



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL DO PARÁ
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES LISAS NERVURADAS
DE CONCRETO ARMADO COM ARMADURA DE
CISALHAMENTO**

ENG^a CIVIL SHIRLEY DO SOCORRO MELO DE SOUZA



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL DO PARÁ
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES LISAS NERVURADAS
DE CONCRETO ARMADO COM ARMADURA DE
CISALHAMENTO**

ENG^a CIVIL SHIRLEY DO SOCORRO MELO DE SOUZA

Dissertação submetida à Universidade Federal do Pará como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

Belém, novembro de 2007.

**“ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES LISAS NERVURADAS
DE CONCRETO ARMADO COM ARMADURA DE
CISALHAMENTO”**

ENG^a CIVIL SHIRLEY DO SOCORRO MELO DE SOUZA

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, da Universidade Federal do Pará - UFPA.

Alcebíades Negrão Macêdo, D.Sc. - Coordenador do PPGEC

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, D.Sc. – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Guilherme Sales Soares de A. Melo, Ph.D. – UNB

Alcebíades Negrão Macêdo, D.Sc. – UFPA

A vocês, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade, não bastaria um obrigada. A vocês, que iluminaram os caminhos obscuros com afeto e dedicação para que os trilhasse sem medo e cheia de esperanças, não bastaria um muito obrigada. A vocês, que se doaram inteiros e renunciaram aos seus sonhos, para que, muitas vezes, pudesse realizar os meus. A vocês, pais por natureza, por opção e amor, não bastaria dizer, que não tenho palavras para agradecer tudo isso. Mas é o que me acontece agora, quando procuro arduamente uma forma verbal de exprimir uma emoção ímpar. Uma emoção que jamais seria traduzida por palavras.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha irmã, pelo apoio, não somente durante os momentos dedicados a esta pesquisa, mas em todos os momentos de minha vida, gostaria de dizer: devo tudo a vocês.

Ao professor Dênio Ramam, pelo cuidadoso trabalho de orientação e inestimáveis contribuições durante a pesquisa de Pós-Graduação.

Aos professores do PPEGC, que contribuíram para minha formação durante este período, em especial aos professores Alcebíades Macêdo e Paulo Sérgio. E ao professor Gerson Miranda pelo incentivo e apoio demonstrados.

Aos amigos Alexandre Vilhena, Amaury Aguiar, Arnolfo Valente, Fabricio Pires, Guilherme Melo, Israel Baltazar, Kelly Nahum, Mikhail Luczynski, Nívea Albuquerque, Natasha Costa, Rodrigo Peixoto, Sebastião Sena, Selma Lobato, Tiago Rodrigues e Vitor Branco da UFPA, pelo auxílio prestado na realização de todas as etapas desta pesquisa e por todos os momentos compartilhados, em especial ao Bernardo Neto e Sandro Damasceno, pela atenção, paciência e apoio que me concederam nos momentos mais difíceis.

As amigas Adelana Guimarães, Aline Ferreira, Carolina Prado, Geisia Nogueira, e Luana Souza pelo exemplo de amizade verdadeira, me incentivando e fazendo os meus dias melhores, mesmo quando ausentes fisicamente.

Ao estimado Wellington, funcionário da empresa Saenge, que contribuiu de forma valiosa nas etapas de ensaio desta pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil, que auxiliaram para o desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao técnico Urbano.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para mais essa realização em minha vida.

Acima de tudo a Deus, maior razão de tudo.

A verdadeira medida de um homem não se vê na forma como se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas em como se mantém em tempos de controvérsia e desafio.

Martin Luther King.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Justificativa	5
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Estrutura do Trabalho.....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Considerações gerais sobre lajes nervuradas	7
2.2 Considerações gerais sobre lajes lisas.....	8
2.3 Revisão de literatura	9
2.3.1 Caixeta (1998).....	9
2.3.2 Melo (2004).....	11
2.3.3 Tesoro (1991).....	13
2.3.4 Lúcio (1991).....	14
2.3.5 Soares (2004)	22
2.4 Prescrições Normativas.....	26
2.4.1 Dimensionamento de lajes ao cisalhamento.....	27
2.4.1.1 ACI 318/05.....	27
2.4.1.2 CEB-FIP MC90	28
2.4.1.3 NBR 6118.....	30
2.4.2 Dimensionamento de lajes ao puncionamento.....	34
2.4.2.1 ACI 318.....	34
2.4.2.2 CEB-FIP MC90	36
2.4.2.3 NBR 6118.....	39
2.5 Resistência à flexão.....	41
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	44

3.1	Considerações iniciais	44
3.2	Características das lajes ensaiadas	46
3.3	Armadura.....	48
	3.3.1 Armadura de flexão	48
	3.3.2 Armadura de cisalhamento	50
3.4	Instrumentação	61
	3.4.1 Deslocamentos verticais	61
	3.4.2 Deformação do concreto.....	62
	3.4.3 Deformação na armadura de flexão	64
	3.4.4 Deformação na armadura de cisalhamento	66
3.5	Materiais.....	68
	3.5.1 Concreto	68
	3.5.1.1 Composição	68
	3.5.1.2 Resistência à compressão	69
	3.5.1.3 Resistência à tração.....	69
	3.5.1.4 Módulo de Elasticidade	70
	3.5.2 Aço.....	70
3.6	Moldagem, concretagem, cura e desforma	71
3.7	Sistema de ensaio e aplicação de carga.....	76
4	RESULTADOS DOS ENSAIOS	80
4.1	Propriedade dos materiais.....	80
	4.1.1 Concreto	80
	4.1.1.1 Resistência à compressão	80
	4.1.1.2 Resistência à tração.....	80
	4.1.1.3 Módulo de elasticidade.....	81
	4.1.2 Aço.....	82
4.2	Deslocamentos verticais das lajes.....	85
4.3	Deformações no concreto	93
4.4	Deformações no aço.....	96
	4.4.1 Armadura de flexão	96
	4.4.2 Armadura de cisalhamento	100
4.5	Padrão de fissuração	104
4.6	Cargas últimas e modos de ruptura.....	109

5 ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS	115
5.1 Resistência ao cisalhamento nas nervuras	115
5.1.1 ACI 318M (ACI, 2002)	115
5.1.2 MC90 (CEB-FIP, 1993)	117
5.1.3 NBR 6118 (ABNT, 2003).....	118
5.2 Resistência ao puncionamento	119
5.2.1 ACI 318 (ACI, 2002).....	119
5.2.2 MC90 (CEB-FIP, 1993)	121
5.2.3 NBR 6118 (ABNT, 2003).....	122
5.3 Resistência à flexão.....	123
5.4 Comparativo entre os resultados estimados e os experimentais	124
6 CONCLUSÕES.....	128
6.1 Conclusões.....	128
6.1.1 <i>Comportamento das lajes</i>	<i>128</i>
6.1.1.1 <i>Deslocamentos verticais</i>	<i>128</i>
6.1.1.2 <i>Deformações na superfície do concreto</i>	<i>128</i>
6.1.1.3 <i>Deformações das armaduras de flexão</i>	<i>129</i>
6.1.1.4 <i>Deformações das armaduras de cisalhamento.....</i>	<i>129</i>
6.1.1.5 <i>Padrão de fissuração.....</i>	<i>130</i>
6.1.1.6 <i>Cargas últimas e modos de ruptura observados</i>	<i>130</i>
6.1.1.7 <i>Resistência ao cisalhamento nas nervuras (análise de normas).....</i>	<i>131</i>
6.1.1.8 <i>Resistência ao puncionamento (análise de normas)</i>	<i>131</i>
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
APÊNDICE A	135
A.1 Deslocamentos verticais	135
A.2 Deformações no concreto	144
A.3 Deformações da armadura de flexão	149
A.4 Deformações da armadura de cisalhamento.....	154
APÊNDICE B.....	159
B.1 Determinação da altura útil.....	159
APÊNDICE C	160

C.1 Estimativas para determinação da carga última de cisalhamento nas nervuras	160
C.2 Estimativas para determinação da carga última de punção	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Laje lisa nervurada (Pinheiro e Rezente, 2003)	1
Figura 2 - Formas removíveis e blocos de EPS utilizados em lajes (Vizotto, 2002)	2
Figura 3 - Laje unidirecional (Pinheiro e Rezente, 2003)	3
Figura 4 - Laje bidirecional (Dias, 2003)	3
Figura 5 - Superfície de ruptura por punção.....	4
Figura 6 - Seção transversal de uma laje nervurada	8
Figura 7 - Ensaio com blocos de concreto para apoio das forças (Caixeta, 1998).....	9
Figura 8 - Características dos modelos do segundo ensaio (Caixeta, 1998)	10
Figura 9 - Seção transversal das vigas utilizadas no terceiro ensaio (Caixeta, 1998)	11
Figura 10 - Seção transversal dos painéis (Melo, 2004).....	12
Figura 11 - Área de influência considerada para o cálculo do esforço cortante nas nervuras (Tesoro, 1991).	14
Figura 12 - Esquema de apoio das lajes de Lúcio (1991).....	15
Figura 13 - Dimensões das lajes e posicionamento das nervuras (Lúcio, 1991).....	16
Figura 14 - Aplicação da carga nas cargas de Lúcio (1991)	16
Figura 15 - Detalhe das armaduras das lajes de Lúcio (1991).....	17
Figura 16 - Detalhe da seção e das armaduras das vigas VLA e VLB (Lúcio, 1991).....	18
Figura 17 - Configuração das linhas de ruptura para as lajes de Lúcio (1991).....	19
Figura 18 - Modelo de ruptura por cisalhamento para lajes nervuradas (Lúcio, 1991)	21
Figura 19 - Região maciça livre de verificação ao cisalhamento nas lajes de Lúcio (1991).....	21
Figura 20 - Detalhe das dimensões das lajes de Soares (2004).....	22
Figura 21 - Posicionamento das armaduras de cisalhamento nas nervuras (Soares, 2004).....	23
Figura 22 - Perímetro de controle de acordo com o ACI 318	35
Figura 23 - Perímetro de controle para verificação da punção fora da região com armadura de cisalhamento de acordo com o ACI 318.....	36
Figura 24 - Perímetro de controle em pilares internos	37
Figura 25 - Perímetro de controle ($u_{n,ef}$) afastado do último elemento da armadura de cisalhamento	39
Figura 26 - Perímetro crítico em pilares internos	39
Figura 27 - Perímetro crítico afastado do último elemento da armadura de punção.....	41
Figura 29 - Configuração das linhas de ruptura adotada.....	42
Figura 29 - Pavimento em laje lisa nervurada (www.atex.com.br).....	44

Figura 30 - Força cortante e momento fletor em uma laje lisa (adaptado de Leonhardt e Mönning, 1978).....	45
Figura 31 - Pontos de momento nulo	45
Figura 32 - Dimensões das lajes ensaiadas.....	47
Figura 33 - Seção transversal das lajes	47
Figura 34 - Cortador de EPS tipo fio quente	48
Figura 35 - Detalhamento da armadura superior	49
Figura 36 - Detalhamento da armadura inferior	49
Figura 37 - Posicionamento das armaduras da laje L1 na forma.....	50
Figura 39 - Detalhe da armação treliçada – TR8644 (unidades em mm).....	51
Figura 40 - Posicionamento das treliças nas nervuras	51
Figura 40 - Posicionamento dos estribos verticais nas nervuras	52
Figura 41 - Posicionamento dos estribos inclinados nas nervuras	52
Figura 42 - Detalhe do posicionamento da armadura de punção	53
Figura 43 - Estribos posicionados na região maciça da laje L8	53
Figura 44 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras (L2)	54
Figura 45 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras (L3)	55
Figura 46 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras (L4)	56
Figura 47 - Posição dos estribos verticais nas nervuras (L5)	57
Figura 48 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras e estribos inclinados de punção (L6)	58
Figura 49 - Posição dos estribos verticais nas nervuras e estribos inclinados na região maciça (L7)	59
Figura 50 - Posição dos estribos inclinados nas nervuras e na região maciça (L8)	60
Figura 51 - Posicionamento dos deflectômetros nas lajes	61
Figura 52 - Detalhe do posicionamento dos deflectômetros na laje.....	62
Figura 53 - Posicionamento dos extensômetros na superfície inferior das lajes	63
Figura 54 - Detalhe dos extensômetros fixados na laje	63
Figura 55 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão	64
Figura 56 - Detalhe do posicionamento do extensômetro na barra	65
Figura 57 - Seqüência de fixação do extensômetro na barra.....	65
Figura 58 - Monitoramento da armadura de flexão da laje L1	66
Figura 59 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento	66
Figura 60 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento (L6)	67

Figura 61 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento (L7)	68
Figura 62 - Detalhe do monitoramento das armaduras de cisalhamento.....	68
Figura 63 - Moldagem dos corpos de prova.....	69
Figura 64 - Armaduras utilizadas nas lajes.....	71
Figura 65 - Formas metálicas utilizadas na confecção das lajes	71
Figura 66 - Marcação e detalhe da fixação dos blocos de EPS	72
Figura 67 - Blocos de EPS fixados à forma.....	72
Figura 68 - Transporte e lançamento do concreto na fôrma.....	73
Figura 69 - Adensamento e regularização da superfície de concreto	74
Figura 70 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test)	74
Figura 71 - Cura das lajes e dos corpos de prova utilizando sacos de aniagem	75
Figura 72 - Retirada dos blocos de EPS	75
Figura 73 - Vista da parte inferior da laje antes a após a retirada dos blocos de EPS.....	76
Figura 74 - Tirantes fixados à laje de reação e perfis metálicos envolvendo os tirantes.....	77
Figura 75 - Sistema de ensaio em planta e em corte	78
Figura 76 - Sistema de ensaio.....	78
Figura 77 - Dispositivo de aplicação de carga.....	79
Figura 78 - Sistema de aquisição de dados.....	79
Figura 79 - Ensaio para determinação da resistência do concreto.....	81
Figura 80 - Ensaio de módulo de elasticidade do concreto	82
Figura 81 - Ensaio de tração do aço	83
Figura 82 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø4,2 mm	84
Figura 83 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø6,0 mm	84
Figura 84 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø6,3 mm	84
Figura 85 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø12,5 mm	85
Figura 86 - Posicionamento dos deflectômetros nas lajes.....	86
Figura 87 - Deslocamentos verticais na laje L1	86
Figura 88 - Deslocamentos verticais na laje L2	87
Figura 89 - Deslocamentos verticais na laje L3	87
Figura 90 - Deslocamentos verticais na laje L4	87
Figura 91 - Deslocamentos verticais na laje L5	88
Figura 92 - Deslocamentos verticais na laje L6	88
Figura 93 - Deslocamentos verticais na laje L7	88
Figura 94 - Deslocamentos verticais na laje L8	89

Figura 95 - Deslocamentos verticais centrais (D4) das lajes.....	89
Figura 96 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L1).....	90
Figura 97 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L2).....	90
Figura 98 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L3).....	91
Figura 99 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L4).....	91
Figura 100 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L5).....	91
Figura 101 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L6).....	92
Figura 102 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L7).....	92
Figura 103 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos deflectômetros (L8).....	92
Figura 104 - Posicionamento dos extensômetros na superfície de concreto das lajes	93
Figura 105 - Deformações medidas no concreto da laje L1	94
Figura 106 - Deformações medidas no concreto da laje L2	94
Figura 107 - Deformações medidas no concreto da laje L3	94
Figura 108 - Deformações medidas no concreto da laje L4	95
Figura 109 - Deformações medidas no concreto da laje L5	95
Figura 110 - Deformações medidas no concreto da laje L6	95
Figura 111 - Deformações medidas no concreto da laje L7	96
Figura 112 - Deformações medidas no concreto da laje L8	96
Figura 113 - Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão das lajes.....	97
Figura 114 - Deformação da armadura de flexão da laje L1	97
Figura 115 - Deformação da armadura de flexão da laje L2	98
Figura 116 - Deformação da armadura de flexão da laje L3	98
Figura 117 - Deformação da armadura de flexão da laje L4	98
Figura 118 - Deformação da armadura de flexão da laje L5	99
Figura 119 - Deformação da armadura de flexão da laje L6	99
Figura 120 - Deformação da armadura de flexão da laje L7	99
Figura 121 - Deformação da armadura de flexão da laje L8	100
Figura 122 - Posicionamento dos extensômetros na armadura de cisalhamento das lajes.....	100
Figura 123 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L2	102
Figura 124 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L3	102
Figura 125 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L4	102
Figura 126 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L5	103
Figura 127 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L6	103
Figura 128 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L7	103

Figura 129 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L8.....	104
Figura 130 - Padrão de fissuração da laje L1	105
Figura 131 - Padrão de fissuração da laje L2	106
Figura 132 - Padrão de fissuração da laje L3	106
Figura 133 - Padrão de fissuração da laje L4	107
Figura 134 - Padrão de fissuração da laje L5	107
Figura 135 - Padrão de fissuração da laje L6	108
Figura 136 - Padrão de fissuração da laje L7	108
Figura 137 - Padrão de fissuração da laje L8	109
Figura 138 - Determinação da inclinação da superfície de ruptura.....	111
Figura 139 - Superfície de ruptura na face inferior das lajes.....	112
Figura 140 - Inclinação do cone de ruptura da laje L1	112
Figura 141 - Inclinação do cone de ruptura da laje L2.....	112
Figura 142 - Inclinação do cone de ruptura da laje L3	113
Figura 143 - Inclinação do cone de ruptura da laje L4.....	113
Figura 144 - Inclinação do cone de ruptura da laje L5.....	113
Figura 145 - Inclinação do cone de ruptura da laje L6.....	113
Figura 146 - Inclinação do cone de ruptura da laje L7.....	114
Figura 147 - Inclinação do cone de ruptura da laje L8.....	114
Figura 148 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo ACI 318 para ruptura por cisalhamento nas nervuras.....	116
Figura 149 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo MC90 para ruptura por cisalhamento nas nervuras	118
Figura 150 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pela NBR 6118 para ruptura por cisalhamento nas nervuras.....	119
Figura 151 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo ACI 318 para ruptura por punção	120
Figura 152 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo MC90 para ruptura por punção.....	122
Figura 153 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pela NBR 6118 para ruptura por punção	123
Figura 154 - Comparação entre os resultados observados e os estimados através do ACI 318 (cisalhamento nas nervuras e punção) e teoria das linhas de ruptura (flexão)	126

Figura 155 - Comparação entre os resultados observados e os estimados através do MC90 (cisalhamento nas nervuras e punção) e teoria das linhas de ruptura (flexão)	126
Figura 156 - Comparação entre os resultados observados e os estimados através da NBR 6118 (cisalhamento nas nervuras e punção) e teoria das linhas de ruptura (flexão)	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das treliças utilizadas no primeiro ensaio de Caixeta (1998).....	10
Tabela 2 - Características dos modelos do segundo e terceiro ensaio (Caixeta, 1998).....	11
Tabela 3 - Cargas de rupturas observadas nos ensaios (Melo, 2004).....	12
Tabela 4 - Características das lajes ensaiadas por Lúcio (1991).....	17
Tabela 5 - Comparação dos resultados estimados com os observados por Lúcio (1991).....	20
Tabela 6 - Características das lajes e propriedades dos materiais (Soares, 2004).....	23
Tabela 7 - Cargas últimas e modos de ruptura observados por Soares (2004).....	24
Tabela 8 - Principais características das lajes ensaiadas.....	46
Tabela 9 - Características das lajes.....	53
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração.....	81
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.....	82
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.....	83
Tabela 13 - Cargas últimas e modos de ruptura observados.....	110
Tabela 14 - Resultados estimados para resistência ao cisalhamento de acordo com o ACI 318	116
Tabela 15 - Resultados estimados para resistência ao cisalhamento de acordo com o MC90....	118
Tabela 16 - Resultados estimados para resistência ao cisalhamento de acordo com a NBR 6118	119
Tabela 17 - Resultados estimados para resistência à punção de acordo com ACI 318.....	120
Tabela 18 - Resultados estimados para resistência à punção de acordo com MC90.....	121
Tabela 19 - Resultados estimados para resistência à punção de acordo com NBR 6118.....	122
Tabela 20 - Resultados estimados para resistência à flexão de acordo com a Teoria das linhas de Ruptura.....	123
Tabela 21 - Modos de ruptura.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Distância livre entre os pontos de momento nulo
b_w	Largura da nervura
c	Lado de um pilar quadrado
d	Altura útil da laje
d'	Cobrimento da armadura
h	Altura total da laje
l	Comprimento do vão da laje
s	Espaçamento das barras da armadura
A_s	Área da seção transversal das armaduras de flexão
A_{sw}	Área da seção transversal das armaduras de cisalhamento
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
EPS	Poliestireno Expandido
f_{ys}	Tensão de escoamento do aço da armadura de flexão
f_{yws}	Tensão de escoamento do aço da armadura de cisalhamento
f_c	Resistência à compressão do concreto medida em corpos de prova cilíndricos
f_t	Resistência à tração do concreto medida em corpos de prova cilíndricos
m_u	Momento de flexão ao longo das linhas de ruptura
P	Carga aplicada na laje
P_{flex}	Carga de ruptura por flexão estimada
P_u	Carga última
V_{Rd}	Força cortante resistente de cálculo
V_{Sd}	Força cortante solicitante de cálculo
V_{Rd1}	Força cortante resistente de cálculo, relativa a elementos sem armadura de cisalhamento
V_{Rd2}	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto
V_{Rd3}	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal
α	Ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje
θ	Ângulo de inclinação das bielas de compressão consideradas no dimensionamento à força cortante
ρ	Taxa de armadura
ϕ	Diâmetro das barras da armadura

RESUMO

SOUZA, Shirley do S. M. **Análise Experimental de Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento**. Belém, 2007. 181p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.

Lajes lisas nervuradas bidirecionais são elementos estruturais de concreto armado apoiados diretamente sobre pilares, sujeitas a solicitações importantes nas duas direções, possibilitam maior velocidade na execução da obra e economia considerável de formas e concreto e, conseqüentemente, mão-de-obra. Este trabalho visa contribuir para o estudo do comportamento deste tipo de laje, quanto a resistência ao cisalhamento nas nervuras e à punção na região maciça das lajes, através de ensaios de 8 lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto armado. Foram realizadas análises comparativas entre os resultados obtidos experimentalmente e os fornecidos por normas técnicas nacionais e internacionais. As lajes eram quadradas de lado igual a 1.800 mm de comprimento e altura total de 140 mm. A seção transversal das lajes foi formada por nervuras de 50 mm de largura na base menor e 100 mm na base maior e os vazios entre as nervuras foram preenchidos com blocos de EPS (poliestireno expandido). As principais variáveis consideradas foram o tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras (treliça, estribo vertical fechado e estribo aberto inclinado a 45°) e a utilização de estribo aberto inclinado a 45° como armadura de punção na região maciça. Foram apresentados e analisados os resultados observados para os deslocamentos verticais, deformação nas armaduras de cisalhamento e de flexão, e a propagação das fissuras. Os valores observados para cargas últimas foram comparados com os resultados estimados.

Observou-se que as armaduras de cisalhamento nas nervuras não ocasionaram ganhos significativos na resistência última e que a armadura de punção elevou significativamente a resistência das lajes.

Palavras-Chave: laje lisa, laje nervurada, puncionamento, armadura de cisalhamento.

ABSTRACT

SOUZA, Shirley do S. M. **Experimental Analysis of Reinforced Concrete Waffle Flat Slabs with Shear Reinforcement**. Belém, 2007. 181p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.

Two-way waffle flat slabs are structural elements of reinforced concrete supported directly on columns, under bending moments over the two directions, they improve the speed of the execution and save moulds and concrete and, consequently, labor. This work seeks to contribute for the study of the behavior of this kind of slab, as the shear resistance of the ribs and the punching in the solid area, through tests of 8 two-way reinforced concrete waffle flat slabs. Comparative analyses between the experimental results and estimated by national and international design codes had been carried out. The slabs were square, with 1.800 mm of side and total height of 140 mm. The cross section of the slabs was formed by ribs with 50 mm of width for the base and 100 mm for the upper base and the spaces between the ribs had been filled with EPS blocks (expanded polystyrene). The main variables considered were the type of shear reinforcement in the ribs (trusses, closed vertical stirrup and 45 inclined stirrup) and the use of 45 inclined stirrup as shear reinforcement in the solid region. They were presented and analyzed the results observed for the vertical displacements, deformation in the flexural and shear reinforcement, and the propagation of cracks. The values observed for failure loads were compared with the estimated ones.

It was observed that the shear reinforcement in the ribs did not increase the failure loads and that the shear reinforcement in the solid region increased significantly the resistance of the slabs.

Keywords: flat slab, waffle slab, punching, shear reinforcement

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A utilização de vãos cada vez maiores, a evolução dos projetos arquitetônicos consolidando novos conceitos como flexibilidade de “layout” e a concorrência no mercado da construção civil, têm levado construtores e projetistas a buscarem soluções mais sofisticadas e que, além de eficazes, possam trazer redução de custos.

Nos edifícios de vários pisos, as lajes são responsáveis por elevada parcela de consumo de concreto. Em se tratando de grandes vãos, utilizando-se lajes maciças apoiadas em vigas (sistema convencional) nos pavimentos, essa parcela, segundo Franca e Fusco (1997) *apud* Silva (2005), chega a quase $2/3$ do volume total da estrutura, pois nesse caso a espessura necessária da laje, para atender ao critério de pequenos deslocamentos verticais, será elevada, tornando a estrutura antieconômica, já que parte da capacidade resistente da laje é utilizada para combater as solicitações decorrentes do peso próprio.

Neste caso, para grandes vãos, a utilização de lajes lisas nervuradas é uma alternativa atrativa, pois define-se como um sistema estrutural que consiste de um conjunto de nervuras solidarizadas por uma mesa de concreto, e apoiado diretamente nos pilares através de uma região maciça (Figura 1), possibilitando que o peso próprio da estrutura seja reduzido através da eliminação de parte do concreto abaixo da linha neutra, o qual se encontra submetido a tensões de tração decorrentes da flexão e cuja resistência a esse tipo de tensão é desprezada no estado limite último.

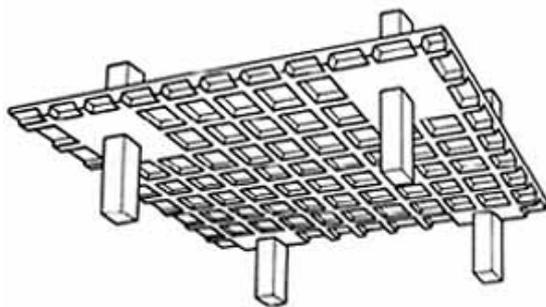


Figura 1 – Laje lisa nervurada (Pinheiro e Rezente, 2003)

Os vazios decorrentes da eliminação do concreto podem ser obtidos através da utilização de formas removíveis ou material inerte (Figura 2), onde normalmente são usados os blocos de poliestireno expandido (EPS). As formas removíveis são normalmente de polipropileno ou metal e podem ser reutilizadas em mais de 100 vezes, de acordo com Pinheiro e Rezente (2003). Já os blocos de EPS vêm sendo muito utilizados na execução de lajes nervuradas, pois apresentam características muito favoráveis para a utilização como enchimento em lajes, dentre elas, proporcionam uma superfície inferior plana, sem agregar peso à laje pois, segundo Andrade (2007), sua massa específica é da ordem de 20 a 25 kg/m³, sendo a leveza um dos grandes atributos desse material, além de apresentarem um baixo coeficiente de absorção, favorecendo a cura do concreto moldado no local, e serem considerados isolantes termo-acústico.



Figura 2 - Formas removíveis e blocos de EPS utilizados em lajes (Vizotto, 2002)

Através da utilização das formas removíveis ou dos elementos de enchimento, pode-se projetar lajes lisas nervuradas unidirecionais ou bidirecionais. As lajes unidirecionais são armadas e apresentam nervuras em apenas uma direção, que será a direção da distribuição do carregamento e normalmente são empregadas em painéis de forma alongada, onde a relação entre os vãos é maior do que 2 (Figura 3). Enquanto que as bidirecionais são armadas e são formadas por nervuras em duas direções, logo concebidas para distribuir as cargas em duas direções e são ideais para emprego de lajes em formato aproximadamente quadrado (Figura 4). As lajes bidirecionais, por serem mais rígidas, permitem vencer vãos maiores e apresentam grande facilidade de distribuição de cargas.



Figura 3 - Laje unidirecional (Pinheiro e Rezente, 2003)



Figura 4 - Laje bidirecional (Dias, 2003)

As lajes nervuradas convencionais (apoiadas em vigas) ou lisas (apoiadas diretamente nos pilares) apresentam algumas vantagens, podendo-se citar: alcançam grandes vãos, mesmo apresentando alturas elevadas, pois o peso próprio da estrutura é reduzido através da utilização ou não de material inerte entre as nervuras; facilidade na execução, ou seja, não requerem técnicas especiais de construção, como no caso de lajes protendidas. Somando-se a essas

vantagens, considerando apenas as lajes lisas nervuradas, ainda tem-se a redução da quantidade de formas e materiais; maior liberdade e flexibilidade para adaptação do espaço interno da obra (devido à ausência de vigas), sendo indicado principalmente para edificações residenciais, hospitalares, garagens e *shopping centers*. Estes três últimos pela facilidade da passagem de dutos e tubulações especiais.

Em contrapartida, as lajes nervuradas apresentam algumas desvantagens: normalmente aumentam a altura total da edificação, sem necessariamente aumentar o peso próprio da estrutura; exigem maiores cuidados durante a concretagem para evitar vazios nas nervuras. Em se tratando de lajes lisas nervuradas, tem-se o aumento dos deslocamentos verticais (flechas) em relação às lajes convencionais com mesmos vãos, diminuição da estabilidade global da estrutura com relação às ações horizontais, possibilidade de ruptura por cisalhamento nas nervuras próximas à região maciça e possibilidade de ruptura por punção. Os deslocamentos verticais podem ser equilibrados com a presença de vigas nas bordas livres das lajes, onde normalmente os deslocamentos são maiores. Quanto à estabilidade global, os efeitos provenientes das ações horizontais podem ser combatidos através da associação das lajes a núcleos rígidos ou a paredes estruturais. Com relação à força cortante, o maior risco provém do puncionamento da laje pelos pilares, por se caracterizar como uma ruptura do tipo frágil e brusca, ou seja, sem aviso prévio, pois normalmente ocorre antes que a armadura de flexão atinja a tensão de escoamento, formando-se uma superfície tronco-cônica que se desenvolve à aproximadamente 35° da região de contato da laje com o pilar, ocasionando a perfuração da laje e o colapso progressivo (Figura 5). Portanto, para garantir que a ruptura, caso ocorra, se dê por flexão e não por punção, estas lajes devem ser dimensionadas em função da resistência à punção na ligação laje-pilar.

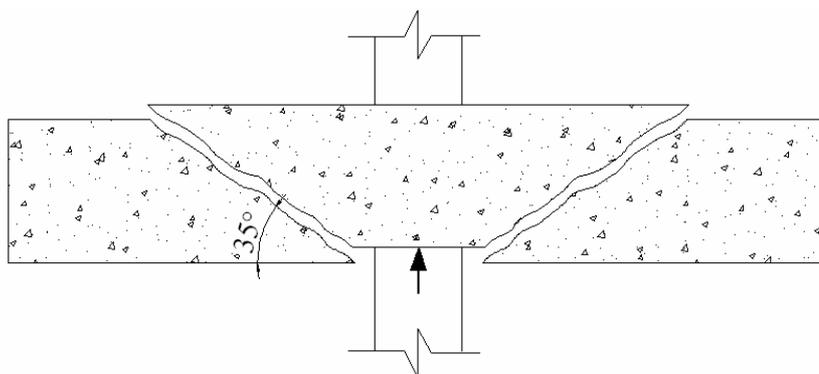


Figura 5 - Superfície de ruptura por punção

1.2 Justificativa

Passado pouco mais de um século da criação da laje nervurada, segundo Schwetz (2005), a indústria da construção civil brasileira ainda utiliza predominantemente o método convencional (lajes maciças apoiadas em vigas) na concepção de estruturas de concreto armado. Porém, a exemplo da Europa e dos EUA, onde o sistema estrutural com lajes lisas nervuradas já está bastante difundido, no Brasil verifica-se um aumento na difusão e utilização desse sistema estrutural, tornando-se necessário desenvolver estudos sobre o comportamento e desempenho que orientem na sua utilização, visto que a atual norma brasileira trata de maneira muito sucinta tanto o dimensionamento ao cisalhamento (lajes nervuradas) quanto à punção (lajes lisas), além de não apresentar qualquer recomendação para a utilização desses sistemas estruturais concomitantemente.

Dessa forma, devido à natureza da ruptura por puncionamento, optou-se por analisar o comportamento de lajes lisas nervuradas com armadura de cisalhamento nas nervuras (treliça, estribo vertical fechado e estribo inclinado a 45°), com a finalidade de se identificar a armadura com melhor desempenho no combate aos esforços cisalhantes e com armadura de punção na região maciça (estribo inclinado a 45°), visando justificar o ganho de resistência das lajes com este tipo de armadura, comprovando a sua eficiência.

1.3 Objetivos

Contribuir para a análise experimental de lajes lisas nervuradas de concreto armado através do estudo da resistência ao cisalhamento oferecida pelas nervuras e da resistência à punção da região maciça de concreto armado.

Verificar e quantificar experimentalmente a resistência à punção em lajes lisas nervuradas de concreto armado e o desempenho das nervuras no combate às tensões de cisalhamento através da utilização de três tipos diferentes de armadura de transversal.

Discutir os resultados obtidos nos ensaios realizados e compará-los com os resultados estimados através das recomendações das normas ACI 318 (American Concrete Institute, 2005), CEB-FIP

Model Code 1990 (Comitê Euro-Internacional do Beton, 1993) e NBR6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003).

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, apresentando-se a seguir o conteúdo de cada um deles.

O segundo capítulo consiste de uma revisão bibliográfica sobre lajes lisas nervuradas, de modo a se obter informações disponíveis nas recomendações normativas para estimativa da carga de ruptura para o esforço cisalhante nas nervuras e para carga de punção das lajes. São também apresentadas algumas pesquisas realizadas relacionadas a lajes lisas nervuradas.

O terceiro capítulo apresenta o programa experimental utilizado durante o projeto de pesquisa, que consiste no sistema de ensaio de 8 lajes lisas nervuradas, além de mostrar os equipamentos empregados nos ensaios, dispositivo de aplicação das cargas e instrumentação utilizada.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais referentes aos ensaios de caracterização dos materiais (concreto e aço), deslocamentos verticais, deformações do concreto e das armaduras, padrão de fissuração, além das cargas e modos de ruptura observados nos ensaios.

O capítulo 5 traz uma comparação entre os resultados estimados e os obtidos nos ensaios para cargas últimas e modos de ruptura e uma breve discussão sobre os resultados teóricos.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

E para finalizar, os Apêndices trazem as planilhas com as leituras obtidas durante os ensaios para deslocamentos verticais e deformações, além de alguns procedimentos de cálculo adotados nesta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais sobre lajes nervuradas

Os pavimentos de uma edificação podem ser constituídos por lajes maciças ou nervuradas. Em se tratando de lajes nervuradas, os elementos podem ser moldados no local ou pré-moldados, apoiados em vigas, paredes de alvenaria estrutural ou apoiados diretamente nos pilares (sem vigas). Segundo Dias (1970) *apud* Schwetz (2005), os primeiros conceitos para lajes nervuradas surgiram em 1854, nos Estados Unidos, quando William Boutland Wilkinson criou um sistema de pequenas vigas em concreto armado regularmente espaçadas, no qual os vazios entre as nervuras eram formados pela colocação de moldes de gesso. Percebe-se que já se demonstrava um domínio dos princípios básicos de funcionamento do concreto armado, visto que, de acordo com a NBR 6118, “lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.”

O fato das teorias de concreto armado desprezarem a resistência do concreto à tração e o desejo de eliminar o excesso de concreto trabalhando nas regiões tracionadas levaram ao desenvolvimento de lajes nervuradas, permitindo um maior aproveitamento do concreto e a redução do peso próprio da estrutura. Utilizando-se lajes nervuradas apoiadas diretamente nos pilares, torna-se necessário a existência de uma região maciça ao redor dos pilares, que terá a função de absorver os momentos negativos provenientes do apoio e resistir aos efeitos de punção devido às altas tensões de cisalhamento.

De acordo com a NBR 6118 as lajes nervuradas podem ser calculadas como maciças, desde que observadas algumas condições quanto às dimensões limites:

- A espessura da mesa (h_f) não deve ser menor que 30 mm ou 1/15 da distância entre nervuras (l_0), quando não houver tubulações horizontais embutidas; Em casos de existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo 12,5 mm, a espessura mínima da mesa deve ser 40 mm;
- A espessura das nervuras (b_w) não deve ser inferior a 50 mm;
- As nervuras com espessura inferior a 80 mm, não devem conter armadura de compressão;

- A verificação da resistência à flexão da mesa pode ser dispensada sempre que a distância entre os eixos das nervuras for menor ou igual a 650 mm e para a verificação das nervuras ao cisalhamento, utiliza-se os critérios de laje;
- Se a distância entre eixos das nervuras estiver entre 650 mm e 1.100 mm, deverá ser feita a verificação da resistência à flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas. Porém, podem ser verificadas como lajes se a distância entre seus eixos for menor ou igual a 900 mm e espessura maior que 120 mm;
- Em lajes com distância entre eixo das nervuras maior que 1.100 mm, a mesa deverá ser calculada como laje maciça.

A Figura 6 mostra algumas dessas recomendações para dimensões limites de lajes nervuradas, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003).

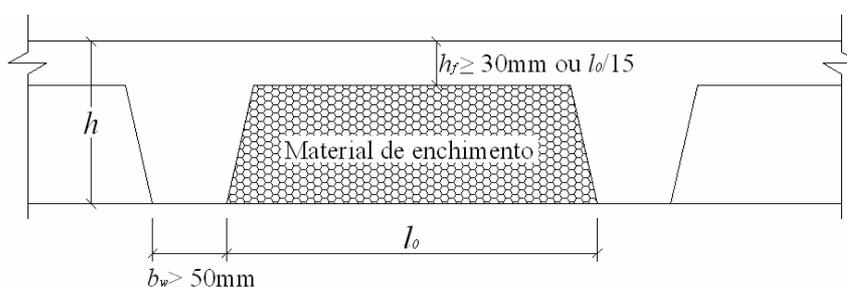


Figura 6 - Seção transversal de uma laje nervurada

2.2 Considerações gerais sobre lajes lisas

Segundo Souza e Cunha (1998), as primeiras lajes cogumelo surgiram nos Estados Unidos, no início do século XX, havendo grandes diferenças na maneira de executá-las. Atualmente a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003) define em seu item 14.7.8 que “lajes cogumelo são lajes apoiadas em pilares com capitéis, enquanto lajes lisas são as apoiadas nos pilares sem capitéis.”

Dessa forma, a ligação laje-pilar é uma região submetida a momentos negativos de grande magnitude, podendo ocasionar a punção. Por ser caracterizado pela atuação de forças concentradas ou agindo em pequenas áreas sobre o elemento estrutural plano, a punção é o fenômeno de perfuração que pode causar a ruína do elemento, sendo esse o motivo pelo qual a capacidade resistente de lajes lisas nervuradas é ditada pela resistência à punção, a qual pode ser aumentada através da utilização de concreto de alta resistência, armadura de combate à punção,

fazendo-se uso da protensão, incorporação de fibras de aço ao concreto ou aumentando as dimensões dos pilares. Entretanto, é importante verificar os efeitos das tensões cisalhantes atuantes nas nervuras, já que também podem acarretar na ruína das lajes.

2.3 Revisão de literatura

2.3.1 Caixeta (1998)

Caixeta (1998) analisou, através do ensaio de flexão simples, o comportamento de 10 modelos de lajes pré-fabricadas com armadura treliçada. Dos 10 modelos ensaiados, 4 tinham seção retangular e 6 tinham seção T. Procurou-se representar de maneira satisfatória o modo real de sua utilização em obra. Um dos objetivos deste trabalho foi analisar a contribuição das diagonais das treliças no combate aos esforços cisalhantes em peças pré-fabricadas através de 3 tipos de ensaios diferentes.

No primeiro ensaio, utilizou-se 4 vigotas treliçadas simplesmente apoiadas, sendo 2 com altura da treliça igual a 80 mm (TR 8634) e 2 com 160 mm (TR 16646) e ambas com 2.200 mm de comprimento, submetidas à duas forças concentradas, tendo como objetivo verificar o comportamento da vigota treliçada, ou seja, avaliar o trabalho das diagonais durante a aplicação das forças e determinar a carga de ruptura para os 4 modelos ensaiados. Para isso, o ensaio foi realizado somente com a vigota treliçada sem a participação do concreto da nervura e capa complementar. Apenas dois blocos de concreto de 100 mm de comprimento foram confeccionados nos locais de aplicação das duas cargas concentradas (Figura 7). As características das treliças são apresentadas na Tabela 1.

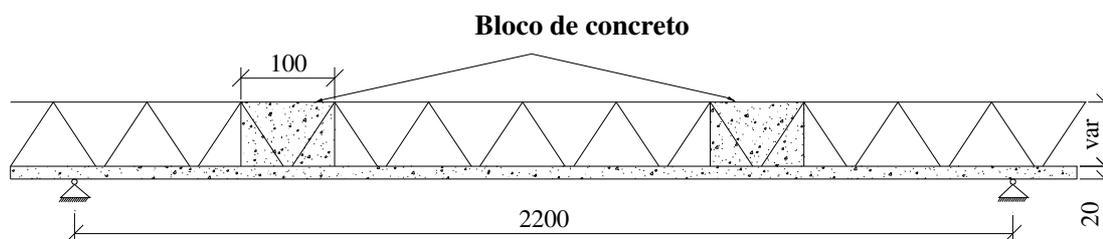


Figura 7 - Ensaio com blocos de concreto para apoio das forças (Caixeta, 1998)

Tabela 1 - Características das treliças utilizadas no primeiro ensaio de Caixaeta (1998)

Posição da armadura	H-8: TR 8634	H-16: TR 16646
\varnothing_{inf} (mm)	2 \varnothing 4,2	2 \varnothing 6,0
\varnothing_{sup} (mm)	1 \varnothing 6,0	1 \varnothing 6,0
$\varnothing_{\text{diag}}$ (mm)	2 \varnothing 3,4	2 \varnothing 4,2
$\varnothing_{\text{arm.adic.}}$ (mm)	1 \varnothing 6,0	1 \varnothing 8,0 + 1 \varnothing 10,0

Para realização do ensaio foi utilizada uma viga em perfil metálico com 1.500 mm de comprimento, responsável pela transmissão das duas forças concentradas na vigota treliçada aplicadas pelo macaco hidráulico. Sendo P a força total produzida pelo macaco hidráulico, o perfil metálico transmitia P/2 para cada força concentrada aplicada na viga treliçada.

Com os resultados desses ensaios verificou-se a instabilidade (ou flambagem) da vigota treliçada, através do grande deslocamento vertical no centro da viga, sendo necessário abandonar este esquema de ensaio, uma vez que não permitiu avaliar a capacidade de carga e medir as deformações nas barras das treliças.

Após a realização do primeiro tipo de ensaio e verificar a sua inviabilidade aos objetivos propostos, partiu-se para o segundo tipo de ensaio, onde concretou-se a nervura e a capa de concreto complementar para cada viga com concreto de 15 MPa de resistência à compressão aos 7 dias (Figura 8). Os procedimentos experimentais para o segundo ensaio foram os mesmos do primeiro ensaio, nos quais foram submetidos 4 modelos de lajes, sendo 2 modelos com a TR 8634 (BETA 12) e 2 com a TR 16646 (BETA 20), cujas características já foram descritas na Tabela 1.

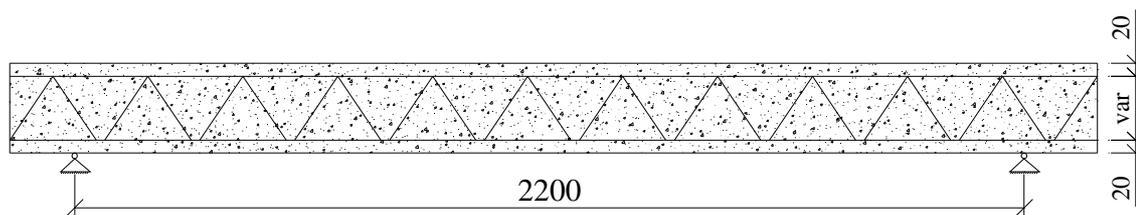


Figura 8 - Características dos modelos do segundo ensaio (Caixeta, 1998)

Finalizados os dois primeiros ensaios, definiu-se, para o terceiro ensaio, com mais exatidão as variáveis a serem analisadas. Estas variáveis estudadas foram o comportamento da viga treliçada na flexão e cisalhamento, distribuição de fissuras, formas de ruptura, verificação das flechas durante a aplicação das cargas, deformações das diagonais e banzo superior da treliça. Foram escolhidas peças com 3 alturas diferentes de treliça, além dos 2 tipos de treliças usadas no segundo ensaio acrescentou-se mais um tipo (TR 12646), sendo 2 vigotas para cada altura, num

total de 6 modelos ensaiados. Nestes ensaios, adotou-se uma seção T (Figura 9) para representar efetivamente a seção transversal da peça em obra. A Tabela 2 apresenta as características dos modelos do segundo e terceiro ensaios.

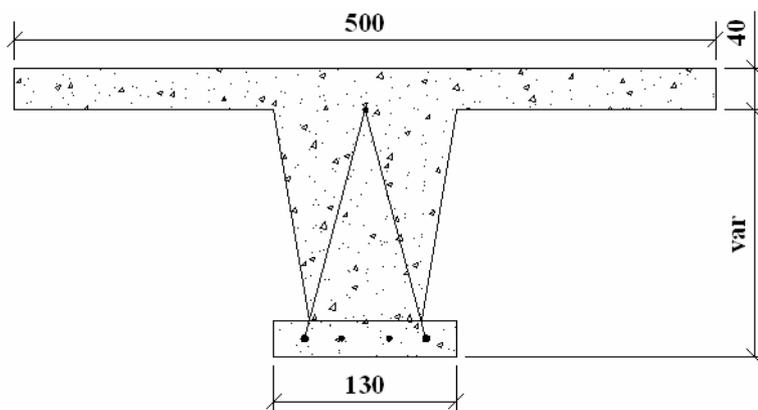


Figura 9 - Seção transversal das vigas utilizadas no terceiro ensaio (Caixeta, 1998)

Tabela 2 - Características dos modelos do segundo e terceiro ensaio (Caixeta, 1998)

Modelo	Altura da treliça (mm)	d (mm)	f_c (Mpa)	Carga de ruptura (kN)
Beta 12	80	105	18,0	4,7
Beta 20	160	185	18,0	21,0
V121	80	105	27,3	3,3
V122	80	105	27,3	5,5
V161	120	145	17,8	7,0
V162	120	145	17,8	10,0
V201	160	185	18,8	9,2
V202	160	185	18,6	13,7

A partir dos ensaios realizados, Caixeta observou que as fissuras foram apenas de flexão, com maior incidência na região entre as forças, ocorrendo apenas na região da nervura, estendendo-se até a capa apenas nas vigas de menor altura. Em relação à contribuição das diagonais da armadura treliçada, Caixeta concluiu que estas pouco contribuem no combate aos esforços cortantes, apresentando deformações insignificantes, tendo com isso, poucas vantagens em relação aos demais tipos de laje. Entretanto, algumas vantagens podem ser citadas, como maiores vãos alcançados, facilidade de manuseio das peças, tanto na obra como na pré-fabricação.

2.3.2 Melo (2004)

Com o objetivo de investigar o comportamento de lajes nervuradas quando solicitadas ao cisalhamento, Melo (2004) analisou experimentalmente 8 painéis de lajes nervuradas com e sem vigotas treliçadas., os quais foram submetidos a duas cargas concentradas aplicadas no bordo

superior. Dos 8 painéis ensaiados, 2 não possuíam armadura de cisalhamento, considerados de referência (PLR-1 e PLR-2). Todos os demais painéis foram constituídos por armadura de cisalhamento nas nervuras, sendo 2 constituídos somente por estribos verticais (PL-1 e PL-2), 2 somente por treliças (PL-3 e PL-4) e 2 por treliças e estribos verticais (PL-5 e PL-6). Os painéis possuíam 1.260 mm de largura, 3.000 mm de comprimento e 150 mm de altura, onde 40 mm caracterizava a zona de capeamento. A Figura 10 mostra as seções transversais dos painéis ensaiados e as respectivas armaduras de cisalhamento nas nervuras e a Tabela 3 apresenta as cargas de rupturas para cada painel.

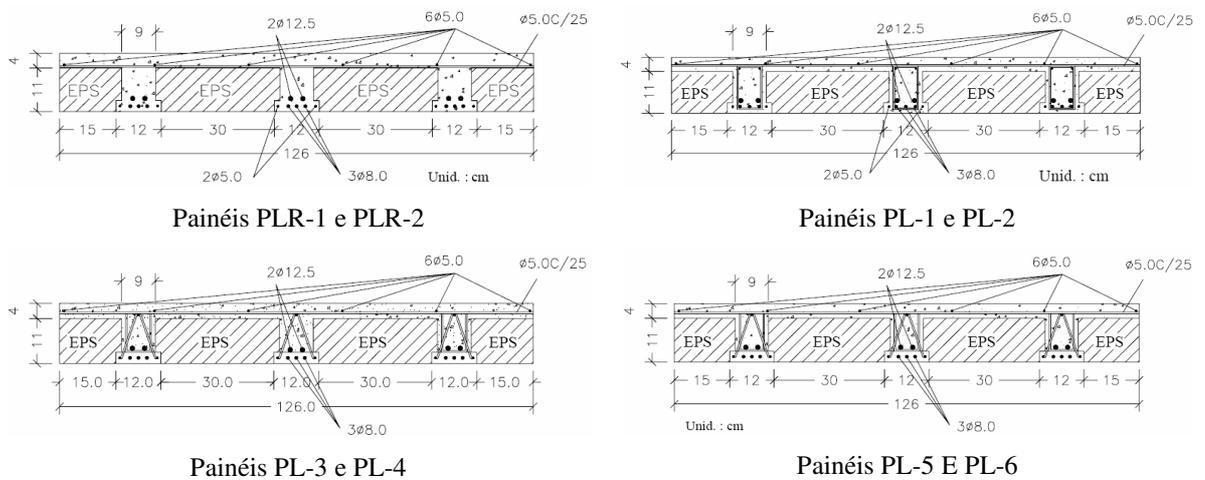
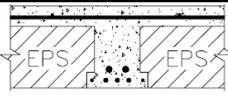
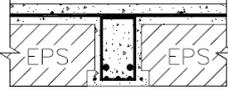
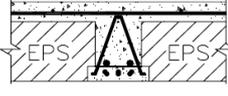
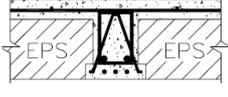


Figura 10 - Seção transversal dos painéis (Melo, 2004)

Tabela 3 - Cargas de rupturas observadas nos ensaios (Melo, 2004)

Seção (nervura central)	Painel	P_u (kN)
	PLR-1	150,0
	PLR-2	141,7
	PL-1	190,9
	PL-2	180,0
	PL-3	192,1
	PL-4	216,7
	PL-5	242,7
	PL-6	230,0

De acordo com os ensaios, Melo observou que os painéis com estribos e treliças (PL-5 e PL-6) foram os que apresentaram maiores deslocamentos verticais. No entanto, os painéis com treliça (PL-3 e PL-4) se mostraram mais rígidos que os demais.

Quanto às deformações das armaduras de cisalhamento, as maiores deformações ocorreram nos extensômetros próximos às cargas. De acordo com as leituras registradas nas treliças, nenhuma diagonal apresentou escoamento, cuja máxima deformação verificada foi de 2,905‰ no painel PL-3. Em relação aos estribos, a maior deformação registrada foi de 7,291‰ no painel PL-5, indicando que, segundo os dados dos ensaios do aço, a armadura do estribo entrou em escoamento.

Com relação à deformação da superfície do concreto, não foi verificado esmagamento do concreto e as maiores deformações foram registradas no painel PL-6, que combinava treliça e estribo como armadura de cisalhamento.

Comparando-se as cargas de ruptura, Melo observou que os modelos com treliças (PL-3 e PL-4) registraram cargas máximas, em média 10% superiores às obtidas pelos modelos com estribos convencionais (PL-1 e PL-2) e cerca de 40% maiores que os de referência, isso mostra que as treliças, quando solicitadas, realmente funcionam, no entanto são menos eficientes que os estribos, pois para um mesmo trecho linear com um metro de comprimento, as treliças apresentaram cerca de 33% a mais de aço que os estribos, no entanto, o ganho de resistência foi em torno de 10%. Para os painéis PL-5 e PL-6, a combinação de estribos com treliças mostrou que a eficiência é ainda menor, pois a quantidade de aço nesses painéis é cerca de 133% maior, no entanto o ganho de resistência foi de 28%, em média.

2.3.3 Tesoro (1991)

De acordo com Tesoro (1991) o tratamento utilizado para determinar a resistência ao esforço cortante nas nervuras de lajes lisas nervuradas é similar ao de vigas, tendo como princípio o método da analogia da treliça de Ritter-Mörsch, considerando que a força cortante solicitante nas nervuras deve ser analisada assim que as nervuras saem da região maciça de concreto armado e que não deve ser maior que a força cortante resistida pelo concreto.

Tesoro comenta que através do método dos pórticos equivalentes também é possível determinar, com certa precisão, o esforço cortante atuante em cada nervura. Para isso, basta dividir o esforço cortante obtido pelo método, pelo número de nervuras que saem do maciço. A Figura 11 mostra a área de influência considerada para o cálculo do esforço cortante nas nervuras, determinado a partir das equações 2.1 e 2.2.

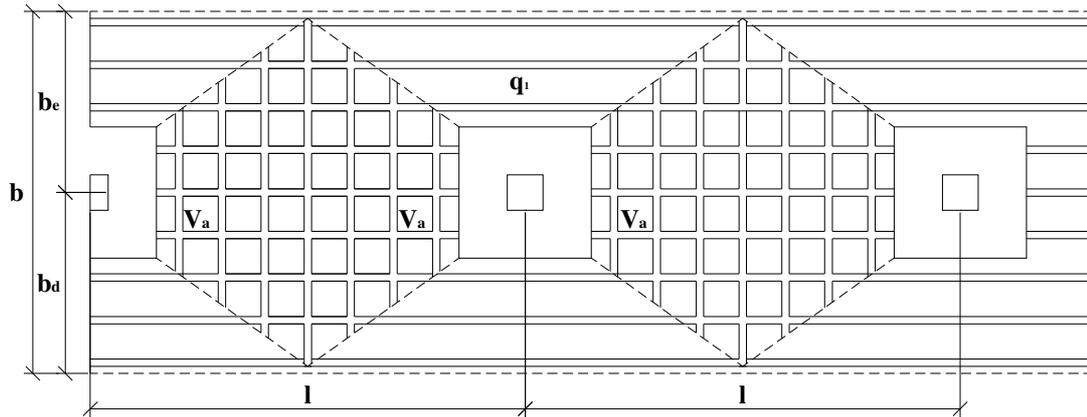


Figura 11 - Área de influência considerada para o cálculo do esforço cortante nas nervuras (Tesoro, 1991).

$$V_a = k \cdot \frac{2 \cdot l \cdot (b_e + b_a) \cdot q_1}{9} = \frac{2}{9} \cdot k \cdot l \cdot b \cdot q_1 \quad (2.1)$$

$$V_n = \frac{V_a}{n/2} = \frac{4}{9} \cdot \frac{k \cdot l \cdot b \cdot q_1}{n} \quad (2.2)$$

Onde:

V_a : força cortante obtido pelo método dos pórticos equivalentes;

V_n : força cortante por nervura;

b : largura do pórtico equivalente;

l : vão;

q_1 : carga total por nervura;

n : número de nervuras do pórtico;

k : fator que leva em conta os momentos nas extremidades dos vãos.

2.3.4 Lúcio (1991)

Lúcio (1991) desenvolveu um estudo baseado na análise experimental de 10 modelos de painéis de lajes nervuradas e duas vigas com o formato das nervuras, com o objetivo de verificar o comportamento à flexão, à torção e ao cisalhamento destes modelos.

Para o estudo do comportamento ao cisalhamento, foram ensaiados 5 modelos de painéis de lajes nervuradas (VL4 a VL8) com carregamento aplicado de baixo para cima, em um pilar central ou em uma viga metálica ligada ao pilar, em casos de excentricidade. Os modelos eram quadrados,

com dimensões de 2.000 mm de comprimento e 180 mm de espessura, apoiados nos 4 bordos por meio de tirantes tensionados, cada um com 10 mm de diâmetro, conforme mostra a Figura 12.

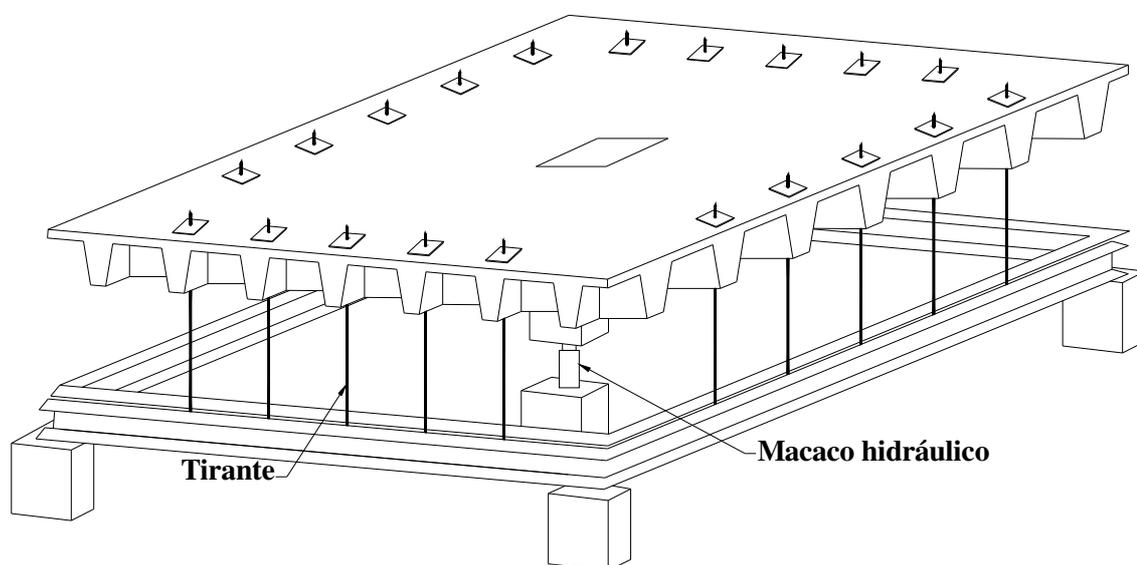


Figura 12 - Esquema de apoio das lajes de Lúcio (1991)

Um dos parâmetros variados foi a quantidade de nervuras que chegava à região maciça. Nos modelos VL4, VL5 e VL6, 12 nervuras convergiam para a região maciça, enquanto que nos outros, apenas 8, como mostra a Figura 13. Outro parâmetro investigado foi a excentricidade do carregamento, que ora foi aplicado por um macaco hidráulico diretamente em um pilar central (VL4 e VL7) ora em uma viga metálica horizontal ligada ao pilar, simulando um carregamento excêntrico. Nas lajes VL5 e VL8 a excentricidade foi de 300 mm e na VL6 a excentricidade foi de 710 mm, sendo que nesta última laje foi colocado outro macaco hidráulico na superfície superior da laje para aplicar o binário responsável pela excentricidade (Figura 14).

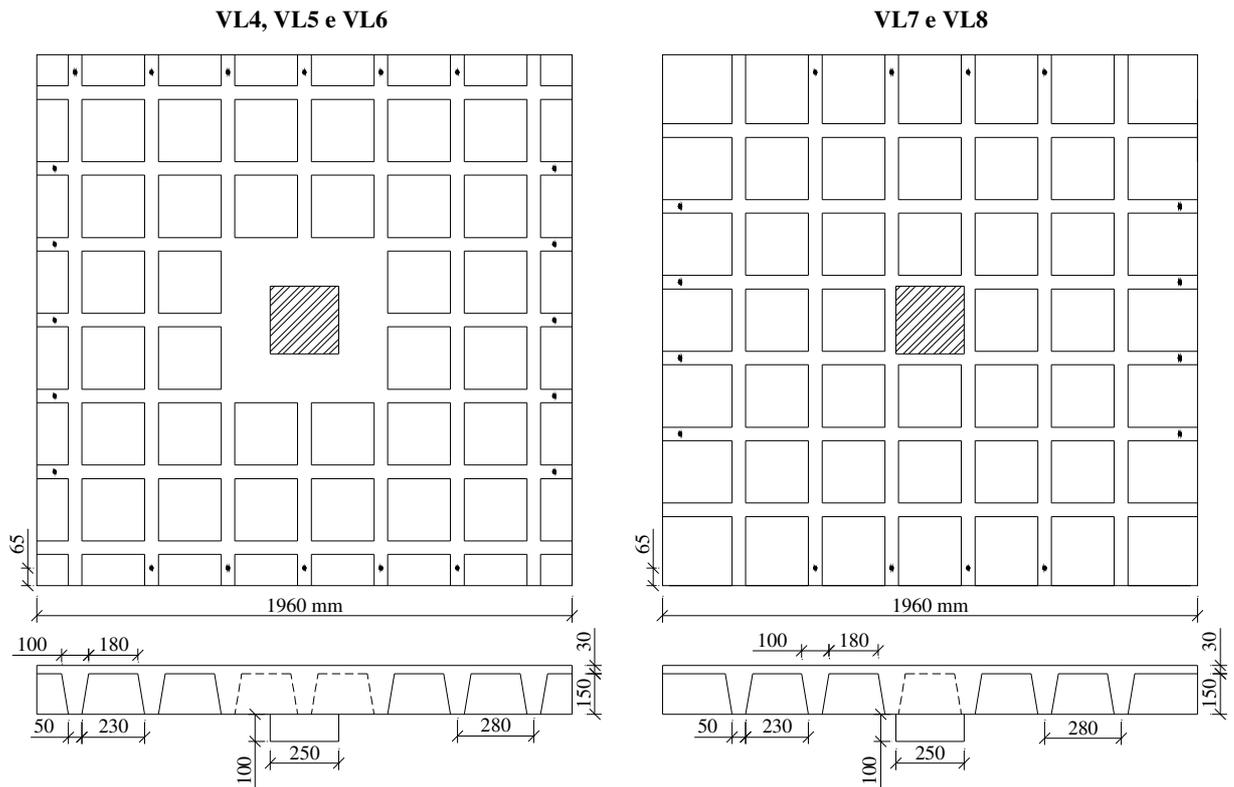


Figura 13 - Dimensões das lajes e posicionamento das nervuras (Lúcio, 1991)

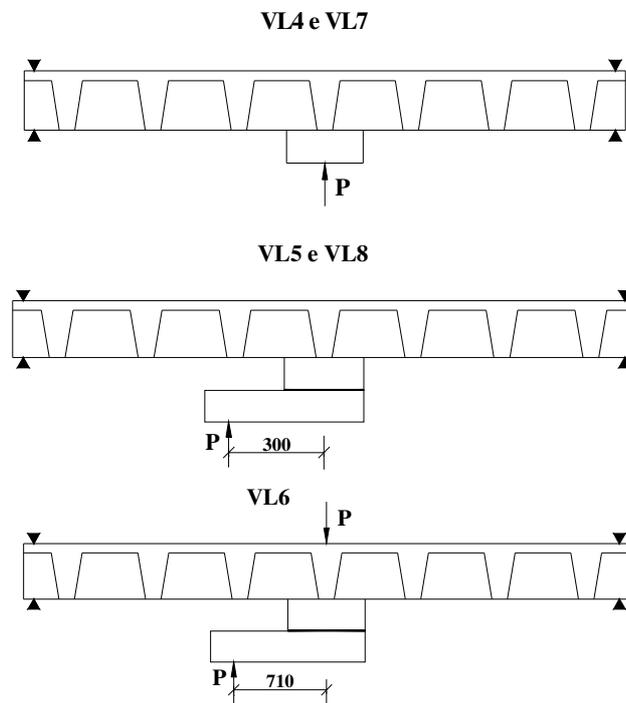


Figura 14 - Aplicação da carga nas cargas de Lúcio (1991)

Todas as lajes tiveram armadura de flexão similar, sendo que nenhum tipo de armadura de cisalhamento foi utilizado nas nervuras. A Figura 15 mostra um detalhe das armaduras das lajes e a Tabela 4 apresenta algumas características das lajes ensaiadas por Lúcio.

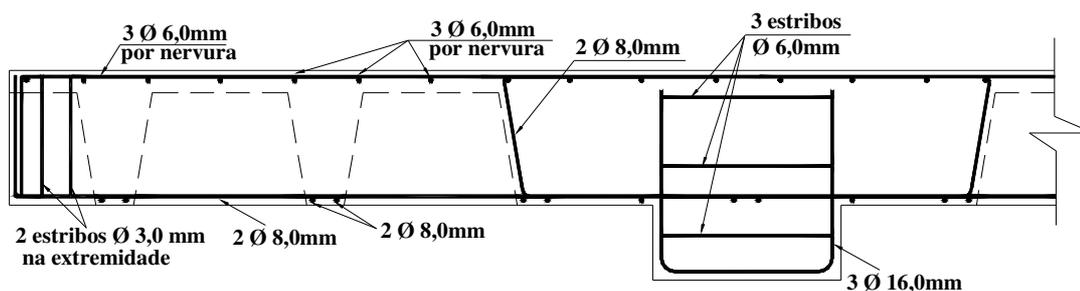


Figura 15 - Detalhe das armaduras das lajes de Lúcio (1991)

Tabela 4 - Características das lajes ensaiadas por Lúcio (1991)

Laje	Excentricidade (mm)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	f_{ys} (MPa)
VL4	-	33,2	2,7	585
VL5	300	30,3	2,6	585
VL6	710	27,6	2,4	585
VL7	-	30	2,6	585
VL8	300	31,1	2,6	585

Também foram ensaiadas 2 vigas nervuradas isoladas (VLA e VLB), simplesmente apoiadas nas duas extremidades e carregadas no meio do vão, com o objetivo de verificar sua ductilidade na ruptura por cisalhamento e com isso dos painéis de lajes. Estes modelos também foram usados para analisar a influência do espaçamento das nervuras transversais na resistência ao cisalhamento. O carregamento foi aplicado através de um atuador hidráulico e medido através de uma célula de carga. O defletoômetro usado para medir o deslocamento vertical foi posicionado no meio do vão. A seção e as armaduras utilizadas nas vigas são mostradas na Figura 16. O modelo VLB apresentou a mesma distância entre as nervuras dos modelos de lajes. Já no modelo VLA os espaçamento entre as nervuras foi maior.

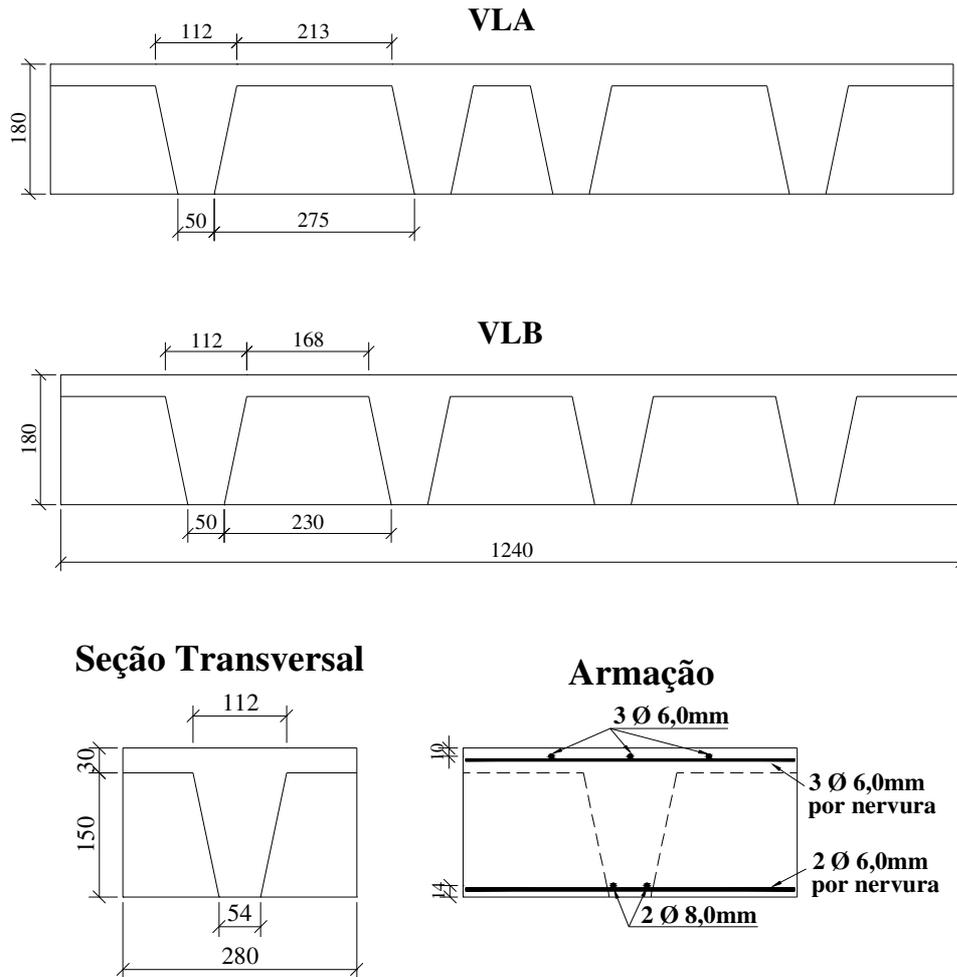


Figura 16 - Detalhe da seção e das armaduras das vigas VLA e VLB (Lúcio, 1991)

Para verificar a força resistente ao cisalhamento dos modelos ensaiados, Lúcio propôs uma equação que leva em consideração o aumento da resistência ao cisalhamento das nervuras principais (aquelas que chegam à região maciça) devido às nervuras transversais, através do fator $(2 \cdot d / a_v)$, onde a_v é considerado o comprimento da projeção horizontal da fissura de cisalhamento, no caso da pesquisa de Lúcio, correspondendo à distância entre as nervuras. A resistência ao cisalhamento (V_R) é determinada pela equação 2.3.

$$V_R = n \cdot V_c \cdot \frac{2 \cdot d}{a_v} \quad (2.3)$$

Onde n é número de nervuras que chegam à região maciça, nos casos das vigas, $n = 1$; V_c é resistência ao cisalhamento do concreto determinado a partir das recomendações normativas da ACI 318/83, BS 8119, CEB-FIP Model Code e a REBAP (norma portuguesa); e d é a altura útil.

O método das linhas de ruptura foi usado para verificar o modo de ruptura e a carga última de flexão. A configuração das linhas de ruptura é apresentada na Figura 17 e a correspondente carga última (P_u) é dada pela equação 2.4.

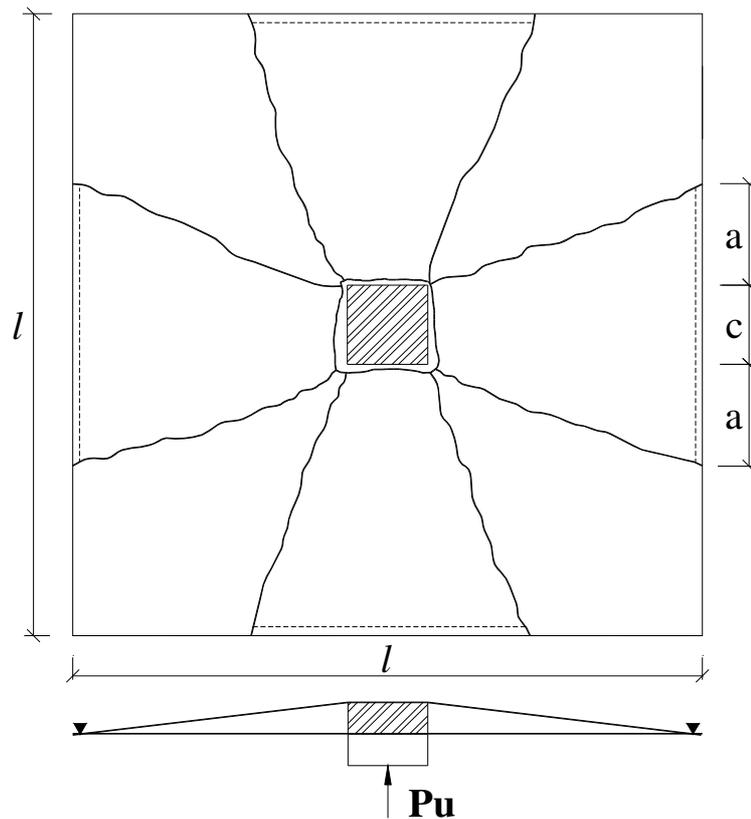


Figura 17 - Configuração das linhas de ruptura para as lajes de Lúcio (1991)

$$P_u = -8 \cdot m_u \cdot \left(\frac{c + 2 \cdot a}{l - c} + \frac{l - c - 2 \cdot a}{l - c + 2 \cdot a} \right) \quad (2.4)$$

Onde m_u é o momento de flexão ao longo das linhas de ruptura; c é dimensão da seção transversal do pilar quadrado; a é a distância entre a última nervura apoiada e a extremidade do pilar, medida paralelamente à extremidade da laje e; l representa a dimensão da laje.

Na Tabela 5 os resultados experimentais observados (V_{Exp}) por Lúcio são comparados com as estimativas normativas (V_R), as quais foi incorporado o fator proposto pelo autor, e com os obtidos pela teoria das linhas de ruptura (P_u).

Tabela 5 - Comparação dos resultados estimados com os observados por Lúcio (1991)

Modelo	E (mm)	n	V_{Exp} (kN)	P_u (kN) (P_u / V_{Exp})	V_R (kN) (V_R / V_{Exp})			
					CEB-FIP	REBAP	BS8110	ACI 318
VLA	-	-	18,65	-	17,56 (0,94)	21,69 (1,16)	18,44 (0,99)	18,13 (0,97)
VLB	-	-	21,95	-	21,54 (0,98)	26,59 (1,21)	22,61 (1,03)	22,23 (1,01)
VL4	-	12	240	224 (0,93)	239 (0,99)	283 (1,18)	247 (1,03)	235 (0,98)
VL5	300	12	190	179 (0,94)	148 (0,78)	176 (0,93)	155 (0,81)	156 (0,82)
VL6	710	12	116	134 (1,15)	92 (0,79)	109 (0,94)	101 (0,87)	104 (0,90)
VL7	-	8	178	221 (1,24)	153 (0,86)	182 (1,02)	160 (0,90)	149 (0,84)
VL8	300	8	149	175 (1,18)	83 (0,56)	99 (0,66)	88 (0,59)	91 (0,61)

Com os dados apresentados na Tabela 5, pode-se verificar que a laje sem excentricidade e com maior número de nervuras chegando à região maciça (VL4) foi a que apresentou a maior resistência, podendo ser, tal fato, justificado por se ter uma maior redistribuição do esforço cortante entre as nervuras, coerente com a equação proposta por Lúcio, que considera o número de nervuras que chegam à região maciça. Em relação às estimativas, de acordo com o método das linhas de ruptura, as únicas lajes que romperiam por flexão seriam a VL4 e a VL5, já que para as demais lajes a resistência à flexão foi superestimada. Entretanto, não há uma coerência com os resultados experimentais, pois de acordo com Lúcio, todas as lajes romperam por flexão, que ocorreu antes ou simultaneamente à ruptura por cisalhamento. Já para os códigos de norma, observa-se que, para os casos sem excentricidade (VLA, VLB, VL4 e VL7), as estimativas se aproximaram bastante dos resultados experimentais, sendo que, em todos estes modelos, a norma portuguesa superestimou os resultados.

Em relação às fissuras nas lajes, Lúcio concluiu que estas ocorrem depois do desenvolvimento de grandes deformações e redistribuição da força cortante entre as nervuras, tendo sua inclinação definida pelas nervuras transversais que se comportam como reforço ao cisalhamento. Esta inclinação seguia a diagonal da face lateral de cada nervura.

Verificou-se que a força cortante é transmitida por uma região de compressão inclinada principal (A), por uma zona de compressão inclinada secundária (B), através do engrenamento do agregado ao longo da fissura de cisalhamento e por efeito pino na região C. A ruptura na região C ocorre pelo fendilhamento do concreto, a fissura de cisalhamento se abre até que não haja mais engrenamento do agregado, então o concreto na região D é esmagado. A armadura na região E funciona eficientemente como um tirante tracionado, devendo ser bem ancorada além dessa seção (Figura 18).

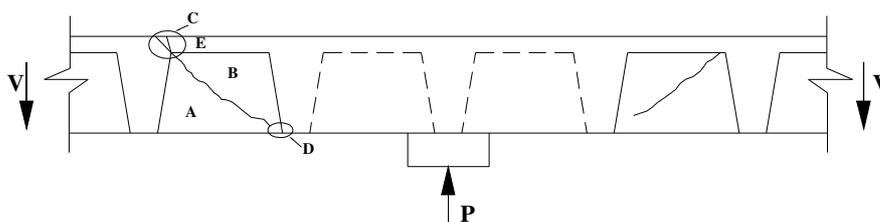


Figura 18 - Modelo de ruptura por cisalhamento para lajes nervuradas (Lúcio, 1991)

Com essas interpretações, Lúcio concluiu que não era necessário verificar o cisalhamento no canto da região maciça (Figura 19), porque não é possível desenvolver fissuras naquela região. Por outro lado, a redistribuição da força cortante entre as nervuras que convergiam à região maciça dos modelos de laje permitiu a formação visível de fissuras antes da ruptura, e alguma ductilidade, o que não foi verificado nos ensaios das vigas nervuradas isoladas. Este fato comprova um comportamento típico de laje, em vez de um comportamento de viga frágil, não precisando ser recomendada armadura de cisalhamento nas nervuras de lajes nervuradas.

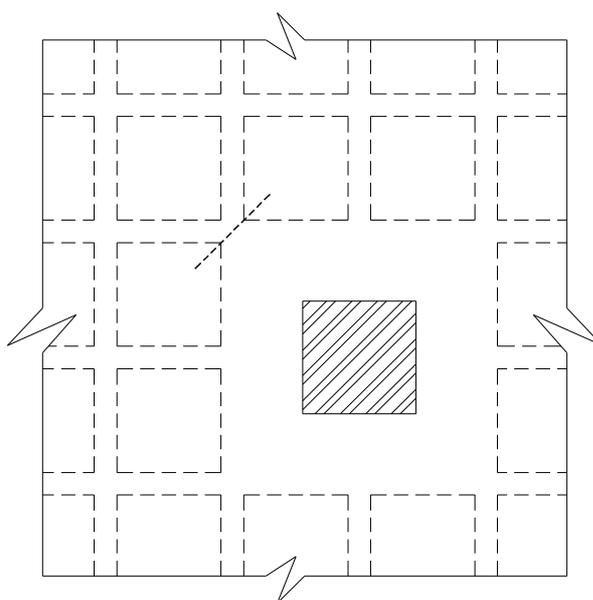


Figura 19 - Região maciça livre de verificação ao cisalhamento nas lajes de Lúcio (1991)

2.3.5 Soares (2004)

Soares (2004) ensaiou 8 lajes cogumelo nervuradas de concreto armado, com pilar metálico central simulando a ligação laje-pilar interior do pavimento submetido a carregamento simétrico, com o objetivo de investigar o comportamento ao esforço cortante nas nervuras e à punção na região maciça.

As lajes eram quadradas com 1.850 mm de lado e espessura de 130 mm, com todos os bordos apoiados, o pilar central era constituído por dois perfis “I” (10 x 80 x 3,5 mm) solidarizados em um capitel metálico (300 x 240 x 10) mm e possuíam a mesma armadura de flexão compostas por barras de 6,0 mm de diâmetro espaçadas a cada 30 cm e uma tela soldada de 4,2 mm de diâmetro espaçadas a cada 15 cm nas duas direções. A Figura 20 mostra as dimensões das lajes em planta e em corte.

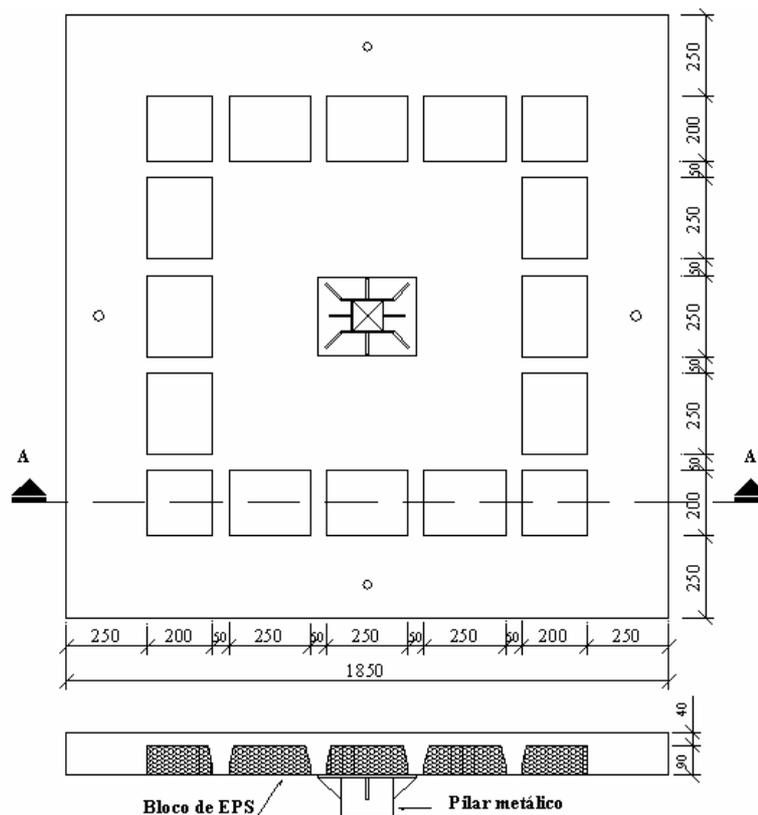


Figura 20 - Detalhe das dimensões das lajes de Soares (2004)

Uma das variáveis considerada foi o tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras, sendo constituídas por pinos com a cabeça para cima e para baixo, com a finalidade de investigar a posição mais eficiente para ancoragem do pino, estribos abertos com inclinação de 45° e estribos

convencionais verticais fechados, conforme a Figura 21. A Tabela 6 mostra as principais características das lajes ensaiadas por Soares e as propriedades dos materiais.

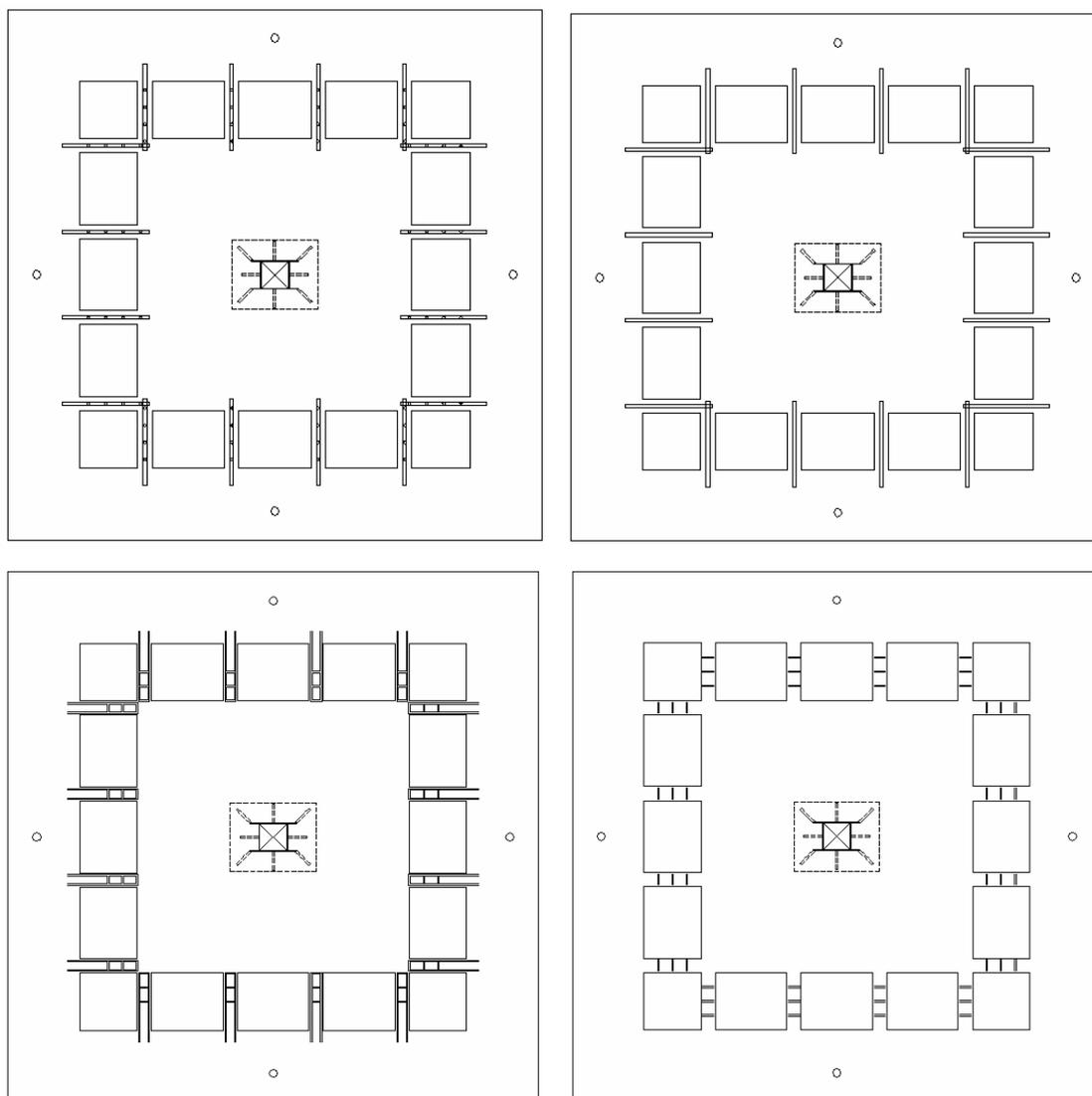


Figura 21 - Posicionamento das armaduras de cisalhamento nas nervuras (Soares, 2004)

Tabela 6 - Características das lajes e propriedades dos materiais (Soares, 2004)

Laje	d (mm)	Arm. flexão ρ (%)	f_c (MPa)	Arm. de cisalhamento		Fibra de aço
				Tipo de arm.	f_{ys} (MPa)	DRAMIX
LR-1	96	0,40	24	-	-	-
LR-2	98	0,39	30	-	-	-
LD-1	99	0,38	34	-	-	sim
LD-2	89	0,46	32	-	-	sim
LAC-1	103	0,36	35	Pino para cima	551	-
LAC-2	103	0,36	36	Pino para baixo	551	-
LAC-3	103	0,36	36	Estribo aberto inclinado	578	-
LAC-4	104	0,35	37	Estribo vertical fechado	578	-

Nos ensaios a carga era aplicada de baixo para cima nos pilares metálicos, através de um macaco hidráulico, tendo sua intensidade medida através de uma célula de carga.

Para estimar a resistência ao cisalhamento nas nervuras e na região maciça, Soares utilizou as recomendações normativas propostas pelo ACI 318/02, CEB-FIP MC90, NBR 6118/03 e NBR 6118/78. A resistência última à flexão foi determinada pelo método das linhas de ruptura. A Tabela 7 apresenta uma comparação entre as cargas últimas obtidas experimentalmente (P_u) por Soares e as cargas últimas estimadas, correspondentes à ruptura por flexão (P_{flex}), ruptura por cisalhamento nas nervuras (V_u) e por punção (V_k) e os modos de ruptura observados.

Tabela 7 - Cargas últimas e modos de ruptura observados por Soares (2004)

Laje	P_u (kN)	P_{flex} (kN)	V_u (kN) (P_u/V_u) - ruptura por cisalhamento nas nervuras				V_k (kN) (P_u/V_k) - ruptura por punção				Modos de ruptura observados
			(P_u/P_{flex})	ACI	CEB	NBR 2003	NBR 1978	ACI	CEB	NBR 2003	
LR-1	239	172 (1,39)	62,4 (3,83)	48 (4,98)	68,8 (3,47)	59,2 (4,04)	229 (1,04)	206 (1,16)	208 (1,15)	146 (1,64)	F/C
LR-2	238	176 (1,35)	72 (3,31)	51,2 (4,65)	81,6 (3,20)	67,2 (3,54)	263 (0,90)	224 (1,06)	227 (1,05)	168 (1,42)	F/C
LD-1	278	176 (1,58)	88,5 (3,14)	56,5 (4,92)	102,5 (2,71)	83,4 (3,33)	347 (0,80)	252 (1,10)	255 (1,09)	221 (1,26)	F/C
LD-2	267	171 (1,56)	77,2 (3,46)	54,8 (4,87)	91,2 (2,93)	76,3 (3,50)	294 (0,91)	230 (1,16)	233 (1,15)	189 (1,42)	F (DPE)
LAC-1	268	181 (1,48)	406,4* (0,66)	340,8* (0,79)	262,4* (1,02)	243,4* (1,10)	302 (0,89)	244 (1,10)	247 (1,09)	192 (1,40)	F (DPE)
LAC-2	275	181 (1,52)	412,8* (0,67)	334,4* (0,82)	265,6* (1,04)	246,7* (1,11)	307 (0,90)	247 (1,11)	250 (1,10)	195 (1,41)	F/P
LAC-3	286	181 (1,58)	412,8* (0,69)	737,6* (0,39)	488* (0,59)	263* (1,09)	307 (0,93)	247 (1,16)	250 (1,14)	195 (1,47)	F/P
LAC-4	276	180 (1,53)	422,4* (0,65)	542,4* (0,51)	360* (0,77)	258,2* (1,07)	315 (0,88)	251 (1,10)	254 (1,09)	200 (1,38)	F/P

*ruptura por tração diagonal da nervura
F/C – flexão com escoamento da armadura / cisalhamento da nervura
F (DPE) – flexão (“ruptura” por deformação plástica excessiva)
F/P - flexão com escoamento da armadura / punção

Em relação à resistência ao cisalhamento nas nervuras, os resultados da Tabela 7 mostram que para as lajes de referência (sem armadura de cisalhamento) as normas se mostraram

conservadoras, apresentando resultados inferiores em média de 4 vezes os resultados experimentais. Para as lajes com armaduras de cisalhamento nas nervuras, verificou-se um aumento na resistência última, principalmente na laje com estribo aberto inclinado (LAC-3), confirmando a eficiência deste tipo de armadura. Entretanto esse ganho de resistência última ao cisalhamento foi penalizado devido à baixa taxa de armadura de flexão caracterizando, para todas as lajes, um comportamento típico de ruptura por flexão, pois todas as barras de aço instrumentadas escoaram atingindo o estado limite último de resistência à flexão.

Na interpretação dos resultados, Soares observou que para todas as lajes as fissuras radiais em torno do pilar surgiram primeiro em relação à fissuração circunferencial, tendendo a saírem do canto do pilar em direção ao bordo da laje. Nas nervuras, as fissuras dirigiam-se do bordo inferior da nervura junto ao maciço central e alcançavam a face inferior da capa, no bordo da laje.

Em relação às armaduras de cisalhamento utilizadas nas nervuras, Soares verificou que estas não proporcionaram ganhos significativos para a carga última, isso porque o estado limite último de resistência à flexão já havia sido atingido, em função das baixas taxas de armadura de flexão utilizadas nas lajes. Por outro lado, nos deslocamentos verticais, observou-se que para um mesmo valor de carga, as lajes com armadura de cisalhamento apresentaram uma redução média de 8% em relação às lajes de referência. Além de se mostrarem eficientes em relação ao modo de ruptura, pois mudaram a ruptura final de cisalhamento na nervura, para outro tipo de ruptura (flexão ou flexão e punção) nas lajes com esse tipo de armadura. Nota-se também que o uso de pinos e estribos aumentou a carga de início de escoamento da armadura de flexão (25% em média) em relação às lajes de referência.

Comparando-se as lajes LAC-1 e LAC-2, observa-se que as deformações registradas nos pinos com as cabeças para baixo (laje LAC-2) foram superiores às registradas nos pinos com as cabeças para cima (laje LAC-1). Observe-se, no entanto que as cargas últimas foram praticamente as mesmas (diferença de 2,6%), mas os mecanismos de ruptura verificados foram diferentes (Tabela 7).

Observou-se também que as deformações registradas nos estribos abertos da laje LAC-3 foram superiores aos dos estribos verticais fechados da laje LAC-4, e que esse aumento de solicitação nos estribos abertos deve ter refletido na carga última alcançada por esta laje, um pouco superior

(4%) à carga última alcançada pela laje LAC-4, nesse caso tendo sido observados os mesmos mecanismos de ruptura.

Ainda segundo Soares, o estribo inclinado e aberto mostrou-se mais eficiente em relação às demais armaduras de cisalhamento, devido a sua inclinação ser quase perpendicular à superfície de ruptura. A vantagem desse estribo é que ele pode ser feito no local e posicionado logo após o posicionamento da armadura de flexão.

Nas deformações no concreto, as mais significativas foram apresentadas nas direções tangenciais, e decresceram à medida que se aproximavam dos bordos das lajes, não sendo observada qualquer diferença de comportamento das deformações com a utilização de armaduras de cisalhamento nas nervuras.

2.4 Prescrições Normativas

Para estimar as resistências ao cisalhamento nas nervuras e à punção na região maciça em lajes lisas nervuradas, considerando-se o caso de pilar interno e centrado, foram utilizadas as prescrições de 3 normas, com o objetivo de comparar os resultados estimados com os resultados experimentais e discutir a precisão das expressões normativas para estas estimativas. As normas utilizadas neste trabalho são mostradas como segue.

- ACI 318/05, American Building Code Requirements for Reinforced Concrete. American Concrete Institute. (ACI, 2005);
- CEB-FIP, *Model Code 1990*. Comité Euro-Internacional du Béton. (CEB-FIP, 1993);
- NBR 6118, *Projeto de estruturas de Concreto*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (ABNT, 2003).

2.4.1 Dimensionamento de lajes ao cisalhamento

2.4.1.1 ACI 318/05

O dimensionamento de seções transversais sujeitas aos esforços cisalhantes é baseada na equação 2.5:

$$V_u \leq \phi \cdot V_n \quad (2.5)$$

onde V_u é a força de cisalhamento ponderada na seção considerada e V_n é força de cisalhamento nominal, dada pela equação 2.6. Para efeito de estudos em laboratório, o coeficiente ϕ é considerado unitário.

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.6)$$

onde V_c é a força de cisalhamento nominal fornecida pelo concreto e V_s é a força de cisalhamento nominal fornecida pela armadura de cisalhamento.

Para os casos de lajes de concreto armado sem armadura de cisalhamento, a parcela de resistência ao cisalhamento do concreto V_c , é o próprio esforço cortante correspondente à fissuração diagonal da peça, sendo determinado pela equação:

$$V_c = \left(\sqrt{f_c} + 120 \cdot \rho \cdot \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) \cdot \frac{b_w \cdot d}{7} \leq \frac{1}{3} \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.7)$$

onde:

f_c : resistência do concreto à compressão em MPa;

b_w : largura mínima ao longo da altura útil d em mm ;

d : altura útil da seção em mm;

$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d}$: taxa da armadura de flexão;

M_u : momento fletor último em N·mm.

A_s : armadura longitudinal em mm².

Para um cálculo mais simplificado, a norma sugere que, para elementos submetidos aos esforços cisalhantes, a resistência ao cisalhamento (V_c) seja calculada conforme a equação 2.8.

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.8)$$

A resistência ao cisalhamento da armadura transversal V_s , pode ser determinada por duas equações, sendo a primeira para o caso em que a armadura de cisalhamento é perpendicular ao plano da laje e outra quando estribos inclinados são usados como armadura de cisalhamento.

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \leq \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.9)$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d \cdot (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha)}{s} \leq \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.10)$$

sendo:

f_y : resistência do aço à tração não maior que 414 MPa;

s : espaçamento entre estribos em mm;

A_v : área da armadura transversal em mm²;

α : ângulo de inclinação da armadura transversal em grau.

2.4.1.2 CEB-FIP MC90

De acordo com o CEB-FIP MC90, as lajes sem armadura de cisalhamento devem ser verificadas obedecendo ao seguinte critério de resistência:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (2.11)$$

Sendo a resistência ao cisalhamento V_{Rd1} dada pela equação 2.12:

$$V_{Rd1} = 0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2.12)$$

onde:

$\xi = 1 + \sqrt{200/d}$, com d em mm;

$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d}$: taxa da armadura de flexão;

b_w : largura mínima em mm, ao longo da altura útil d ;

d : altura útil da seção em mm;

A_s : armadura longitudinal em mm².

A resistência à compressão do concreto (f_{ck}) deve ser limitada a 50 MPa.

A força de cisalhamento que causa fissura pode ser estimada pela equação 2.13

$$V_{Rd} = 0,15 \cdot \left(\frac{3 \cdot d}{a} \right)^{1/3} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2.13)$$

onde a é a distância do apoio ao ponto de aplicação de carga.

Para as lajes armadas ao cisalhamento, o MC90 propõe o dimensionamento ao esforço cortante nas nervuras como viga, através do modelo da treliça generalizada, onde a inclinação das diagonais comprimidas da treliça (θ) assume valores entre 18,4° e 45°.

A verificação das diagonais comprimidas do concreto é feita através da força solicitante atuante na diagonal comprimida e da força resistente à compressão, que deverá ser maior ou igual a solicitante, e são determinadas pelas equações 2.14 e 2.15, respectivamente:

$$F_{scw} = \frac{V_d}{\text{sen}\theta} \cdot \left(\frac{\text{cotg}\theta}{\text{cotg}\theta + \text{cotg}\alpha} \right) \quad (2.14)$$

$$F_{rcw} = f_{cdi} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos\theta \quad (2.15)$$

onde V_d é o esforço cortante de cálculo, z é o braço de alavanca e f_{cdi} : tensão média considerada para zonas submetidas ao esforço cortante uniaxial de compressão, sendo determinada de acordo com as equações 2.16 e 2.17 para regiões não fissuradas e regiões fissuradas, respectivamente:

$$f_{cd1} = 0,85 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \cdot f_{cd} \quad (2.16)$$

$$f_{cd2} = 0,60 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \cdot f_{cd} \quad (2.17)$$

A verificação das diagonais tracionadas constituídas pela armadura transversal é feita através da força solicitante atuante e da força resistente de tração, sendo determinadas pelas equações 2.18 e 2.19, respectivamente:

$$F_{stw} = \frac{V_d}{\text{sen } \alpha} \quad (2.18)$$

$$F_{rtw} = \left[\frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{s} \right] \cdot z \cdot (\cotg \theta + \cotg \alpha) \quad (2.19)$$

2.4.1.3 NBR 6118

As lajes nervuradas podem ser calculadas de acordo com as prescrições da NBR 6118, referentes a lajes maciças ou vigas. Alguns anos atrás, a versão antiga da atual norma dispensava a colocação de armadura transversal (estribos) quando da verificação das nervuras ao cisalhamento, desde que a distância entre as nervuras não fosse superior a 500 mm e quando as alvenarias não se apoiavam sobre as lajes. Atualmente, quando se empregam lajes de grandes vãos, que suportam diretamente paredes de alvenaria, esta restrição não é suficiente para se dispensar a armadura de cisalhamento e necessita de um tratamento diferenciado daquele estabelecido há alguns anos.

De acordo com a NBR 6118, as nervuras em lajes nervuradas com espaçamento menor que 600 mm podem ser verificadas como lajes e para que se possa dispensar o uso de armadura transversal para resistir aos esforços cortantes, a desigualdade abaixo deve ser verificada:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (2.20)$$

A força cortante resistente de cálculo ao cisalhamento é dada pela equação 2.21:

$$V_{Rd1} = \left[\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (2.21)$$

onde:

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd};$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c;$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02; \quad \tau_{Rd} = 0,25 \cdot \frac{0,21 \cdot f_c^{2/3}}{\gamma_c}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c}$$

k = coeficiente que pode assumir os seguintes valores:

$k = 1$, para elementos onde 50% da armadura inferior não chega ao apoio, ou

$k = 1,6 - d > 1$, para os demais casos, com d em metros;

f_{ctd} : resistência de cálculo do concreto ao cisalhamento;

A_{s1} : área da armadura de tração;

b_w : largura mínima da seção ao longo da altura útil d ;

N_{sd} : força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento (compressão positiva);

d : altura útil da seção (distância entre a borda comprimida e o centro de gravidade da armadura de tração).

Nos elementos sem armadura de cisalhamento, a resistência de cálculo para a verificação da compressão diagonal do concreto é dada por:

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v1} \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d \quad (2.22)$$

onde:

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas do concreto;

$$\alpha_{v1} = \left(0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \right) \leq 0,5.$$

Para os casos em que a NBR 6118 não dispensa a verificação do cisalhamento nas lajes nervuradas, o cisalhamento nas nervuras deve ser tratado de acordo com as prescrições estabelecidas para elementos lineares (vigas) sujeitos ao esforço cortante.

A NBR 6118 pressupõe para elementos lineares submetidos à força cortante, a analogia com modelo de treliça, associado à mecanismos resistentes complementares desenvolvidos no interior do elemento estrutural.

A verificação deve garantir simultaneamente as condições:

Integridade das diagonais comprimidas de concreto ($V_{sd} < V_{Rd2}$);

Integridade das diagonais tracionadas ($V_{sd} < V_{Rd3}$), composta pela parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao da treliça (V_c) e pela parcela resistida pela armadura transversal (V_{sw}), ou seja, $V_{sd} < V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$.

As forças cortantes resistentes V_{Rd2} e V_{Rd3} podem ser obtidas por dois modelos:

Modelo de cálculo I: adota o modelo da treliça clássica, com bielas comprimidas a 45° , e a parcela de força cortante resistida pelos mecanismos complementares da treliça (V_c) é tomada constante;

Modelo de cálculo II: adota o modelo de treliça generalizada, com bielas comprimidas variando entre 30° e 45° , e a parcela de força cortante resistida pelos mecanismos complementares da treliça (V_c) sofrendo redução com o aumento de V_{sd} .

a. Modelo de cálculo I

a.1. Verificação das diagonais comprimidas

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (2.23)$$

onde:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \text{ (com } f_{ck} \text{ em MPa)}$$

a.2. Verificação das diagonais tracionadas

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (2.24)$$

onde:

$V_c = 0$, nos elementos estruturais tracionados, em que a linha neutra fica fora da seção;

$V_c = V_{c0}$, na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = V_{c0} \cdot (1 + M_0/M_{sd,max}) \leq 2 \cdot V_{c0}$, na flexo-compressão;

M_0 : é o valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão provocada pelas forças normais na borda da seção tracionada por $M_{sd,max}$;

$M_{sd,max}$: é o momento fletor de cálculo, que pode ser considerado como o de maior valor do semitramo considerado.

Sendo V_{c0} e V_{sw} , obtidos através das equações 2.25 e 2.26, respectivamente:

$$V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (2.25)$$

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{S} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen} \alpha + \cos \alpha) \quad (2.26)$$

Substituindo as equações 2.25 e 2.26 em 2.24, tem-se a capacidade resistente da diagonal tracionada:

$$V_{Rd3} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d + \left(\frac{A_{sw}}{S} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen} \alpha + \cos \alpha) \quad (2.27)$$

onde:

α : ângulo de inclinação das bielas tracionadas (armadura transversal);

f_{ywd} : tensão na armadura transversal, limitada ao valor f_{yd} no caso de estribos e a 70% desse valor no caso de barras dobradas, limitando estes valores a 435 MPa;

S : é a projeção horizontal do espaçamento entre barras transversais.

b. Modelo de cálculo II

b.1. Verificação das diagonais comprimidas

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot (\cotg \theta + \cotg \alpha) \quad (2.28)$$

onde:

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (\text{com } f_{ck} \text{ em MPa})$$

b.2. Verificação das diagonais tracionadas

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (2.29)$$

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{S} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cotg \theta + \cotg \alpha) \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.30)$$

Para as diferentes situações de esforços solicitantes na seção, a parcela V_c assume, então, os valores:

$V_c = 0$, nos elementos estruturais tracionados, em que a linha neutra fica fora da seção;

$V_c = V_{c1}$, na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = V_{c1} \cdot (1 + M_0/M_{sd, \max}) \leq 2 \cdot V_{c1}$, na flexo-compressão, sendo:

$V_{c1} = V_{c0}$, quando $V_{Sd} \leq V_{c0}$, ou

$V_{c1} = 0$, quando $V_{Sd} = V_{Rd2}$

É prescrita a interpolação linear para valores intermediários.

2.4.2 Dimensionamento de lajes ao puncionamento

2.4.2.1 ACI 318

A verificação da resistência à punção em lajes apoiadas em todos os bordos e sem armadura de cisalhamento, com a seção crítica b_o distante não menos que $d/2$ das faces do pilar, é feita através das equações 2.31 a 2.33, sendo considerado o menor valor obtido entre as 3 equações, ou seja, situação mais desfavorável.

$$V_c = \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{6} \cdot b_o \cdot d \quad (2.31)$$

$$V_c = \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_o} + 2\right) \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{12} \cdot b_o \cdot d \quad (2.32)$$

$$V_c = \frac{\sqrt{f_c}}{3} \cdot b_o \cdot d \quad (2.33)$$

onde:

f_c : resistência à compressão do concreto em MPa;

β_c : razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;

$b_o = 2 \cdot (a + b) + 4 \cdot d$: perímetro de controle em mm;

d : altura útil em mm;

$\alpha_s = 3,32$ para pilar interno.

O perímetro de controle para verificação da resistência à punção, segundo o ACI 318 é mostrado na Figura 22.

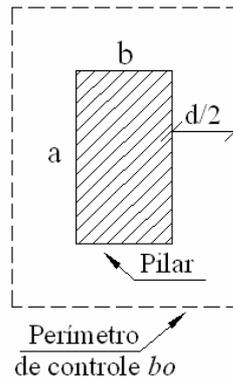


Figura 22 - Perímetro de controle de acordo com o ACI 318

Para as lajes com armadura de cisalhamento, a resistência à punção é dada pela contribuição do concreto somada à contribuição da armadura de cisalhamento, como mostra as equações 2.34 e 2.35.

$$V_c \leq \frac{\sqrt{f_c}}{6} \cdot b_o \cdot d \quad (2.34)$$

$$V_s = \frac{A_{sv} \cdot f_{yv} \cdot d}{s} \quad (2.35)$$

Para os casos em que a armadura de cisalhamento for composta por estribos inclinados, a parcela contribuinte desta armadura é dada por:

$$V_s = \frac{A_{sv} \cdot f_{yv} \cdot (\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha) \cdot d}{s} \quad (2.36)$$

onde:

A_{sv} : área da armadura de cisalhamento, em mm²;

s : espaçamento da armadura de cisalhamento, em mm;

f_{yv} : tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, não maior que 414 MPa;

α : ângulo de inclinação dos estribos.

A soma da contribuição do concreto e da armadura de cisalhamento não deve ser maior que

$$\frac{\sqrt{f_c}}{2} \cdot b_o \cdot d \text{ ou } \frac{\sqrt{f_c}}{3} \cdot b_o \cdot d \text{ (fora da região com armadura de cisalhamento).}$$

A Figura 23 mostra o perímetro de controle para verificação fora da região com armadura de cisalhamento, afastado de $d/2$ da última camada de estribos, sendo que, o espaçamento radial entre as barras da armadura de cisalhamento, não deve ser superior a $d/2$.

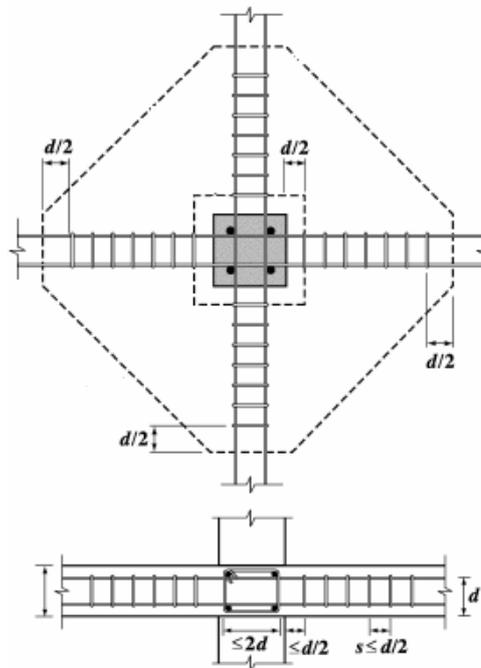


Figura 23 - Perímetro de controle para verificação da punção fora da região com armadura de cisalhamento de acordo com o ACI 318

2.4.2.2 CEB-FIP MC90

A verificação da resistência ao cisalhamento é feita em termos de tensões cisalhantes, atuantes ao longo de um perímetro de controle, distante $2 \cdot d$ da face do pilar ou área carregada, conforme mostra a Figura 24.

A altura útil d da laje é dada constante e pode ser determinada pela equação:

$$d_{ef} = \frac{(d_x + d_y)}{2} \quad (2.37)$$

onde d_x e d_y são as alturas úteis das armaduras nas duas direções ortogonais.

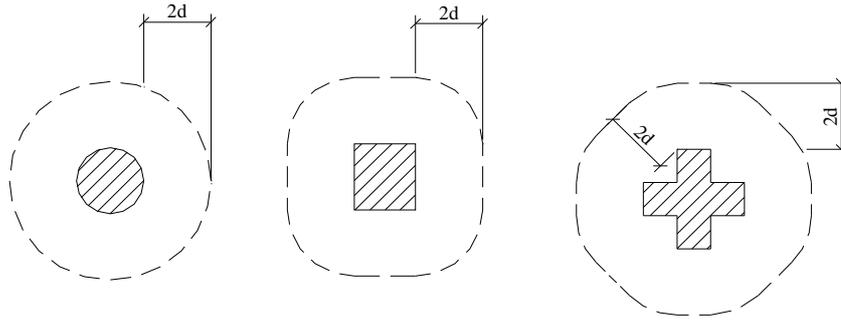


Figura 24 - Perímetro de controle em pilares internos

Para o caso em que a carga concentrada for distribuída de maneira simétrica, a tensão de cisalhamento aplicada no perímetro de controle é determinada pela equação 2.38:

$$\tau_{Sd} = \frac{P_{Sd}}{u_1 \cdot d} \quad (2.38)$$

onde:

P_{Sd} : carga concentrada aplicada à laje em N;

u_1 : comprimento do perímetro de controle em mm.

A resistência ao cisalhamento em lajes de concreto armado sem armadura de punção, é dada pela equação 2.39.

$$\tau_{Rd} = 0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \quad (2.39)$$

onde:

$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$, com d em mm;

f_{ck} : resistência característica do concreto, limitada a 50 MPa.

A taxa de armadura de flexão (ρ) pode ser calculada por $\sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$, onde ρ_x e ρ_y são as taxas de armaduras em direções ortogonais.

A verificação da resistência à punção em lajes com armadura de cisalhamento, é feita em 3 regiões:

a. Região adjacente à área carregada:

$$P_{sd} \leq u_o \cdot d \cdot (0,5 \cdot f_{cd2}) \quad (2.40)$$

onde:

$$f_{cd2} = 0,60 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) \cdot f_c ;$$

u_o : perímetro crítico (ao redor do pilar).

b. Região com armadura de cisalhamento:

$$P_{sd} \leq 0,09 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot u_1 \cdot d + 1,5 \cdot \left(\frac{d}{S_r}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.41)$$

onde:

S_r : espaçamento radial entre as armaduras de cisalhamento, não sendo maior que $0,75 \cdot d$;

A_{sw} : área de armadura de cisalhamento ao redor do pilar por camada;

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

u_1 : perímetro crítico distante $2 \cdot d$ da face do pilar em mm;

f_{ywd} : resistência de cálculo da armadura de punção, não maior que 300 MPa.

c. Região fora da armadura de cisalhamento:

$$P_{sd} \leq 0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot u_{n,ef} \cdot d \quad (2.42)$$

sendo:

$u_{n,ef}$: comprimento efetivo de um perímetro crítico construído a uma distância $2 \cdot d$ da última camada de armadura de cisalhamento, a qual pode ser distribuída radialmente ou em cruz (Figura 25).

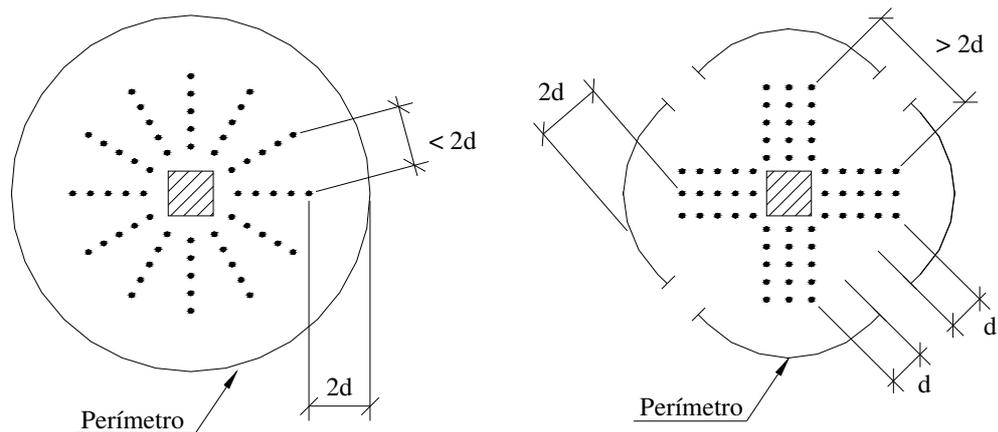


Figura 25 - Perímetro de controle ($u_{n.ef}$) afastado do último elemento da armadura de cisalhamento

2.4.2.3 NBR 6118

O dimensionamento de lajes ao puncionamento, de acordo com a NBR 6118, é baseado no método da superfície de controle, ou seja, através da tensão de cisalhamento atuante na superfície a considerar. A NBR 6118 sugere que a verificação seja feita em 3 superfícies críticas definidas no entorno de forças concentradas. Na primeira superfície crítica (contorno C) definida pelo pilar ou carga concentrada deve ser verificada a tensão de compressão diagonal do concreto; na segunda superfície crítica afastada $2 \cdot d$ do pilar ou área carregada, (contorno C') a verificação deve ser feita através capacidade da ligação à punção, associada à resistência à tração diagonal e ; na terceira superfície crítica, utilizada quando for necessário colocar armadura transversal, sendo afastada $2 \cdot d$ da última camada da armadura transversal (contorno C''). A Figura 26 mostra os perímetros críticos propostos pela norma para carregamento simétrico.

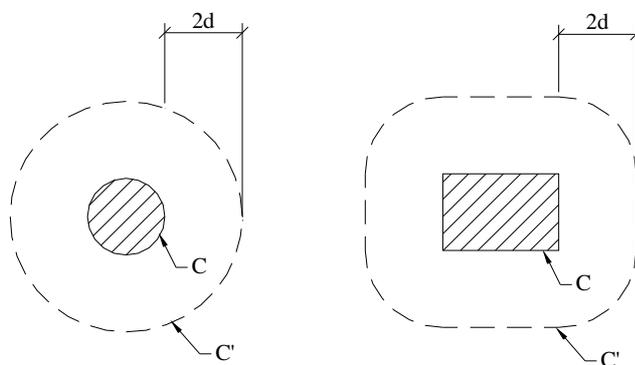


Figura 26 - Perímetro crítico em pilares internos

De acordo com a Figura 26, para pilar interno e efeito de carregamento considerado simétrico, a tensão solicitante é dada pela equação 2.43.

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} \quad (2.43)$$

onde:

F_{sd} : força ou reação concentrada de cálculo em N;

u : perímetro de crítico em mm;

d : altura útil ao longo do contorno crítico em mm.

A verificação da tensão de cisalhamento resistente deve ser feita de acordo com o perímetro crítico considerado, sendo que em todas as situações a tensão resistente de cálculo (τ_{Rd}) deve ser maior que a tensão solicitante (τ_{sd}).

- a. Verificação da tensão resistente de compressão diagonal do concreto (τ_{Rd2}) no contorno C, em lajes submetidas à punção, com ou sem armadura:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \quad (2.44)$$

onde:

$$\alpha_v = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right), f_{ck} \text{ em MPa};$$

τ_{sd} é dada pela equação 2.43, onde $u=u_o$ (perímetro do contorno C).

- b. Verificação da tensão resistente (τ_{Rd1}) no contorno C'' (região fora da armadura de punção):

$$\tau_{Rd1} = 0,13 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \quad (2.45)$$

onde:

d : altura útil em mm;

ρ : taxa geométrica de armadura de flexão.

Neste caso o perímetro crítico (u') utilizado deverá ser distante $2 \cdot d$ da última camada da armadura de punção, conforme a Figura 27.

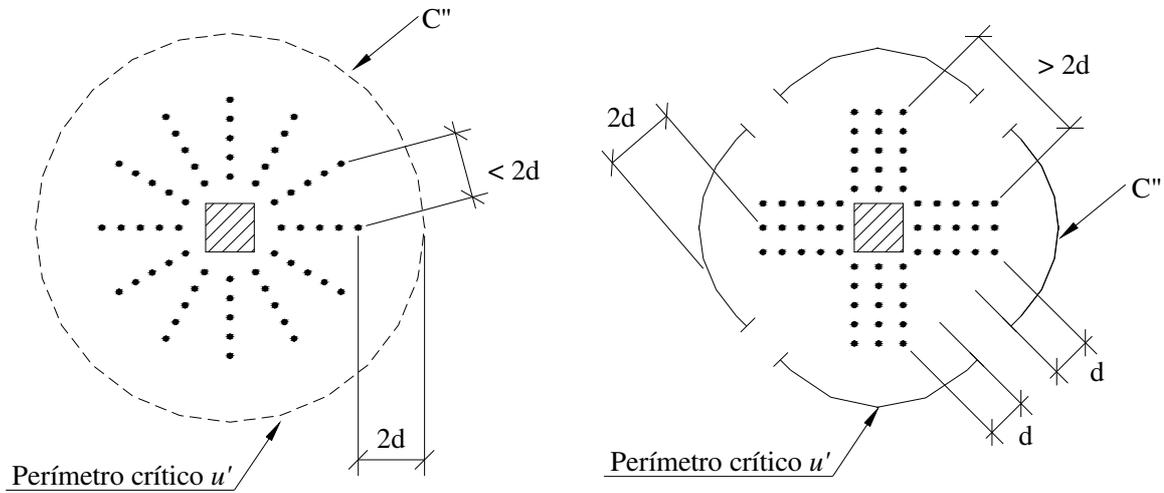


Figura 27 - Perímetro crítico afastado do último elemento da armadura de punção

c. Verificação da tensão resistente (τ_{Rd3}) no contorno C' (região com armadura de punção):

$$\tau_{Rd3} = 0,10 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} + 1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha}{u \cdot d} \quad (2.45)$$

onde:

S_r : espaçamento radial entre as armaduras de punção, não maior que $0,75 \cdot d$;

A_{sw} : área de armadura de punção num contorno completo paralelo a C' ;

α : ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de punção e o plano da laje;

u : perímetro crítico C' , distante $2 \cdot d$ da face do pilar;

f_{ywd} : resistência de cálculo da armadura de punção, não maior que 300 MPa para conectores ou 250 MPa para estribos (aços CA-50 e CA-60).

2.5 Resistência à flexão

Na estimativa para resistência à flexão foi utilizada a Teoria das Linhas de Ruptura, desenvolvida por K. W. Johansen (1943). De acordo com Souza e Cunha (1998), esta teoria baseia-se na hipótese de que, na iminência da ruptura da laje, formam-se linhas ruptura nas regiões de momento máximo e que ao longo destas linhas atuam momentos de ruptura de

intensidade constante. Por ser um método que permite dimensionar lajes de diversas formas, condições de apoio e carregamentos, tem grande divulgação e utilização em pesquisas científicas. A Figura 28 mostra a configuração das linhas de ruptura adotada nesta pesquisa.

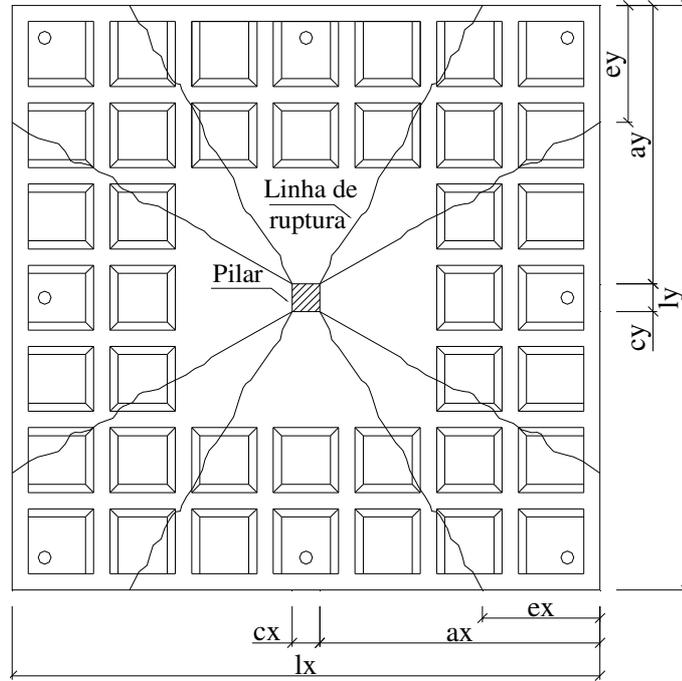


Figura 28 - Configuração das linhas de ruptura adotada

As equações utilizadas para determinação do momento fletor último e carga última à flexão foram as mesmas utilizadas por Oliveira (2003) para a configuração das linhas de ruptura indicadas na Figura 28

$$m_u = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \rho \cdot \frac{f_{ys}}{f_c} \right) \quad (2.46)$$

$$P_{flex} = 2 \cdot m_u \cdot \left\{ \frac{l_x}{a_x} + \frac{l_y}{a_y} - 2 \cdot \left(\frac{a_y}{a_x} \cdot f_x + \frac{a_x}{a_y} \cdot f_y \right) \right\} \quad (2.47)$$

onde:

$$f_x = \frac{e_y}{a_y} \cdot \frac{\frac{e_x}{a_x} \cdot \left(\frac{a_y}{e_y} - 1 \right)}{1 + \frac{e_x}{a_x} \cdot \left(\frac{a_y}{e_y} - 1 \right)} \quad f_y = \frac{e_x}{a_x} \cdot \frac{\frac{e_y}{a_y} \cdot \left(\frac{a_x}{e_x} - 1 \right)}{1 + \frac{e_y}{a_y} \cdot \left(\frac{a_x}{e_x} - 1 \right)} \quad (2.48)$$

Entretanto, em Dias (2003) foi verificado que na análise de lajes nervuradas convencionais ou lisas sob flexão, a placa enrijecida por nervuras era convertida em uma placa maciça, considerando a inércia da seção “T” para a obtenção de uma espessura equivalente de laje maciça constante. Em Langendonck (1970) também foi verificado que todos os estudos apresentados para as mais diversas configurações das linhas de ruptura eram referentes ao comportamento de lajes maciças. Dessa forma, optou-se por utilizar os conceitos de altura equivalente adotados por Dias (2003) para substituição da altura da laje nervurada por uma altura de laje maciça de rigidez equivalente. A altura equivalente da laje é determinada através da equação 2.49, onde se considera a equivalência do momento de inércia à flexão.

$$h_{eq} = \left(\frac{12 \cdot I}{a_l} \right)^{1/3} \quad (2.48)$$

onde:

h_{eq} : espessura da laje maciça equivalente;

I: momento de inércia à flexão da seção transversal “T” em relação ao eixo baricêntrico horizontal;

a_l : distância entre os eixos das nervuras.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Em estruturas com lajes lisas nervuradas cujos pilares são espaçados de modo regular, com vãos de mesma ordem de grandeza nas duas direções, submetidas a carregamento centrado, ocorre uma distribuição balanceada de momentos fletores, sendo a ligação laje-pilar, geralmente, o ponto crítico desses esforços. Segundo Leonhard e Mönning (1978) as forças cortantes aumentam hiperbolicamente em direção ao pilar de modo que os valores máximos ocorrem na região onde os momentos negativos também são máximos. Dessa forma, a região maciça em torno do pilar, presente em lajes lisas nervuradas, deve abranger a região onde ocorrem as altas tensões de cisalhamento. A Figura 29 apresenta um pavimento simétrico de um edifício em laje lisa nervurada e a Figura 30 mostra os diagramas dos esforços cortantes e momentos balanceados em torno do pilar interno (região de estudo desta pesquisa).



Figura 29 -Pavimento em laje lisa nervurada (www.atex.com.br)

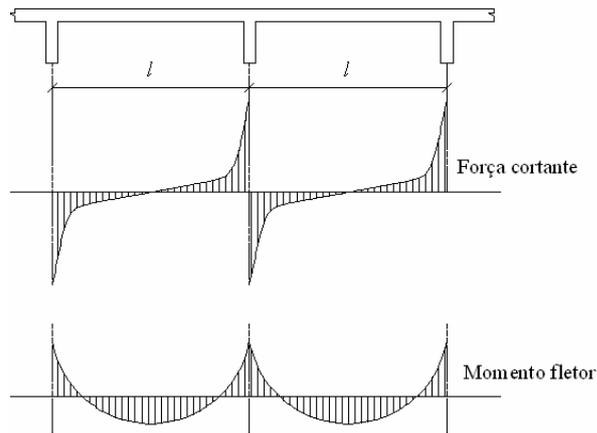


Figura 30 - Força cortante e momento fletor em uma laje lisa (adaptado de Leonhardt e Mönning, 1978)

Ainda segundo Leonhardt e Mönning (1978), o ponto de momento nulo situa-se sobre uma circunferência em torno do centro do pilar, com um raio igual a $0,22 \cdot l$, onde l é o vão dos painéis quadrados adjacentes ao pilar, conforme a Figura 31. Neste caso, para efeito de estudos sobre cisalhamento, torna-se suficiente a utilização de “elementos de lajes” nos ensaios de laboratório, com dimensões que representem a região de momento negativo ao redor do pilar e delimitados por pontos de momentos nulos. Além disso, esses elementos apresentam vantagens como simplicidade, facilidade e economia para o ensaio, quando comparados aos ensaios de painéis completos.

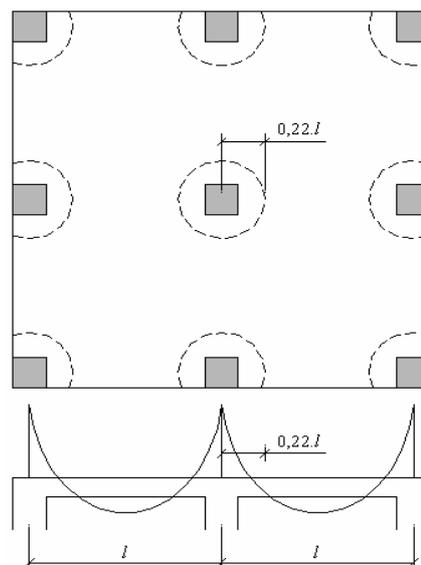


Figura 31 - Pontos de momento nulo

Dessa forma, nesta pesquisa, optou por utilizar elementos de lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto armado submetidos a carregamento simétrico, que representem a região da ligação laje-pilar interior do pavimento, equivalente a uma laje com vão de aproximadamente 4 m.

3.2 Características das lajes ensaiadas

Foram realizados ensaios em 8 lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto armado, com carregamento aplicado no meio do vão através de uma placa metálica, simulando a ligação laje-pilar, situação crítica em lajes lisas. As principais variáveis consideradas foram o tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras (treliça, estribo vertical fechado e estribo inclinado a 45°) e a utilização de estribo inclinado a 45° como armadura de punção na região maciça.

As medidas idealizadas para as lajes foram tomadas a partir da análise do trabalho de Soares (2004), de maneira a serem obtidas dimensões julgadas adequadas ao manuseio e ensaio de laboratório. As lajes apresentaram seção quadrada de lado igual a 1.800 mm de comprimento e altura total de 140 mm, sendo 60 mm de capeamento. A altura útil foi determinada através da média dos centros de gravidade das armaduras de flexão por metro de laje em cada direção (descrito no Apêndice B), obtendo-se o valor de 111 mm, ocorrendo variações devido ao processo de montagem e posicionamento das armaduras nas formas. A Figura 32 mostra as dimensões das lajes e a Tabela 8 apresenta algumas características das lajes ensaiadas.

A seção transversal das lajes foi formada por nervuras de 50 mm de largura na base menor e 100 mm na base maior. Os vazios entre as nervuras foram preenchidos com blocos de EPS em formato piramidal de base quadrada, cujo lado da base maior apresentava 200 mm de comprimento para todos os blocos e lado da base menor 150 mm e 175 mm de comprimento para os blocos internos e externos, respectivamente e altura de 80 mm (Figura 33). Esse formato dos blocos de EPS foi obtido com auxílio de um cortador de EPS tipo fio quente, confeccionado no próprio Laboratório de Engenharia Civil, sendo também utilizada uma estrutura de apoio para garantir a angulação desejada das arestas laterais do bloco, como mostra a Figura 34.

Tabela 8 - Principais características das lajes ensaiadas

Laje	d (mm)	Arm. flexão ρ (%)	f_c (MPa)	Arm. de cisalhamento	
				Nervuras	Punção
L1	120	1,27	36,6	-	-
L2	106	1,44	37,8	Treliça	-
L3	111	1,37	41,4	Treliça	-
L4	118	1,29	39,2	Treliça	-
L5	115	1,33	37,9	Estribo vertical fechado	-
L6	104	1,47	39,8	Treliça	Estribo aberto inclinado
L7	112	1,36	40,9	Estribo vertical fechado	Estribo aberto inclinado
L8	108	1,41	39,0	Estribo aberto inclinado	Estribo aberto inclinado

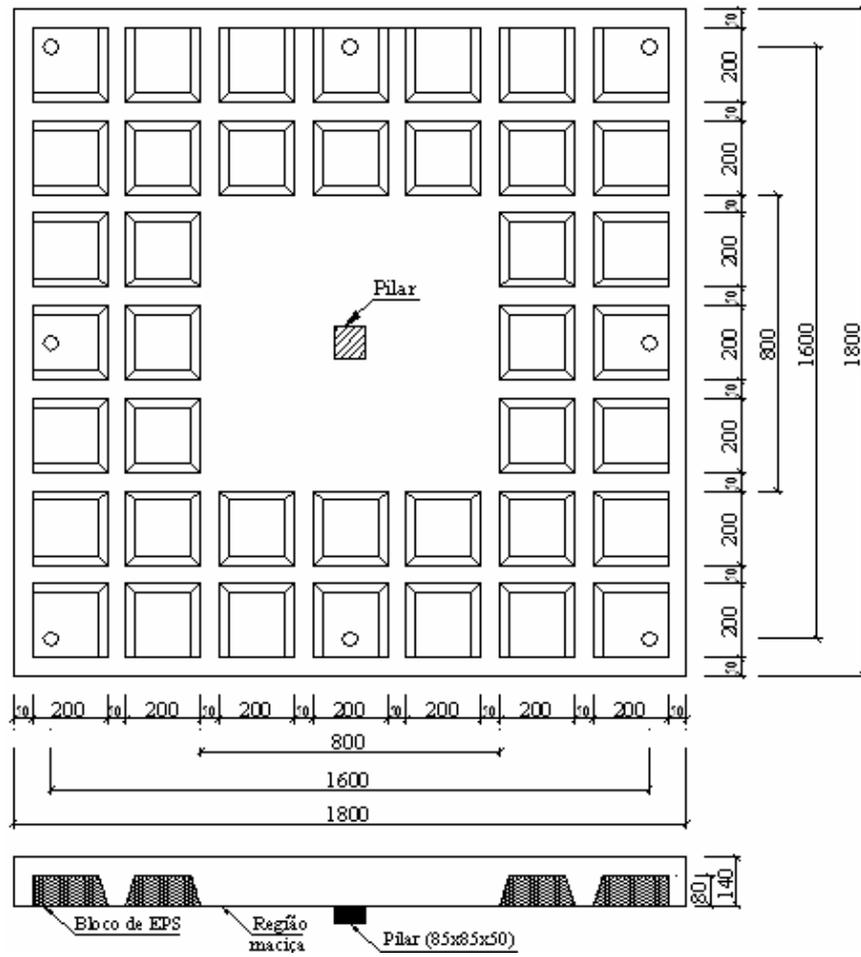


Figura 32 - Dimensões das lajes ensaiadas

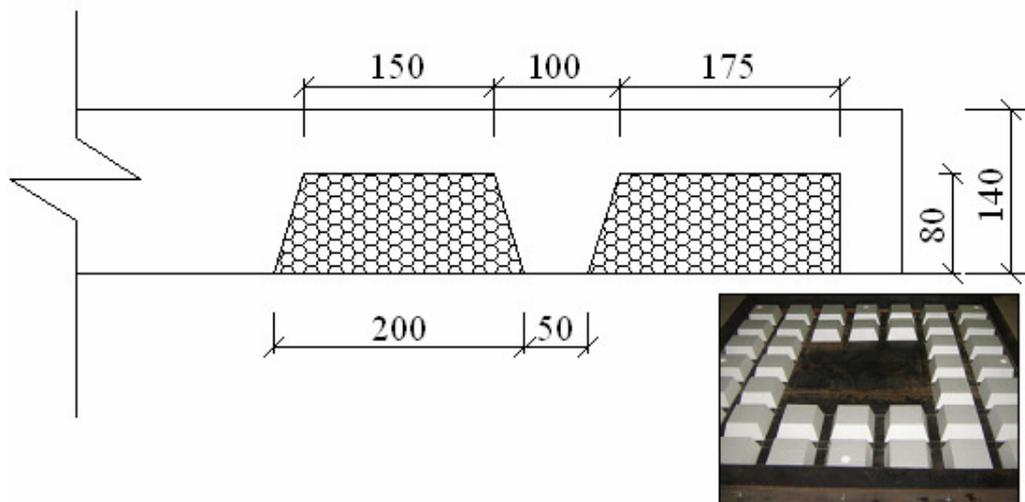


Figura 33 - Seção transversal das lajes



Figura 34 - Cortador de EPS tipo fio quente

3.3 Armadura

3.3.1 Armadura de flexão

A armadura de flexão principal posicionada na parte superior das lajes foi constituída por 6 barras de 6,0 mm e 21 barras 12,5 mm de diâmetro na direção x e 21 barras de 12,5 mm de diâmetro na direção y, proporcionando uma taxa de armadura de flexão em torno de 1,4%. A diferença entre as armaduras nas direções x e y se deve ao fato de que em algumas lajes constituídas por treliça nas nervuras (ver item 3.3.2) o banzo superior da treliça funciona como armadura de flexão. Dessa forma, optou-se por utilizar as barras de 6,0 mm de diâmetro nas lajes que não fossem constituídas por treliça, para que todas as lajes apresentassem a mesma taxa de armadura de flexão. Para garantir a ancoragem das barras sujeitas à tração, estas foram dobradas formando um ângulo de 90° com a superfície da laje, respeitando o cobrimento adotado de 10 mm para a faces inferior e 15 mm para a face superior.

Na parte inferior das lajes foram dispostas armaduras de distribuição posicionadas nas duas direções principais (x e y), compostas por 12 barras de 4,2 mm de diâmetro em cada direção, sendo dispostas 2 barras por nervura. As Figuras 35 e 36 mostram o detalhamento das armaduras superior e inferior, respectivamente e a Figura 37 mostra o posicionamento das armaduras em uma das lajes (L1), no momento antes da concretagem.

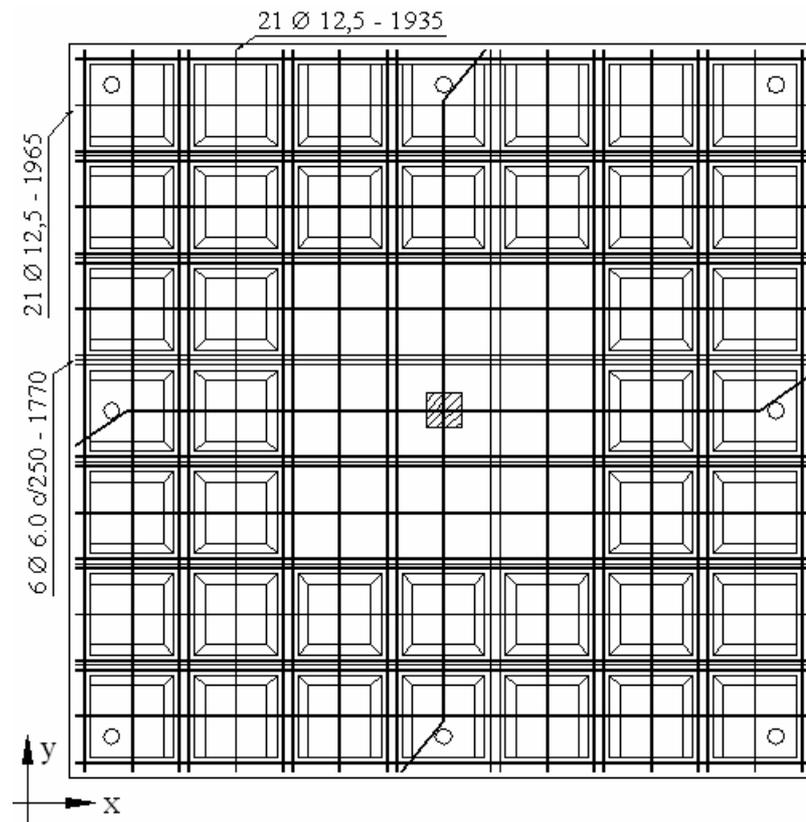


Figura 35 - Detalhamento da armadura superior

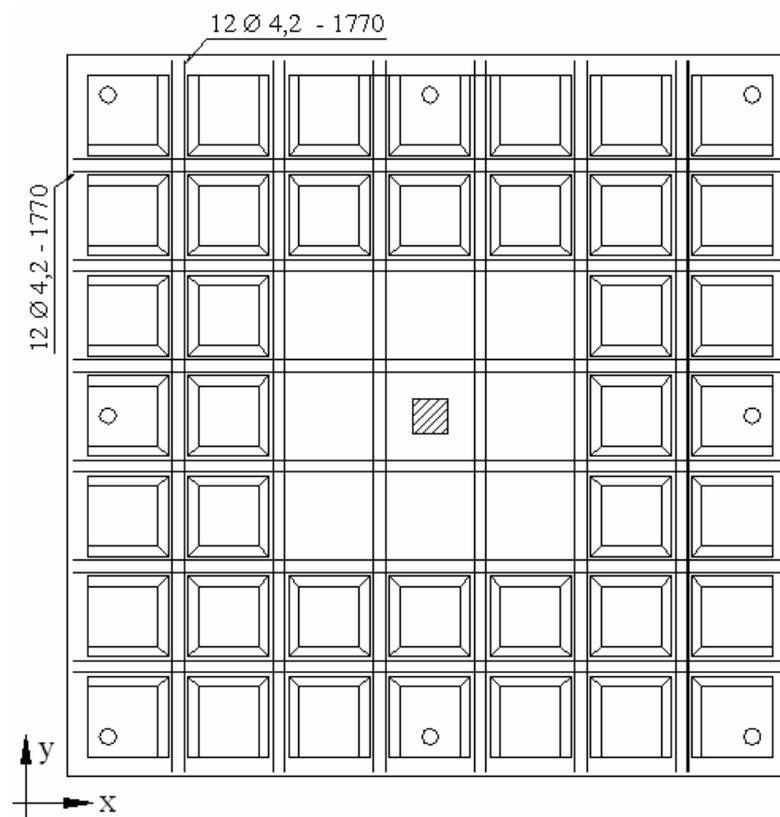


Figura 36 - Detalhamento da armadura inferior



Figura 37 - Posicionamento das armaduras da laje L1 na forma

3.3.2 Armadura de cisalhamento

Foram utilizados 3 tipos de armadura de cisalhamento nas nervuras. Na direção x, as armaduras foram constituídas por treliça (L2, L3, L4 e L6), estribo vertical fechado (L5 e L7) e estribo aberto inclinado a 45° (L8) e, na direção y, por estribo vertical fechado (L2, L3, L4, L5, L6 e L7) e estribo aberto inclinado a 45° (L8).

Nas nervuras constituídas por armação treliçada, utilizou-se a treliça do tipo TR 8644, cujas características são 80 mm de altura, diâmetro do banzo superior de 6,0 mm e diâmetros da diagonal e banzo inferior de 4,2 mm e passo (espaçamento entre eixos dos nós) de 200 mm, conforme mostrado na Figura 38. As treliças foram posicionadas internamente à armadura de flexão superior, com o banzo superior funcionando como parte da armadura de flexão e o banzo inferior como armadura de distribuição, apresentadas no item 3.3.1. A Figura 39 mostra o posicionamento da treliça na nervura em relação à armadura de flexão e um detalhe deste posicionamento.

Ao escolher treliça como armadura de cisalhamento, pretendeu-se investigar a contribuição das diagonais no combate aos esforços cisalhantes, de maneira a elucidar esta questão, visto que alguns autores consideram irrelevante a capacidade resistente das diagonais das treliças enquanto que outros as consideram com desempenho satisfatório.

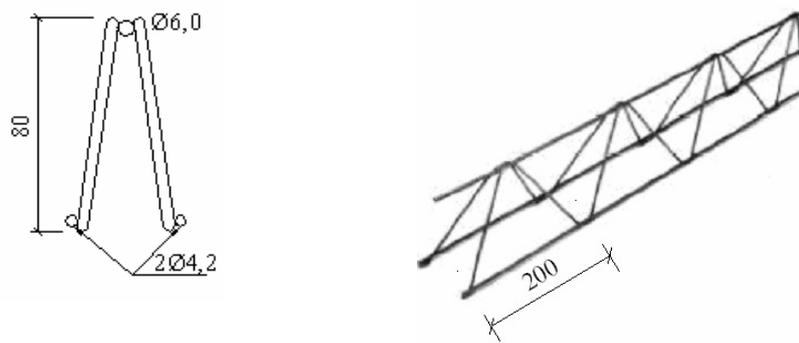


Figura 38 - Detalhe da armação treliçada – TR8644 (unidades em mm)

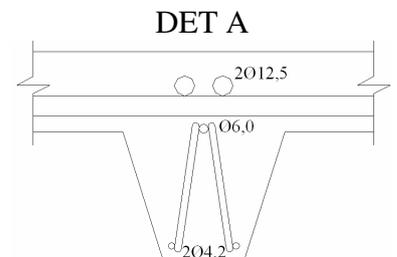
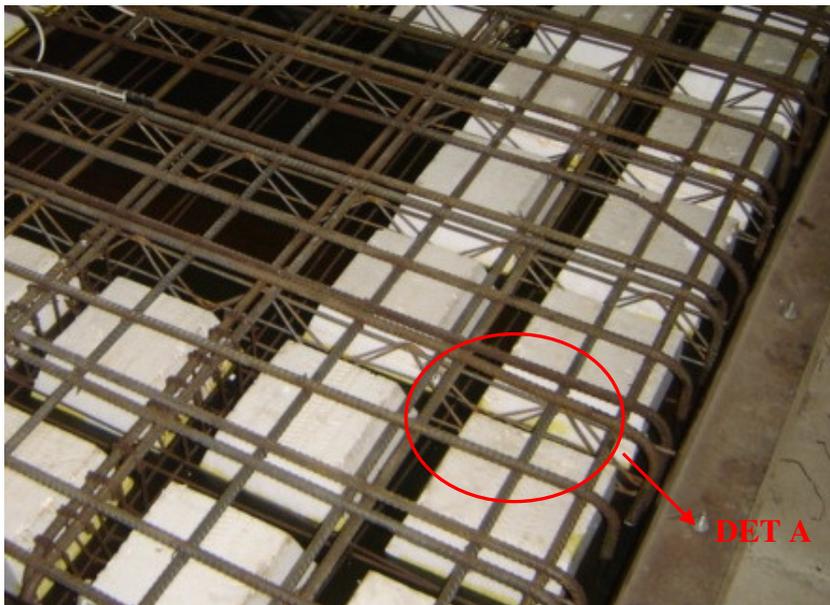


Figura 39 - Posicionamento das treliças nas nervuras

Os estribos utilizados nas nervuras, tanto os verticais fechados quanto os abertos inclinados a 45°, foram confeccionados com aço de diâmetro 4,2 mm. Os estribos verticais fechados foram dispostos em 9 camadas por nervura, espaçados de 50 mm e posicionados envolvendo as barras da armadura de flexão superior e inferior. Enquanto os estribos abertos inclinados a 45° envolveram apenas a armadura de flexão superior, sendo a parte inferior do estribo posicionada no mesmo nível da armadura de distribuição, e apresentaram espaçamento de 97 mm, totalizando 5 estribos por nervura. Em função da diferença da área de aço entre os estribos vertical e inclinado, tornou-se necessário fazer uma equivalência de área de aço por nervura, para se obter a mesma taxa de armadura de cisalhamento, razão pela qual o espaçamento do estribo inclinado foi aproximadamente o dobro do estribo vertical. Essa equivalência não foi estabelecida entre os estribos e a armadura treliçada, devido ao espaçamento das diagonais da treliça ser fixo, ocasionando uma taxa de armadura 1,2 vezes menor que a taxa do estribos . As Figuras 40 e 41

mostram o posicionamento nas nervuras dos estribos verticais fechados e abertos inclinados a 45°, respectivamente.

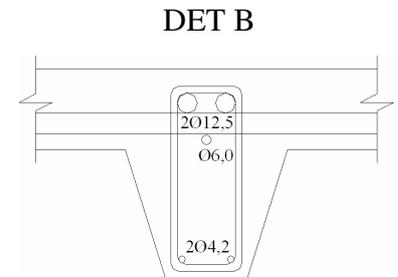
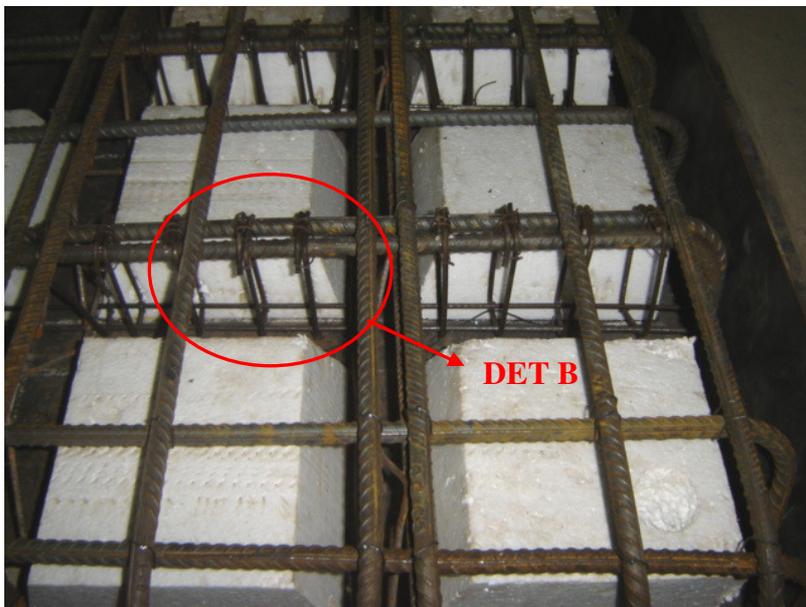


Figura 40 - Posicionamento dos estribos verticais nas nervuras

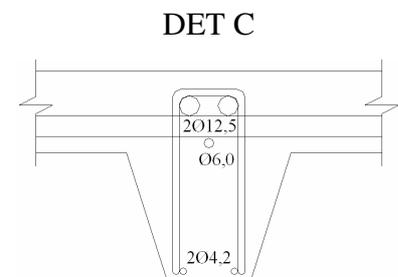
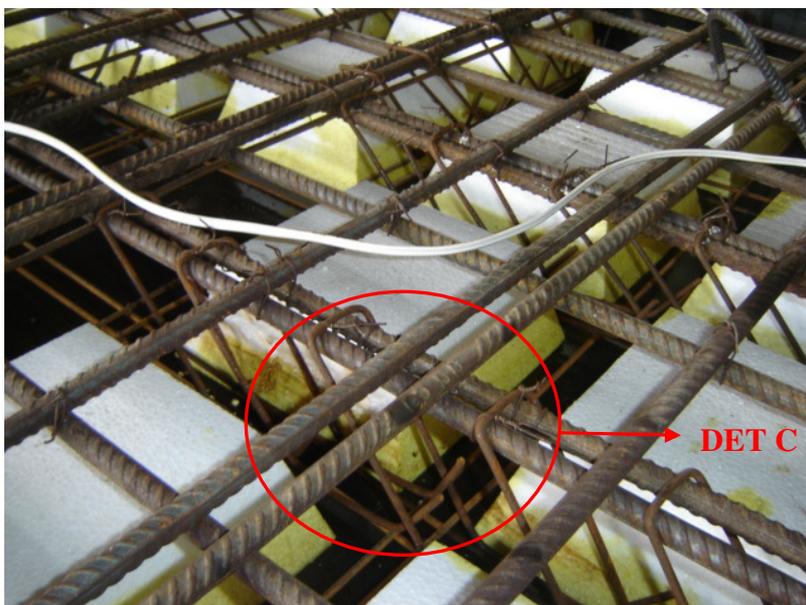


Figura 41 - Posicionamento dos estribos inclinados nas nervuras

Em relação à armadura de combate à punção, foram utilizados estribos abertos com inclinação de 45° em relação à superfície da laje e diâmetro de 6,3 mm. Das 8 lajes ensaiadas, 3 (L6, L7 e L8) apresentaram esta armadura, a qual foi disposta em 3 camadas distribuídas em cruz na região maciça, ou seja, posicionadas paralelamente às faces do pilar, conforme recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2003).

A Figura 42 mostra um desenho esquemático do posicionamento da armadura de punção em relação às armaduras de flexão, com os respectivos espaçamentos recomendados pela norma brasileira e a Figura 43 mostra a armadura de punção posicionada na laje L8 antes da concretagem.

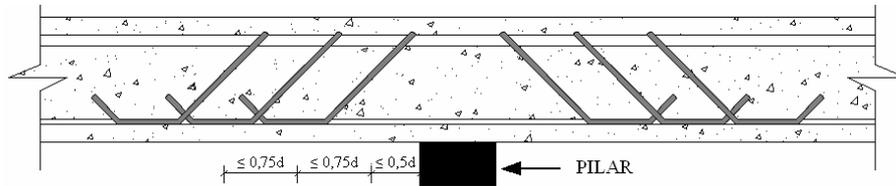


Figura 42 - Detalhe do posicionamento da armadura de punção



Figura 43 - Estribos posicionados na região maciça da laje L8

A Tabela 9 apresenta as principais características das lajes ensaiadas quanto à armadura de cisalhamento (nervura e punção) e as Figuras 44 a 50 mostram o posicionamento dessas armaduras nas lajes ensaiadas.

Tabela 9 - Características das lajes

Laje	Armadura de cisalhamento		
	Nervura x	Nervura y	Punção
L1	-	-	-
L2	Treliça	Estribo vertical fechado	-
L3	Treliça	Estribo vertical fechado	-
L4	Treliça	Estribo vertical fechado	-
L5	Estribo vertical	Estribo vertical fechado	-
L6	Treliça	Estribo vertical fechado	Estribo inclinado a 45°
L7	Estribo vertical fechado	Estribo vertical fechado	Estribo inclinado a 45°
L8	Estribo inclinado a 45°	Estribo inclinado a 45°	Estribo inclinado a 45°

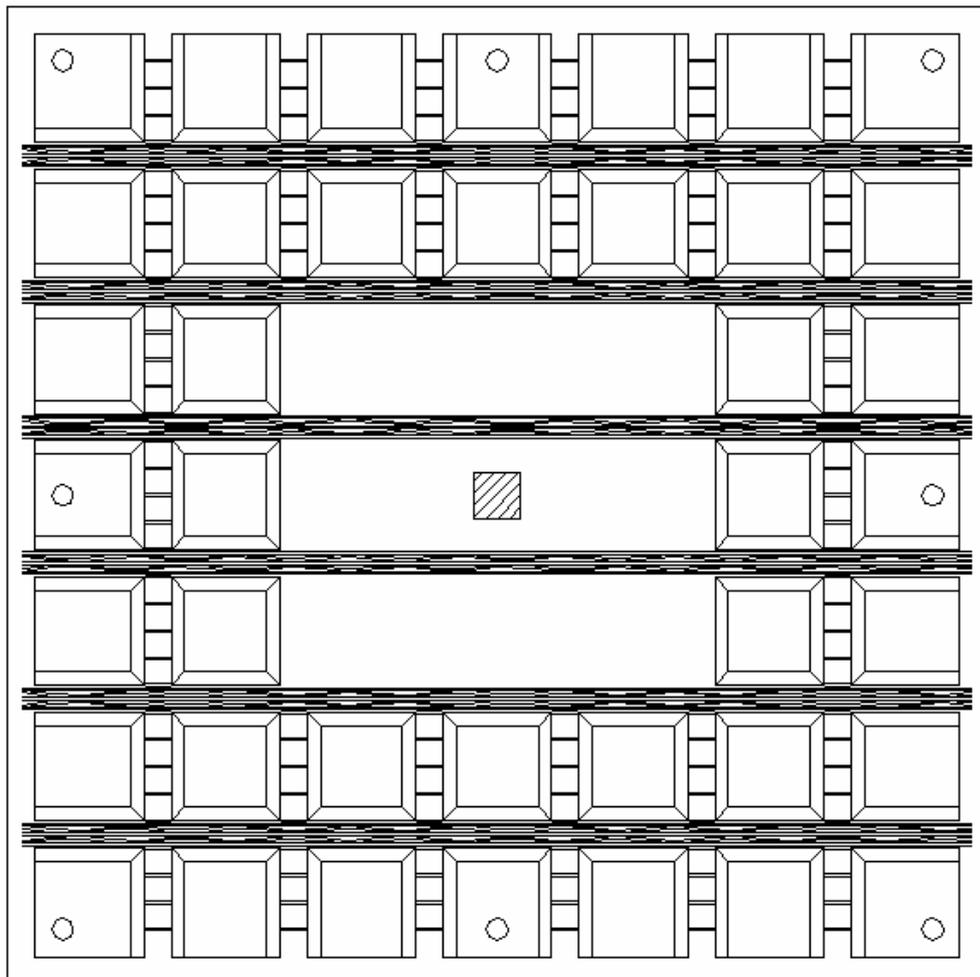


Figura 44 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras (L2)

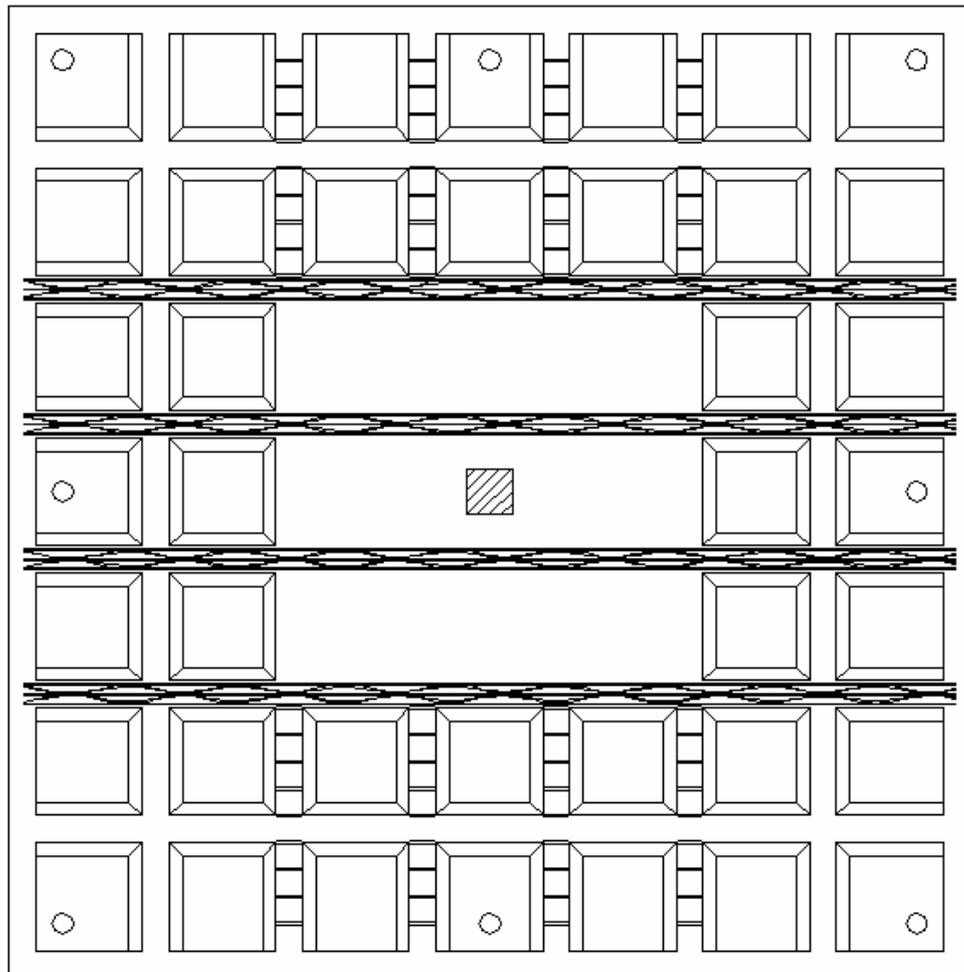


Figura 45 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras (L3)

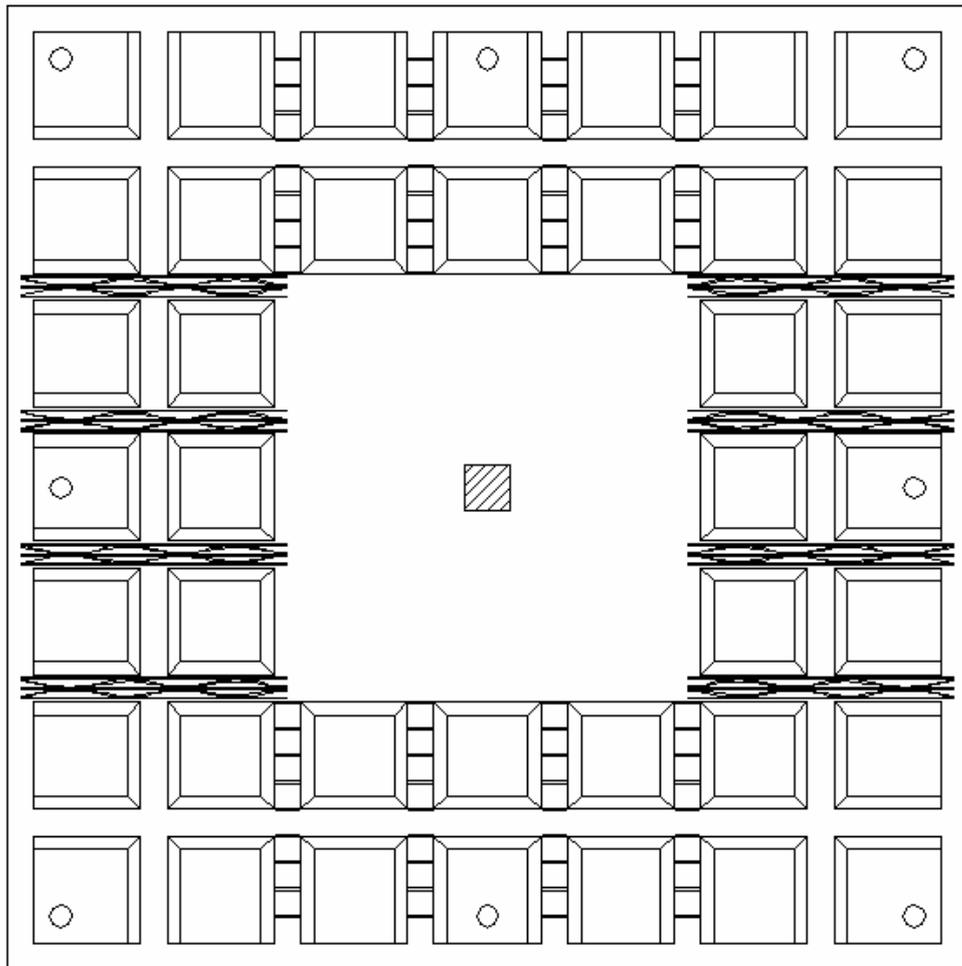


Figura 46 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras (L4)

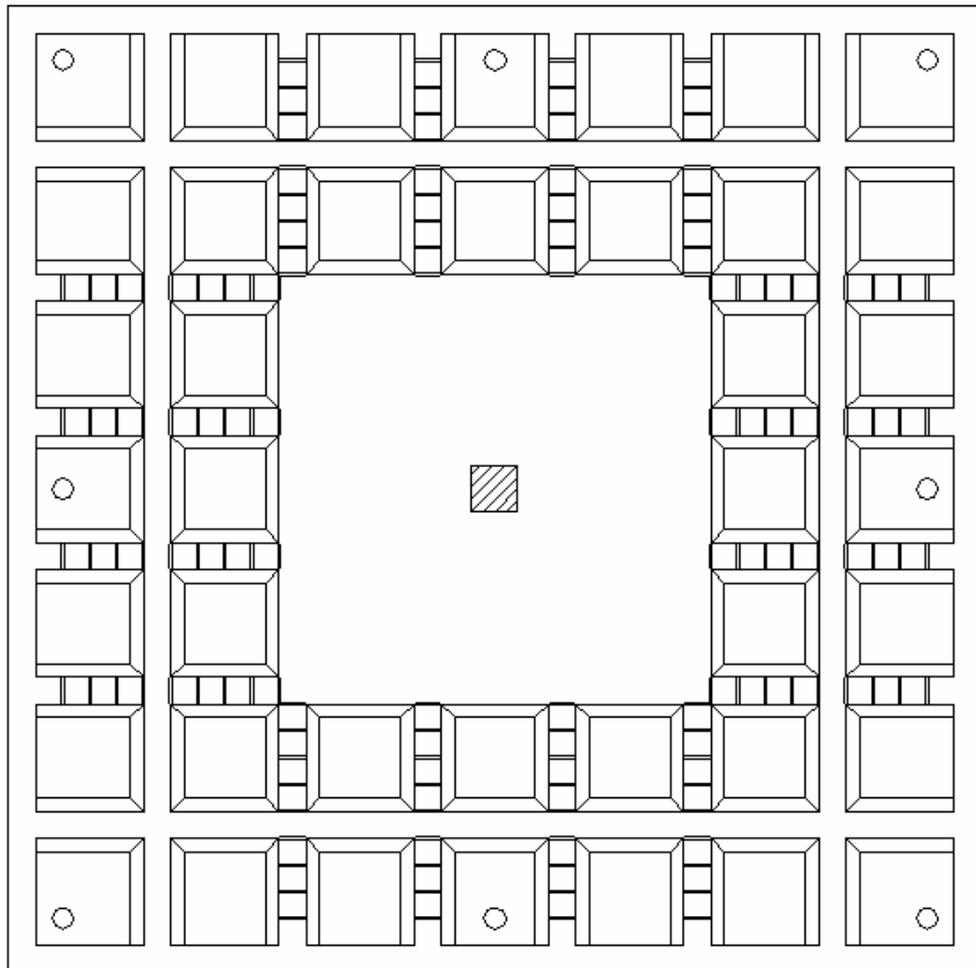


Figura 47 - Posição dos estribos verticais nas nervuras (L5)

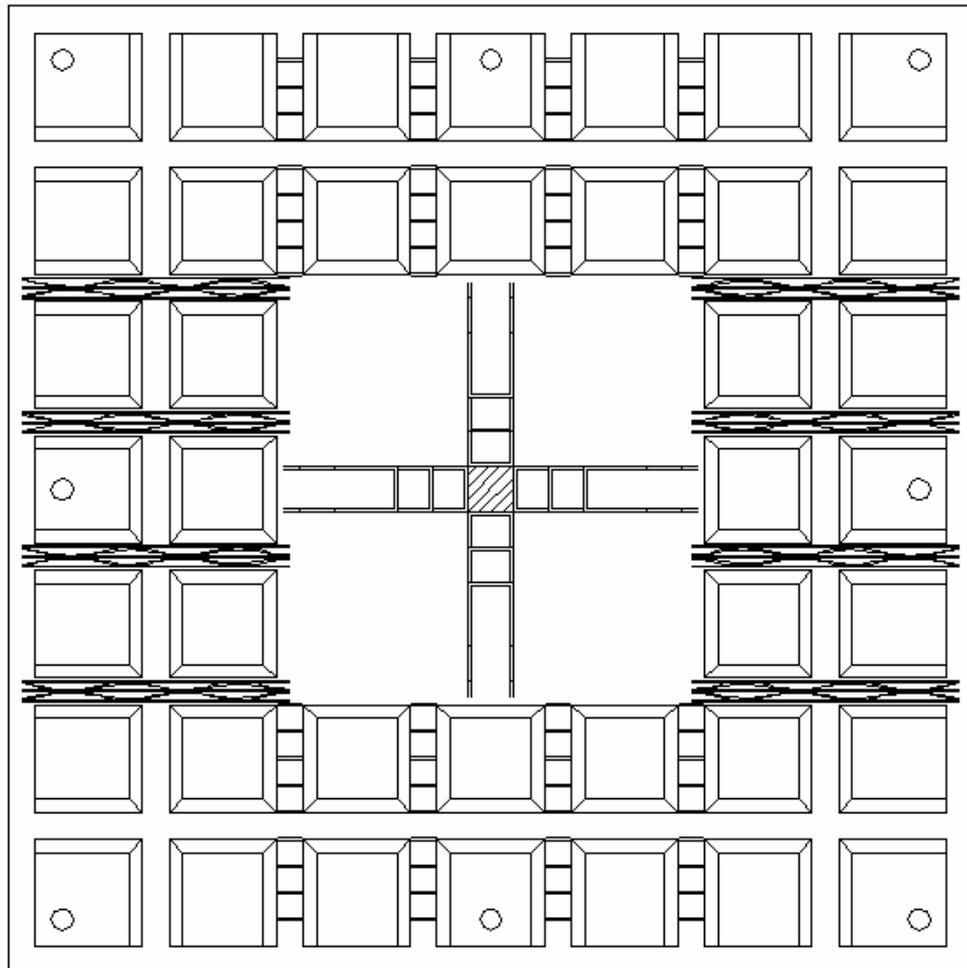


Figura 48 - Posição das treliças e estribos verticais nas nervuras e estribos inclinados de punção (L6)

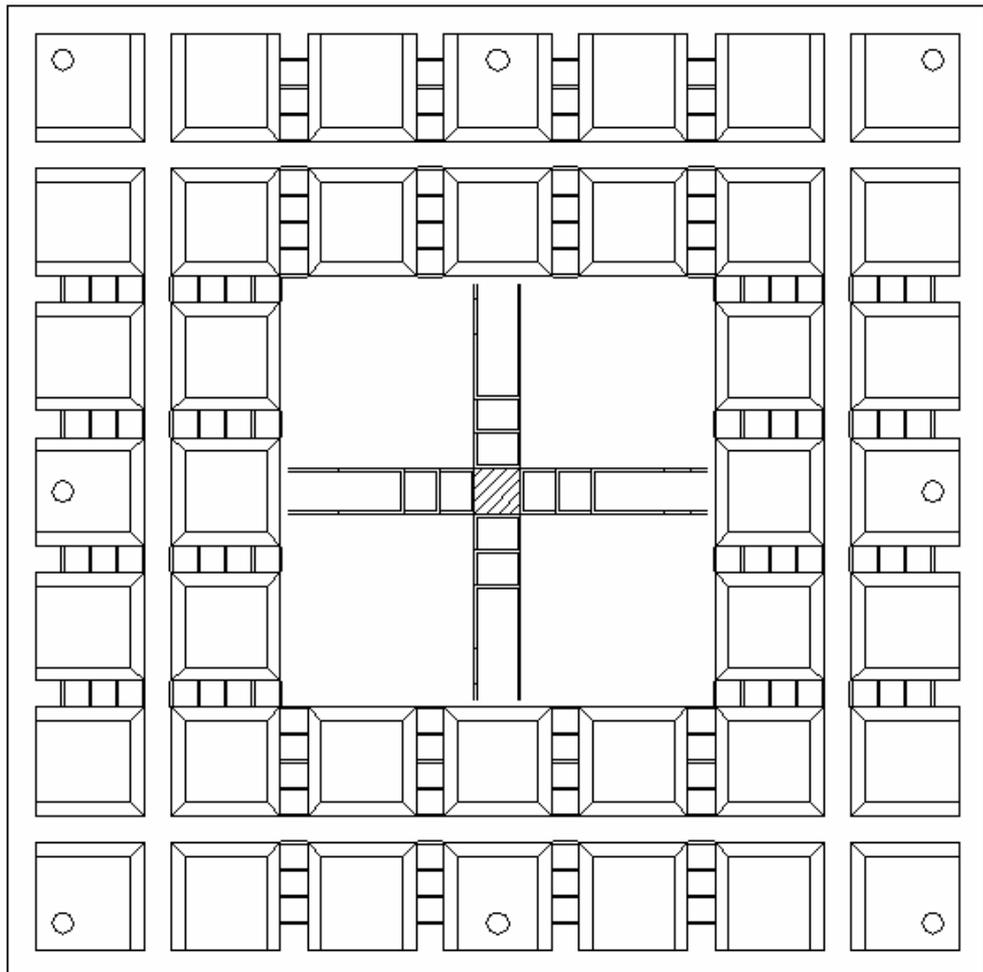


Figura 49 - Posição dos estribos verticais nas nervuras e estribos inclinados na região maciça (L7)

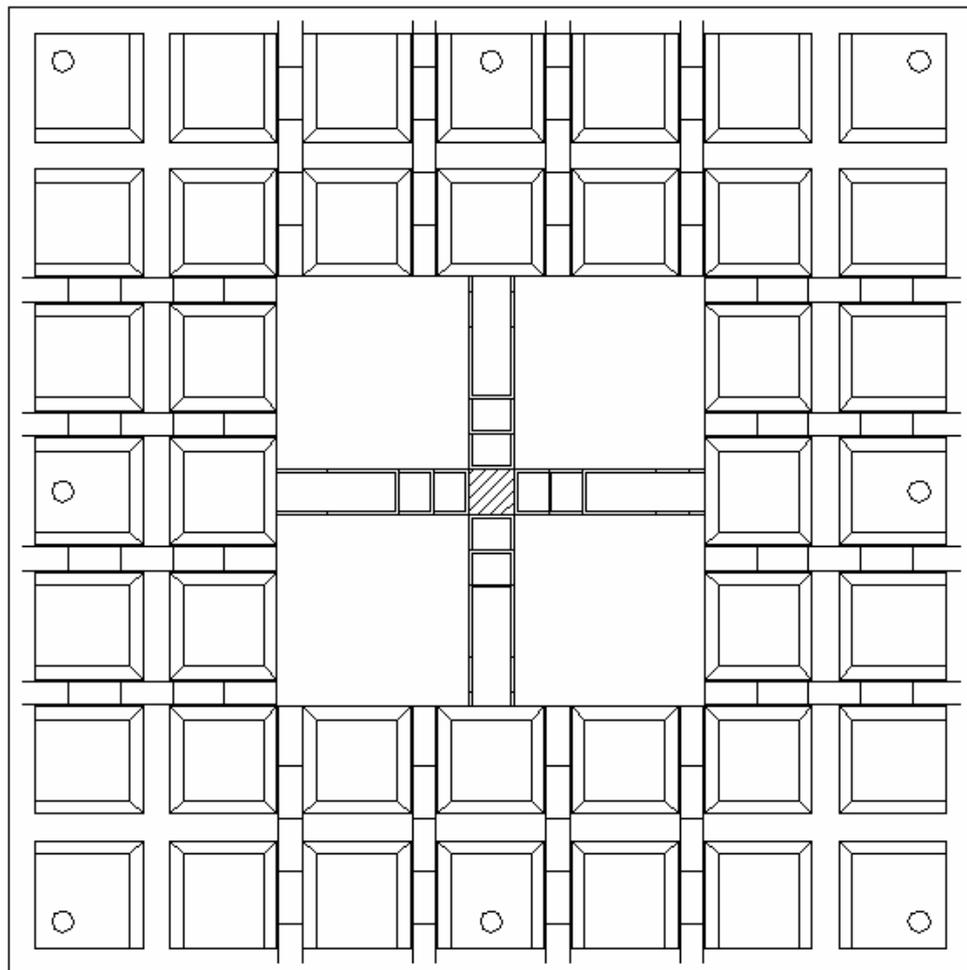
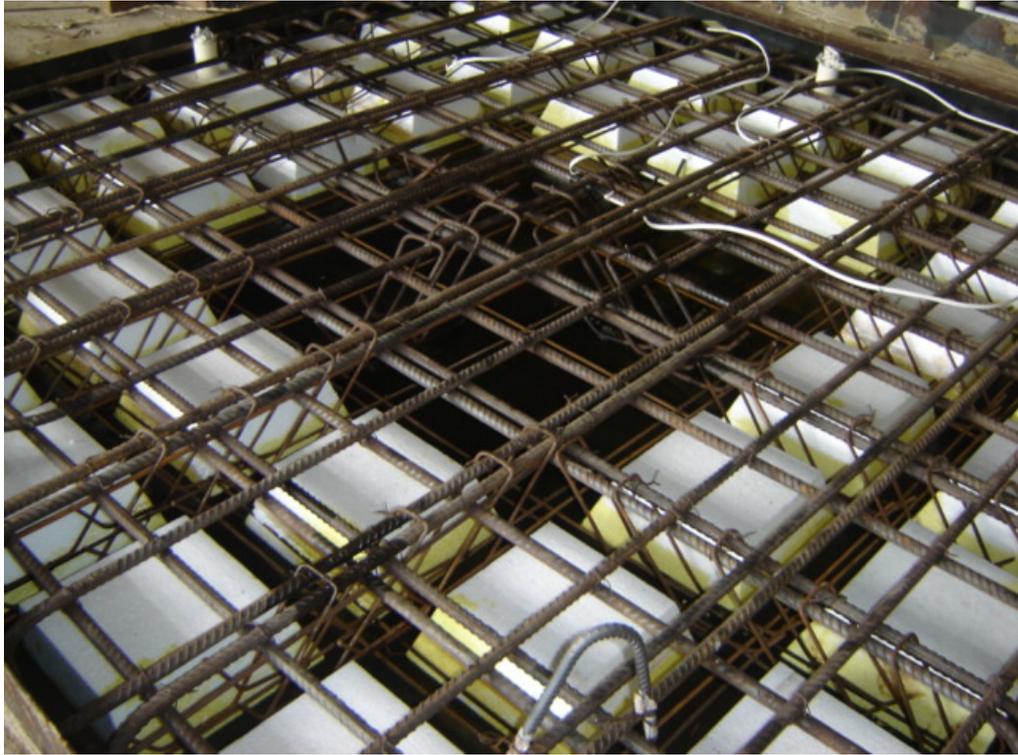


Figura 50 - Posição dos estribos inclinados nas nervuras e na região maciça (L8)

3.4 Instrumentação

3.4.1 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais (flechas) foram medidos através de deflectômetros analógicos, com leitura máxima de 50 mm e precisão de 0,01 mm, posicionados no meio do vão, distribuídos nas direções x e y, espaçados de 174,5 mm entre si e em contato com a superfície superior das lajes. Os deflectômetros tiveram o mesmo posicionamento em todas as lajes e foram fixados com o auxílio de bases magnéticas em perfis metálicos, que por sua vez foram apoiados em cavaletes metálicos, de maneira que não houvesse qualquer dependência em relação ao sistema de ensaio e uma possível interferência nas leituras dos deslocamentos. A Figura 51 mostra o esquema de posicionamento dos deflectômetros nas lajes, indicados pela letra D e a Figura 52 mostra os deflectômetros posicionados em uma das lajes ensaiadas.

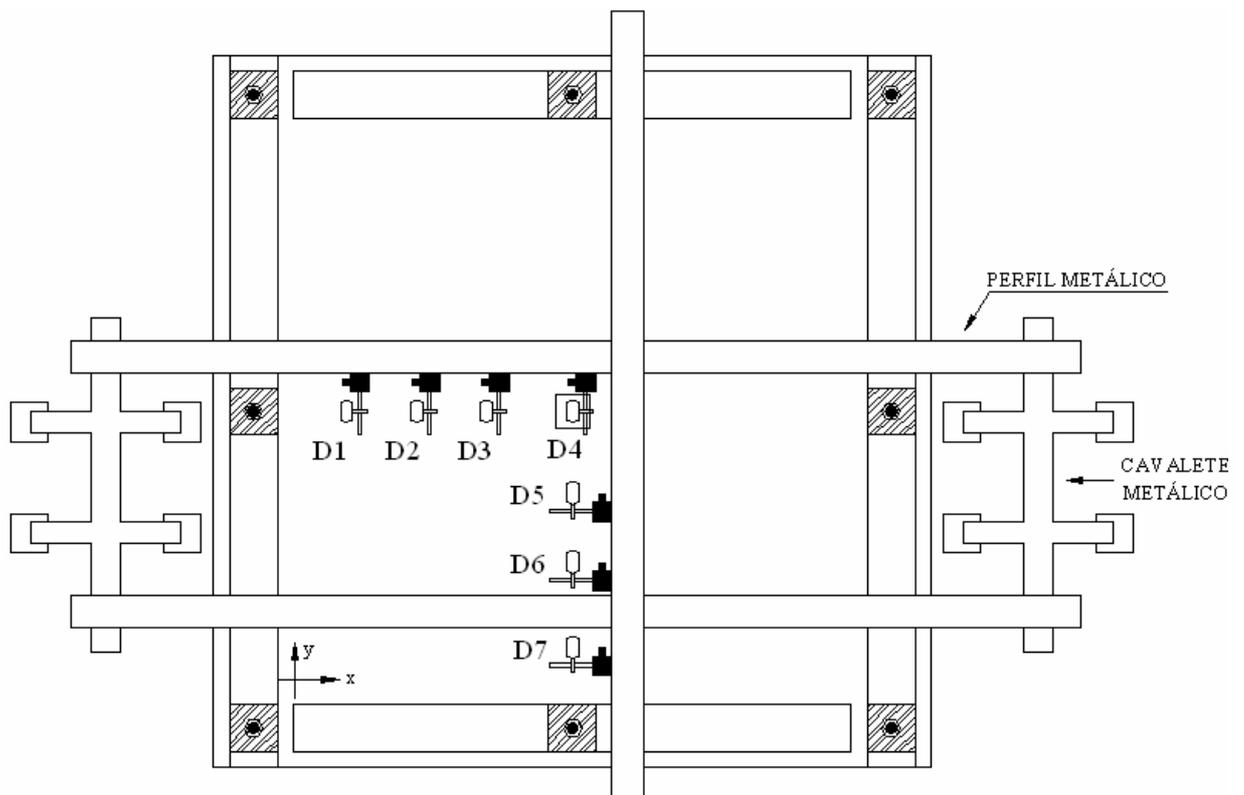


Figura 51 - Posicionamento dos deflectômetros nas lajes



Figura 52 - Detalhe do posicionamento dos deflectômetros na laje

3.4.2 Deformação do concreto

Para medir as deformações no concreto, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EERs) da marca KYOWA, modelo KC-80-120-A1-11, aqui denominados pela letra C seguida de um número. Os extensômetros foram fixados na superfície inferior de todas as lajes, nos pontos próximos ao pilar (C1 e C2) e nos pontos situados nas nervuras (C3 e C4). Identificados os pontos de monitoramento nas lajes, era feito um tratamento de remoção de impurezas e regularização da superfície, com araldite 10 minutos e posteriormente, os EERs eram fixados nesses pontos, com auxílio de adesivo instantâneo a base de cianocrilato (superbonder). Após a colagem, os EERs eram conectados ao sistema de aquisição de dados (SPIDER 8), através de cabos flexíveis.

Na laje de referência (L1) e nas lajes em que a armadura de cisalhamento nas nervuras era diferente nas direções x e y (L2, L3, L4 e L6), foram fixados 4 EERs (C1, C2, C3 e C4), conforme Figura 53, enquanto que nas lajes com mesmo tipo de armadura de cisalhamento nas duas direções (L5, L7 e L8), foram fixados apenas 2 EERs (C1 e C3). Os EERs fixados na região maciça foram posicionados a uma distância de 55 mm da face do pilar (dentro da região $d/2$, área mais crítica segundo o ACI 318), e apenas na direção tangencial, sendo tal posicionamento justificado pelo fato de se ter uma predominância das tensões tangenciais sobre as tensões radiais

neste tipo de sistema estrutural (OLIVEIRA, 1998). A Figura 54 mostra um detalhe da fixação dos extensômetros na laje.

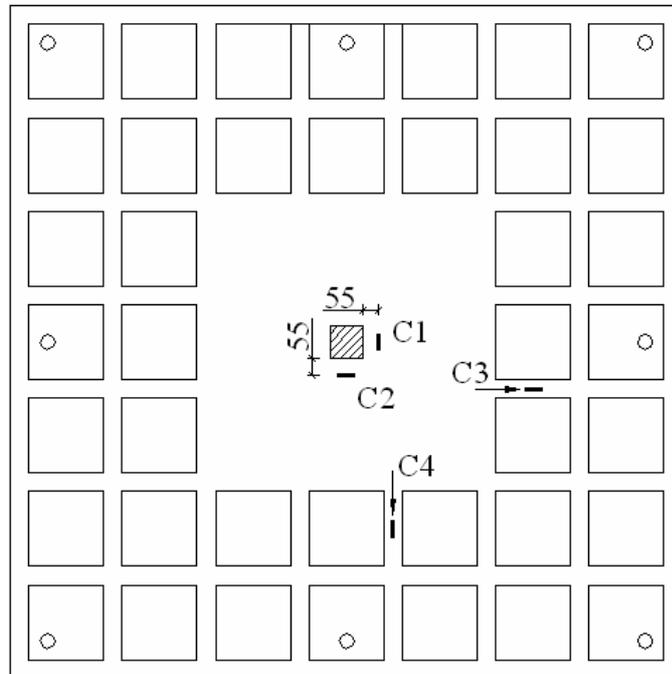


Figura 53 - Posicionamento dos extensômetros na superfície inferior das lajes



Figura 54 - Detalhe dos extensômetros fixados na laje

3.4.3 Deformação na armadura de flexão

As deformações na armadura de flexão foram monitoradas com extensômetros, seguindo o mesmo critério usado na medição da deformação no concreto, quanto à localização dos pontos a serem monitorados, ou seja, próximos ao pilar, a fim de registrar as máximas deformações e nas nervuras, para que fosse possível comparar as deformações na armadura em pontos distintos da laje, e ainda auxiliar na classificação do modo de ruptura. Neste monitoramento, utilizou-se extensômetros elétricos de resistência da marca KYOWA, modelo KFG-5-120-C1-11, aqui denominados pela letra E seguida de um número (Figura 55), os quais foram conectados ao mesmo sistema de aquisição de dados utilizado na leitura das deformações do concreto. As lajes L1, L2, L3, L4 e L6 apresentaram os quatro pontos monitorados (E1, E2, E3 e E4), enquanto que as lajes L5, L7 e L8, apenas os pontos E1 e E3.

Apesar de a armadura sofrer deformações diferentes em suas superfícies superior e inferior, levando alguns pesquisadores a monitorarem essas duas superfícies, nesta pesquisa optou-se pela utilização de apenas um extensômetro em cada ponto, sendo posicionado a meia altura da barra (Figura 56), obtendo-se, dessa forma, um valor médio da deformação da armadura de flexão.

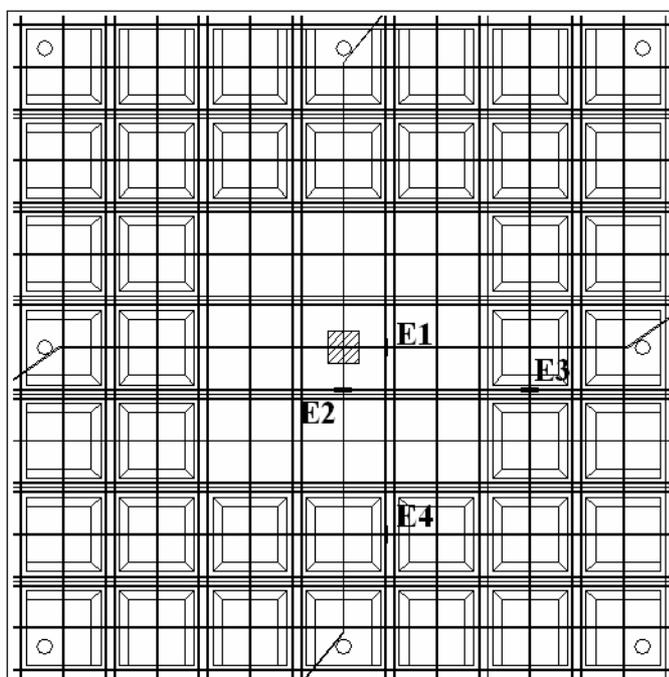


Figura 55 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão



Figura 56 - Detalhe do posicionamento do extensômetro na barra

A seqüência de fixação dos extensômetros nas barras, se deu através da regularização da superfície (retirada das nervuras), remoção de impurezas, colagem dos extensômetros com auxílio de adesivo à base de cianocrilato (superbonder) e posterior proteção com uma camada de araldite e, por fim, a ligação dos extensômetros ao cabo flexível, o qual era conectado ao SPIDER 8. Essa última ligação era protegida através de fita isolante de auto-fusão. As Figuras 57 e 58 mostram, respectivamente, essa seqüência de fixação do extensômetro na barra e uma laje (L1) com as barras monitoradas.

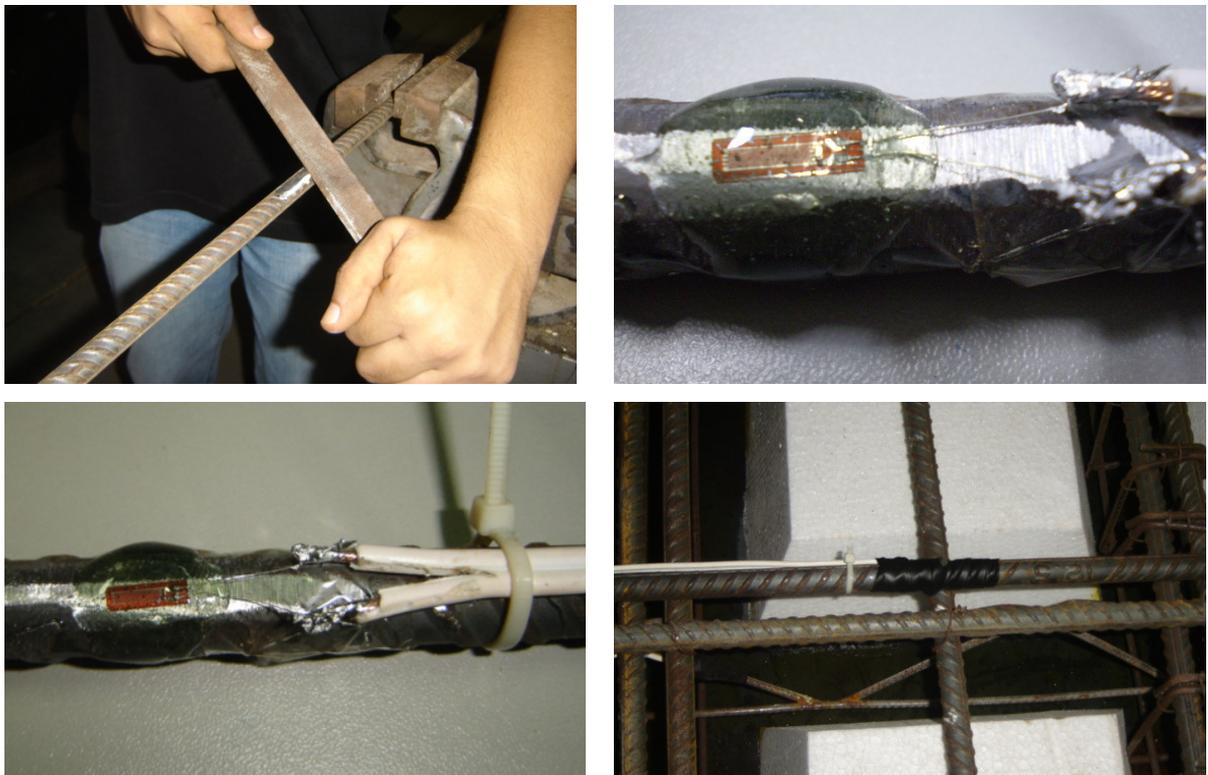


Figura 57 - Seqüência de fixação do extensômetro na barra



Figura 58 - Monitoramento da armadura de flexão da laje L1

3.4.4 Deformação na armadura de cisalhamento

Os extensômetros utilizados para medir as deformações nas armaduras de cisalhamento foram os mesmo utilizados nas armaduras de flexão (KFG-5-120-C1-11), bem como a seqüências de preparo e fixação dos extensômetros nas barras. Tanto nas armaduras de cisalhamento nas nervuras quanto na região maciça, foi utilizado apenas um extensômetro, sendo posicionado a meia altura em uma das diagonais tracionadas da treliça e em um dos ramos dos estribos (inclinado e vertical), conforme mostra a Figura 59, sendo, segundo Azevedo (1999), tal posicionamento o trecho responsável pelo combate ao cisalhamento.

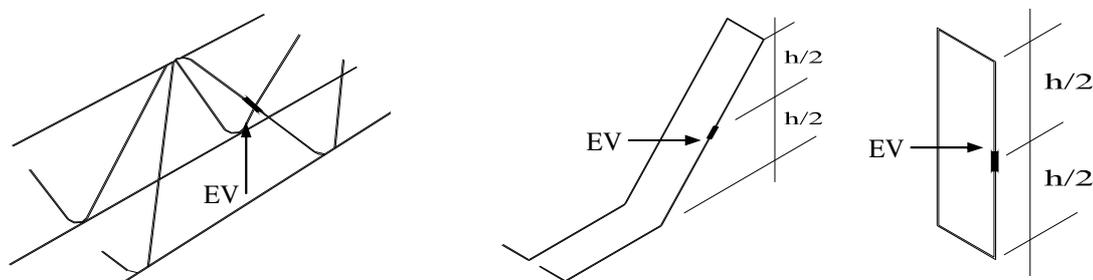


Figura 59 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento

Os extensômetros utilizados para monitorar as armaduras de cisalhamento foram identificados pelas letras EV seguidas de um número, sendo EV1 para estribos nas nervuras (vertical ou inclinado), EV2 para treliça e EV3 e EV4 para estribos de punção (região maciça). Nas lajes em que a armadura de cisalhamento nas nervuras era diferente nas direções x e y (L2, L3, L4 e L6), as armaduras foram monitoradas em duas nervuras através da fixação dos extensômetros EV1 e EV2, sendo que na laje L6, por apresentar estribos de combate à punção na região maciça, foram fixados mais dois extensômetros, EV3 e EV4 (Figura 60). Nas lajes em que a armadura de cisalhamento nas nervuras era a mesma nas duas direções (L5, L7 e L8), apenas uma nervura foi monitorada (EV1), sendo que nas lajes L7 e L8 foram monitoradas as armaduras de cisalhamento de combate à punção na região maciça (EV3), como mostra a Figura 61. A Figura 62 mostra o detalhe do posicionamento dos extensômetros nas barras.

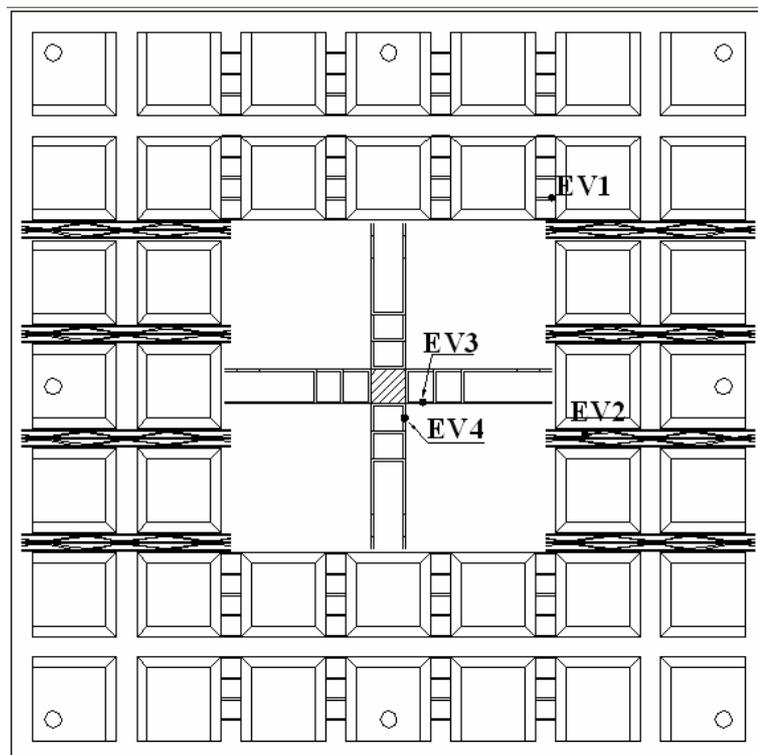


Figura 60 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento (L6)

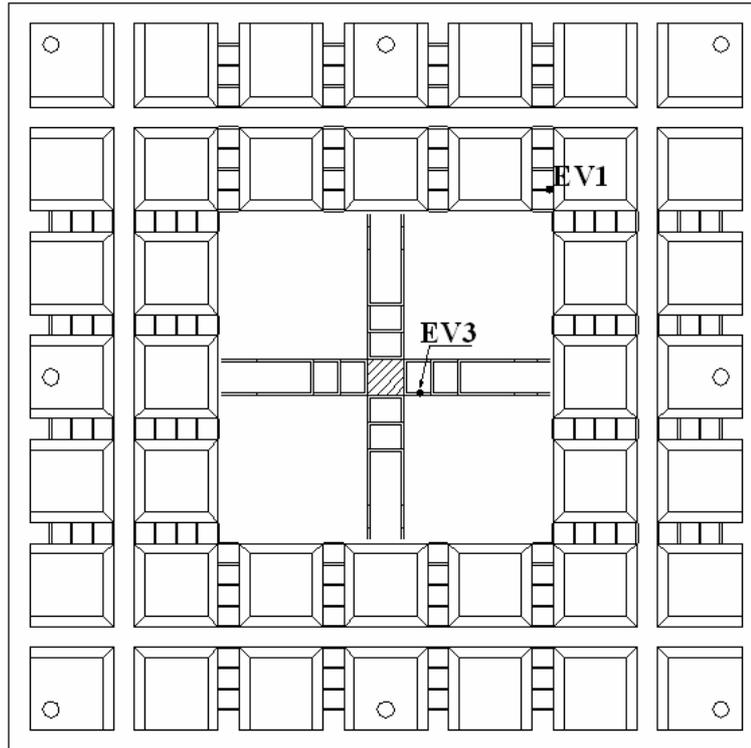


Figura 61 - Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento (L7)



Figura 62 - Detalhe do monitoramento das armaduras de cisalhamento

3.5 Materiais

3.5.1 Concreto

3.5.1.1 Composição

O concreto utilizado na confecção das lajes foi dosado em central de Belém (Supermix Concreto S.A.), de maneira a atingir resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias. Na composição do concreto foi utilizado cimento CII-Z-32 (cimento portland com adição de material pozolânico), areia como agregado miúdo, proveniente do Areal 21 (aproximadamente 21 km de Belém-PA),

classificada como muito fina, com faixa granulométrica entre 0,6 a 2,4 mm de diâmetro. Como agregado graúdo, foi utilizado seixo rolado, proveniente de Ourém-PA.

3.5.1.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto (f_c) foi determinada através de ensaio à compressão simples de 3 corpos de prova cilíndricos padronizados de 100 mm x 200 mm, para cada uma das 8 lajes, tendo-se moldado no total 24 corpos de prova. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 1994), no Laboratório de Resistência dos Materiais da UFPA, e cujos resultados são apresentados no capítulo 4. A Figura 63 mostra os corpos de prova sendo moldados para os ensaios de determinação das propriedades do concreto.



Figura 63 - Moldagem dos corpos de prova

3.5.1.3 Resistência à tração

Para a determinação da resistência à tração do concreto, também foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm para cada laje, submetidos ao ensaio de compressão diametral de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 1994), realizado no Laboratório de Resistência dos Materiais da UFPA.

3.5.1.4 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto, foi obtido através do ensaio de 3 corpos de prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm para cada laje. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 1984) e os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados estimados através das normas MC90 (CEB-FIP, 1993) e NBR6118 (ABNT, 2003), de acordo com as equações 3.1 e 3.2, respectivamente.

$$E_c = \alpha_\beta \cdot 2,15 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{f_c}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.1)$$

$$E_c = 5.600 \cdot f_c^{1/2} \quad (3.2)$$

O coeficiente α_β presente na equação 3.1 está relacionado com o tipo de agregado, e nesta pesquisa, este coeficiente foi adotado igual a 1. A comparação entre os resultados estimados e os experimentais para módulo de elasticidade é mostrada no item 4.1.1.3 desta pesquisa.

3.5.2 Aço

As armaduras de flexão foram compostas por barras de 4,2, 6,0 e 12,5 mm de diâmetro e as armaduras de cisalhamento, por barras de 4,2 mm nas nervuras e 6,3 mm na região maciça (ver item 3.3.1 e 3.3.2 deste trabalho), as quais foram entregues em lotes separados por bitola (Figura 64). Foram retiradas amostras das barras de aço utilizadas na confecção das armaduras das lajes e para formação das amostras, extraiu-se, aleatoriamente, 3 amostras de 500 mm de cada bitola que foram submetidas ao ensaio de tração de acordo com a NBR 6152 (ABNT, 1992). Para a determinação da resistência à tração das diagonais da treliça, as amostras ensaiadas foram obtidas a partir da armadura do banzo inferior, por apresentar o mesmo diâmetro das diagonais. Para tanto, procedeu-se o preparo das amostras através do corte das diagonais, permanecendo nas amostras apenas a região soldada entre o banzo inferior e a diagonal. A partir daí as amostras também foram ensaiadas de acordo com a NBR 6152. O diagrama tensão deformação, e as características mecânicas dos aços ensaiados são mostrados no capítulo 4.



Figura 64 - Armaduras utilizadas nas lajes

3.6 Moldagem, concretagem, cura e desforma

Para a confecção das lajes foram utilizadas formas metálicas providas de furos, onde foram colocados, antes da concretagem, tubos de PVC de 40 mm de diâmetro para a posterior passagem das lajes pelos tirantes no sistema de ensaio. Antes da concretagem, as formas receberam uma camada de óleo lubrificante para facilitar a desmoldagem. A Figura 65 mostra as formas metálicas no laboratório.



Figura 65 - Formas metálicas utilizadas na confecção das lajes

O processo de formação das nervuras se iniciou através da marcação das posições dos blocos de EPS nas formas e, posterior fixação destes às mesmas (Figura 66). A Figura 67 mostra uma forma com os blocos de EPS devidamente fixados.



Figura 66 - Marcação e detalhe da fixação dos blocos de EPS

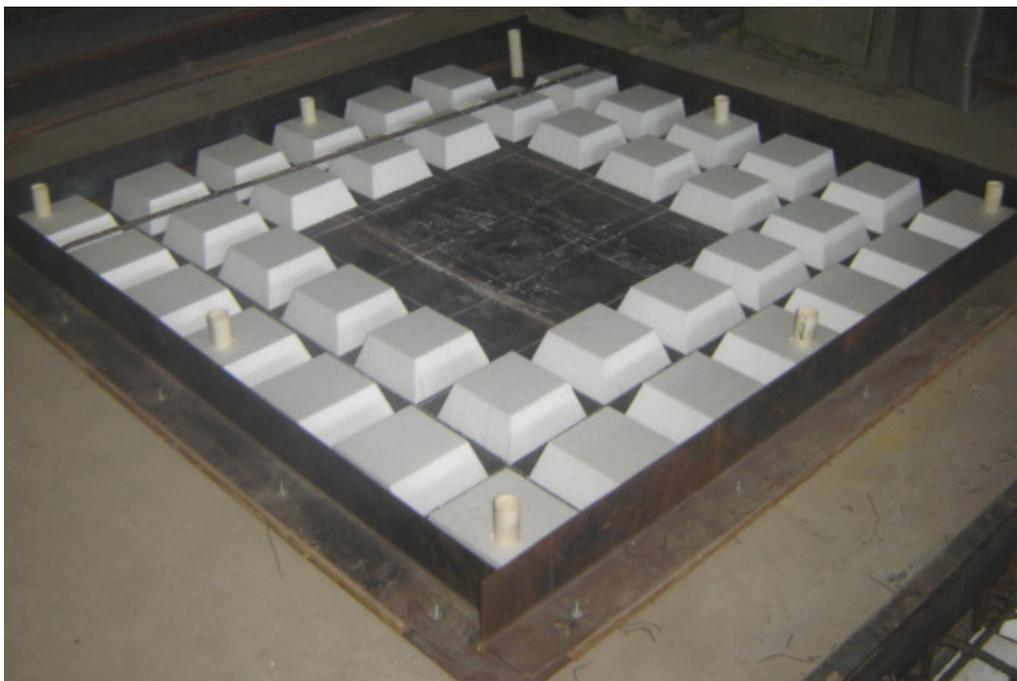


Figura 67 - Blocos de EPS fixados à forma

Terminada a etapa de fixação dos elementos de enchimento, iniciou-se a colocação das armaduras que foram previamente montadas de acordo com o detalhamento de cada laje. Nas nervuras constituídas por estribo vertical, as amarrações dos estribos verticais nas armaduras de flexão foram feitas fora da forma para posteriormente serem colocadas na mesma. Enquanto que, nas lajes com estribos inclinados nas nervuras e região maciça, estes foram posicionados após a armadura de flexão ter sido colocada na forma. Como mencionado anteriormente, a facilidade no posicionamento dos estribos inclinados proporciona benefícios de grande relevância, principalmente em relação ao tempo de execução desta etapa.

Na etapa da concretagem, o concreto foi transportado até o local de lançamento por meio de carrinhos-de-mão, obedecendo às recomendações da NBR 14931 (ABNT, 2003) quanto à altura de lançamento nas formas que não deve ter queda livre superior a 2 m, para evitar a segregação do concreto. O adensamento do concreto foi feito mecanicamente com o auxílio de uma vibrador de imersão, de modo a reduzir a porosidade ao máximo e torná-lo o mais compacto possível. Simultaneamente ao início da concretagem das lajes, realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, ou Slump Test, com o objetivo de verificar a consistência inicial do concreto. Terminada a concretagem, as superfícies das lajes foram regularizadas e para isso, utilizou-se uma régua de madeira. As Figuras 68 a 70 mostram as etapas de concretagem das lajes.



Figura 68 - Transporte e lançamento do concreto na fôrma



Figura 69 - Adensamento e regularização da superfície de concreto



Figura 70 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test)

Para evitar fissuras de retração, a água que satura o concreto fresco deve permanecer em seu interior para possibilitar a reação de hidratação do cimento e a água superficial deve evaporar lentamente para evitar tensões internas. Dessa forma, uma boa cura deve proporcionar uma lenta evaporação da água superficial e impedir que a outra parcela da água do concreto utilizada na reação de hidratação do cimento evapore. O método de cura usado nesta pesquisa foi o revestimento saturado (saco de aniagem) e teve início 6 horas após o término da concretagem. Como medida prática de controle da umidade, as lajes foram molhadas regularmente 3 vezes ao dia, durante 7 dias. Os corpos de prova moldados para os ensaios de determinação das propriedades mecânicas do concreto foram submetidos ao mesmo processo de cura das lajes. A Figura 71 mostra a cura das lajes. A retirada das formas ocorreu 14 dias após a concretagem das lajes, pois de um modo geral, quando se trata de concreto convencional, é uma idade adequada para tal procedimento.



Figura 71 - Cura das lajes e dos corpos de prova utilizando sacos de aniagem

Uma vez que as lajes haviam sido desformadas, deu-se início aos procedimentos de preparação das lajes para os ensaios, começando com a retirada manualmente, com o emprego de espátula, dos blocos de EPS para a visualização das nervuras no momento do ensaio (Figura 72). A Figura 73 mostra a superfície inferior das lajes antes e após a retirada do material de enchimento.



Figura 72 - Retirada dos blocos de EPS



Figura 73 - Vista da parte inferior da laje antes e após a retirada dos blocos de EPS

3.7 Sistema de ensaio e aplicação de carga

O sistema de ensaio foi composto por 8 tirantes de aço com diâmetro de 29 mm e $f_{ys} = 400$ MPa, que foram fixados à laje de reação do laboratório, com a função de transmitir o carregamento aplicado nas lajes ensaiadas. Perfis metálicos cilíndricos envolveram 4 dos 8 tirantes, a fim de sustentar as lajes que posteriormente seriam ensaiadas (Figura 74). As lajes foram incorporadas ao sistema de ensaio através de furos deixados previamente durante a concretagem, exclusivamente para essa finalidade de atravessar os tirantes (ver item 3.6). Vigas metálicas foram posicionadas sobre os 4 bordos das lajes, simulando um apoio contínuo e foram fixadas às lajes através do aperto das “porcas” nos tirantes. O sistema de ensaio devidamente montado pode ser visto através das Figuras 75 e 76.

Finalizada a montagem do sistema de reação e apoio, os dispositivos responsáveis pela aplicação da carga eram posicionados. Esse conjunto foi composto por uma placa metálica quadrada de 85 mm de lado posicionada no centro da laje para simular a ação do pilar, uma rótula, um cilindro hidráulico com capacidade de 1.000 kN, o qual era alimentado por uma bomba hidráulica e cuja intensidade do carregamento era medido através de uma célula de carga com capacidade para 1.000 kN e precisão de 1 kN. A Figura 77 mostra o conjunto de aplicação de carga.

Concomitantemente à montagem dos dispositivos de aplicação de carga, eram posicionados os deflectômetros para a medição dos deslocamentos verticais e também era feita a conexão dos

cabos flexíveis, previamente ligados aos extensômetros, ao sistema de aquisição de dados SPIDER 8 (Figura 78).

Finalizadas as etapas de montagem, iniciou-se o processo de carregamento, no sentido de baixo para cima, adotando-se um incremento de carga de 10 kN. Para cada incremento de carga foram medidos os deslocamentos verticais, as deformações nas armaduras e no concreto, através dos extensômetros, e as fissuras foram apenas mapeadas, com o objetivo de identificá-las, visto que suas medidas fogem do escopo deste trabalho.



Figura 74 - Tirantes fixados à laje de reação e perfis metálicos envolvendo os tirantes

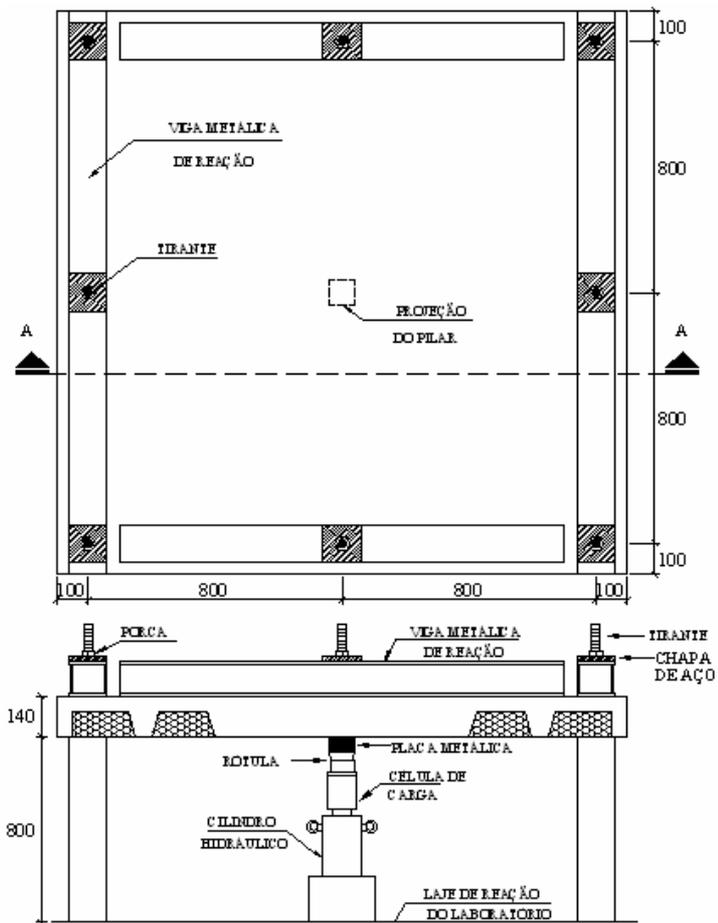


Figura 75 - Sistema de ensaio em planta e em corte



Figura 76 - Sistema de ensaio



Figura 77 - Dispositivo de aplicação de carga



Figura 78 - Sistema de aquisição de dados

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, referentes aos modelos propostos nesta pesquisa. Primeiramente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais (concreto e aço) e em seguida, os resultados referentes aos deslocamentos verticais, deformações do concreto e das armaduras, padrão de fissuração, além das cargas e modos de ruptura observados nos ensaios.

4.1 Propriedade dos materiais

4.1.1 Concreto

As propriedades mecânicas do concreto foram determinadas a partir de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e do módulo de elasticidade longitudinal. Todos os ensaios foram realizados na prensa AMSLER com capacidade de 1.000 kN do Laboratório de Engenharia Civil da UFPa.

4.1.1.1 Resistência à compressão

Os ensaios para determinação da resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 1994). Para cada laje foram ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm de dimensões e em até 24 horas após a ruptura das lajes. A resistência à compressão do concreto adotada foi a média aritmética obtida entre os 3 corpos de prova ensaiados para cada laje, nas respectivas idades, conforme apresentado na Tabela 10

4.1.1.2 Resistência à tração

A resistência à tração foi determinada através do ensaio de compressão diametral realizado de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 1994). Da mesma forma como na determinação da resistência à compressão, foram moldados e ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm de dimensões para cada laje, sendo considerada a resistência à tração, a média aritmética entre os valores. A Figura 79 mostra um corpo de prova posicionado para os ensaios de compressão e tração.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração

Laje	Idade (dias)	f_c (MPa)	f_t (MPa)
L1	54	36,6	3,5
L2	49	37,8	3,4
L3	64	41,4	2,4
L4	60	39,2	2,9
L5	56	37,9	2,8
L6	70	39,8	2,0
L7	68	40,9	1,7
L8	74	39,0	1,7
Média		39,1	2,5

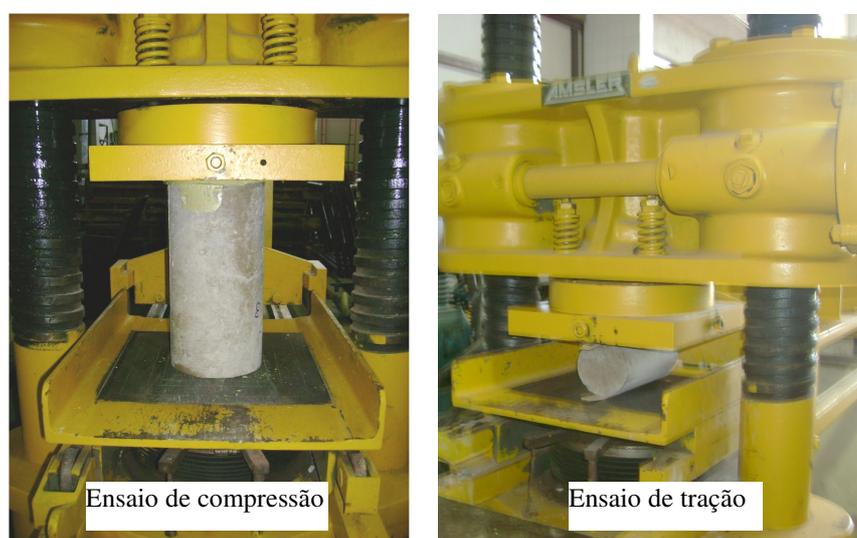


Figura 79 - Ensaio para determinação da resistência do concreto

4.1.1.3 Módulo de elasticidade

Para determinação do módulo de elasticidade foram ensaiados, para cada laje, 3 corpos de prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm de dimensões, de acordo com as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 1984). Após o término do ensaio de módulo de elasticidade os corpos de prova foram carregados até sua ruptura, com a finalidade de verificar se as resistências à compressão do concreto diferem em mais de 20%, já que, nesse caso, os resultados dos corpos de prova devem ser descartados. A Figura 80 mostra o ensaio de um corpo de prova e a Tabela 11 apresenta os resultados experimentais para o módulo de elasticidade e os estimados de acordo com as normas MC90 (CEB-FIP, 1993) e NBR 6118 (ABNT, 2003), conforme item 3.5.1.4 desta pesquisa, além de uma relação entre esses valores, para avaliar a coerência dos resultados. Observa-se que os valores estimados pelo MC90 e pela NBR 6118 para o módulo de elasticidade são bastante

próximos. Entretanto, diferem substancialmente dos resultados obtidos experimentalmente, sendo superestimados em 18%.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade

Laje	Idade (dias)	f_c (MPa)	$E_{c,Exp}$ (GPa)	$E_{c,MC90}$ (GPa)	$E_{c,NBR\ 6118}$ (GPa)	$E_{c,Exp}/E_{c,MC90}$	$E_{c,Exp}/E_{c,NBR\ 6118}$
L1	54	36,6	26,5	29,9	30,6	0,89	0,87
L2	49	37,8	22,6	30,2	30,8	0,75	0,73
L3	64	41,4	20,3	31,0	31,2	0,66	0,65
L4	60	39,2	21,1	30,5	30,9	0,69	0,68
L5	56	37,9	26,5	30,2	30,8	0,88	0,86
L6	70	39,8	27,0	30,7	31,0	0,88	0,87
L7	68	40,9	27,8	31,0	31,2	0,90	0,89
L8	74	39,0	27,6	30,5	30,9	0,91	0,89
Média		39,1	24,9	30,5	30,9	0,82	0,80



Figura 80 - Ensaio de módulo de elasticidade do concreto

4.1.2 Aço

Para determinar a resistência à tração e o módulo de elasticidade das barras de aço utilizadas na confecção das lajes, foram retiradas 3 amostras de corpo de prova de 500 mm de comprimento de cada diâmetro, as quais foram ensaiadas de acordo com a NBR 6152 (ABNT, 1992). As deformações das barras foram medidas através de extensômetros mecânicos (Figura 81). Para o aço de 12,5 mm de diâmetro, o patamar de escoamento apresentou-se bem definido. Para as barras de aço sem patamar de escoamento (4,2 mm, 6,0 mm e 6,3 mm), a tensão de escoamento foi obtida a partir da interseção do diagrama tensão x deformação com uma reta paralela ao

trecho elástico do diagrama, com origem na deformação residual de 2‰. Os resultados das propriedades mecânicas dos aços utilizados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 12 e representam a média entre os 3 corpos de prova ensaiados para cada diâmetro de barra. As Figuras 82 a 85 mostram as curvas de tensão x deformação para os aços ensaiados. O último ponto não corresponde à tensão máxima, pois não se mediu a deformação para esta tensão.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade

ϕ (mm)	f_{ys} (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_{ys} (‰)	E_s (GPa)	Tipo de Armadura
4,2	667,0	704,9	5,1	217,3	Cisalhamento
4,2 (treliça)	583,0	681,0	4,8	210,5	Cisalhamento
6,0	588,5	688,5	4,7	217,9	Flexão
6,3	588,0	794,5	4,4	242,0	Cisalhamento
12,5	601,6	740,2	2,5	255,3	Flexão



Figura 81 - Ensaio de tração do aço

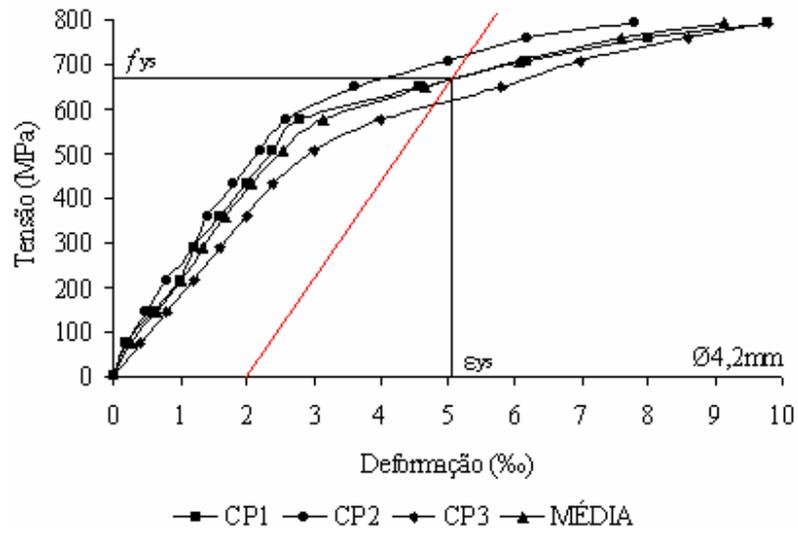


Figura 82 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø4,2 mm

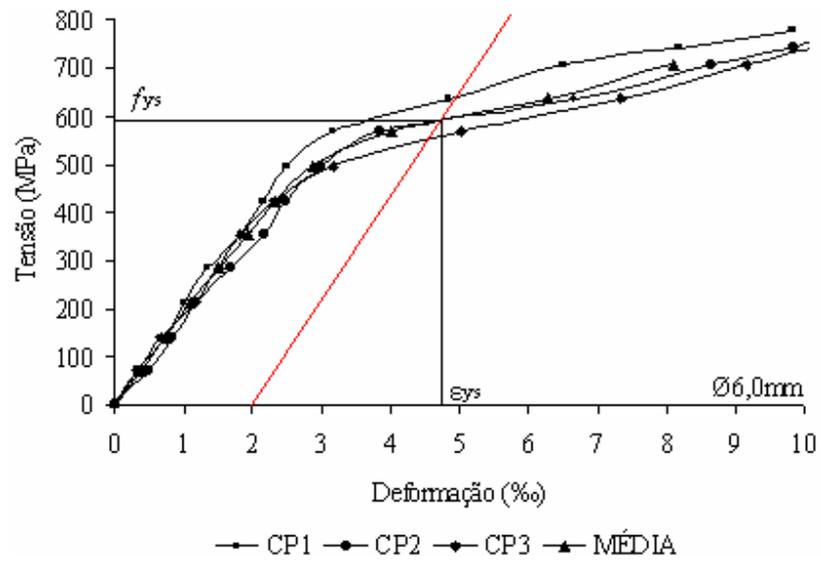


Figura 83 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø6,0 mm

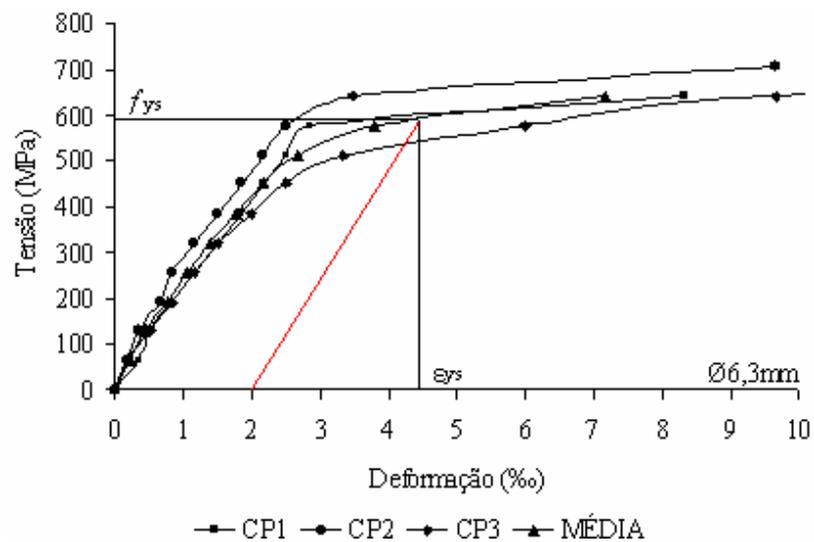


Figura 84 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø6,3 mm

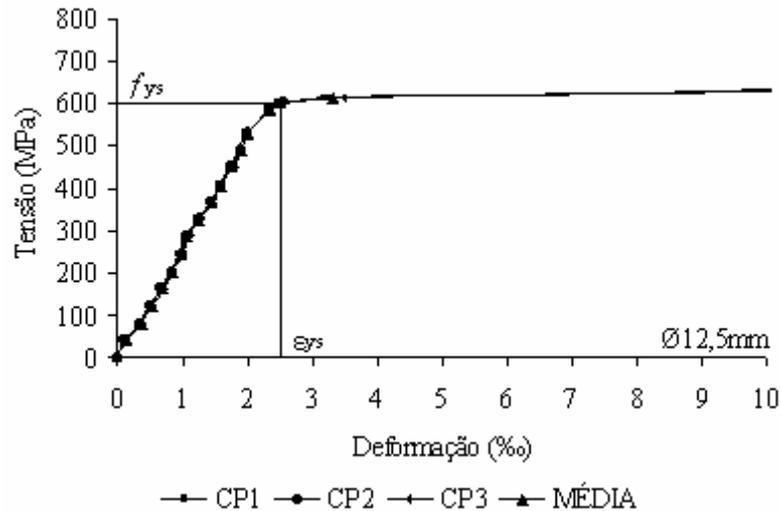


Figura 85 - Curva tensão x deformação para o aço de Ø12,5 mm

4.2 Deslocamentos verticais das lajes

Como mencionado anteriormente, para medir os deslocamentos verticais das lajes foram utilizados 7 deflectômetros analógicos posicionados em sua superfície superior, conforme mostra a Figura 86. Os deflectômetros foram distribuídos nas duas direções principais (x e y) com a finalidade de comparar o comportamento das lajes quanto à ductilidade, devido à variação da armadura de cisalhamento nas nervuras e ao uso de estribos inclinados como armadura de punção. As Figuras 87 a 94 mostram os deslocamentos verticais obtidos para cada laje e a Figura 95 mostra o gráfico dos deslocamentos verticais centrais (D4) de todas as lajes para cada estágio de carregamento aplicado.

Através dos gráficos das Figuras 87 a 94 pode-se observar que, para os primeiros estágios de carregamento, os deslocamentos verticais apresentaram um comportamento quase linear (até aproximadamente 50 kN). A partir do surgimento das primeiras fissuras, observa-se uma inclinação da curva, com deslocamentos verticais maiores para um mesmo passo de carga. Para as lajes com armadura de cisalhamento apenas nas nervuras (L2, L3, L4 e L5), apesar da taxa de armadura de flexão ter sido mantida constante, esperava-se que a armadura de cisalhamento nas nervuras influenciasse nos deslocamentos, proporcionando uma redução destes em relação à laje de referência (L1), para um mesmo valor de carga, o que não foi observado experimentalmente. Em relação às lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras e armadura de punção na região maciça (L6, L7 e L8), pode-se observar o ganho de ductilidade que estas lajes apresentaram com a introdução da armadura de punção. Isso pode ser verificado claramente no gráfico da Figura 95

(deslocamentos máximos). Entretanto, independente do uso das armaduras de cisalhamento nas nervuras e de punção na região maciça, as lajes apresentaram um comportamento semelhante, com variações apenas na ductilidade.

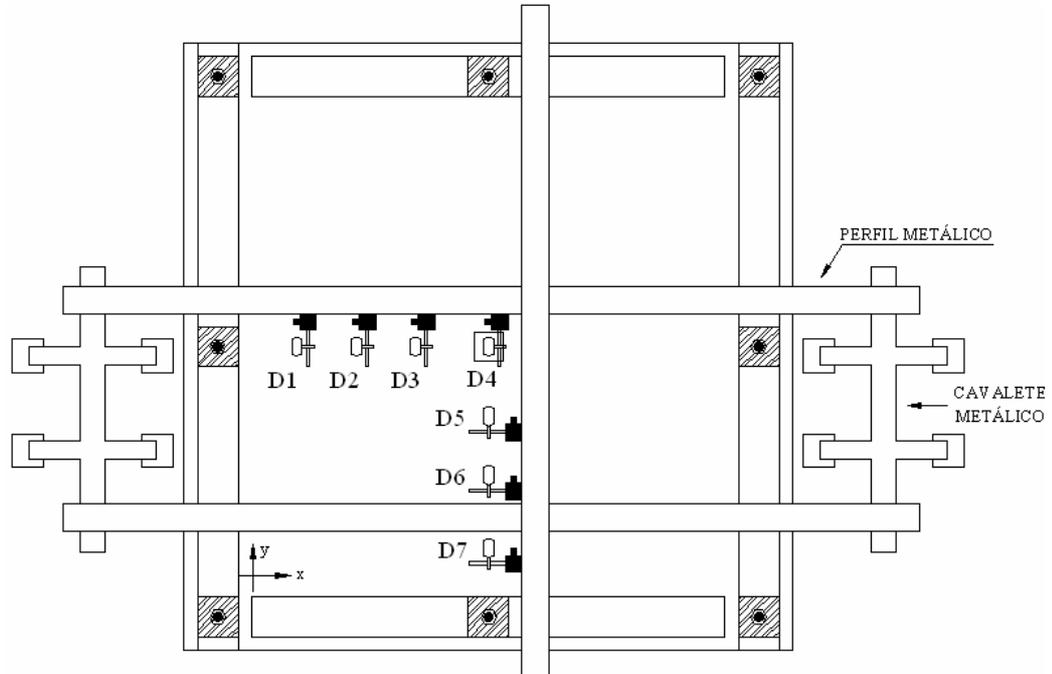


Figura 86 - Posicionamento dos defletores nas lajes

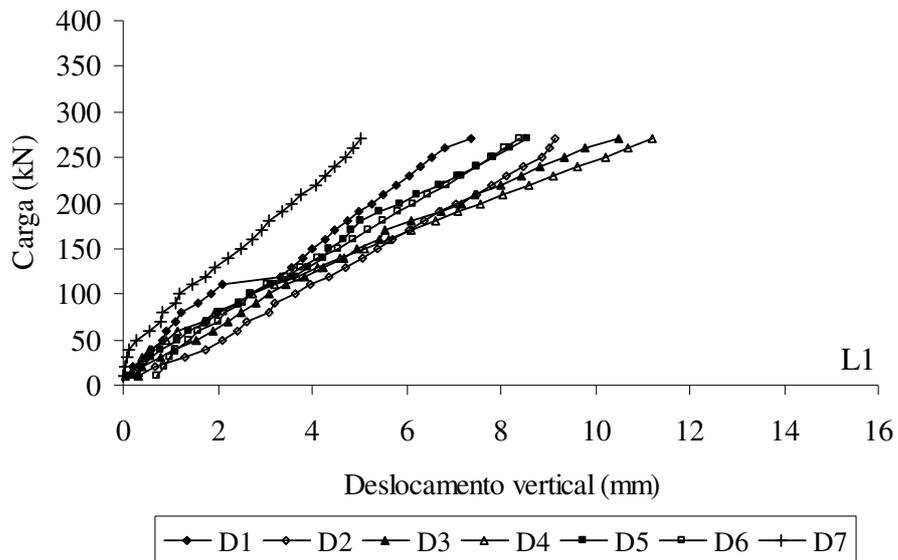


Figura 87 - Deslocamentos verticais na laje L1

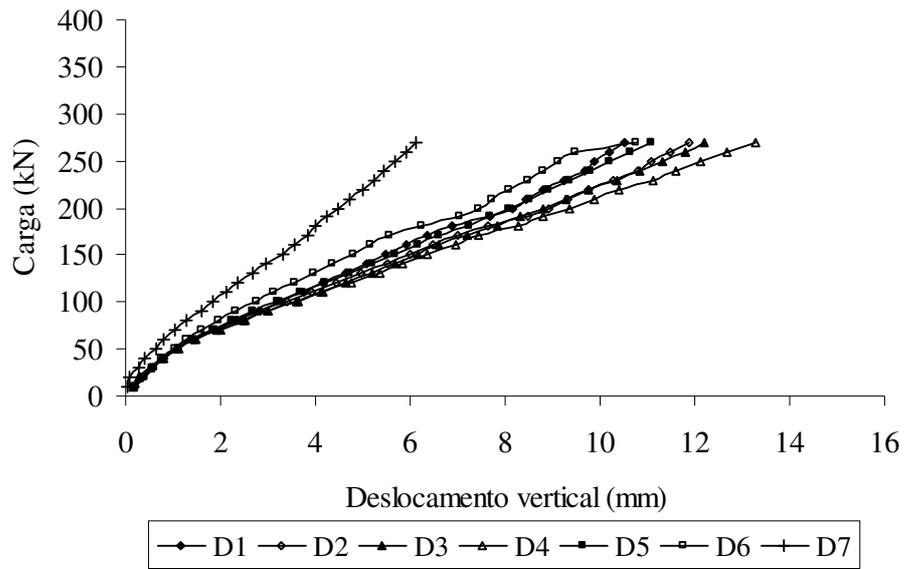


Figura 88 - Deslocamentos verticais na laje L2

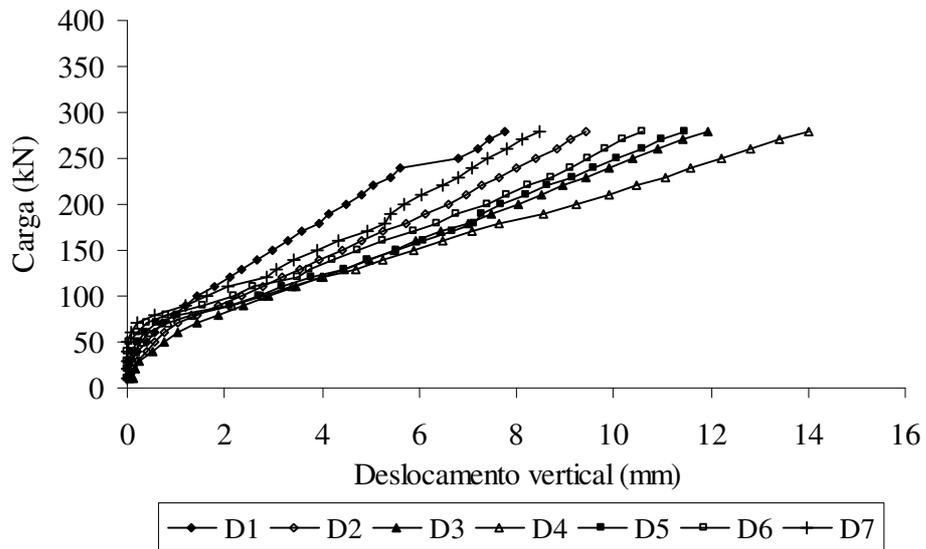


Figura 89 - Deslocamentos verticais na laje L3

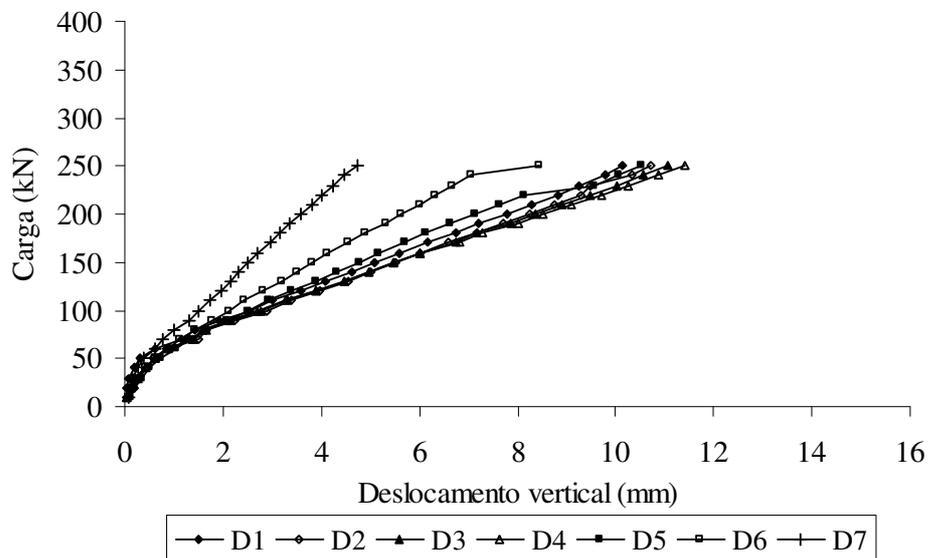


Figura 90 - Deslocamentos verticais na laje L4

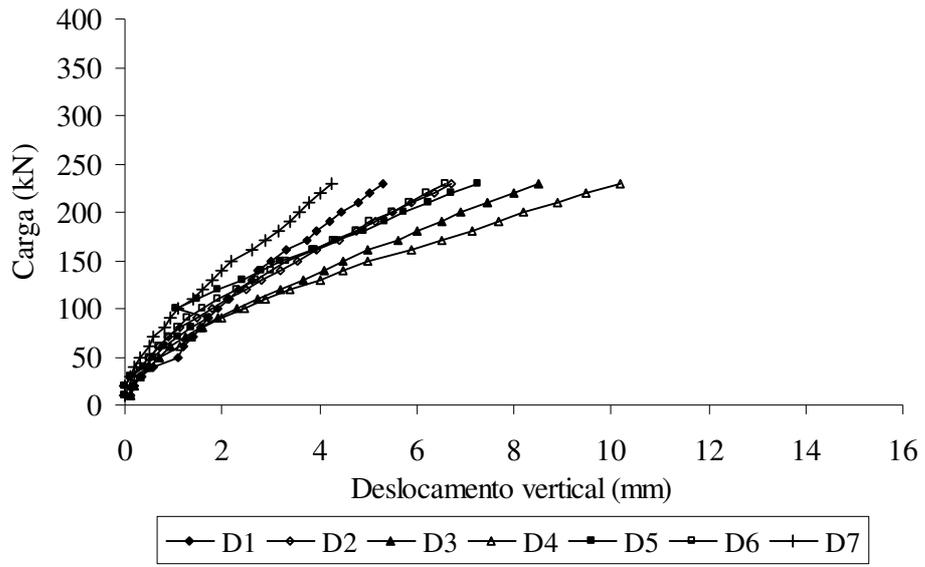


Figura 91 - Deslocamentos verticais na laje L5

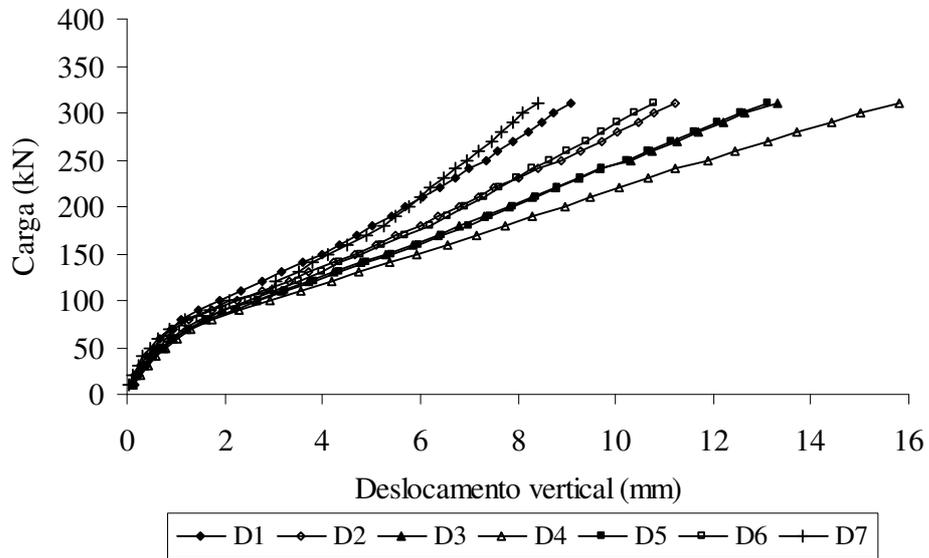


Figura 92 - Deslocamentos verticais na laje L6

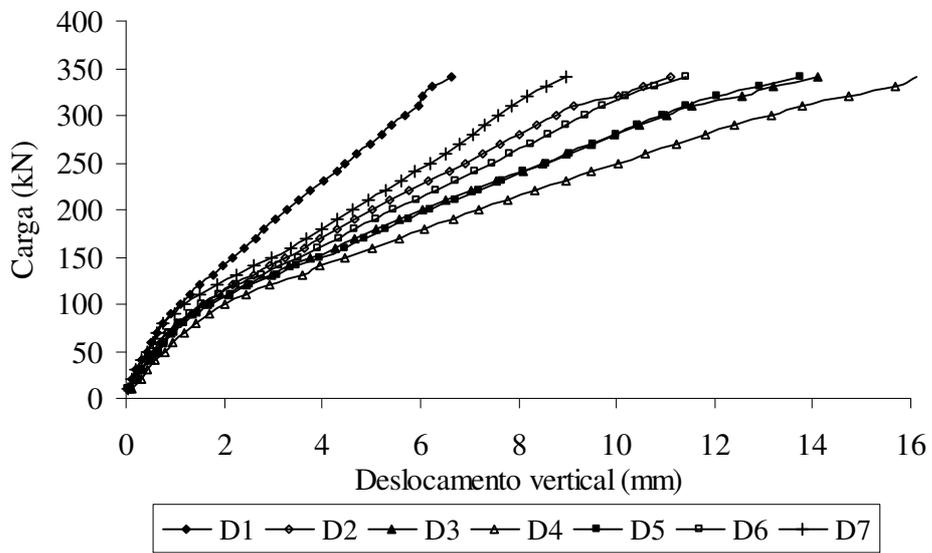


Figura 93 - Deslocamentos verticais na laje L7

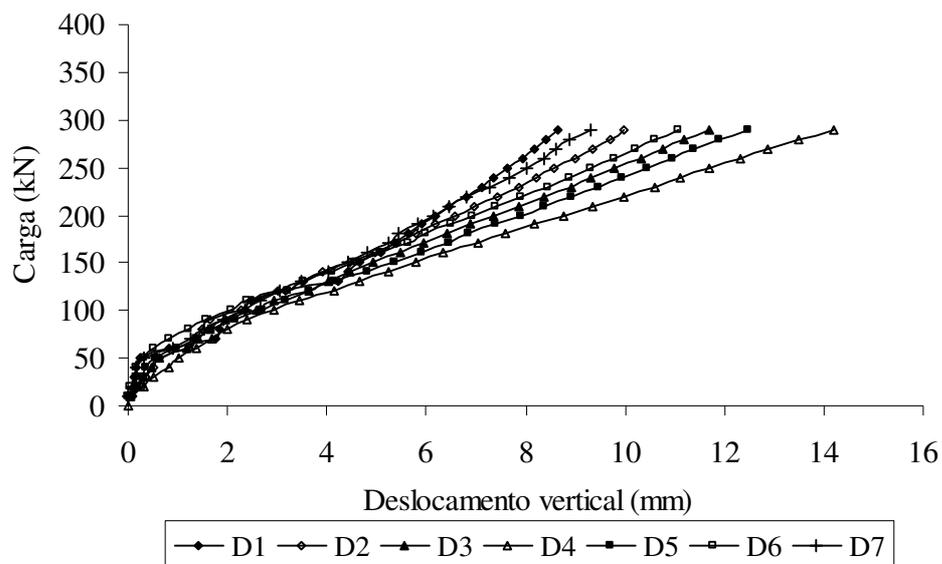


Figura 94 - Deslocamentos verticais na laje L8

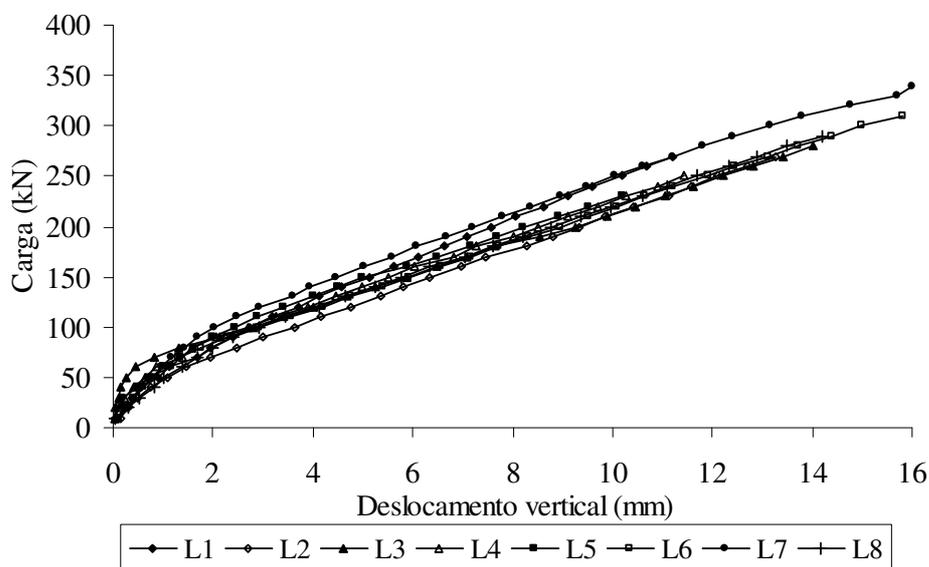


Figura 95 - Deslocamentos verticais centrais (D4) das lajes

Visando analisar os deslocamentos verticais das lajes em relação ao posicionamento dos deflectômetros, apresentam-se os gráficos das Figuras 96 a 103. O ponto 0 (zero) no eixo das abscissas indica o meio do vão das lajes, o lado negativo indica os deflectômetros posicionados na direção x das lajes (D1, D2 e D3) e o lado positivo, os posicionados na direção y (D5, D6 e D7).

Analisando a variação dos deslocamentos das lajes em relação às direções principais (x e y), observa-se que a laje de referência (L1) e as lajes sem armadura de punção (L2, L3 L4 e L5) se comportaram de maneira similar, com grandes acréscimos de deslocamentos entre os deflectômetros adjacentes à área carregada (D3 e D5) e o deflectômetro central (D4),

principalmente aquele posicionado na direção y (D5). De maneira geral os deslocamentos na direção y foram menores, comparados aos da direção x, indicando uma maior rigidez nesta direção. Em relação às lajes com armadura de punção (L6, L7 e L8), observa-se nos gráficos uma pequena variação entre os deslocamentos nas duas direções. Entretanto, estas três lajes apresentaram comportamentos diferentes. A Figura 101 mostra o gráfico com uma variação com tendência linear para a laje L6, enquanto que para a laje L7, o gráfico da Figura 102 mostra uma tendência logarítmica e para a laje L8, tendência de potência (Figura 103).

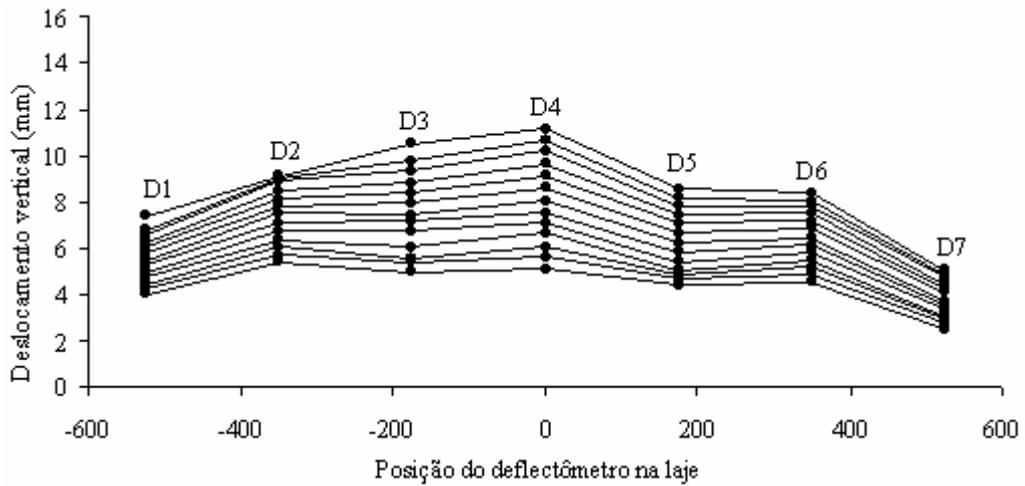


Figura 96 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L1)

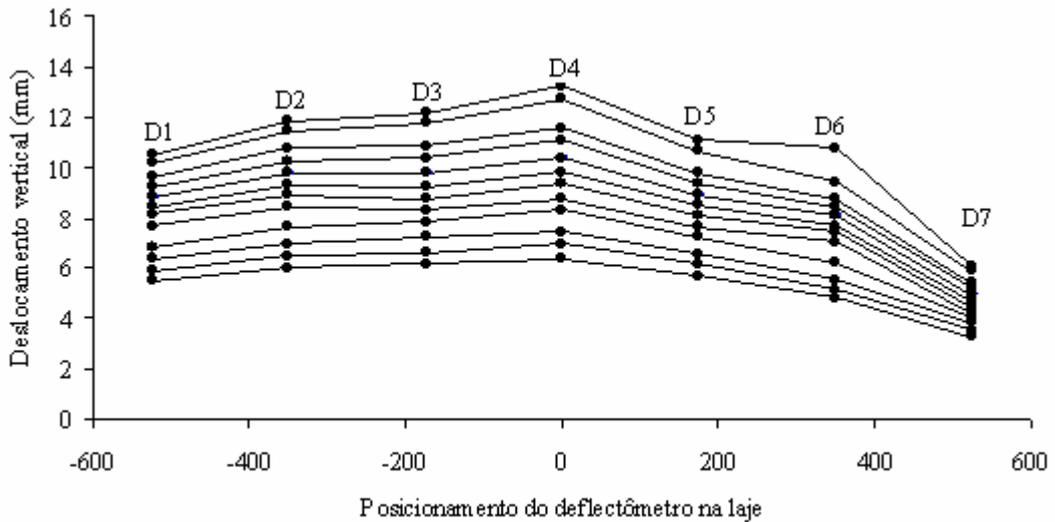


Figura 97 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L2)

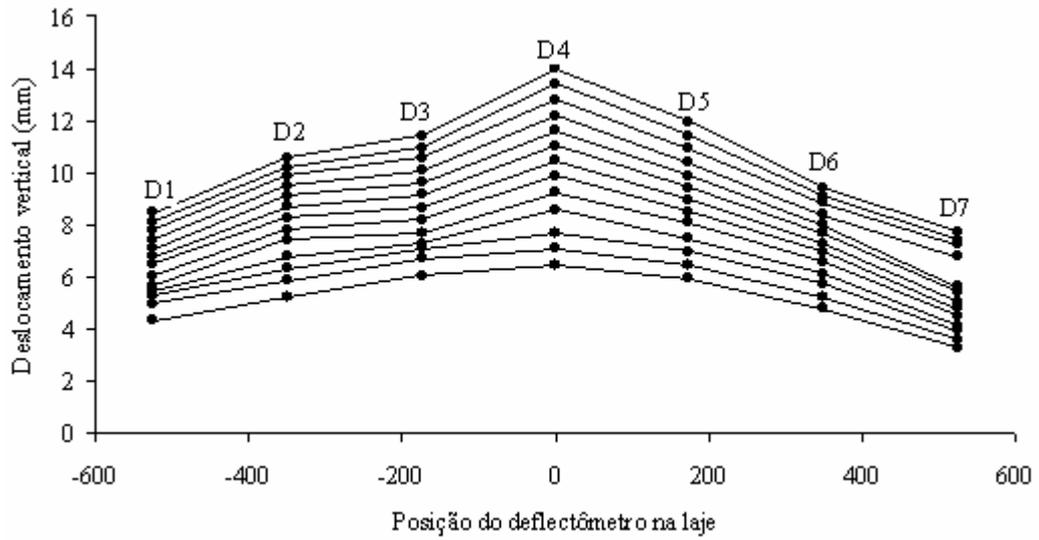


Figura 98 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L3)

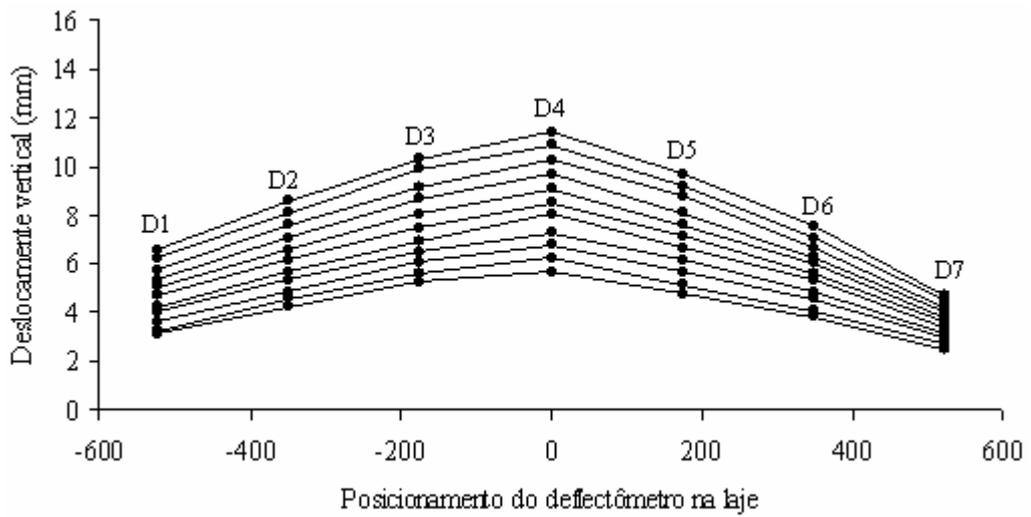


Figura 99 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L4)

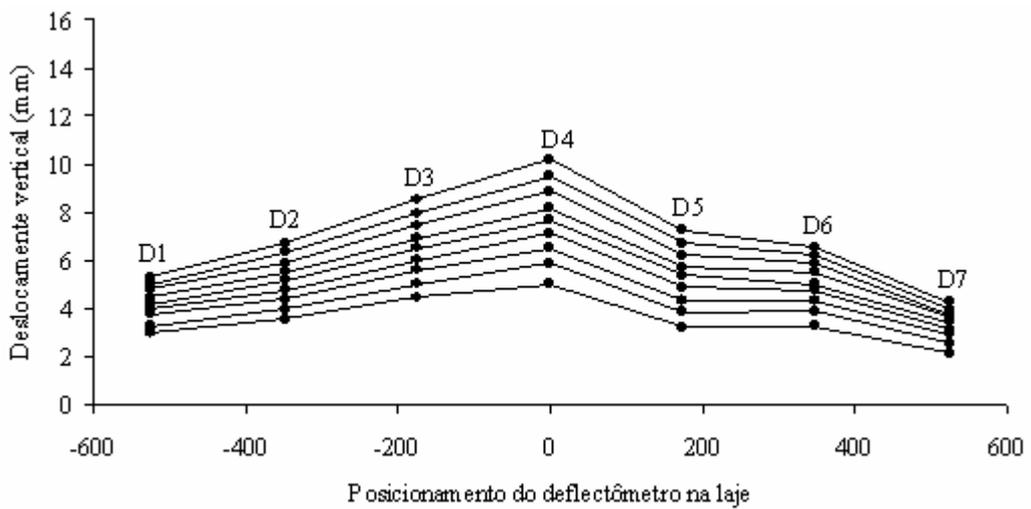


Figura 100 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L5)

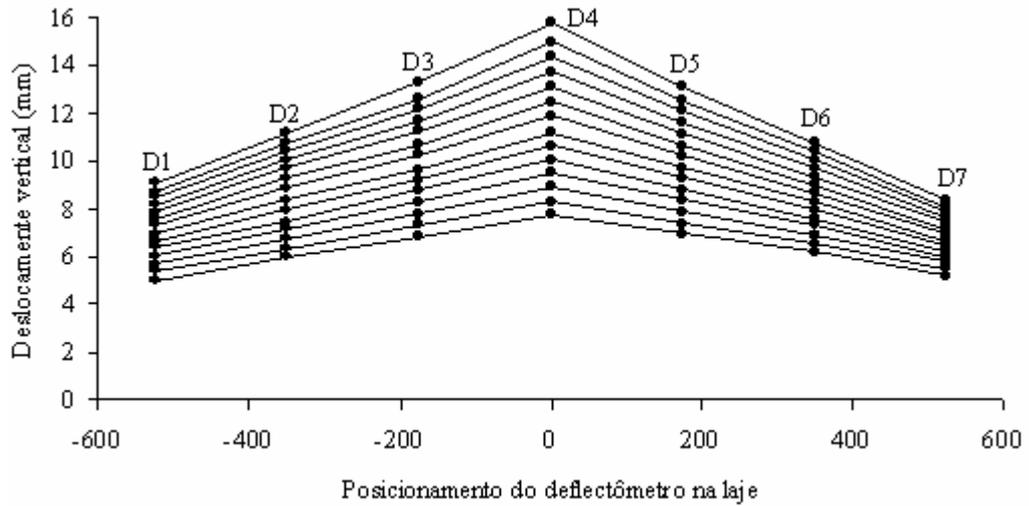


Figura 101 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L6)

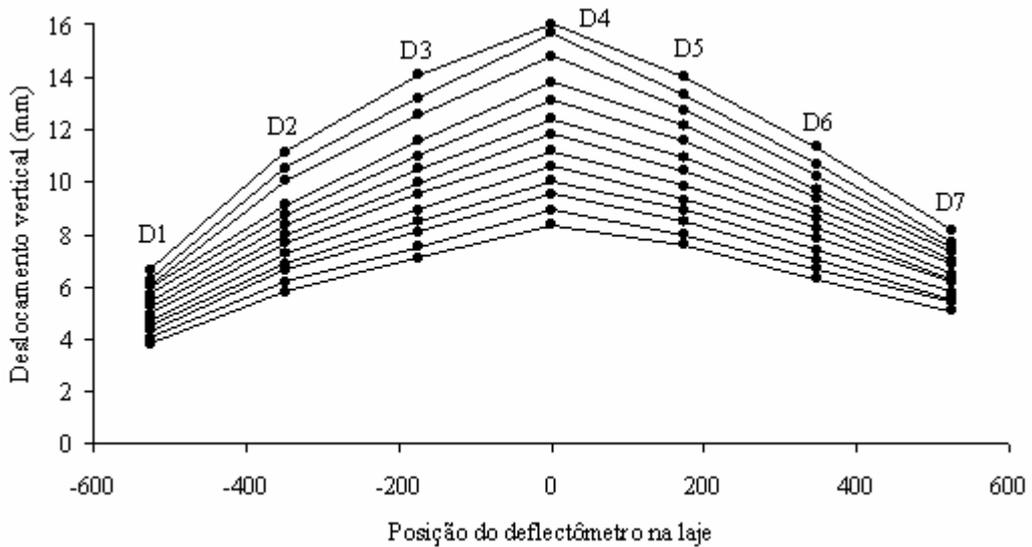


Figura 102 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L7)

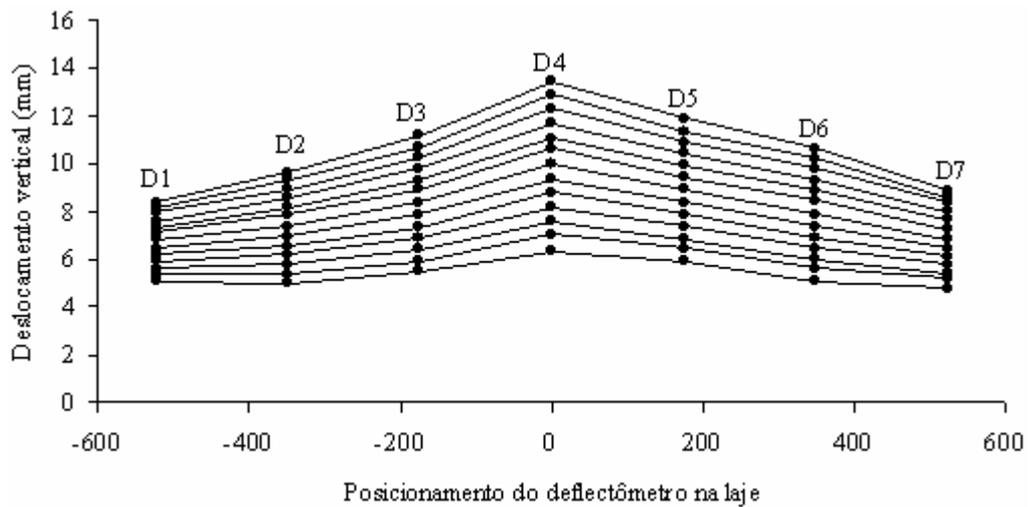


Figura 103 - Deslocamentos verticais em relação à posição dos defletores (L8)

4.3 Deformações no concreto

Os extensômetros usados para medir as deformações no concreto foram fixados na face inferior das lajes (região comprimida). Os posicionamentos para fixação dos extensômetros foram determinados de acordo com a variação das armaduras de cisalhamento nas nervuras (descritos no item 3.4.2). A Figura 104 mostra as posições dos extensômetros nas lajes.

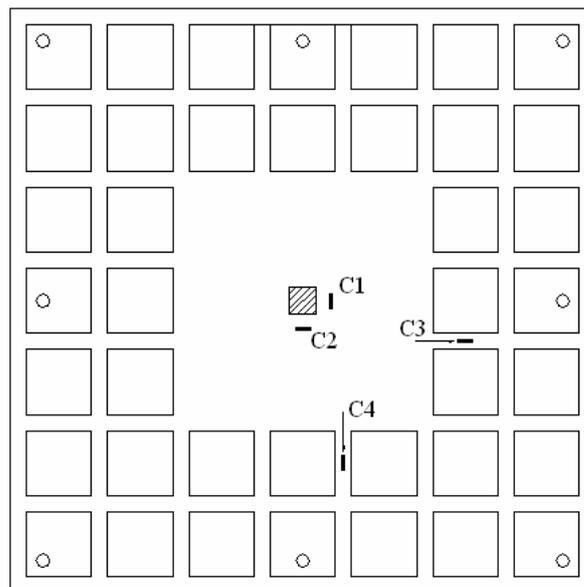


Figura 104 - Posicionamento dos extensômetros na superfície de concreto das lajes

Optou-se por medir apenas as deformações tangenciais na região maciça, pois são comprovadamente superiores às deformações radiais (OLIVEIRA, 1998 e SOARES, 2004). Entretanto, nas nervuras só foi possível medir as deformações radiais, pois a largura das nervuras (50 mm) não permitiu a fixação dos extensômetros na direção tangencial. As Figuras 105 a 112 mostram os gráficos carga x deformação do concreto para as lajes ensaiadas. Nos pontos instrumentados na região maciça, as lajes L6 e L7 foram as que apresentaram as maiores deformações (4,19‰ e 3,64‰, respectivamente), indicando a ocorrência do esmagamento do concreto nessa região das lajes. As deformações registradas nas nervuras (C3 e C4) foram bastante inferiores à deformação de esmagamento do concreto (3,5‰), confirmando que uma possível ruptura por esmagamento do concreto nas nervuras estivesse longe de ocorrer.

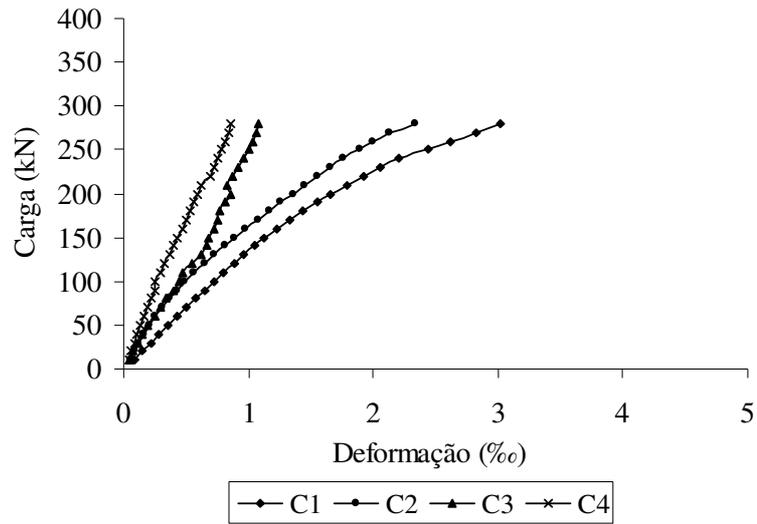


Figura 105 - Deformações medidas no concreto da laje L1

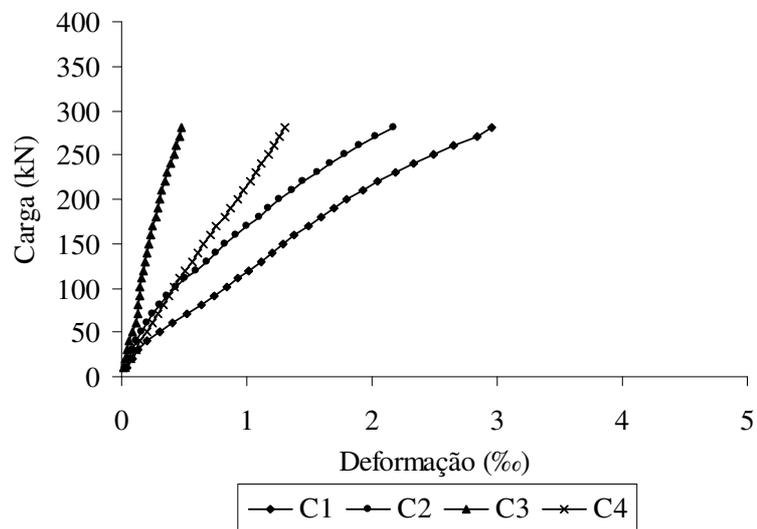


Figura 106 - Deformações medidas no concreto da laje L2

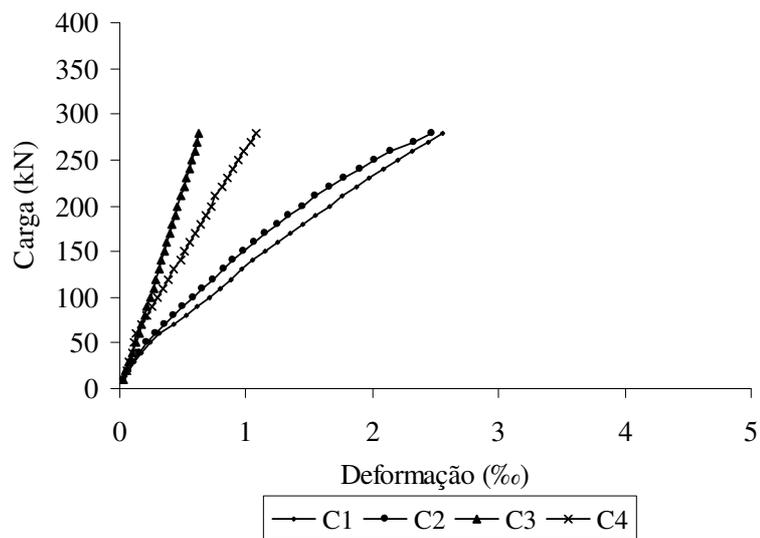


Figura 107 - Deformações medidas no concreto da laje L3

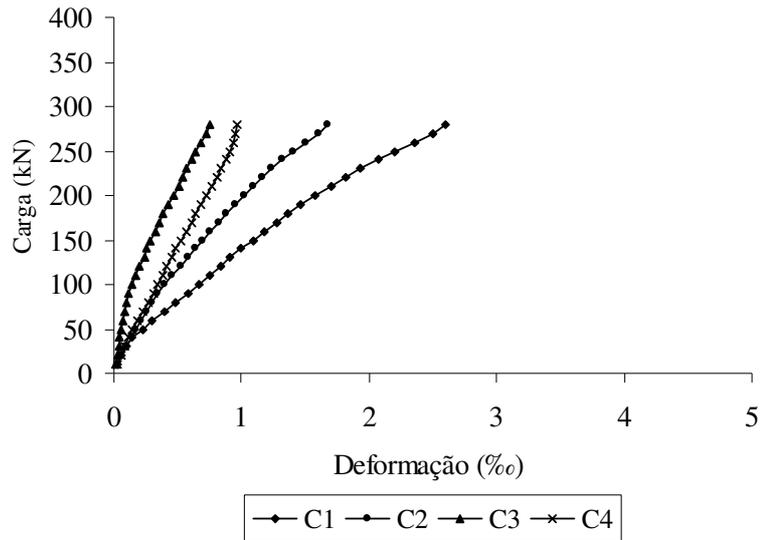


Figura 108 - Deformações medidas no concreto da laje L4

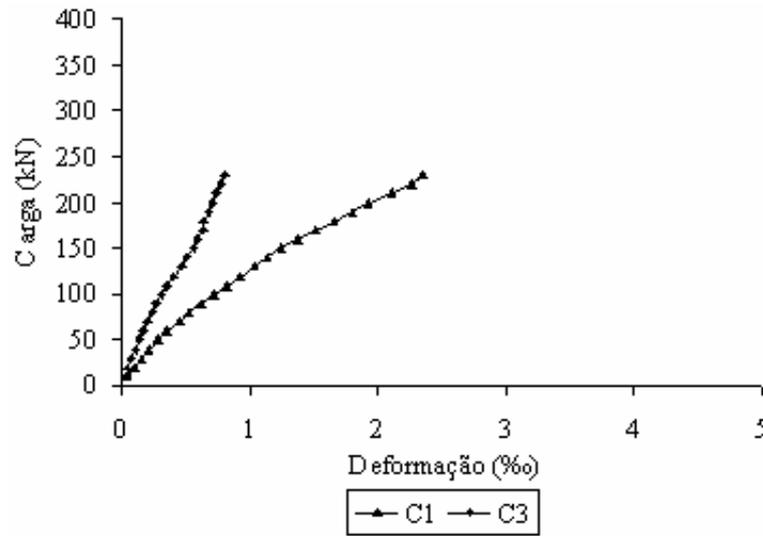


Figura 109 - Deformações medidas no concreto da laje L5

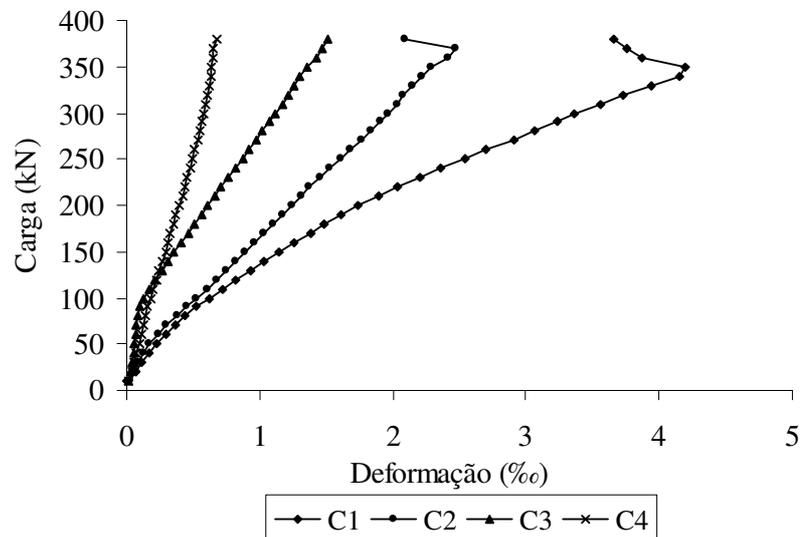


Figura 110 - Deformações medidas no concreto da laje L6

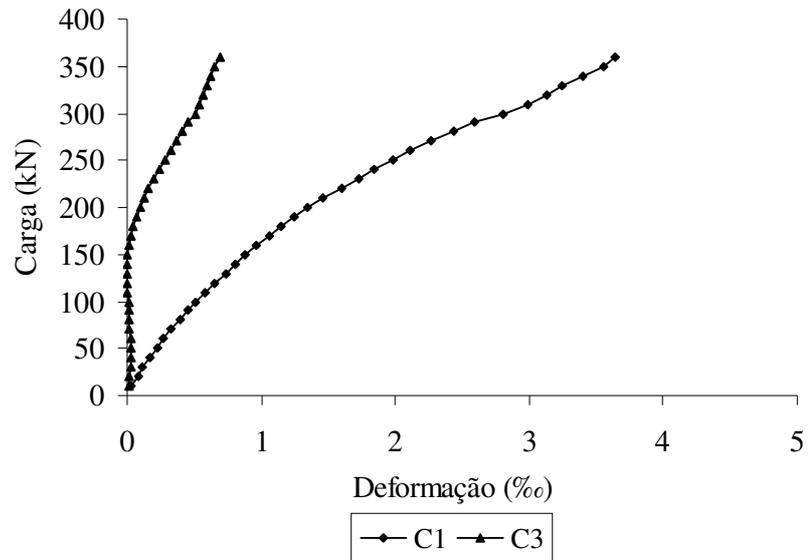


Figura 111 - Deformações medidas no concreto da laje L7

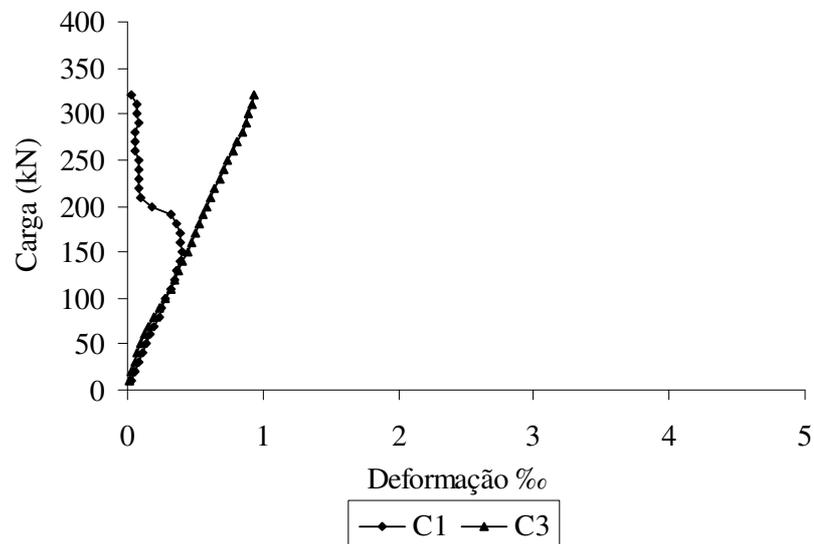


Figura 112 - Deformações medidas no concreto da laje L8

4.4 Deformações no aço

4.4.1 Armadura de flexão

Para analisar o comportamento das lajes através da deformação da armadura de flexão, instrumentou-se as armaduras nas direções principais (x e y), como mostra a Figura 113.

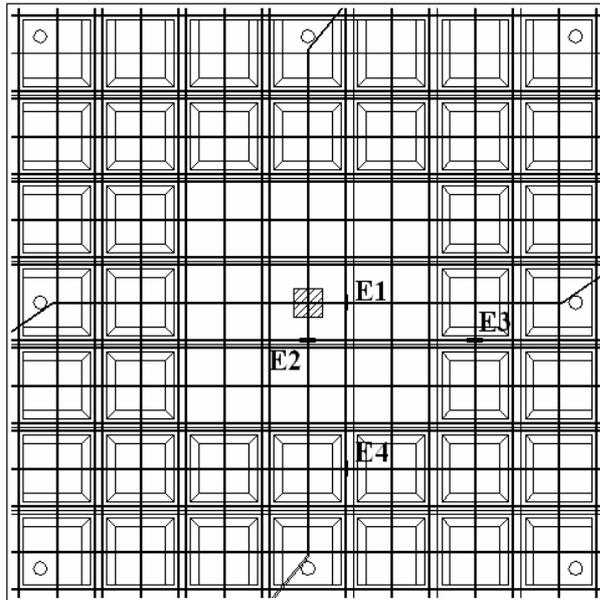


Figura 113 - Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão das lajes

As Figuras 114 a 121 apresentam as deformações das armaduras de flexão em relação à carga aplicada nas lajes. Observa-se que, como esperado, as maiores deformações foram registradas nas barras próximas ao pilar (E1 e E2), tendo sido 4,38‰ a máxima deformação alcançada, verificada na laje L7 (laje com armadura de punção). As deformações registradas nos pontos situados nas nervuras também foram mais significativas nas lajes com armadura de punção, cujo máximo valor foi registrado pelo extensômetro E3 da laje L6 (2,87‰). Observa-se também que as armaduras das lajes L1 (3,76‰), L2 (2,72‰), L6 (3,79‰) e L7 (4,38‰) atingiram o escoamento nos pontos monitorados na região maciça, atribuindo à estas lajes um comportamento típico de ruptura por flexão.

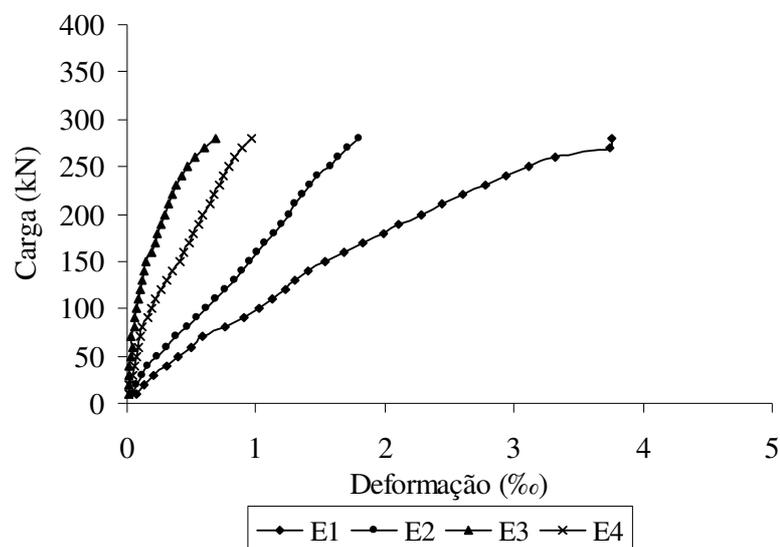


Figura 114 - Deformação da armadura de flexão da laje L1

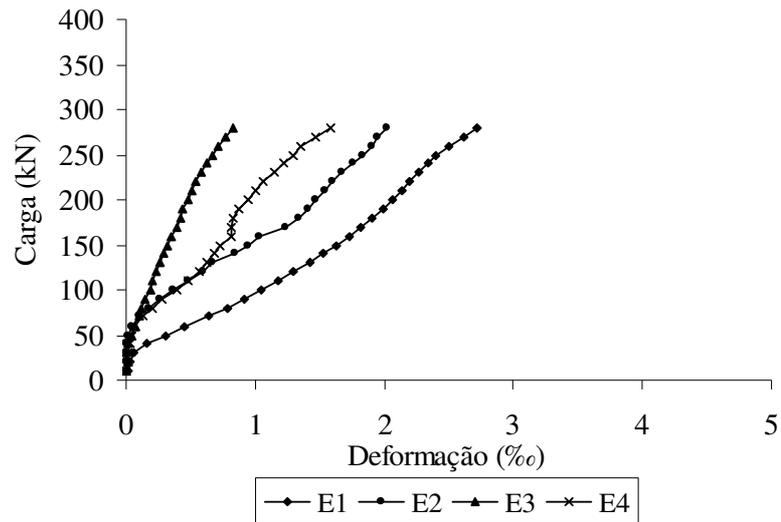


Figura 115 - Deformação da armadura de flexão da laje L2

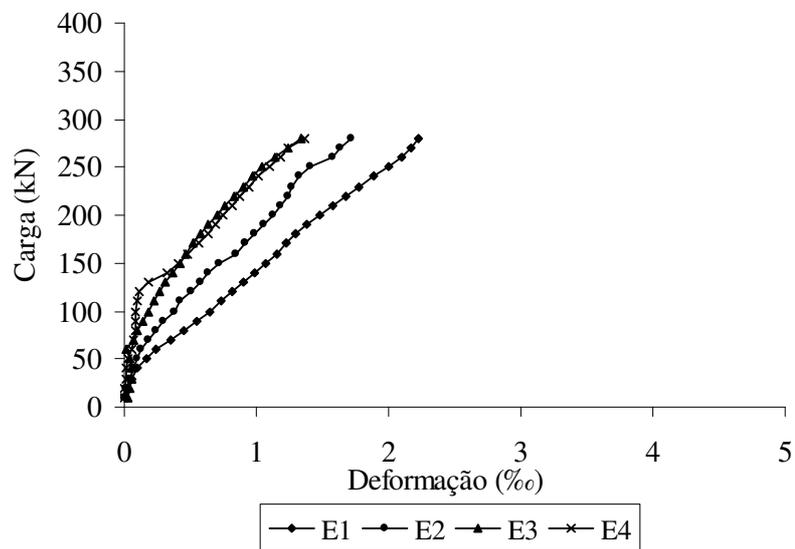


Figura 116 - Deformação da armadura de flexão da laje L3

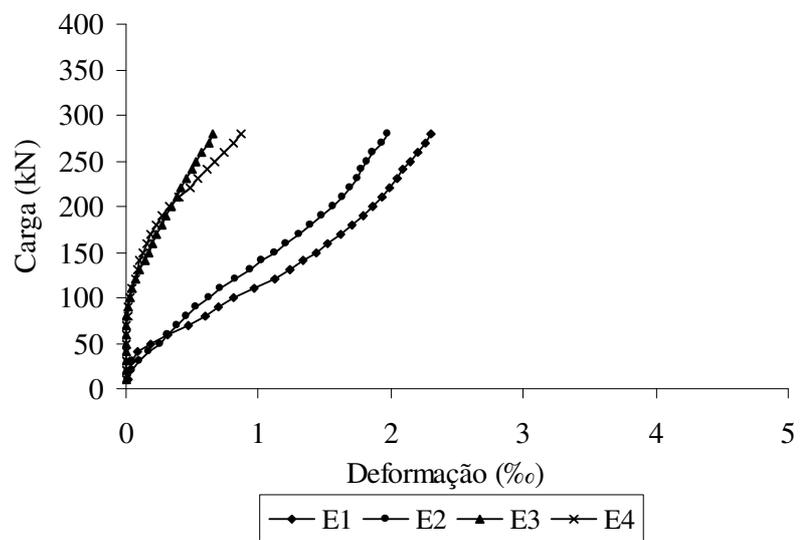


Figura 117 - Deformação da armadura de flexão da laje L4

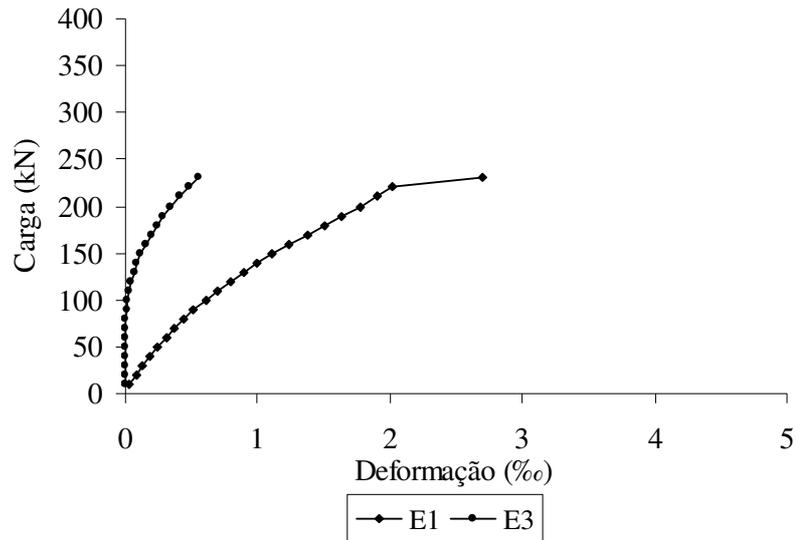


Figura 118 - Deformação da armadura de flexão da laje L5

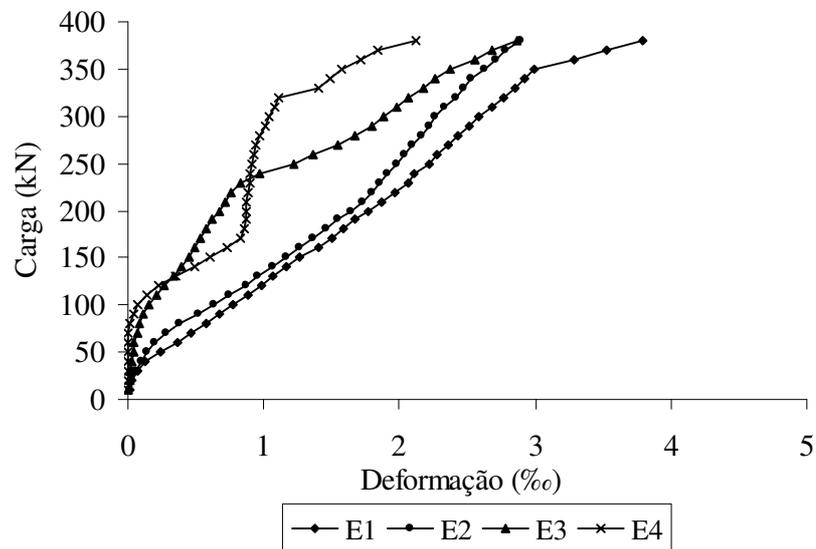


Figura 119 - Deformação da armadura de flexão da laje L6

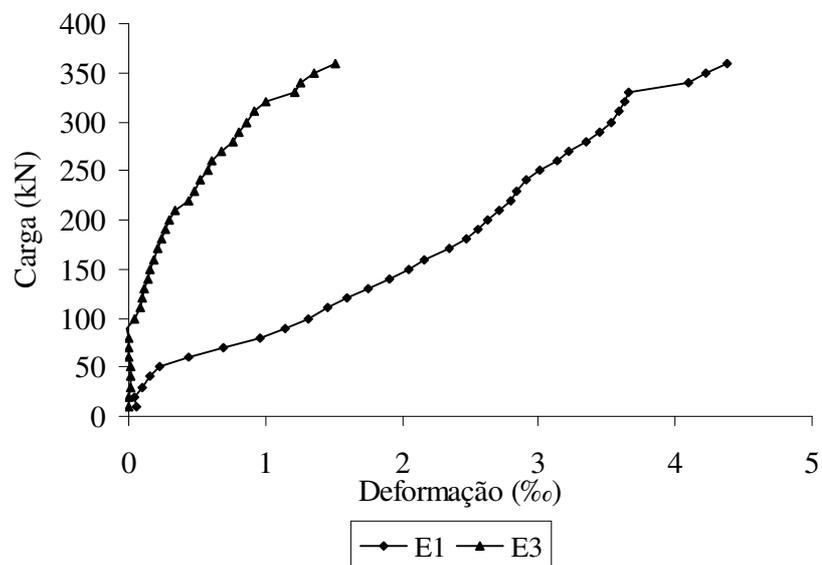


Figura 120 - Deformação da armadura de flexão da laje L7

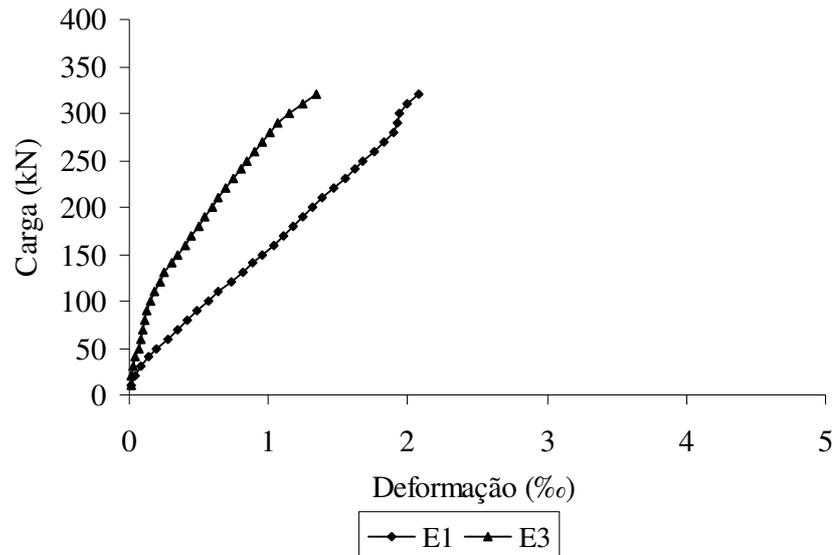


Figura 121 - Deformação da armadura de flexão da laje L8

4.4.2 Armadura de cisalhamento

Com o objetivo de analisar o desempenho das armaduras de cisalhamento nas nervuras e região maciça (treliças e estribos), foram monitoradas as deformações destas armaduras através de extensômetro posicionado na diagonal tracionada da treliça e em um dos ramos dos estribos (vertical e inclinado). A Figura 122 mostra o posicionamento das armaduras monitoradas nas lajes e um detalhe do posicionamento do extensômetro nas armaduras.

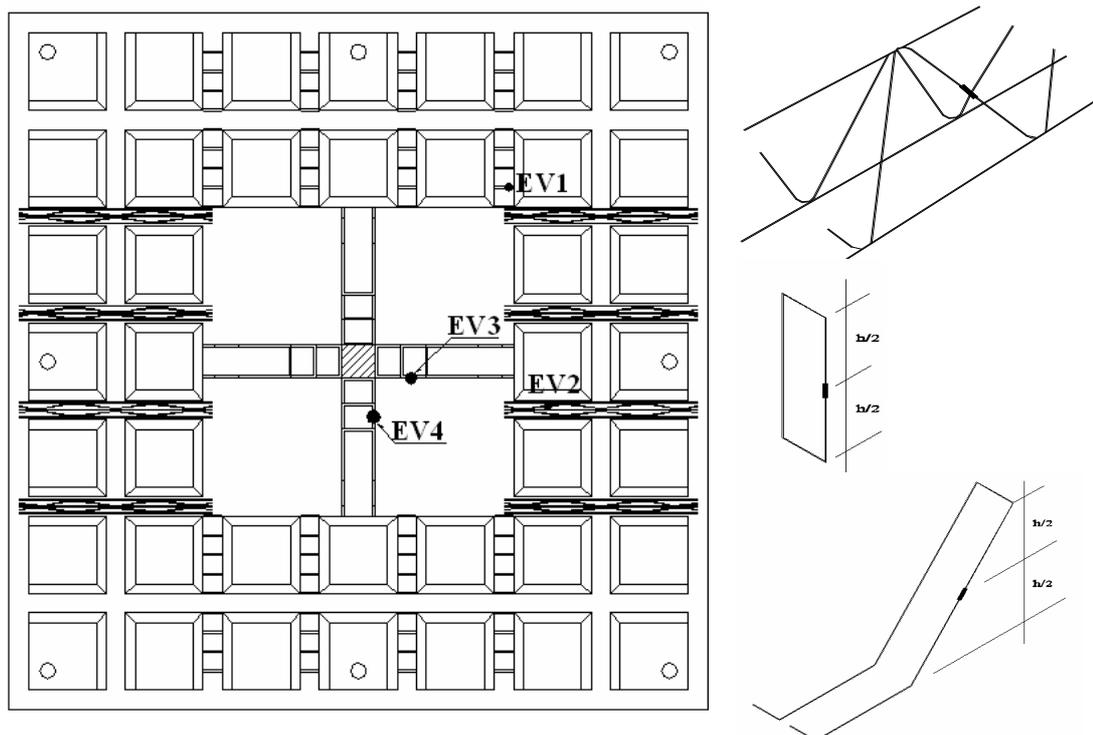


Figura 122 - Posicionamento dos extensômetros na armadura de cisalhamento das lajes

As deformações das armaduras de cisalhamento são mostradas nas Figuras 123 a 129. Através dos gráficos, pode-se observar que as deformações das armaduras de cisalhamento nas nervuras foram bem menores que a deformação de escoamento do aço ($\epsilon_{y_{sw}} = 4,7\%$), indicando que estas foram pouco solicitadas. Comparando-se as lajes L2, L3 e L4, que apresentavam como armadura de cisalhamento nas nervuras treliça na direção x e estribo vertical na direção y, observa-se que nas lajes L2 e L4, as deformações registradas na treliça e no estribo vertical foram bem próximas, o que leva a afirmar o melhor desempenho da armação inclinada (treliça) em relação à armadura vertical, visto que, a taxa de armadura desta última era 1,21 vezes maior que a da treliça. Já na laje L3 a deformação verificada no estribo foi o dobro da verificada na treliça. Esse comportamento pode estar associado ao fato da laje ter apresentado maiores deslocamentos verticais na direção y (mesma direção dos estribos verticais).

Nas lajes com mesmo tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras nas direções x e y, pode-se comparar as deformações registradas nos estribos verticais da laje L7 com as deformações dos estribos inclinados da laje L8. Observa-se que os estribos verticais apresentaram deformações inferiores aos estribos inclinados. Esse aumento na solicitação dos estribos inclinados vem confirmar a sua eficiência já que, neste caso, as duas lajes apresentaram a mesma taxa de armadura de cisalhamento. Porém esse melhor desempenho não refletiu no aumento da carga última em relação à laje L7, sendo 11% inferior, como será visto no item 4.6.

Em relação às armaduras de punção (estribo inclinado a 45°), apesar de terem sido bastante solicitadas, nenhum estribo apresentou escoamento (deformação maior que $4,4\%$), sendo a deformação máxima alcançada de $3,34\%$, verificada na laje L8 (laje com estribo inclinado nas nervuras), ou seja, a armadura de punção apresentou um melhor desempenho quando associada ao uso de estribo inclinado nas nervuras. Observa-se também, nos gráficos das Figuras 127 a 129, que com aproximadamente 80% da carga de ruptura, passaram a não deformar de maneira proporcional ao acréscimo de carga, indicando que o escoamento não estava longe de ocorrer e confirmando o ganho de ductilidade que as lajes obtiveram com a introdução da armadura de punção.

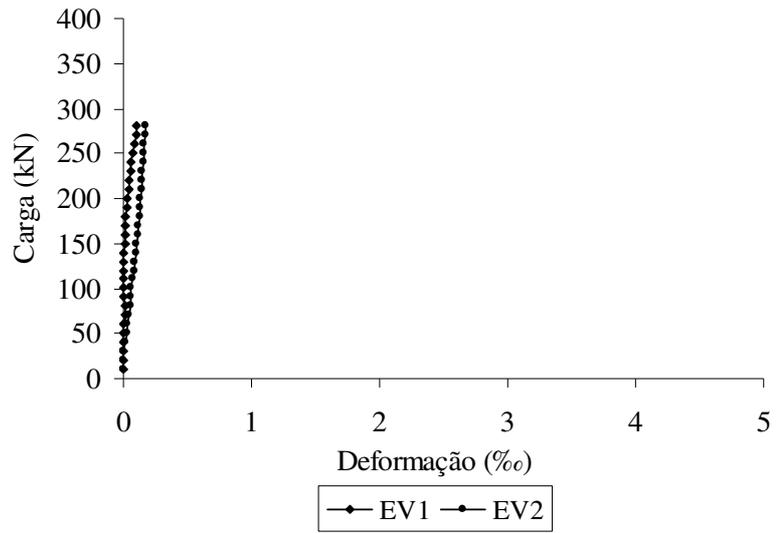


Figura 123 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L2

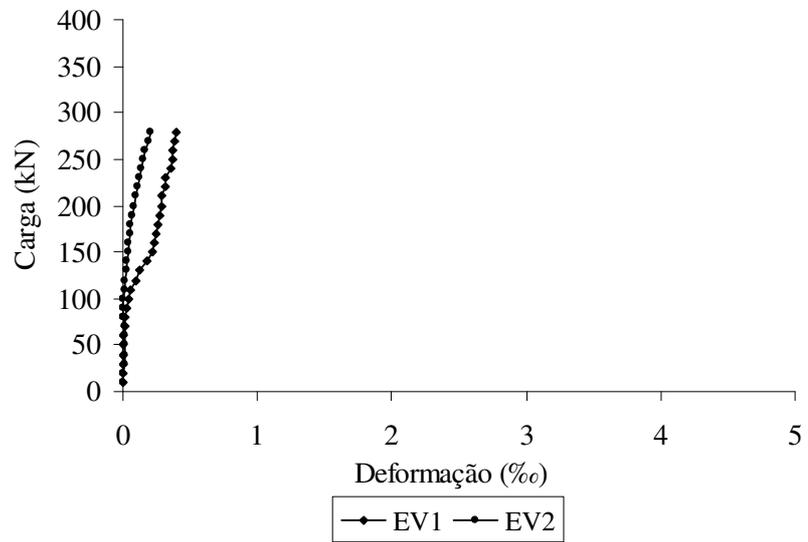


Figura 124 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L3

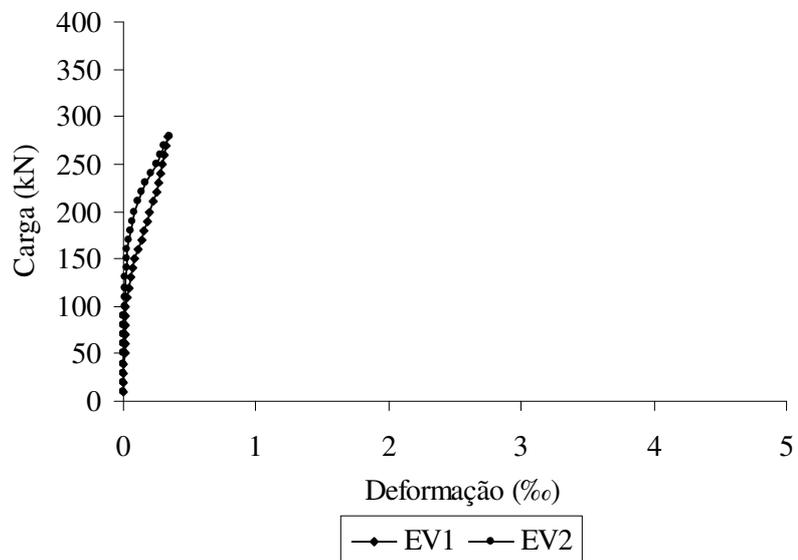


Figura 125 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L4

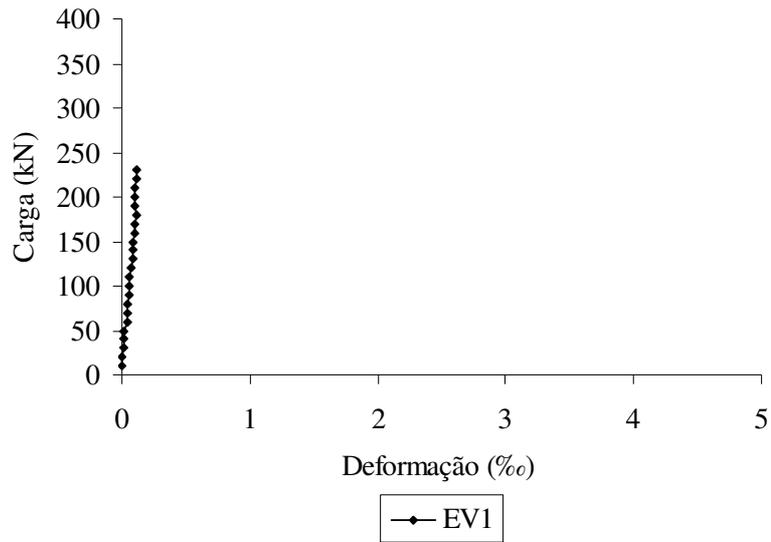


Figura 126 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L5

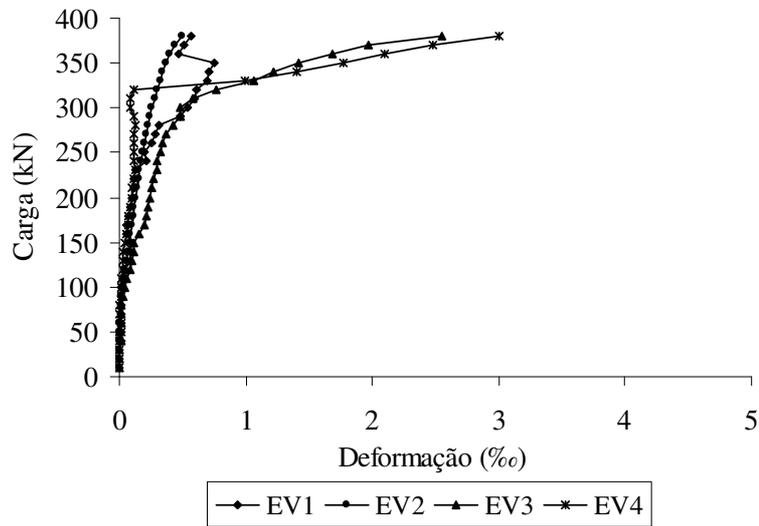


Figura 127 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L6

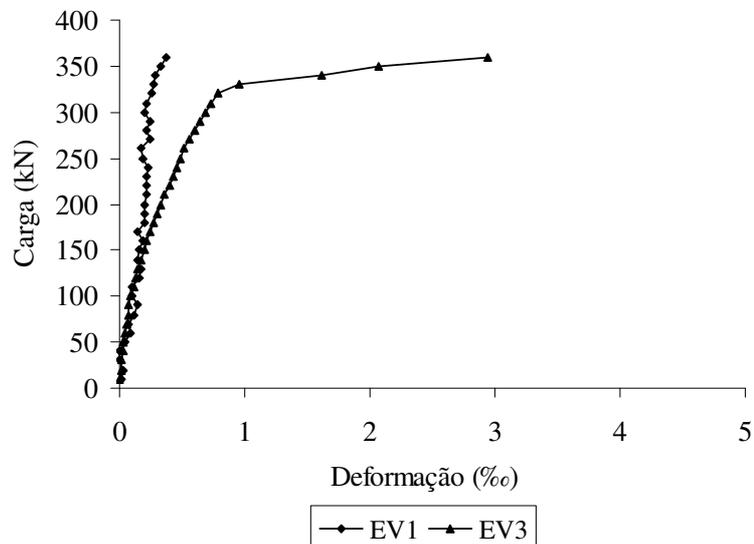


Figura 128 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L7

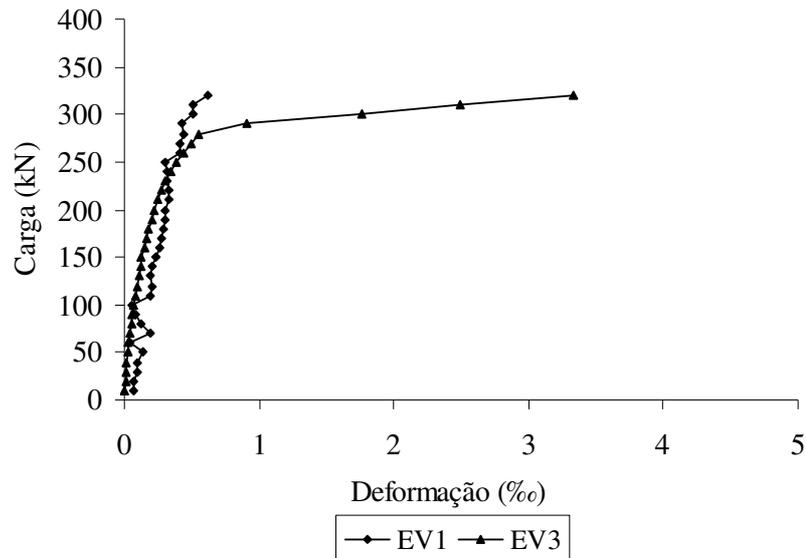


Figura 129 - Deformação da armadura de cisalhamento da laje L8

4.5 Padrão de fissuração

O desenvolvimento das fissuras se deu de forma semelhante em todas as lajes, surgindo primeiro as fissuras radiais a partir da extremidade do pilar em direção aos bordos da laje e em seguida, para níveis mais elevados de carga, surgiam as fissuras tangenciais. Observou-se que neste estágio já não surgem mais fissuras radiais, apenas aumentando a abertura daquelas já existentes.

A formação das fissuras foi acompanhada a cada incremento de carga, de maneira que o padrão de fissuração observado contribuiu na análise do comportamento das lajes. Nas lajes com armadura de cisalhamento apenas nas nervuras, a primeira fissura radial surgiu com aproximadamente 19% da carga de ruptura, enquanto que para as lajes com armadura de punção, esse percentual reduziu pra 8%. Em virtude das lajes com armadura de punção terem começado a fissurar primeiro, observa-se, nas Figuras 130 a 137, que o numero de fissuras aumentou nas lajes com este tipo de armadura, comprovando o aumento da ductilidade proporcionado pelo uso da armadura de punção.

Nas lajes cujo modo de ruptura (item 4.6) foi classificado como flexão (L1, L2, L6 e L7), observa-se uma tendência das fissuras se desenvolverem longitudinalmente, ou seja, paralelas aos bordos das lajes. Enquanto que nas demais lajes, as fissuras se estendiam radialmente em direção aos bordos.

Com o progresso do carregamento, ocorre sobre a superfície superior das lajes, a formação das fissuras tangenciais, as quais foram mais evidentes nas lajes com armadura de punção (L6, L7 e L8). Cabe ressaltar que nesse momento as fissuras radiais existentes são interligadas pelas tangenciais e que tão logo surgem as fissuras tangenciais, as fissuras radiais deixam de surgir e passam a sofrer prolongamento e aumento em sua abertura. Neste estágio, existe a possibilidade de visualização da formação do cone de punção, decorrente da formação de uma fissura inclinada.



Figura 130 - Padrão de fissuração da laje L1

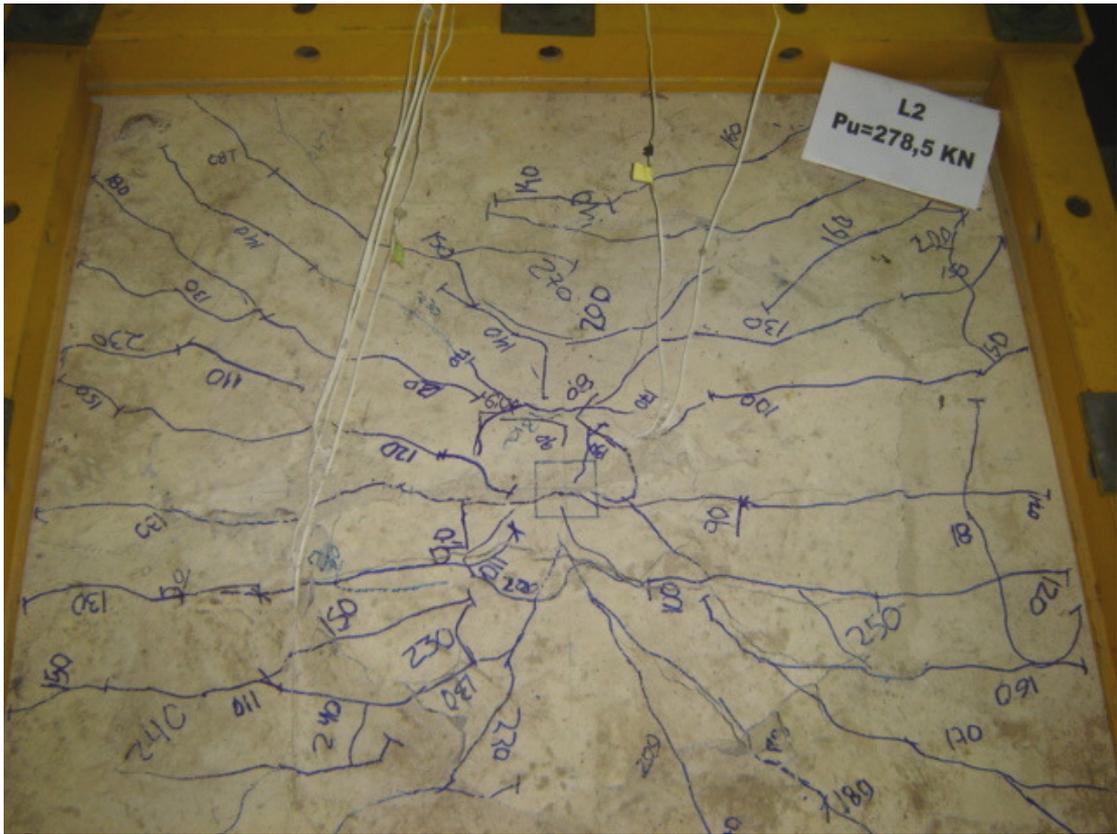


Figura 131 - Padrão de fissuração da laje L2

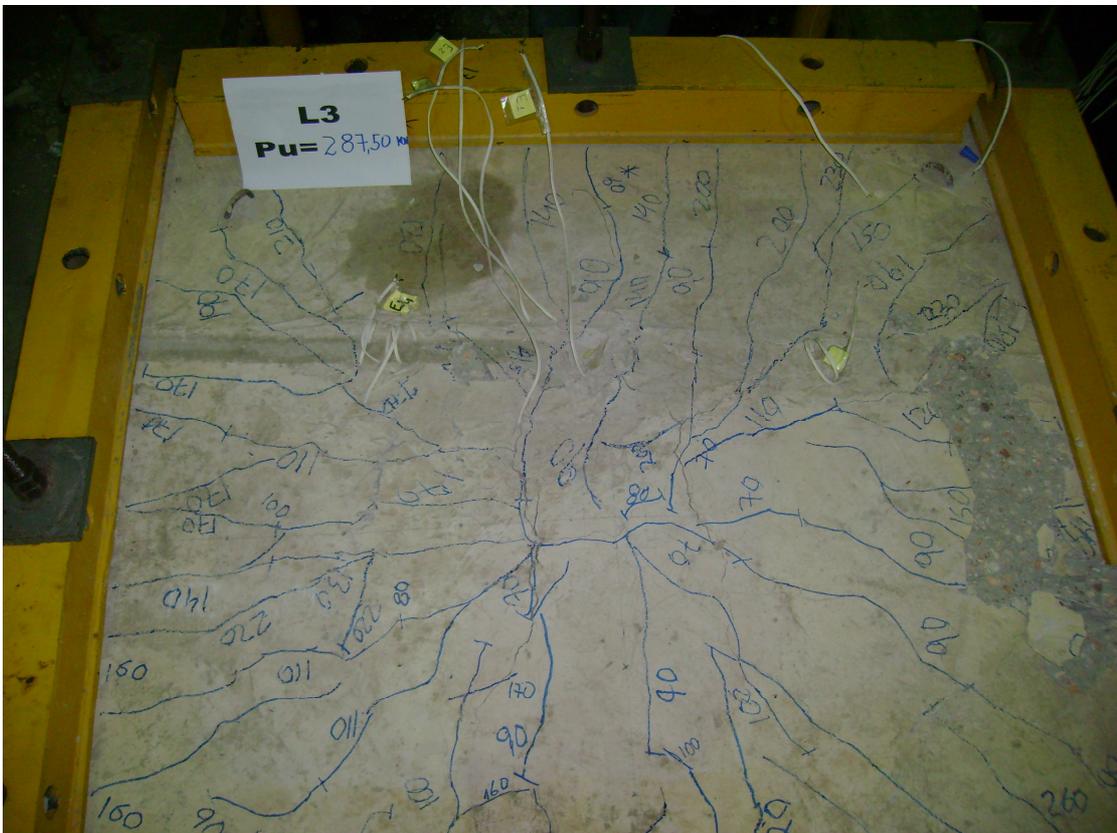


Figura 132 - Padrão de fissuração da laje L3



Figura 133 - Padrão de fissuração da laje L4



Figura 134 - Padrão de fissuração da laje L5



Figura 135 - Padrão de fissuração da laje L6

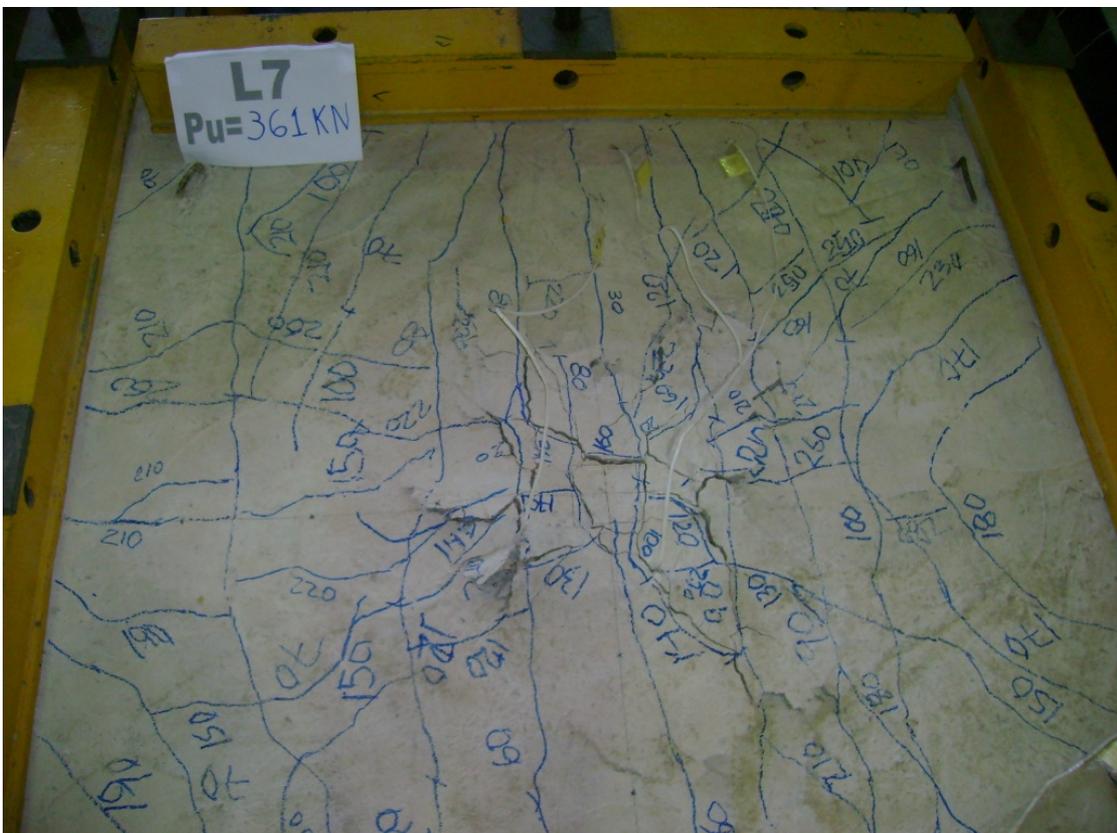


Figura 136 - Padrão de fissuração da laje L7

e estribo inclinado como armadura de punção. Entretanto, analisando qualitativamente o desempenho das lajes L6, L7 e L8 (lajes que alcançaram as maiores resistências) através das cargas últimas, dos deslocamentos verticais, das deformações e do padrão de fissuração, observa-se que a laje L8 apresentou um comportamento mais rígido, comprovando a eficiência dos estribos inclinados, apesar da redução da carga última em 15% em relação à carga última máxima alcançada nesta pesquisa. Esse fato pode ser atribuído à rápida perda de resistência nos últimos passos de carregamento desta laje, impedindo que a mesma ultrapassasse a resistência já atingida.

Tabela 13 - Cargas últimas e modos de ruptura observados

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	P_u (kN)	Modo de Ruptura Observado
L1	120	1,27	36,6	280,0	Flexão
L2	106	1,44	37,8	278,5	Flexão
L3	111	1,37	41,4	287,5	Punção
L4	118	1,29	39,2	287,0	Punção
L5	115	1,33	37,9	235,0	Punção
L6	104	1,47	39,8	380,0	Flexão
L7	112	1,36	40,9	361,0	Flexão
L8	108	1,41	39,0	322,0	Punção

Para definir o modo de ruptura das lajes, utilizou-se parâmetros que permitiram identificar os casos de punção predominante e flexão combinada com punção. Esses parâmetros estão relacionados à deformação da armadura de flexão, deformação da superfície de concreto e padrão de fissuração.

No dimensionamento das lajes, os modos de ruptura previstos foram punção e cisalhamento nas nervuras. Entretanto, após os ensaios, observou-se que algumas lajes tiveram o modo de ruptura diferente do previsto, sendo que nenhuma laje apresentou ruptura por cisalhamento nas nervuras. As lajes L1, L2, L6 e L7 apresentaram modo de ruptura por flexão. Esta classificação foi baseada na análise das deformações das armaduras de flexão, as quais, para estas lajes, chegaram ao escoamento, e também nos padrões de fissuração verificados, que apresentaram um nível bastante elevado. Posteriormente estas lajes apresentaram ruína por punção, já que ficou evidente a formação do cone de punção. Nas lajes L6 e L7, que possuíam armadura que punção, ficou evidente que o efeito deste tipo de armadura retarda a ruptura por punção. As demais lajes romperam por punção, com características de uma ruptura brusca.

Quanto aos ângulos da superfície de ruptura das lajes, estes foram determinados a partir de uma análise feita após o término dos ensaios. Esta análise foi baseada primeiramente na aplicação de carga após o término do ensaio, para que a superfície de ruptura ficasse mais evidente. Em seguida foi feita a medição da superfície de ruptura externa e posterior remoção da camada de concreto solta. Nesse estágio foi possível verificar a tendência do ângulo da fissura inclinada que formou o cone de ruptura, através do cruzamento entre a fissura e a altura útil, a partir do qual a fissura passou a se estender acima da armadura de flexão. A Figura 138 mostra estas etapas de medição da superfície de ruptura formada após o carregamento pós-ruptura. Pode-se observar na face inferior da laje mostrada na Figura 139, que a superfície de ruptura se inicia no contorno da placa a qual o carregamento era aplicado. Este comportamento foi verificado em todas as lajes, como pode ser visto nas Figuras 140 a 147.



Figura 138 - Determinação da inclinação da superfície de ruptura



Figura 139 - Superfície de ruptura na face inferior das lajes

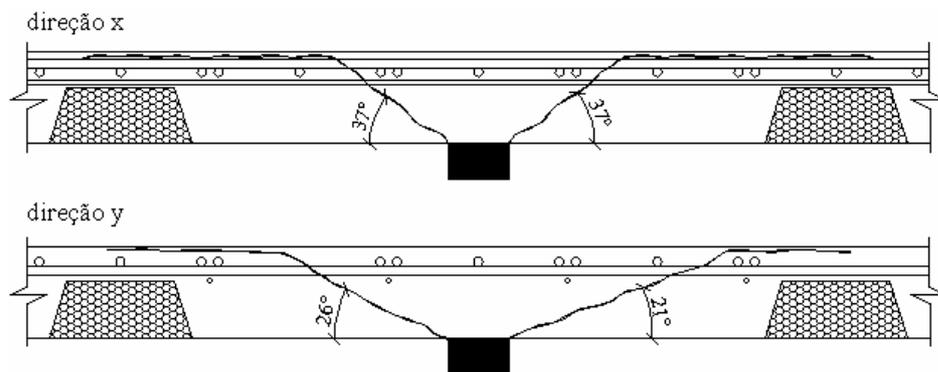


Figura 140 - Inclinação do cone de ruptura da laje L1

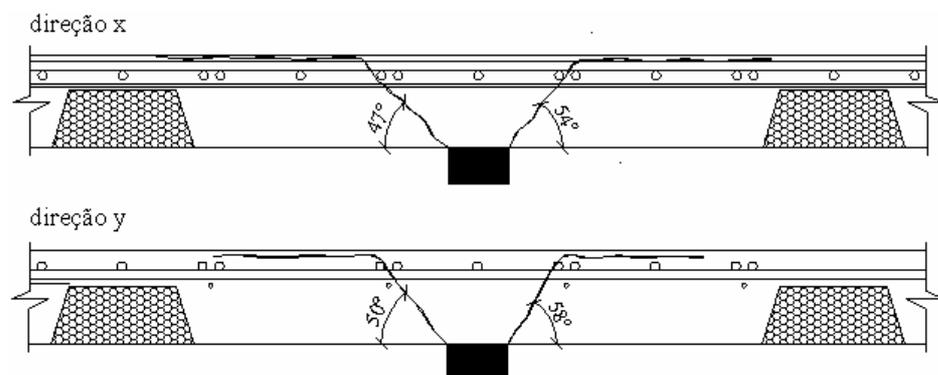


Figura 141 - Inclinação do cone de ruptura da laje L2

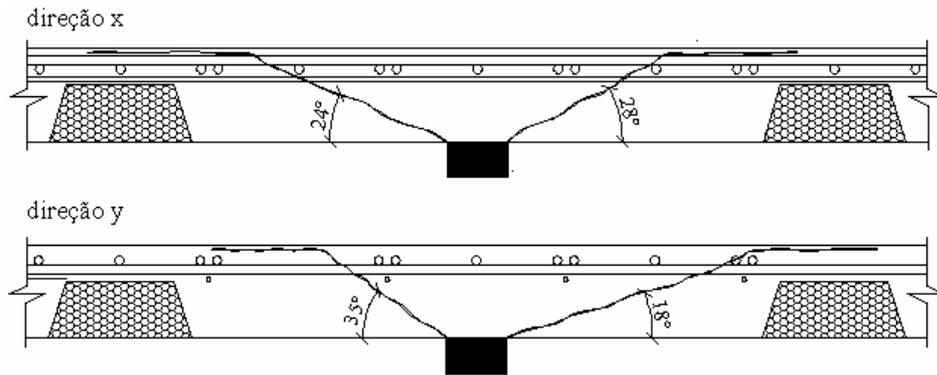


Figura 142 - Inclinação do cone de ruptura da laje L3

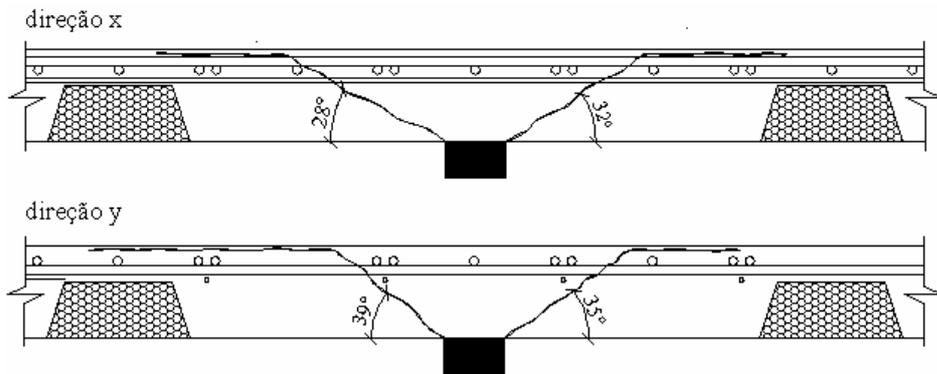


Figura 143 - Inclinação do cone de ruptura da laje L4

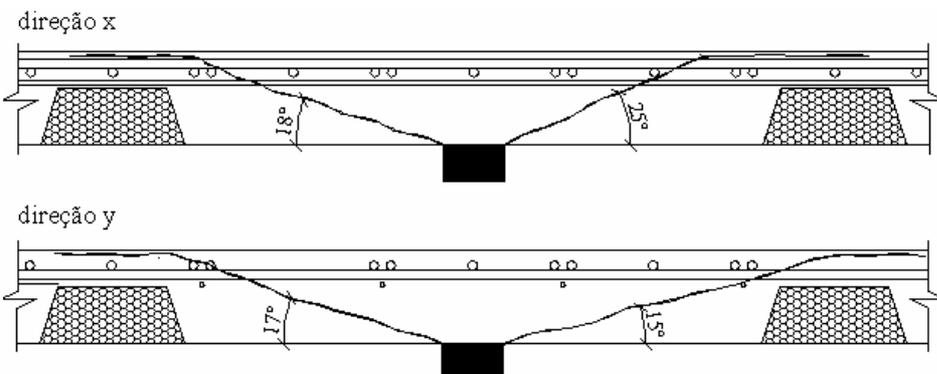


Figura 144 - Inclinação do cone de ruptura da laje L5

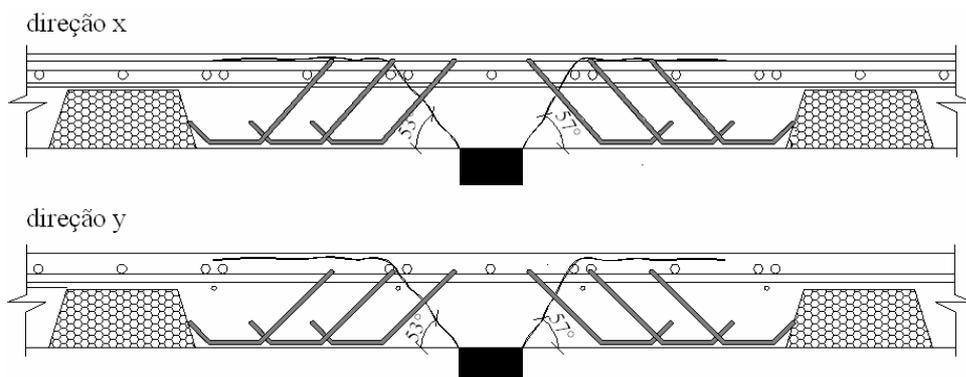


Figura 145 - Inclinação do cone de ruptura da laje L6

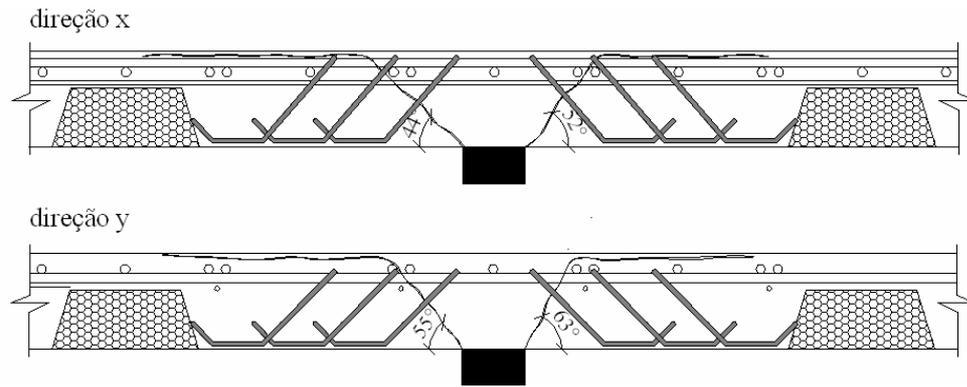


Figura 146 - Inclinação do cone de ruptura da laje L7

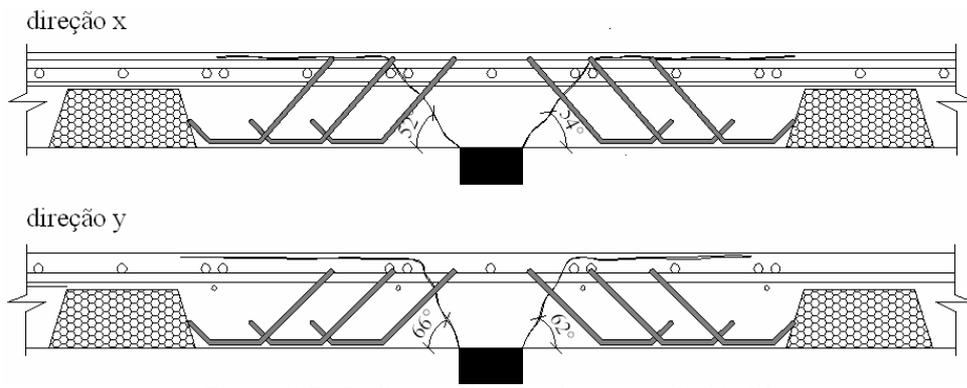


Figura 147 - Inclinação do cone de ruptura da laje L8

Pode-se observar que a utilização da armadura de punção exerceu grande influência na inclinação do cone interno, com a linha de ruptura atravessando a região transversalmente armada. Comparando-se, por exemplo, as lajes L5 e L7, as quais apresentaram o mesmo tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras, a laje sem armadura de punção apresentou em média o cone inclinado a 18°, enquanto que a laje com este tipo de armadura, apresentou o cone inclinado em 53°, em média. Outro fato interessante está relacionado ao ângulo de inclinação do cone de ruptura da laje L2, por ser uma laje sem armadura de punção e apresentar comportamento semelhante ao das lajes com este tipo de armadura, ou seja, com a inclinação da superfície de ruptura bem mais elevada. Esse comportamento pode ser justificado devido ao fato de que na laje L2 as treliças usadas como armadura de cisalhamento nas nervuras atravessavam a região maciça, contribuindo para uma maior inclinação da superfície de ruptura.

5 ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS

Neste capítulo é mostrada uma comparação entre os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa para carga última e os estimados de acordo com as expressões normativas apresentadas no capítulo 2, para resistência ao cisalhamento nas nervuras e resistência à punção na região maciça. Também é feita uma comparação entre a resistência à flexão obtida através da teoria das linhas de ruptura e as resistências últimas obtidas nos ensaios. É importante ressaltar que nas estimativas, foram obedecidas as restrições quanto ao limite de escoamento do aço, as equações foram utilizadas sem os devidos coeficientes de segurança e a resistência do concreto à compressão obtida nos ensaios foi admitida como a resistência característica do concreto ($f_c = f_{ck}$).

Para avaliar a capacidade resistente ao cisalhamento de lajes lisas nervuradas, foram utilizadas as recomendações das normas ACI 318M (ACI, 2002), MC90 (CEB-FIP, 1993) e NBR 6118 (ABNT, 2003) com a finalidade de discutir a precisão das expressões normativas quanto a esta verificação. Em relação a resistência à flexão, esta foi determinada através da utilização da teoria da linhas de ruptura.

5.1 Resistência ao cisalhamento nas nervuras

5.1.1 ACI 318M (ACI, 2002)

Observa-se na Tabela 14 e na Figura 148 que a estimativa apresentada para laje de referência (L1) é muito conservadora, subestimando a capacidade resistente deste modelo em 2,73 vezes a carga última obtida experimentalmente. É importante ressaltar que, apesar desta diferença entre os resultados estimado e experimental, esta laje não rompeu por cisalhamento nas nervuras (modo de ruptura previsto) indicando que a segurança seria ainda maior para este tipo de ruptura. Esse resultado pode ser justificado devido ao fato de que a expressão simplificada recomendada pela norma para esta estimativa, considera apenas a resistência do concreto à compressão, desprezando a resistência proporcionada pela armadura de flexão, ocasionando resultado a favor da segurança com coeficiente bem maior que o 1,4 recomendado por esta norma. Para as lajes com armadura de cisalhamento, aquelas constituídas por armação treliçada, também apresentaram estimativas

conservadoras, fato atribuído ao espaçamento entre as diagonais tracionadas da treliça, visto que ao se comparar a laje L4 (com armação treliçada) e a laje L5 (com estribo vertical), cujos parâmetros como f_c e d são bem aproximados, observa-se que a laje L5 apresentou estimativa 1,88 vezes maior que a laje L4, para um espaçamento entre as armaduras de cisalhamento 4 vezes menor. Ao se comparar as lajes com estribo vertical e inclinado, verifica-se que a norma superestima, principalmente, as lajes com estribo vertical, prevendo uma carga até duas vezes maior que a registrada no ensaio (laje L5). A exemplo das lajes com estribo vertical, a laje com estribo inclinado nas nervuras (L8) também apresentou carga experimental inferior à estimativa para uma ruptura por cisalhamento nas nervuras. Apesar dos resultados estimados diferirem substancialmente dos experimentais, estes resultados, a princípio, estão corretos, pois nenhuma dessas lajes rompeu por cisalhamento nas nervuras, indicando que este tipo de ruptura ocorreria com uma carga mais elevada que as obtidas nos ensaios.

Tabela 14 - Resultados estimados para resistência ao cisalhamento de acordo com o ACI 318

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Armadura de cisalhamento nas nervuras	V (kN)	P_u (kN)	P_u/V	Modo de Ruptura observado
L1	120	1,27	36,6	-	102,4	280,0	2,73	Flexão
L2	106	1,44	37,8	Treliça	222,7	278,5	1,25	Flexão
L3	111	1,37	41,4	Treliça	234,4	287,5	1,23	Punção
L4	118	1,29	39,2	Treliça	250,5	287,0	1,15	Punção
L5	115	1,33	37,9	Estribo vertical	472,6	235,0	0,50	Punção
L6	104	1,47	39,8	Treliça	221,9	380,0	1,71	Flexão
L7	112	1,36	40,9	Estribo vertical	478,1	361,0	0,76	Flexão
L8	108	1,41	39,0	Estribo inclinado	378,9	322,0	0,85	Punção

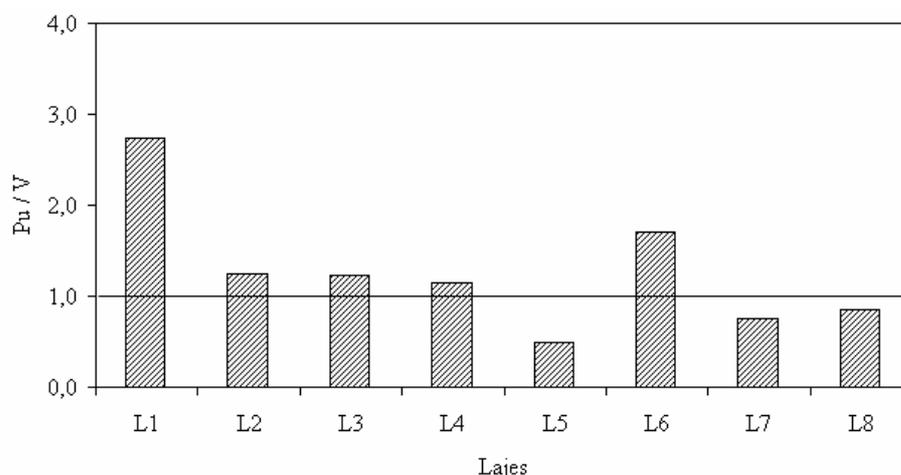


Figura 148 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo ACI 318 para ruptura por cisalhamento nas nervuras

5.1.2 MC90 (CEB-FIP, 1993)

Seguindo as recomendações do MC90 para determinação da resistência última ao cisalhamento em lajes nervuradas, a laje sem armadura de cisalhamento (L1) foi verificada como laje e como viga e as lajes com este tipo de armadura foram verificadas apenas como vigas, através das solicitações das diagonais comprimidas e tracionadas, conforme mostrado no capítulo 2.

Assumindo como carga última estimada, a mais desfavorável, ou seja, a menor dentre os valores encontrados, a laje L1 apresentou ruptura como laje. Já as demais lajes, em sua totalidade, apresentaram ruptura por tração diagonal inclinada a 30°. As estimativas obtidas através das recomendações do MC90 apresentadas na Tabela 15, se mostraram bastante conservadoras para a maioria das lajes. Apenas a laje L5 apresentou resultado experimental inferior aos estimado, ou seja, contra a segurança, conforme pode ser visto na Figura 149. Comparando-se as lajes com mesmo detalhamento quanto à armadura de cisalhamento nas nervuras (L4 = L6 e L5 = L7), pode-se observar a influência da altura útil neste dimensionamento, visto que as lajes L4 e L6, por apresentarem uma considerável diferença neste parâmetro, apresentaram cargas de ruptura estimadas bastante distintas entre si. Enquanto que, as lajes L5 e L7 apresentaram valores para alturas úteis e cargas últimas bem aproximados. Para os casos em que as nervuras eram constituídas por treliças, cujas estimativas foram bastante inferiores aos resultados experimentais, observa-se o bom desempenho deste tipo de armadura, já que, a ruptura deveria ter ocorrido por cisalhamento nas nervuras, o que não foi verificado nos ensaios. Para a segunda situação, onde o resultado estimado se mostrou contra a segurança (L5), observa-se que a utilização dos estribos nas nervuras foi penalizada, pois proporcionaram uma resistência média estimada 2,18 vezes maior que a da laje de referência, a qual não foi alcançada nos ensaios. Entretanto, esta laje não rompeu por cisalhamento nas nervuras, apresentado ruptura por punção, com uma carga bem menor que a estimada, reduzindo a capacidade resistente das lajes ao cisalhamento.

Tabela 15 - Resultados estimados para resistência ao cisalhamento de acordo com o MC90

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Armadura de cisalhamento nas nervuras	V (kN)	P_u (kN)	P_u/V	Modo de Ruptura observado
L1	120	1,27	36,6	-	147,9	280,0	1,89	Flexão
L2	106	1,44	37,8	Treliça	97,4	278,5	2,86	Flexão
L3	111	1,37	41,4	Treliça	106,9	287,5	2,69	Punção
L4	118	1,29	39,2	Treliça	119,5	287,0	2,40	Punção
L5	115	1,33	37,9	Estribo vertical	322,1	235,0	0,73	Punção
L6	104	1,47	39,8	Treliça	99,3	380,0	3,83	Flexão
L7	112	1,36	40,9	Estribo vertical	322,5	361,0	1,12	Flexão
L8	108	1,41	39,0	Estribo inclinado	215,7	322,0	1,49	Punção

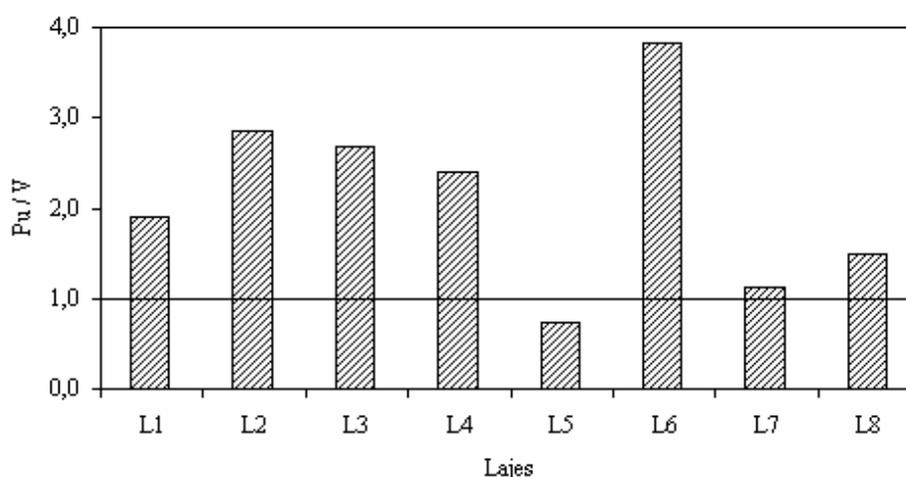


Figura 149 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo MC90 para ruptura por cisalhamento nas nervuras

5.1.3 NBR 6118 (ABNT, 2003)

A exemplo das demais normas, os resultados estimados através da NBR 6118 e os obtidos experimentalmente, para cargas últimas, apresentaram divergências. As lajes nervuradas foram verificadas ao cisalhamento como viga e como laje, sendo considerado sempre o menor valor entre os estimados. Para a laje de referência (L1) a resistência última foi demasiadamente subestimada para uma ruptura como viga, com a laje alcançando, no ensaio, praticamente o dobro da resistência estimada, como pode ser visto na Tabela 16 e na Figura 150. As demais lajes também apresentaram estimativas bastante inferiores aos resultados experimentais, em média 44%, indicando, neste caso, a ocorrência de uma ruptura por tração diagonal nas nervuras (Modelo II, $\theta = 45^\circ$), o que não foi verificado nos ensaios. Para as lajes que, além da armadura de cisalhamento nas nervuras, apresentaram armadura de punção (L6, L7 e L8), essa disparidade foi bem maior, resultando em

cargas estimadas aproximadamente 2 vezes menores que as experimentais, uma vez que a contribuição da armadura de punção não é considerada neste dimensionamento.

Tabela 16 - Resultados estimados para resistência ao cisalhamento de acordo com a NBR 6118

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Armadura de cisalhamento nas nervuras	V (kN)	P_u (kN)	P_u/V	Modo de Ruptura observado
L1	120	1,27	36,6	-	143,8	280,0	1,95	Flexão
L2	106	1,44	37,8	Treliça	182,0	278,5	1,53	Flexão
L3	111	1,37	41,4	Treliça	192,8	287,5	1,49	Punção
L4	118	1,29	39,2	Treliça	207,4	287,0	1,38	Punção
L5	115	1,33	37,9	Estribo vertical	175,2	235,0	1,34	Punção
L6	104	1,47	39,8	Treliça	184,8	380,0	2,06	Flexão
L7	112	1,36	40,9	Estribo vertical	177,3	361,0	2,04	Flexão
L8	108	1,41	39,0	Estribo inclinado	189,6	322,0	1,70	Punção

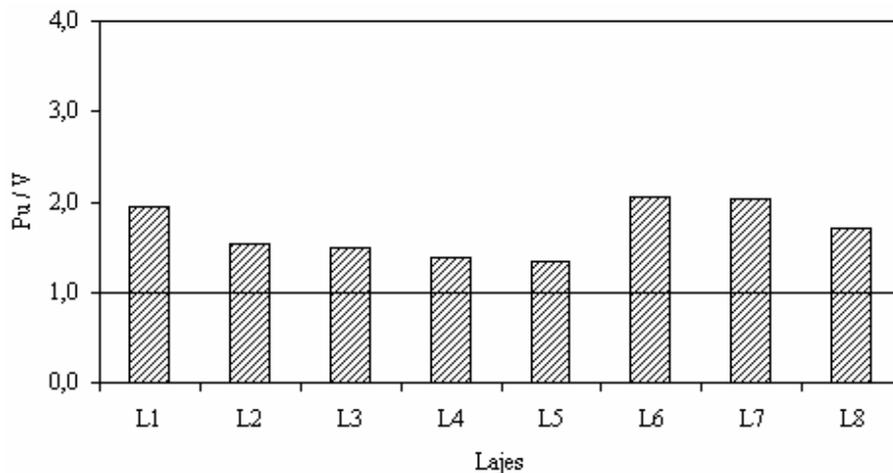


Figura 150 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pela NBR 6118 para ruptura por cisalhamento nas nervuras

5.2 Resistência ao puncionamento

5.2.1 ACI 318 (ACI, 2002)

Os resultados estimados através das recomendações do ACI 318 foram bastante inferiores aos resultados experimentais, para todas as lajes. Em relação às lajes sem armadura de punção, a norma faz 3 verificações adotando-se, como carga última, o menor valor entre elas, sendo a mais desfavorável, a situação em que a norma limita a capacidade resistente das lajes à resistência do

concreto à compressão, desprezando a contribuição da armadura de flexão neste dimensionamento, obtendo-se, dessa forma, resultados que subestimam a resistência última das lajes. Estes resultados conservadores já foram identificados em outras pesquisas. Ramdane (1996) *apud* Azevedo (1999) observou que para taxa de armadura de 1,28%, o cálculo teórico subestima os valores experimentais, enquanto que, para a taxa de armadura de 0,58%, os valores calculados foram contra a segurança. Da mesma forma, as lajes com armadura de punção também apresentaram resultados conservadores, considerando-se a situação mais desfavorável, para todas as lajes, aquela em que a superfície de ruptura cruza a primeira camada da armadura de punção, dentro da região afastada $d/2$ da face do pilar, com resultados estimados aproximadamente 25% inferiores aos experimentais, conforme mostra a Tabela 17 e a Figura 151.

Tabela 17 - Resultados estimados para resistência à punção de acordo com ACI 318

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Armadura de punção	P_p (kN)	P_u (kN)	P_u/P_p	Modo de Ruptura observado
L1	120	1,27	36,6	-	210,0	280,0	1,33	Flexão
L2	106	1,44	37,8	-	164,2	278,5	1,70	Flexão
L3	111	1,37	41,4	-	178,8	287,5	1,61	Punção
L4	118	1,29	39,2	-	199,5	287,0	1,44	Punção
L5	115	1,33	37,9	-	189,0	235,0	1,24	Punção
L6	104	1,47	39,8	Estribo inclinado	248,6	380,0	1,53	Flexão
L7	112	1,36	40,9	Estribo inclinado	282,6	361,0	1,28	Flexão
L8	108	1,41	39,0	Estribo inclinado	260,3	322,0	1,24	Punção

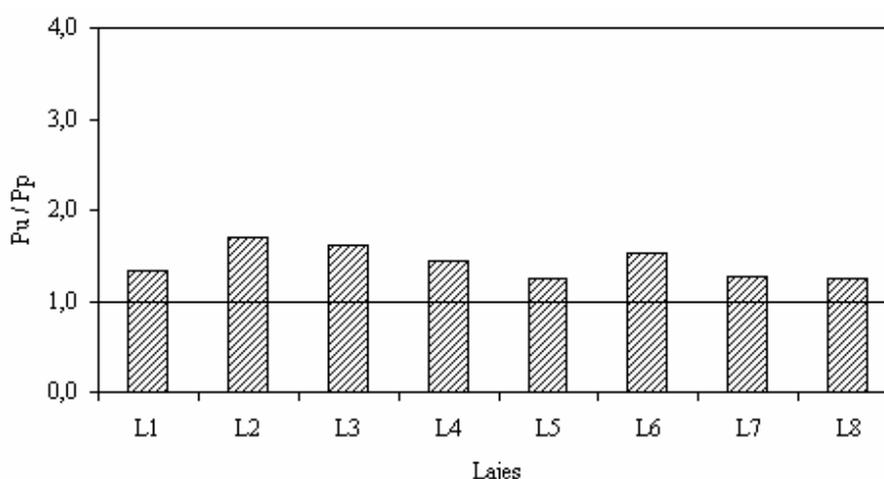


Figura 151 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo ACI 318 para ruptura por punção

5.2.2 MC90 (CEB-FIP, 1993)

Através da Tabela 18 e da Figura 152, pode-se verificar que todas as lajes sem armadura de punção apresentaram cargas últimas estimadas, de acordo com as recomendações do MC90, superiores às cargas últimas obtidas nos ensaios, com as lajes L2 e L3 apresentando resultados satisfatórios, superestimando a resistência das lajes em 2% e 5%, respectivamente, dentro do limite de 10% considerado aceitável. Cabe ressaltar que, apesar desses resultados terem sido considerados satisfatórios, apenas a laje L3 rompeu por punção. Já as lajes L1, L4 e L5 apresentaram valores fora desse limite, chegando a 26% contra a segurança para a laje L5, mostrando que pelas estimativas uma ruptura por punção estivesse longe de ocorrer. Contudo, as lajes L4 e L5 romperam por punção. Para as lajes com armadura de punção, a verificação foi feita em 3 regiões e em todas as lajes a situação mais desfavorável foi aquela em a ruptura acontece na região com armadura de punção, ou seja, afastada $2 \cdot d$ da face do pilar. Observa-se que as lajes L6 e L7 apresentaram carga de ruptura estimada menor que a carga experimental, com a laje L7 apresentando resultado satisfatório, indicando que uma ruptura por punção teria ocorrido, o que na prática não aconteceu. Em relação à laje L8, o resultado foi superestimando em 6%, portanto dentro dos 10% aceitáveis, com o modo de ruptura confirmando o resultado. Avalia-se, portanto, que os resultados estimados através das equações desta norma tendem a ser satisfatórios, visto que mesmo os resultados que não ficaram dentro do limite considerado aceitável, não ficaram tão distantes dos obtidos nos ensaios. Entretanto, é importante destacar que nem sempre foi verificada a ruptura por punção e que as lajes que romperam por flexão poderiam atingir cargas últimas maiores, caso a ruptura se desse por punção.

Tabela 18 - Resultados estimados para resistência à punção de acordo com MC90

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Armadura de punção	P_p (kN)	P_u (kN)	$\frac{P_u}{P_p}$	Modo de Ruptura observado
L1	120	1,27	36,6	-	341,6	280,0	0,82	Flexão
L2	106	1,44	37,8	-	284,9	278,5	0,98	Flexão
L3	111	1,37	41,4	-	303,5	287,5	0,95	Punção
L4	118	1,29	39,2	-	329,3	287,0	0,87	Punção
L5	115	1,33	37,9	-	316,5	235,0	0,74	Punção
L6	104	1,47	39,8	Estribo inclinado	336,1	380,0	1,13	Flexão
L7	112	1,36	40,9	Estribo inclinado	357,6	361,0	1,01	Flexão
L8	108	1,41	39,0	Estribo inclinado	344,0	322,0	0,94	Punção

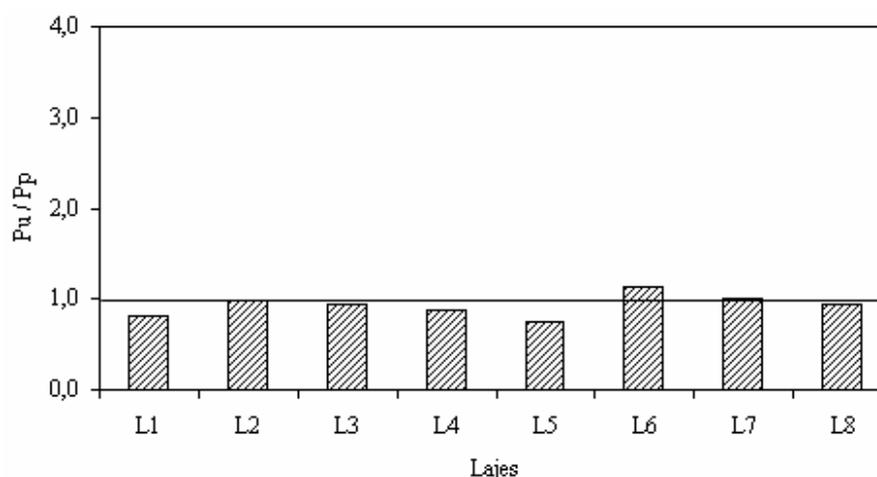


Figura 152 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pelo MC90 para ruptura por punção

5.2.3 NBR 6118 (ABNT, 2003)

A exemplo do MC90, a NBR 6118 apresentou resultados superestimados para as lajes sem armadura de punção, sendo as estimativas para as lajes L2 e L3 consideradas satisfatórias (superiores aos experimentais em 3% e 6%, respectivamente), como pode ser visto na Tabela 19 e na Figura 153. Esta semelhança entre os resultados eram esperados devido a similaridade entre as equações utilizadas por estas normas para estimar a resistência ao puncionamento. Dentre as lajes com armadura de punção, as lajes L7 e L8 apresentaram os resultados estimados e experimentais bem próximos, sendo 4% conservador para a laje L7 e 3% contra a segurança para a laje L8, indicando resultados satisfatórios. Lembrando que nem sempre ocorreu ruptura por punção, mesmo para as lajes em que os resultados foram considerados satisfatórios.

Tabela 19 - Resultados estimados para resistência à punção de acordo com NBR 6118

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Armadura de punção	P_p (kN)	P_u (kN)	P_u / P_p	Modo de Ruptura observado
L1	120	1,27	36,6	-	345,4	280,0	0,81	Flexão
L2	106	1,44	37,8	-	288,1	278,5	0,97	Flexão
L3	111	1,37	41,4	-	306,9	287,5	0,94	Punção
L4	118	1,29	39,2	-	332,9	287,0	0,86	Punção
L5	115	1,33	37,9	-	320,1	235,0	0,73	Punção
L6	104	1,47	39,8	Estribo inclinado	323,8	380,0	1,17	Flexão
L7	112	1,36	40,9	Estribo inclinado	346,1	361,0	1,04	Flexão
L8	108	1,41	39,0	Estribo inclinado	331,9	322,0	0,97	Punção

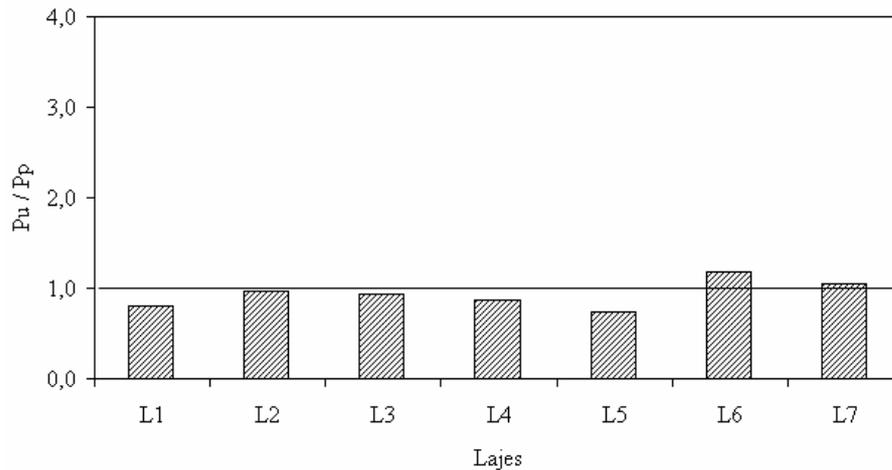


Figura 153 - Comparação entre as cargas observadas e as estimadas pela NBR 6118 para ruptura por punção

5.3 Resistência à flexão

A resistência à flexão das lajes foi obtida através da Teoria das Linhas de Ruptura, cuja configuração das linhas de ruptura e as equações adotadas são mostradas no capítulo 2 desta pesquisa. A Tabela 20 apresenta uma comparação entre as cargas últimas obtidas experimentalmente e as estimadas para ruptura por flexão. Como pode ser observado, com exceção da laje L6, todas as lajes apresentaram estimativas superiores aos resultados experimentais. Nas lajes sem armadura de punção a resistência foi superestimada em média 23%, indicando que uma ruptura por flexão estivesse longe de ocorrer. Porém, observa-se que as lajes L1 e L2 romperam por flexão. As lajes com armadura de punção L6 e L7 apresentaram resultados estimados bem próximos aos experimentais, sendo considerados satisfatórios, concordando com o modo de ruptura observado.

Tabela 20 - Resultados estimados para resistência à flexão de acordo com a Teoria das linhas de Ruptura

Laje	d (mm)	ρ (%)	f_c MPa	P_{flex} (kN)	P_u (kN)	$\frac{P_u}{P_{flex}}$	Modo de Ruptura observado
L1	120	1,27	36,6	363,1	280,0	0,77	Flexão
L2	106	1,44	37,8	357,6	278,5	0,78	Flexão
L3	111	1,37	41,4	359,1	287,5	0,80	Punção
L4	118	1,29	39,2	360,5	287,0	0,80	Punção
L5	115	1,33	37,9	359,1	235,0	0,65	Punção
L6	104	1,47	39,8	361,9	380,0	1,05	Flexão
L7	112	1,36	40,9	363,1	361,0	0,99	Flexão
L8	108	1,41	39,0	360,5	322,0	0,89	Punção

5.4 Comparativo entre os resultados estimados e os experimentais

As Figuras 154 a 156 mostram as cargas últimas obtidas experimentalmente, as estimadas através das normas ACI 318, MC90 e NBR 6118 para ruptura por cisalhamento nas nervuras e punção e as cargas últimas à flexão obtidas através da Teoria das Linhas de Ruptura.

Através do gráfico da Figura 154, observa-se que a norma americana ACI 318 tende a subestimar a resistência última ao cisalhamento das lajes, principalmente para a laje de referência (L1), que alcançou uma carga no ensaio 2,73 vezes maior que a carga estimada, e para as lajes com treliça como armadura de cisalhamento nas nervuras, cuja maior disparidade entre as cargas últimas, estimada e experimental, foi observada na laje L6, que por apresentar armadura de punção, ganhou um acréscimo de carga que não foi considerado na estimativa para ruptura por cisalhamento. Em se tratando das lajes constituídas por estribos vertical e inclinado, a norma superestimou a resistência dessas lajes ao cisalhamento, sendo a diferença mais expressiva registrada na laje L5 (50%). Em relação à estimativa para ruptura por punção, a norma subestimou esta resistência última para todas as lajes, indicando uma ruptura estimada por punção, o que nem sempre ocorreu nos ensaios, conforme será mostrado mais a frente, já que algumas lajes apresentaram escoamento da armadura de flexão, caracterizando uma ruptura por flexão.

Já os resultados obtidos através das recomendações do MC90 para resistência ao cisalhamento nas nervuras, observa-se no gráfico da Figura 155 que foram consideravelmente subestimados, com a laje L6 apresentando as maiores diferenças. Entretanto a laje L5 foi a única que apresentou resultados estimados contra a segurança. As estimativas para ruptura por punção foram superestimadas para todas as lajes sem armadura de punção, cujas maiores divergências foram apresentadas pelas lajes L1, L4 e L5. As demais lajes apresentaram resultados satisfatórios. Das lajes com armadura de punção, as lajes L6 e L7 apresentaram resultados conservadores, sendo a estimativa para a laje L7 considerada satisfatória. De acordo com o MC90, as lajes L1, L2, L3, L4, L6, L7 e L8 apresentaram ruptura por cisalhamento nas nervuras, discordando totalmente da ruptura observada no laboratório. Já a laje L5 apresentou ruptura estimada por punção, o que realmente ocorreu.

A norma brasileira NBR 6118 subestimou os resultados para ruptura por cisalhamento nas nervuras em todas as lajes, sendo as lajes com armadura de punção as que apresentaram a resistência nas nervuras mais penalizada, conforme mostra a Figura 156. Para resistência ao puncionamento, as estimativas foram superestimadas para a maioria das lajes, sendo que para as lajes L2 e L3 os resultados foram considerados satisfatórios. Assim como nas estimativas do MC90, apenas as lajes L6 e L7 apresentaram resultados conservadores. Estes resultados levam a modos de ruptura previstos diferentes dos verificados nos ensaios.

A Tabela 21 apresenta os modos de ruptura observados nos ensaios e os previstos por todas as normas utilizadas nesta pesquisa. Observa-se que a norma americana foi a que mais concordou com os resultados experimentais, quanto ao modo de ruptura, e que a norma brasileira estimou rupturas completamente diferentes das observadas nos ensaios.

Tabela 21 - Modos de ruptura

Laje	Modos de ruptura observados	Modos de ruptura previstos		
		ACI 318	MC90	NBR 6118
L1	Flexão	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras
L2	Flexão	Punção	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras
L3	Punção	Punção	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras
L4	Punção	Punção	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras
L5	Punção	Punção	Punção	Cisalhamento nervuras
L6	Flexão	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras
L7	Flexão	Punção	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras
L8	Punção	Punção	Cisalhamento nervuras	Cisalhamento nervuras

De maneira geral, os gráficos mostram o quanto as estimativas para lajes lisas nervuradas divergem dos resultados experimentais, seja para carga última seja para modo de ruptura, indicando que, ao analisar o comportamento de lajes lisas nervuradas isoladamente, ou seja, sem considerar a influência de parâmetros de lajes nervuradas no dimensionamento à punção e vice versa, não se tem o real comportamento deste tipo de sistema estrutural.

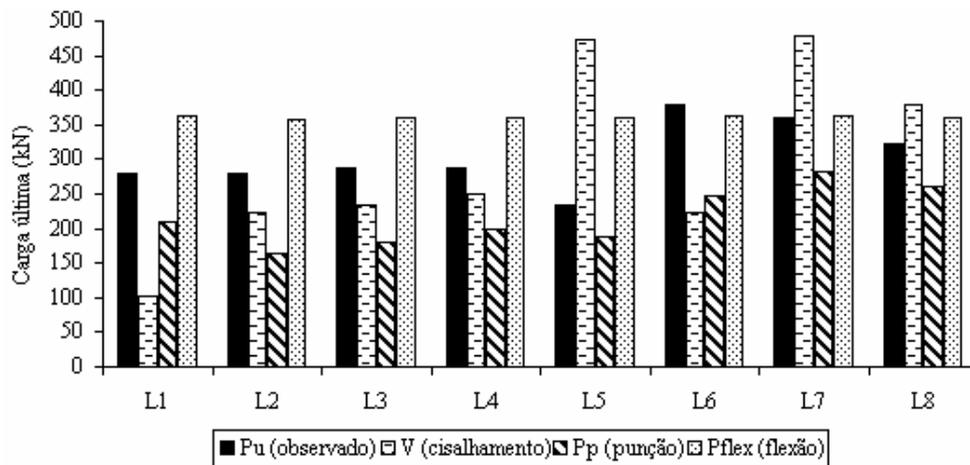


Figura 154 - Comparação entre os resultados observados e os estimados através do ACI 318 (cisalhamento nas nervuras e punção) e teoria das linhas de ruptura (flexão)

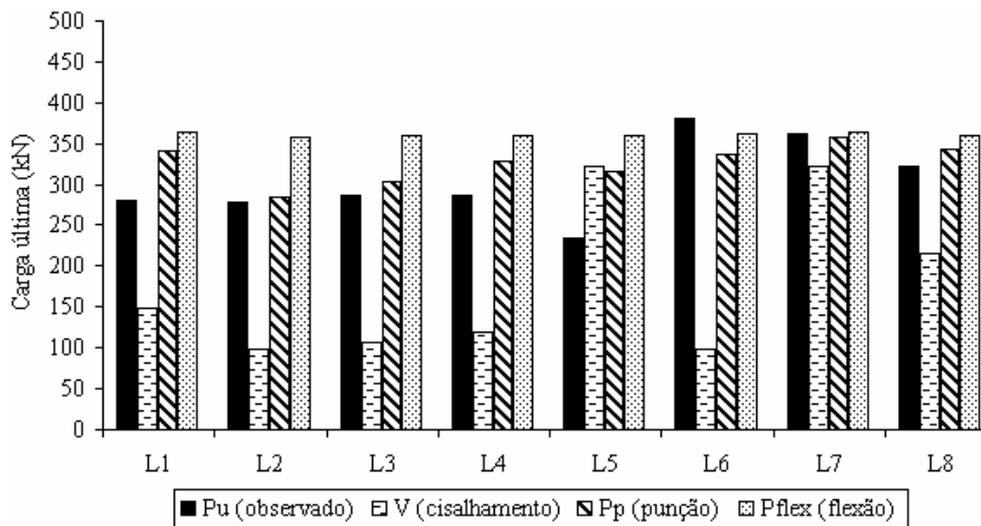


Figura 155 - Comparação entre os resultados observados e os estimados através do MC90 (cisalhamento nas nervuras e punção) e teoria das linhas de ruptura (flexão)

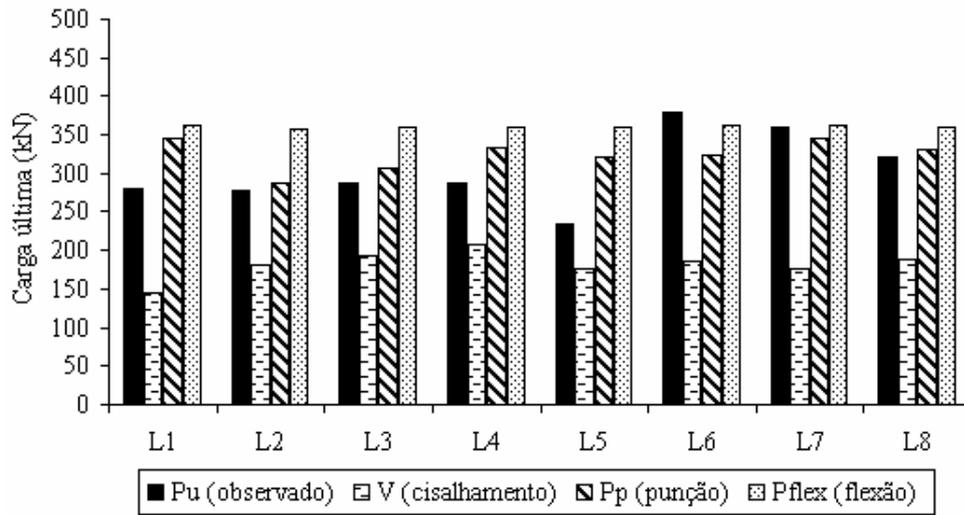


Figura 156 - Comparação entre os resultados observados e os estimados através da NBR 6118 (cisalhamento nas nervuras e punção) e teoria das linhas de ruptura (flexão)

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

6.1.1 Comportamento das lajes

6.1.1.1 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais foram medidos através de deflectômetros posicionados ortogonalmente nas direções x e y. Observou-se que nos primeiros estágios de carregamento, os deslocamentos verticais apresentaram um comportamento quase linear (até aproximadamente 50 kN). A partir do surgimento das primeiras fissuras, observou-se uma inclinação da curva, com deslocamentos verticais maiores para um mesmo passo de carga.

A armadura de cisalhamento nas nervuras não influenciou na rigidez das lajes, já que não foi verificada redução dos deslocamentos verticais em relação à laje de referência, para um mesmo valor de carga. Nas lajes com armadura de punção, observou-se o ganho de ductilidade que este tipo de armadura proporcionou às lajes. Entretanto, independente do uso das armaduras de cisalhamento nas nervuras e de punção na região maciça, as lajes apresentaram um comportamento semelhante, com variações apenas na ductilidade.

6.1.1.2 Deformações na superfície do concreto

Foram medidas apenas as deformações tangenciais do concreto, por serem, comprovadamente, superiores às radiais neste tipo de sistema estrutural.

Nos pontos instrumentados na região maciça, as lajes L6 e L7 foram as que apresentaram as maiores deformações (4,19‰ e 3,64‰, respectivamente), indicando a ocorrência do esmagamento do concreto nessa região das lajes. As deformações registradas nas nervuras (C3 e C4) foram bastante inferiores à deformação de esmagamento do concreto (3,5‰), confirmando que uma possível ruptura por esmagamento do concreto nas nervuras estivesse longe de ocorrer.

6.1.1.3 Deformações das armaduras de flexão

Observou-se que, como esperado, as maiores deformações foram registradas nas barras próximas ao pilar, tendo sido 4,38‰ a máxima deformação alcançada, verificada na laje L7 (laje com armadura de punção). As deformações registradas nos pontos situados nas nervuras também foram mais significativas nas lajes com armadura de punção, cujo máximo valor foi registrado na laje L6 (2,87‰). Observa-se também que as armaduras das lajes L1 (3,76‰), L2 (2,72‰), L6 (3,79‰) e L7 (4,38‰) atingiram o escoamento nos pontos monitorados na região maciça, atribuindo a estas lajes um comportamento típico de ruptura por flexão.

6.1.1.4 Deformações das armaduras de cisalhamento

As deformações das armaduras de cisalhamento nas nervuras foram bem menores que a deformação de escoamento do aço ($\epsilon_{y,sw} = 4,7‰$), indicando que estas foram pouco solicitadas. Dessa forma, a verificação da contribuição dessas armaduras no combate aos esforços cisalhantes foi prejudicada.

Comparando-se as lajes L2, L3 e L4, que apresentavam como armadura de cisalhamento nas nervuras treliça na direção x e estribo vertical na direção y, observou-se que nas lajes L2 e L4, as deformações registradas na treliça e no estribo vertical foram bem próximas, o que leva a afirmar o melhor desempenho da armadura inclinada (treliça) em relação à armadura vertical, visto que, a taxa de armadura em peso desta última era 1,2 vezes maior que a da treliça. Já na laje L3 a deformação verificada no estribo foi o dobro da verificada na treliça. Esse comportamento pode estar associado ao fato da laje ter apresentado maiores deslocamentos verticais na direção y (mesma direção dos estribos verticais).

Nas lajes com mesmo tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras nas direções x e y, pode-se comparar as deformações registradas nos estribos verticais da laje L7 com as deformações dos estribos inclinados da laje L8. Observa-se que os estribos verticais apresentaram deformações inferiores aos estribos inclinados. Esse aumento na solicitação dos estribos inclinados vem confirmar a sua eficiência já que, neste caso, as duas lajes apresentaram a mesma taxa de armadura de cisalhamento. Porém esse melhor desempenho não refletiu no aumento da carga última em relação à laje L7, sendo 11% inferior.

Em relação às armaduras de punção (estribo inclinado a 45°), apesar de terem sido bastante solicitadas, nenhum estribo apresentou escoamento (deformação maior que 4,4‰), sendo a deformação máxima alcançada de 3,34‰, verificada na laje L8 (laje com estribo inclinado nas nervuras), mostrando-se mais eficiente quando associada ao uso de estribo inclinado nas nervuras. Observou-se também, que com aproximadamente 80% da carga de ruptura, passaram a deformar de maneira não mais proporcional ao acréscimo de carga, indicando que o escoamento não estava longe de ocorrer.

6.1.1.5 Padrão de fissuração

As primeiras fissuras a surgirem foram as radiais, que surgiam a partir da extremidade do pilar em direção aos bordos da laje. Nas lajes sem armadura de punção, a primeira fissura radial surgiu com aproximadamente 19% da carga de ruptura e com 8% da carga da ruptura para as lajes com armadura de punção. Em níveis mais elevados de carga, surgiam as fissuras tangenciais, as quais foram mais evidentes nas lajes com armadura de punção.

Notou-se também, que nas lajes que romperam por flexão, as fissuras tendem a se desenvolver longitudinalmente em direção aos bordos das lajes e nos demais casos, as fissuras se estendem radialmente a partir da extremidade do pilar em direção aos bordos da laje.

6.1.1.6 Cargas últimas e modos de ruptura observados

A utilização das armaduras de cisalhamento não ocasionou aumento nas cargas últimas, devido a resistência à flexão ou à punção ter sido atingida antes que essas armaduras fossem solicitadas. Dessa forma, as lajes com armadura de cisalhamento apresentaram cargas últimas muito próximas da verificada na laje de referência. As lajes com armadura de punção obtiveram um acréscimo de carga de aproximadamente 26% em relação à laje de referência, com a máxima carga de ruptura tendo sido alcançada pela laje L6.

Quanto aos modos de ruptura, foram observadas ruptura por flexão, com a armadura de flexão alcançando o escoamento, e punção caracterizada como uma ruptura brusca e frágil. Cabe ressaltar, que de acordo com as estimativas da NBR 6118, todas as lajes romperiam por flexão, o que não foi observado nos ensaios.

6.1.1.7 Resistência ao cisalhamento nas nervuras (análise de normas)

De maneira geral, as estimativas normativas para resistência ao cisalhamento em lajes nervuradas se mostraram conservadoras, incluindo aquelas com armadura de cisalhamento nas nervuras, com resultados estimados através do MC90 entre 1,12 a 3,83 vezes inferiores aos obtidos nos ensaios e a segurança para ruptura por cisalhamento seria ainda maior caso a ruptura se desse por cisalhamento nas nervuras. Comportamento semelhante foi verificado pelas demais normas.

Em relação às lajes com armadura de punção, algumas divergências entre as estimativas normativas foram verificadas, visto que ora a resistência última era subestimada ora era superestimada com uma tendência das normas subestimarem a capacidade resistente dessas lajes, haja vista que nenhuma norma apresenta recomendações que levem em consideração armadura de combate à punção.

6.1.1.8 Resistência ao puncionamento (análise de normas)

Em relação à resistência ao puncionamento, as normas se mostraram bastante divergentes. Todas as estimativas obtidas através das recomendações do ACI 318, foram inferiores aos resultados experimentais. Já a verificação através do MC90, mostrou que esta norma tende a superestimar os resultados, sendo em alguns casos considerados satisfatórios, apesar de nem sempre coincidir com o modo de ruptura observado e apresentou também alguns resultados conservadores. Como esperado, os resultados obtidos para resistência última através da NBR 6118, foram bastante próximos, coincidindo, inclusive, os casos de superestimação e subestimação.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Este estudo consistiu da análise de lajes lisas nervuradas armadas ao cisalhamento, submetidas à carregamento centrado com pilar com taxa de retangularidade 1, não elucidando completamente a problemática das possíveis rupturas deste tipo de sistema estrutural. Dessa forma, têm-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Investigar o comportamento de lajes lisas nervuradas, submetidas carregamento com índices de retangularidade diferentes;
- Analisar a influência da região maciça nas resistências ao cisalhamento e ao puncionamento, variando suas dimensões;
- Variar as taxas de armaduras de punção e flexão visando maiores solicitações nas armaduras de cisalhamento nas nervuras;
- Desenvolver modelos matemáticos capazes de melhorar as estimativas normativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318:2005. *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005.

ANDRADE, J.J. de O. *Propriedade dos Polímeros* MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, Ed. Isaia, G.C.. IBRACON, vol. 2, cap. 38, pp. 1263-1291, 2007.

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

_____. **NBR 6152** – *Materiais metálicos. Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5739** – *Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 7222** – *Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118** – *Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 14931** – *Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2003.

AZEVEDO, A. P. (1999). *Resistência e ductilidade das ligações laje-pilar em lajes cogumelo de concreto de alta resistência armado com fibras de aço e armadura transversal de pinos*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAIXETA, D. P. (1998) *Contribuição ao Estudo de Lajes Mistas Pré-fabricadas com Vigas Treliçadas*. Dissertação (Mestrado). UNICAMP, Campinas – SP.

CEB - FIP (1990). *Model Code 1990: Final Draft*. Bulletin D'Information, No 203-205, CEB, Lausanne, July 1991.

DIAS, R. H. (2003). *Análise numérica de pavimentos de edifícios em lajes nervuradas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FRANCA, A.B.M.; FUSCO, P.B. *As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios*. São Paulo: AFALA & ABRAPEX, 1997.

LANGENDONCK, T. V. *Teoria Elementar das Charneiras Plásticas*. Volume I e II. ABCP, 1970.

LEONHARDT, F.; MÖNIG, E. (1978). *Construções de concreto: casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Rio de Janeiro, Interciência. v.2.

LÚCIO, V. J. G., *Waffle Slab Structure Under Vertical and Horizontal Loading*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Tese de Doutorado, Portugal, Lisboa, 1991, 418p.

MELGES, J.L.P. (2001). *Análise experimental da punção em lajes de concreto armado e protendido*. São Carlos. 2v. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MELO, J.G.S.; MELO, G.S.S.A.; NAGATO, Y. *Análise experimental de lajes nervuradas pré-fabricadas com armação treliçada ao cisalhamento*. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005.Recife.Anais

OLIVEIRA, D. R. C., *Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento ao Puncionamento*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília, 1998, 137p.

OLIVEIRA, D. R. C., *Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, Brasília, 2003, 214p.

OLIVEIRA, D. R. C., *Estruturas de Concreto Armado II: notas de aula*. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, 2007.

PINHEIRO, L.M.; REZENTE, J.A. *Lajes nervuradas: notas de aula*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

RAMDANE, K.E. (1996). *Punching shear of high performance concrete slabs*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE UTILIZATION OF HIGH STRENGTH / HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 4., Paris, 1996. *Proceedings*. Paris, AFPC/AFREM/ENPC. v.3, p.1015-1026.

SCHWETZ, P.F. (2005). *Análise teórico-experimental de uma laje nervurada em modelo reduzido sujeita a um carregamento linear*. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SILVA, M.A.F.(2005). *Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado* Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SOARES, Y.V., *Análise Experimental de Lajes Cogumelo Nervuradas de Concreto Armado com Pilares Metálicos*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, Brasília, 2004, 200p.

SOUZA, V. C. M. de, CUNHA, A. J. P. da, *Lajes em Concreto Armado e Protendido*. Rio de Janeiro Ed. UERJ, 1998, 580p.

TESORO, F. R., *Los Forjados Reticulares – Manual Prático*. CYPE Ingenieros, Barcelona, 1991, 232p.

APÊNDICE A

LEITURAS REGISTRADAS NOS ENSAIOS

A.1 Deslocamentos verticais

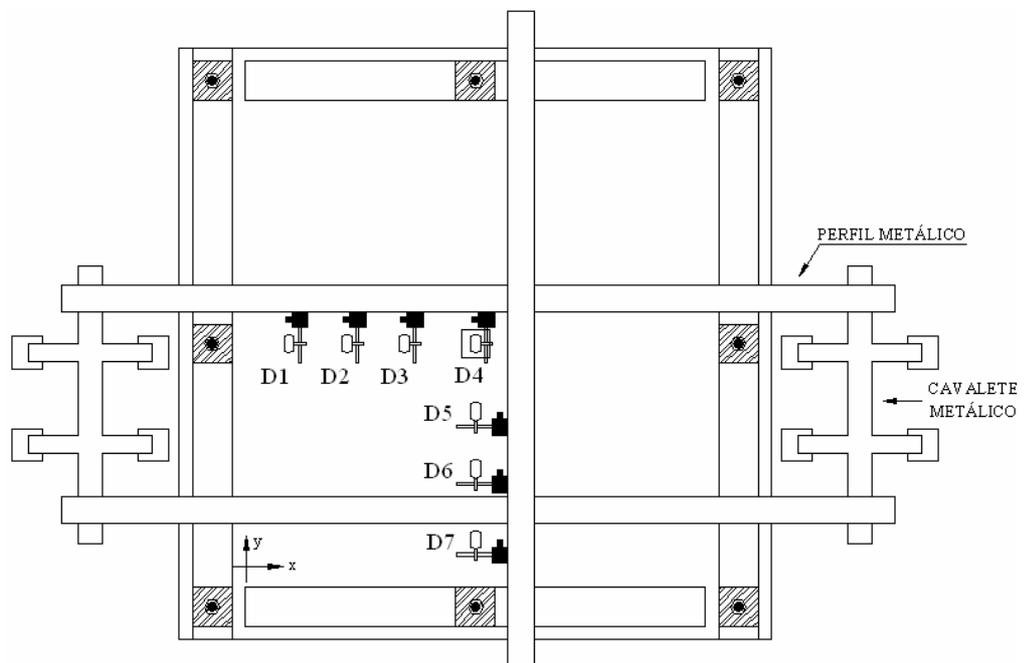


Figura A.1 – Posicionamento dos defletores na laje

Tabela A.1.1 – Leitura dos deflectômetros na laje L1

Carga (kN)	Deflectômetro						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,08	0,30	0,30	0,05	0,18	0,71	0,00
20	0,20	0,68	0,41	0,30	0,41	0,89	0,05
30	0,49	1,31	0,80	0,38	0,58	1,00	0,09
40	0,60	1,74	1,05	0,55	0,79	1,10	0,10
50	0,84	2,09	1,56	0,91	1,14	1,39	0,29
60	0,90	2,40	1,90	1,13	1,37	1,60	0,55
70	1,09	2,63	2,20	1,70	1,79	2,00	0,80
80	1,24	3,08	2,49	1,96	2,02	2,14	0,85
90	1,58	3,21	2,80	2,40	2,47	2,55	1,10
100	1,86	3,64	3,09	2,72	2,71	2,69	1,20
110	2,09	3,95	3,45	3,20	3,12	3,05	1,48
120	3,34	4,36	3,86	3,70	3,59	3,44	1,74
130	3,55	4,70	4,24	4,12	3,94	3,75	1,95
140	3,80	5,06	4,66	4,58	4,25	4,10	2,20
150	4,00	5,40	4,96	5,12	4,37	4,55	2,51
160	4,27	5,70	5,42	5,61	4,67	4,86	2,75
170	4,48	6,05	5,56	6,09	4,85	5,18	2,95
180	4,75	6,38	6,08	6,63	5,03	5,49	3,10
190	4,98	6,71	6,73	7,08	5,43	5,81	3,35
200	5,25	7,06	7,15	7,56	5,87	6,14	3,55
210	5,50	7,49	7,46	8,04	6,21	6,46	3,76
220	5,80	7,79	8,00	8,60	6,68	6,85	4,06
230	6,04	8,13	8,42	9,10	7,08	7,18	4,26
240	6,30	8,49	8,85	9,61	7,47	7,50	4,49
250	6,55	8,88	9,36	10,20	7,85	7,82	4,72

Tabela A.1.2 – Leitura dos deflectômetros na laje L2

Carga (kN)	Deflectômetro						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,20	0,15	0,16	0,15	0,15	0,20	0,05
20	0,34	0,31	0,28	0,26	0,36	0,40	0,07
30	0,57	0,54	0,51	0,50	0,58	0,59	0,26
40	0,81	0,79	0,78	0,76	0,80	0,77	0,41
50	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10	1,03	0,65
60	1,40	1,41	1,48	1,45	1,40	1,26	0,80
70	1,86	1,86	1,98	1,93	1,82	1,61	1,05
80	2,33	2,36	2,50	2,46	2,24	1,95	1,28
90	2,79	2,85	3,00	2,98	2,69	2,31	1,58
100	3,28	3,40	3,60	3,62	3,20	2,76	1,85
110	3,74	3,93	4,12	4,16	3,68	3,12	2,12
120	4,15	4,43	4,63	4,75	4,21	3,55	2,37
130	4,63	4,96	5,19	5,35	4,70	3,95	2,67
140	5,08	5,52	5,68	5,82	5,18	4,37	2,97
150	5,46	6,00	6,17	6,34	5,68	4,79	3,30
160	5,91	6,49	6,61	6,97	6,15	5,17	3,57
170	6,35	6,98	7,20	7,44	6,59	5,54	3,83
180	6,86	7,63	7,84	8,29	7,24	6,24	4,00
190	7,67	8,46	8,32	8,80	7,66	7,05	4,23
200	8,16	8,91	8,80	9,34	8,08	7,42	4,46
210	8,44	9,33	9,27	9,86	8,51	7,70	4,71
220	8,81	9,76	9,75	10,40	8,90	8,08	4,98
230	9,22	10,26	10,36	11,13	9,36	8,46	5,22
240	9,67	10,78	10,84	11,59	9,80	8,80	5,45
250	9,87	11,06	11,30	12,12	10,21	9,12	5,68
260	10,20	11,47	11,78	12,69	10,65	9,46	5,92
270	10,51	11,86	12,21	13,28	11,08	10,76	6,10

Tabela A.1.3 – Leitura dos deflectômetros na laje L3

Carga (kN)	Deflectômetro						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,08	0,10	0,05	0,05	0,00	0,00
20	0,00	0,12	0,15	0,05	0,05	0,00	0,00
30	0,05	0,20	0,25	0,10	0,05	0,00	0,00
40	0,20	0,38	0,52	0,15	0,08	0,00	0,00
50	0,40	0,55	0,75	0,28	0,18	0,05	0,00
60	0,55	0,75	1,05	0,45	0,35	0,18	0,06
70	0,73	1,05	1,42	0,82	0,60	0,40	0,20
80	0,94	1,43	1,88	1,30	1,05	0,80	0,55
90	1,18	1,88	2,38	2,15	2,10	1,55	1,20
100	1,45	2,35	2,90	2,80	2,72	2,18	1,65
110	1,80	2,80	3,45	3,40	3,20	2,60	2,05
120	2,10	3,20	3,98	4,00	3,80	3,50	2,85
130	2,35	3,55	4,45	4,70	4,45	3,75	3,05
140	2,65	3,95	4,98	5,25	4,95	4,20	3,42
150	3,00	4,41	5,50	5,90	5,55	4,75	3,90
160	3,30	4,80	5,95	6,48	6,08	5,25	4,35
170	3,60	5,25	6,45	7,10	6,70	5,90	4,95
180	3,95	5,75	7,00	7,65	7,12	6,35	5,30
190	4,15	6,12	7,49	8,55	7,30	6,75	5,40
200	4,50	6,60	8,05	9,25	7,70	7,40	5,70
210	4,80	6,95	8,50	9,90	8,20	7,80	6,05
220	5,05	7,30	8,95	10,45	8,65	8,25	6,50
230	5,40	7,66	9,45	11,05	9,15	8,70	6,80
240	5,60	8,00	9,90	11,60	9,60	9,10	7,10
250	6,80	8,40	10,40	12,20	10,05	9,48	7,42
260	7,20	8,84	10,90	12,80	10,58	9,85	7,81
270	7,45	9,10	11,42	13,40	11,00	10,20	8,10
280	7,75	9,45	11,95	14,00	11,45	10,60	8,46

Tabela A.1.4 – Leitura dos deflectômetros na laje L4

Carga (kN)	Deflectômetro						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,02	0,12	0,03	0,03	0,00	0,00	0,04
10	0,03	0,08	0,02	0,02	0,10	0,09	0,06
20	0,05	0,20	0,12	0,12	0,20	0,15	0,11
30	0,08	0,28	0,26	0,21	0,34	0,21	0,17
40	0,20	0,45	0,43	0,41	0,50	0,43	0,26
50	0,32	0,59	0,63	0,62	0,72	0,61	0,38
60	0,63	0,84	0,87	0,85	1,03	0,90	0,61
70	0,84	1,50	1,40	1,39	1,32	1,11	0,79
80	1,12	1,67	1,66	1,57	1,66	1,42	1,01
90	1,56	2,23	2,17	2,07	2,08	1,79	1,31
100	1,69	2,88	2,79	2,69	2,52	2,13	1,52
110	2,10	3,40	3,33	3,26	2,93	2,44	1,74
120	2,35	3,98	3,91	3,88	3,40	2,81	1,96
130	2,56	4,54	4,47	4,46	3,91	3,19	2,14
140	2,89	5,02	4,97	4,97	4,31	3,49	2,31
150	3,10	4,20	5,25	5,70	4,78	3,83	2,51
160	3,28	4,55	5,64	6,22	5,15	4,11	2,70
170	3,60	4,87	6,10	6,82	5,70	4,54	2,96
180	4,00	5,30	6,48	7,28	6,13	4,88	3,16
190	4,21	5,70	6,94	8,02	6,65	5,31	3,37
200	4,73	6,15	7,45	8,51	7,12	5,63	3,57
210	5,03	6,60	8,04	9,10	7,65	6,03	3,81
220	5,32	7,05	8,67	9,71	8,12	6,33	4,01
230	5,78	7,62	9,15	10,25	8,78	6,68	4,25
240	6,20	8,10	9,90	10,89	9,20	7,07	4,48
250	6,57	8,60	10,32	11,42	9,72	7,57	4,74

Tabela A.1.5 – Leitura dos defletores na laje L5

Carga (kN)	Defleto						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10
20	0,00	0,00	0,00	0,20	0,10	0,15	0,20
30	0,10	0,10	0,13	0,20	0,30	0,35	0,30
40	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50	0,50	0,60
50	0,30	0,50	0,60	0,70	0,70	0,50	1,10
60	0,50	0,70	0,80	1,15	0,95	0,70	1,20
70	0,60	0,90	1,10	1,35	1,25	0,90	1,40
80	0,80	1,10	1,35	1,60	1,55	1,15	1,55
90	0,95	1,30	1,70	2,00	1,90	1,50	1,70
100	1,10	1,60	1,05	2,45	2,30	1,80	1,90
110	1,40	1,90	1,50	2,90	2,75	2,10	2,15
120	1,60	2,30	1,90	3,40	3,20	2,50	2,35
130	1,80	2,70	2,40	4,00	3,65	2,80	2,60
140	2,00	3,00	2,80	4,50	4,10	3,20	2,75
150	2,20	3,30	3,20	5,00	4,50	3,55	3,00
160	2,60	3,90	3,85	5,90	5,00	3,95	3,30
170	2,90	4,30	4,35	6,50	5,60	4,40	3,75
180	3,15	4,75	4,90	7,15	6,00	4,75	3,95
190	3,40	5,05	5,35	7,70	6,50	5,15	4,20
200	3,60	5,50	5,75	8,20	6,90	5,50	4,45
210	3,80	5,85	6,25	8,90	7,45	5,90	4,80
220	4,00	6,20	6,70	9,50	8,00	6,35	5,05
230	4,25	6,60	7,25	10,20	8,50	6,70	5,30

Tabela A.1.6 – Leitura dos deflectômetros na laje L6

Carga (kN)	Deflectômetro						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,10	0,15	0,10	0,12	0,10	0,10	0,02
20	0,17	0,25	0,20	0,28	0,25	0,22	0,10
30	0,28	0,40	0,36	0,42	0,41	0,38	0,22
40	0,40	0,48	0,51	0,59	0,56	0,55	0,33
50	0,54	0,66	0,75	0,80	0,73	0,72	0,47
60	0,68	0,79	0,95	1,02	0,94	0,90	0,62
70	0,89	0,96	1,21	1,30	1,25	1,15	0,86
80	1,10	1,25	1,62	1,75	1,60	1,50	1,18
90	1,45	1,72	1,95	2,28	2,20	1,96	1,70
100	1,90	2,25	2,63	2,92	2,68	2,50	2,08
110	2,35	2,78	3,18	3,55	3,25	3,00	2,95
120	2,78	3,30	3,72	4,18	3,82	3,52	3,04
130	3,18	3,73	4,22	4,76	4,35	3,98	3,52
140	3,58	4,21	4,78	5,38	4,90	4,35	3,81
150	4,00	4,68	5,31	5,93	5,40	4,78	4,12
160	4,35	5,10	5,83	6,55	5,95	5,21	4,50
170	4,70	5,51	6,35	7,15	6,45	5,70	4,88
180	5,02	6,02	6,81	7,73	7,00	6,20	5,25
190	5,40	6,35	7,31	8,30	7,42	6,55	5,50
200	5,70	6,80	7,82	8,95	7,90	6,90	5,75
210	6,05	7,20	8,30	9,50	8,38	7,30	6,00
220	6,40	7,50	8,78	10,08	8,80	7,62	6,21
230	6,70	8,00	9,25	10,65	9,28	7,98	6,48
240	7,00	8,40	9,68	11,20	9,72	8,30	6,70
250	7,35	8,90	10,30	11,90	10,22	8,65	6,96
260	7,60	9,28	10,73	12,45	10,65	9,00	7,18
270	7,92	9,70	11,25	13,10	11,15	9,40	7,45
280	8,20	10,05	11,70	13,72	11,60	9,70	7,65
290	8,50	10,45	12,22	14,40	12,10	10,05	7,90
300	8,75	10,78	12,65	15,00	12,55	10,40	8,10

Tabela A.1.7 – Leitura dos deflectômetros na laje L7

Carga (kN)	Deflectômetro						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,05	0,09	0,08	0,11	0,08	0,03	0,04
20	0,12	0,22	0,25	0,32	0,23	0,20	0,13
30	0,18	0,30	0,32	0,42	0,31	0,31	0,20
40	0,30	0,43	0,50	0,60	0,49	0,47	0,32
50	0,43	0,58	0,65	0,80	0,66	0,56	0,43
60	0,53	0,70	0,76	0,96	0,80	0,69	0,54
70	0,63	0,83	0,92	1,18	0,99	0,85	0,64
80	0,76	1,09	1,03	1,43	1,20	1,05	0,77
90	0,91	1,33	1,36	1,70	1,45	1,31	0,97
100	1,10	1,59	1,66	2,03	1,73	1,54	1,18
110	1,32	1,91	2,08	2,46	2,12	1,89	1,51
120	1,50	2,19	2,43	2,91	2,54	2,27	1,85
130	1,78	2,62	2,95	3,58	3,08	2,75	2,26
140	1,99	2,94	3,33	3,95	3,47	3,11	2,60
150	2,18	3,25	3,74	4,46	3,95	3,53	2,95
160	2,42	3,65	4,26	5,03	4,48	3,90	3,34
170	2,63	3,96	4,68	5,57	4,86	4,33	3,69
180	2,82	4,29	5,10	6,08	5,29	4,67	3,99
190	3,05	4,65	5,59	6,66	5,77	5,10	4,30
200	3,28	5,00	6,03	7,18	6,20	5,46	4,62
210	3,51	5,38	6,53	7,78	6,70	5,91	4,95
220	3,77	5,77	7,04	8,34	7,18	6,32	5,28
230	4,04	6,15	7,54	8,95	7,65	6,71	5,61
240	4,30	6,60	8,08	9,49	8,10	7,10	5,90
250	4,48	6,90	8,49	10,05	8,56	7,48	6,22
260	4,70	7,27	8,96	10,60	9,04	7,84	6,51
270	4,96	7,64	9,49	11,20	9,51	8,25	6,81
280	5,20	8,00	9,97	11,82	9,99	8,62	7,06
290	5,43	8,36	10,45	12,42	10,41	8,95	7,30
300	5,70	8,76	11,02	13,14	10,94	9,38	7,60
310	5,96	9,14	11,55	13,80	11,40	9,70	7,85
320	6,05	10,05	12,56	14,75	12,04	10,20	8,16
330	6,25	10,55	13,20	15,70	12,92	10,80	8,56
340	6,63	11,10	14,10	16,10	13,75	11,40	8,95

Tabela A.1.8 – Leitura dos deflectômetros na laje L8

Carga (kN)	Deflectômetro						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,01	0,01	0,01	0,05	0,04	0,09	0,07
20	0,08	0,04	0,14	0,30	0,18	0,28	0,13
30	0,16	0,15	0,28	0,52	0,31	0,34	0,10
40	0,16	0,17	0,34	0,81	0,46	0,49	0,17
50	0,30	0,31	0,56	1,03	0,63	0,61	0,22
60	0,91	0,51	0,99	1,38	1,19	1,22	0,82
70	1,24	0,82	1,35	1,69	1,42	1,36	1,77
80	1,54	1,22	1,69	1,98	1,63	1,47	1,83
90	1,91	1,58	2,15	2,38	1,94	1,64	1,97
100	2,34	2,06	2,69	2,94	2,58	2,28	2,33
110	2,66	2,40	3,16	3,43	2,92	2,50	2,45
120	3,06	3,22	3,65	4,14	3,64	3,18	3,01
130	3,48	3,52	4,16	4,66	4,04	3,53	4,22
140	4,02	4,12	4,81	5,23	4,46	3,93	4,43
150	4,42	4,59	5,35	5,78	4,93	4,46	4,67
160	4,81	5,07	5,89	6,35	5,48	4,98	5,07
170	5,24	5,62	6,45	7,03	5,94	5,38	5,35
180	5,42	5,97	6,86	7,59	6,40	5,79	5,65
190	5,81	6,49	7,40	8,19	6,90	6,18	5,91
200	6,15	6,94	7,90	8,78	7,36	6,56	6,17
210	6,46	7,40	8,38	9,36	7,88	6,98	6,45
220	6,82	7,91	8,92	9,98	8,38	7,42	6,82
230	7,29	8,44	9,47	10,61	8,92	7,86	7,12
240	7,68	8,88	9,95	11,10	9,32	8,20	7,36
250	8,01	9,31	10,43	11,69	9,79	8,57	7,63
260	8,36	9,78	10,95	12,34	10,32	8,98	7,93
270	8,60	10,20	11,38	12,88	10,74	9,35	8,18
280	8,88	10,61	11,88	13,48	11,20	9,69	8,40
290	9,33	11,08	12,47	14,20	11,68	9,98	8,65

A.2 Deformações no concreto

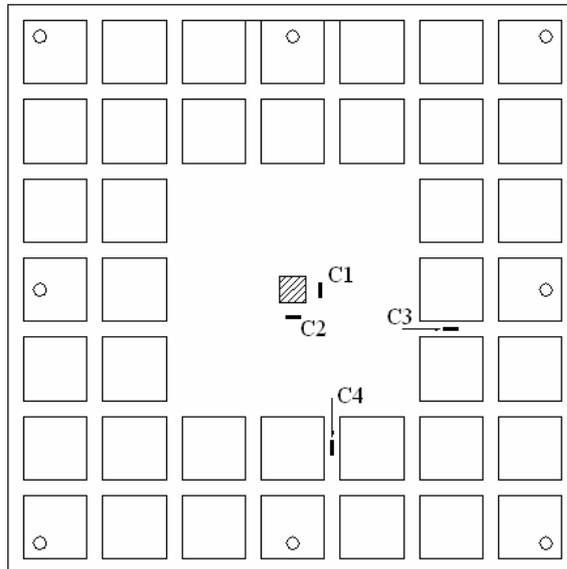


Figura A.2 – Posicionamento dos extensômetros na superfície de concreto

Tabela A.2.1 – Leitura dos extensômetros na superfície de concreto das lajes L1 e L2

Laje L1					Laje L2				
Carga (kN)	Extensômetro				Carga (kN)	Extensômetro			
	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)		C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)
0	0,10	0,06	0,05	0,04	0	0,10	0,06	0,05	0,04
10	0,15	0,09	0,08	0,06	10	0,04	0,03	0,01	0,04
20	0,22	0,12	0,11	0,08	20	0,08	0,05	0,03	0,07
30	0,29	0,16	0,15	0,11	30	0,13	0,08	0,04	0,11
40	0,36	0,20	0,20	0,13	40	0,21	0,12	0,06	0,15
50	0,43	0,25	0,25	0,16	50	0,31	0,16	0,09	0,20
60	0,51	0,31	0,29	0,19	60	0,41	0,20	0,11	0,24
70	0,58	0,36	0,34	0,22	70	0,53	0,25	0,12	0,29
80	0,65	0,42	0,40	0,25	80	0,64	0,30	0,13	0,33
90	0,73	0,49	0,44	0,26	90	0,74	0,36	0,14	0,37
100	0,80	0,57	0,47	0,29	100	0,83	0,44	0,15	0,42
110	0,88	0,65	0,54	0,33	110	0,92	0,51	0,16	0,46
120	0,96	0,73	0,61	0,37	120	1,01	0,59	0,17	0,51
130	1,05	0,81	0,66	0,40	130	1,11	0,67	0,18	0,56
140	1,13	0,89	0,68	0,43	140	1,20	0,76	0,20	0,61
150	1,23	0,98	0,72	0,47	150	1,28	0,83	0,22	0,66
160	1,33	1,08	0,76	0,50	160	1,38	0,92	0,23	0,71
170	1,44	1,17	0,77	0,54	170	1,49	1,01	0,25	0,76
180	1,55	1,26	0,81	0,57	180	1,60	1,10	0,27	0,82
190	1,66	1,35	0,85	0,60	190	1,70	1,18	0,29	0,87
200	1,79	1,45	0,83	0,63	200	1,80	1,26	0,31	0,92
210	1,92	1,55	0,87	0,69	210	1,93	1,36	0,33	0,97
220	2,06	1,65	0,92	0,72	220	2,05	1,45	0,35	1,02
230	2,21	1,75	0,96	0,75	230	2,20	1,56	0,37	1,07
240	2,44	1,89	1,00	0,79	240	2,34	1,67	0,39	1,12
250	2,61	2,00	1,03	0,81	250	2,49	1,78	0,41	1,17
260	2,82	2,13	1,06	0,84	260	2,65	1,90	0,44	1,21
270	3,01	2,34	1,07	0,86	270	2,84	2,03	0,46	1,26
280	0,10	0,06	0,05	0,04	280	2,95	2,18	0,47	1,30

Tabela A.2.2 – Leitura dos extensômetros na superfície de concreto das lajes L3 e L4

Laje L3					Laje L4				
Carga (kN)	Extensômetro				Carga (kN)	Extensômetro			
	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)		C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,03	0,03	0,03	0,03	10	0,03	0,02	0,01	0,03
20	0,06	0,06	0,05	0,05	20	0,06	0,05	0,02	0,05
30	0,11	0,10	0,07	0,07	30	0,10	0,09	0,04	0,08
40	0,17	0,16	0,10	0,09	40	0,15	0,14	0,05	0,11
50	0,24	0,22	0,13	0,11	50	0,22	0,18	0,06	0,15
60	0,31	0,28	0,16	0,13	60	0,30	0,21	0,07	0,19
70	0,43	0,35	0,18	0,17	70	0,40	0,25	0,08	0,23
80	0,52	0,42	0,19	0,21	80	0,49	0,29	0,09	0,27
90	0,61	0,49	0,21	0,25	90	0,58	0,34	0,11	0,31
100	0,70	0,58	0,24	0,30	100	0,67	0,40	0,14	0,34
110	0,79	0,66	0,26	0,35	110	0,75	0,46	0,17	0,38
120	0,88	0,74	0,29	0,39	120	0,83	0,52	0,20	0,41
130	0,96	0,82	0,31	0,43	130	0,92	0,59	0,23	0,45
140	1,06	0,90	0,33	0,48	140	1,00	0,64	0,26	0,48
150	1,16	0,99	0,35	0,52	150	1,09	0,70	0,29	0,53
160	1,25	1,06	0,37	0,56	160	1,18	0,76	0,32	0,56
170	1,35	1,15	0,40	0,60	170	1,27	0,82	0,35	0,61
180	1,45	1,24	0,42	0,64	180	1,36	0,88	0,39	0,64
190	1,55	1,34	0,44	0,68	190	1,46	0,95	0,42	0,68
200	1,66	1,44	0,46	0,72	200	1,58	1,02	0,46	0,72
210	1,76	1,54	0,48	0,76	210	1,70	1,09	0,50	0,77
220	1,87	1,66	0,51	0,81	220	1,82	1,17	0,54	0,81
230	1,97	1,77	0,53	0,85	230	1,94	1,24	0,58	0,84
240	2,09	1,90	0,55	0,89	240	2,08	1,33	0,61	0,88
250	2,20	2,01	0,57	0,94	250	2,20	1,40	0,65	0,91
260	2,32	2,15	0,59	0,98	260	2,36	1,50	0,68	0,93
270	2,45	2,32	0,61	1,03	270	2,50	1,60	0,72	0,95
280	2,55	2,48	0,63	1,07	280	2,59	1,67	0,75	0,97

Tabela A.2.3 – Leitura dos extensômetros na superfície de concreto das lajes L5 e L6

Laje L5			Laje L6				
Carga (kN)	Extensômetro		Carga (kN)	Extensômetro			
	C1 (‰)	C3 (‰)		C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)
0	0,10	0,06	0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,02	0,04	10	0,00	0,03	0,02	0,02
20	0,05	0,09	20	0,07	0,06	0,03	0,04
30	0,08	0,15	30	0,11	0,09	0,04	0,06
40	0,11	0,21	40	0,16	0,13	0,05	0,07
50	0,14	0,29	50	0,23	0,18	0,06	0,09
60	0,17	0,36	60	0,30	0,23	0,07	0,11
70	0,20	0,45	70	0,37	0,29	0,07	0,13
80	0,24	0,53	80	0,44	0,38	0,08	0,14
90	0,27	0,62	90	0,53	0,45	0,10	0,16
100	0,31	0,72	100	0,62	0,53	0,13	0,18
110	0,36	0,82	110	0,72	0,60	0,17	0,20
120	0,41	0,93	120	0,83	0,68	0,22	0,23
130	0,46	1,03	130	0,93	0,75	0,26	0,25
140	0,52	1,14	140	1,03	0,82	0,31	0,27
150	0,56	1,24	150	1,14	0,89	0,35	0,29
160	0,60	1,38	160	1,26	0,96	0,41	0,31
170	0,64	1,51	170	1,38	1,03	0,46	0,33
180	0,64	1,65	180	1,49	1,10	0,51	0,35
190	0,68	1,80	190	1,61	1,17	0,56	0,37
200	0,71	1,93	200	1,74	1,24	0,61	0,40
210	0,74	2,11	210	1,89	1,31	0,66	0,42
220	0,77	2,27	220	2,04	1,37	0,71	0,44
230	0,81	2,35	230	2,21	1,45	0,77	0,46
			240	2,36	1,52	0,82	0,48
			250	2,55	1,61	0,87	0,50
			260	2,70	1,68	0,92	0,52
			270	2,90	1,76	0,97	0,53
			280	3,06	1,83	1,02	0,55
			290	3,23	1,91	1,07	0,56
			300	3,36	1,97	1,12	0,58
			310	3,56	2,03	1,17	0,59
			320	3,73	2,08	1,21	0,61
			330	3,95	2,14	1,25	0,62
			340	4,15	2,21	1,30	0,63
			350	4,19	2,29	1,35	0,64
			360	3,86	2,41	1,42	0,65
			370	3,76	2,47	1,46	0,66
			380	3,66	2,08	1,51	0,67

Tabela A.2.4 – Leitura dos extensômetros na superfície de concreto das lajes L7 e L8

Laje L7			Laje L8		
Carga (kN)	Extensômetro		Carga (kN)	Extensômetro	
	C1 (‰)	C3 (‰)		C1 (‰)	C3 (‰)
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
10	0,04	0,01	10	0,02	0,01
20	0,08	0,02	20	0,05	0,03
30	0,12	0,02	30	0,08	0,05
40	0,17	0,03	40	0,11	0,07
50	0,22	0,03	50	0,15	0,10
60	0,27	0,02	60	0,17	0,13
70	0,33	0,02	70	0,20	0,16
80	0,40	0,01	80	0,23	0,20
90	0,45	0,01	90	0,25	0,23
100	0,52	0,01	100	0,28	0,28
110	0,59	0,00	110	0,32	0,31
120	0,65	0,00	120	0,34	0,35
130	0,73	0,00	130	0,36	0,37
140	0,80	0,00	140	0,38	0,41
150	0,88	0,01	150	0,41	0,44
160	0,97	0,01	160	0,39	0,47
170	1,06	0,03	170	0,39	0,50
180	1,15	0,05	180	0,36	0,53
190	1,25	0,07	190	0,32	0,56
200	1,35	0,10	200	0,18	0,58
210	1,47	0,13	210	0,09	0,61
220	1,60	0,16	220	0,09	0,64
230	1,72	0,20	230	0,08	0,68
240	1,84	0,24	240	0,09	0,71
250	1,98	0,29	250	0,09	0,74
260	2,11	0,33	260	0,06	0,78
270	2,27	0,37	270	0,06	0,81
280	2,43	0,41	280	0,06	0,85
290	2,60	0,46	290	0,09	0,88
300	2,81	0,50	300	0,07	0,90
310	2,99	0,54	310	0,07	0,92
320	3,14	0,57	320	0,03	0,93
330	3,25	0,60			
340	3,39	0,62			
350	3,55	0,65			
360	3,64	0,69			

A.3 Deformações da armadura de flexão

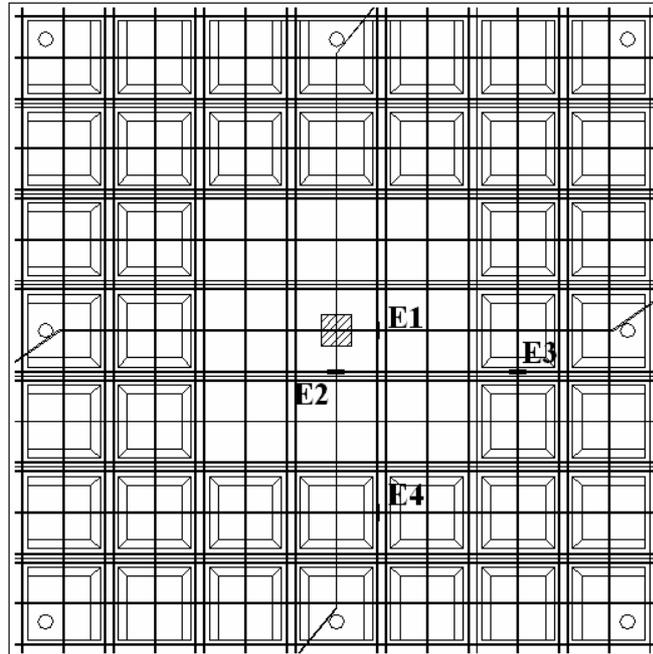


Figura A.3 – Posicionamento dos extensômetros na superfície de concreto

Tabela A.3.1 – Leitura dos extensômetros das armaduras de flexão das lajes L1 e L2

Laje L1					Laje L2				
Carga (kN)	Extensômetro				Carga (kN)	Extensômetro			
	E1 (‰)	E2 (‰)	E3 (‰)	E4 (‰)		E1 (‰)	E2 (‰)	E3 (‰)	E4 (‰)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,08	0,05	0,01	0,01	10	0,01	0,00	0,00	0,00
20	0,13	0,08	0,01	0,02	20	0,03	0,01	0,01	0,01
30	0,21	0,12	0,02	0,05	30	0,06	0,00	0,00	0,02
40	0,30	0,17	0,02	0,06	40	0,16	0,00	0,02	0,02
50	0,40	0,23	0,03	0,07	50	0,30	0,02	0,04	0,04
60	0,49	0,31	0,04	0,08	60	0,46	0,05	0,07	0,06
70	0,59	0,38	0,03	0,10	70	0,63	0,10	0,09	0,13
80	0,76	0,46	0,05	0,12	80	0,79	0,18	0,12	0,20
90	0,91	0,54	0,06	0,16	90	0,91	0,26	0,14	0,28
100	1,03	0,62	0,08	0,19	100	1,04	0,37	0,19	0,39
110	1,13	0,69	0,08	0,23	110	1,18	0,48	0,21	0,48
120	1,22	0,76	0,10	0,26	120	1,30	0,60	0,23	0,56
130	1,30	0,83	0,11	0,31	130	1,43	0,66	0,26	0,62
140	1,40	0,89	0,13	0,35	140	1,52	0,84	0,29	0,68
150	1,54	0,95	0,15	0,40	150	1,62	0,94	0,32	0,73
160	1,68	1,02	0,19	0,44	160	1,73	1,03	0,35	0,81
170	1,83	1,07	0,22	0,48	170	1,82	1,24	0,39	0,82
180	1,99	1,13	0,23	0,52	180	1,91	1,33	0,42	0,83
190	2,10	1,19	0,26	0,55	190	1,99	1,41	0,44	0,87
200	2,28	1,25	0,29	0,58	200	2,06	1,47	0,48	0,94
210	2,44	1,30	0,32	0,64	210	2,14	1,54	0,51	1,00
220	2,60	1,36	0,35	0,68	220	2,20	1,60	0,54	1,06
230	2,78	1,41	0,39	0,71	230	2,27	1,68	0,58	1,15
240	2,94	1,47	0,43	0,75	240	2,34	1,76	0,62	1,22
250	3,11	1,57	0,47	0,80	250	2,40	1,83	0,66	1,29
260	3,31	1,64	0,52	0,84	260	2,50	1,90	0,71	1,35
270	3,74	1,71	0,60	0,89	270	2,62	1,95	0,76	1,47
280	3,76	1,80	0,69	0,97	280	2,72	2,02	0,82	1,59

Tabela A.3.2 – Leitura dos extensômetros das armaduras de flexão das lajes L3 e L4

Laje L3					Laje L4				
Carga (kN)	Extensômetro				Carga (kN)	Extensômetro			
	E1 (‰)	E2 (‰)	E3 (‰)	E4 (‰)		E1 (‰)	E2 (‰)	E3 (‰)	E4 (‰)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,02	0,00	0,03	0,00	10	0,01	0,02	0,00	0,00
20	0,03	0,02	0,05	0,01	20	0,02	0,05	0,00	0,00
30	0,05	0,04	0,05	0,02	30	0,04	0,11	0,00	0,00
40	0,10	0,07	0,05	0,03	40	0,08	0,18	0,00	0,00
50	0,17	0,10	0,04	0,05	50	0,18	0,25	0,00	0,00
60	0,23	0,13	0,01	0,07	60	0,31	0,32	0,00	0,00
70	0,35	0,19	0,07	0,08	70	0,46	0,39	0,00	0,00
80	0,45	0,24	0,10	0,09	80	0,59	0,45	0,00	0,01
90	0,55	0,30	0,14	0,08	90	0,70	0,53	0,01	0,02
100	0,64	0,38	0,19	0,10	100	0,81	0,62	0,03	0,03
110	0,74	0,42	0,23	0,11	110	0,97	0,72	0,05	0,05
120	0,82	0,51	0,27	0,19	120	1,12	0,83	0,07	0,06
130	0,90	0,58	0,32	0,32	130	1,23	0,93	0,11	0,08
140	0,98	0,64	0,36	0,41	140	1,33	1,02	0,14	0,10
150	1,07	0,72	0,42	0,48	150	1,43	1,12	0,17	0,13
160	1,15	0,85	0,47	0,57	160	1,52	1,21	0,20	0,15
170	1,23	0,91	0,52	0,63	170	1,62	1,31	0,23	0,19
180	1,29	0,98	0,58	0,69	180	1,70	1,39	0,27	0,23
190	1,38	1,06	0,64	0,74	190	1,78	1,48	0,30	0,27
200	1,48	1,13	0,70	0,81	200	1,86	1,56	0,34	0,33
210	1,57	1,19	0,76	0,87	210	1,93	1,63	0,38	0,40
220	1,68	1,24	0,84	0,94	220	1,99	1,69	0,42	0,48
230	1,78	1,27	0,90	1,02	230	2,04	1,74	0,45	0,54
240	1,88	1,33	0,98	1,10	240	2,09	1,78	0,49	0,61
250	2,00	1,41	1,05	1,18	250	2,15	1,82	0,53	0,67
260	2,10	1,58	1,14	1,24	260	2,20	1,87	0,57	0,74
270	2,17	1,64	1,24	1,36	270	2,26	1,93	0,62	0,81
280	2,22	1,72	1,34	1,49	280	2,30	1,97	0,65	0,87

Tabela A.3.3 – Leitura dos extensômetros das armaduras de flexão das lajes L5 e L6

Laje L5			Laje L6				
Carga (kN)	Extensômetro		Carga (kN)	Extensômetro			
	E1 (‰)	E3 (‰)		E1 (‰)	E2 (‰)	E3 (‰)	E4 (‰)
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,04	0,00	10	0,01	0,01	0,00	0,00
20	0,08	0,00	20	0,03	0,03	0,01	0,00
30	0,13	0,00	30	0,07	0,05	0,02	0,00
40	0,18	0,00	40	0,13	0,10	0,03	0,00
50	0,25	0,00	50	0,24	0,14	0,04	0,00
60	0,31	0,00	60	0,36	0,20	0,05	0,00
70	0,37	0,00	70	0,47	0,28	0,07	0,01
80	0,44	0,01	80	0,57	0,38	0,09	0,02
90	0,52	0,01	90	0,67	0,52	0,11	0,04
100	0,60	0,02	100	0,77	0,63	0,15	0,07
110	0,70	0,03	110	0,88	0,75	0,21	0,14
120	0,79	0,05	120	0,98	0,87	0,27	0,23
130	0,90	0,07	130	1,06	0,96	0,34	0,36
140	1,00	0,09	140	1,17	1,06	0,40	0,49
150	1,11	0,12	150	1,27	1,16	0,44	0,61
160	1,24	0,15	160	1,40	1,26	0,49	0,73
170	1,37	0,19	170	1,50	1,37	0,54	0,83
180	1,51	0,24	180	1,58	1,46	0,58	0,86
190	1,64	0,29	190	1,67	1,55	0,62	0,87
200	1,77	0,34	200	1,78	1,64	0,67	0,88
210	1,90	0,41	210	1,87	1,72	0,72	0,87
220	2,02	0,48	220	1,97	1,79	0,76	0,88
230	2,70	0,55	230	2,06	1,85	0,82	0,89
			240	2,11	1,91	0,97	0,90
			250	2,22	1,97	1,22	0,92
			260	2,28	2,03	1,36	0,93
			270	2,36	2,09	1,54	0,95
			280	2,44	2,16	1,67	0,97
			290	2,52	2,21	1,80	1,01
			300	2,59	2,27	1,88	1,04
			310	2,68	2,33	1,98	1,08
			320	2,77	2,41	2,06	1,11
			330	2,85	2,47	2,18	1,41
			340	2,92	2,53	2,27	1,49
			350	2,99	2,62	2,37	1,57
			360	3,29	2,71	2,55	1,71
			370	3,53	2,78	2,68	1,84
			380	3,79	2,89	2,87	2,12

Tabela A.3.4 – Leitura dos extensômetros das armaduras de flexão das lajes L7 e L8

Laje L7			Laje L8		
Carga (kN)	Extensômetro		Carga (kN)	Extensômetro	
	E1 (‰)	E3 (‰)		E1 (‰)	E3 (‰)
0	0,02	0,00	0	0,00	0,00
10	0,05	0,00	10	0,01	0,01
20	0,04	0,00	20	0,04	0,02
30	0,10	0,01	30	0,08	0,03
40	0,16	0,01	40	0,13	0,05
50	0,23	0,01	50	0,19	0,06
60	0,44	0,00	60	0,27	0,08
70	0,69	0,00	70	0,35	0,09
80	0,95	-0,01	80	0,42	0,11
90	1,14	-0,01	90	0,49	0,12
100	1,31	0,05	100	0,56	0,15
110	1,46	0,09	110	0,64	0,18
120	1,60	0,10	120	0,73	0,22
130	1,76	0,11	130	0,81	0,25
140	1,91	0,14	140	0,89	0,31
150	2,04	0,15	150	0,96	0,35
160	2,16	0,19	160	1,04	0,40
170	2,35	0,21	170	1,11	0,44
180	2,47	0,24	180	1,17	0,49
190	2,56	0,27	190	1,25	0,55
200	2,63	0,30	200	1,32	0,59
210	2,71	0,34	210	1,39	0,64
220	2,80	0,44	220	1,47	0,69
230	2,84	0,48	230	1,55	0,75
240	2,91	0,53	240	1,62	0,80
250	3,01	0,58	250	1,68	0,85
260	3,13	0,61	260	1,76	0,91
270	3,22	0,68	270	1,82	0,96
280	3,34	0,76	280	1,89	1,01
290	3,45	0,80	290	1,92	1,07
300	3,53	0,87	300	1,94	1,15
310	3,59	0,92	310	1,99	1,24
320	3,63	1,00	320	2,08	1,34
330	3,66	1,21			
340	4,10	1,26			
350	4,23	1,36			
360	4,38	1,51			

A.4 Deformações da armadura de cisalhamento

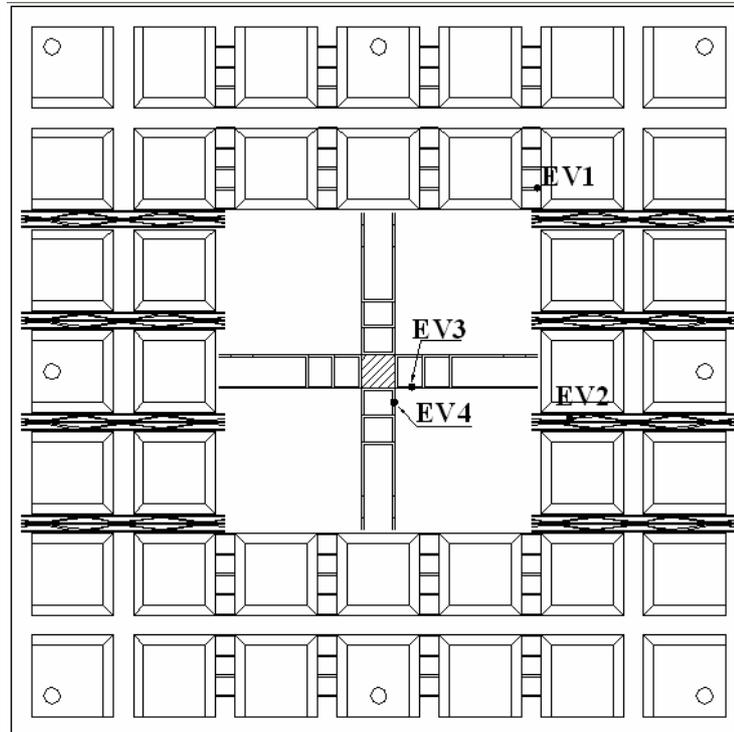


Figura A.4 – Posicionamento dos extensômetros na superfície de concreto

Tabela A.4.1 – Leitura dos extensômetros das armaduras de cisalhamento das lajes L2 e L3

Laje L2			Laje L3		
Carga (kN)	Extensômetro		Carga (kN)	Extensômetro	
	EV1 (%)	EV2 (%)		EV1 (%)	EV2 (%)
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
10	0,00	0,00	10	0,00	0,00
20	0,00	0,00	20	0,00	0,01
30	0,00	0,00	30	0,00	0,01
40	0,01	0,01	40	0,01	0,01
50	0,01	0,02	50	0,01	0,02
60	0,01	0,03	60	0,01	0,02
70	0,01	0,04	70	0,01	0,01
80	0,01	0,05	80	0,01	0,00
90	0,00	0,05	90	0,02	0,00
100	0,01	0,07	100	0,03	0,00
110	0,00	0,07	110	0,06	0,01
120	0,00	0,08	120	0,09	0,02
130	0,00	0,09	130	0,12	0,02
140	0,00	0,09	140	0,17	0,03
150	0,01	0,11	150	0,22	0,04
160	0,01	0,11	160	0,23	0,04
170	0,01	0,11	170	0,25	0,05
180	0,02	0,12	180	0,26	0,06
190	0,02	0,13	190	0,27	0,07
200	0,03	0,14	200	0,28	0,08
210	0,04	0,14	210	0,29	0,09
220	0,04	0,15	220	0,31	0,10
230	0,05	0,15	230	0,32	0,12
240	0,06	0,16	240	0,35	0,13
250	0,07	0,16	250	0,36	0,15
260	0,08	0,17	260	0,37	0,17
270	0,10	0,17	270	0,38	0,19
280	0,10	0,18	280	0,40	0,20

Tabela A.4.2 – Leitura dos extensômetros das armaduras de cisalhamento das lajes L4 e L5

Laje L4			Laje L5	
Carga (kN)	Extensômetro		Carga (kN)	Extensômetro
	EV1 (‰)	EV2 (‰)		EV1 (‰)
0	0,00	0,00	0	0,00
10	0,00	0,00	10	0,00
20	0,00	0,00	20	0,01
30	0,00	0,00	30	0,01
40	0,01	0,00	40	0,01
50	0,01	0,00	50	0,01
60	0,01	0,00	60	0,04
70	0,01	0,00	70	0,04
80	0,01	0,00	80	0,05
90	0,02	0,01	90	0,05
100	0,02	0,01	100	0,06
110	0,02	0,02	110	0,06
120	0,04	0,02	120	0,07
130	0,05	0,02	130	0,08
140	0,06	0,03	140	0,08
150	0,08	0,03	150	0,09
160	0,12	0,04	160	0,09
170	0,14	0,05	170	0,10
180	0,16	0,07	180	0,12
190	0,18	0,09	190	0,09
200	0,20	0,11	200	0,10
210	0,23	0,14	210	0,11
220	0,25	0,17	220	0,12
230	0,26	0,20	230	0,12
240	0,28	0,25	240	0,00
250	0,29	0,27	250	0,01
260	0,31	0,31	260	0,01
270	0,32	0,35	270	0,01
280	0,34	0,38	280	0,01

Tabela A.4.3 – Leitura dos extensômetros das armaduras de flexão das lajes L6 e L7

Laje L6					Laje L7		
Carga (kN)	Extensômetro				Carga (kN)	Extensômetro	
	EV1(‰)	EV2(‰)	EV3(‰)	EV4(‰)		EV1(‰)	EV3(‰)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,01	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	10	0,02	0,01
20	0,00	0,00	0,00	0,00	20	0,03	0,01
30	0,00	0,00	0,01	0,01	30	0,01	0,02
40	0,01	0,00	0,01	0,01	40	0,00	0,02
50	0,01	0,00	0,01	0,01	50	0,05	0,03
60	0,01	0,01	0,01	0,01	60	0,09	0,04
70	0,01	0,01	0,01	0,01	70	0,07	0,06
80	0,01	0,01	0,02	0,01	80	0,11	0,07
90	0,02	0,02	0,03	0,01	90	0,14	0,08
100	0,02	0,03	0,04	0,01	100	0,10	0,09
110	0,02	0,04	0,06	0,02	110	0,10	0,11
120	0,04	0,05	0,08	0,02	120	0,16	0,12
130	0,08	0,06	0,10	0,02	130	0,17	0,15
140	0,08	0,07	0,12	0,03	140	0,15	0,17
150	0,11	0,08	0,12	0,04	150	0,16	0,19
160	0,06	0,09	0,16	0,05	160	0,19	0,22
170	0,06	0,10	0,20	0,07	170	0,15	0,24
180	0,07	0,11	0,21	0,07	180	0,20	0,27
190	0,08	0,12	0,22	0,09	190	0,19	0,30
200	0,09	0,13	0,24	0,10	200	0,20	0,33
210	0,11	0,14	0,25	0,10	210	0,22	0,36
220	0,12	0,15	0,27	0,11	220	0,21	0,40
230	0,13	0,16	0,30	0,12	230	0,21	0,43
240	0,21	0,17	0,30	0,12	240	0,22	0,45
250	0,20	0,19	0,33	0,12	250	0,18	0,48
260	0,25	0,20	0,34	0,12	260	0,18	0,52
270	0,29	0,22	0,37	0,12	270	0,25	0,56
280	0,31	0,23	0,42	0,12	280	0,21	0,61
290	0,48	0,25	0,48	0,12	290	0,24	0,64
300	0,54	0,26	0,49	0,09	300	0,20	0,69
310	0,59	0,28	0,58	0,09	310	0,21	0,73
320	0,61	0,29	0,76	0,11	320	0,25	0,79
330	0,69	0,32	1,07	0,99	330	0,28	0,96
340	0,71	0,34	1,22	1,40	340	0,29	1,62
350	0,75	0,36	1,41	1,77	350	0,33	2,07
360	0,47	0,40	1,69	2,09	360	0,37	2,95
370	0,51	0,43	1,97	2,47			
380	0,57	0,50	2,55	3,01			

Tabela A.4.3 – Leitura dos extensômetros das armaduras de flexão da laje L8

Laje L8		
Carga (kN)	Extensômetro	
	EV1(‰)	EV3(‰)
0	0,00	0,00
10	0,07	0,00
20	0,07	0,01
30	0,10	0,01
40	0,10	0,02
50	0,14	0,02
60	0,05	0,03
70	0,19	0,04
80	0,13	0,05
90	0,09	0,06
100	0,06	0,07
110	0,19	0,09
120	0,20	0,10
130	0,20	0,11
140	0,21	0,12
150	0,23	0,13
160	0,26	0,15
170	0,28	0,17
180	0,29	0,18
190	0,30	0,20
200	0,30	0,22
210	0,32	0,25
220	0,34	0,28
230	0,31	0,31
240	0,32	0,34
250	0,31	0,38
260	0,41	0,44
270	0,41	0,50
280	0,44	0,56
290	0,42	0,90
300	0,52	1,77
310	0,52	2,49
320	0,63	3,34

APÊNDICE B

B.1 Determinação da altura útil

1. Dados da laje:

$$h = 140 \text{ mm}$$

$$d' = 25,25 \text{ mm}$$

$$A_{s1}(\phi 12,5 \text{ mm}) = 12 \cdot 122,7 = 1.473 \text{ mm}^2 \text{ (área de aço por metro)}$$

$$A_{s2}(\phi 6,0 \text{ mm}) = 4 \cdot 28,27 = 113 \text{ mm}^2 \text{ (área de aço por metro)}$$

2. Cálculo da altura útil na direção longitudinal (d_x)

$$d_{x1} = h - d' = 140 - 25,25 = 114,75$$

$$d_{x2} = h - d' - (1,5 \cdot 12,5) - (0,5 \cdot 6,0) = 140 - 25,25 - 18,75 - 3 = 93 \text{ mm}$$

$$d_x = \frac{(d_{x1} \cdot A_{s1}) + (d_{x2} \cdot A_{s2})}{(A_{s1} + A_{s2})} = \frac{(114,75 \cdot 1473) + (93 \cdot 113)}{(1473 + 113)} = 120,81 \text{ mm}$$

3. Cálculo da altura útil na direção transversal (d_y)

$$d_y = h - d' - (1 \cdot 12,5) = 140 - 25,25 - 12,5 = 102,25 \text{ mm}$$

4. Altura útil (d)

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} = \frac{120,81 + 102,25}{2} = 111,5 \text{ mm} \therefore d = 111 \text{ mm}$$

APÊNDICE C

C.1 Estimativas para determinação da carga última de cisalhamento nas nervuras

Tabela C.1.1 – Resultados estimados através do ACI 318

CISALHAMENTO NAS NERVURAS				
Laje	Sem <i>A_{sw}</i>		Com <i>A_{sw}</i>	
	Viga(1/6) (kN)	Viga(1/3) (kN)	Viga-tração (kN)	Viga (2/3) (kN)
L1	102,4	204,9	-	-
L2	-	-	222,7	429,8
L3	-	-	234,4	456,2
L4	-	-	250,5	491,3
L5	-	-	516,7	472,6
L6	-	-	221,9	438,5
L7	-	-	506,8	478,1
L8	-	-	378,9	449,6

Tabela C.1.2 – Resultados estimados através do MC90

CISALHAMENTO NAS NERVURAS						
Laje	Sem <i>A_{sw}</i>		Com <i>A_{sw}</i>			
	Laje (kN)	Viga (kN)	Viga (kN)			
			Comp.-30°	Tração-30°	Comp.-45°	Tração-45°
L1	147,9	216,9	-	-	-	-
L2	-	-	409,3	129,0	472,6	97,4
L3	-	-	459,5	141,7	530,6	106,9
L4	-	-	524,7	158,4	605,9	119,5
L5	-	-	486,3	557,8	561,5	322,1
L6	-	-	445,1	131,6	513,9	99,3
L7	-	-	518,0	558,6	598,1	322,5
L8	-	-	456,3	294,6	526,9	215,7

Tabela C.1.3 – Resultados estimados através da NBR 6118

CISALHAMENTO NAS NERVURAS												
Laje	Sem Asw		Com Asw - Compressão Diagonal				Com Asw - Tração Diagonal					
	Laje	Viga	Laje (kN)	Viga (kN)			Laje(kN)			Viga (kN)		
	(kN)	(kN)		Mod. I	Mod. II - 30	Mod. II - 45	Mod. I	Mod. II - 30	Mod. II - 45	Mod. I	Mod. II - 30	Mod. II - 45
L1	152,0	143,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L2	-	-	706,0	721,8	1076,2	1624,0	187,0	199,3	182,0	267,3	294,0	256,5
L3	-	-	759,2	772,6	1152,0	1738,4	198,1	210,9	192,8	282,2	310,2	270,8
L4	-	-	828,4	839,0	1250,9	1887,7	212,9	226,6	207,4	302,3	332,2	290,3
L5	-	-	786,6	800,4	693,2	800,4	183,8	205,1	175,2	590,1	775,9	515,0
L6	-	-	748,8	754,8	1125,4	1698,3	189,7	201,8	184,8	268,5	294,9	258,0
L7	-	-	826,6	829,2	718,1	829,2	185,6	206,6	177,3	581,3	763,9	509,0
L8	-	-	758,2	767,9	1048,9	1535,7	195,3	209,5	189,6	439,5	503,3	413,9

C.2 Estimativas para determinação da carga última de punção

Tabela C.2.1 – Resultados estimados através do ACI 318

PUNÇÃO					
Laje	U1 (mm)	Un,ef (mm)	V1 (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)
L1	820,0	-	210,0	-	-
L2	764,0	-	164,2	-	-
L3	784,0	-	178,8	-	-
L4	812,0	-	199,5	-	-
L5	800,0	-	189,0	-	-
L6	756,0	1714,5	-	248,6	375,9
L7	788,0	1948,2	-	282,6	465,7
L8	772,0	1904,9	-	260,3	428,3

Tabela C.2.2 – Resultados estimados através do MC90

PUNÇÃO						
Laje	Uo (mm)	U1 (mm)	Un,ef (mm)	V1 região sem armadura - kN	V2 região adjacente ao pilar - kN	V3 região com armadura - kN
L1	340	1848,0	-	341,6	-	-
L2	340	1672,0	-	284,9	-	-
L3	340	1734,9	-	303,5	-	-
L4	340	1822,8	-	329,3	-	-
L5	340	1785,1	-	316,5	-	-
L6	340	1646,9	2453,7	426,0	534,6	336,1
L7	340	1747,4	2618,2	471,4	587,4	357,6
L8	340	1697,2	2536,0	442,9	543,9	344,0

Tabela C.2.3 – Resultados estimados através da NBR 6118

PUNÇÃO						
Laje	Uo (mm)	U1 (mm)	Un,ef (mm)	V1 região sem armadura - kN	V2 região adjacente ao pilar - kN	V3 região com armadura - kN
L1	340,0	1848,0	-	345,4	-	-
L2	340,0	1672,0	-	288,1	-	-
L3	340,0	1734,9	-	306,9	-	-
L4	340,0	1822,8	-	332,9	-	-
L5	340,0	1785,1	-	320,1	-	-
L6	340,0	1646,9	2453,7	430,8	449,1	323,8
L7	340,0	1747,4	2618,2	476,6	493,4	346,1
L8	340,0	1697,2	2536,0	447,8	456,9	331,9