dimensões do pilar paralela e perpendicular à direção do momento transferido da laje ao pilar, respectivamente;

O coeficiente K_2 assume os valores estabelecidos para K na Tabela 2.2, substituindo-se C_1/C_2 por $C_2/2C_1$.

A Tabela 7.29 apresenta a comparação entre a tensão admissível fornecida pela NBR 6118:2003 e a tensão última obtida com a atual sugestão, considerando a carga última, V_u , o momento último, M_u , e o momento causado pela excentricidade da reação de apoio em relação ao eixo do pilar, M_u^* . Na Figura 7.30 essa comparação é mostrada graficamente.

Com a sugestão, todas as estimativas foram a favor da segurança.

Tabela 7.29 – Comparação entre a tensão proposta para as lajes da Série 2 (τ_u) e a estimada pela NBR 6118:2003 (τ_{r1})

Laje	C' (mm)	e*(¹) (mm)	τ_{r1} (²) (MPa)	V_u (kN)	M_u (kN.m)	M_u^* (kN.m)	τ_{Vu} (³) (MPa)	τ_M (⁴) (MPa)	τ_u (⁵) (MPa)	τ_u/τ_{Sd}
L8	2558	78	1,53	192	86,3	15,0	0,61	0,94	1,55	1,01
L10	2171	0	1,53	189	83,0	0,0	0,71	0,92	1,63	1,06
L11	2581	79	1,55	299	139,1	23,5	0,93	0,72	1,65	1,07
L12	2558	78	1,58	319	74,4	24,9	1,01	1,01	2,02	1,28
L13	2181	0	1,55	277	61,9	0,0	1,02	0,67	1,70	1,09
L17	2091	144	1,36	279	59,3	40,1	1,07	1,06	2,12	1,56
L18	1216	0	1,40	322	53,1	0,0	2,10	0,76	2,86	2,05
Média =									1,30	
Desvio padrão =									0,38	
Coeficiente de variação (%) =									29,1	

(¹) e^* - excentricidade do centróide do perímetro crítico em relação ao eixo do pilar

(²) $M_u^* = V_u \cdot e^*$

$$(\text{3}) \quad \tau_{r1} = 0,13.1,4 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) (100\rho f_{ck})^{1/3}$$

(⁴) tensão provocada pela carga de ruptura: $\tau_{Vu} = \frac{V_u}{u_1 d}$

(⁵) tensão provocada pelos momentos M_u e M_u^* : $\tau_M = \frac{K(M_u - M_u^*)}{W_p d}$ para a laje L11;

$$\tau_M = \frac{K(M_u + M_u^*)}{W_p d} \text{ para L8, L12 e L17.}$$

(⁶) $\tau_u = \tau_{Vu} + \tau_M$

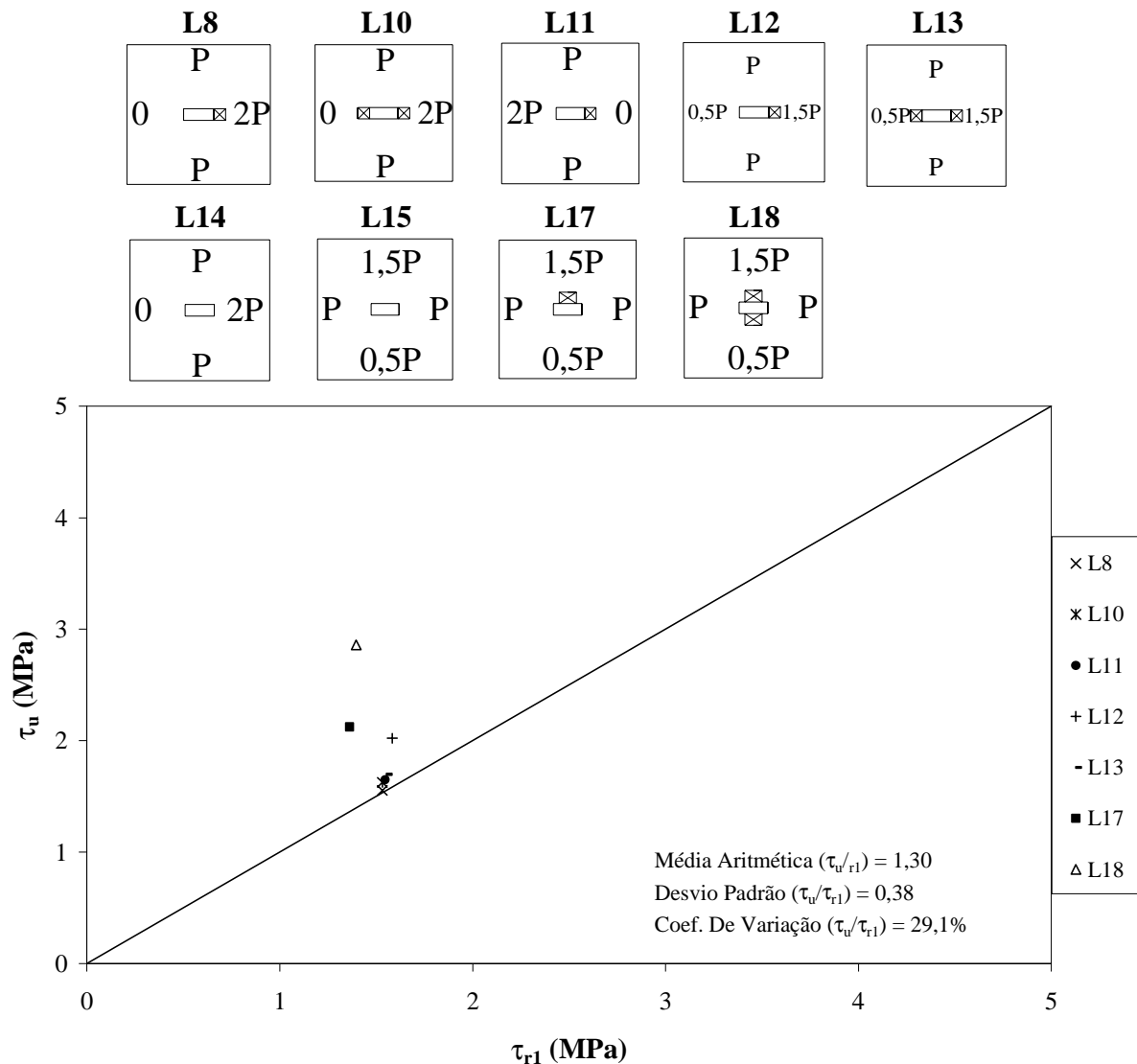


Figura 7.30 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{rl}) pela proposta para NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 com furo(s) e transferência de momento

7.8 SUGESTÃO PARA O EUROCODE 2/2004 E O ACI-318:2005 PARA O CÁLCULO DE LAJES COM FURO(S) E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO

A sugestão para o EUROCODE 2/2004 e o ACI-318:2005 é baseada na sugestão mostrada no item anterior, 7.7. Portanto, em cada norma deve-se **adicionar** ao momento transferido da laje para o pilar, o momento resultante da excentricidade do perímetro crítico adotado por cada norma, M_{Sd}^* , se o momento transferido for aplicado de maneira que esteja no sentido da região com furo. Se o momento transferido for aplicado de maneira que esteja no sentido contrário à região com furo, então se deve **subtrair** o momento M_{Sd}^* do mesmo.

No EUROCODE 2/2004, deve-se manter no cálculo da tensão resistente admissível a limitação da taxa de armadura, porém essa limitação deverá ser de 0,90%. No ACI-318:2005, como a norma não trata da taxa de armadura em suas formulações, não é necessário nenhuma limitação.

7.9 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS ESTUDADAS E AS PROPOSTAS APRESENTADAS PARA LAJES COM FURO(S), E TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO DA PRESENTE PESQUISA E DA LITERATURA

Neste item serão comparadas as relações Tensão atuante / Tensão resistente obtidas com a aplicação das normas apresentadas e as obtidas com as propostas para as normas, para as lajes com furo(s) e transferência de momento da presente pesquisa e, também, para as encontradas na literatura, mostradas no Capítulo 2.

Na Tabela 7.30 é apresentada a comparação das estimativas das normas estudadas com as estimativas obtidas com as propostas para as mesmas. Nas Figuras 7.31 a 7.36 são mostrados os gráficos “Tensão última atuante x Tensão resistente admissível” para as normas estudadas e para as propostas para as normas.

O ACI apresentou estimativas mais conservadoras (média das relações $v_u/v_u(AB)$ igual a 2,88), sendo que nenhuma estimativa foi contra a segurança.

O EUROCODE 2/2004 e a NBR 6118:2003 apresentaram estimativas contra a segurança apenas para a laje L8, com um furo adjacente ao menor lado do pilar e com momento no sentido da região com furo (excentricidade de carga igual a 0,439m). O EUROCODE 2/2004 mostrou-se mais conservador que a NBR 6118:2003.

Para os resultados obtidos com as sugestões, podem ser feitas as seguintes observações:

- Para todas as lajes com excentricidade do perímetro crítico em relação ao eixo do pilar, as normas aumentaram o conservadorismo, com exceção da laje L11, que teve o momento transferido com sentido contrário à região com furo (o momento M_{sd}^* foi subtraído do momento último, M_u);

- Para todas as normas, a média geral das relações Tensão atuante / Tensão resistente, para todas as lajes, aumentou muito pouco. E, o desvio padrão e o coeficiente de variação diminuíram, também muito pouco;

- Em nenhuma norma foi verificado resultado contra a segurança;

Tabela 7.30 – Comparação entre as relações Tensão atuante / Tensão resistente obtidas com a aplicação das normas apresentadas e as obtidas com as propostas para as normas, para as lajes com furo da Série 2 e da literatura

Laje	ACI	EC2	NBR	ACI	EC2	NBR	
	2005	2004	6118	prop	prop	prop	
	$v_u/$	$v_u/$	$\tau_u/$	$v_u/$	$v_u/$	$\tau_u/$	
	$v_{u(AB)}$	$v_{R,c}$	τ_{r1}	$v_{u(AB)}$	$v_{R,c}$	τ_{r1}	
SOUZA (2008)	L8	1,41	0,98	0,86	1,50	1,08	1,01
	L10	1,62	1,22	1,06	1,62	1,22	1,06
	L11	1,77	1,49	1,30	1,67	1,36	1,07
	L12	1,56	1,17	1,02	1,71	1,32	1,28
	L13	1,58	1,25	1,09	1,58	1,25	1,09
	L17	1,73	1,27	1,11	1,96	1,53	1,56
	L18	2,33	2,34	2,05	2,33	2,34	2,05
Média	1,71	1,39	1,21	1,77	1,44	1,30	
Desv. Pad.	0,30	0,44	0,39	0,29	0,42	0,38	
Coef. Var. (%)	17,2	31,9	32,2	16,2	29,0	29,1	
HANSON & HANSON (1964)	A3L	2,01	1,55	1,07	2,01	1,55	1,07
	A4L	2,11	1,60	1,10	2,11	1,60	1,10
	A5C	3,74	2,31	1,59	3,74	2,31	1,59
	A6C	4,01	2,47	1,70	4,01	2,47	1,70
	A13L	2,27	1,77	1,22	2,27	1,77	1,22
	A14C	3,46	2,23	1,53	3,46	2,23	1,53
Média	2,93	1,99	1,37	2,93	1,99	1,37	
Desv. Pad.	0,90	0,40	0,27	0,90	0,40	0,27	
Coef. Var. (%)	30,7	20,0	20,0	30,7	20,0	20,0	
Média Geral	2,28	1,67	1,29	2,31	1,69	1,33	
Desv. Pad. Geral	0,88	0,51	0,34	0,86	0,48	0,32	
Coef. Var. Geral (%)	38,8	30,6	26,3	37,4	28,5	24,2	

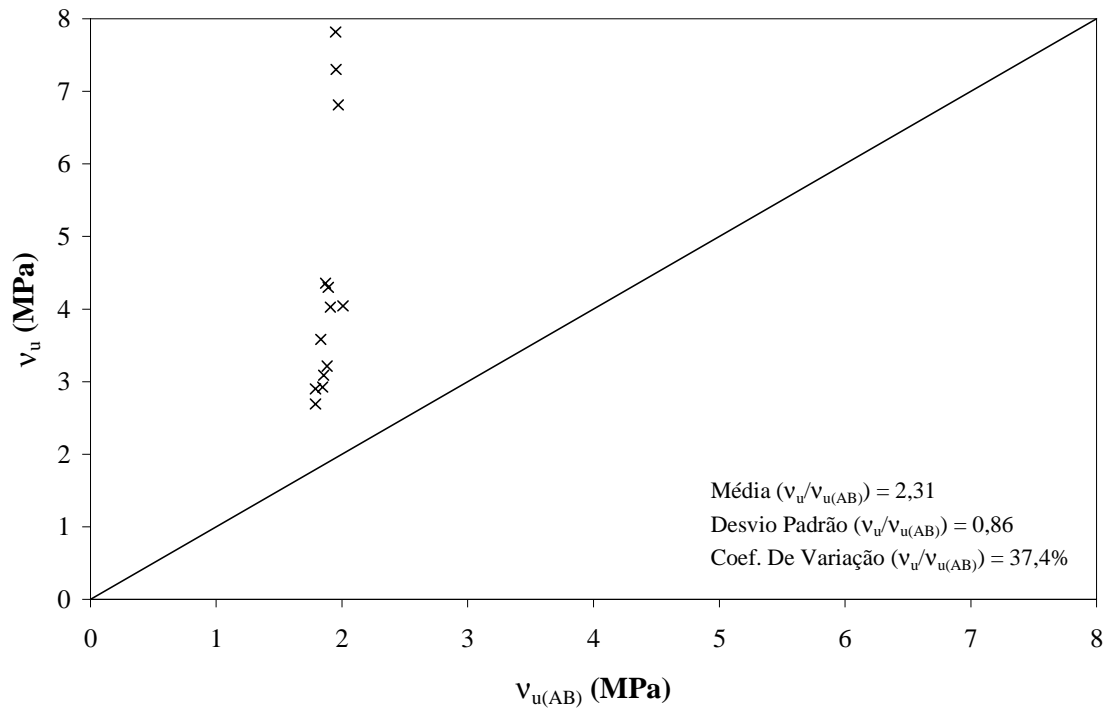


Figura 7.31 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{u(AB)}$) pelo ACI-318:2005 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento

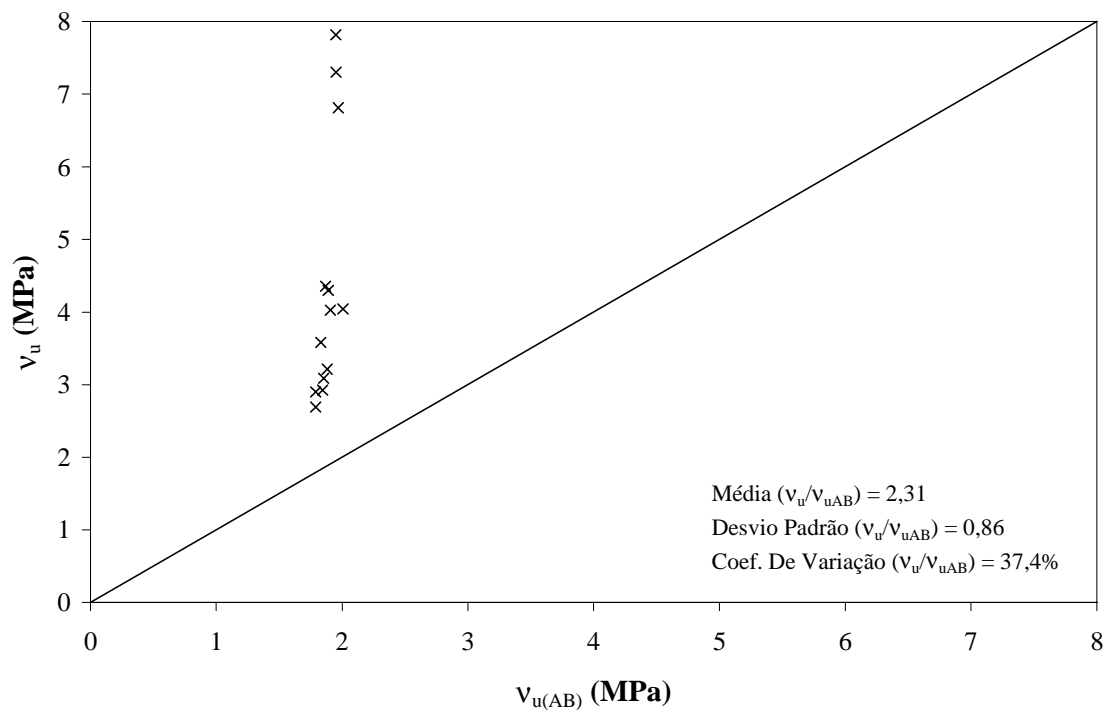


Figura 7.32 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{u(AB)}$) pela Proposta para o ACI-318:2005 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento

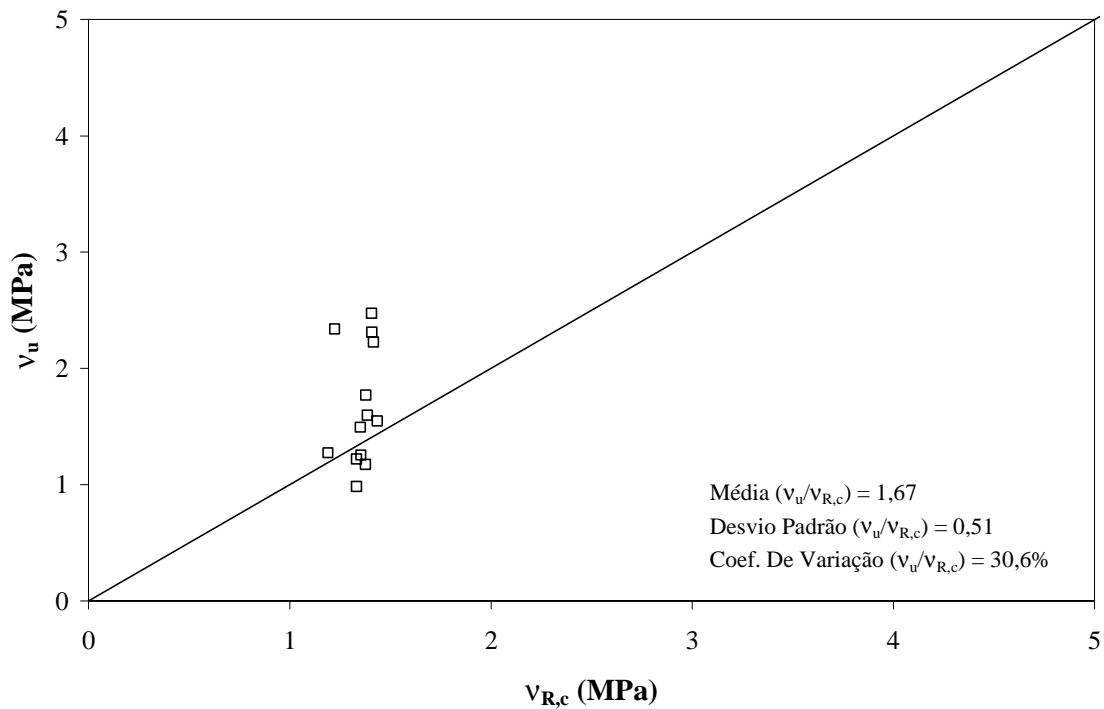


Figura 7.33 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pelo EUROCODE 2/2004 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento

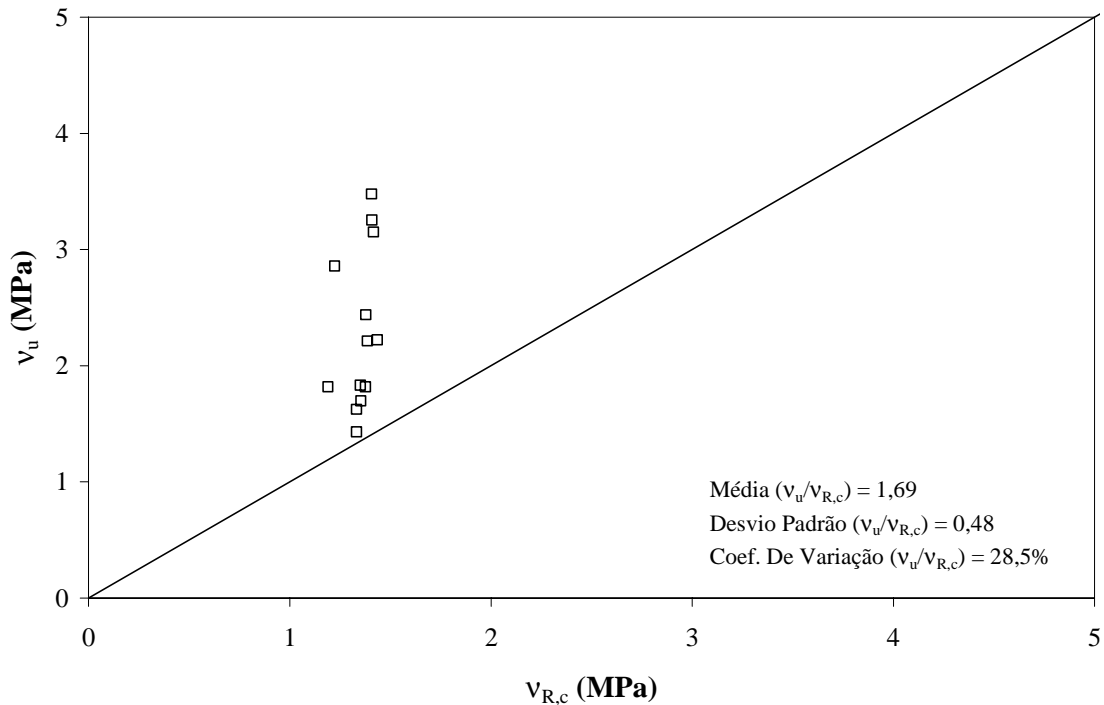


Figura 7.34 – Tensão atuante (v_u) x Tensão resistente ($v_{R,c}$) pela Proposta para o EUROCODE 2/2004 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento

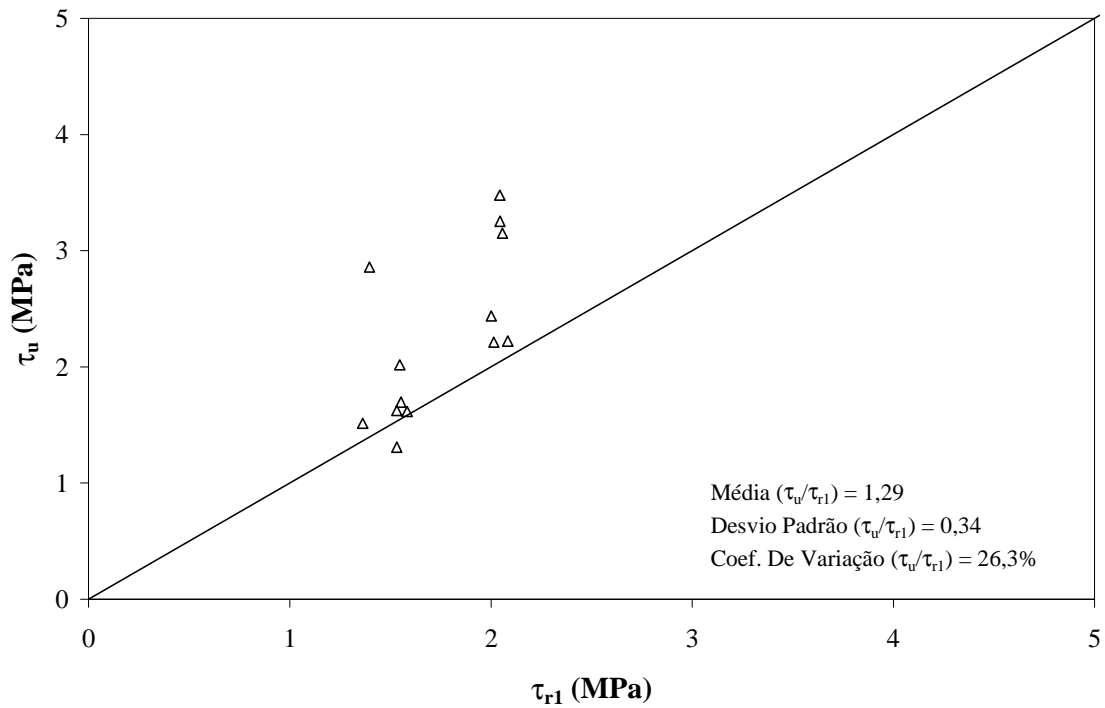


Figura 7.35 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento

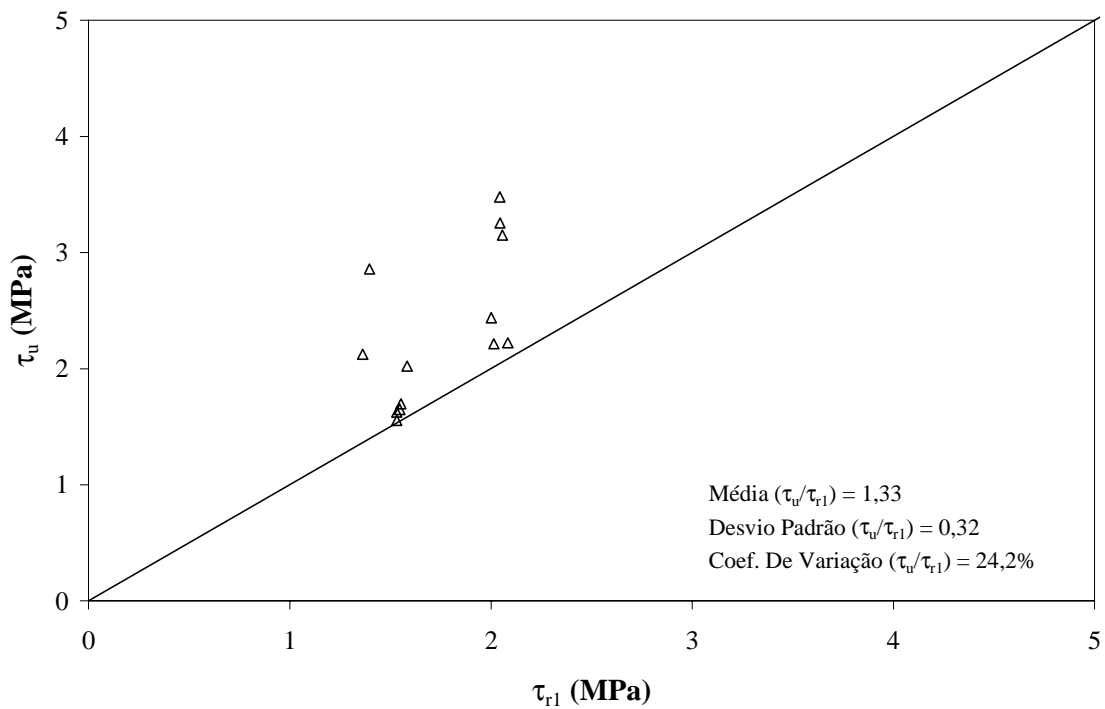


Figura 7.36 – Tensão atuante (τ_u) x Tensão resistente (τ_{r1}) pela Proposta para o NBR 6118:2003 - lajes da Série 2 e da literatura com furo(s) e transferência de momento

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi investigar experimentalmente o comportamento de ligações laje-pilar de regiões internas das lajes lisas, com um ou dois furos adjacentes ao pilar, e com ou sem transferência de momento fletor da laje ao pilar. As principais variáveis foram: o posicionamento e as dimensões dos furos, a taxa e a distribuição da armadura de flexão, a armadura de cisalhamento e a excentricidade de carga (relação $M(\text{momento transferido})/V(\text{carregamento vertical})$) na ligação.

Foi desenvolvido um sistema de ensaio que tornou possível aplicar e controlar carregamentos simétricos e assimétricos, transferindo momento fletor da laje ao pilar. O sistema de ensaio comportou-se de maneira satisfatória para quase todos os carregamentos. Para o caso de transferência de momento na direção paralela ao menor lado do pilar e com excentricidade de carga planejada igual a 0,250m (lajes L15 e L18), os carregamentos experimentais ficaram diferentes dos planejados, em função da grande rotação das lajes (vide item 5.2), mas puderam ser utilizadas com suas “novas” excentricidades efetivas. Esse problema pode ser resolvido no futuro com um sistema de aplicação de carga capaz de controlar a carga e o deslocamento nessa direção.

Foram feitas comparações e análises entre os resultados experimentais dos 19 (dezenove) ensaios realizados, distribuídos em 2 (dois) grupos, o primeiro com 10 lajes sem a aplicação de momento (Série 1) e o segundo com 9 lajes com a aplicação de momento (Série 2). As 16 lajes com furo(s) da pesquisa foram comparadas entre si e com as três lajes de referência, uma sem furo e sem aplicação de momento (Série 1), e outras duas lajes sem furo mas com transferência de momento da laje ao pilar (Série 2).

Os resultados experimentais foram comparados com estimativas pelas normas: CEB-FIP/MC1990, EC2/2004, ACI-318:2005 e NBR 6118:2003. A partir daí foram propostas modificações para todas as normas estudadas, a fim de que as estimativas aproximem-se mais dos resultados experimentais, uma vez que os resultados não foram satisfatórios, alguns inclusive contra a segurança, principalmente quando a dimensão do furo

é maior que a largura do pilar, mas preocupando-se também para que o conservadorismo não ficasse excessivo.

8.1.1 Comportamento das lajes

8.1.1.1 Lajes sem transferência de momento da laje ao pilar (Série 1)

8.1.1.1.1 Modo, carga e superfície de ruptura

As lajes apresentaram duas maneiras de ruptura por punção: a) punção “adjacente”, com a superfície de ruptura se iniciando na superfície superior da laje, e terminando na ligação laje-pilar, na superfície inferior da laje (lajes L1 a L4, L16 e L19); e b) punção “adjacente e afastada”, com parte da superfície de ruptura adjacente, e o restante da superfície de ruptura afastada em torno do pilar, principalmente para as lajes com um furo, o que as torna assimétricas (lajes L5, L6, L7 e L9).

A existência de furo(s) adjacente(s) ao pilar nas lajes diminuiu a resistência à punção de 4% (laje L7, com furo pequeno e alta taxa de armadura) para 50% (laje L4, com um furo de 400x400mm adjacente ao menor lado do pilar e baixa taxa de armadura), em relação à laje de referência, sem furo. Não houve diminuição na carga de ruptura da laje L16, com um furo adjacente ao maior lado do pilar.

As maiores perdas ocorreram para as lajes com um furo adjacente ao menor lado do pilar e com a dimensão adjacente do furo maior que o pilar (lajes L2, L3 e L4), que tiveram como variável a taxa e o posicionamento da armadura de flexão. As perdas foram respectivamente de 49%, 47% e 50%, em relação à laje de referência sem furo. As cargas de ruptura próximas indicam que a taxa e o posicionamento da armadura de flexão utilizada praticamente não tem influência na carga última.

A armadura de cisalhamento utilizada (barras dobradas) nas lajes L5 e L6, para lajes com furos grandes adjacentes ao menor lado do pilar e com a dimensão adjacente do furo maior que a dimensão do pilar, possibilitou um aumento em até 70% na carga de ruptura, em relação à laje semelhante com furo e taxa de armadura (L3), mas não possibilitou que a carga de ruptura alcançada pela laje de referência sem furo (L1) fosse alcançada (perda de 12% foi verificada).

8.1.1.1.2 Deslocamentos verticais

A presença de furos, como esperado, conduziu a um aumento dos deslocamentos verticais nas regiões dos furos.

Lajes com maiores taxas de armadura de flexão (L7, L9 e L19), em relação à laje de referência sem furo (L1), tiveram deslocamentos semelhantes aos de L1, inclusive nas regiões com furos.

Na maioria dos casos das lajes com um furo (L2 a L6 e L16), os deslocamentos das regiões sem furo foram inferiores aos da laje de referência sem furo, comportamento de rotação que pode ser assemelhado ao de uma laje com transferência de momento ao pilar, com excentricidades de carga e relação $M(\text{momento})/V(\text{carregamento vertical})$ inferiores às aplicadas neste trabalho.

A utilização de armadura de cisalhamento conduziu a menores deslocamentos verticais em relação às lajes com mesmos furos, mas sem tal armadura. E, em comparação com a laje de referência sem furo, os deslocamentos nos lados com furos foram bastante superiores.

8.1.1.1.3 Deformações das armaduras de flexão

Pode ser observado que o escoamento da armadura foi alcançado em vários pontos, principalmente na região dos pilares, como esperado.

As barras da armadura de flexão descontínuas (que terminavam no furo) foram pouco solicitadas, indicando que essas armaduras não são efetivas quanto ao combate à flexão e, por conseguinte, à punção.

8.1.1.1.4 Deformações nas armaduras de cisalhamento

As barras dobradas (armadura de cisalhamento) utilizadas apresentaram um comportamento peculiar de “flexão localizada”, com as fibras superiores dos pontos monitorados apresentando escoamento ou deformações quase de mesma ordem, enquanto as fibras inferiores apresentaram pouco alongamento e, em alguns passos de carga, inclusive encurtamento.

Mais ensaios deste tipo de armadura em lajes sem furo e com furo são necessários para que tal comportamento possa ser devidamente equacionado.

8.1.1.1.5 Deformações do concreto

Foram instrumentados pontos no pilar (lajes L1, e L2 a L4). Nos pilares observou-se que as maiores deformações foram nas “quinas” destes (vide item 4.7), como esperado, e as máximas deformações estavam longe do esmagamento. Já nas lajes foram observadas deformações bem maiores, próximas ao esmagamento, e foi possível se comprovar o caminhamento das cargas, nas lajes com furo e sem furo, neste caso contornando-os (caso das lajes L5, L6, L7 e L9). As maiores deformações (de compressão) nas lajes com furos foram observadas próximas ao centro do pilar, na direção perpendicular ao maior lado do pilar.

8.1.1.2 Lajes com transferência de momento da laje ao pilar (Série 2)

8.1.1.2.1 Modo, carga e superfície de ruptura

A transferência de momento da laje ao pilar, nas lajes sem furo L14 (excentricidade de 0,459m) e L15 (excentricidade de 0,183m), reduziu a carga destas lajes entre 23% e 42%, em relação à laje de referência L1.

Nas lajes com furos, a transferência de momento para o pilar levou a um decréscimo de resistência entre 32% e 60% em relação à laje de referência sem furo e sem transferência de momento.

Comparando-se as lajes com furos e com transferência de momento com as lajes sem furo e com transferência de momento, para os parâmetros estudados:

- A redução do perímetro da ligação laje-pilar devido a um furo adjacente não resulta em perda de carga quando o momento não estiver no sentido da região da laje com furo;
- Mesmo com o momento aplicado no sentido da região com o furo, a carga de ruptura da laje com furo pode ser superior, dependendo da excentricidade de carga aplicada. Por exemplo, para lajes com momentos aplicados na mesma direção, a laje L12, com furo adjacente ao menor lado do pilar e excentricidade de carga igual a 0,233m, teve carga 16% superior à L14, sem furo, com excentricidade de 0,459m;

- Lajes com excentricidades de carga semelhantes e momento aplicado no sentido da região com furo podem ter perdas de carga entre 12% e 31%. Por exemplo, para lajes com momentos aplicados na mesma direção: a laje L18, com um furo adjacente ao menor lado do pilar e excentricidade de carga igual a 0,439m, teve carga 30% inferior à de L14; a laje L17, com um furo adjacente ao maior lado do pilar e excentricidade de carga igual a 0,213m, teve carga 23% inferior à de L15, sem furo, com excentricidade de 0,183m;

Para as lajes com furos, comparando-se as lajes com momento aplicado (Série 2), em relação às lajes sem momento aplicado (Série 1), foram observadas perdas de carga entre 22% e 58% nas lajes com transferência de momento, em relação às lajes semelhantes sem a transferência de momento. E, a resistência ao puncionamento diminuiu de maneira diretamente proporcional ao aumento da excentricidade de carga.

Como observado, as piores situações com relação à perda de resistência nas lajes, com furo adjacente ao pilar e transferência de momento, ocorrem quando o momento está no sentido da região com furo, que é mais frágil e não tem concreto para resistir às compressões presentes na camada inferior da placa que são aumentadas devido ao momento.

8.1.1.2.2 Deslocamentos verticais

Na direção em que foi aplicado o momento, houve rotação e o lado mais carregado se deslocou no sentido da aplicação da carga, enquanto o bordo oposto se deslocou em sentido contrário ao da aplicação da carga.

Na direção na qual não foi aplicado o momento, os deslocamentos apresentados por todas as lajes foram semelhantes aos obtidos na laje de referência L1, sem furo e sem momento.

Nas lajes com furo(s) e momento aplicado paralelo ao maior lado do pilar, a existência de furo não implicou em grandes diferenças de deslocamentos no lado com furo, em relação à laje sem furo com momento aplicado na mesma direção e excentricidade de carga semelhante. Quando a excentricidade de carga foi menor (L12 e L13), foram apresentados deslocamentos nos lados com furos, inferiores aos da laje sem furo (L14).

Nas lajes com furo(s) e momento aplicado paralelo ao menor lado do pilar (lajes L17 e L18), a existência de furo implicou em diferenças de deslocamentos significativas no

lado com furo, em relação à laje sem furo e com momento aplicado na mesma direção, e excentricidade de carga semelhante (L15).

8.1.1.2.3 Deformações nas armaduras de flexão

Os pontos instrumentados próximos aos pilares, nos lados mais carregados da laje, com os extensômetros colados de maneira paralela à direção do momento aplicado, tiveram maiores deformações, como esperado, chegando inclusive a deformações próximas ao escoamento (lajes L14, L15, L17 e L18).

As barras da armadura de flexão descontínuas (que terminavam no furo), igualmente ao ocorrido na Série 1, foram pouco solicitadas, indicando que essas armaduras não foram solicitadas à flexão e que não contribuíram na punção.

8.1.1.2.4 Deformações do concreto

Para as lajes com momento aplicado (Série 2), os pontos instrumentados no lado mais carregado, com os extensômetros na mesma direção do momento aplicado, tiveram as maiores deformações.

Na direção do momento aplicado, alguns extensômetros que estavam situados nos lados menos carregados indicaram que houve tração e nos lados mais carregados indicaram compressão, evidenciando a rotação das lajes (lajes L8, L10, L11, L13).

8.1.2 Normas de projeto

Partindo do princípio que as normas devem ser seguras e até certo ponto conservadoras, principalmente em se tratando de ruptura à punção de lajes, rupturas frágeis e sem aviso, a comparação dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa com as estimativas das normas mostrou que as prescrições das normas não estão apresentando a segurança almejada.

Para lajes sem furo, com ou sem transferência de momento da laje ao pilar, as estimativas das normas foram próximas das obtidas experimentalmente, embora tenha conduzido a estimativas contra a segurança em alguns casos. A NBR 6118:2003 apresentou

relação V_u/V_{calc} igual a 0,99 para a laje L1, sem furo e sem transferência de momento. E, o CEB-FIP/MC1990 e a NBR apresentaram estimativas levemente contra a segurança para a laje L15, com momento transferido paralelo ao menor lado do pilar e excentricidade de carga igual a 0,183. As relações Tensão atuante / Tensão resistente foram iguais a 0,95 e 0,94, respectivamente.

O maior problema surgiu com a comparação das estimativas das normas com os resultados das lajes da Série 1, com furo(s) e sem aplicação de momento. Quando o furo é adjacente ao menor lado do pilar e quando a dimensão do furo é superior à dimensão do pilar (caso das lajes L2, L3 e L4), as estimativas são contra a segurança para todas as normas (EUROCODE 2/2004, ACI-318:2005 e NBR 6118:2003). A norma brasileira também superestimou, de maneira mais moderada, as situações de um furo de 200x200mm adjacente ao menor lado do pilar e de dois furos de 200x200mm adjacentes aos menores lados do pilar.

Esta verificação pode ser corroborada ao se analisar as outras lajes disponíveis na literatura (vide item 7.6). Para lajes com furos situados adjacentes aos menores lados do pilar que ultrapassam a dimensão do menor lado, as estimativas foram contra a segurança, indicando que, para essa situação as normas não estão adequadas.

De uma maneira geral, para as outras situações de furo, o EUROCODE e o ACI apresentaram recomendações conservadoras ou próximas dos resultados experimentais. A NBR ainda apresenta estimativas contra a segurança para outras situações de furo em lajes lisas (ligações com um ou mais furos adjacentes a um pilar quadrado).

Já para as lajes com furo e transferência de momento da laje ao pilar, os resultados foram mais conservadores, somente tendo sido contra a segurança para uma laje (L8). O ACI apresentou resultados conservadores para todas as lajes da pesquisa e da literatura, mostrando-se uma norma apropriada. O EUROCODE e a NBR apresentaram resultados contra a segurança apenas para a laje L8, com um furo de 200x200mm, com momento aplicado no sentido da região com furo (excentricidade de carga última igual a 0,449).

8.1.2.1 Sugestão para as normas de cálculo para lajes com furo(s), sem transferência de momento

A sugestão para modificação do CEB-FIP/MC1990, do EUROCODE 2/2004, do ACI-318:2005 e da NBR 6118:2003 baseia-se na indicação que a NBR 6118:2003 apresenta

para o cálculo de punção em ligações laje-pilar de borda, que apresenta situação semelhante a de uma laje com furo em que o centro de gravidade da seção crítica não coincide com o eixo do pilar.

A proposta formulada indica a **adição ao carregamento solicitante** do momento M_{sd}^* , resultante da excentricidade do perímetro crítico u , da laje com furo, em relação ao centro do pilar, como mostrado na Figura 8.1. Assim, toda laje com furo, que gere excentricidade do perímetro crítico em relação ao pilar, deve ser calculada como uma laje que está submetida à transferência de momento da laje ao pilar.

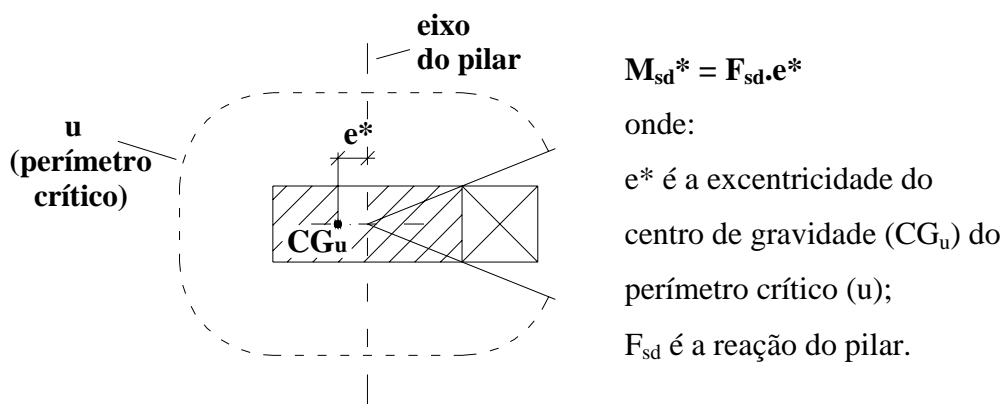


Figura 8.1 – Momento M_{sd}^* , resultante da excentricidade do perímetro crítico u

Além dessa consideração, quando tratar da situação de furo em que a dimensão do furo adjacente ao pilar é maior que o lado ao qual o mesmo é adjacente, devem-se utilizar as seguintes limitações para a taxa de armadura de flexão:

- Para a NBR 6118:2003: $\rho \leq 0,5\%$;
- Para o EUROCODE 2/2004: $\rho \leq 0,90\%$.

Com as sugestões foram eliminados os resultados contra a segurança do EUROCODE 2/2004 e do ACI-318:2005, tornando-as mais seguras sem aumentar muito o conservadorismo (vide item 7.6).

A NBR 6118:2003 ainda apresentou poucos resultados contra a segurança. Seria interessante, para essa norma, adotar a limitação indicada pelo EUROCODE da parcela

$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$, assim, as estimativas dessa norma ficariam praticamente idênticas às do EUROCODE 2/2004, sempre a favor da segurança.

8.1.2.2 Sugestão para as normas de cálculo para lajes com furo(s) e transferência de momento

A sugestão para modificação do CEB-FIP/MC1990, do EUROCODE 2/2004, do ACI-318:2005 e da NBR 6118:2003 baseia-se, também, na indicação que a NBR 6118:2003 apresenta para o cálculo de punção em ligações laje-pilar de borda.

A proposta formulada indica, quando o momento transferido estiver no sentido da região com furo, a **adição ao momento solicitante** do momento M_{sd}^* , resultante da excentricidade do perímetro crítico **u**, da laje com furo, em relação ao centro do pilar (Figura 8.1). Quando o momento transferido estiver no sentido contrário à região com furo, o momento M_{sd}^* deve ser **descontado do momento solicitante**, cálculo semelhante ao de uma ligação laje-pilar de borda.

A consideração de limitações para a taxa de armadura de flexão, quando tratar da situação de furo adjacente em que o lado do furo encostado no pilar é maior que o lado do pilar, deve ser mantida:

- Para a NBR 6118:2003: $\rho \leq 0,5\%$;
- Para o EUROCODE 2/2004: $\rho \leq 0,90\%$.

Com estas sugestões foram eliminados os resultados contra a segurança das normas estudadas, tornando-as mais seguras sem aumentar muito o conservadorismo (vide item 7.9).

8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.2.1 Com relação ao aparato experimental utilizado no laboratório

- Melhorar o sistema de ensaio, inserindo equipamentos e instrumentos capazes de controlar a carga e o deslocamento nos locais de aplicação de carga;
- Colocar um sistema rotulado para todos os pontos de aplicação de carga, pois existe o risco das deformações das lajes levarem ao empenamento dos tirantes;
- Desenvolver um sistema seguro para medir deslocamentos na superfície inferior e superior das lajes, possivelmente utilizando medidor a *laser*, possibilitando então maior facilidade no acompanhamento das fissuras na superfície superior das lajes;
- Monitorar as rotações do pilar;
- Aperfeiçoar o sistema de fixação da laje no bloco de apoio, inserir, além da protensão, outra contenção para evitar a rotação da laje.

8.2.2 Novas pesquisas experimentais

- Estudo da armadura mínima para o caso de lajes com furos adjacentes ao pilar;
- Investigar a armadura de cisalhamento mais eficaz para lajes com furos e transferência de momento da laje ao pilar, variando o posicionamento dos furos, os tipos de armadura de cisalhamento e o momento transferido;
- Investigar outras situações de momento, com outras geometrias de pilares e de furos adjacentes;
- Ensaiar lajes protendidas com furo(s) adjacente(s) a um pilar interno, verificar o posicionamento mais satisfatório das cordoalhas e investigar o efeito da protensão nesse tipo de ligação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI COMMITTEE 318. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary - ACI 318/2002*. Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute, 2002.
- AL-YOUSIF, A. T.; REGAN P. E. *Punching Resistences of RC Slabs Supported by Large an/or Elongated Columns*. *The Structural Engineer*, March, 2003, pp 130-134.
- ANDERSSON, J. L. *Punching of Concrete Slabs with Shear Reinforcement*. Meddelande N° 47, Institutionen för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 1963.
- ANDRÄ, H. P. *Zum Tragverhalten von Flachdecken mit Dubelleisten*. *Bewehrung im Auflagerbereich*, *Beton-und Stahlbetonbau*, 76(H3), pp 53-57 & (H4) pp 100-104, 1981.
- ANDRÄ, H. P. *Zum Tragverhalten des Auflagerbereichs von Flachdecken*. Stuttgart, Dr. Ing Thesis, Universität Stuttgart, 1982.
- ANDRADE, J. L. S. de. *Estudo Experimental da Inclinação de Estribos Abertos em Lajes Cogumelo de Concreto Armado*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília 2000, 142 p.
- ANDRADE, M. A. S. de. *Punção em lajes cogumelo – Estudo do Posicionamento da Armadura de Cisalhamento em Relação à Armadura de Flexão*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 1999, 156 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739:1994 – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto*. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118:2003 – Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6152:1992 – Materiais Metálicos – Determinação das Propriedades de Tração*. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222:1994 – Argamassa de Concreto – Determinação da Resistência à Tração Por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522:1984 – Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão-Deformação – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1984.
- BORGES, L. L. J. *Comportamento ao Puncionamento de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares e Furos de Grandes Dimensões*. Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2004, 365p.
- BRAESTRUP, M. W. *Axisymmetric Punching of Plain and Reinforced Concrete*. Report R 75. Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, Copenhagen, 1976.
- BROMS, C. E. *Punching of Flat Plates: A Question of Concrete Properties in Biaxial Compression and Size effect*. ACI Structural Journal. Vol. 87(3), May-Jun 1990, pp 292-304.
- CEB-FIP (1990). *CEB-FIP Model Code 1990: Final Draft*. Bulletin D'Information, Committee Euro-International du Beton, Lausanne, July. 1991.
- CARVALHO, E. M. L. *Puncionamento de Lajes Protendidas*. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1982.
- COELHO, A. E. G. *Puncionamento em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Resistência de 30MPa e Armadura de Cisalhamento Vertical e Inclinada*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 1999, 133 p.
- CORDOVIL, F. A. B. *Punção em Placas de Concreto Armado*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995, 393p.
- DIAS, D. P. *Reforço ao Puncionamento em Lajes-cogumelo*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- DIAS DE COSSIO, R. *Discussion of "Shear and Diagonal Tension.. Part 3 – Slabs and Footings"*. ACI Journal Proceedings, Vol. 59, n°9, September 1962, pp 1323-1332.
- ELSTNER, R. C.; HOGNESTAD, E. *Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs*. ACI Journal, Vol. 53, n°1, Jul, pp 29-58, 1956.

- EUROCODE 2. *Design of concrete structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings*. European Prestandard ENV 1992-1-1:2004. European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- FORSELL, C.; HOLMBERG, A. *Stampellast pa Platter av Betong*. *Betong*, Vol. 31, n°2, pp 95-123, 1946.
- FUSCO, P. B. *Investigação Experimental Sobre o Cisalhamento em Lajes de Concreto Armado*. Boletim Técnico 8505, Depto. Engenharia de Estruturas e Fundações, EPUSP, São Paulo, 1985.
- GOMES, R. B. *Punching Resistance of Reinforced Concrete Flat Slabs with Shear Reinforcement*. Polytechnic of Central London, PhD Thesis, October, 1991, 185p.
- GOMES, R. B.; ANDRADE, M.A.S. de. *Punching in Reinforced Concrete Flat Slabs with Holes*. In: *Proceedings of Developments in Computer Aided Design and Modelling for Structural Engineering*. Edinburgh-UK, pp.185-193, 1995.
- GRAF, O. *Tests of Reinforced Concrete Slabs Under Concentrated Load Applied Near One Support (Versuche Über Die Widerstandsfähigkeit Von Eisenbetonplatten Unter Konzentrierter Last Nahe Einem Uflager)*. Deutscher Ausschuss für Eisenbeton, Heft 73 Berlin, pp 28p, 1933.
- GRAF, O. *Strength Tests of Reinforced Concrete Slabs Supported on All Sides Under Concentrated Loads (Versuche Über Die Widerstandsfähigkeit Von Allseitigen Dicken Eisenbeton Platten Unter Einzellasten)*. Deutscher Ausschuss für Eisenbeton, Heft 88 Berlin, pp 22p, 1938.
- HALLGREN, M. *Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs*. Royal Institute of Technology, Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden, 1996, 206p.
- HAWKINS, N. W. *Shear Strength of Slabs With Shear Reinforcement*. ACI Publication SP 42, Detroit, 1974, pp 785-815.
- HAWKINS, N. W.; BAO, A.; YAMASAKI, J. *Moment Transfer from Concrete Slabs to Columns*. ACI Structural Journal. Vol. 86, n°6, Nov-Dec 1989, pp 705-716.
- HAWKINS, N. W.; FALLSEN, H. B.; HINOJOSA, R. C. *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, pp 126-146.

- HANSON, N. W.; HANSON, J. M. *Shear and Moment Transfer Between Concrete Slabs and Columns*. Journal. PCA Research and Development Laboratories. Vol. 10, n°1, pp 2-16, 1968.
- IOANNOU, C. *Behaviour of Flat Slabs With Openings*. University of Sheffield, PhD Thesis, 2001.
- ISLAM, S.; PARK, R. *Tests on Slabs-column Connections with Shear and Unbalanced Flexure*. Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 102 (ST9), March 1976, p. 549-568.
- JOHANSEN, K. W. *Linhas de Ruptura – Teoria e Prática*. Traduzido do original dinamarquês por Jayme Mason (livre docente da Escola Nacional de Engenharia). Editora Ao Livro Técnico S.A. Rio de Janeiro, 1962.
- KINNUNEN, S.; NYLANDER, H. *Punching of Concrete Slabs Without Shear Reinforcement*. Meddelande N° 38, Institutionen för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolans, Stockholm, 1960.
- KINNUNEN, S.; NYLANDER, H.; TOLF P. *Plattjocklekens Inverkan på Betongplattors Hållfasthet vid Genomstansning: Försök med Rektangulära Plattor*. (Trita – BST – 0137). Institutionen för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolans, Stockholm, 1980.
- KINNUNEN, S. *Punching of Concrete Slabs With Two-way Reinforcement With Special Reference to Dowel Effect and Deviation of Reinforcement from Polar Symmetry*. Meddelande N° 41, Institutionen för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolans, Stockholm, 1963.
- KOCH, R. *Flat Slab-column-connections With Shear Comb Reinforcement*. Otto Graf Journal, Vol. 1, 1990, pp 125-140.
- LANGHOR, P. H.; GHALI, A.; DILGER, W. H. *Stud Shear Reinforcement for Flat Concrete Plates*. ACI Journal, Vol. 73(3), March 1976, pp 141-146.
- MACGREGOR, J. G. *Reinforced Concrete – Mechanics and Design*. 2^a edition, Prentice Hall Editora, 1992, 848p.
- MARTINELLI, D. A. O. *Sobre a Ruína das Ligações Laje-pilar nos Cantos de Lajes Cogumelo*. Tese de Livre-Docência, Esc. Eng. São Carlos - USP, 1974, 142p.

- MELGES, J. L. P. *Punção em Lajes: Exemplos de Cálculo e Análise Teórico-experimental*. Dissertação de Mestrado, EESC/USP, São Carlos, 1995.
- MELO, G. S. A. *Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure*. Polytechnic of Central London, PhD Thesis, August, 1990, 214 p.
- MELO, G. S. A. *Puncionamento, Pós-puncionamento e Colapso Progressivo em Lajes Cogumelo*. IV Simpósio EPUSP Estruturas de Concreto. São Paulo, 2000.
- MOKHTAR, A.; GHALI, A.; DILGER, W. H. *Stud Shear Reinforcing for Flat Concrete Plates*. ACI Journal Proceedings, Vol. 82(5), Sept-Oct 1985, pp 676-683.
- MOWRER, R. D; VANDERBILT, M. D. *Shear strength of lightweight aggregate reinforced concrete flat plates*. ACI Journal, Sep-Oct 1985, p. 676-683.
- NAGATO, Y. *Mecânica Experimental*. Notas de aula, Brasília, 2004.
- NILSSON, A. *Spänningstillstånd i Plattdel Utanföör Skjuvarmering Vid Genomstansning*. Meddelande N° 140, Institutionen för Byggnadsstatik, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm, 1963.
- OLIVEIRA, D. R. C. *Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto de Alta Resistência com Armadura Inclinada de Punçã*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 1998, 137 p.
- OLIVEIRA, D. R. C. *Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares*. Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2003, 214 p.
- PARK, R.; GAMBLE, W. L. *Reinforced Concrete Slabs*. John Wiley & Sons Editora, 1980, 618p.
- PINTO, R. C. A. *Punção Assimétrica em Lajes*. 1993, 145p. Tese de Mestrado, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1993.
- REGAN, P. E. *Design for Punching Shear*. The Structural Engineer, vol. 52, n° 6, p. 197-207, June, 1974.
- REGAN, P. E. *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.

- REGAN P. E.; BRAESTRUP, M. W. *Punching Shear in Reinforced Concrete: A State of Art Report*. Bulletin D'information 168, Comite Euro International Du Beton, January 1985, 232 p.
- REGAN P. E.; REZAI-JORABI, H. *Shear Resistance of One-way Slabs Under Concentrated Loads*. ACI Structural Journal, March-April 1988, pp 150-158.
- RICHART, F. E. *Reinforced Concrete Wall and Column Footing*. ACI Journal, vol. 45, n° 2, p. 97-127, p. 237-260, November, 1948.
- ROLL, F.; ZAID, S. T. H.; SABNIS, G. M.; CHUANG, K. *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.
- SANTOS, V. C. F. *Resistência ao Puncionamento de Lajes Cogumelo de Concreto Armado*. Projeto Final de Graduação, UnB, 1995, 48p.
- SEIBLE, F.; GHALI, A.; DILGER, W. H. *Preassembled Shear Reinforcing Units for Flat Plates*. ACI Journal, Vol. 77(1), Jan-Feb 1980, pp 28-35.
- SHEHATA, I. A. E. M. *Theory of Punching in Concrete Slabs*. 1982, 150p. Polytechnic of Central London, PhD Thesis, Sept, 1985.
- SHEHATA, I. A. E. M.; REGAN, P. E. *Punching in RC Slabs*. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 7, July, pp 1726-1740, 1989.
- SILVA, A. S. *Punção em lajes cogumelo: Pilares Retangulares, Furos e Armadura de Cisalhamento*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2003, 210 p.
- SOUZA, R. M. de. *Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado Com Furos Adjacentes ou Distantes de Um Pilar Interno*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2004, 171p.
- SOUZA, V. C. M de.; CUNHA, A. J. P. *Lajes em Concreto Armado e Protendido*. 2ª edição, Niterói: EDUFF, Rio de Janeiro, Ed UERJ, 580p, 1998.
- STIGLAT, K.; STEINER, J. *Durchstanzen von mit Dubelleisten Verstärkten Flachdecken*. Die auf Stahlstützen Aufliegen, Beton-und Stahlbetonbau, 75(H10), pp 239-246, 1980.
- SZILARD, R. *Theory na Analysis of Plates – Classical na Numerical Methods*. Pretince Hall Editora, 1974, 724p.

- TALBOLT, A. N. *Reinforced Concrete Wall Footings and Column Footings*. Bulletin 67, March 1913. 1-114, University of Illinois, Engeneering Experiment Station, Urbana, 1913.
- TAKEYA, T. *Estudo Experimental da Ruína de Ligações Laje-pilar em Bordas de Laje Cogumelo*. Dissertação de Mestrado, Esc. de Eng. de São Carlos, USP, , 1981, 241p.
- TENG, S.; KUANG, K. L.; CHEONG, H. K. *Concrete Flat Plate Design – Findings of Joint BCA-NTU*, R&D Projec, 1999, 15p.
- TRAUTWEIN, L. M. *Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento Tipo “Studs” Interno e Estribo Inclinado*. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2001, 167 p.
- TRAUTWEIN, L. M. *Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Análise Experimental e Numérica*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006, 350p.
- VAN DER VOET, A. F.; GHALI, A.; DILGER, W. H. *Concrete Flat Plates With Well-anchored Shear Reinforcement Elements*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 9(1), 1982, pp 107-114.
- VARGAS, E. N. Z., *Punção em Lajes Cogumelo de Concreto de Alta Resistência Reforçado com Fibras de Aço*. Dissertação de Mestrado, EESC/USP, São Carlos, 1997.
- YITZHAKI, D. *Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs*. ACI Journal. Vol. 63, n°5, May 1966, pp 527-540.
- YITZHAKI, D. *Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs*. Bulletin d’ Information n°58, CEB, Oct 1966, pp 83-115.

APÊNDICE A

GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DO AÇO DA ARMADURA DE FLEXÃO E DA ARMADURA DE CISALHAMENTO

O ensaio do aço com diâmetro 5,0mm foi feito em uma prensa da marca EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda, mostrada na Figura A.1. O software utilizado permitiu que os pontos da curva “Tensão x Deformação Específica” fossem armazenados para que pudesse ser feito o gráfico, como mostrado na Figura A.2.

Para os demais aços ensaiados, foi utilizada uma prensa analógica MARUTO, com automação feita pela empresa EMIC, como mostrado na Figura A.3. O software utilizado não armazena os dados para a confecção da curva “Tensão x Deformação Específica”. As curvas fornecidas pelo software, da “Tensão x Deformação Específica (%)”, são mostradas nas Figuras A.4 a A.9, onde, no gráfico, a deformação específica (%) é o percentual do comprimento entre as garras do extensômetro (50mm), que a amostra deformou em cada passo de carga.



Figura A.1 – Prensa utilizada para o ensaio do aço com 5,0mm de diâmetro

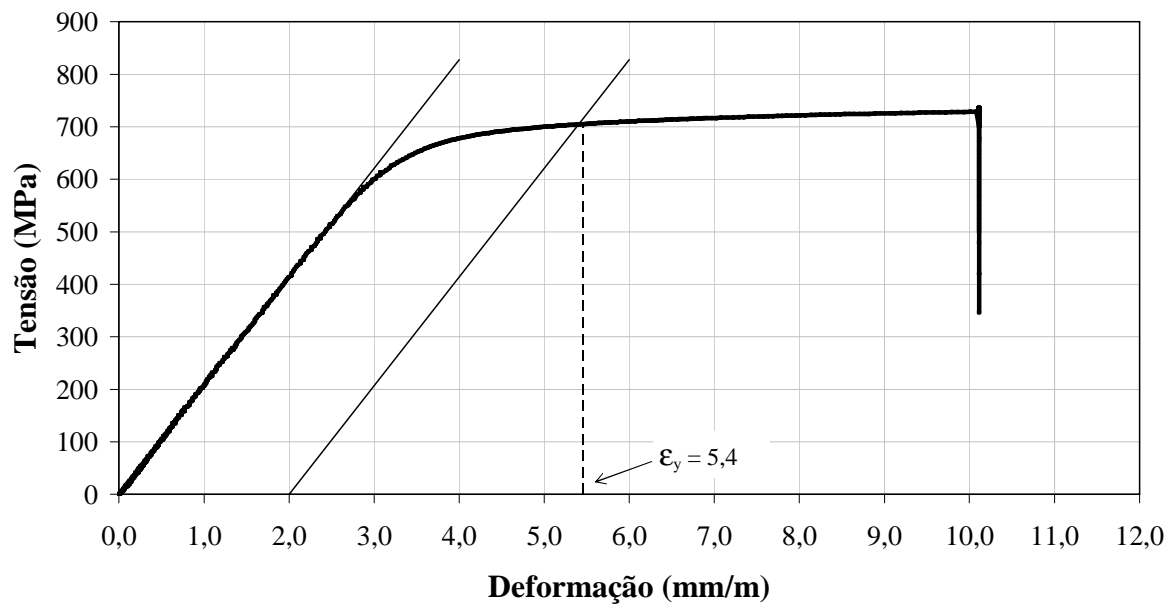


Figura A.2 – Curva “Tensão x Deformação” do aço com 5,0mm de diâmetro



Figura A.3 – Prensa utilizada para o ensaio dos aços com diâmetro maior ou igual a 6,3mm

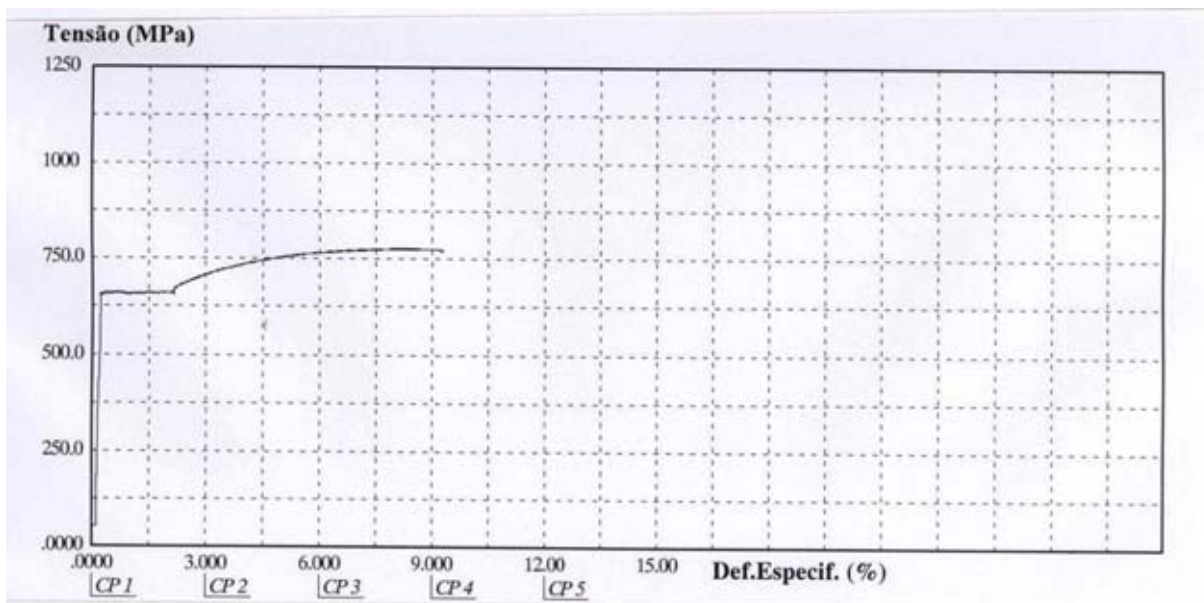


Figura A.4 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 1 do aço com 6,3mm de diâmetro

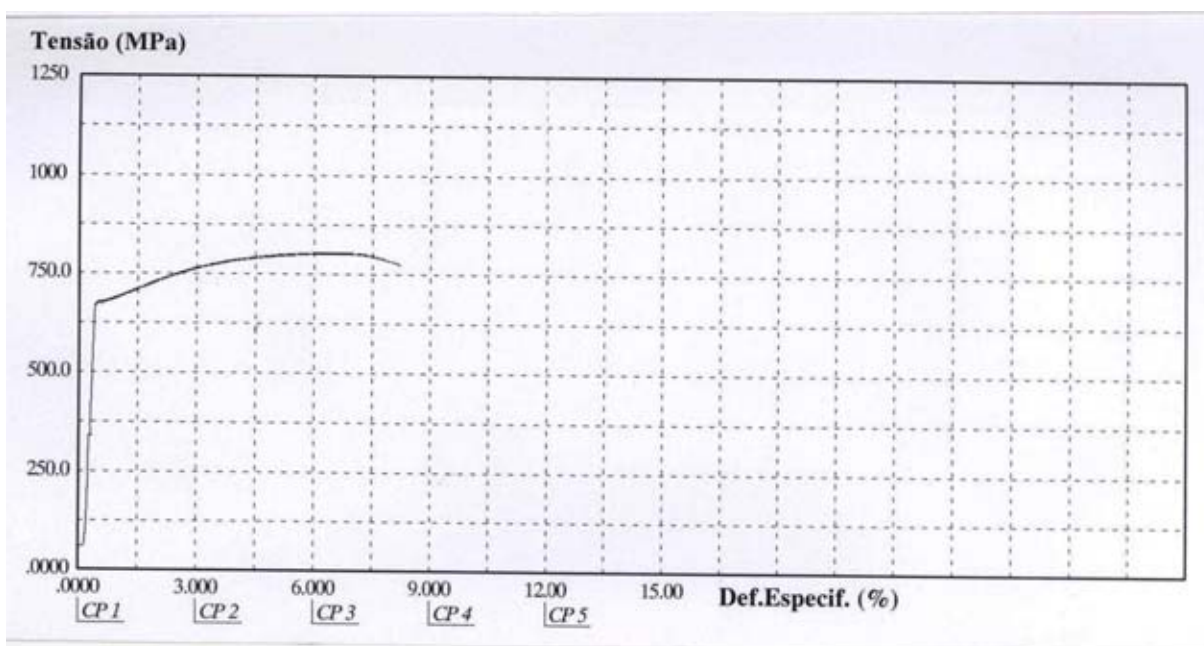


Figura A.5 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 2 do aço com 6,3mm de diâmetro

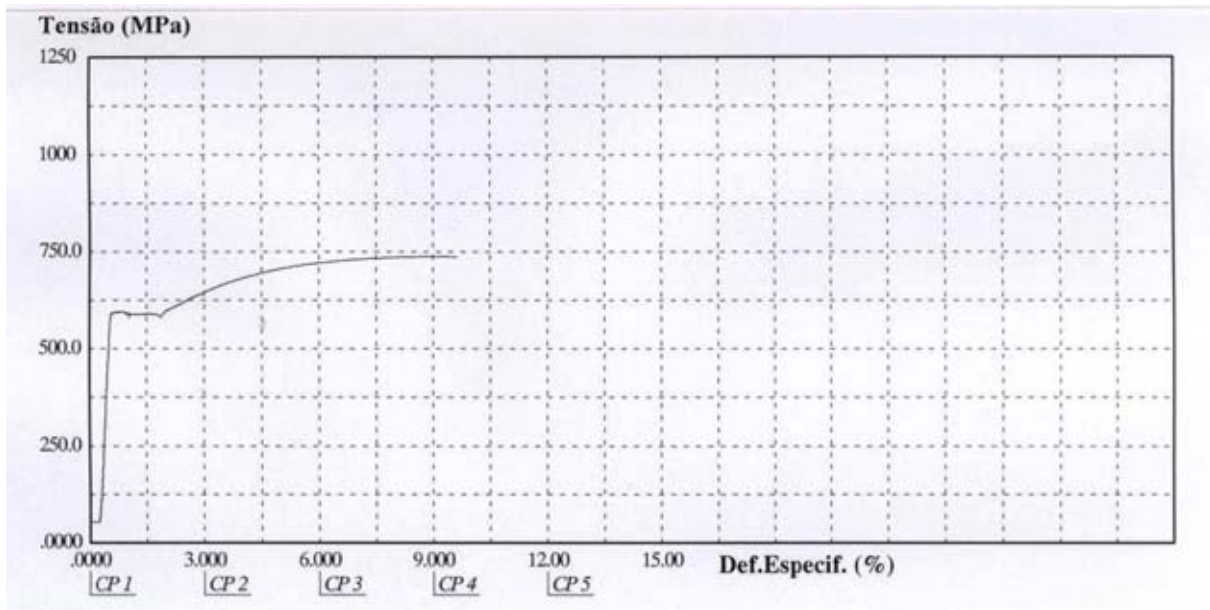


Figura A.6 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 1 do aço com 12,5mm de diâmetro

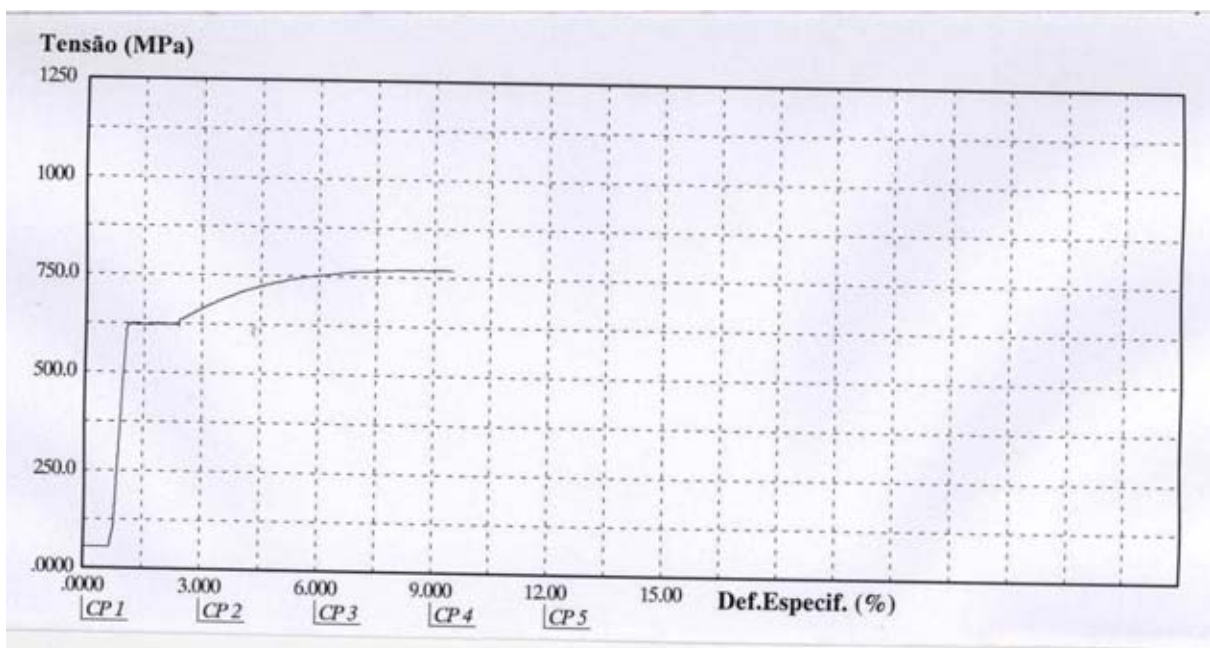


Figura A.7 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 2 do aço com 12,5mm de diâmetro

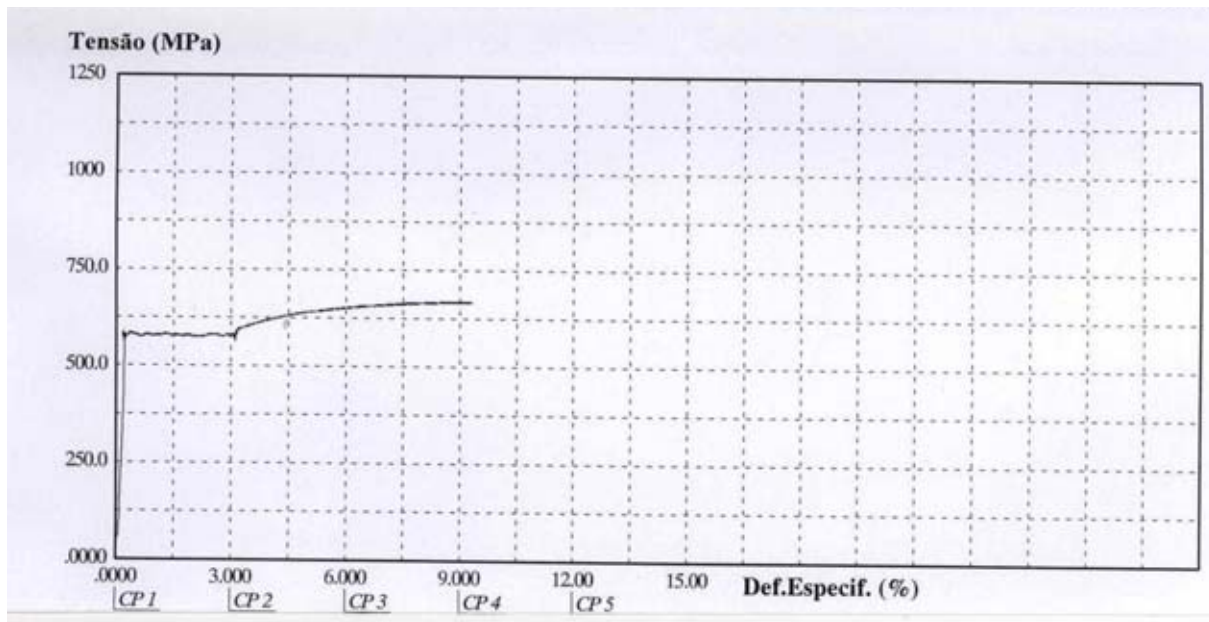


Figura A.8 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 3 do aço com 12,5mm de diâmetro

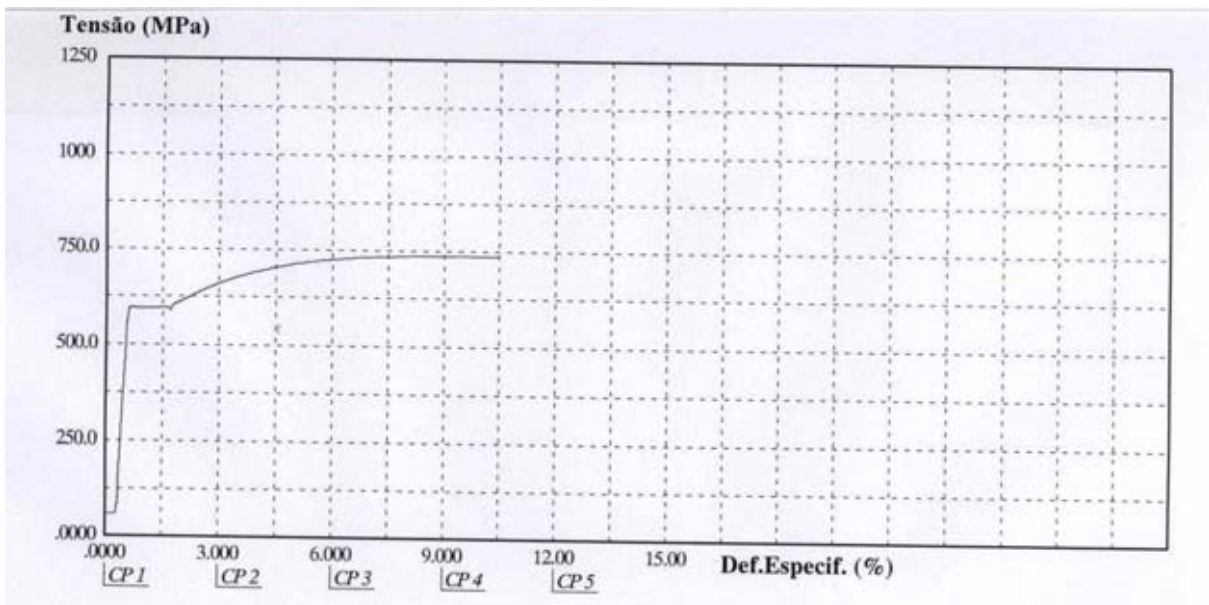


Figura A.9 – Curva “Tensão x Deformação Específica (%)” - lote 1 do aço com 16,0mm de diâmetro

APÊNDICE B

LEITURAS DOS ENSAIOS

B.1 DESLOCAMENTO VERTICAL

Tabela B.1 – Deslocamentos verticais da laje L1

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	-0,27	-0,28	-0,05	0,00	-0,26	-0,29	-0,35	-0,32	-0,02	-0,01	-0,33	-0,29
100	-0,67	-0,73	-0,11	0,00	-0,65	-0,73	-0,85	-0,77	-0,06	-0,03	-1,04	-0,73
125	-1,18	-0,95	-0,14	0,00	-0,85	-1,38	-1,42	-0,98	-0,07	-0,05	-1,05	-1,38
150	-1,80	-1,22	-0,16	-0,01	-1,12	-2,03	-1,94	-1,34	-0,09	-0,06	-1,05	-2,03
175	-2,35	-1,58	-0,19	0,00	-1,42	-2,80	-2,64	-1,83	-0,12	-0,08	-1,05	-2,80
200	-2,95	-1,99	-0,22	0,00	-1,76	-3,65	-3,37	-2,34	-0,15	-0,10	-1,05	-3,65
250	-4,51	-3,01	-0,28	-0,01	-2,69	-5,20	-5,26	-3,66	-0,21	-0,14	-1,05	-5,20
300	-5,86	-3,01	-0,33	-0,01	-3,62	-5,99	-6,91	-4,80	-0,26	-0,17	-1,05	-5,99
350	-7,69	-3,01	-0,39	-0,03	-4,66	-8,85	-8,80	-6,13	-0,32	-0,22	-1,05	-8,85

Tabela B.2 – Deslocamentos verticais da laje L2

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,05	-0,02	0,00	-	-0,08	-0,12	-0,24	-0,17	-0,01	0,00	0,00	-0,01
50	-0,15	-0,09	0,00	-	-0,28	-0,40	-0,43	-0,31	-0,02	0,00	-0,17	-0,26
75	-0,30	-0,19	0,00	-	-0,61	-0,86	-0,83	-0,60	-0,04	0,00	-0,47	-0,69
100	-0,53	-0,35	0,00	-	-1,11	-1,53	-1,42	-1,01	-0,05	-0,01	-0,87	-1,25
125	-0,80	-0,52	0,00	-	-1,77	-2,40	-2,10	-1,49	-0,07	-0,02	-1,38	-1,95
150	-1,12	-0,73	0,00	-	-2,59	-3,48	-2,87	-2,04	-0,10	-0,06	-1,96	-2,76
200	-1,82	-1,23	0,00	-	-4,69	-6,23	-4,72	-3,37	-0,17	-0,15	-3,37	-4,71

Tabela B.3 – Deslocamentos verticais da laje L3

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,05	-0,01	-0,01	-	-0,10	-0,14	-0,14	-0,09	0,00	0,00	-0,07	-0,08
50	-0,15	-0,07	-0,02	-	-0,26	-0,36	-0,34	-0,24	0,00	-0,02	-0,24	-0,31
75	-0,25	-0,14	-0,02	-	-0,51	-0,73	-0,67	-0,47	0,00	-0,03	-0,55	-0,76
100	-0,40	-0,22	-0,04	-	-0,90	-1,24	-1,16	-0,82	0,02	-0,11	-0,99	-1,39
125	-0,67	-0,37	-0,06	-	-1,60	-2,26	-1,79	-1,28	0,02	-0,13	-1,66	-2,32
150	-0,99	-0,58	-0,08	-	-2,17	-3,03	-2,45	-1,75	0,05	-0,18	-2,24	-3,14
200	-1,48	-0,90	-0,10	-	-3,90	-5,36	-4,04	-2,98	0,05	-0,23	-3,29	-4,59
225	-1,44	-0,90	-0,12	-	-6,22	-8,28	-6,05	-4,64	0,05	-0,28	-4,10	-5,63

Tabela B.4 – Deslocamentos verticais da laje L4

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,03	-0,05	-0,01	-	-0,10	-0,20	-0,18	-0,12	-0,02	0,00	-0,07	-0,10
50	-0,17	-0,14	-0,03	-	-0,18	-0,31	-0,20	-0,14	-0,02	0,00	-0,30	-0,44
75	-0,17	-0,37	-0,03	-	-0,42	-0,69	-0,70	-0,50	-0,02	0,00	-0,64	-0,93
100	-1,41	-0,96	-0,05	-	-0,92	-1,46	-1,46	-1,04	-0,02	-0,02	-1,34	-1,93
125	-2,45	-1,62	-0,07	-	-1,76	-2,67	-2,48	-1,75	0,00	-0,06	-2,13	-3,07
150	-3,56	-2,40	-0,09	-	-3,02	-4,51	-3,53	-2,48	0,00	-0,11	-3,23	-4,65
175	-4,30	-2,88	-0,10	-	-4,43	-6,45	-4,79	-3,36	-0,01	-0,13	-4,06	-5,82
200	-5,05	-3,39	-0,11	-	-6,28	-8,56	-5,93	-4,14	-0,01	-0,19	-5,45	-7,28

Tabela B.5 – Deslocamentos verticais da laje L5

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,06	-0,03	0,00	-	-0,05	-0,10	-0,12	0,00	0,00	0,02	-0,04	-0,05
50	-0,16	-0,09	0,01	-	-0,18	-0,29	-0,27	-0,09	-0,01	0,02	-0,20	-0,29
75	-0,36	-0,23	0,00	-	-0,42	-0,64	-0,64	-0,37	-0,02	0,02	-0,47	-0,69
100	-0,57	-0,37	-0,01	-	-0,76	-1,14	-1,12	-0,70	-0,03	0,01	-0,81	-1,18
125	-0,86	-0,57	-0,03	-	-1,19	-1,75	-1,77	-1,18	-0,04	0,00	-1,23	-1,78
150	-1,20	-0,79	-0,05	-	-1,67	-2,44	-2,48	-1,71	-0,06	-0,02	-1,74	-2,49
175	-1,67	-1,11	-0,08	-	-2,27	-3,28	-3,21	-2,24	-0,08	-0,04	-2,26	-3,23
200	-2,05	-1,37	-0,10	-	-2,88	-4,13	-3,94	-2,74	-0,09	-0,06	-2,78	-3,95
225	-2,45	-1,64	-0,13	-	-3,61	-5,12	-4,82	-3,35	-0,10	-0,08	-3,39	-4,83
250	-2,80	-1,88	-0,16	-	-4,40	-6,19	-5,58	-3,89	-0,12	-0,11	-4,01	-5,68
275	-3,14	-2,12	-0,17	-	-4,94	-6,92	-6,43	-4,48	-0,14	-0,10	-4,48	-6,34
300	-3,54	-2,40	-0,21	-	-5,84	-8,12	-7,24	-5,07	-0,15	-0,13	-5,15	-7,27
325	-3,99	-2,70	-0,24	-	-6,63	-9,14	-8,23	-5,78	-0,17	-0,15	-5,75	-8,11
350	-4,45	-3,03	-0,27	-	-7,69	-10,44	-9,28	-6,55	-0,19	-0,16	-6,46	-9,08

Tabela B.6 – Deslocamentos verticais da laje L6

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,05	-0,07	-0,01	-	-0,05	-0,06	-0,10	-0,07	0,00	0,00	-0,05	-0,08
50	-0,15	-0,14	-0,02	-	-0,21	-0,28	-0,28	-0,20	-0,02	0,00	-0,23	-0,33
75	-0,31	-0,25	-0,04	-	-0,45	-0,63	-0,70	-0,49	-0,03	0,00	-0,50	-0,72
100	-0,57	-0,43	-0,06	-	-0,84	-1,19	-1,35	-0,96	-0,06	-0,05	-0,93	-1,35
150	-1,37	-0,96	-0,15	-	-1,85	-2,61	-2,73	-1,87	-0,12	-0,13	-2,13	-3,04
200	-2,12	-1,45	-0,21	-	-3,22	-4,50	-4,32	-3,05	-0,17	-0,20	-3,29	-4,71
250	-2,95	-2,01	-0,29	-	-4,66	-6,48	-6,06	-4,31	-0,23	-0,27	-4,48	-6,41
300	-3,85	-2,63	-0,40	-	-6,16	-8,46	-7,67	-5,45	-0,27	-0,36	-6,00	-8,52
325	-4,25	-2,92	-0,44	-	-6,86	-9,37	-8,62	-6,12	-0,30	-0,36	-6,63	-9,42
350	-4,78	-3,29	-0,52	-	-7,90	-10,68	-9,49	-6,74	-0,32	-0,43	-7,56	-10,67
375	-5,31	-3,65	-0,60	-	-9,11	-12,08	-10,51	-7,47	-0,34	-0,45	-8,48	-11,92
400	-5,39	-3,74	-0,61	-	-12,30	-15,67	-11,87	-8,54	-0,42	-0,41	-10,67	-14,51

Tabela B.7 – Deslocamentos verticais da laje L7

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,07	-0,05	-0,01	-	-0,04	-0,06	-0,12	-0,08	-0,01	0,01	-0,01	-0,01
50	-0,17	-0,12	-0,03	-	-0,14	-0,20	-0,27	-0,19	-0,01	0,01	-0,17	-0,25
75	-0,32	-0,22	-0,04	-	-0,28	-0,40	-0,53	-0,38	-0,01	-0,05	-0,20	-0,29
100	-0,51	-0,36	-0,07	-	-0,46	-0,67	-0,83	-0,60	-0,01	-0,05	-0,47	-0,67
125	-0,82	-0,58	-0,11	-	-0,76	-1,10	-1,43	-1,01	-0,02	-0,03	-0,87	-1,25
150	-1,15	-0,81	-0,14	-	-1,09	-1,59	-1,98	-1,39	-0,02	-0,04	-1,32	-1,89
200	-2,08	-1,43	-0,23	-	-2,02	-2,96	-3,35	-2,33	-0,02	-0,05	-2,43	-3,50
250	-2,97	-2,04	-0,33	-	-2,89	-4,23	-4,74	-3,29	0,00	-0,07	-3,48	-5,02
300	-3,83	-2,64	-0,43	-	-3,95	-5,74	-6,22	-4,34	0,00	-0,08	-4,63	-6,67
350	-4,69	-3,22	-0,52	-	-4,92	-7,11	-7,62	-5,32	0,01	-0,11	-5,70	-8,19
400	-5,50	-3,79	-0,58	-	-6,24	-8,84	-8,90	-6,21	0,00	-0,11	-7,16	-10,17

Tabela B.8 – Deslocamentos verticais da laje L8

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,08	0,08	0,02	-	-0,24	-0,34	-0,12	-0,10	-0,02	-0,01	-0,07	-0,13
50	0,03	0,32	0,09	-	-0,87	-1,23	-0,54	-0,39	-0,03	-0,02	-0,27	-0,42
75	0,08	0,61	0,18	-	-1,89	-2,68	-1,07	-0,77	-0,02	-0,04	-0,72	-1,06
100	0,08	0,97	0,29	-	-3,11	-4,39	-2,09	-1,49	-0,01	-0,01	-0,96	-1,42
125	0,08	1,30	0,35	-	-4,46	-6,25	-2,60	-1,87	0,00	-0,05	-1,63	-2,38
150	0,08	2,02	0,50	-	-6,66	-9,20	-3,84	-2,72	0,02	0,03	-2,27	-3,26

Tabela B.9 – Deslocamentos verticais da laje L9

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,09	-0,05	-	-	-0,04	-0,06	-0,12	-0,09	0,00	-0,01	-0,05	-0,06
50	-0,27	-0,19	-	-	-0,14	-0,21	-0,34	-0,25	-0,01	0,00	-0,20	-0,28
75	-0,54	-0,37	-	-	-0,32	-0,49	-0,65	-0,47	-0,02	0,00	-0,45	-0,65
100	-0,99	-0,69	-	-	-0,56	-0,84	-1,08	-0,77	-0,03	-0,01	-0,84	-1,22
150	-2,09	-1,43	-	-	-1,29	-1,92	-2,39	-1,70	-0,07	-0,06	-1,66	-2,41
200	-3,23	-2,19	-	-	-2,06	-3,05	-3,52	-2,50	-0,09	-0,08	-2,70	-3,90
250	-4,16	-2,85	-	-	-2,70	-3,96	-4,67	-3,27	-0,13	-0,17	-3,29	-4,87
300	-5,50	-3,82	-	-	-3,57	-5,15	-5,97	-4,21	-0,15	-0,19	-4,46	-6,51
325	-6,26	-4,38	-	-	-4,00	-5,77	-6,94	-4,93	-0,19	-0,21	-4,91	-7,14

Tabela B.10 – Deslocamentos verticais da laje L10

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,14	0,10	-	-	-0,21	-0,28	-0,16	-0,11	0,01	0,00	-0,05	-0,07
50	0,47	0,33	-	-	-0,78	-1,11	-0,48	-0,34	0,01	0,01	-0,25	-0,36
75	0,87	0,63	-	-	-1,62	-2,34	-0,94	-0,66	0,03	0,01	-0,54	-0,78
100	1,42	1,03	-	-	-2,79	-3,96	-1,56	-1,09	0,09	0,04	-0,99	-1,42
125	2,07	1,49	-	-	-4,16	-5,95	-2,23	-1,55	0,16	0,07	-1,48	-2,11
150	2,84	2,05	-	-	-5,68	-8,05	-2,82	-1,98	0,23	0,13	-2,09	-2,93

Tabela B.11 – Deslocamentos verticais da laje L11

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	-0,96	-0,66	-0,14	-	0,34	0,45	-0,31	-0,19	-0,02	0,02	-0,19	-0,29
75	-1,94	-1,34	-0,26	-	0,61	0,84	-0,83	-0,64	-0,04	-0,19	-0,57	-0,73
100	-3,22	-2,23	-0,41	-	0,96	1,32	-1,46	-1,03	-0,04	-0,18	-0,94	-1,24
150	-6,38	-4,33	-0,76	-	1,85	2,56	-2,93	-2,06	-0,01	-0,14	-1,84	-2,49
200	-9,53	-6,48	-1,09	-	2,93	4,07	-4,23	-2,92	0,07	0,02	-2,60	-3,56
225	-11,56	-7,85	-1,33	-	3,70	5,08	-5,01	-3,47	0,14	0,11	-3,04	-4,15
250	-13,67	-9,30	-1,55	-	4,57	6,27	-5,80	-3,99	0,22	0,25	-3,48	-4,76

Tabela B.12 – Deslocamentos verticais da laje L12

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,01	-0,06	-0,09
25	0,03	0,02	0,00	-	-0,10	-0,15	-0,09	-0,07	0,00	-0,04	-0,08	-0,09
50	0,10	0,07	0,03	-	-0,34	-0,50	-0,28	-0,19	0,00	-0,04	-0,18	-0,25
75	0,20	0,14	0,04	-	-0,70	-1,00	-0,55	-0,37	0,00	-0,07	-0,37	-0,51
100	0,29	0,21	0,05	-	-1,16	-1,67	-0,93	-0,62	-0,01	-0,08	-0,59	-0,81
150	0,53	0,37	0,07	-	-2,73	-3,98	-2,44	-1,66	0,03	-0,07	-1,55	-2,19
200	0,66	0,48	0,10	-	-4,54	-6,60	-3,86	-2,63	0,06	0,03	-2,56	-3,64
225	0,77	0,56	0,13	-	-5,50	-7,96	-4,74	-3,20	0,08	-0,02	-3,02	-4,29
250	0,87	0,62	0,14	-	-6,18	-8,92	-5,19	-3,49	0,08	0,03	-3,40	-4,85
275	0,99	0,72	0,16	-	-7,28	-10,42	-5,97	-4,04	0,11	0,05	-3,93	-5,60

Tabela B.13 – Deslocamentos verticais da laje L13

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,02	0,02	-	-	-0,10	-0,15	-0,12	-0,08	0,00	0,00	-0,01	-0,03
50	0,06	0,05	-	-	-0,40	-0,57	-0,34	-0,25	0,00	0,00	0,06	-0,24
75	0,12	0,09	-	-	-0,78	-1,14	-0,71	-0,51	-0,01	0,01	-0,35	-0,51
100	0,17	0,14	-	-	-1,33	-1,96	-1,14	-0,79	-0,01	0,03	-0,64	-0,93
125	0,22	0,19	-	-	-2,01	-2,97	-1,70	-1,20	0,01	0,05	-1,56	-1,48
150	0,29	0,25	-	-	-2,57	-3,80	-2,16	-1,54	0,00	0,05	-1,89	-1,95
175	0,36	0,30	-	-	-3,19	-4,70	-2,76	-1,96	-0,01	0,08	-2,18	-2,39
200	0,48	0,41	-	-	-4,02	-5,92	-3,42	-2,42	0,02	0,16	-2,58	-2,98
225	0,55	0,47	-	-	-4,85	-7,13	-4,01	-2,81	0,03	0,19	-3,08	-3,69
250	0,69	0,59	-	-	-6,03	-8,79	-4,75	-3,35	0,03	0,25	-3,65	-4,47

Tabela B.14 – Deslocamentos verticais da laje L14

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,13	0,09	0,02	-0,04	-0,17	-0,25	-0,09	-0,06	0,00	0,00	-0,05	-0,08
50	0,43	0,29	0,07	-0,12	-0,66	-0,96	-0,30	-0,20	0,00	0,00	-0,23	-0,40
75	0,76	0,52	0,14	-0,23	-1,38	-2,02	-0,62	-0,42	0,00	0,00	-0,55	-0,78
100	1,13	0,77	0,22	-0,38	-2,43	-3,54	-1,16	-0,78	-0,01	0,00	-0,97	-1,37
150	1,99	1,38	0,37	-0,75	-5,23	-7,64	-2,63	-1,77	-0,03	-0,04	-2,05	-2,92
200	2,97	2,08	0,53	-1,10	-7,99	-11,60	-4,04	-2,71	-0,04	-0,08	-3,10	-4,46
250	4,61	3,23	0,83	-1,52	-11,45	-16,54	-5,62	-3,71	-0,04	-0,12	-4,34	-6,26

Tabela B.15 – Deslocamentos verticais da laje L15

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,08	-0,04	0,01	0,00	-0,01	-0,04	-0,41	-0,29	-0,05	0,02	0,15	0,21
50	-0,21	-0,12	0,01	0,01	-0,11	-0,15	-1,23	-0,89	-0,13	0,08	0,49	0,66
75	-0,46	-0,28	-0,01	0,01	-0,25	-0,34	-2,63	-1,85	-0,27	0,18	1,03	1,36
100	-0,82	-0,52	0,01	0,02	-0,47	-0,66	-4,39	-3,07	-0,42	0,30	1,54	2,05
150	-2,01	-1,29	0,10	0,03	-1,29	-1,80	-9,13	-6,50	-0,78	0,01	2,39	2,76
200	-3,40	-2,21	0,17	0,12	-2,10	-2,99	-14,33	-10,18	-1,19	0,37	4,03	4,87
250	-4,75	-3,01	0,51	0,60	-3,15	-4,59	-	-	-1,99	0,72	5,57	8,92

Tabela B.16 – Deslocamentos verticais da laje L16

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
25	-0,08	-0,04	0,00	0,00	-0,06	-0,04	-0,11	-0,07	-	0,00	-0,01	-0,02
50	-0,23	-0,15	-0,02	-0,01	-0,13	-0,14	-0,36	-0,23	-	0,00	-0,08	-0,12
75	-0,41	-0,28	-0,04	-0,03	-0,23	-0,28	-0,72	-0,50	-	0,00	-0,28	-0,18
100	-0,70	-0,46	-0,07	-0,05	-0,35	-0,44	-1,35	-0,94	-	-0,02	-0,34	-0,50
125	-1,06	-0,71	-0,09	-0,05	-0,50	-0,66	-2,13	-1,47	-	-0,02	-0,56	-0,83
150	-1,69	-1,13	-0,13	-0,08	-0,79	-1,08	-3,11	-2,14	-	-0,02	-0,93	-1,35
200	-3,25	-2,17	-0,13	-0,11	-1,60	-2,25	-5,34	-3,69	-	-0,02	-1,65	-2,44
250	-4,90	-3,27	-0,16	-0,13	-2,50	-3,57	-7,69	-5,31	-	-0,02	-2,42	-3,59
300	-6,65	-4,42	-0,26	-0,16	-3,35	-4,81	-10,20	-7,09	-	-0,04	-3,13	-4,68
350	-8,04	-5,28	-0,29	-0,19	-4,08	-5,87	-12,08	-8,37	-	0,19	-3,66	-5,35
400	-10,04	-6,60	-0,35	-0,25	-5,11	-7,34	-15,51	-10,94	-	0,20	-4,19	-6,19

Tabela B.17 – Deslocamentos verticais da laje L17

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
25	-0,07	-0,03	0,03	0,06	-0,02	-0,02	-0,54	-0,38	-	0,06	0,26	0,34
50	-0,21	-0,14	0,04	0,12	-0,11	-0,16	-1,63	-1,15	-	0,14	0,72	0,96
75	-0,43	-0,29	0,05	0,08	-0,26	-0,37	-3,34	-2,36	-	0,25	1,32	1,77
100	-0,76	-0,53	0,05	0,02	-0,50	-0,72	-5,65	-3,97	-	0,36	1,95	2,62
150	-1,70	-1,19	0,17	0,01	-1,25	-1,81	-12,36	-8,45	-	0,83	4,21	5,64
200	-3,71	-2,02	0,44	0,07	-2,56	-3,73	-21,18	-16,35	-	0,96	7,62	10,60

Tabela B.18 – Deslocamentos verticais da laje L18

Carga (kN)	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
	850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
25	-0,12	-0,08	-0,01	0,00	-0,02	0,01	-0,52	-0,37	-	-	0,23	0,30
50	-0,41	-0,27	-0,04	0,01	-0,10	-0,18	-1,75	-1,24	-	-	0,63	0,83
75	-0,79	-0,53	-0,07	0,02	-0,27	-0,44	-3,74	-2,65	-	-	1,24	1,61
100	-1,35	-0,90	-0,12	0,05	-0,45	-0,75	-6,18	-4,40	-	-	2,00	2,60
150	-2,86	-1,96	-0,18	0,18	-0,87	-1,49	-13,42	-10,34	-	-	4,65	6,02
200	-4,45	-3,01	-0,18	0,47	-1,05	-1,94	-21,41	-16,11	-	-	8,42	10,89
250	-6,43	-4,36	-0,14	0,95	-1,03	-2,22	-30,99	-23,16	-	-	-	-

Tabela B.19 – Deslocamentos verticais da laje L19

Carga (kN)	Deslocamentos verticais da laje L19 (mm)											
	Número do relógio comparador											
	Direção x						Direção y					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
	Distância ao centro da laje (mm)						Distância ao centro da laje (mm)					
850	650	280	280	650	850	850	650	130	130	650	850	
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
25	-0,01	0,00	0,05	0,07	0,03	0,01	-0,06	-0,03	-	-	-0,04	-0,08
50	-0,16	-0,04	0,07	0,09	-0,02	-0,07	-0,29	-0,19	-	-	-0,17	-0,27
75	-0,38	-0,17	0,06	0,09	-0,11	-0,23	-0,63	-0,42	-	-	-0,41	-0,61
100	-0,40	-0,16	0,06	0,10	-0,15	-0,24	-0,66	-0,45	-	-	-0,46	-0,65
125	-0,74	-0,40	0,04	0,09	-0,27	-0,44	-1,12	-0,77	-	-	-0,76	-1,10
150	-1,75	-1,05	0,03	0,05	-0,82	-1,27	-2,64	-1,83	-	-	-1,71	-2,45
200	-3,27	-2,05	-0,02	-0,01	-1,55	-2,37	-4,28	-2,97	-	-	-2,88	-4,09
250	-4,59	-2,92	-0,07	-0,03	-2,15	-3,26	-5,71	-3,97	-	-	-3,84	-5,44
300	-5,88	-3,79	-0,12	-0,05	-2,85	-4,31	-7,21	-5,04	-	-	-4,88	-6,86
350	-7,53	-4,90	-0,20	-0,10	-3,83	-5,71	-8,73	-6,14	-	-	-6,62	-9,12

B.2 DEFORMAÇÃO DAS ARMADURAS

Tabela B.20 – Deformações da armadura de flexão da laje L1

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100	0,130	0,100	0,040	-	0,010	0,000	0,100	0,000	0,180	0,110	0,100	0,020
125	0,360	0,270	0,600	-	0,040	0,000	0,300	0,000	0,400	0,110	0,150	0,060
150	0,600	0,450	0,620	-	0,110	0,020	0,400	0,000	0,500	0,380	0,250	0,090
175	0,860	0,660	0,780	-	-0,090	0,020	0,500	0,000	0,610	0,580	0,450	0,130
200	1,130	0,900	0,960	-	-0,110	0,020	0,600	0,000	0,750	0,700	0,650	0,200
250	1,410	1,130	1,130	-	-0,050	0,020	0,800	0,000	0,910	0,760	1,370	0,280
300	1,910	1,570	1,490	-	-0,560	0,020	1,200	0,000	1,360	-	2,020	0,520
350	2,410	2,030	-0,330	-	-0,560	0,020	1,600	0,000	1,740	-	2,850	0,780
400	-	-	-0,050	-	-0,550	0,020	2,020	0,000	2,260	-	2,620	1,090

Tabela B.20 – Deformações da armadura de flexão da laje L1 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	13	14	15	16	17	18
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
100	0,050	0,040	0,250	0,000	0,020	0,020
125	0,110	0,110	0,590	0,000	0,070	0,070
150	0,150	0,140	0,760	0,000	0,120	0,130
175	0,200	0,180	0,950	0,000	0,180	0,670
200	0,260	0,240	1,210	0,000	0,290	3,880
250	0,340	0,310	1,460	0,000	0,390	-
300	0,550	0,550	2,030	0,000	0,660	-
350	0,700	0,770	2,460	0,000	0,940	-
400	1,000	1,050	2,960	0,000	1,330	-

Tabela B.21 – Deformações da armadura de flexão da laje L2

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,365	0,015	0,015	0,000	0,000	0,000	0,010	0,005	0,000	0,000	0,050	0,015
50	0,450	0,065	0,030	0,020	0,000	0,000	0,020	0,020	0,000	0,000	1,335	0,045
75	0,660	0,175	0,050	0,050	0,005	0,005	0,040	0,045	0,095	0,000	-	0,105
100	0,910	0,305	0,100	0,130	0,000	0,010	0,040	0,035	0,210	0,000	-	0,195
125	1,130	0,460	0,210	0,230	0,010	0,025	0,160	0,150	0,300	0,000	-	0,320
150	1,425	0,645	0,345	0,330	0,025	0,040	0,280	0,250	0,395	0,000	-	0,445
200	1,900	1,015	0,785	0,750	0,045	0,060	0,590	0,545	0,690	0,000	-	0,995

Tabela B.21 – Deformações da armadura de flexão da laje L2 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro									
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,010	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000
50	0,000	0,050	0,015	0,000	0,015	0,000	0,000	0,050	0,020	0,010
75	0,000	0,120	0,015	0,000	0,035	0,000	0,000	0,115	0,075	0,010
100	0,000	0,220	0,020	0,000	0,040	0,000	0,000	0,180	0,350	0,025
125	0,000	0,330	0,055	0,000	0,050	0,000	0,000	0,275	0,430	0,050
150	0,000	0,465	0,135	0,000	0,065	0,000	0,000	0,385	0,550	0,105
200	0,000	0,745	0,390	0,000	0,100	0,000	0,000	0,560	0,990	0,265

Tabela B.22 – Deformações da armadura de flexão da laje L3

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,035	0,025	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,095	0,075	0,040	-	0,010	0,000	0,100	0,000	0,180	0,110	0,100	0,020
75	0,210	0,155	0,600	-	0,040	0,000	0,300	0,000	0,400	0,110	0,150	0,060
100	0,380	0,115	0,620	-	0,110	0,020	0,400	0,000	0,500	0,380	0,250	0,090
125	0,650	0,375	0,780	-	-0,090	0,020	0,500	0,000	0,610	0,580	0,450	0,130
150	0,900	0,585	0,960	-	-0,110	0,020	0,600	0,000	0,750	0,700	0,650	0,200
200	1,370	0,855	1,130	-	-0,050	0,020	0,800	0,000	0,910	0,760	1,370	0,280
225	1,575	0,855	1,490	-	-0,560	0,020	1,200	0,000	1,360	-	2,020	0,520

Tabela B.22 – Deformações da armadura de flexão da laje L3 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	13	14	15	16	17	18
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,050	0,040	0,250	0,000	0,020	0,020
75	0,110	0,110	0,590	0,000	0,070	0,070
100	0,150	0,140	0,760	0,000	0,120	0,130
125	0,200	0,180	0,950	0,000	0,180	0,670
150	0,260	0,240	1,210	0,000	0,290	3,880
200	0,340	0,310	1,460	0,000	0,390	-
225	0,550	0,550	2,030	0,000	0,660	-

Tabela B.23 – Deformações da armadura de flexão da laje L4

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,030	0,000	0,010	0,005	0,000	0,010	0,010	0,030	0,040	0,020	0,020
50	0,000	0,130	0,000	0,025	0,025	0,000	0,015	0,015	0,060	0,055	0,055	0,040
75	0,000	0,340	0,000	0,090	0,025	0,000	0,025	0,025	0,120	0,140	-	0,130
100	0,000	0,700	0,000	0,165	0,060	0,015	0,190	0,155	0,280	0,365	-	0,320
125	0,000	1,060	0,000	0,475	0,075	0,040	0,780	0,715	0,460	0,970	-	1,550
150	0,000	1,460	0,000	0,990	0,305	0,055	1,085	1,100	0,835	2,330	-	0,940
175	0,000	1,760	0,000	1,425	0,225	0,065	1,280	1,400	1,140	2,160	-	1,265
200	0,000	2,145	0,000	2,090	0,170	0,095	1,465	2,840	1,340	2,710	-	1,670

Tabela B.23 – Deformações da armadura de flexão da laje L4 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro			
	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,025	0,000	0,005	0,005
50	0,080	0,000	0,020	0,015
75	0,170	0,000	0,035	0,035
100	0,320	0,000	0,180	0,175
125	0,610	0,000	0,470	0,430
150	1,010	0,000	0,755	0,695
175	1,145	0,000	0,965	0,885
200	1,150	0,000	1,200	1,090

Tabela B.24 – Deformações da armadura de flexão da laje L5

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,003	0,008	-0,005	1,833	0,000	-0,005
50	0,269	0,003	-0,003	-1,003	0,000	0,001
75	0,389	0,003	0,004	-5,018	0,000	0,000
100	-0,034	0,022	0,032	2,078	0,000	0,000
125	-0,141	0,038	0,008	-6,365	0,000	-0,004
150	-0,132	0,056	0,073	-1,712	0,000	0,003
175	-0,285	0,084	0,122	-1,370	0,000	0,046
200	0,342	0,076	0,044	7,519	0,000	-0,004
225	0,336	0,071	0,024	13,411	0,000	0,009
250	0,232	0,073	-0,034	16,508	0,000	-0,003
275	-0,022	0,068	-0,083	15,519	0,000	0,000
300	0,356	0,062	-0,066	6,936	0,000	0,019
325	0,528	0,058	0,328	1,469	0,000	0,007
350	0,304	0,046	-0,040	-1,620	0,000	-0,004

Tabela B.25 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L5

Carga (kN)	Extensômetro							
	7	8	9	10	11	12	13	14
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,010	0,010	0,000	0,016	0,015	0,012	0,015	0,008
50	0,053	0,033	0,000	0,036	0,035	0,017	0,034	0,015
75	0,191	0,096	0,000	0,080	0,112	0,038	0,102	0,034
100	0,409	0,147	0,000	0,110	0,247	0,073	0,221	0,067
125	0,670	0,179	0,000	0,068	0,440	0,098	0,411	0,097
150	0,859	0,197	0,000	0,012	0,658	0,105	0,657	0,118
175	1,086	0,253	0,000	-0,021	0,861	0,080	0,906	0,097
200	1,265	0,241	0,000	-0,046	1,049	0,048	1,092	0,060
225	1,524	0,288	0,000	-0,059	1,258	0,014	1,308	0,024
250	1,812	0,290	0,000	-0,041	1,457	-0,015	1,520	0,014
275	2,108	0,284	0,000	-0,052	1,653	-0,038	1,699	0,010
300	2,512	0,276	0,000	-0,033	1,874	-0,054	1,934	0,016
325	2,859	0,300	0,000	0,004	2,105	-0,080	2,168	0,027
350	3,234	0,348	0,000	-0,064	2,395	-0,110	2,487	0,080

Tabela B.26 – Deformações da armadura de flexão da laje L6

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,016	0,004	0,014	0,000	0,000	-0,012
50	0,015	0,010	0,020	0,000	0,000	0,005
75	0,031	0,018	0,024	0,000	0,000	0,013
100	0,050	0,021	0,035	0,000	0,000	0,019
150	0,069	0,069	0,022	0,000	0,000	-0,023
200	0,045	0,164	0,039	0,000	0,000	-0,027
250	0,022	0,223	0,081	0,000	0,000	-0,006
300	0,011	0,251	0,094	0,000	0,000	-0,023
325	0,050	0,318	0,126	0,000	0,000	0,035
350	0,041	0,333	0,101	0,000	0,000	0,024
375	0,039	0,327	0,047	0,000	0,000	0,024
400	0,029	0,310	-0,017	0,000	0,000	0,025

Tabela B.27 – Deformações da armadura de cisalhamento da laje L6

Carga (kN)	Extensômetro							
	7	8	9	10	11	12	13	14
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,010	0,002	0,007	0,005	0,007	0,005	0,002	0,001
50	0,069	0,018	0,057	0,029	0,042	0,022	0,030	0,007
75	0,156	0,065	0,189	0,067	0,164	0,084	0,103	0,020
100	-0,162	0,096	0,433	0,129	0,330	0,148	0,264	0,044
150	-0,825	0,114	0,918	0,141	0,686	0,027	0,720	0,061
200	-0,306	0,134	1,383	0,194	1,128	-0,010	1,136	0,001
250	0,313	0,230	1,895	0,294	1,554	-0,001	1,538	-0,045
300	0,892	0,389	2,490	0,479	1,985	0,025	2,034	-0,079
325	1,188	0,505	2,732	0,553	2,219	0,064	2,262	-0,057
350	1,440	0,578	3,088	0,686	2,455	0,085	2,576	-0,052
375	1,672	0,670	3,424	0,774	2,706	0,146	2,929	-0,034
400	2,002	0,768	3,813	0,834	3,065	0,266	3,421	-0,111

Tabela B.28 – Deformações da armadura de flexão da laje L7

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,002	0,003	0,004	0,003	-0,001	0,001
50	0,002	0,000	0,007	0,004	-0,001	0,002
75	0,005	0,002	0,015	0,009	-0,003	0,002
100	0,016	0,014	0,027	0,017	-0,006	0,001
125	0,044	0,071	0,060	0,041	-0,009	0,002
150	0,061	0,101	0,112	0,083	-0,008	0,008
200	0,102	0,203	0,232	0,169	-0,006	0,011
250	0,111	0,263	0,281	0,195	0,002	0,022
300	0,097	0,311	0,293	0,194	0,012	0,032
350	0,080	0,352	0,284	0,182	0,025	0,045
400	0,106	0,371	0,237	0,150	0,040	0,060

Tabela B.29 – Deformações da armadura de flexão da laje L8

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,002	0,001	0,001	0,003	0,000	0,000
50	0,010	0,022	0,039	0,000	-0,004	0,001
75	0,034	0,060	0,047	-0,003	-0,006	0,005
100	0,096	0,098	0,049	0,003	-0,014	0,002
125	0,147	0,241	0,046	0,054	-0,020	0,003

Tabela B.30 – Deformações da armadura de flexão da laje L9

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,013	-0,303	-0,002	0,027	0,000	-0,001
50	0,000	0,013	0,014	0,036	0,001	-0,001
75	0,011	0,034	0,017	0,053	0,003	-0,020
100	0,028	0,065	0,047	0,080	0,008	0,005
125	-0,487	0,193	0,097	0,116	0,013	0,009
150	-0,721	0,325	0,151	0,154	0,021	0,016
200	-0,559	0,446	0,180	0,024	0,029	0,023
250	-0,383	0,507	0,191	0,128	0,043	0,035
300	-0,359	0,521	0,177	0,141	0,050	0,041

Tabela B.31 – Deformações da armadura de flexão da laje L10

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,004	-0,886	0,001	-0,029	-0,002	0,004
50	0,005	-0,857	-0,001	-0,033	-0,038	0,011
75	0,081	-0,867	-0,005	-0,021	-0,013	0,007
100	0,182	-0,498	-0,010	-0,007	-0,054	0,010
125	0,283	-0,499	0,011	0,028	-0,073	-0,011
150	0,295	-0,528	0,125	0,189	-0,068	-0,007
175	0,633	-0,038	0,329	0,289	-0,019	0,027

Tabela B.32 – Deformações da armadura de flexão da laje L11

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,006	0,022	0,052	0,985	1,120	-0,635
75	0,009	0,039	0,120	1,095	1,126	0,149
100	0,005	0,080	0,218	0,277	1,142	-0,117
150	0,000	0,219	0,451	0,546	1,348	0,056
200	-0,043	0,374	0,676	1,760	1,588	0,198
225	-0,086	0,478	0,805	1,822	1,708	0,317
250	-0,128	0,578	0,912	1,649	1,806	0,479

Tabela B.33 – Deformações da armadura de flexão da laje L12

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,010	0,008	-0,041	0,058	-0,002	-0,001
50	0,009	0,034	-0,038	-0,006	-0,005	-0,002
75	0,033	0,069	-0,036	-0,006	-0,008	-0,006
100	0,056	0,099	-0,022	0,062	-0,011	-0,007
150	0,112	0,112	0,021	0,101	0,006	0,010
200	0,163	0,093	0,061	0,091	0,019	0,028
225	-0,009	0,074	0,073	0,156	0,025	0,035
250	0,220	0,037	0,105	0,152	0,029	0,045

Tabela B.34 – Deformações da armadura de flexão da laje L13

Carga (kN)	Extensômetro					
	1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,022	0,000	0,000	-0,008	0,000	0,058
50	-0,027	-0,009	0,017	-0,044	-0,084	0,087
75	-0,062	-0,024	0,064	-0,036	-0,004	0,026
100	0,091	-0,032	0,123	0,063	0,008	0,120
125	0,234	-0,035	0,162	0,051	0,023	0,233
150	0,305	-0,032	0,187	0,032	0,033	0,309
175	0,337	-0,026	0,189	0,018	0,048	0,350
200	0,422	-0,018	0,167	0,008	0,062	0,403
225	0,471	0,010	0,175	0,003	0,081	0,662
250	0,720	0,037	0,201	0,117	0,102	0,751

Tabela B.35 – Deformações da armadura de flexão da laje L14

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,093	0,023	0,032	-0,026	0,034	-0,002	0,020	0,019	0,022	-0,034	0,018	0,013
50	0,093	0,056	0,171	-0,126	0,127	0,021	0,104	0,096	0,123	0,025	0,129	0,091
75	0,147	0,135	0,333	-0,259	0,275	0,080	0,246	0,227	0,300	0,129	0,312	0,207
100	3,283	0,228	0,502	-0,413	0,530	5,296	0,426	0,419	1,059	0,256	0,551	0,377
150	8,488	0,468	1,020	-0,910	1,223	5,928	1,039	0,950	1,571	0,567	1,019	0,749
200	8,394	0,727	1,580	-1,422	1,931	6,619	1,656	1,456	1,928	0,834	1,391	1,037
250	8,463	0,947	2,205	-1,995	2,730	7,250	2,251	2,025	2,288	1,158	1,870	1,418

Tabela B.35 – Deformações da armadura de flexão da laje L14 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	13	14	15	16	17	18
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,030	0,024	-0,006	-0,006	0,074	0,043
50	0,200	0,154	-0,044	-0,038	0,367	0,289
75	0,440	0,339	-0,099	-0,081	0,775	0,588
100	0,708	0,561	-0,170	-0,132	1,264	0,934
150	1,334	1,065	-0,260	-0,171	2,157	1,451
200	1,946	1,589	-0,163	-0,022	2,927	1,912
250	2,690	2,273	0,063	0,414	3,642	2,329

Tabela B.36 – Deformações da armadura de flexão da laje L15

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,078	0,063	0,048	0,040	0,035	0,033	0,067	0,018	-0,003	0,002	0,011	0,005
50	0,185	0,147	0,119	0,100	0,071	0,061	0,081	0,052	-0,009	0,006	0,031	0,020
75	2,203	0,736	0,349	0,298	0,238	0,202	0,165	0,159	-0,026	-0,013	0,063	0,050
100	2,345	0,627	0,642	0,564	0,472	0,412	0,516	0,290	-0,032	-0,017	0,126	0,104
150	2,813	2,751	1,205	1,033	0,925	0,801	1,064	0,580	0,039	0,047	0,379	0,324
200	3,629	3,388	1,803	1,475	1,351	1,158	0,942	0,908	0,284	0,321	0,814	0,689
250	3,861	3,534	2,663	2,084	1,910	1,675	1,471	1,275	0,404	0,491	1,185	1,004
300	6,836	13,753	7,281	9,689	3,096	2,520	1,916	1,880	0,432	0,537	1,561	1,342

Tabela B.36 – Deformações da armadura de flexão da laje L15 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	13	14	15	16	17	18
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,012	0,009	0,030	0,024	0,015	-0,004
50	0,039	0,032	0,099	0,069	0,047	0,071
75	0,091	0,073	0,189	0,145	0,104	0,096
100	0,194	0,160	0,286	0,221	0,187	0,198
150	0,575	0,461	0,779	0,583	0,561	0,498
200	1,041	0,887	1,461	0,999	1,069	0,914
250	1,553	1,382	2,150	1,402	1,537	1,423
300	2,073	1,899	2,826	1,623	2,016	1,914

Tabela B.37 – Deformações da armadura de flexão da laje L16

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000
25	0,053	0,031	0,037	0,024	0,032	0,048	0,010	0,009	0,015	-	0,004	0,001
50	0,145	0,087	0,092	0,063	0,077	0,107	0,046	0,023	0,044	-	0,013	0,000
75	0,312	0,187	0,193	0,135	0,196	0,216	0,132	0,075	0,086	-	0,030	0,000
100	0,568	0,358	0,353	0,258	0,373	0,406	0,288	0,182	0,164	-	0,048	0,000
125	0,815	0,529	0,496	0,360	0,587	0,584	0,497	0,364	0,303	-	0,083	0,000
150	1,182	0,767	0,674	0,550	0,817	0,841	0,706	0,515	0,493	-	0,124	0,000
200	1,798	1,180	1,057	0,970	1,138	1,145	0,941	0,680	0,840	-	0,146	0,000
250	2,401	1,560	1,499	1,414	1,404	1,445	1,118	0,837	1,229	-	0,215	0,000
300	2,950	1,913	1,907	1,781	1,713	1,776	1,272	0,959	1,577	-	0,387	0,090
350	3,543	2,265	2,310	2,129	3,175	2,126	1,453	1,108	1,943	-	0,648	0,142
400	3,952	2,972	2,697	2,482	16,425	2,518	1,693	1,292	2,215	-	0,815	0,632

Tabela B.37 – Deformações da armadura de flexão da laje L16 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	13	14	15	16	17	18
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,004	0,010	0,007	0,022	0,018
50	0,000	0,016	0,028	0,024	0,068	0,057
75	0,000	0,034	0,060	0,049	0,137	0,112
100	0,000	0,056	0,137	0,118	0,266	0,231
125	0,000	0,096	0,238	0,194	0,424	0,545
150	0,000	0,167	0,378	0,329	0,684	0,649
200	0,000	0,380	0,714	0,675	1,241	0,699
250	0,000	0,630	1,032	1,000	1,693	1,012
300	0,000	0,816	1,320	1,289	2,072	1,257
350	0,000	1,058	1,668	1,485	2,458	1,470
400	0,000	1,275	2,112	1,618	2,831	1,678

Tabela B.38 – Deformações da armadura de flexão da laje L17

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,053	0,029	0,040	0,026	0,028	0,012	-0,002	0,013	-0,003	-0,005	0,006	0,007
50	0,254	0,129	0,162	0,115	0,171	0,112	0,093	0,121	-0,005	0,004	0,015	0,015
75	0,526	0,361	0,346	0,265	0,434	0,305	0,275	0,323	0,011	0,023	0,035	0,033
100	0,832	0,602	0,554	0,451	0,669	0,480	0,471	0,540	0,099	0,117	0,058	0,059
150	1,501	1,095	0,998	0,890	1,088	0,830	0,786	0,864	0,415	0,274	0,139	0,135
200	2,165	1,480	1,460	1,432	1,538	1,218	1,036	1,086	0,708	0,304	0,312	0,318
250	2,844	1,754	1,969	1,855	1,947	1,573	1,245	1,340	0,898	0,333	0,418	0,423

Tabela B.38 – Deformações da armadura de flexão da laje L17 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	13	14	15	16	17	18
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,005	0,000	0,012	-0,002	-0,007	-0,037
50	0,026	0,000	0,056	-0,012	0,098	-0,060
75	0,056	0,000	0,125	0,086	0,229	0,136
100	0,135	0,000	0,251	0,389	0,505	0,265
150	0,339	0,000	0,543	0,951	0,905	0,618
200	0,684	0,000	1,002	2,723	1,526	0,970
250	0,926	0,000	1,448	2,804	2,013	0,680

Tabela B.39 – Deformações da armadura de flexão da laje L18

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,086	0,050	0,000	0,000	0,083	0,250	0,027	0,032	-0,005	-0,011	0,009	0,006
50	0,298	0,203	0,000	0,000	0,188	0,425	0,143	0,132	-0,029	-0,008	0,018	0,027
75	0,664	0,458	0,000	0,000	0,298	0,584	0,305	0,269	-0,022	0,006	0,111	0,177
100	1,017	0,710	0,000	0,000	0,685	0,751	0,475	0,401	-0,007	0,060	0,230	0,352
150	1,696	1,193	0,000	2,121	1,301	1,044	0,775	0,685	0,138	0,343	0,523	0,827
200	2,324	1,633	0,000	1,267	1,589	1,403	1,066	0,925	0,444	0,714	0,858	1,352
250	2,939	2,188	0,000	2,480	2,013	1,832	1,348	1,187	10,567	1,068	1,204	1,906

Tabela B.39 – Deformações da armadura de flexão da laje L18 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,003	-0,052	0,008	0,001	0,009	0,000	0,154	-0,027	0,008	0,728	0,025	0,033
50	0,060	0,003	0,051	0,045	0,039	0,000	0,205	-0,042	0,070	0,778	0,101	0,118
75	0,165	0,087	0,163	0,125	0,091	0,000	0,294	0,181	0,525	0,353	0,262	0,279
100	0,336	0,202	0,272	0,215	0,138	0,000	0,395	0,206	0,661	1,000	0,443	0,435
150	0,728	-0,662	0,518	0,408	0,244	0,000	0,628	0,428	1,305	1,314	0,869	0,725
200	1,061	-0,410	0,796	0,649	0,430	0,000	0,865	0,770	1,764	1,509	1,374	0,998
250	1,398	-0,316	1,088	0,888	0,650	0,000	1,120	0,965	2,114	1,999	1,913	1,210

Tabela B.39 – Deformações da armadura de flexão da laje L18 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro								
	25	26	27	28	29	30	31	32	
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
25	0,026	0,023	0,013	0,048	0,012	0,023	-0,008	0,011	
50	0,126	0,091	0,038	0,101	0,028	0,017	0,025	-0,037	
75	0,291	0,222	0,125	0,044	0,065	-0,082	0,054	-0,062	
100	0,460	0,360	0,171	0,102	0,107	-0,009	0,087	-0,068	
150	0,937	0,625	0,336	0,171	0,281	0,279	0,159	0,064	
200	1,453	0,860	0,656	0,253	0,522	0,667	0,236	0,212	
250	2,006	1,128	1,012	0,221	0,748	0,703	0,481	0,379	

Tabela B.40 – Deformações da armadura de flexão da laje L19

Carga (kN)	Extensômetro											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000	-
25	0,010	0,000	-0,004	-0,009	0,032	0,048	0,010	0,009	0,015	-	0,004	-
50	0,096	0,000	0,089	0,066	0,077	0,107	0,046	0,023	0,044	-	0,013	-
75	0,253	0,000	0,196	0,171	0,196	0,216	0,132	0,075	0,086	-	0,030	-
100	0,390	0,000	0,333	0,287	0,373	0,406	0,288	0,182	0,164	-	0,048	-
125	0,862	0,000	0,741	0,625	0,587	0,584	0,497	0,364	0,303	-	0,083	-
150	1,297	0,000	1,152	0,999	0,817	0,841	0,706	0,515	0,493	-	0,124	-
200	1,702	0,000	1,525	1,318	1,138	1,145	0,941	0,680	0,840	-	0,146	-
250	2,044	0,000	1,836	1,607	1,404	1,445	1,118	0,837	1,229	-	0,215	-
300	2,351	0,000	2,136	1,866	1,713	1,776	1,272	0,959	1,577	-	0,387	-

Tabela B.40 – Deformações da armadura de flexão da laje L19 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	13	14	15	16	17	18
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,000	0,004	0,010	0,008	0,150	0,000
50	0,000	0,016	0,026	0,022	0,300	0,000
75	0,000	0,034	0,058	0,054	0,400	0,000
100	0,000	0,056	0,110	0,105	6,389	0,000
125	0,000	0,096	0,300	0,328	7,456	0,000
150	0,000	0,167	0,530	0,614	8,188	0,000
200	0,000	0,380	0,754	0,892	8,363	0,000
250	0,000	0,630	1,104	1,317	8,542	0,000
300	0,000	0,816	1,383	1,651	8,985	0,000

B.3 DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

Tabela B.41 – Deformações do concreto da laje L1

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	-0,030	0,016	0,019	0,014	-0,022	-0,019	0,013	0,012	0,001	-0,024
100	-0,081	0,023	0,021	0,017	-0,088	-0,060	0,017	0,024	0,001	-0,061
125	-0,119	0,041	0,051	0,033	-0,099	-0,067	0,046	0,047	0,004	-0,083
150	-0,234	0,014	0,031	0,013	-0,138	-0,108	0,031	0,034	0,008	-0,102
175	-0,409	0,015	0,032	0,012	-0,176	-0,137	0,036	0,045	0,016	-0,116
200	-0,384	0,040	0,056	0,028	-0,193	-0,151	0,051	0,056	0,014	-0,139
250	-0,408	0,016	0,041	0,005	-0,290	-0,194	0,062	0,067	0,025	-0,171
300	-0,406	0,034	0,058	0,019	-0,336	-0,229	0,081	0,078	0,024	-0,208
350	-0,400	0,026	0,069	0,004	-0,419	-0,280	0,065	0,074	0,019	-0,230
400	-0,507	0,010	0,057	-0,020	-0,510	-0,325	0,044	0,050	0,011	-0,259

Tabela B.41 – Deformações do concreto da laje L1 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,002	-0,010	-0,031	-0,035	-0,019	-0,027
100	-0,002	-0,039	-0,090	-0,083	-0,048	-0,055
125	0,000	-0,049	-0,119	-0,106	-0,054	-0,062
150	-0,004	-0,058	-0,151	-0,131	-0,064	-0,066
175	0,003	-0,067	-0,179	-0,152	-0,074	-0,069
200	0,000	-0,083	-0,216	-0,184	-0,090	-0,080
250	0,000	-0,119	-0,277	-0,242	-0,124	-0,140
300	-0,001	-0,139	-0,335	-0,308	-0,158	-0,195
350	-0,006	-0,185	-0,408	-0,361	-0,198	-0,259
400	-0,004	-0,215	-0,424	-0,416	-0,238	-0,240

Tabela B.42 – Deformações do concreto da laje L2

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,005	0,002	0,005	0,007	-0,001	-0,008	-0,015	-0,014	-0,001	-0,004
50	-0,052	-0,010	-0,014	-0,018	-0,027	-0,039	-0,040	-0,020	0,020	0,014
75	-0,038	0,008	0,007	-0,001	-0,011	-0,032	-0,029	0,001	0,044	0,030
100	-0,078	0,002	0,003	-0,001	-0,031	-0,059	-0,041	0,013	0,068	0,054
125	-0,099	0,028	0,029	0,013	-0,018	-0,077	-0,046	0,025	0,087	0,063
150	-0,183	0,056	0,071	0,047	-0,003	-0,103	-0,040	0,068	0,100	0,022
200	-0,168	-0,159	-0,166	-0,158	-0,151	-0,150	-0,178	-0,189	-0,032	-0,016

Tabela B.42 – Deformações do concreto da laje L2 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,005	-0,014	-0,011	-0,018	-0,009	-0,020
50	-0,003	-0,026	-0,009	-0,031	-0,014	-0,041
75	-0,008	-0,043	-0,008	-0,053	-0,023	-0,072
100	0,003	-0,064	-0,006	-0,066	-0,029	-0,106
125	-0,001	-0,083	-0,008	-0,085	-0,031	-0,148
150	-0,009	-0,126	-0,021	-0,153	-0,037	-0,253
200	0,009	0,005	-0,005	-0,009	-0,004	0,016

Tabela B.43 – Deformações do concreto da laje L3

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,017	0,027	0,016	0,029	0,013	-0,005	0,020	0,006	0,075	-0,001
50	0,002	0,042	0,039	0,041	0,018	-0,031	0,024	0,007	0,165	0,002
75	-0,007	0,055	0,039	0,044	0,013	-0,076	0,003	0,011	0,240	0,007
100	0,005	0,097	0,072	0,080	0,032	-0,075	0,025	0,023	0,309	0,016
125	0,029	0,125	0,078	0,090	0,033	-0,128	0,021	0,034	0,371	0,031
150	0,022	0,136	0,065	0,074	0,000	-0,158	0,022	0,042	0,386	0,051
200	0,061	0,125	0,052	0,044	-0,043	-0,112	0,026	0,045	0,376	0,019

Tabela B.43 – Deformações do concreto da laje L3 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,013	-0,008	-0,023	-0,011	-0,005	0,005
50	-0,023	-0,017	-0,054	-0,026	-0,014	-0,001
75	-0,028	-0,022	-0,087	-0,042	-0,023	-0,036
100	-0,040	-0,029	-0,119	-0,072	-0,045	-0,049
125	-0,048	-0,039	-0,159	-0,086	-0,039	-0,063
150	-0,073	-0,050	-0,199	-0,135	-0,053	-0,111
200	-0,113	-0,047	-0,183	-0,140	-0,055	-0,072

Tabela B.44 – Deformações do concreto da laje L4

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	0,050	0,032	0,041	0,042	0,029	-0,015	-0,001	0,003	-0,010	-0,014
50	0,070	0,045	0,059	0,055	0,035	-0,008	0,021	0,024	0,001	-0,022
75	0,075	0,063	0,079	0,073	0,035	-0,025	0,032	0,030	0,013	-0,041
100	0,051	0,064	0,091	0,082	0,023	-0,061	0,034	0,031	0,029	-0,043
125	-0,263	0,078	0,119	0,111	0,041	-0,091	0,040	0,035	0,031	-0,050
150	-0,691	0,083	0,129	0,123	0,037	-0,080	0,064	0,059	0,049	-0,043
200	-0,651	0,106	0,166	0,159	0,061	-0,119	0,068	0,069	0,051	-0,038

Tabela B.44 – Deformações do concreto da laje L4 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,004	-0,011	-0,028	-0,014	0,002	0,001
50	-0,018	-0,014	-0,036	-0,027	-0,002	-0,021
75	-0,051	-0,035	-0,074	-0,052	-0,007	-0,057
100	-0,093	-0,061	-0,128	-0,066	-0,006	-0,106
125	-0,122	-0,086	-0,197	-0,093	-0,013	-0,170
150	-0,154	-0,090	-0,217	-0,102	-0,013	-0,235
200	-0,159	-0,101	-0,289	-0,085	-0,016	-0,283

Tabela B.45 – Deformações do concreto da laje L5

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,017	-0,026	-0,147	0,005	-0,043	-0,007	-0,031	-0,018	-0,027	-0,018
50	-0,042	-0,072	-0,232	0,014	-0,110	-0,018	-0,081	-0,044	-0,075	-0,053
75	-0,089	-0,162	-0,391	0,026	-0,238	-0,030	-0,166	-0,095	-0,141	-0,111
100	-0,131	-0,275	-0,577	0,038	-0,378	-0,045	-0,260	-0,146	-0,214	-0,176
125	-0,194	-0,392	-0,759	0,051	-0,546	-0,057	-0,371	-0,208	-0,295	-0,257
150	-0,266	-0,493	-0,889	0,047	-0,730	-0,069	-0,491	-0,274	-0,388	-0,331
175	-0,321	-0,613	-0,953	0,019	-0,913	-0,085	-0,623	-0,362	-0,474	-0,416
200	-0,354	-0,722	-1,019	-0,011	-1,109	-0,097	-0,758	-0,433	-0,567	-0,480
225	-0,381	-0,848	-1,054	-0,042	-1,383	-0,116	-0,919	-0,513	-0,681	-0,529
250	-0,389	-0,997	-1,104	-0,073	-1,630	-0,139	-1,045	-0,584	-0,782	-0,575
275	-0,417	-1,119	-1,176	-0,099	-1,906	-0,169	-1,185	-0,672	-0,883	-0,630
300	-0,407	-1,293	-1,189	-0,172	-2,137	-0,202	-1,286	-0,748	-0,980	-0,684
325	-0,430	-1,442	-1,282	-0,276	-2,392	-0,240	-1,386	-0,851	-1,095	-0,749
350	-0,440	-1,619	-1,348	-0,438	-2,663	-0,284	-1,451	-0,937	-1,239	-0,827

Tabela B.45 – Deformações do concreto da laje L5 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,033	-0,005	-0,044	0,006	-0,011	-0,023
50	-0,104	-0,019	-0,140	0,013	-0,051	-0,074
75	-0,213	-0,033	-0,282	0,031	-0,094	-0,150
100	-0,342	-0,049	-0,430	0,043	-0,146	-0,251
125	-0,497	-0,067	-0,597	0,056	-0,203	-0,358
150	-0,677	-0,079	-0,699	0,058	-0,259	-0,451
175	-0,885	-0,092	-0,672	-0,024	-0,300	-0,554
200	-1,132	-0,109	-0,645	-0,062	-0,337	-0,652
225	-1,493	-0,129	-0,584	-0,102	-0,365	-0,753
250	-1,771	-0,167	-0,518	-0,156	-0,378	-0,861
275	-2,002	-0,210	-0,512	-0,200	-0,411	-0,952
300	-2,200	-0,263	-0,483	-0,302	-0,431	-1,087
325	-2,395	-0,312	-0,527	-0,394	-0,453	-1,210
350	-2,602	-0,401	-0,358	-0,560	-0,396	-1,317

Tabela B.46 – Deformações do concreto da laje L6

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,009	-0,026	-0,032	0,000	-0,032	-0,005	-0,022	-0,017	-0,025	-0,017
50	-0,021	-0,077	-0,093	0,004	-0,095	-0,012	-0,076	-0,044	-0,076	-0,046
75	-0,045	-0,154	-0,193	0,008	-0,202	-0,022	-0,167	-0,090	-0,160	-0,093
100	-0,065	-0,270	-0,353	0,012	-0,338	-0,037	-0,291	-0,162	-0,275	-0,159
150	-0,134	-0,460	-0,454	-0,106	-0,651	-0,054	-0,608	-0,328	-0,581	-0,352
200	-0,168	-0,654	-0,362	-0,193	-1,098	-0,075	-0,895	-0,479	-0,844	-0,508
250	-0,193	-0,874	-0,332	-0,216	-1,526	-0,099	-1,154	-0,627	-1,055	-0,680
300	-0,218	-1,072	-0,317	-0,233	-1,782	-0,116	-1,284	-0,688	-1,147	-0,832
325	-0,237	-1,170	-0,346	-0,225	-1,917	-0,122	-1,352	-0,716	-1,170	-0,897
350	-0,258	-1,260	-0,371	-0,227	-2,009	-0,139	-1,361	-0,754	-1,162	-0,974
375	-0,304	-1,355	-0,485	-0,187	-2,153	-0,172	-1,356	-0,795	-1,169	-1,044

Tabela B.46 – Deformações do concreto da laje L6 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
25	-0,029	-0,007	-0,041	0,003	-0,011	-
50	-0,094	-0,016	-0,131	0,007	-0,030	-
75	-0,192	-0,027	-0,275	0,011	-0,057	-
100	-0,325	-0,042	-0,451	0,001	-0,085	-
150	-0,652	-0,076	-0,562	-0,158	-0,179	-
200	-1,019	-0,113	-0,514	-0,306	-0,232	-
250	-1,364	-0,155	-0,466	-0,453	-0,260	-
300	-1,586	-0,202	-0,562	-0,671	-0,288	-
325	-1,673	-0,224	-0,647	-0,753	-0,306	-
350	-1,750	-0,245	-0,674	-0,860	-0,313	-
375	-1,802	-0,233	-0,793	-0,908	-0,353	-

Tabela B.47 – Deformações do concreto da laje L7

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,010	-0,017	-0,019	-0,022	-0,026	-0,010	-0,022	-0,020	-0,019	-0,020
50	-0,025	-0,052	-0,052	-0,072	-0,078	-0,028	-0,065	-0,050	-0,065	-0,054
75	-0,048	-0,100	-0,098	-0,150	-0,168	-0,053	-0,138	-0,094	-0,136	-0,102
100	-0,075	-0,157	-0,156	-0,239	-0,279	-0,081	-0,220	-0,146	-0,226	-0,168
125	-0,123	-0,228	-0,242	-0,350	-0,435	-0,120	-0,335	-0,207	-0,339	-0,267
150	-0,156	-0,298	-0,311	-0,456	-0,556	-0,158	-0,423	-0,284	-0,430	-0,348
200	-0,211	-0,463	-0,474	-0,711	-0,813	-0,245	-0,594	-0,452	-0,617	-0,521
250	-0,256	-0,615	-0,651	-0,930	-1,079	-0,334	-0,777	-0,565	-0,759	-0,693
300	-0,285	-0,811	-0,834	-1,188	-1,399	-0,445	-0,961	-0,699	-0,924	-0,855
350	-0,301	-0,993	-1,022	-1,422	-1,724	-0,555	-1,137	-0,832	-1,070	-0,997
400	-0,293	-1,203	-1,252	-1,707	-2,019	-0,662	-1,359	-0,950	-1,313	-1,138

Tabela B.47 – Deformações do concreto da laje L7 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,020	-0,007	-0,014	-0,017	-0,007	-0,016
50	-0,065	-0,024	-0,045	-0,055	-0,024	-0,053
75	-0,139	-0,043	-0,090	-0,112	-0,051	-0,100
100	-0,239	-0,061	-0,146	-0,181	-0,086	-0,155
125	-0,377	-0,090	-0,218	-0,278	-0,126	-0,232
150	-0,496	-0,117	-0,271	-0,385	-0,169	-0,316
200	-0,738	-0,176	-0,375	-0,662	-0,264	-0,538
250	-0,936	-0,239	-0,464	-0,883	-0,325	-0,712
300	-1,187	-0,311	-0,550	-1,144	-0,368	-0,888
350	-1,478	-0,387	-0,622	-1,404	-0,393	-1,050
400	-1,524	-0,535	-0,270	-1,687	-0,328	-1,172

Tabela B.48 – Deformações do concreto da laje L8

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,002	-0,054	-0,025	-0,076	-0,037	-0,006	-0,024	0,011	-0,022	0,015
50	-0,008	-0,224	-0,080	-0,338	-0,147	-0,036	-0,101	0,047	-0,100	0,057
75	-0,012	-0,460	-0,143	-0,645	-0,281	-0,077	-0,191	0,105	-0,194	0,116
100	-0,026	-0,686	-0,216	-0,993	-0,464	-0,138	-0,339	0,171	-0,292	0,211
125	-0,024	-0,952	-0,179	-1,450	-0,606	-0,219	-0,460	0,328	-0,484	0,248
150	-0,012	-1,269	-0,051	-2,085	-0,769	-1,372	-0,616	0,729	-0,685	0,266

Tabela B.48 – Deformações do concreto da laje L8 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,035	0,000	-0,017	-0,079	0,002	-0,055
50	-0,156	-0,018	-0,036	-0,386	0,000	-0,260
75	-0,291	-0,035	-0,039	-0,716	-0,001	-0,484
100	-0,433	-0,057	-0,023	-1,145	0,005	-0,756
125	-0,628	-0,126	0,059	-1,704	-0,035	-0,956
150	-0,714	-0,292	0,053	-2,086	-0,043	-1,143

Tabela B.49 – Deformações do concreto da laje L9

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,015	-0,023	-0,028	-0,026	-0,045	-0,009	-0,030	-0,030	-0,024	-0,032
50	-0,037	-0,060	-0,078	-0,070	-0,137	-0,018	-0,081	-0,088	-0,072	-0,098
75	-0,059	-0,126	-0,134	-0,153	-0,255	-0,038	-0,138	-0,167	-0,132	-0,196
100	-0,090	-0,207	-0,199	-0,266	-0,406	-0,062	-0,213	-0,286	-0,179	-0,355
150	-0,149	-0,390	-0,309	-0,579	-0,760	-0,112	-0,381	-0,582	-0,240	-0,674
200	-0,184	-0,536	-0,365	-0,857	-1,083	-0,158	-0,513	-0,850	-0,313	-0,982
250	-0,211	-0,696	-0,429	-1,139	-1,474	-0,214	-0,665	-1,141	-0,355	-1,274
300	-0,227	-0,847	-0,501	-1,412	-1,863	-0,264	-0,831	-1,484	-0,414	-1,584
350	-0,236	-0,936	-0,553	-1,576	-2,152	-0,204	-0,934	-1,700	-0,434	-1,732

Tabela B.49 – Deformações do concreto da laje L9 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,032	-0,006	-0,024	-0,028	-0,009	-0,022
50	-0,114	-0,019	-0,076	-0,079	-0,033	-0,059
75	-0,233	-0,038	-0,135	-0,172	-0,059	-0,118
100	-0,394	-0,059	-0,225	-0,302	-0,100	-0,188
150	-0,694	-0,108	-0,338	-0,641	-0,161	-0,342
200	-0,980	-0,163	-0,434	-0,966	-0,210	-0,481
250	-1,233	-0,234	-0,493	-1,333	-0,229	-0,636
300	-1,595	-0,313	-0,580	-1,661	-0,255	-0,789
350	-1,782	-0,359	-0,618	-1,774	-0,263	-0,840

Tabela B.50 – Deformações do concreto da laje L10

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,009	-0,058	-0,045	-0,067	-0,044	-0,004	-0,035	0,014	-0,026	0,004
50	0,000	-0,210	-0,128	-0,275	-0,149	-0,006	-0,116	0,067	-0,101	0,058
75	-0,006	-0,405	-0,209	-0,564	-0,282	-0,007	-0,222	0,139	-0,208	0,125
100	-0,038	-0,606	-0,287	-0,888	-0,444	-0,007	-0,377	0,226	-0,373	0,204
125	-0,050	-0,845	-0,347	-1,286	-0,611	-0,003	-0,537	0,288	-0,532	0,223
150	-0,047	-1,174	-0,354	-1,880	-0,780	-0,013	-0,686	0,350	-0,707	0,319

Tabela B.50 – Deformações do concreto da laje L10 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,032	-0,004	-0,015	-0,069	-0,006	-0,052
50	-0,140	-0,015	-0,038	-0,265	-0,003	-0,207
75	-0,281	-0,021	-0,038	-0,548	0,009	-0,404
100	-0,466	-0,031	-0,065	-0,906	0,026	-0,639
125	-0,617	-0,045	-0,039	-1,329	0,026	-0,882
150	-0,733	-0,115	0,036	-1,646	-0,013	-1,019

Tabela B.51 – Deformações do concreto da laje L11

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,078	0,019	-0,073	0,043	-0,003	-0,135	-0,058	-0,185	0,037	-0,173
75	0,120	0,039	-0,162	0,107	-0,123	-0,042	-0,100	-0,394	-0,128	-0,360
100	0,023	0,067	-0,261	0,182	-0,277	-0,072	-0,154	-0,636	-0,207	-0,567
150	-0,192	0,049	-0,543	0,297	-0,622	-0,175	-0,258	-1,164	-0,368	-1,076
200	-0,778	0,179	-0,807	0,354	-0,900	-0,280	-0,323	-1,753	-0,445	-1,676
225	-0,455	0,210	-0,911	0,420	-1,029	-0,330	-0,341	-2,074	-0,453	-2,002
250	-0,882	0,243	-0,992	0,537	-1,164	-0,381	-0,347	-2,427	-0,450	-2,329

Tabela B.51 – Deformações do concreto da laje L11 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	-0,094	-0,032	-0,076	0,042	-0,056	0,016
75	-0,209	-0,061	-0,166	0,093	-0,119	0,041
100	-0,347	-0,096	-0,286	0,155	-0,204	0,073
150	-0,600	-0,165	-0,575	0,273	-0,388	0,163
200	-0,815	-0,256	-0,832	0,357	-0,572	0,200
225	-0,912	-0,306	-0,935	0,422	-0,678	0,223
250	-1,014	-0,355	-1,051	0,593	-0,797	0,238

Tabela B.52 – Deformações do concreto da laje L12

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,008	-0,031	-0,029	-0,008	-0,029	-0,006	-0,020	-0,004	-0,020	-0,006
50	-0,020	-0,095	-0,078	-0,013	-0,083	-0,017	-0,062	-0,007	-0,051	-0,006
75	-0,035	-0,182	-0,139	-0,020	-0,170	-0,031	-0,126	-0,009	-0,097	-0,010
100	-0,052	-0,282	-0,193	-0,023	-0,274	-0,042	-0,234	-0,016	-0,148	-0,011
150	-0,110	-0,523	-0,419	-0,036	-0,575	-0,047	-0,531	0,000	-0,340	0,007
200	-0,077	-0,808	-0,577	-0,039	-0,804	-0,068	-0,702	-0,014	-0,521	0,007
225	-0,058	-0,912	-0,546	-0,041	-0,938	-0,075	-0,800	-0,005	-0,601	0,008
250	-0,045	-1,034	-0,555	-0,046	-1,060	-0,091	-0,888	0,004	-0,681	0,016
275	-0,038	-1,183	-0,661	-0,048	-1,175	-0,118	-0,989	0,019	-0,763	0,029

Tabela B.52 – Deformações do concreto da laje L12 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	-	-	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-	-	-0,019	-0,045	-0,007	-0,035
50	-	-	-0,049	-0,153	-0,012	-0,109
75	-	-	-0,083	-0,309	-0,022	-0,205
100	-	-	-0,102	-0,506	-0,033	-0,328
150	-	-	-0,105	-1,023	-0,058	-0,620
200	-	-	-0,093	-1,577	-0,064	-0,901
225	-	-	-0,096	-1,827	-0,052	-1,031
250	-	-	-0,066	-2,091	-0,028	-1,173
275	-	-	-0,002	-2,256	-0,004	-1,290

Tabela B.53 – Deformações do concreto da laje L13

Carga (kN)	Extensômetro									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,009	-0,033	-0,024	-0,041	-0,036	-0,005	-0,027	-0,006	-0,021	-0,001
50	-0,024	-0,123	-0,068	-0,167	-0,123	-0,017	-0,094	-0,008	-0,083	-0,002
75	-0,049	-0,235	-0,117	-0,326	-0,245	-0,031	-0,188	-0,011	-0,158	-0,001
100	-0,080	-0,374	-0,161	-0,539	-0,382	-0,047	-0,291	-0,013	-0,260	0,001
125	-0,101	-0,518	-0,215	-0,761	-0,544	-0,061	-0,412	-0,011	-0,367	0,007
150	-0,124	-0,676	-0,267	-1,019	-0,725	-0,078	-0,545	-0,002	-0,486	0,016
175	-0,130	-0,840	-0,332	-1,293	-0,918	-0,092	-0,692	0,005	-0,604	0,030
200	-0,125	-1,016	-0,407	-1,584	-1,108	-0,104	-0,843	0,007	-0,724	0,040
225	-0,140	-1,179	-0,452	-1,856	-1,266	-0,116	-0,979	0,014	-0,843	0,051
250	-0,153	-1,338	-0,394	-2,246	-1,422	-0,129	-1,144	0,042	-0,986	0,091

Tabela B.53 – Deformações do concreto da laje L13 (continuação)

Carga (kN)	Extensômetro					
	11	12	13	14	15	16
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,027	-0,004	-0,014	-0,038	-0,005	-0,033
50	-0,101	-0,012	-0,047	-0,141	-0,019	-0,118
75	-0,195	-0,021	-0,074	-0,282	-0,038	-0,229
100	-0,313	-0,032	-0,101	-0,474	-0,059	-0,372
125	-0,429	-0,042	-0,139	-0,699	-0,078	-0,525
150	-0,554	-0,056	-0,197	-0,983	-0,090	-0,696
175	-0,663	-0,070	-0,258	-1,274	-0,093	-0,869
200	-0,769	-0,087	-0,324	-1,574	-0,097	-1,041
225	-0,870	-0,105	-0,341	-1,902	-0,118	-1,202
250	-0,937	-0,161	-0,261	-2,227	-0,144	-1,277

Tabela B.54 – Deformações do concreto da laje L14

Carga (kN)	Extensômetro						
	1	2	3	4	5	6	7
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,007	-0,031	-0,030	-0,050	-0,048	-0,050	-0,043
50	-0,019	-0,107	-0,097	-0,209	-0,198	-0,191	-0,175
75	-0,030	-0,217	-0,189	-0,440	-0,379	-0,312	-0,341
100	-0,042	-0,339	-0,339	-0,726	-0,572	-0,436	-0,516
150	-0,075	-0,623	-0,569	-1,313	-1,028	-0,679	-1,004
200	-0,100	-0,895	-0,670	-1,937	-1,629	-0,841	-1,504

Tabela B.55 – Deformações do concreto da laje L15

Carga (kN)	Extensômetro						
	1	2	3	4	5	6	7
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,011	-0,044	-0,041	-0,027	-0,022	-0,018	-0,028
50	-0,029	-0,134	-0,121	-0,082	-0,069	-0,057	-0,080
75	-0,059	-0,310	-0,249	-0,171	-0,143	-0,100	-0,165
100	-0,097	-0,494	-0,391	-0,303	-0,247	-0,174	-0,268
150	-0,177	-0,797	-0,689	-0,695	-0,548	-0,484	-0,477
200	-0,253	-1,068	-0,957	-1,055	-0,945	-0,812	-0,668
250	-0,395	-1,302	-1,132	-1,501	-1,432	-1,213	-0,952
300	-0,577	-1,539	-1,231	-1,829	-1,953	-1,536	-1,032

Tabela B.56 – Deformações do concreto da laje L16

Carga (kN)	Extensômetro			
	1	2	3	4
10	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,012	-0,045	-0,014	-0,015
50	-0,038	-0,137	-0,039	-0,045
75	-0,151	-0,271	-0,071	-0,084
100	-0,122	-0,453	-0,105	-0,121
125	-0,250	-0,624	-0,137	-0,163
150	-0,255	-0,814	-0,196	-0,217
200	-0,477	-1,166	-0,344	-0,325
250	-0,641	-1,629	-0,483	-0,422
300	-0,843	-2,079	-0,642	-0,507
350	-0,952	-2,564	-0,837	-0,565
400	-1,088	-2,250	-1,019	-0,486

Tabela B.57 – Deformações do concreto da laje L17

Carga (kN)	Extensômetro			
	1	2	3	4
10	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,013	-0,073	-0,025	-0,022
50	-0,049	-0,262	-0,077	-0,077
75	-0,103	-0,510	-0,132	-0,139
100	-0,162	-0,790	-0,191	-0,214
150	-0,319	-1,442	-0,330	-0,357
200	-0,630	-2,185	-0,627	-0,532
250	-0,800	-2,348	-0,819	-0,258

Tabela B.58 – Deformações do concreto da laje L18

Carga (kN)	Extensômetro							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,018	-0,090	-0,026	-0,028	0,031	-0,012	-0,003	-0,013
50	-0,055	-0,312	-0,071	-0,082	-0,016	-0,038	0,003	-0,029
75	-0,120	-0,659	-0,122	-0,148	-0,122	-0,079	-0,009	-0,056
100	-0,196	-1,004	-0,166	-0,211	-0,166	-0,114	-0,002	-0,083
150	-0,349	-1,811	-0,278	-0,344	-0,216	-0,187	0,013	-0,164
200	-0,660	-2,672	-0,406	-0,317	-0,141	-0,240	0,007	-0,246
250	-0,706	-3,056	-0,659	-0,192	-0,112	-0,399	-0,146	-0,369

Tabela B.59 – Deformações do concreto da laje L19

Carga (kN)	Extensômetro			
	1	2	3	4
10	0,000	0,000	0,000	0,000
25	-0,034	-0,032	-0,026	-0,023
50	-0,038	-0,114	-0,059	-0,067
75	-0,026	-0,175	-0,100	-0,122
100	-0,057	-0,299	-0,145	-0,184
125	-0,095	-0,657	-0,267	-0,307
150	-	-0,886	-0,416	-0,427
200	-	-1,122	-0,544	-0,503
250	-	-1,452	-0,736	-0,573
300	-	-1,797	-0,949	-0,658

APÊNDICE C

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES UTILIZANDO A TEORIA DAS LINHAS DE RUPTURA

As resistências à flexão das lajes da pesquisa foram determinadas a partir da configuração das linhas de ruptura apresentadas nas Figuras C.1 a C.14, definidas pela semelhança com a fissuração observada das lajes próximas da ruptura.

Para a laje L8 foram feitas duas configurações de linhas de ruptura. A determinação da primeira seguiu os mesmos critérios das demais e foi a configuração considerada para a definição do modo de ruptura no Capítulo 5. A segunda configuração foi feita com apenas duas linhas de ruptura em função dos escoamentos apresentados pelos extensômetros que ocorreram próximos das linhas consideradas.

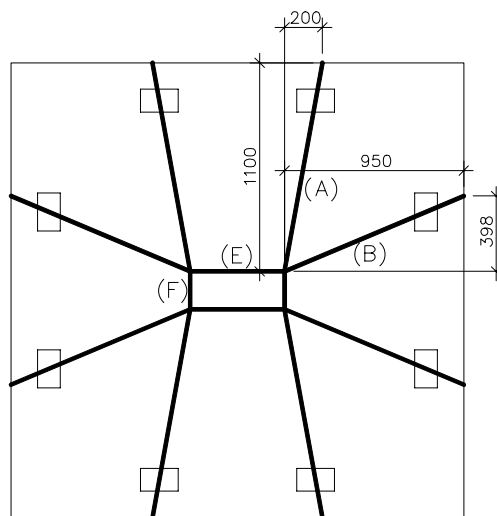


Figura C.1 – Linhas de ruptura para a laje L1

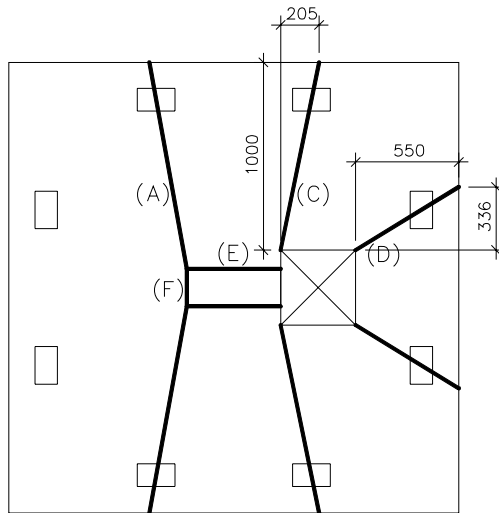


Figura C.2 – Linhas de ruptura para as lajes L2 a L6

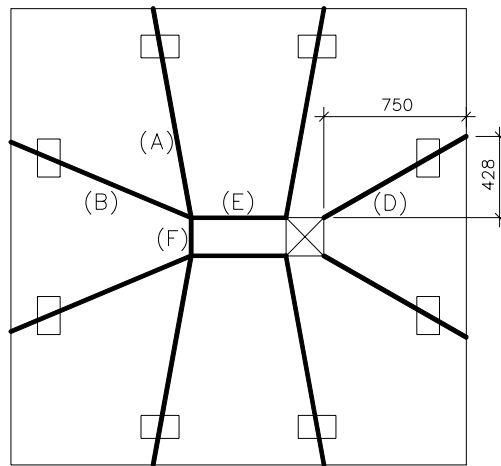


Figura C.3 – Linhas de ruptura para a laje L7

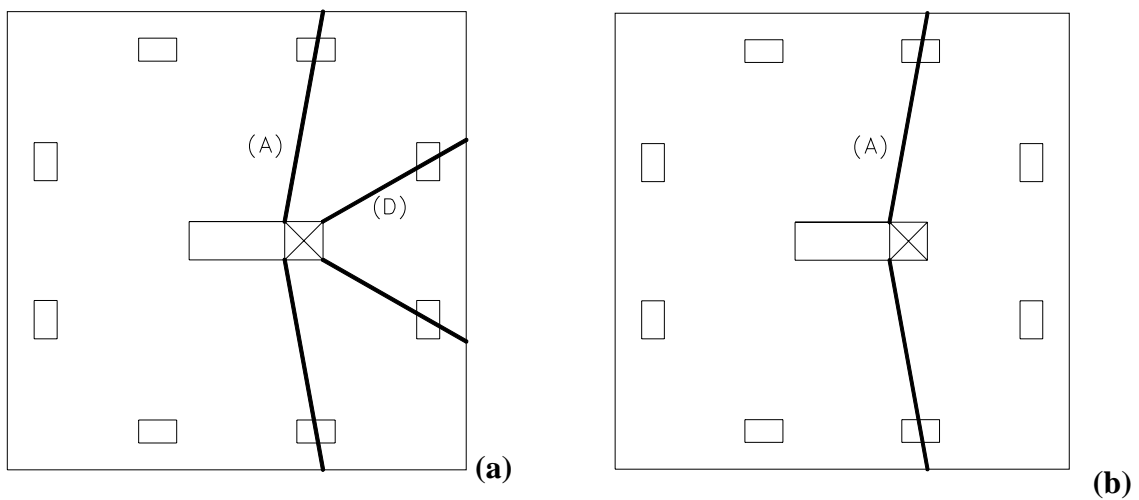


Figura C.4 – Linhas de ruptura para a laje L8 – configurações “a” e “b”

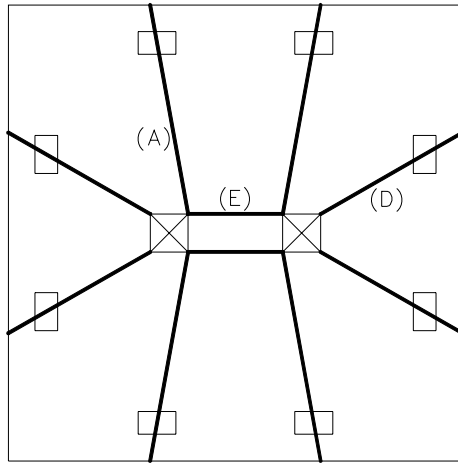


Figura C.5 – Linhas de ruptura para as lajes L9

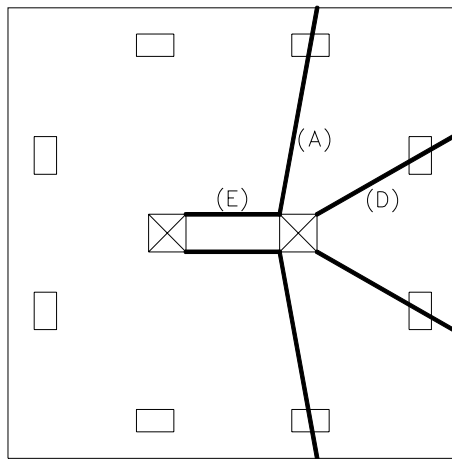


Figura C.6 – Linhas de ruptura para as lajes L10 e L13

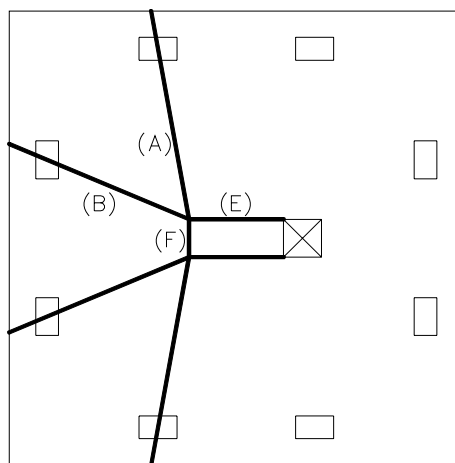


Figura C.7 – Linhas de ruptura para a laje L11

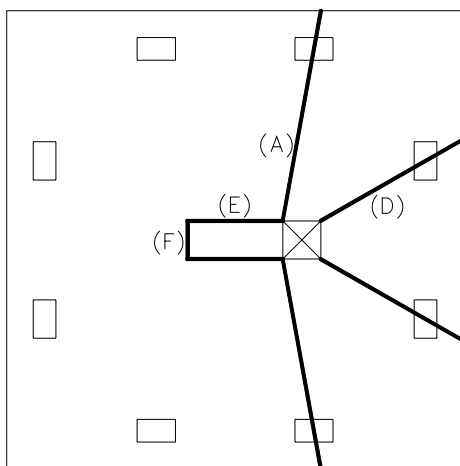


Figura C.8 – Linhas de ruptura para a laje L12

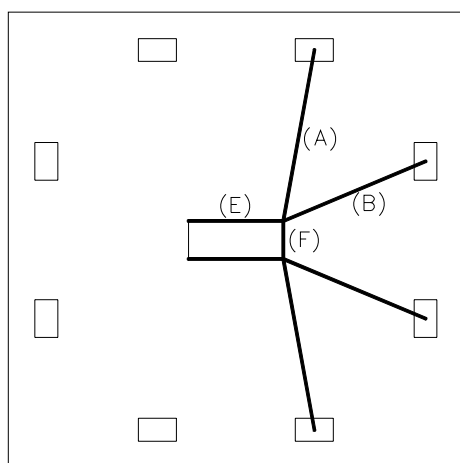


Figura C.9 – Linhas de ruptura para a laje L14

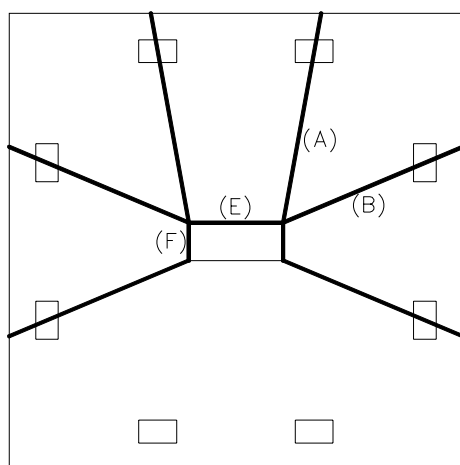


Figura C.10 – Linhas de ruptura para a laje L15

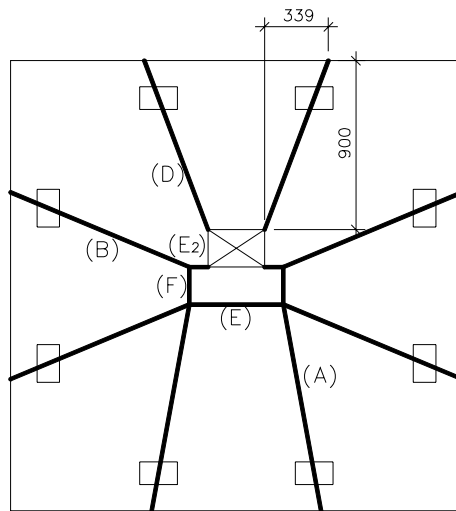


Figura C.11 – Linhas de ruptura para a laje L16

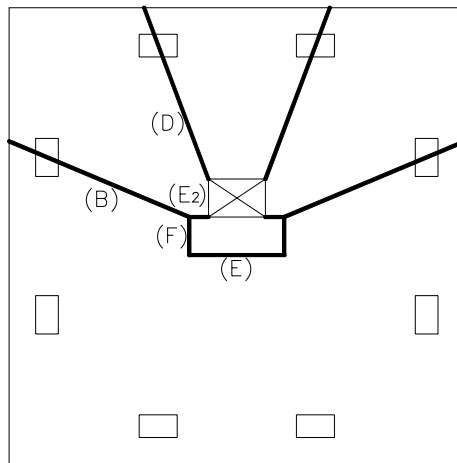


Figura C.12 – Linhas de ruptura para a laje L17

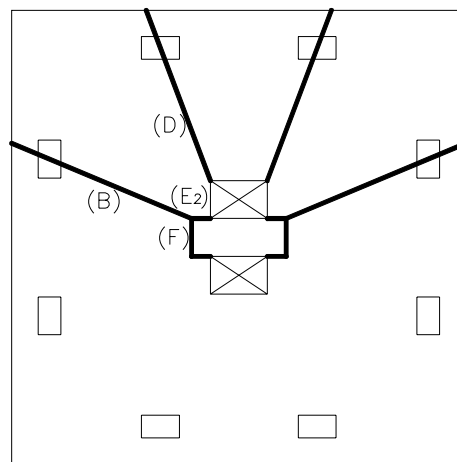


Figura C.13 – Linhas de ruptura para a laje L18

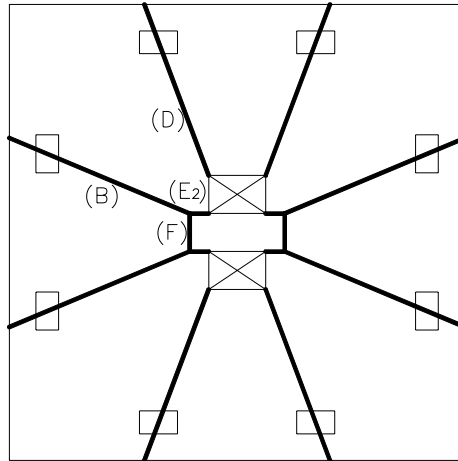


Figura C.14 – Linhas de ruptura para a laje L19

Aplicando um deslocamento virtual unitário nos pontos centrais de aplicação de carga, e, considerando o deslocamento dos pontos do pilar iguais a zero, tem-se:

- Deslocamento máximo das linhas de ruptura em x e em y , (δ_{Ax} , δ_{Ay} , δ_{Bx} , δ_{By} , δ_{Cx} , δ_{Cy} e δ_{Dx} , δ_{Dy});
- Rotação das linhas de ruptura nas direções x e y (θ_{Ax} , θ_{Ay} , θ_{Bx} , θ_{By} , θ_{Cx} , θ_{Cy} e θ_{Dx} , θ_{Dy}) – determinado pela divisão do deslocamento pelo comprimento (L_A , L_B , L_C e L_D , respectivamente) da linha de ruptura em cada direção;
- Rotação das linhas de ruptura nas faces do pilar em relação aos pontos de aplicação de carga em x e em y (θ_{Ex} , θ_{Ey});

Aplicando o Princípio dos Trabalhos Virtuais, obtém-se:

$$W_{\text{Externo}} = W_{\text{Interno}}$$

$$V_{\text{flex}} = \sum(\text{trabalho interno das linhas de escoamento})$$

$$V_{\text{flex}} = \sum m_{u,i} L_i \theta_i$$

O trabalho pode ser calculado decompondo os momentos, ficando:

$$V_{\text{flex}} = \sum (m_{u,ix} L_{i,x} \theta_{i,x} + m_{u,iy} L_{i,y} \theta_{i,y})$$

Então, temos as seguintes equações para o cálculo da carga de flexão:

- Para a laje L1:

$$V_{\text{flex}} = 4 \left(m_{u, Ax} L_{A, x} \theta_{A, x} + m_{u, Ay} L_{A, y} \theta_{A, y} \right) + 4 \left(m_{u, Bx} L_{B, x} \theta_{B, x} + m_{u, By} L_{B, y} \theta_{B, y} \right) + 2m_{u, Ex} L_{E, x} \theta_{E, x} + 2m_{u, Fy} L_{F, y} \theta_{F, y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para as lajes L2 a L6:

$$V_{\text{flex}} = 2 \left(m_{u, Ax} L_{A, x} \theta_{A, x} + m_{u, Ay} L_{A, y} \theta_{A, y} \right) + 2 \left(m_{u, Cx} L_{C, x} \theta_{C, x} + m_{u, Cy} L_{C, y} \theta_{C, y} \right) + 2 \left(m_{u, Dx} L_{D, x} \theta_{D, x} + m_{u, Dy} L_{D, y} \theta_{D, y} \right) + 2m_{u, Ex} L_{E, x} \theta_{E, x} + m_{u, Fy} L_{F, y} \theta_{F, y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{C,x} = 205\text{mm}; L_{C,y} = 1000\text{mm}; L_{D,x} = 550\text{mm}; L_{C,y} = 336\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L7:

$$V_{\text{flex}} = 4 \left(m_{u, Ax} L_{A, x} \theta_{A, x} + m_{u, Ay} L_{A, y} \theta_{A, y} \right) + 2 \left(m_{u, Bx} L_{B, x} \theta_{B, x} + m_{u, By} L_{B, y} \theta_{B, y} \right) + 2 \left(m_{u, Dx} L_{D, x} \theta_{D, x} + m_{u, Dy} L_{D, y} \theta_{D, y} \right) + 2m_{u, Ex} L_{E, x} \theta_{E, x} + m_{u, Fy} L_{F, y} \theta_{F, y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_{D,x} = 750\text{mm}; L_{D,y} = 428\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L8, configuração “a”:

$$V_{\text{flex}} = 2 \left(m_{u, Ax} L_{A, x} \theta_{A, x} + m_{u, Ay} L_{A, y} \theta_{A, y} \right) + 2 \left(m_{u, Dx} L_{D, x} \theta_{D, x} + m_{u, Dy} L_{D, y} \theta_{D, y} \right)$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{D,x} = 750\text{mm}; L_{D,y} = 428\text{mm}.$$

- Para a laje L8, configuração “b”:

$$V_{\text{flex}} = 2 \left(m_{u, Ax} L_{A, x} \theta_{A, x} + m_{u, Ay} L_{A, y} \theta_{A, y} \right)$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}.$$

- Para a laje L9:

$$V_{\text{flex}} = 4 \left(m_{u, Ax} L_{A, x} \theta_{A, x} + m_{u, Ay} L_{A, y} \theta_{A, y} \right) + 4 \left(m_{u, Dx} L_{D, x} \theta_{D, x} + m_{u, Dy} L_{D, y} \theta_{D, y} \right) + 2m_{u, Ex} L_{E, x} \theta_{E, x}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{D,x} = 750\text{mm}; L_{D,y} = 428\text{mm}; L_E = 500\text{mm}.$$

- Para a lajes L10 e L13:

$$V_{\text{flex}} = 2\left(m_{u, Ax} L_{A,x} \theta_{A,x} + m_{u, Ay} L_{A,y} \theta_{A,y}\right) + 2\left(m_{u, Dx} L_{D,x} \theta_{D,x} + m_{u, Dy} L_{D,y} \theta_{D,y}\right) + 2m_{u, Ex} L_E \theta_{E,x}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{D,x} = 750\text{mm}; L_{D,y} = 428\text{mm}; L_E = 500\text{mm}.$$

- Para a laje L11:

$$V_{\text{flex}} = 2\left(m_{u, Ax} L_{A,x} \theta_{A,x} + m_{u, Ay} L_{A,y} \theta_{A,y}\right) + 2\left(m_{u, Bx} L_{B,x} \theta_{B,x} + m_{u, By} L_{B,y} \theta_{B,y}\right) + 2m_{u, Ex} L_E \theta_{E,x} + m_{u, Fy} L_F \theta_{F,y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L12:

$$V_{\text{flex}} = 2\left(m_{u, Ax} L_{A,x} \theta_{A,x} + m_{u, Ay} L_{A,y} \theta_{A,y}\right) + 2\left(m_{u, Dx} L_{D,x} \theta_{D,x} + m_{u, Dy} L_{D,y} \theta_{D,y}\right) + 2m_{u, Ex} L_E \theta_{E,x} + m_{u, Fy} L_F \theta_{F,y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{D,x} = 750\text{mm}; L_{D,y} = 428\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L14:

$$V_{\text{flex}} = 2\left(m_{u, Ax} L_{A,x} \theta_{A,x} + m_{u, Ay} L_{A,y} \theta_{A,y}\right) + 2\left(m_{u, Bx} L_{B,x} \theta_{B,x} + m_{u, By} L_{B,y} \theta_{B,y}\right) + 2m_{u, Ex} L_E \theta_{E,x} + m_{u, Fy} L_F \theta_{F,y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L15:

$$V_{\text{flex}} = 2\left(m_{u, Ax} L_{A,x} \theta_{A,x} + m_{u, Ay} L_{A,y} \theta_{A,y}\right) + 4\left(m_{u, Bx} L_{B,x} \theta_{B,x} + m_{u, By} L_{B,y} \theta_{B,y}\right) + m_{u, Ex} L_E \theta_{E,x} + 2m_{u, Fy} L_F \theta_{F,y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L16:

$$V_{\text{flex}} = 2\left(m_{u, Ax} L_{A,x} \theta_{A,x} + m_{u, Ay} L_{B,y} \theta_{B,y}\right) + 4\left(m_{u, Bx} L_{B,x} \theta_{B,x} + m_{u, By} L_{B,y} \theta_{B,y}\right) + 2\left(m_{u, Dx} L_{D,x} \theta_{D,x} + m_{u, Dy} L_{D,y} \theta_{D,y}\right) + m_{u, Ex} L_E \theta_{E,x} + m_{u, E_2x} L_{E_2} \theta_{E_2,x} + 2m_{u, Fy} L_F \theta_{F,y}$$

onde:

$$L_{A,x} = 200\text{mm}; L_{A,y} = 1100\text{mm}; L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_{D,x} = 339\text{mm}; L_E = 500\text{mm};$$

$$L_{E_2} = 200\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L17:

$$V_{\text{flex}} = 2 \left(m_{u, Bx} L_{B, x} \theta_{B, x} + m_{u, By} L_{B, y} \theta_{B, y} \right) + 2 \left(m_{u, Dx} L_{D, x} \theta_{D, x} + m_{u, Dy} L_{D, y} \theta_{D, y} \right) + m_{u, Ex} L_{E, x} \theta_{E, x} + m_{u, E_2x} L_{E_2, x} \theta_{E_2, x} + 2m_{u, Fy} L_{F, y} \theta_{F, y}$$

onde:

$$L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_{D,x} = 339\text{mm}; L_E = 500\text{mm}; L_{E2} = 200\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L18:

$$V_{\text{flex}} = 2 \left(m_{u, Bx} L_{B, x} \theta_{B, x} + m_{u, By} L_{B, y} \theta_{B, y} \right) + 2 \left(m_{u, Dx} L_{D, x} \theta_{D, x} + m_{u, Dy} L_{D, y} \theta_{D, y} \right) + 2m_{u, E_2x} L_{E_2, x} \theta_{E_2, x} + 2m_{u, Fy} L_{F, y} \theta_{F, y}$$

onde:

$$L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_{D,x} = 339\text{mm}; L_{E2} = 200\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

- Para a laje L19:

$$V_{\text{flex}} = 4 \left(m_{u, Bx} L_{B, x} \theta_{B, x} + m_{u, By} L_{B, y} \theta_{B, y} \right) + 4 \left(m_{u, Dx} L_{D, x} \theta_{D, x} + m_{u, Dy} L_{D, y} \theta_{D, y} \right) + 2m_{u, E_2x} L_{E_2, x} \theta_{E_2, x} + 2m_{u, Fy} L_{F, y} \theta_{F, y}$$

onde:

$$L_{B,x} = 950\text{mm}; L_{B,y} = 398\text{mm}; L_{D,x} = 339\text{mm}; L_{E2} = 200\text{mm}; L_F = 200\text{mm}.$$

O momento de plastificação por unidade de largura da laje, em cada direção, foi calculado com as equações a seguir, indicadas por PARK & GAMBLE (1980).

$$m_{u,x} = A_{Sx} f_y \left(d_{s,x} - 0,59 A_{Sx} \frac{f_y}{f_c} \right)$$

$$m_{u,y} = A_{Sy} f_y \left(d_{s,y} - 0,59 A_{Sy} \frac{f_y}{f_c} \right)$$

onde:

A_{Sx} – área de aço por unidade (por metro) na direção da projeção x da linha de ruptura;

A_{Sy} – área de aço por unidade (por metro) na direção da projeção y da linha de ruptura.

A Tabela C.1 contém os valores dos momentos plásticos, das rotações em x e em y das linhas de ruptura, a carga de flexão e a comparação com a carga última de ensaio de todas as lajes da pesquisa.

Tabela C.1 – Cargas de ruptura por flexão e comparação com carga última de ensaio

Laje	$m_{u, Ax}$	$\theta_{A, x}$	$m_{u, Bx}$	$\theta_{B, x}$	$m_{u, Cx}$	$\theta_{C, x}$	$m_{u, Dx}$	$\theta_{D, x}$	$m_{u, Ex}$	$\theta_{E, x}$	$m_{u, Ezx}$	$\theta_{Ez, x}$
L1	75,5	0,00017	71,9	0,00094	-	-	-	-	61,7	0,00111	-	-
L2	75,5	0,00017	-	-	0,0	0,00014	92,7	0,00098	100,3	0,00111	-	-
L3	41,4	0,00017	-	-	0,0	0,00014	72,2	0,00098	152,2	0,00111	-	-
L4	77,9	0,00017	-	-	0,0	0,00014	71,5	0,00098	63,6	0,00111	-	-
L5	40,1	0,00017	-	-	0,0	0,00014	69,8	0,00098	144,5	0,00111	-	-
L6	39,8	0,00017	-	-	0,0	0,00014	69,1	0,00098	133,3	0,00111	-	-
L7	40,5	0,00017	42,5	0,00094	-	-	72,2	0,00087	146,6	0,00111	-	-
L8 ^(a)	0,0	0,00017	-	-	-	-	71,6	0,00087	-	-	-	-
L8 ^(b)	0,0	0,00017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L9	0,0	0,00017	42,3	0,00094	-	-	71,6	0,00087	143,0	0,00111	-	-
L10	0,0	0,00017	-	-	-	-	71,6	0,00087	151,6	0,00111	-	-
L11	41,2	0,00017	43,3	0,00094	-	-	-	-	149,3	0,00111	-	-
L12	40,5	0,00017	-	-	-	-	72,3	0,00087	147,3	0,00111	-	-
L13	0,0	0,00017	44,8	0,00094	-	-	75,8	0,00087	152,2	0,00111	-	-
L14	58,6	0,00017	75,8	0,00094	-	-	-	-	65,0	0,00111	-	-
L15	76,5	0,00017	72,9	0,00094	-	-	-	-	62,3	0,00111	-	-
L16	112,0	0,00017	74,3	0,00094	-	-	110,4	0,00094	92,1	0,00111	160,4	0,00111
L17	-	-	74,3	0,00094	-	-	110,4	0,00094	92,1	0,00111	160,4	0,00111
L18	-	-	73,9	0,00094	-	-	108,8	0,00094	-	-	156,8	0,00111
L19	-	-	74,2	0,00094	-	-	109,5	0,00094	-	-	158,3	0,00111

*Momentos de plastificação em kN.m/m; (a) – configuração de linhas de ruptura “a”; (b) – configuração de linhas de ruptura “b”.

Tabela C.1 – Cargas de ruptura por flexão e comparação com carga última de ensaio (continuação)

Laje	$m_{u,Ay}$	$\theta_{A,y}$	$m_{u,By}$	$\theta_{B,y}$	$m_{u,Cy}$	$\theta_{C,y}$	$m_{u,Dy}$	$\theta_{D,y}$	$m_{u,Fy}$	$\theta_{F,y}$	V_{flex} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_{flex}
L1	63,2	0,00094	65,3	0,00039	-	-	-	-	84,6	0,00133	683	475	0,70
L2	77,7	0,00094	-	-	77,0	0,00092	118,9	0,00041	84,6	0,00133	409	240	0,59
L3	87,9	0,00094	-	-	95,8	0,00092	165,1	0,00041	87,9	0,00133	677	250	0,37
L4	57,3	0,00094	-	-	62,6	0,00092	53,8	0,00041	0,0	0,00133	402	237	0,59
L5	85,1	0,00094	-	-	92,6	0,00092	157,9	0,00041	85,1	0,00133	652	416	0,64
L6	84,3	0,00094	-	-	91,8	0,00092	156,4	0,00041	84,3	0,00133	635	425	0,67
L7	92,9	0,00094	155,5	0,00039	-	-	146,9	0,00039	85,9	0,00133	841	455	0,54
L8 ^(a)	92,0	0,00094	-	-	-	-	144,3	0,00039	-	-	332	192	0,58
L8 ^(b)	92,0	0,00094	-	-	-	-	-	-	-	-	191	192	1,01
L9	92,0	0,00094	152,5	0,00039	-	-	144,3	0,00039	-	-	823	375	0,46
L10	92,0	0,00094	-	-	-	-	144,3	0,00039	-	-	501	189	0,38
L11	94,3	0,00094	158,0	0,00039	-	-	-	-	87,3	0,00133	514	299	0,58
L12	93,1	0,00094	-	-	-	-	147,3	0,00039	86,1	0,00133	523	319	0,61
L13	97,4	0,00094	161,9	0,00039	-	-	153,0	0,00039	-	-	521	277	0,53
L14	66,5	0,00094	68,7	0,00039	-	-	-	-	89,2	0,00133	394	274	0,69
L15	63,6	0,00094	65,7	0,00039	-	-	-	-	85,5	0,00133	518	364	0,70
L16	64,7	0,00094	66,9	0,00039	-	-	78,0	0,00053	125,4	0,00133	729	474	0,65
L17	-	-	66,9	0,00039	-	-	78,0	0,00053	125,4	0,00133	434	279	0,64
L18	-	-	66,7	0,00039	-	-	77,7	0,00053	156,8	0,00133	432	322	0,75
L19	-	-	66,9	0,00039	-	-	78,0	0,00053	158,3	0,00133	714	411	0,58

*Momentos de plastificação em kN.m/m; (a) – configuração de linhas de ruptura “a”; (b) – configuração de linhas de ruptura “b”.