

**PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO
COM PILARES DE CANTO REENTRANTE**

WALLISON CARLOS DE SOUSA BARBOSA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO
COM PILARES DE CANTO REENTRANTE**

WALLISON CARLOS DE SOUSA BARBOSA

ORIENTADOR: GUILHERME SALES S. A. MELO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM-001A/12
BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2012**


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

**PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM
PILARES DE CANTO REENTRANTE**

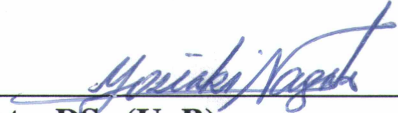
WALLISON CARLOS DE SOUSA BARBOSA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**


APROVADA POR:



Prof. Guilherme Sales S. de A. Melo, PhD (UnB)
(Orientador)



Prof. Yosiaki Nagato, DSc (UnB)
(Examinador Interno)



Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães, PhD (PUC-Rio)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 27 DE FEVEREIRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

BARBOSA, WALLISON CARLOS DE SOUSA	
Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Pilares de Canto Reentrante [Distrito Federal] 2012.	
xxvii, 211p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2012). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1.Punção	2.Lajes Lisas
3.Pilar de Canto Reentrante	
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARBOSA, W. C. S. (2012). Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Pilares de Canto Reentrante. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-001A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 211p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wallison Carlos de Sousa Barbosa

TÍTULO: Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Pilares de Canto Reentrante.

GRAU: Mestre

ANO: 2012

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

Wallison Carlos de Sousa Barbosa
Rua 7, 2411, Parque Progresso II.
64.077-560 Teresina – PI – Brasil.
wallcsb@gmail.com

Dedicatória.

Dedico este trabalho a Deus, fonte eterna e inesgotável de esperança, amor, bondade, sabedoria e inspiração, à minha mãe Laura Alves de Sousa Barbosa, ao meu pai Luis Carlos de Sousa Barbosa e à minha irmã Wellynne Carla de Sousa Barbosa, pelo amor, carinho, confiança e compreensão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela bondade e por sempre se mostrar presente em minha vida, quem segurou as pontas nos momentos difíceis e me iluminou nos momentos felizes.

Aos meus pais, Luis Carlos de Sousa Barbosa e Laura Alves de Sousa Barbosa pelo imenso amor, carinho e compreensão e à minha irmã Wellynne Carla de Sousa Barbosa por todo carinho, amor e motivação.

Ao Professor Guilherme Sales S. A. Melo, pela consistente orientação, disponibilidade, apoio, motivação e sabedoria ao longo do trabalho.

Ao Professor Yosiaki Nagato, pela disponibilidade, cordialidade, incentivo, esclarecimentos e sugestões durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Paul Regan, pelas valiosas contribuições, esclarecimentos e sugestões durante a realização do trabalho.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa de Análise Experimental de Estruturas da UnB: Elaine Albuquerque, Nívea Albuquerque, Juliano Silva, Fábio, Galileu, Maurício, Wagner e Helder pela fundamental ajuda na realização dos ensaios, conhecimentos compartilhados e incentivo.

Ao Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília pela oportunidade e acolhimento.

Aos Professores do PECC por todo conhecimento transmitido durante o mestrado.

À Eva Veloso, secretária do PECC, pela constante prontidão em ajudar, esclarecer e contribuir para o bom andamento das atividades diárias dos alunos e professores do Programa de Pós-Graduação.

Aos amigos: Henrique Campos Junior, Sebastião Simão, Iuri Lustosa, Jorge Campuzano, Ramon Saleno, Luís Alejandro Peña, Mylane Hortegal, Virley, Patrícia Fontoura, Marcus Tavares, Ádria Mendonça, Nailde Coelho, Maria de Nazaré, Abdala, Morgana e Fernanda pelos momentos de descontração, constante motivação e incentivo durante todo o mestrado.

Aos amigos e companheiros de Colina: Dyorgge Alves, Fabio Pedro, Urubatan Tupinanbá e Raphael pela convivência amistosa e momentos de descontração.

À empresa CONCRECON Ltda, pela colaboração com materiais de ensaio.

Aos colaboradores do Laboratório de Estruturas da UnB: Leandro, Adelmo, Júlio, Magno e Francisco por toda a ajuda na execução, montagem dos ensaios e incentivo.

Aos colaboradores do Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB: Severino e Washington pela ajuda nos ensaios de caracterização dos materiais e Valderí pela execução das formas dos pilares dos modelos.

Aos colaboradores do Laboratório de Mecânica da UnB: Artur e Xavier, pela ajuda na execução dos *studs* e das conexões de fixação dos modelos no pórtico de reação.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Confia no Senhor e faze o bem; assim habitarás na terra, e te alimentarás em segurança.

Deleita-te também no Senhor, e ele te concederá o que deseja o teu coração.

Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele tudo fará.

E ele fará sobressair a tua justiça como a luz, e o teu direito como o meio-dia.

Salmo 37:3,6

RESUMO

PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM PILARES DE CANTO REENTRANTE

Autor: Wallison Carlos de Sousa Barbosa

Orientador: Guilherme Sales S. A. Melo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, fevereiro de 2012

A ligação direta entre pilares e lajes de concreto armado é uma alternativa cada vez mais frequente nos projetos de construção civil. Diversos fatores podem indicar a conveniência da utilização de um modelo estrutural do tipo laje lisa, ou solução com pilar apoiado em uma laje. Em ambos os casos, têm-se a situação da carga aplicada em uma área reduzida, gerando tensões de cisalhamento significativas na região da laje ao redor do pilar ou área carregada. Assim a laje tende a romper por punção.

Neste trabalho foram investigados o comportamento estrutural e a resistência última à punção de ligações entre lajes lisas e pilares de canto reentrante. As principais variáveis consideradas foram: armadura de cisalhamento e excentricidade de carga na ligação. Foram ensaiados quatro modelos locais de ligação laje-pilar de canto reentrante, distribuídos em dois grupos: um com duas lajes sem armadura de cisalhamento, ensaiadas com diferentes excentricidades de carga e o outro grupo com duas lajes, uma com três e a outra com quatro camadas de *double headed studs* com disposição radial.

Foram analisados os resultados de cargas últimas, fissuração, deslocamento vertical, deformações das armaduras de flexão e de cisalhamento e do concreto, e rotação das lajes. A armadura de cisalhamento e as diferentes excentricidades de carga influenciaram o comportamento e a carga de ruptura das lajes. Essas influências foram quantificadas.

Os resultados experimentais foram comparados com os estimados segundo as normas: NBR 6118:2007, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2008. Para os modelos sem armadura de cisalhamento as estimativas de resistência à punção obtidas com a NBR 6118:2007 e o Eurocode 2:2004 foram semelhantes aos resultados obtidos experimentalmente, enquanto que o ACI 318:2008 apresentou resultados mais conservadores de resistência à punção em relação aos observados em laboratório.

ABSTRACT

PUNCHING IN REINFORCED CONCRETE FLAT SLABS WITH REENTRANT CORNER COLUMN

Author: Wallison Carlos de Sousa Barbosa

Supervisor: Guilherme Sales S. A. Melo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, February of 2012

The direct link between reinforced concrete columns and slabs is an alternative increasingly common in civil construction projects. Several factors may indicate the convenience of the use of a structural model of the type flat slab or with column supported by a slab. In both cases, there is the situation of load applied in a small area, generating significant shear stresses in the region of the slab around the column or the loaded area, thus the slab tends to fail by punching.

In this work it was investigated the structural behavior and ultimate punching strength of connections between flat slabs and reentrant corner columns. The main variables considered were shear reinforcement and eccentricity of the load on the link. Four local models of slab-reentrant corner column link were tested, divided in two groups: one with two slabs without shear reinforcement tested with different load eccentricities and the other with two slabs, one with three and the other with four layers of double headed studs with radial layout.

It was analyzed the results of ultimate load, cracking, vertical displacement, strains in bending and shear reinforcement and at the bottom surface of the concrete, and slab rotation. The shear reinforcement and different load eccentricities influenced the behavior and rupture load of the slabs. These influences were quantified.

The experimental results were compared with those estimated according to the codes: NBR 6118:2007, Eurocode 2:2004 and ACI 318: 2008. For models without shear reinforcement, estimates of punching strength obtained with NBR 6118:2007 and Eurocode 2:2004 were similar to those obtained experimentally, while ACI 318:2008 presented more conservative results of punching strength than those observed in laboratory.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	3
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	4
1.2.1	Objetivo Geral	4
1.2.2	Objetivos Específicos	5
1.3	METODOLOGIA	5
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	7
2.1.1	Aspectos Gerais sobre ruptura por punção em lajes lisas.....	7
2.1.2	Armadura de Cisalhamento	9
2.2	TRABALHOS EXPERIMENTAIS CONSIDERADOS PARA O ESTUDO DO FENÔMENO DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM PILARES DE CANTO REENTRANTE	14
2.2.1	Pesquisas realizadas no Exterior	15
2.2.1.1	REGAN E SAMADIAN (2001).....	15
2.2.1.2	RUIZ E MUTTONI (2009)	19
2.2.2	Pesquisas realizadas no Brasil	24
2.2.2.1	CORDOVIL (1995)	24
2.2.2.2	TRAUTWEIN (2006)	28
2.2.2.3	GOMES (2010)	30
2.2.2.4	FERREIRA (2010)	33
2.3	PRESCRIÇÕES NORMATIVAS.....	37
2.3.1	Eurocode 2:2004 - Design of concrete structures.....	37
2.3.2	ACI 318:2008 - Building Code Requirements for Structural Concrete	43
2.3.3	NBR 6118:2007 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.	47
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS	52
3.2	ARMADURA DE FLEXÃO.....	54
3.3	ARMADURA DE CISALHAMENTO	56
3.4	ARMADURA DOS PILARES	59
3.5	FÔRMAS	59

3.6	INSTRUMENTAÇÃO	60
3.6.1	Deslocamentos Verticais	60
3.6.2	Deformação nas Armaduras e na superfície do Concreto	63
3.6.3	Rotação da Laje	67
3.7	SISTEMA DE ENSAIO	68
3.8	MONTAGEM DOS ENSAIOS	74
3.9	MOLDAGEM E CURA	74
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	77
4.1	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	77
4.1.1	Concreto	77
4.1.2	Aço	79
4.2	CARGAS DE RUPTURA	80
4.3	DESLOCAMENTOS VERTICAIS	81
4.4	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO	91
4.5	DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE CISALHAMENTO (STUDS)	104
4.6	DEFORMAÇÃO NO CONCRETO	106
4.7	ROTAÇÕES DAS LAJES	109
4.8	MAPA DE FISSURAÇÃO	110
4.9	RESUMO DOS RESULTADOS	114
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	116
5.1	DESLOCAMENTOS VERTICAIS	117
5.2	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO	121
5.3	ARMADURA DE CISALHAMENTO	124
5.4	DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO	127
5.5	ROTAÇÕES DAS LAJES	128
5.6	PADRÃO DE FISSURAÇÃO DOS MODELOS	130
5.7	CARGAS E MODOS DE RUPTURA	132
5.7.1	NBR 6118:2007	133
5.7.2	Eurocode 2:2004	135
5.7.3	ACI 318:2008	138
5.7.4	Análise dos resultados dos ensaios e das prescrições normativas quanto às cargas de ruptura	140
6	ANÁLISE NUMÉRICA	143
6.1	MODELO NUMÉRICO	143

7	CONCLUSÕES.....	151
7.1	COMPORTAMENTO DAS LAJES.....	151
7.1.1	Modo, carga e superfície de ruptura	151
7.1.2	Deslocamentos verticais	152
7.1.3	Deformação das armaduras de flexão e dos <i>studs</i>	153
7.1.4	Deformações do concreto	153
7.1.5	Inclinações das lajes	154
7.1.6	Normas de projeto	154
7.1.7	Análise numérica	155
7.2	SISTEMA DE ENSAIO	155
7.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	155
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
	APÊNDICES.....	162
A.	EVOLUÇÃO DAS CARGAS ATÉ A RUPTURA.....	163
B.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS LAJES.....	168
C.	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO E DE CISCALHAMENTO.....	173
D.	DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO	186
E.	INCLINAÇÕES DAS LAJES	191
F.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS NAS BORDAS DAS LAJES.....	196
G.	CARGAS, MODOS DE RUPTURA E PARÂMETROS NORMATIVOS.....	201
H.	DISTRIBUIÇÃO DAS ARMADURAS	205
I.	PROJETO DAS FÔRMAS METÁLICAS UTILIZADAS NA PESQUISA... 	208
J.	DISPOSITIVO DE TRAVAMENTO DOS PILARES	209

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características gerais e resultados das lajes ensaiadas.....	16
Tabela 2.2 - Lajes ensaiadas (Cordovil, 1995).....	26
Tabela 2.3 - Características geométricas e resultados experimentais (Trautwein, 2006)....	30
Tabela 2.4 - Dimensões e variáveis dos modelos (Gomes, 2010).....	31
Tabela 2.5 - Grupos e parâmetros (Gomes, 2010).....	32
Tabela 2.6 - Relação Momento/Cortante (M/V) e cargas de ruptura (Gomes, 2010).....	32
Tabela 2.7 - Características das lajes (Ferreira, 2010).....	35
Tabela 2.8 - Valores de k para pilares retangulares (Eurocode 2:2004).....	40
Tabela 2.9 - Valores de K (NBR 6118:2007).....	49
Tabela 3.1 - Características dos modelos.....	53
Tabela 4.1 - Ensaio de Compressão.....	78
Tabela 4.2 - Ensaio de Tração por Compressão Diametral.....	78
Tabela 4.3 - Ensaio de Módulo de Elasticidade.....	78
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do Concreto.....	79
Tabela 4.5 - Propriedades mecânicas do aço utilizado nas lajes.....	80
Tabela 4.6 - Carga de ruptura das lajes.....	81
Tabela 4.7 - Resumo dos resultados experimentais (deslocamentos verticais e deformação na armadura de flexão).....	114
Tabela 4.8 - Resumo dos resultados experimentais (deformações na armadura de cisalhamento e na superfície do concreto).....	115
Tabela 5.1 - Grupos e parâmetros analisados.....	116
Tabela 5.2 - Deslocamentos verticais nas direções S-N e L-O.....	118
Tabela 5.3 - Deslocamentos verticais nas direções SO-NE e SE-NO.....	118
Tabela 5.4 - Extensômetros mais solicitados na armadura de flexão.....	124
Tabela 5.5 - Valores máximos de deformação na armadura de cisalhamento.....	126
Tabela 5.6 - Cargas correspondentes ao surgimento de fissuras.....	131
Tabela 5.7 - Cargas últimas e modos de ruptura dos modelos.....	132
Tabela 5.8 - Cargas de punção segundo a NBR 6118:2007 para todos os modelos.....	133
Tabela 5.9 - Cargas de punção pelo Eurocode 2:2004 para todos os modelos.....	136
Tabela 5.10 - Cargas de punção pelo ACI 318:2008 para todos os modelos.....	138
Tabela 6.1 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo.....	144
Tabela 6.2 - Deslocamentos verticais.....	150

Tabela A. 1 - Evolução de cargas para o modelo LR01	164
Tabela A. 2 - Evolução de cargas para o modelo LC02	165
Tabela A. 3 - Evolução de cargas para o modelo LC03	166
Tabela A. 4 - Evolução de cargas para o modelo LR04	167
Tabela B. 1 - Deslocamentos verticais no modelo LR01	169
Tabela B. 2 - Deslocamentos verticais no modelo LC02	170
Tabela B. 3 - Deslocamentos verticais no modelo LC03	171
Tabela B. 4 - Deslocamentos verticais no modelo LR04	172
Tabela C. 1 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LR01 (EF1 a EF14)	174
Tabela C. 2 - Deformação na armadura de flexão superior do modelo LR01 (EF15 a EF27)	175
Tabela C. 3 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC02 (EF1 a EF14)	176
Tabela C. 4 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC02 (EF15 a EF27)	177
Tabela C. 5 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC03 (EF1 a EF14)	178
Tabela C. 6 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC03 (EF15 a EF27)	179
Tabela C. 7 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LR04 (EF1 a EF14)	180
Tabela C. 8- Deformações na armadura de flexão superior do modelo LR04 (EF15 a EF27)	181
Tabela C. 9 - Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LR01	182
Tabela C. 10 - Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LC02	183
Tabela C. 11 - Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LC03	184
Tabela C. 12- Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LR04	185
Tabela D. 1 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LR01.....	187
Tabela D. 2 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LC02.....	188
Tabela D. 3 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LC03.....	189
Tabela D. 4 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LR04.....	190
Tabela E. 1 - Inclinações da laje LR01.....	192
Tabela E. 2- Inclinações da laje LC02.....	193

Tabela E. 3- Inclinações da laje LC03.....	194
Tabela E. 4 - Inclinações da laje LR04.....	195
Tabela F. 1 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LR01	197
Tabela F. 2 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LC02	198
Tabela F. 3 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LC03	199
Tabela F. 4 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LR04	200
Tabela G. 1 - Parâmetros para cálculo de resistência estimada pela NBR 6118:2007.....	202
Tabela G. 2 - Cargas de ruptura estimadas pela NBR 6118:2007.....	202
Tabela G. 3 - Parâmetros para cálculo de resistência estimada pelo Eurocode 2:2004 ...	203
Tabela G. 4- Cargas de ruptura estimadas pelo Eurocode 2:2004.....	203
Tabela G. 5 - Parâmetros para cálculo de resistência estimada pelo ACI 318M:2008 ...	204
Tabela G. 6 - Cargas de ruptura estimadas pelo ACI 318:2008	204

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistemas estruturais em lajes lisas (Ferreira, 2010).....	1
Figura 1.2 - Colapso parcial do edifício Pipers Row Car Park, Wolverhampton (1997).....	3
Figura 1.3 - Colapso parcial em Garagem Comercial, Christchurch CBD, Nova Zelândia (2011)	3
Figura 2.1 – Representação esquemática da ruptura por punção para lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento (CEB-FIP/MC90:1993).....	7
Figura 2.2 - Ruptura por punção em laje-lisa (modificado – Mirzaei, 2010).....	8
Figura 2.3 - Perspectivas esquemáticas de superfície de ruína devidas à punção em ligações laje-pilar em lajes lisas (Carvalho, 2009)	8
Figura 2.4 - Tipos de armaduras de cisalhamento para lajes lisas (Ferreira, 2010)	10
Figura 2.5 - Detalhes do sistema de armaduras (Halfen Deha, 2010).....	11
Figura 2.6 - Detalhes do sistema de armaduras (Schöck Bole, 2004).....	12
Figura 2.7 - Arranjos para a distribuição das armaduras de cisalhamento (NBR 6118:2007)	13
Figura 2.8 - Ancoragem de <i>double-headed studs</i> em lajes lisas (Ferreira, 2010)	13
Figura 2.9 - Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes R1 a R4, A1 e A2 (Regan e Samadian, 2001).....	17
Figura 2.10 - Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes RS1 e RS2 (Regan e Samadian, 2001).....	18
Figura 2.11 - Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes S1 e S2	18
Figura 2.12 - Superfícies de ruptura das lajes ensaiadas (Regan e Samadian, 2001).....	19
Figura 2.13 - Modos de ruptura de lajes lisas com armadura de cisalhamento.....	19
Figura 2.14 - Resistência a punção em lajes com armadura de cisalhamento baseado na CSCT (Ruiz e Muttoni, 2009)	21
Figura 2.15 - Contribuição da armadura de cisalhamento. (a) Parâmetros geométricos da armadura de cisalhamento e fissura crítica de cisalhamento. (b) Abertura das fissuras críticas de cisalhamento e deslocamento longitudinal e transversal em relação à armadura de cisalhamento. (c) Contribuição da armadura de cisalhamento dentro do	21
Figura 2.16 - Sistema de ensaio e detalhes das lajes (Cordovil, 1995)	24
Figura 2.17 - Armaduras de cisalhamento (Cordovil, 1995).....	26
Figura 2.18 - Perímetros de controle (Cordovil, 1995)	27
Figura 2.19 - Sistema de ensaio (Trautwein, 2006).....	28

Figura 2.20 - Desenho esquemático do posicionamento da armadura de cisalhamento (Trautwein, 2006).....	29
Figura 2.21 - Geometria dos modelos locais de ensaio (Gomes, 2010).....	31
Figura 2.22 - Programa de ensaios (Ferreira, 2010).....	34
Figura 2.23 - Projeto de armaduras de flexão das lajes (Ferreira, 2010).....	36
Figura 2.24 - Modelo para verificar a ruptura por punção no estado limite último (Eurocode 2:2004).....	37
Figura 2.25 - Perímetro de controle típico ao redor de áreas carregadas (Eurocode 2:2004).....	37
Figura 2.26 - Perímetro crítico com a existência de furo (Eurocode 2:2004).....	38
Figura 2.27 - Armadura de borda (Eurocode 2: 2004).....	38
Figura 2.28 - Distribuição de cisalhamento devido a um momento desbalanceado para laje com pilar interno (Eurocode 2:2004).....	40
Figura 2.29 - Perímetro de controle externo à região com armaduras de cisalhamento (Eurocode 2:2004).....	42
Figura 2.30 - Localização da seção crítica e suposta distribuição das tensões de cisalhamento (ACI 318:2008).....	43
Figura 2.31 - Perímetro crítico para lajes com furos (ACI 318:2008).....	44
Figura 2.32 - Perímetro crítico para pilares internos, de borda e de canto (NBR 6118:2007).....	48
Figura 2.33 - Perímetro crítico para lajes com furos (NBR 6118:2007).....	48
Figura 2.34 - Disposição da armadura de punção em planta e contorno da superfície crítica C” (NBR 6118: 2007).....	49
Figura 2.35 - Disposição da armadura de punção (NBR 6118: 2007).....	49
Figura 3.1 - Idealização dos modelos locais para análise experimental.....	52
Figura 3.2- Geometria dos modelos locais ensaiados.....	53
Figura 3.3 - Armadura superior de flexão dos modelos.....	54
Figura 3.4 - Armadura inferior de flexão dos modelos.....	55
Figura 3.5 - Projeto das armaduras de cisalhamento.....	57
Figura 3.6- Detalhes das armaduras de cisalhamento.....	58
Figura 3.7 - Distribuição dos <i>studs</i> nos modelos LC02 e LC03.....	58
Figura 3.8 - Projeto de armadura dos pilares.....	59
Figura 3.9 - Detalhes das formas.....	60
Figura 3.10 - Posicionamento dos LVDTs nos modelos.....	61

Figura 3.11- LVDTs utilizados para medir os deslocamentos verticais.....	61
Figura 3.12 - Potenciômetro utilizado para medir deslocamento vertical do ponto L16	62
Figura 3.13 - Projeto de posicionamento das réguas	62
Figura 3.14 - Posicionamento das réguas no modelo LR04	63
Figura 3.15 - Procedimento de colagem dos extensômetros	64
Figura 3.16 - Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão superior	65
Figura 3.17 - Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão inferior.....	66
Figura 3.18 - Posicionamento dos extensômetros nos <i>studs</i>	66
Figura 3.19 - Posicionamento dos extensômetros na superfície do concreto	67
Figura 3.20 - Detalhe dos inclinômetros	67
Figura 3.21 - Posicionamento dos inclinômetros (dimensões em milímetro).....	68
Figura 3.22 - Sistema de ensaio: vista superior	69
Figura 3.23 - Detalhes do Sistema de Ensaio.....	70
Figura 3.24 - Sistema de ensaio: vista superior	71
Figura 3.25 - Sistema de ensaio: vista lateral	71
Figura 3.26 - Sistema de ensaio: vista frontal	72
Figura 3.27 - Sistema de ensaio: vista 3D	72
Figura 3.28 - Foto do sistema de ensaio da laje LC03	73
Figura 3.29 - Sistema de aquisição de dados.....	73
Figura 3.30 - Concretagem dos Modelos	75
Figura 3.31 - Cura dos modelos	76
Figura 4.1 - Ensaio de tração do aço	79
Figura 4.2 - Curvas tensão-deformação do aço das armaduras de flexão	80
Figura 4.3 - Curva tensão-deformação do aço das armaduras de cisalhamento.....	80
Figura 4.4 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LR01	82
Figura 4.5 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LR01	82
Figura 4.6 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LR01	82
Figura 4.7 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LR01	83
Figura 4.8 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LC02	83
Figura 4.9 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LC02	83
Figura 4.10 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LC02.....	84
Figura 4.11 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LC02.....	84
Figura 4.12 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LC03	84
Figura 4.13 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LC03	85

Figura 4.14 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LC03	85
Figura 4.15 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LC03	85
Figura 4.16 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LR04	86
Figura 4.17 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LR04	86
Figura 4.18 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LR04	86
Figura 4.19 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LR04	87
Figura 4.20 - Carga versus deslocamento do Modelo LR01	87
Figura 4.21 - Carga versus deslocamento do Modelo LC02	87
Figura 4.22 - Carga versus deslocamento do Modelo LC03	88
Figura 4.23 - Carga versus deslocamento do Modelo LR04	88
Figura 4.24- Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LR01	89
Figura 4.25 - Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LC02	89
Figura 4.26- Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LC03	90
Figura 4.27 - Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LR04	90
Figura 4.28 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01	91
Figura 4.29 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01	92
Figura 4.30 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01	92
Figura 4.31 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01	92
Figura 4.32 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01	93
Figura 4.33 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01	93
Figura 4.34 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02	93
Figura 4.35 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02	94
Figura 4.36 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02	94
Figura 4.37 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02	94
Figura 4.38 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02	95
Figura 4.39 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02	95
Figura 4.40 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03	95
Figura 4.41 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03	96
Figura 4.42 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03	96
Figura 4.43 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03	96
Figura 4.44 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03	97
Figura 4.45 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03	97
Figura 4.46 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04	97
Figura 4.47 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04	98

Figura 4.48 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04.....	98
Figura 4.49 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04.....	98
Figura 4.50 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04.....	99
Figura 4.51 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04.....	99
Figura 4.52 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR01	99
Figura 4.53 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR01	100
Figura 4.54 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR01	100
Figura 4.55 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC02	100
Figura 4.56 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC02	101
Figura 4.57 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC02	101
Figura 4.58 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC03	101
Figura 4.59 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC03	102
Figura 4.60 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC03	102
Figura 4.61 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR04	102
Figura 4.62 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR04	103
Figura 4.63 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR04	103
Figura 4.64 - Deformações na 1ª camada de <i>studs</i> do modelo LC02	104
Figura 4.65 - Deformações na 2ª camada de <i>studs</i> do modelo LC02	104
Figura 4.66 - Deformações na 3ª camada de <i>studs</i> do modelo LC02	105
Figura 4.67 - Deformações na 1ª camada de <i>studs</i> do modelo LC03	105
Figura 4.68 - Deformações na 2ª camada de <i>studs</i> do modelo LC03	105
Figura 4.69 - Deformações na 3ª camada de <i>studs</i> do modelo LC03	106
Figura 4.70 - Deformações na 4ª camada de <i>studs</i> do modelo LC03	106
Figura 4.71 - Deformações na superfície do concreto do modelo LR01	107
Figura 4.72 - Deformações na superfície do concreto do modelo LC02	107
Figura 4.73 - Deformações na superfície do concreto do modelo LC03	108
Figura 4.74 - Deformações na superfície do concreto do modelo LR04	108
Figura 4.75 - Rotações na laje LR01	109
Figura 4.76 - Rotações na laje LC02	109
Figura 4.77 - Rotações na laje LC03	110
Figura 4.78 - Rotações na laje LR04	110
Figura 4.79 - Configuração de fissuras do modelo LR01	111
Figura 4.80 - Configuração de fissuras do modelo LC02	111
Figura 4.81 - Configuração de fissuras do modelo LC03	112

Figura 4.82 - Configuração de fissuras do modelo LR04.....	112
Figura 4.83 – Aspecto das fissuras na reentrância da laje LR01	113
Figura 4.84 - Aspecto das fissuras na reentrância da laje LC02	113
Figura 4.85 - Aspecto das fissuras na reentrância da laje LC03	113
Figura 4.86 - Aspecto das fissuras na reentrância da laje LR04	114
Figura 5.1 - Resumo das características dos modelos do Grupo 1	116
Figura 5.2 - Resumo das características dos modelos do Grupo 2.....	117
Figura 5.3 – Deslocamentos verticais máximos na direção S-N dos modelos ensaiados .	118
Figura 5.4 - Deslocamentos verticais máximos na direção L-O dos modelos ensaiados..	119
Figura 5.5 - Deslocamentos verticais máximos na direção SO-NE dos modelos ensaiados	119
Figura 5.6 - Deslocamentos verticais máximos na direção SE-NO dos modelos ensaiados	119
Figura 5.7 - Deslocamento vertical na borda N-S para os modelos ensaiados.....	120
Figura 5.8 - Deslocamento vertical em uma das bordas na direção L-O para os modelos ensaiados.....	121
Figura 5.9 - Deformações na armadura de flexão superior na direção NO-SE.....	122
Figura 5.10 - Deformações na armadura de flexão superior na direção SO-NE.....	123
Figura 5.11 - Disposição dos extensômetros na armadura de cisalhamento	125
Figura 5.12 - Deformações registradas pelos extensômetros da armadura de cisalhamento	126
Figura 5.13 - Deformações na superfície inferior do concreto.....	128
Figura 5.14 - Rotações das lajes dos modelos	129
Figura 5.15 – Perímetros de controle segundo a NBR 6118:2007	133
Figura 5.16 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura estimadas para o Grupo 1 de acordo com a NBR 6118:2007	134
Figura 5.17 – Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura dentro e fora da região de armadura de cisalhamento de acordo com a NBR 6118:2007.....	134
Figura 5.18 - Perímetros de controle segundo o Eurocode 2:2004	136
Figura 5.19 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura estimadas para o Grupo 1 de acordo com o Eurocode 2:2004	136
Figura 5.20 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura dentro e fora da região de armadura de cisalhamento de acordo com o Eurocode 2:2004.	137
Figura 5.21 - Perímetros de controle segundo o ACI 318:2008.....	138

Figura 5.22 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura estimadas para o Grupo 1 de acordo com o ACI 318:2008.....	139
Figura 5.23 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura dentro e fora da região de armadura de cisalhamento de acordo com o ACI 318:2008.....	139
Figura 5.24 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LR01	140
Figura 5.25 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LC02.....	141
Figura 5.26 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LC03	141
Figura 5.27 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LR04.....	141
Figura 6.1 - Elemento sólido SOLID65 (Biblioteca do ANSYS)	143
Figura 6.2 - Modelagem computacional.....	144
Figura 6.3 - Malha adotada para análise em elementos finitos	145
Figura 6.4 - Deslocamento na direção z (valores em metro) para o modelo LR01	145
Figura 6.5 - Deslocamento na direção z (valores em metro) para o modelo LR04.....	146
Figura 6.6 - Deslocamentos verticais na direção S-N	147
Figura 6.7 - Deslocamentos verticais na direção L-O	148
Figura 6.8 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO	149
Figura A. 1 - Posicionamento dos atuadores hidráulicos	163
Figura H. 1 - Armaduras das lajes LR01 e LR04	205
Figura H. 2 - Armaduras da laje LC02	206
Figura H. 3- Armaduras da laje LC03	207
Figura I. 1 - Projeto de fôrmas.....	208
Figura J. 1 - Detalhe da chapa inferior do portico de reação.....	209
Figura J. 2- Chapa de base em perspectiva.....	209
Figura J. 3 - Detalhe das peças da conexão inferior	210
Figura J. 4 - Detalhes da conexão de travamento inferior dos modelos.....	210
Figura J. 5 - Detalhes da chapa superior do pórtico de reação	211
Figura J. 6 - Chapa Superior em perspectiva.....	211
Figura J. 7 - Detalhe das peças da conexão superior	212
Figura J. 8- Detalhes da conexão de travamento superior dos modelos.....	212

LISTA DE SÍMBOLOS

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta dissertação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

A_c - área de concreto na seção crítica;

A_{si} - área da seção transversal da armadura de cisalhamento;

A_{sw} - área das armaduras de cisalhamento por camada;

b_0 - perímetro da seção crítica para pilares de borda;

$b_{o,int}$ - perímetro de controle (afastado $0,5.d$ além da extremidade da fissura, tipicamente na face da coluna);

b_1 - comprimento do perímetro crítico perpendicular à borda livre;

b_2 - comprimento do perímetro crítico paralelo à borda livre;

b_w - largura da seção crítica ou largura da área tributária considerada;

C_1 - dimensão do pilar perpendicular à borda livre;

C_2 - dimensão do pilar paralela à borda livre;

c_1 - dimensão da coluna paralela à excentricidade da carga;

c_2 - dimensão de coluna perpendicular à excentricidade da carga;

c_{AB} - excentricidade do perímetro crítico, corresponde à distância entre o eixo que passa pelo centróide do perímetro crítico e o lado deste paralelo à borda livre;

$c_{máx}$ - lado maior do pilar;

$c_{mín}$ - lado menor do pilar;

d - altura útil da laje;

d_g - tamanho máximo do agregado;

d_{g0} - tamanho do agregado de referência definido para 16 mm (0,63 pol.);

d_x - média aritmética das alturas úteis da armadura passiva na direção x;

d_y - média aritmética das alturas úteis da armadura passiva na direção y;

E - módulo de elasticidade do material;

E_{cs} - módulo de elasticidade secante do concreto;

E_c - módulo de elasticidade do concreto;

E_{tan} - módulo de elasticidade tangente inicial do concreto;

F_t - força de ruína do corpo-de-prova por compressão diametral;

f_c - resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos;

f'_c - resistência à compressão do concreto;
 f_{cd} - resistência de cálculo à compressão do concreto;
 f_{ck} - resistência característica à compressão do concreto;
 f_{ctj} - resistência do concreto à tração aos j dias, em MPa;
 f_{cj} - resistência do concreto à compressão aos j dias, em MPa;
 f_{cr} - tensão de fissuração do concreto;
 f_{ct} - resistência do concreto à tração;
 f_{ctj} - resistência do concreto à tração aos j dias, em MPa;
 f_y - tensão de escoamento do aço;
 f_{yd} - resistência de cálculo ao escoamento da armadura tracionada ou menos comprimida;
 f_{yk} - resistência característica ao escoamento da armadura tracionada ou menos comprimida;
 f_{ys} - tensão de escoamento da armadura de flexão;
 f_{yw} - tensão de escoamento da armadura de cisalhamento;
 $f_{ywd,ef}$ - tensão efetiva na armadura de cisalhamento
 f_u - resistência última da armadura;
 F_{sd} - força ou reação concentrada de cálculo;
 h - espessura da laje;
 J_c - propriedade da seção crítica assumida, análoga ao momento polar de inércia;
 K - coeficiente que fornece a parcela de M_{sd} transmitida ao pilar por cisalhamento;
 k - coeficiente que relaciona a maior com a menor dimensão do pilar ou área carregada;
 L - comprimento do vão de um painel;
 l_x - lado da laje na direção x;
 l_y - lado da laje na direção y;
 M_{sd} - momento de extremidade de cálculo;
 M_u - momento majorado desequilibrado;
 P_u - carga de ruptura de ensaio;
 P_f - carga de ruptura;
 P_{uLref} - carga de ruptura da laje de referência;
 s_0 - distância entre o primeiro conector e a face do pilar;
 s_r - espaçamento radial das camadas de armaduras de cisalhamento;
 u - perímetro crítico;
 u_l - comprimento do perímetro de controle básico;

u_0 - comprimento do perímetro do pilar;
 $u_{n,eff}$ - soma dos trechos do perímetro mínimo externos às armaduras de cisalhamento, com nenhuma das partes tomada com comprimento superior a $2d$;
 u_{out} - perímetro de controle no qual a armadura de cisalhamento não é necessária;
 V_c - contribuição do concreto;
 V_d - carga de projeto estimada de ruptura da laje;
 V_{ED} - força de cisalhamento de cálculo;
 V_{flex} - força de cisalhamento associada com a capacidade de flexão;
 $V_{R,c}$ - capacidade resistente de uma laje similar, mas sem armadura de cisalhamento;
 $V_{R,cs}$ - resistência máxima proveniente da combinação da armadura de cisalhamento e do concreto;
 $V_{R,in}$ - resistência a punção dentro da zona de armadura de cisalhamento;
 $V_{R,max}$ - resistência máxima para uma determinada dimensão de pilar, altura útil e resistência à compressão do concreto;
 $V_{R,out}$ - resistência da laje na região externa às armaduras de cisalhamento;
 V_s - contribuição do aço;
 V_u - carga última de ensaio;
 W_l - Módulo de Resistência Plástica perpendicular à borda livre do perímetro u ;
 W_p - módulo resistente da seção crítica.

LETRAS GREGAS

α - ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano médio da laje;
 β - fator de redução da resistência à punção em lajes com momentos desbalanceados na ligação laje-pilar;
 β_i - ângulo entre a barra da armadura de cisalhamento e o plano médio da laje.
 κ - índice de armadura de cisalhamento;
 λ - fator de flexão;
 v_E - tensão de cisalhamento solicitante de cálculo;
 v_{Ed} - tensão atuante na ligação;
 v_n - tensão de cisalhamento resistente de cálculo;
 $v_{RD,c}$ - valor de cálculo da resistência ao cisalhamento sem armadura de punção ao longo da seção considerada;

$V_{RD,máx}$ - valor de cálculo máximo da tensão de cisalhamento ao longo da seção considerada;

v_u - tensão de cisalhamento solicitante de cálculo;

ρ - taxa geométrica de armadura passiva de flexão;

ρ_1 - taxa de armadura média da laje, devendo ser calculada em uma largura igual ao tamanho do pilar mais $3.d$ para cada lado;

ρ_x - taxa geométrica de armadura passiva na direção x;

ρ_y - taxa geométrica de armadura passiva na direção y;

σ_{cp} - tensão de compressão do concreto no plano da laje na seção crítica nas direções y e z dado em MPa e com valor negativo para compressão;

σ_{si} - tensão de cisalhamento;

τ_{Rd1} - tensão de cisalhamento resistente de cálculo;

τ_{Rd2} - tensão resistente;

τ_{Sd} - tensão de cisalhamento solicitante de cálculo;

$\tau_{Sd,ef}$ - tensão de cisalhamento solicitante de cálculo efetiva;

τ_u - tensão de cisalhamento última.

ϕ - diâmetro da armadura;

ψ - rotação máxima da laje;

ω - abertura da fissura de cisalhamento crítico.

LISTA DE ABREVIACÕES

ACI – American Concrete Institute;

ENC - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB;

NBR – Norma Brasileira;

P - Ruptura por Punção;

FP – Ruptura por Flexo-Punção.

1 INTRODUÇÃO

Em um mercado de crescente competitividade, o engenheiro a cada dia se defronta com novos desafios técnicos e tecnológicos. Problemas de ordem estética e econômica levam à concepção e cálculo de estruturas cada vez mais arrojadas.

A ligação direta entre pilar e lajes de concreto armado é uma alternativa cada vez mais frequente nos projetos de construção civil. Diversos fatores podem indicar a conveniência da utilização de um modelo estrutural tipo laje lisa (lajes apoiadas diretamente em pilares sem capitéis, segundo a NBR 6118:2007), mostrado na Figura 1.1, ou de uma solução com carga aplicada em uma área reduzida, o que pode gerar tensões de cisalhamento significativas na região da laje ao redor do pilar ou da área carregada.

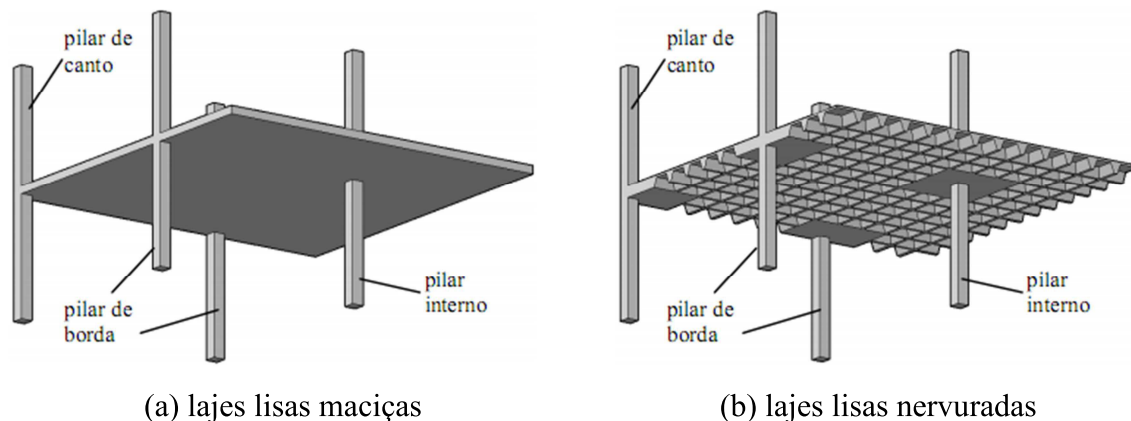


Figura 1.1 - Sistemas estruturais em lajes lisas (Ferreira, 2010)

Entre as possíveis vantagens deste tipo de estrutura pode-se citar:

- Simplificação na execução das formas e cimbramento: devido à ausência de vigas ocorre uma diminuição dos recortes, ocasionando uma maior agilidade no processo construtivo e redução de custo;
- Simplificação das armaduras: o arranjo das armaduras de flexão é mais simples e conseqüentemente mais fácil para executar, possibilitando também o uso de telas soldadas;
- Simplificação na concretagem: maior facilidade no lançamento, adensamento e desforma do concreto, reduzindo a possibilidade de ocorrência de falhas;
- Melhoria da qualidade final e diminuição de revestimentos: com a simplificação das formas, das armaduras e da concretagem, é possível obter estruturas com

melhor acabamento, o que pode até dispensar revestimentos. Quando houver necessidade de revestimento, a superfície a ser revestida é menor, a preparação é facilitada e também as dificuldades para revestir as superfícies planas são menores.

- Simplificação das instalações prediais: o projeto e a execução de instalações prediais elétricas e hidráulicas são facilitados e a qualidade aumentada, pois diminui a quantidade de curvas e a necessidade de contornar vigas ou perfura-las.
- Maior flexibilidade de *layout*: ampla liberdade na definição de espaços internos e facilidade na realização de reformas e modificações futuras, pois as divisórias não estão condicionadas à localização das vigas do piso e do teto.

Algumas desvantagens podem ser observadas no uso de pavimentos de edifícios em lajes lisas, fazendo com que a sua utilização tenha que ser bem estudada e comparada com outros tipos de pavimentos de edifícios, antes de sua adoção pura e simplesmente.

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

Na região de ligação laje-pilar em lajes lisas, são observadas elevadas tensões originadas pelos esforços de flexão e de cisalhamento, que podem provocar ruptura por punção da laje com uma carga inferior à de flexão. A ruptura por punção está associada à formação de um tronco de pirâmide que tende a se desligar da laje. A resistência à punção, quando dimensionada inadequadamente, pode causar graves acidentes, como o colapso de uma laje, ou mesmo a ruína total da estrutura. A ruptura por punção pode ocorrer sem aviso prévio e de forma frágil.

De acordo com Melo (1990), o primeiro caso registrado de ruptura por punção foi o do edifício *Prest-o-Lite*, em Indianápolis (1911), onde as lajes se desligaram completamente dos pilares, ocorrendo o colapso progressivo de toda a estrutura, provocando várias mortes. Outros casos de acidentes estruturais devido à punção têm sido registrados, como apresentado na Figura 1.2 e na Figura 1.3, referentes ao colapso parcial do edifício *Pipers*

Row Car Park, localizado na cidade de Wolverhampton na Inglaterra e ao colapso parcial de um edifício garagem em Christchurch-Nova Zelândia, respectivamente.



Figura 1.2 - Colapso parcial do edifício Pipers Row Car Park, Wolverhampton (1997)



Figura 1.3 - Colapso parcial em Garagem Comercial, Christchurch CBD, Nova Zelândia (2011)

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

A previsão da carga de ruptura em lajes lisas sem armadura de punção, segundo várias normas (ACI 318:2008, Eurocode 2:2004 e NBR 6118:2007) pode ser feita pelo cálculo da tensão nominal de cisalhamento atuando em uma dada superfície de controle e comparando-se esta tensão com a resistência do concreto ao cisalhamento, que é calculada em função da resistência característica do concreto à compressão, entre outros parâmetros (geometria do pilar, taxa de armadura de flexão e espessura da laje). Já nas lajes lisas com presença de armadura de cisalhamento, a previsão da carga de ruptura das lajes será dada pela soma da parcela resistente do aço (taxa de armadura de combate à punção) e do concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

O trabalho em questão apresenta significativa relevância, visto que o tema discutido ainda demonstra-se pouco conhecido perante o meio científico brasileiro e internacional. A punção em lajes lisas de concreto armado se apresenta atualmente como um tema de considerável complexidade devido ao conjunto de fatores que podem influenciar no desenvolvimento desse fenômeno, além do fato de que os métodos teóricos disponíveis para a estimativa de resistência ao cisalhamento de lajes lisas de concreto apresentam

falhas no que se refere a explicar o fenômeno da punção e em prever com precisão e segurança a resistência e modo de ruptura das lajes. Para casos onde são empregadas armaduras de cisalhamento do tipo *stud*, pilares de canto reentrante, em que se observa a transferência de momentos na ligação laje-pilar, tem-se observado a maior necessidade de aprimoramento dos métodos teóricos e a escassez de trabalhos que envolvem esse tipo de conexão, assim esta pesquisa pode contribuir significativamente para o melhor entendimento destas situações, comuns no projeto de edifícios com lajes lisas.

Em países como Canadá, Estados Unidos da América e parte da Europa e Ásia, é usual a utilização de sistemas de lajes apoiadas diretamente sobre os pilares ou com o uso de capitéis, enquanto que no Brasil, onde o uso do concreto é predominante no projeto e execução de estruturas, o sistema de lajes lisas de concreto armado, apesar de suas vantagens e simplificações, ainda é pouco utilizado, principalmente pelo pouco conhecimento que o meio técnico-construtivo tem a respeito deste sistema. E mesmo nos países onde o sistema de lajes lisas é largamente utilizado observa-se o desconhecimento a respeito de certas situações de projeto, tais como o caso de lajes lisas de concreto armado com pilares de canto reentrante. Deste modo, pesquisas como esta podem contribuir para a divulgação e emprego de modo adequado e seguro desse tipo de sistema.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa contribuir para o avanço do conhecimento acerca do fenômeno de punção em lajes lisas de concreto armado, tendo em vista fatores como economia e segurança estrutural, considerando o histórico de casos de acidentes observados relacionados ao fenômeno da punção. Para isto, buscar-se-á avaliar os mecanismos resistentes participantes nas lajes lisas de concreto armado com e sem armadura de cisalhamento a partir de estudo experimental e numérico em lajes lisas de concreto armado com pilares de canto reentrante com e sem a presença de armaduras de cisalhamento considerando diferentes excentricidades de carga, observando-se a variação destes parâmetros sobre o comportamento dos modelos durante os ensaios. Desta maneira, pretende-se contribuir com os estudos do fenômeno de punção em lajes lisas de concreto armado através da obtenção de dados que auxiliem na previsão de onde deverão ocorrer as possíveis falhas por punção, na caracterização da superfície de ruptura e na identificação

dos tipos de ruptura, buscando assim contribuir para um melhor entendimento do fenômeno de punção para conexões laje-pilar com pilares de canto reentrante.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realização de revisão bibliográfica visando-se a obtenção de embasamento teórico através da análise de outras pesquisas cujo escopo é o estudo de lajes lisas de concreto armado com ou sem o emprego de armaduras de cisalhamento;
- Obtenção e apresentação de resultados experimentais a partir da realização de ensaios com modelos locais de lajes lisas de concreto armado com pilares de canto reentrante;
- Comparação dos resultados experimentais com a previsão de diferentes códigos normativos;
- Avaliação do desempenho do tipo de conexão em estudo para diferentes quantidades de armadura de cisalhamento;
- Análise das simulações realizadas com modelos numéricos;

1.3 METODOLOGIA

Esta pesquisa de mestrado foi desenvolvida paralelamente à pesquisa de doutorado da Eng^a Elaine Jaricuna Pereira de Albuquerque em cuja tese os resultados desta pesquisa serão incorporados. Após revisão bibliográfica foi feito planejamento dos ensaios contando com a valiosa colaboração do professor Paul Erskine Regan.

Foram construídos quatro modelos locais de lajes lisas com pilar de canto reentrante, variando-se características como a presença e quantidade de armadura de cisalhamento do tipo *stud* e a excentricidade da carga aplicada. Os quatro modelos foram moldados e ensaiados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, onde foram verificadas as características de ruptura de cada modelo no decorrer dos ensaios.

Para auxílio quanto à compreensão do comportamento dos modelos locais foram realizadas análises numéricas simplificadas dos modelos de ensaio através do método dos elementos finitos utilizando-se o *software* Ansys, onde se considerou o concreto como material isotrópico.

Após os ensaios, os resultados foram analisados e discutidos considerando a deformação específica no concreto e na armadura, deslocamentos verticais, rotações e cargas de ruptura. Essas cargas foram comparadas com as estimativas de algumas das mais importantes normas e códigos de projeto estrutural de concreto armado, que são: a norma brasileira ABNT NBR 6118:2007, ACI 318:2008 e Eurocode 2:2004.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto de sete capítulos, cujos conteúdos são apresentados sucintamente a seguir:

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica com resultados de pesquisas pertinentes publicadas sobre o tema principal e outros relacionados, assim como aspectos gerais sobre o comportamento das lajes lisas de concreto armado além da metodologia de cálculo proposta pelas normas NBR 6118:2007, ACI 318:2008 e Eurocode 2:2004, indicando também valores limites para as lajes lisas de concreto armado.

No Capítulo 3 apresenta-se o programa experimental, onde são descritos os modelos de ensaio, as variáveis estudadas, a instrumentação e os procedimentos de ensaio.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios quanto às deformações nas armaduras de flexão e cisalhamento, deformações no concreto, deslocamentos verticais, fissuração, cargas últimas, rotações das lajes, cargas e modos de ruptura.

No Capítulo 5 são apresentadas as análises dos resultados obtidos nos ensaios e das previsões de capacidade de carga estimadas pelas normas avaliadas para as lajes ensaiadas, comparando-as aos valores experimentais.

No Capítulo 6 são apresentadas análises de resultados obtidos através de modelagens numéricas consideradas para os modelos locais de ensaio, sendo avaliada a distribuição dos esforços e deslocamentos na estrutura utilizando-se o software Ansys®.

No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões, onde foram resumidas as principais contribuições do trabalho, além de propostas para novas possibilidades de investigação.

No final da dissertação são apresentadas as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fenômeno de punção pode ser caracterizado como um modo de ruptura que ocorre por cisalhamento em elementos delgados submetidos a carga ou reação concentrada aplicada transversalmente, que provoca elevadas tensões de cisalhamento em torno de regiões relativamente pequenas, podendo resultar em ruptura frágil. Nas lajes lisas, esta situação é típica na região da ligação laje-pilar. Procura-se minimizar essas tensões atuantes na região próxima ao pilar com o uso de *drop panel* ou capitéis na região onde ocorrem os maiores esforços de cisalhamento. Outra forma de combate à punção é o aumento da capacidade resistente da laje, utilizando-se concreto de alta resistência e armadura de cisalhamento. A Figura 2.1 apresenta a superfície de ruptura devido à punção em lajes lisas sem armadura de cisalhamento nos casos de carregamento simétrico. Segundo o CEB-FIP MC90:1993 a superfície de ruptura tem formato tronco-cônica e se desenvolve a partir da extremidade da área carregada até a face oposta da laje, seguindo uma inclinação de 25° a 30°.

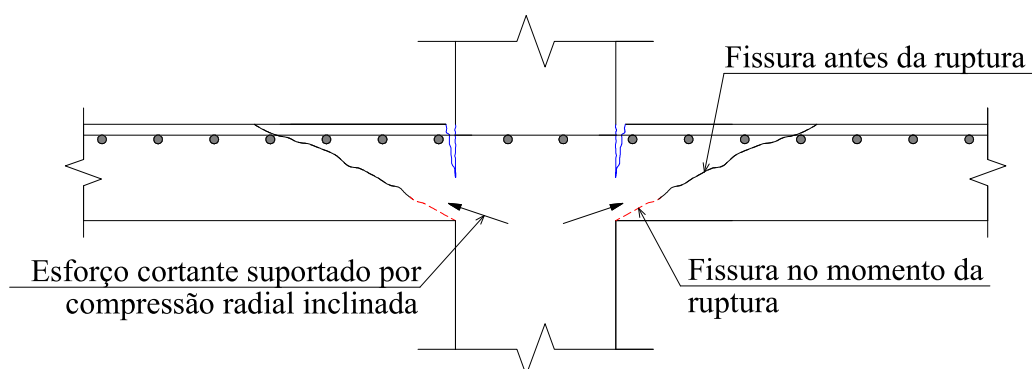


Figura 2.1 – Representação esquemática da ruptura por punção para lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento (CEB-FIP/MC90:1993)

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1.1 Aspectos Gerais sobre ruptura por punção em lajes lisas

Para os sistemas de lajes lisas de concreto armado o dimensionamento é realizado considerando a resistência à punção nas conexões entre a laje e o pilar, pois a ruptura devida à punção, esquematizada na Figura 2.2, pode se desenvolver de forma abrupta e frágil, onde a armadura de flexão pode não atingir sua tensão de escoamento, gerando assim limitação quanto à ductilidade da laje.

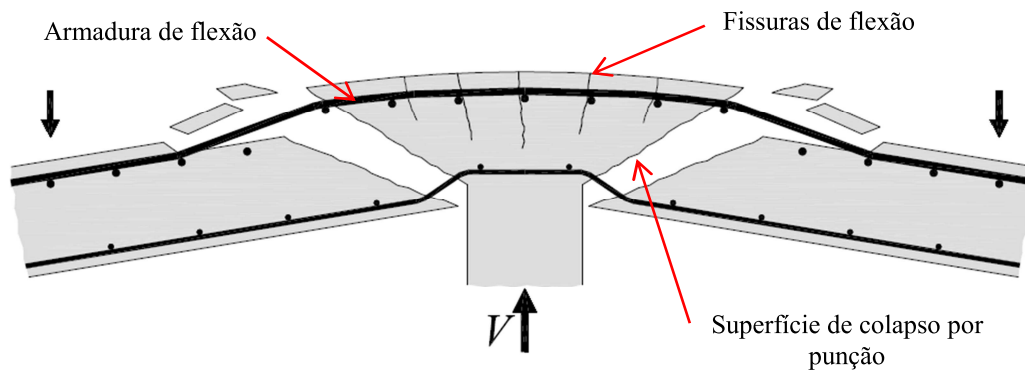


Figura 2.2 - Ruptura por punção em laje-lisa (modificado – Mirzaei, 2010)

Ferreira (2010) cita que a resistência à punção em lajes lisas de concreto armado pode ser elevada adotando-se algumas medidas, como o aumento da seção do pilar, da espessura da laje, da taxa de armadura de flexão, ou da resistência à compressão do concreto. No entanto a solução que tem se mostrado mais eficiente contra a ruptura por punção é a utilização de armaduras de cisalhamento bem ancoradas.

Segundo Carvalho (2009) entre os fatores que interferem na resistência à punção podem ser relacionados: resistência do concreto; altura útil e relação entre o lado de pilar quadrado (ou diâmetro de circular) e a altura útil; relação entre os lados dos pilares, aberturas na laje próximas aos pilares; excentricidade do carregamento; perímetro de contato entre a laje e o pilar; armadura de flexão; armadura de cisalhamento (transversal). A Figura 2.3 apresenta o aspecto da superfície de ruína devido à punção em ligações laje-pilar em lajes lisas.

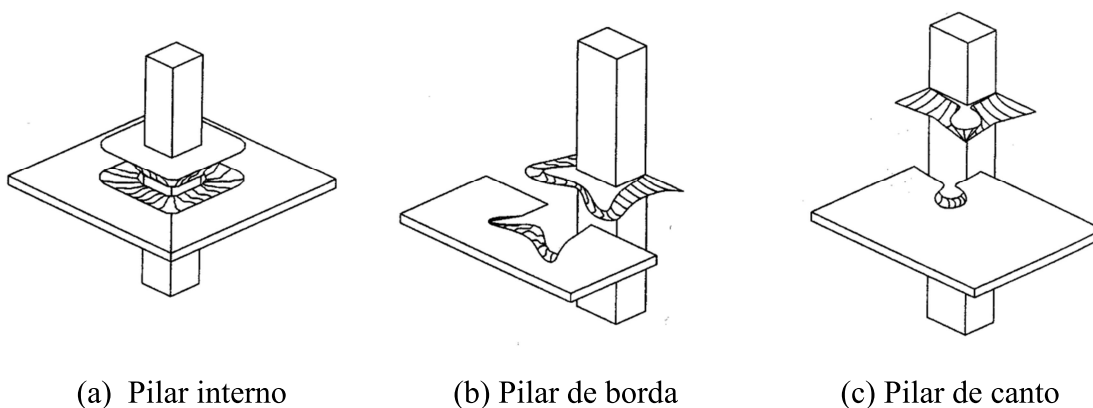


Figura 2.3 - Perspectivas esquemáticas de superfície de ruína devidas à punção em ligações laje-pilar em lajes lisas (Carvalho, 2009)

2.1.2 Armadura de Cisalhamento

Para se evitar a ruína por punção, muitas vezes é necessário aumentar a resistência da ligação laje-pilar. Soluções comuns como capitéis e “*drop panels*” podem ser indesejáveis do ponto de vista arquitetônico ou construtivo, e, por isso, o uso de armaduras de cisalhamento para o combate à punção, ou simplesmente, armaduras de punção, vem crescendo bastante. Essa alternativa, favorável do ponto de vista da ductilidade, pode contribuir para a mudança do tipo de ruína previsto, de frágil (punção) para dúctil (flexão).

Quando são utilizadas armaduras de punção, o plano preferencial para a formação da superfície de ruína é modificado e vai se afastando da face do pilar. A capacidade resistente da ligação aumenta numa boa proporção, tanto que, de acordo com Gomes (1991), a resistência das lajes com armaduras de punção pode chegar ao dobro da resistência das lajes sem essas armaduras. Esse aumento proporcionado pelas armaduras, entretanto, é limitado pela tensão de esmagamento da biela comprimida de concreto na face do pilar. Dessa forma, a tensão resistente da ligação tem uma parcela referente à armadura de punção e outra referente ao concreto.

A parcela do concreto corresponde a cerca de 75% da resistência da laje sem armadura de punção, segundo os estudos de Regan e Braestrup (1985), com base nos trabalhos de Dilger e Ghali (1981), Langohr et al. (1976) e Seible et al. (1980), dentre outros. Nas lajes com armadura de cisalhamento a parcela resistente do concreto sofre redução consequente, principalmente, das maiores deformações e aberturas de fissuras relacionadas ao trabalho da armadura de cisalhamento.

Já a parcela da armadura depende de vários parâmetros, como a disposição e os espaçamentos dos elementos, a eficiência das ancoragens, além da própria área de aço. Podem ser utilizados estribos ou conectores tipo pino (*studs*), modelos mais usuais dentre outras possibilidades. A Figura 2.4 mostra detalhes de alguns tipos de armaduras de cisalhamento utilizadas para lajes lisas de concreto armado.

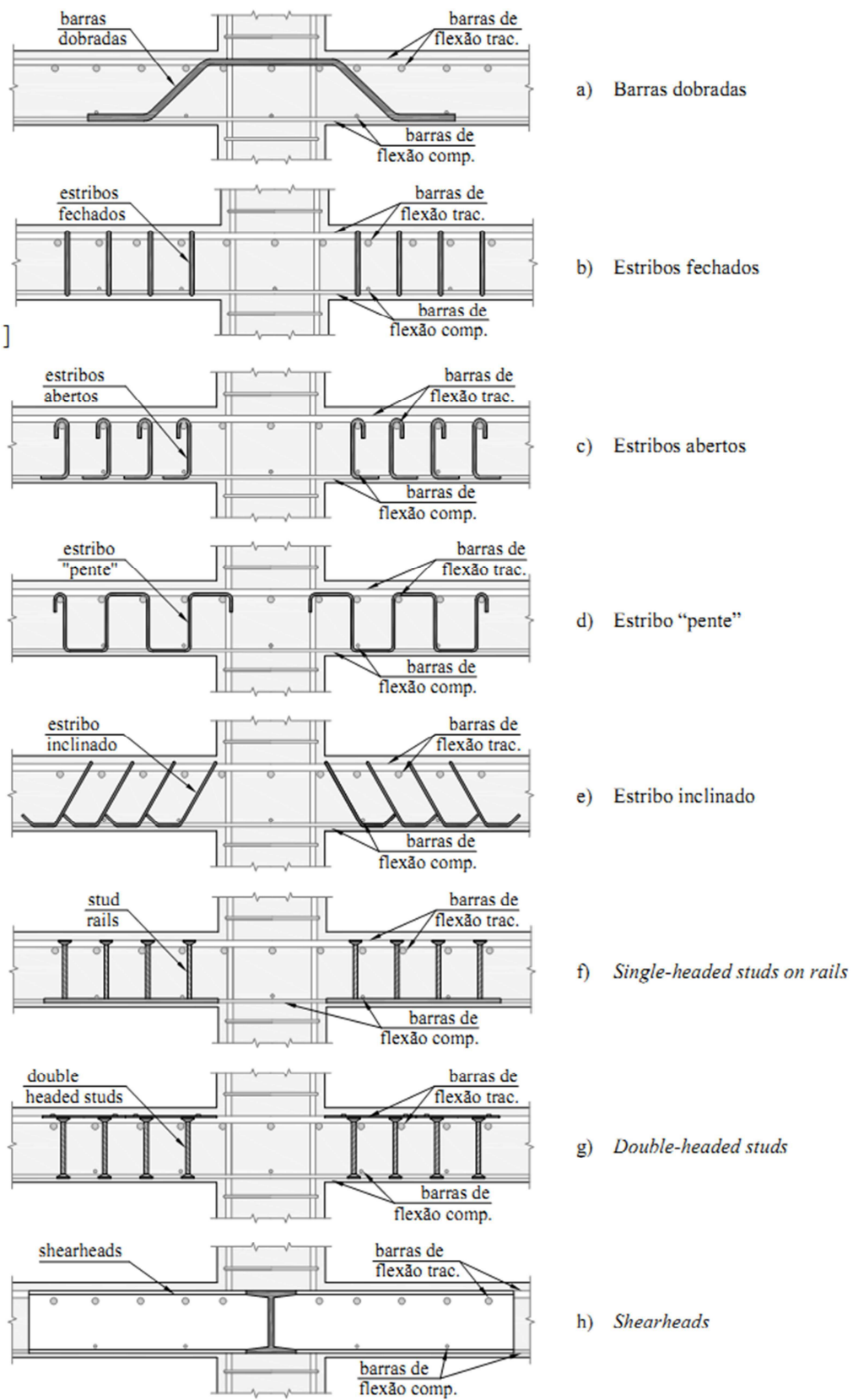


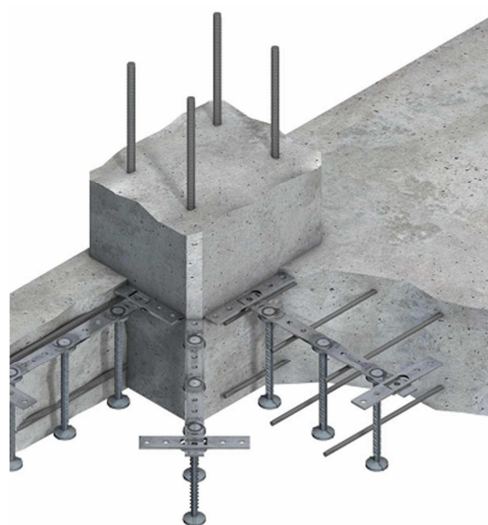
Figura 2.4 - Tipos de armaduras de cisalhamento para lajes lisas (Ferreira, 2010)

Apesar dos estribos serem escolhidos com maior frequência, a garantia de sua ancoragem requer cuidados essenciais. O estribo deve envolver tanto a armadura de flexão superior quanto a inferior, o que dificulta e pode atrasar o processo executivo. Pequenas falhas nessas ligações provocam escorregamento e já comprometem a eficiência da armadura, como mencionado por Dilger e Ghali (1981).

Mais efetivos em termos de ancoragem e mais facilmente colocados nas lajes, os conectores tipo pino têm apresentado bom desempenho no aumento da resistência da ligação laje-pilar, como comprovado experimentalmente por Dilger e Ghali (1981), Mokhtar *et al.* (1985), Elgabry e Ghali (1987) e Ferreira (2010). Dependendo do fabricante deste tipo de armadura, pode-se posicioná-la antes ou depois da montagem das armaduras de flexão, tendo para tal, chapas ou barras delgadas de aço apenas para permitir sua fixação. A Figura 2.5 mostra detalhes das armaduras da HALFEN DEHA e a Figura 2.6 apresenta detalhes do sistema de armaduras contra punção SCHÖCK BOLE®. Segundo Ghali (1989), numa mesma situação, esse tipo de armadura requer uma menor área de aço que os estribos, o que também significa economia. Por tudo isso, os conectores tipo pino vêm sendo cada vez mais empregados em diversos países.

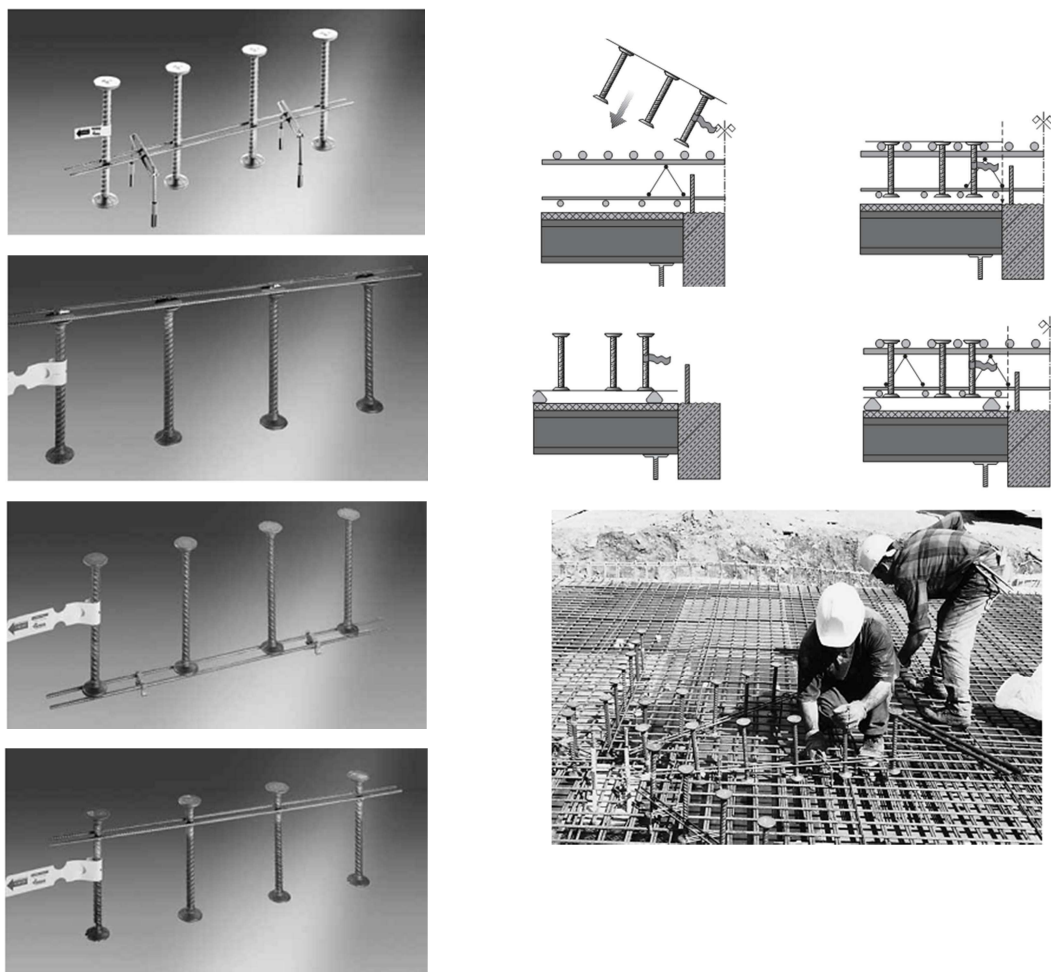


(a) Detalhe dos *studs*



(b) Posicionamento

Figura 2.5 - Detalhes do sistema de armaduras (Halfen Deha, 2010)

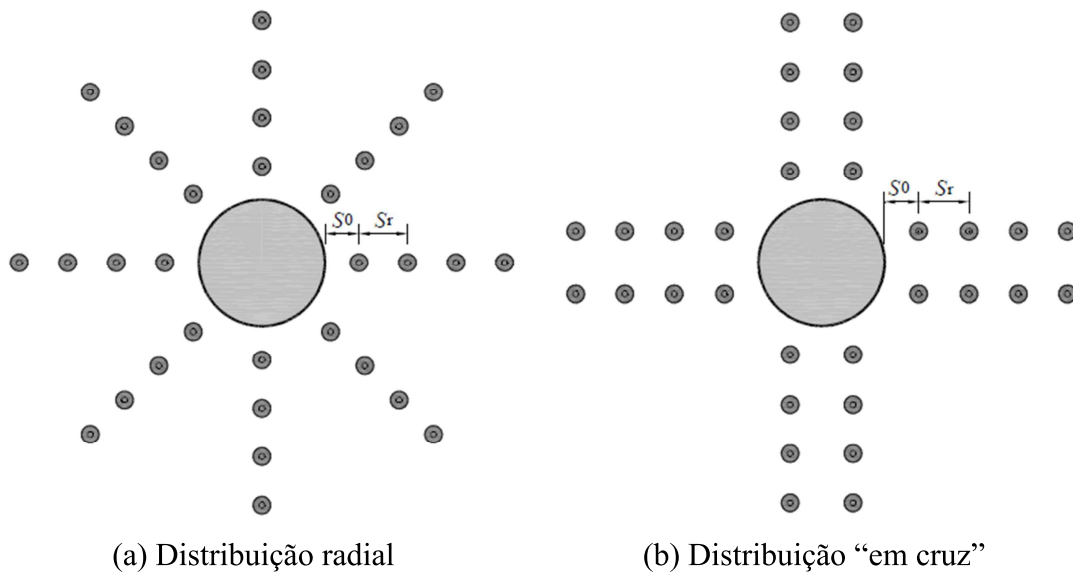


(a) Tipos de sistemas de posicionamento

(b) Posicionamento em obra

Figura 2.6 - Detalhes do sistema de armaduras (Schöck Bole, 2004)

Além do tipo de armadura de cisalhamento a ser usado, outros fatores que influenciam significativamente na resistência à punção de lajes lisas estão relacionados com a quantidade e com o arranjo adotado para a distribuição das armaduras. Teoricamente, o arranjo ideal seria aquele em que as armaduras de cisalhamento fossem distribuídas igualmente em torno da superfície de ruptura, porém, do ponto de vista construtivo, isso muitas vezes não é simples devido à interferência entre as armaduras de flexão e de cisalhamento na região da ligação laje-pilar. Esse tipo de distribuição é normalmente denominado de radial e pode ser observado na Figura 2.7a. Por questões construtivas, muitas vezes é mais simples concentrar as armaduras de cisalhamento em faixas ortogonais, em um arranjo “em cruz”, conforme pode ser observado na Figura 2.7b.



(a) Distribuição radial (b) Distribuição “em cruz”
 Figura 2.7 - Arranjos para a distribuição das armaduras de cisalhamento (NBR 6118:2007)

Para o espaçamento entre camadas (s_r), é sugerido pelas normas que a distância máxima adotada seja de $0,75 \cdot d$. Segundo Ferreira (2010), essa limitação para o máximo espaçamento entre camadas parece justificável uma vez que, se for considerado que o comprimento das armaduras de cisalhamento é aproximadamente igual à altura útil da laje (d), ao se espaçar as armaduras com valores de $s_r = d$ a tendência seria que o ângulo da superfície de ruptura fosse 45° e, com tal inclinação, a superfície de ruptura poderia não cruzar nenhuma das armaduras de cisalhamento. A Figura 2.8 apresenta a ruptura por punção assumindo-se uma inclinação de 45° para a superfície de ruptura onde é possível perceber que, se a primeira camada estiver muito próxima da face do pilar e se as demais camadas estiverem muito afastadas é possível que as armaduras não sejam eficientes.

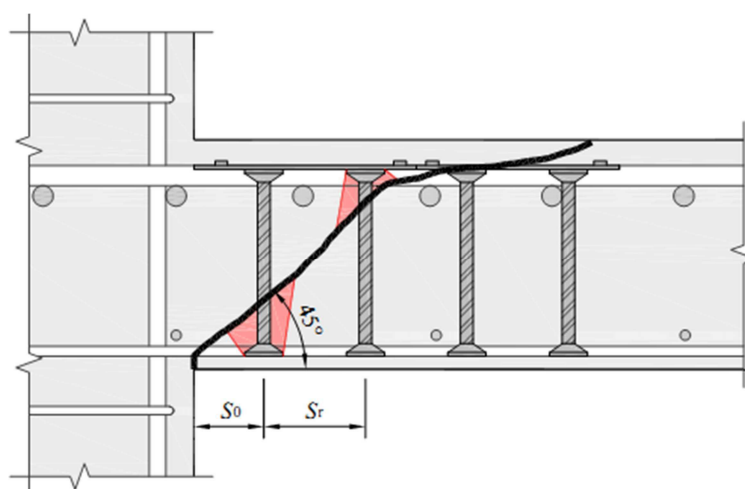


Figura 2.8 - Ancoragem de *double-headed studs* em lajes lisas (Ferreira, 2010)

Ferreira (2010) cita que outro parâmetro que pode influenciar o desempenho de uma conexão laje-pilar é o comportamento da região onde as armaduras de cisalhamento serão utilizadas. A correta definição das dimensões da região onde é necessária a utilização de armadura de cisalhamento é fundamental para evitar rupturas bruscas na parte externa à região com armadura de cisalhamento.

2.2 TRABALHOS EXPERIMENTAIS CONSIDERADOS PARA O ESTUDO DO FENÔMENO DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM PILARES DE CANTO REENTRANTE

Durante a realização desta pesquisa foram observadas várias publicações sobre o estudo do fenômeno de punção para pilares internos, de borda e de canto, considerando a investigação quanto a vários parâmetros. No entanto, não foram encontrados trabalhos publicados sobre punção em lajes lisas de concreto armado com pilares de canto reentrante. Neste Capítulo são apresentados alguns trabalhos relevantes para o estudo do fenômeno de punção e que podem contribuir para a análise dos resultados desta pesquisa.

A primeira pesquisa experimental relativa ao fenômeno de punção foi realizada por Talbot em 1913, onde foram ensaiadas 197 sapatas, 114 sob muros e 83 sob pilares, verificando-se que 20 romperam por punção. A partir dos resultados experimentais Talbot propôs um cálculo de resistência ao cisalhamento de ligações laje-pilar baseado apenas na resistência do concreto, sem levar em conta a influência da armadura de flexão. Talbot constatou que a armadura de flexão tem influência sobre a resistência à punção e concluiu que a superfície de ruptura é tronco-cônica com faces inclinadas com um ângulo de aproximadamente 45°.

Em 1933, Graf concluiu que a resistência à punção das lajes aumentava pouco com o aumento da resistência à compressão do concreto e confirmou que a fissuração devido à flexão diminui a resistência da ligação laje-pilar.

Kinnunen e Nylander (1960) realizaram ensaios com lajes circulares, sendo os primeiros a apresentar uma teoria racional, com um modelo mecânico, sobre lajes submetidas à punção, considerando o caso específico de lajes com armadura de flexão circular. Kinnunen (1963) estendeu o modelo mecânico para lajes com armaduras de flexão ortogonais, considerando os efeitos de pino e de membrana da armadura.

A transferência de momentos nas ligações laje-pilar foi inicialmente estudada com maiores detalhes por Moe em 1961, onde foram ensaiadas 43 lajes e feito um estudo estatístico dos resultados de 260 lajes e sapatas, concluindo-se que a transferência de momento reduz a resistência da ligação e que a resistência à punção está relacionada com a resistência à flexão.

Na Universidade de Brasília os primeiros ensaios envolvendo o estudo de punção em lajes lisas de concreto armado foram realizados por Santos (1995) e por Oliveira (1998) e para lajes lisas protendidas por Correa (2001), Alves (2002) e Villaverde (2003) em dissertações de mestrado e nas teses de doutorado de Silva (2005) e Carvalho (2005). Recentemente pode-se citar os trabalhos desenvolvidos por Villaverde (2008), Gomes (2010) e Ferreira (2010). Todos estes trabalhos trataram do estudo da ruptura de lajes lisas de concreto armado ou protendido à punção, com ou sem armadura de cisalhamento, sob a orientação do Professor Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo.

2.2.1 Pesquisas realizadas no Exterior

2.2.1.1 REGAN E SAMADIAN (2001)

No trabalho desenvolvido por Regan e Samadian (2001) foram ensaiados dez modelos locais de lajes de concreto armado, com 3000 mm de lado e espessura de 200 mm, com diferentes tipos de armadura de cisalhamento. As lajes foram submetidas a carregamento simétrico através de uma chapa metálica quadrada de 200 mm de lado. A Tabela 2.1 apresenta detalhes das lajes ensaiadas por Regan e Samadian (2001), assim como o modo e as cargas de ruptura obtidas com os ensaios.

Tabela 2.1 - Características gerais e resultados das lajes ensaiadas
(Regan e Samadian, 2001)

Laje	$f_c^{(1)}$ (MPa)	$A_{sw}^{(2)}$ (mm ²)	$V_u^{(3)}$ (kN)	Modo de Ruptura
R1	33,9	2714	560	Externa
R2	37,6	1810	587	Interna
R3	33,4	1810	693	Externa
R4	39,4	2714	773	Externa
A1	37,4	1885	853	Externa
A2	43,1	1257	853	Interna
RS1	35,4	1810	1040	Laminar
RS2	37,6	3217	1120	Laminar
S1	39,9	905	1200	Interna
S2	44,1	1609	1227	Interna

(1) - Resistência a compressão do concreto;

(2) – Área da armadura de cisalhamento dentro de um perímetro distante $1,5.d$ a partir da face do pilar;

(3) – Carga de Ruptura da laje;

Interna - Superfície de ruptura à punção interna à região de AC;

Externa – Superfície de ruptura à punção externa à região de AC;

AC: armadura de cisalhamento.

Para os ensaios foram utilizados cinco tipos de armadura de cisalhamento, sendo duas lajes para cada tipo de armadura. A principal variável no programa experimental foi a quantidade de armadura de cisalhamento por camada.

Três tipos da armadura de cisalhamento eram *studs*, variando entre si a forma de ancoragem na armadura de flexão. Nas lajes R1 e R2 foram utilizadas linhas de “*studs*” com ancoragem constituída por chapas individualizadas na extremidade superior, e a extremidade inferior das barras dos *studs* foram conectadas a uma chapa única. As lajes R3 e R4 apresentaram armadura de cisalhamento com chapas individualizadas em cada extremidade e uma barra de aço à meia altura ligando todos os elementos. Nas lajes A1 e A2, os elementos da armadura de cisalhamento foram soldados nas duas extremidades em chapas únicas. A Figura 2.9 apresenta o arranjo das armaduras utilizadas por Regan e Samadian (2001) nas lajes R1 a R4, A1 e A2.

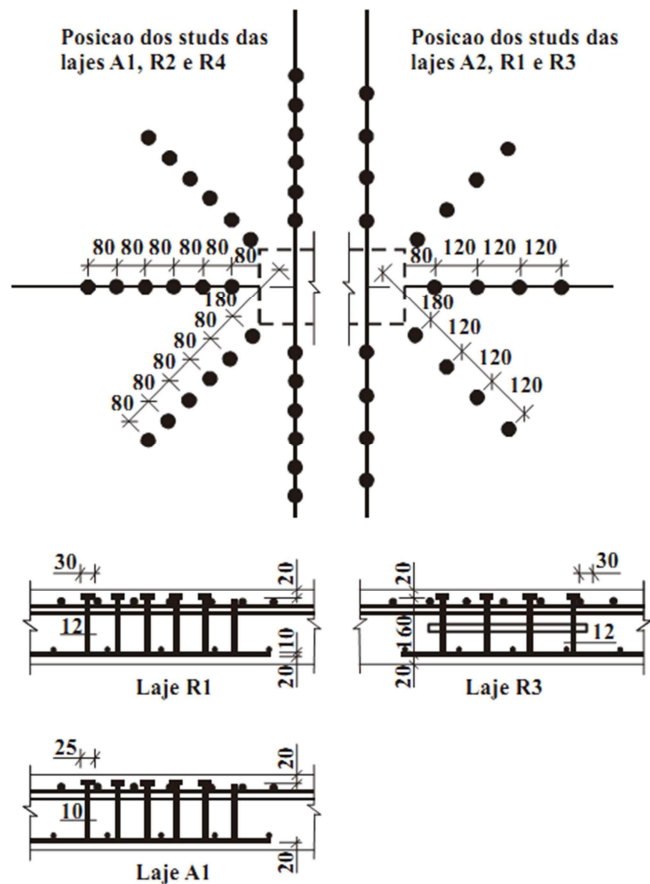


Figura 2.9 - Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes R1 a R4, A1 e A2 (Regan e Samadian, 2001)

As armaduras de cisalhamento utilizadas para as lajes RS1 e RS2 foram do tipo “*ladders*”, que apresentavam em planta a forma de “V” e não eram ancoradas na armadura de flexão. A Figura 2.10 apresenta detalhes dos *ladders* utilizados.

Para as lajes S1 e S2 foram utilizados estribos com curva de 180° na camada superior da armadura de flexão. A Figura 2.11 apresenta detalhes do arranjo dos estribos utilizados.

Com exceção das lajes com *ladders*, todas as rupturas ocorreram por punção, com a superfície de ruptura cruzando a região da armadura de cisalhamento ou externa a região armada transversalmente. Nas duas lajes com armadura de cisalhamento do tipo *ladder* surgiram fissuras horizontais entre as armaduras de flexão e de cisalhamento na parte superior e inferior com inclinação até a superfície superior da laje na região externa à armadura transversal, que foi denominada pelo autor como laminação do concreto. A Figura 2.12 apresenta as superfícies de ruptura das lajes analisadas.

Regan e Samadian (2001) concluíram que as armaduras de cisalhamento testadas podem aumentar a resistência à punção de lajes lisas de concreto armado em até 75%

comparando-se com lajes similares sem armadura transversal. Os autores relatam que a armadura do tipo *ladder* foi a que apresentou maior praticidade quanto à execução e posicionamento, servindo também para manter o espaçamento entre as armaduras de flexão positiva e negativa das lajes.

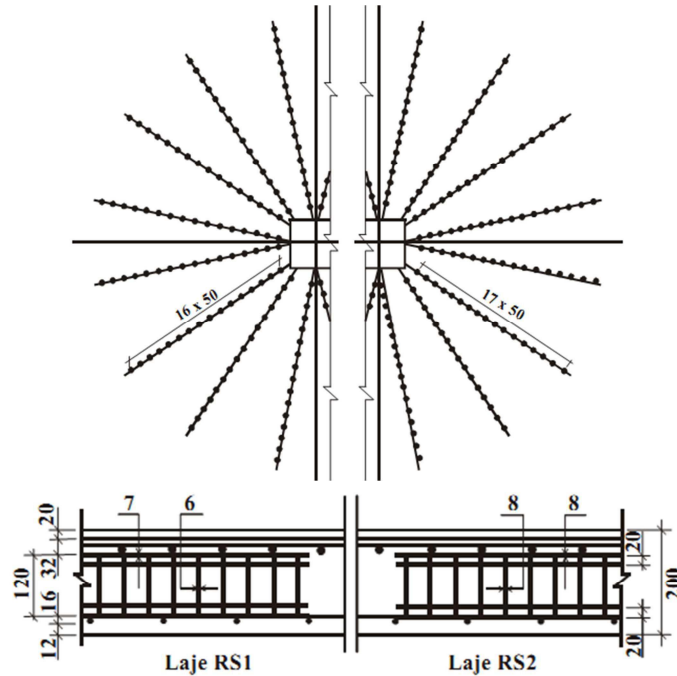


Figura 2.10 - Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes RS1 e RS2 (Regan e Samadian, 2001)

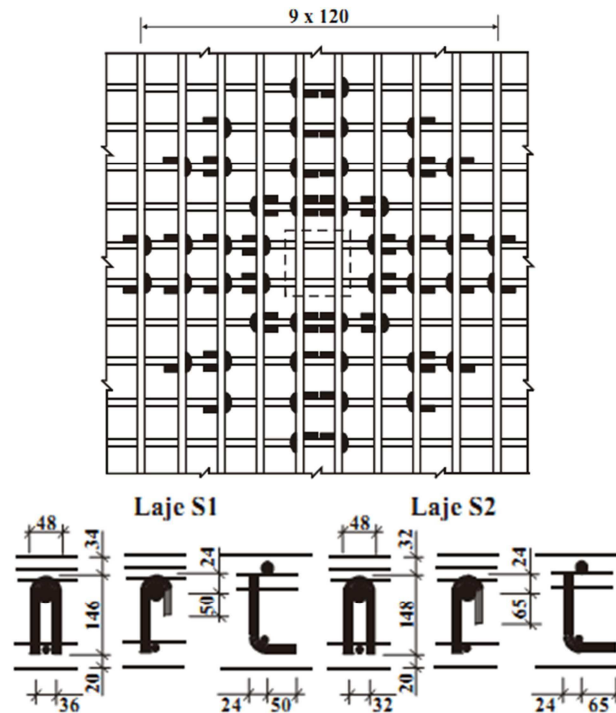


Figura 2.11 - Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada nas lajes S1 e S2 (Regan & Samadian, 2001)

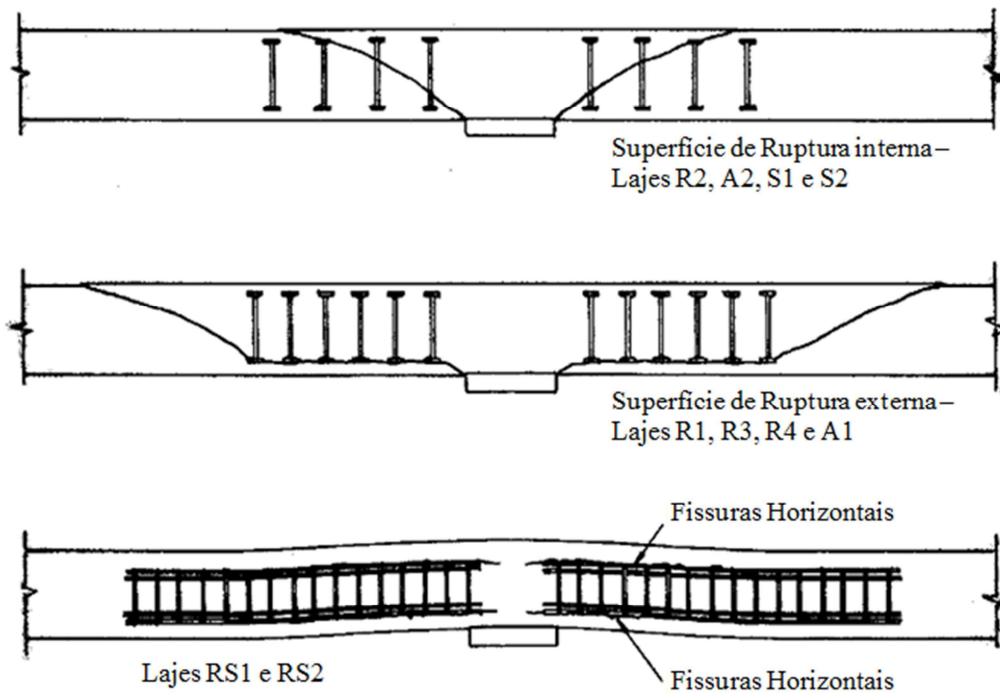


Figura 2.12 - Superfícies de ruptura das lajes ensaiadas (Regan e Samadian, 2001)

2.2.1.2 RUIZ E MUTTONI (2009)

Ruiz e Muttoni propuseram um modelo baseado na Teoria da fissura Crítica de Cisalhamento para estimar a contribuição da armadura de cisalhamento na resistência à punção de lajes lisas de concreto armado.

Considerando-se a distribuição da armadura de cisalhamento, uma laje de concreto armado pode desenvolver três diferentes modos de ruptura por punção: esmagamento da biela de concreto na região próxima ao pilar, punção no interior da zona onde está distribuída a armadura de cisalhamento e punção fora da zona da armadura de cisalhamento. A Figura 2.13 apresenta os modos de ruptura por punção.

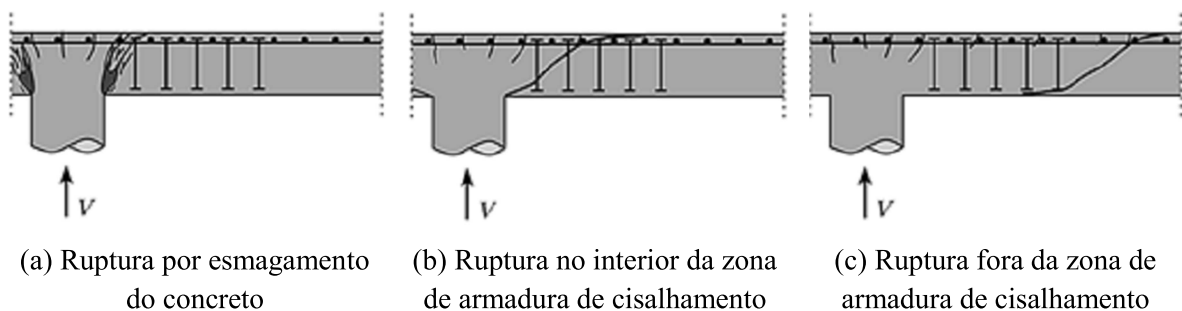


Figura 2.13 - Modos de ruptura de lajes lisas com armadura de cisalhamento (Ruiz e Muttoni, 2009)

Segundo Ruiz e Muttoni, dentro da zona de armadura de cisalhamento a superfície de ruptura se desenvolve quando uma fissura de cisalhamento se abre, localizando as tensões. A esta fissura chamou de fissura crítica de cisalhamento, como mostrado na Figura 2.14. Neste caso, uma parcela do esforço de cisalhamento é absorvida pelo concreto (esta contribuição é limitada pela abertura da fissura crítica de cisalhamento e pela sua rugosidade), enquanto a parcela restante da força de cisalhamento é resistida pela armadura de cisalhamento. A resistência à punção pode ser assim escrita como:

$$V_{R,in} = V_c + V_s \quad (2.1)$$

A contribuição do concreto (V_c) pode ser estimada de acordo com a CSCT (*critical shear crack theory*) supondo que uma única fissura se desenvolve na zona de ruptura. Com base nesta teoria, Ruiz e Muttoni propuseram o seguinte critério de ruptura, que se correlacionou bem com os resultados de 99 ensaios de punção empregando modelos de lajes sem armadura de cisalhamento.

$$V_c = \frac{3}{4} \cdot \frac{b_{0,int} \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}}{1 + 15 \cdot \frac{\psi \cdot d}{d_{g0} + d_g}} \quad (\text{N,m}) \quad (2.2)$$

onde :

ψ é a rotação máxima da laje;

$b_{0,int}$ é o perímetro de controle (afastado $0,5 \cdot d$ além da extremidade da fissura, tipicamente na face da coluna);

d é a altura útil da laje;

f'_c é a resistência à compressão do concreto;

d_g é o tamanho máximo do agregado;

d_{g0} é o tamanho do agregado de referência definido para 16 mm (0,63 pol.).

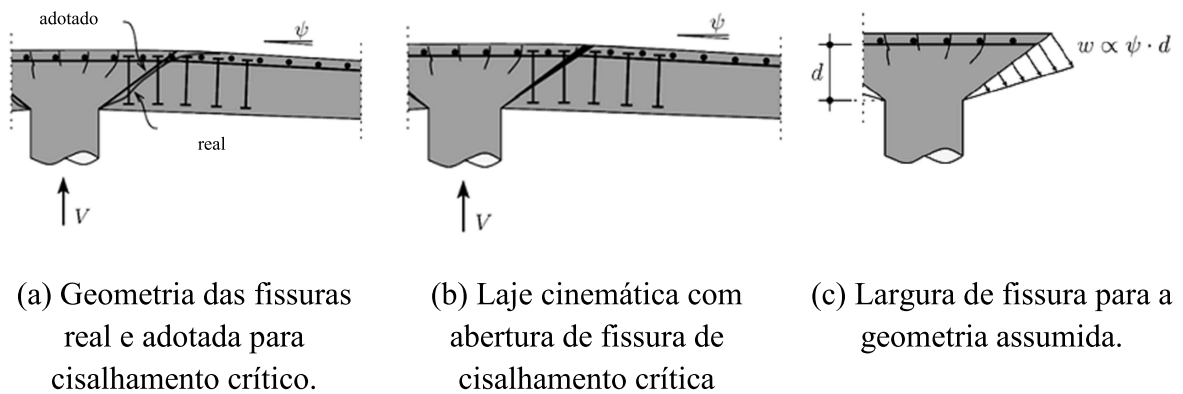


Figura 2.14 - Resistência a punção em lajes com armadura de cisalhamento baseado na CSCT (Ruiz e Muttoni, 2009)

A contribuição da armadura de cisalhamento pode ser calculada de acordo com a Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento usando sua hipótese principal, que estabelece que a abertura da fissura de cisalhamento crítica é proporcional ao produto da rotação da laje e a profundidade efetiva do membro conforme ilustra a Figura 2.15.

$$\omega = \kappa \cdot \psi \cdot d \quad (2.3)$$

onde:

κ é uma constante cujo valor proposto por Ruiz e Muttoni é $\kappa = 0,50$.

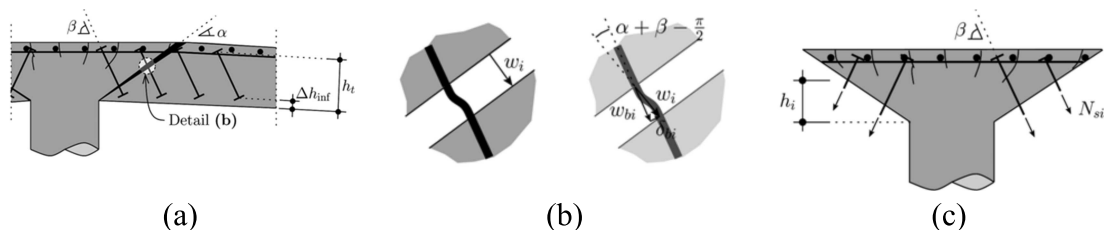


Figura 2.15 - Contribuição da armadura de cisalhamento. (a) Parâmetros geométricos da armadura de cisalhamento e fissura crítica de cisalhamento. (b) Abertura das fissuras críticas de cisalhamento e deslocamento longitudinal e transversal em relação à armadura de cisalhamento. (c) Contribuição da armadura de cisalhamento dentro do cone de punção. (Ruiz e Muttoni, 2009)

Se a ação de pino da armadura de cisalhamento é negligenciada, a contribuição da armadura de cisalhamento torna-se:

$$V_s = \sum_{i=1}^n \sigma_{si} \cdot (\psi) \cdot A_{si} \cdot \sin(\beta_i) \quad (2.4)$$

onde:

σ_{si} é a tensão na armadura de cisalhamento;

A_{si} é a área da seção transversal da armadura de cisalhamento;

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

De acordo com a Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento as resistências à ruptura por punção fora da zona de armadura de cisalhamento ($V_{R,out}$) e por esmagamento do concreto nas proximidades do pilar ($V_{R,crush}$) são dadas pelas expressões a seguir:

$$V_{R,out} = \frac{3}{4} \cdot \frac{b_{0,out} \cdot d_v \cdot \sqrt{f'_c}}{1 + 15 \cdot \frac{\psi \cdot d}{d_{g0} + d_g}} \quad (N, mm) \quad (2.5)$$

$$V_{R,crush} = \lambda \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{b_{0,col} \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}}{1 + 15 \cdot \frac{\psi \cdot d}{d_{g0} + d_g}} \quad (N, mm) \quad (2.6)$$

onde:

d_v é a altura útil reduzida;

$b_{0,out}$ é o perímetro da superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento;

$b_{0,col}$ é o comprimento de um perímetro de controle à $d/2$ da face do pilar;

λ é considerado igual a 3 para os casos de armaduras de cisalhamento bem ancoradas como *studs* e 2 para os demais tipos de armadura de cisalhamento.

Ruiz e Muttoni observaram que a contribuição do concreto para a resistência à punção de lajes não é constante, ao contrário do que é assumido na maioria das prescrições normativas. Alguns códigos subestimam esta contribuição para baixas taxas de armadura de cisalhamento e podem superestimá-la para grandes taxas.

Concluiu-se que um modelo físico baseado na teoria da fissura crítica de cisalhamento pode ser usado para estimar a resistência à punção em lajes de concreto armado com armadura transversal considerando expressões analíticas simples.

Com base na teoria de fissura crítica de cisalhamento, demonstrou-se que a força da contribuição do concreto na resistência à punção é reduzida para grandes rotações nas lajes. Esta redução depende de alguns parâmetros como, por exemplo, a taxa de armadura de flexão ou a quantidade de armadura de cisalhamento.

2.2.2 Pesquisas realizadas no Brasil

2.2.2.1 CORDOVIL (1995)

Cordovil (1995) ensaiou dez lajes quadradas com 1540 mm de lado, tendo como principais variáveis o uso de armadura de cisalhamento e a transferência de momento na ligação laje-pilar.

No sistema de ensaio utilizado, a carga foi aplicada de baixo para cima por meio de um atuador hidráulico posicionado de acordo com a excentricidade requerida. As lajes foram apoiadas de maneira que o vão livre foi de 1340 mm. O carregamento excêntrico foi aplicado com a utilização de um dispositivo, criado pelo autor, chamado de “*trans-moment*”, com distâncias de 200 mm ou 400 mm do centro do pilar, transmitindo momento para a laje, como mostrado na Figura 2.16. O dispositivo permitiu com que as cargas fossem transmitidas à laje por meio de barras de aço comprimidas e tracionadas, causando um sistema binário de forças em contato com a laje.

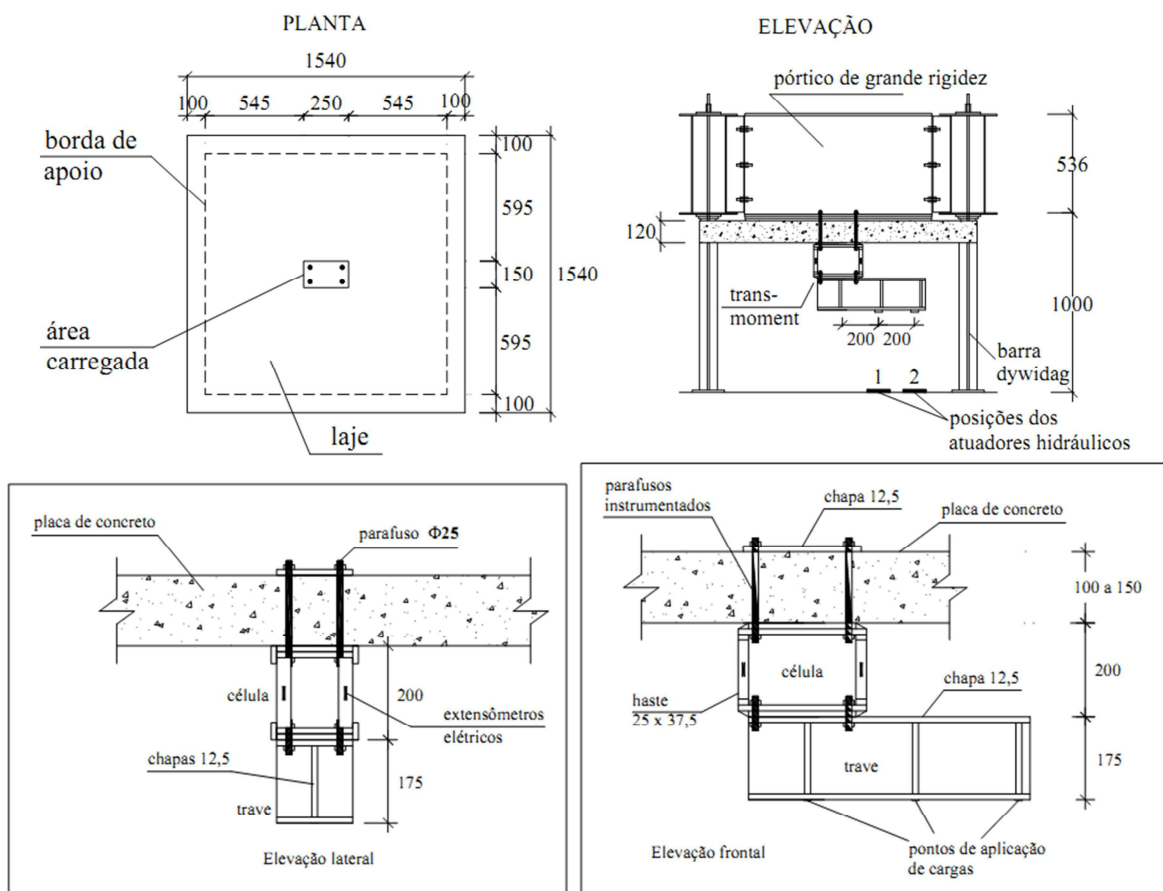


Figura 2.16 - Sistema de ensaio e detalhes das lajes (Cordovil, 1995)

O estudo das lajes foi dividido em duas séries: série de “carga centrada” e série de “carga excêntrica”.

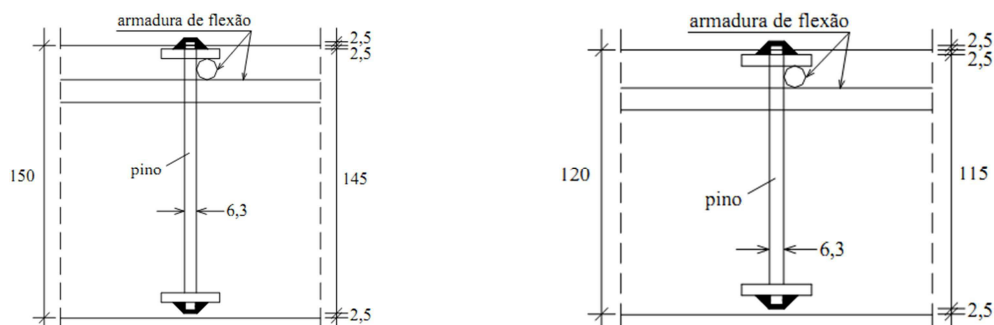
Para a série de “carga centrada”, foram ensaiadas três lajes: lajes 7, 8 e 11. O carregamento foi aplicado de forma centrada e as lajes tiveram espessura total de 150 mm. Nas lajes 8 e 11 foram usadas armaduras de cisalhamento tipo pino, com 6,3mm de diâmetro. O carregamento foi aplicado na laje, de baixo para cima, por meio de um atuador hidráulico, sobre uma chapa metálica quadrada com 100 mm de lado.

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

Na série de “carga excêntrica”, foram ensaiadas sete lajes com espessura de 120 mm, das quais duas tiveram cargas centradas, lajes 14 e 15; e cinco tiveram cargas excêntricas, lajes 9, 10, 12, 13 e 16, duas com excentricidade igual a 200 mm (lajes 10 e 12) e três com excentricidade igual a 400 mm (lajes 9, 13 e 16). Nas lajes 10, 14 e 16 foram dispostas armaduras de cisalhamento do tipo pino com 6,3 mm de diâmetro. Para as lajes com carregamento excêntrico a área carregada, com a utilização do “*trans-moment*”, foi retangular de lados 250 x 150 mm .

Nas lajes da série de “carga excêntrica”, a armadura de flexão foi composta de malha ortogonal com 15 barras de 10 mm de diâmetro na direção paralela ao maior lado do pilar e 14 barras de 10 mm de diâmetro na direção perpendicular. A taxa de armadura, r , foi de 0,88 % e a altura útil das lajes, d , foi de 104 mm.

As armaduras de cisalhamento foram dispostas em forma de “cruz”, adequando-se ao posicionamento da armadura de flexão. A Figura 2.17 apresenta detalhes das armaduras de cisalhamento utilizadas por Cordovil (1995), para as duas séries ensaiadas.



(a) Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada para a série “carga centrada” (b) Detalhe da armadura de cisalhamento utilizada para a série “carga excêntrica”

Figura 2.17 - Armaduras de cisalhamento (Cordovil, 1995)

As características das lajes ensaiadas são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Lajes ensaiadas (Cordovil, 1995)

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

⁽¹⁾ Adjacente, simétrico – indica ruptura adjacente à área carregada com deslocamento de um sólido quase simétrico;
Adjacente irregular – indica ruptura adjacente à área carregada com deslocamento de um sólido irregular.

Baseando-se nos resultados experimentais obtidos, Cordovil apresentou uma proposta de alteração para o CEB-FIP MC90:1993 que consistiu basicamente na mudança da distância do perímetro crítico em relação ao perímetro do pilar de $2,0.d$ para $1,25.d$ para lajes sem armadura de cisalhamento. A Figura 2.18 apresenta a proposta de perímetro de controle sugerida por Cordovil. Para lajes com armadura de cisalhamento foi proposta a mudança do perímetro de controle externo, distante $2,0.d$ da última camada de armadura de cisalhamento, para um perímetro de controle distante $2,5.d$ das bordas da área carregada. Assim, o perímetro de controle externo fica dependente somente das dimensões da área carregada e da altura útil, d , da laje.

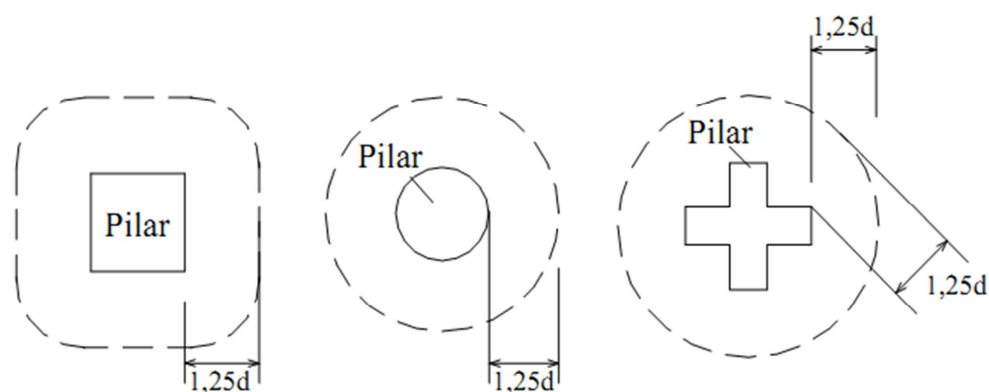


Figura 2.18 - Perímetros de controle (Cordovil, 1995)

Para lajes com disposição de armadura transversal foi sugerido também acréscimo nas prescrições do CEB-FIP MC90:1993 quanto ao espaçamento entre linhas de armaduras de cisalhamento, onde é recomendada uma distância máxima de $1,5.d$ entre linhas consecutivas da primeira camada de armadura transversal, acrescentando que a armadura de cisalhamento deve ter uma extensão mínima de $2,0.d$ das bordas do pilar.

2.2.2.2 TRAUTWEIN (2006)

O trabalho consistiu no estudo experimental de lajes lisas de concreto armado com a armadura de cisalhamento não envolvendo a armadura de flexão. Onze lajes lisas quadradas de concreto com 200 mm de espessura e 3000 mm de lado, com uma área central carregada de 200 mm de lado, foram testadas até a ruptura. Todas as lajes romperam por punção, com cargas de ruptura superiores em até 110 % em relação à carga de ruptura de laje similar sem armadura de cisalhamento, demonstrando a eficiência da armadura. A Figura 2.19 apresenta o sistema de ensaio utilizado na pesquisa.

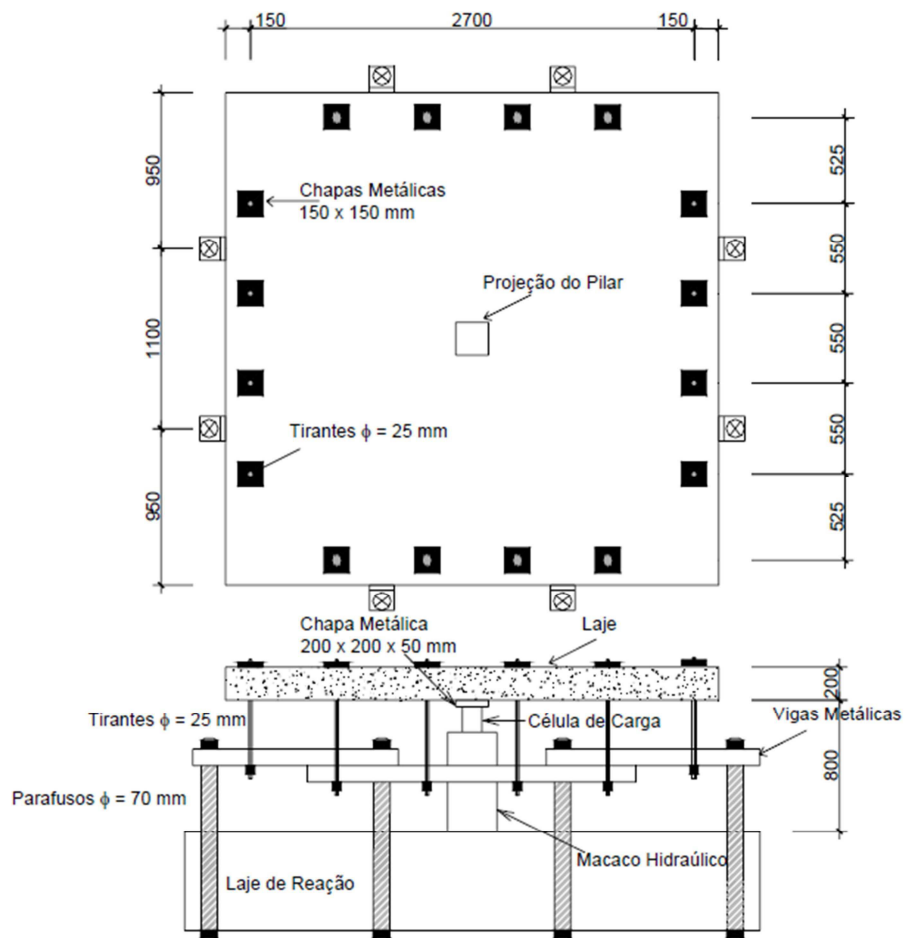


Figura 2.19 - Sistema de ensaio (Trautwein, 2006)

Foram definidos dois grupos com lajes de mesmas dimensões e armadura de flexão e com armadura de cisalhamento do tipo *stud* interno. O Grupo 1 apresentou armadura dimensionada para que a superfície de ruptura ocorresse externamente à região armada transversalmente e os modelos do Grupo 2 foram executados considerando a ocorrência de ruptura na região interior às armaduras de cisalhamento. As lajes do Grupo 1 foram identificadas com a letra “E” e as lajes do Grupo 2 identificadas com a letra “I”.

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

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

A armadura de cisalhamento utilizada em todas as lajes foi do tipo “stud”, onde barras de aço CA50 foram soldadas, em suas extremidades, às chapas de aço de 30 mm de largura e 10 mm de espessura. A altura total dos “studs” foi 115 mm. Os “studs” foram colocados de forma interna à armadura de flexão, sem envolver as barras da armadura superior e inferior. A Figura 2.20 apresenta um desenho esquemático do posicionamento da armadura de cisalhamento.

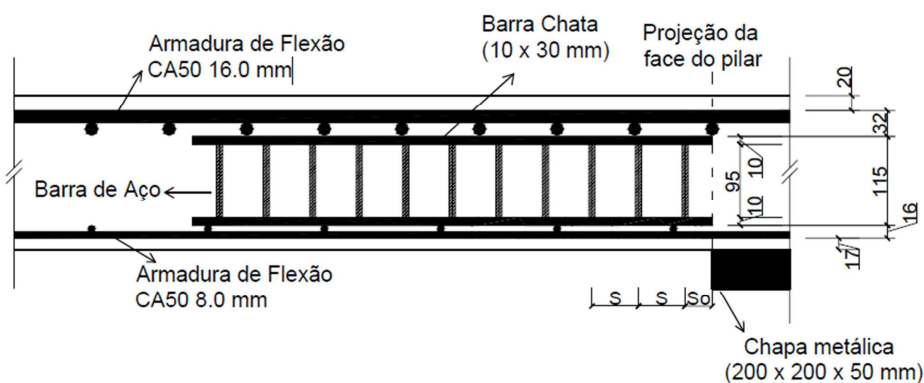


Figura 2.20 - Desenho esquemático do posicionamento da armadura de cisalhamento (Trautwein, 2006)

As lajes do Grupo 2 apresentaram menor densidade de armadura de cisalhamento em relação ao Grupo 1, induzindo uma ruptura na região das armaduras de cisalhamento. A Tabela 2.3 apresenta as características geométricas e resultados dos ensaios de Trautwein (2006).

Tabela 2.3 - Características geométricas e resultados experimentais (Trautwein, 2006)

Lajes	d (mm)	Concreto		Armadura de Cisalhamento							Ruptura	
		f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	ϕ	nº de linhas	âng. entre linhas	nº de camadas	distrib.	s_0	s_r	P_u (kN)	Modo
E2	159	35,2	3,3	10,0	11	30°	11	Radial	35	60	1100	externa
E2	159	36,6	3,6	10,0	3/8/5	*	3/8/5	Par./ Rad	35	60	990	externa
E3	159	41,1	3,7	10,0	11	30°	11	Radial	35	60	1090	externa
E4	154	40,6	4,5	10,0	11	30°	11	Radial	35	60	1205	externa
E5	154	42,1	3,2	10,0	11	30°	11	Radial	35	60	1222	externa
I6	159	39,1	3,7	6,3	11	45°/22,5°	11	Radial	35	60	830	interna
I7	159	39,6	3,4	10,0	11	45°/22,5°	11	Radial	35	60	978	interna
I8	159	35,4	2,6	8,0	11	45°/22,5°	11	Radial	35	60	856	interna
I9	161	43,6	4,0	5,0	5	45°	5	Radial	80	80	853	interna
I10	161	44,4	3,2	8,0	5	45°	5	Radial	80	80	975	interna
I11	161	41,4	3,7	6,3	5	45°	5	Radial	80	80	945	interna

Altura das lajes – h = 200 mm;
 Taxa de armadura de flexão – $\rho = 1,20 \%$;
 * as três primeiras linhas foram paralelas à face do pilar (1ª camada – $s_r=75$ mm, 2ª – $s_r=105$ mm, 3ª – $s_r=135$ mm) e, a partir da 4ª linha, distribuição radial com $s_r=60$ mm.

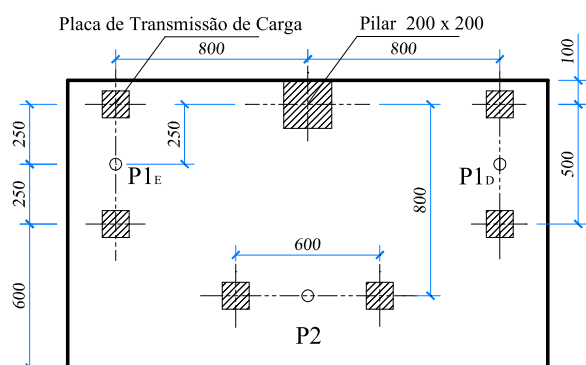
Todas as lajes romperam por punção e verificou-se que as lajes do Grupo 1 alcançaram cargas 77 % a 118 % superiores à carga de ruptura da laje L1 de Gomes (1991) sem armadura de cisalhamento. Nas lajes do Grupo 2, o aumento da carga de ruptura variou de 48 % a 72 % em relação à laje de referência. O acréscimo de resistência das lajes testadas comprovou a potencialidade do tipo de armadura de cisalhamento interna à armadura de flexão. O autor concluiu também que para valores maiores da relação entre a quantidade de armadura de cisalhamento por camada e o espaçamento radial entre as camadas a resistência à punção aumenta.

2.2.2.3 GOMES (2010)

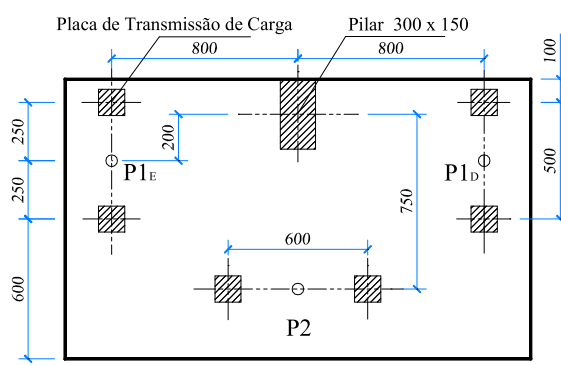
Gomes (2010) realizou ensaios de dezesseis modelos locais de ligação laje lisa protendida-pilar de borda. As características dos modelos encontram-se presentes na Tabela 2.4. Os modelos locais ensaiados apresentaram pilares com altura total de 1620 mm, sendo 900 mm acima do plano superior da laje e 600 mm abaixo do plano inferior. A espessura das lajes de todos os modelos era de 120 mm. A Figura 2.21 apresenta detalhes dos modelos.

Tabela 2.4 - Dimensões e variáveis dos modelos (Gomes, 2010)

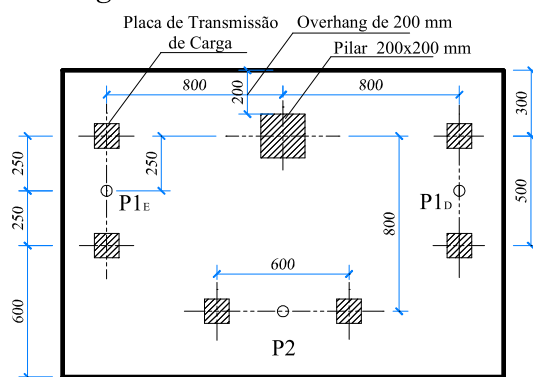
Modelo	Largura (mm)	f_c (MPa)	Dimensões dos Pilares (mm)	Overhang (mm)	Relação P1/P2	Relação P1 _D /P1 _E
L01	1200	52,2	200 x 200	---	0,5	---
L02	1200	52,2	200 x 200	---	0,5	---
L03	1200	54,7	150 x 300	---	4,0	---
L04	1200	54,7	150 x 300	---	0,5	---
L05	1400	50,7	200 x 200	200	4,0	---
L06	1400	50,7	200 x 200	200	0,5	---
L07	1400	56,9	200 x 200	200	4,0	---
L08	1400	56,9	200 x 200	200	0,5	---
L09	1200	54,4	200 x 200	---	Var	2,0
L10	1200	55,5	200 x 200	---	Var	4,0
L11	1200	54,4	200 x 200	---	---	2,0
L12	1200	54,4	200 x 200	---	---	4,0
L13	1200	55,2	200 x 200	---	---	4,0
L14	1200	55,5	200 x 200	---	Var	2,0
L15	1200	55,2	200 x 200	---	---	2,0
L16	1200	55,2	200 x 200	---	Var	4,0



(a) – Geometria e localização das cargas em planta dos modelos sem *overhang*.



(b) – Geometria dos modelos com pilares retangulares.



(c) – Geometria e localização das cargas em planta dos modelos com *overhang*.

Figura 2.21 - Geometria dos modelos locais de ensaio (Gomes, 2010)

Os modelos foram divididos em grupos para que variáveis específicas fossem analisadas, a Tabela 2.5 apresenta os grupos de modelos ensaiados e na Tabela 2.6 são apresentados os resultados quanto à cargas e modos de ruptura observados.

Tabela 2.5 - Grupos e parâmetros (Gomes, 2010)

Grupos	Modelos	Em comum	Variável de ensaio
Grupo 1	L01 e L02	Relação P1/P2	Disposição dos cabos
	L03 e L04	Disposição dos cabos	Relação P1/P2
	L02 e L04	Relação P1/P2	Disposição dos cabos; Relação c/d.
Grupo 2	L05 e L06	Disposição dos cabos	Relação P1/P2
	L07 e L08	Disposição dos cabos	Relação P1/P2
	L05 e L07	Relação P1/P2	Disposição dos cabos
	L06 e L08	Relação P1/P2	Disposição dos cabos
Grupo 3	L01 e L06	Disposição dos cabos	<i>Overhang</i>
Grupo 4	L09, L10, L14 e L16	Carga P2 = 40 kN e Disposição dos cabos	Relação P1 _D /P1 _E
Grupo 5	L11, L12, L13 e L15	Ausência de carga P2 e Disposição dos cabos	Relação P1 _D /P1 _E
Grupo 6	L09 à L16	Relação P1 _D /P1 _E Disposição dos cabos	Presença ou ausência de carga P2 = 40 kN

Tabela 2.6 - Relação Momento/Cortante (M/V) e cargas de ruptura (Gomes, 2010)

Modelo	M _{u1} / V _u	M _{u2} / V _u	Carga de Ruptura (kN)
L01	0,515	---	126,0
L02	0,537	---	136,9
L03	0,262	---	255,8
L04	0,472	---	183,8
L05	0,311	---	211,0
L06	0,530	---	146,8
L07	0,311	---	210,5
L08	0,521	---	167,5
L09	0,398	0,266	151,8
L10	0,423	0,559	133,8
L11	0,250	0,338	169,5
L12	0,250	0,497	147,1
L13	0,250	0,528	141,3
L14	0,394	0,309	160,4
L15	0,250	0,297	177,1
L16	0,419	0,572	142,8

Para os modelos L3 e L4; L5 e L6; L7 e L8; em que a análise foi feita apenas para o momento em relação ao eixo paralelo à borda que continha a ligação e foram mantidos os

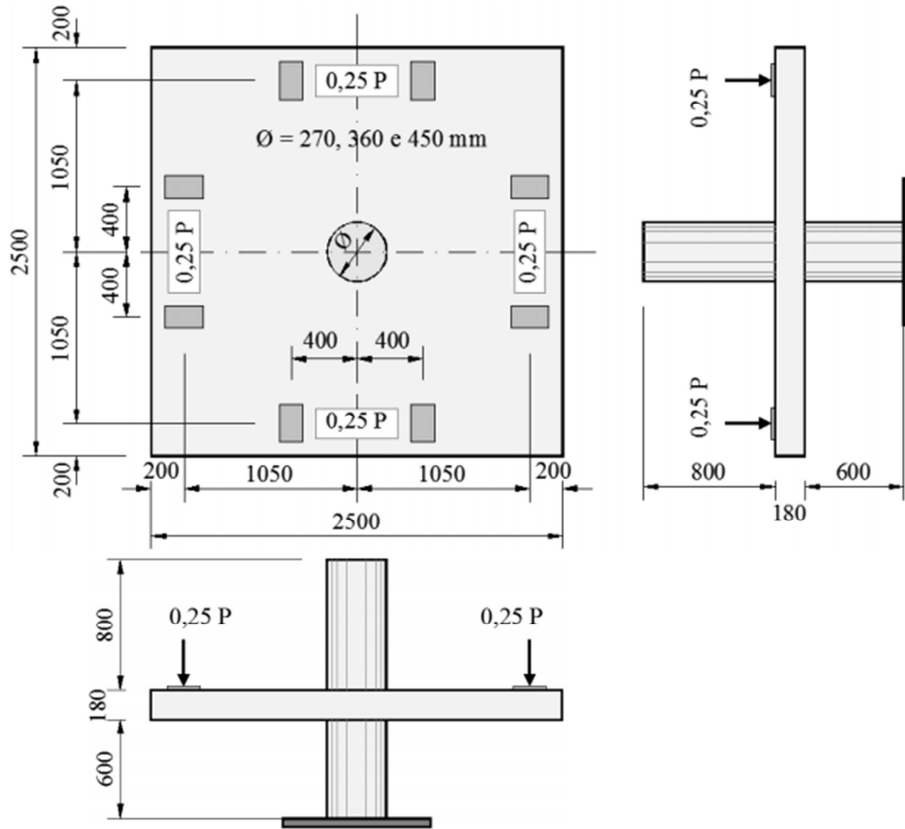
demais parâmetros, os resultados mostraram que com o aumento da relação momento/cortante no pilar a capacidade resistente caiu, atestando a necessidade de atenção quanto a essa questão.

Observou-se que os modelos L03, L05 e L07, com relação de carregamento $P_1/P_2 = 4$, apresentaram ruptura por punção bem caracterizada, mostrando, para essa relação de carga, a grande propensão a este tipo de ruptura. Foi observado que o momento perpendicular à borda da ligação, transferido para o pilar, contribuiu significativamente quanto aos deslocamentos verticais obtidos.

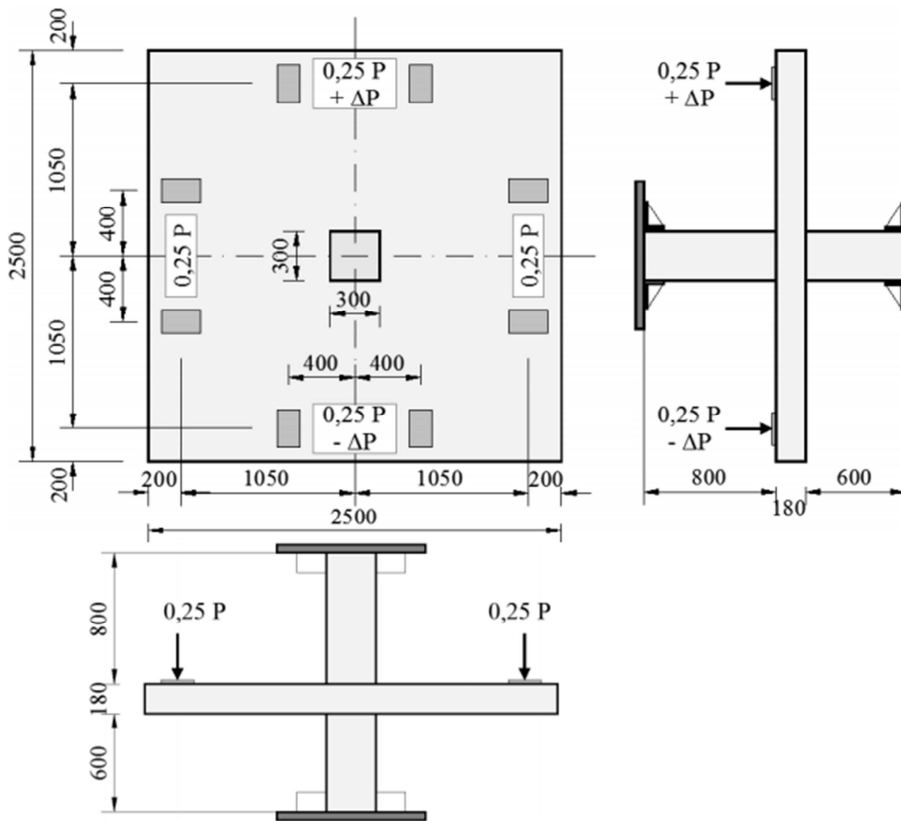
2.2.2.4 FERREIRA (2010)

Ferreira (2010) investigou o comportamento de 16 lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento divididas em duas séries, tendo-se como variáveis: forma dos pilares (seções circulares e quadradas), dimensão dos pilares, modo de carregamento (simétrico e assimétrico), taxa de armadura de flexão, quantidade e disposição das armaduras de cisalhamento.

Visando simplificação quanto ao travamento dos pilares, na segunda série de ensaios a seção foi estabelecida como sendo quadrada, com lado de 300 mm. Esta medida foi adotada de forma a permitir a comparação entre as lajes com pilares quadrados e aquelas com pilares circulares com diâmetro de 360 mm, pois o perímetro de controle u_1 , determinado segundo as recomendações das normas NBR 6118:2003, Eurocode 2:2004 e CEB-FIP MC90:1993, é aproximadamente igual. A Figura 2.22 ilustra o programa de ensaio das lajes e a Tabela 2.7 apresenta as suas características principais.



(a) Lajes da 1ª série de ensaios



(a) Lajes da 2ª série de ensaios

Figura 2.22 - Programa de ensaios (Ferreira, 2010)

Tabela 2.7 - Características das lajes (Ferreira, 2010)

Série de Ensaios	Laje	Pilar (mm)	d (mm)	ρ (‰)	f'_c (MPa)	Armadura de Cisalhamento			e (mm)	P_u (kN)	Modo de Ruptura
						Nº Cam.	Nº Linhas	A_{sw} /Cam. (mm ²)			
1ª série	LC01*	270	143	1,50	48,0	6	10	785,40	0	858,4	P
	LC02*	360	140	1,55	47,0	6	10	785,40	0	955,7	FP
	LC03*	450	142	1,41	49,0	6	10	785,40	0	1.076,8	P
	LC04*	360	140	1,55	48,0	6	12	942,48	0	1.122,1	FP
	LC05*	360	140	2,06	50,0	6	10	785,40	0	1.117,5	FP
	LC06 ^o	360	143	1,45	49,0	6	10	785,40	0	1.077,5	FP
	LC07 [†]	360	144	1,60	49,0	7	10	785,40	0	1.110,4	FP
	LC08*	360	144	1,63	48,0	6	12	942,48	0	1.058,9	FP
2ª série	LS01*	300	145	1,54	48,0	2	12	942,48	0	1.021,5	P
	LS02*	300	143	1,46	49,0	4	12	942,48	0	1.127,5	P
	LS03*	300	145	1,54	50,0	2	12	942,48	315	698,5	P
	LS04*	300	143	1,46	49,0	4	12	942,48	315	721,7	P
	LS05	300	143	1,57	50,0	--	--	--	0	779,0	P
	LS06	300	144	1,56	50,0	--	--	--	315	528,3	P
	LS07#	300	143	1,69	49,0	4	12	1.472,72	0	1.196,0	P
	LS08#	300	144	1,68	48,0	4	12	1.472,72	315	934,1	P

Obs.:

* $S_0 = 70$ mm $S_r = 100$ mm $\phi_w = 10,0$ mm $f_{yw} = 500$ MPa

† $S_0 = 55$ mm $S_r = 80$ mm $\phi_w = 10,0$ mm $f_{yw} = 500$ MPa

$S_0 = 70$ mm $S_r = 100$ mm $\phi_w = 12,5$ mm $f_{yw} = 500$ MPa

o $S_0 = 70$ mm $S_r = 100$ mm $\phi_w = 12,5$ mm $f_{yw} = 500$ MPa $\rho' = 1,14$ ‰

Ferreira (2010) adotou uma taxa de armadura de flexão comprimida significativa, visando evitar uma possível ruptura por esmagamento do concreto na face inferior das lajes na região próxima ao pilar. Essa armadura foi composta por 4 barras de 16,0 mm nas direções “x” e “y” cruzando a seção do pilar e por barras de 12,5 mm no restante da laje. Para garantir a ancoragem destas armaduras, foram utilizados ganchos em forma de “u”, compostos por barras de 12,5 mm de diâmetro. A Figura 2.23 apresenta um projeto geral das armaduras de flexão das lajes, idealizado no início da pesquisa.

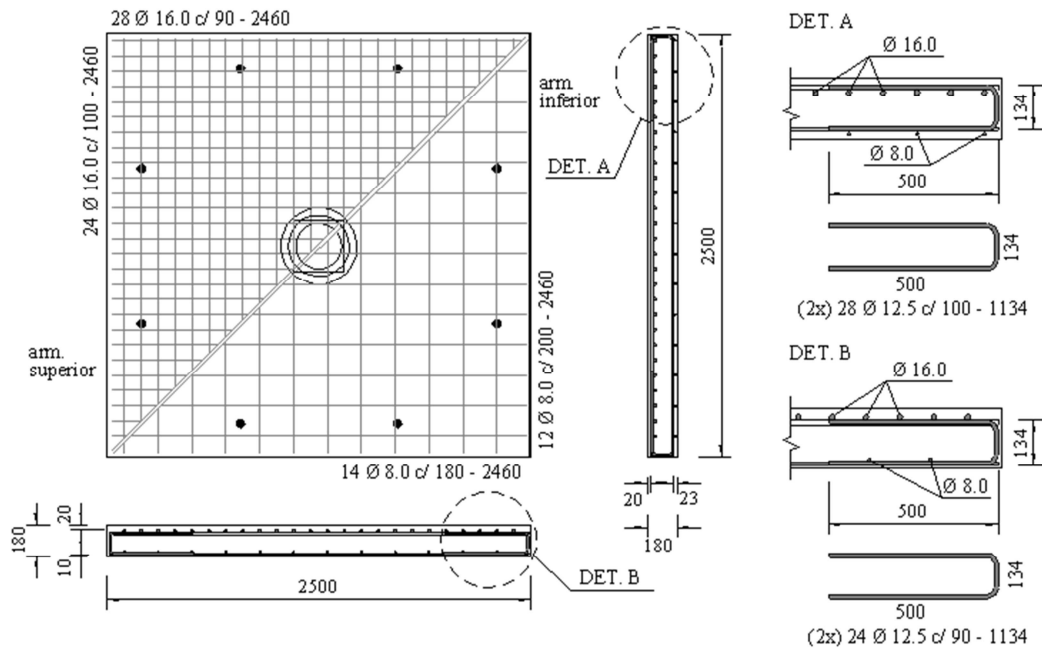


Figura 2.23 - Projeto de armaduras de flexão das lajes (Ferreira, 2010)

Os modos de ruptura possíveis para as lajes ensaiadas são: punção, caracterizado normalmente como um modo de ruptura brusco, com poucos avisos, sem que as armaduras de flexão atinjam o escoamento ou a superfície do concreto atinja valores de deformação próximos ao de ruptura por esmagamento; flexo-punção, caracterizado como um modo de ruptura mais dúctil, com a laje trabalhando bastante à flexão, porém com a formação do cone de punção no momento da ruptura; flexão, que apresenta modo de ruptura normalmente caracterizado pelo esmagamento da superfície do concreto, sem a formação do cone de punção e notório escoamento da armadura de flexão.

Todas as lajes ensaiadas apresentaram modos de ruptura dúcteis, com algumas barras da armadura de flexão atingindo a tensão de escoamento e com elevadas deformações na superfície do concreto. Deve-se isso ao uso de uma quantidade elevada de armaduras de cisalhamento, as quais se mostraram bastante eficientes.

2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

2.3.1 Eurocode 2:2004 - Design of concrete structures

O Eurocode 2:2004 define que a punção pode resultar de um carregamento concentrado ou de uma reação atuante em uma área relativamente pequena de uma laje ou fundação. A Figura 2.24 apresenta um modelo para verificar a ruptura por punção no estado limite último.

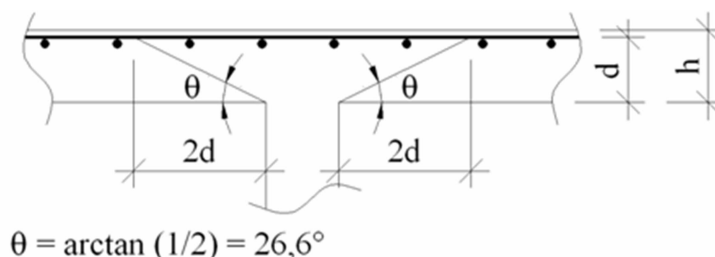


Figura 2.24 - Modelo para verificar a ruptura por punção no estado limite último (Eurocode 2:2004)

A verificação da resistência à punção é feita em torno de um perímetro de controle u_1 tomado a uma distância $2.d$ da área carregada e deve ser constituído de modo a minimizar o seu comprimento. A Figura 2.25 mostra detalhes dos perímetros de controle adotados pelo Eurocode 2:2004.

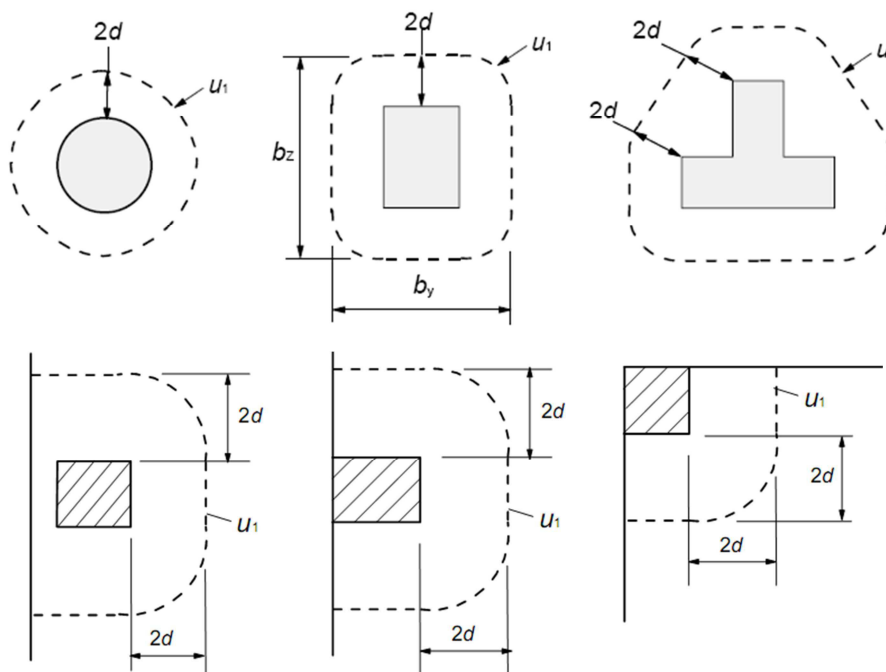


Figura 2.25 - Perímetro de controle típico ao redor de áreas carregadas (Eurocode 2:2004)

O perímetro de controle quando existem furos com distâncias menores ou iguais a $6.d$ da face do pilar é considerado como mostra a Figura 2.26.

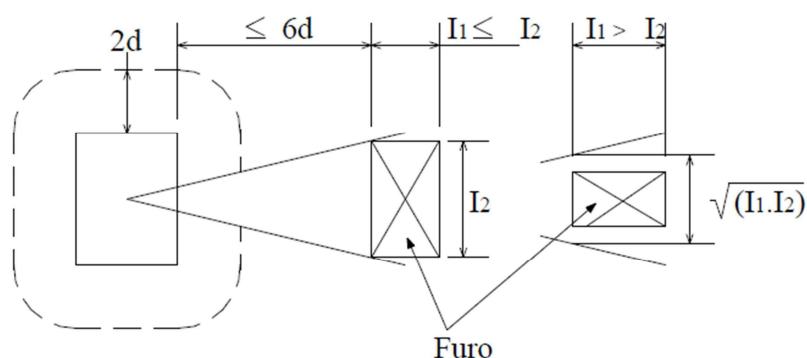


Figura 2.26 - Perímetro crítico com a existência de furo (Eurocode 2:2004)

O Eurocode 2 define que a resistência à punção de uma laje com armadura de cisalhamento deve ser o menor valor entre $V_{R,máx}$, $V_{R,cs}$, e $V_{R,out}$, mas não menor que $V_{R,c}$. Segundo o Eurocode 2:2004:

- $V_{R,máx}$ é a resistência máxima para uma determinada dimensão de pilar, altura útil e resistência à compressão do concreto;
- $V_{R,cs}$ é a resistência máxima advinda da combinação da armadura de cisalhamento e do concreto;
- $V_{R,out}$ é a resistência da laje na região externa às armaduras de cisalhamento;
- $V_{R,c}$ é a capacidade resistente de uma laje similar, mas sem armadura de cisalhamento.

Para áreas carregadas situadas próximas ou em uma borda ou canto, a uma distância menor do que d , armaduras especiais nas bordas devem ser previstas. Ao longo de uma borda livre, uma laje deve normalmente conter armadura longitudinal e transversal, geralmente dispostas como mostrado na Figura 2.27.

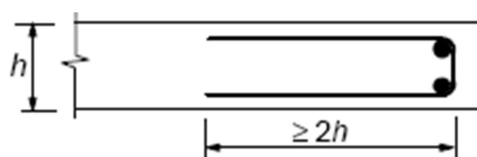


Figura 2.27 - Armadura de borda (Eurocode 2: 2004)

As verificações a serem feitas são:

- a) Verificação no perímetro do pilar ou área carregada. A máxima tensão de cisalhamento não deve exceder:

$$v_{Ed} < v_{RD,máx} \quad (2.7)$$

onde:

v_{Ed} é a carga atuante na ligação;

$v_{RD,máx}$ é o valor de cálculo máximo da resistência ao cisalhamento ao longo da seção considerada.

- b) Verificação da necessidade de armadura de punção. Não será necessária armadura de punção se:

$$v_{Ed} < v_{RD,c} \quad (2.8)$$

onde:

$v_{RD,c}$ é o valor de cálculo da resistência ao cisalhamento sem armadura de punção ao longo da seção considerada.

No cálculo da tensão atuante quando a reação for excêntrica (ver Figura 2.28) com relação ao perímetro de controle a máxima tensão de cisalhamento deve ser tomada como:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_1 \cdot d} \quad (2.9)$$

onde:

$$\beta = 1 + k \cdot \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1} \quad (2.10)$$

W_1 é o Módulo de Resistência Plástica em função do perímetro de controle básico u_1 ;

d é a profundidade média efetiva da laje, que pode ser tomada como $(d_y + d_z)/2$, onde d_y e d_z correspondem às profundidades efetivas nos eixos y e z da seção de controle;

u_1 é o comprimento do perímetro de controle básico;

k é o coeficiente que relaciona a maior com a menor dimensão do pilar ou área carregada, apresentado na Tabela 2.8:

Tabela 2.8 - Valores de k para pilares retangulares (Eurocode 2:2004)

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

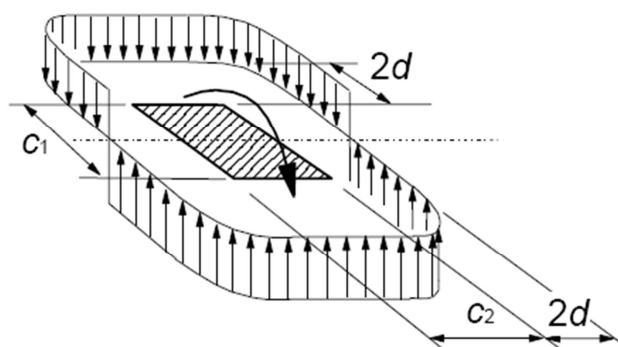


Figura 2.28 - Distribuição de cisalhamento devido a um momento desbalanceado para laje com pilar interno (Eurocode 2:2004)

Para pilares retangulares de centro:

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 \cdot c_2 + 4 \cdot c_2 d + 16 \cdot d^2 + 2 \cdot \pi \cdot d \cdot c_1 \quad (2.11)$$

onde:

c_1 é a direção do pilar paralela à excentricidade de carga;

c_2 é a direção do pilar perpendicular à excentricidade de carga.

ou:

$$W_1 = \int_0^{u_i} |e| dl \quad (2.12)$$

onde:

dl é o incremento de comprimento do perímetro;

$|e|$ é a distancia de dl ao eixo sobre o qual o momento M_{Ed} atua.

$v_{Rd,máx}$ é calculado para a seção do perímetro de contorno do pilar ou área carregada e é dado por:

$$v_{Rd,máx} = 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (2.13)$$

onde:

$$v = 1 - \frac{f_{ck}}{250}; f_{ck} \text{ em MPa} \quad (2.14)$$

A resistência de uma laje de concreto armado sem armaduras de cisalhamento pode ser calculada por:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k(100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,10 \cdot \sigma_{cp} \geq (v_{min} + 0,10 \cdot \sigma_{cp}) \quad (2.15)$$

onde:

f_{ck} é dado em MPa;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2, d \text{ em mm} \quad (2.16)$$

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{1,y} \cdot \rho_{1,z}} \leq 0,02 \quad (2.17)$$

ρ é a taxa de armadura de flexão tracionada média da laje. Devem ser consideradas as barras dentro de uma região afastada $3 \cdot d$ das faces do pilar.

O valor recomendado para $C_{Rd,c}$ é $0,18/\gamma_c$.

A resistência de uma laje de concreto armado com armaduras de cisalhamento pode ser calculada por:

$$v_{Rd,cs} = 0,75 \cdot v_{Rd,c} + 1,5(d/s_r) \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \cdot (1/(u_1 \cdot d)) \cdot \sin \alpha \quad (2.18)$$

onde:

u_1 é a soma dos trechos do perímetro mínimo externo às armaduras de cisalhamento, com nenhuma das partes tomadas com comprimento superior a $2 \cdot d$;

d é a altura útil da laje;

s_r é o espaçamento radial entre camadas sucessivas de armaduras de cisalhamento;

A_{sw} é a área das armaduras de cisalhamento por camada;

$f_{ywd,ef}$ é a tensão efetiva na armadura de cisalhamento;

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 \cdot d \leq f_{ywd} \text{ (MPa)} \quad (2.19)$$

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

u_0 é o comprimento do perímetro do pilar.

Para um pilar de canto reentrante e seção quadrada:

$$u_1 = u_0 + 3 \cdot \pi \cdot d \quad (2.20)$$

O perímetro de controle no qual a armadura de cisalhamento não é necessária, u_{out} (ou $u_{out,ef}$) deve ser calculado:

$$u_{out,ef} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{v_{Rd,c} \cdot d} \quad (2.21)$$

O perímetro externo à região com armadura de cisalhamento deve ser colocado a uma distância não superior a $1,5 \cdot d$, conforme ilustrado na Figura 2.29.

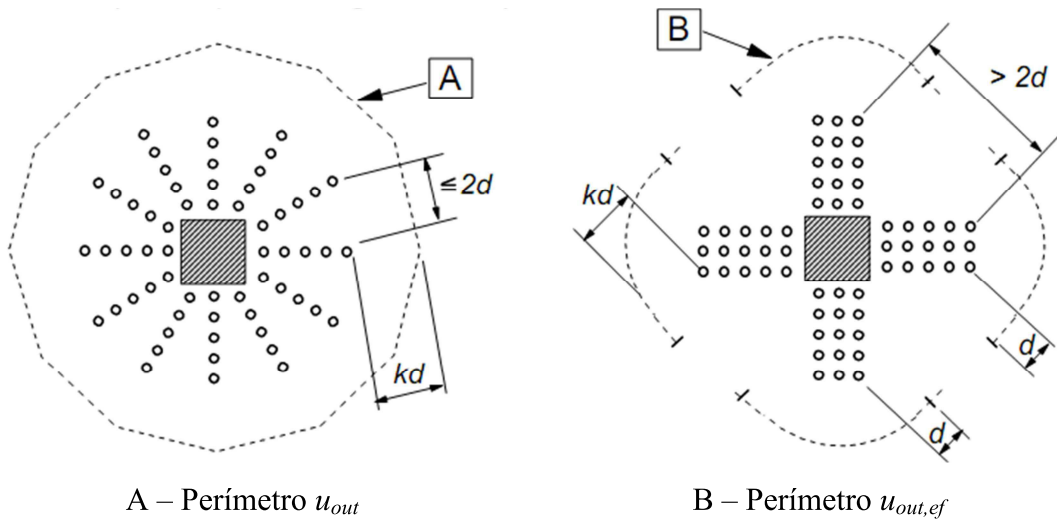


Figura 2.29 - Perímetro de controle externo à região com armaduras de cisalhamento (Eurocode 2:2004)

2.3.2 ACI 318:2008 - Building Code Requirements for Structural Concrete

O ACI 318:2008 adota um perímetro de controle localizado a uma distancia de $0,5.d$ das faces do pilar para o cálculo da resistência à punção com superfície de ruptura cruzando a armadura de cisalhamento. Para superfície de ruptura externa à região armada ao cisalhamento o perímetro de controle é considerado a uma distância de $0,5.d$ da última camada de armadura transversal.

Para colunas quadradas ou retangulares, cargas concentradas, ou áreas de reação, são permitidas seções críticas com quatro lados retilíneos.

A suposta distribuição das tensões de cisalhamento e a disposição da seção crítica para pilares internos e de borda estão ilustradas na Figura 2.30.

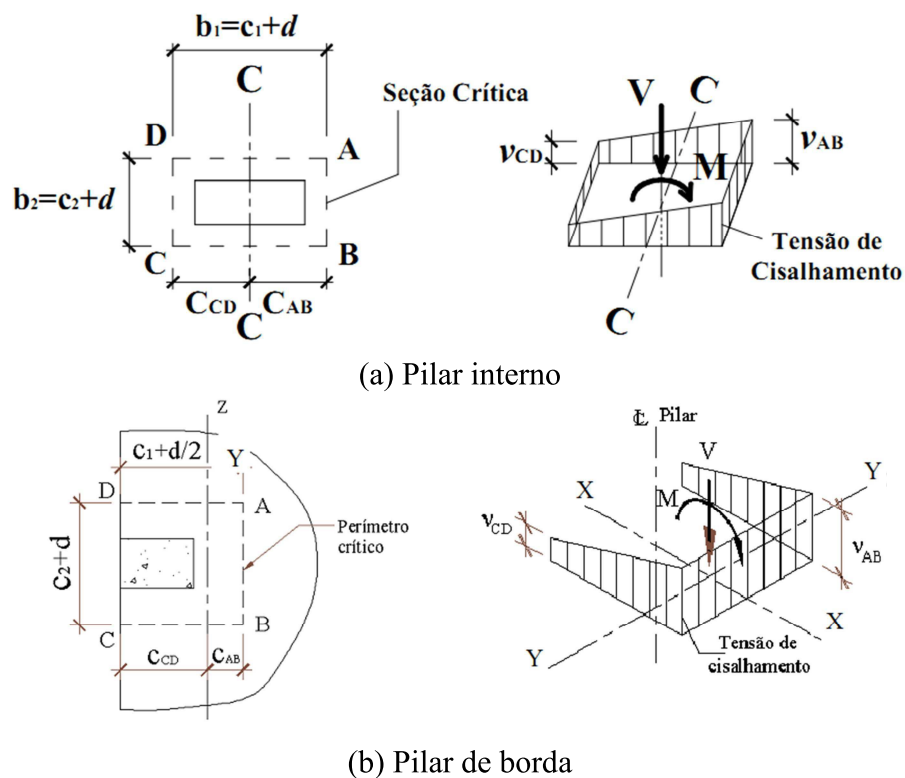


Figura 2.30 - Localização da seção crítica e suposta distribuição das tensões de cisalhamento (ACI 318:2008)

Quando houverem furos, o perímetro de controle deve ser reduzido como mostrado na Figura 2.31. Furos localizados a uma distância superior a $10.h$ devem ser desconsiderados, sendo h a altura da laje.

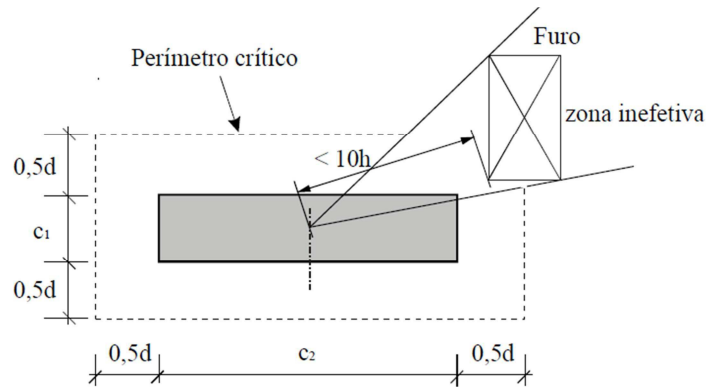


Figura 2.31 - Perímetro crítico para lajes com furos (ACI 318:2008)

Para lajes não protendidas e sapatas, V_c deve ser o menor entre (a), (b) e (c):

$$(a) \quad V_c = \left(2 + \frac{4}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad (2.22)$$

onde β é a relação entre o lado maior e o lado menor da coluna, carga concentrada, ou área de reação.

$$(b) \quad V_c = \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad (2.23)$$

onde α_s é 40 para coluna interna, 30 para coluna de borda e 20 para coluna de canto.

$$(c) \quad V_c = 4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad (2.24)$$

Para levar em consideração a utilização de concreto leve, a menos que haja especificação contrária, um fator de modificação λ aparece como multiplicador de $\sqrt{f'_c}$ em todas as equações e as seções aplicáveis ao cálculo da carga resistente, onde $\lambda = 0,85$ para concreto de areia leve e $0,75$ para todos os concretos leves. Interpolação linear entre $0,75$ e $0,85$ é permitida com base em frações volumétricas quando uma parte do agregado leve e fino é substituído pelo agregado normal.

Interpolação linear entre $0,85$ e $1,0$ é permitida com base em frações volumétricas para concretos contendo agregado fino e uma mistura de agregados graúdos. Para concreto simples, $\lambda = 1,0$. Se a tensão de tração média do concreto, f_{ct} , é especificada:

$$\lambda = f_{ct} / (6.7 \sqrt{f'_c}) \leq 1,0 \quad (2.25)$$

O dimensionamento de qualquer seção de concreto ao cisalhamento, incluindo o dimensionamento de uma ligação laje-pilar à punção, deve satisfazer a seguinte condição:

$$v_u \leq \phi \cdot v_n \quad (2.26)$$

onde:

v_u é a tensão de cisalhamento máxima devido à M_u e V_u ;

v_n é a tensão de cisalhamento resistente.

Para a tensão de cisalhamento resultante da transferência de momento, a excentricidade de cisalhamento deve ser considerada variável de forma linear sobre o centroide das seções críticas.

Para ligações laje-pilar que realizam transferência de momentos e não apresentam armadura de cisalhamento:

$$\phi \cdot v_n = \frac{\phi \cdot V_c}{b_0 \cdot d} \quad (2.27)$$

Para membros com armadura de cisalhamento diferente de *shearheads*:

$$\phi \cdot v_n = \frac{\phi \cdot (V_c + V_s)}{b_0 \cdot d} \quad (2.28)$$

A contribuição da armadura de cisalhamento, quando se tem estribos verticais, é dada pela expressão:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (2.29)$$

onde:

A_v é a área de armadura de cisalhamento por camada;

f_y é a tensão específica de escoamento do aço;

s é o espaçamento entre camadas sucessivas da armadura de cisalhamento.

A força de cisalhamento majorada V_u e o momento majorado desequilibrado M_u são determinados a partir do centroide axial c-c da seção crítica. O valor máximo de tensão de cisalhamento majorado pode ser calculado através de:

$$v_{u(AB)} = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_u \cdot c_{AB}}{J_c} \quad (2.30)$$

ou

$$v_{u(CD)} = \frac{V_u}{A_c} - \frac{\gamma_v \cdot M_u \cdot c_{CD}}{J_c} \quad (2.31)$$

onde:

V_u é a força de cisalhamento majorada;

M_u é o momento majorado desequilibrado;

c_{AB} é a excentricidade do perímetro crítico;

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

sendo:

$$\gamma_v = (1 - \gamma_f) \quad (2.32)$$

onde:

$$\gamma_f = \frac{1}{1 + (2/3) \cdot \sqrt{b_1/b_2}} \quad (2.33)$$

Com b_1 e b_2 sendo, respectivamente, as dimensões da seção crítica na direção de aplicação do momento fletor e na direção perpendicular a essa.

Para colunas internas A_c e J_c podem ser calculados como:

A_c é a área de concreto da seção crítica assumida:

$$A_c = 2 \cdot d \cdot (c_1 + c_2 + 2 \cdot d) \quad (2.34)$$

J_c é a propriedade da seção crítica assumida, análoga ao momento polar de inércia:

$$J_c = \frac{d \cdot (c_1 + d)^3}{6} + \frac{(c_1 + d) \cdot d^3}{6} + \frac{d \cdot (c_2 + d) \cdot (c_1 + d)^2}{2} \quad (2.35)$$

2.3.3 NBR 6118:2007 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.

O modelo empírico de cálculo adotado pela NBR 6118:2007 é baseado no método da superfície de controle. Compara-se a tensão de cisalhamento atuante em cada uma das superfícies críticas perpendiculares ao plano médio da laje com a tensão resistente correspondente. Compara-se também a tensão solicitante máxima com a capacidade resistente da ligação, dada pela resistência do concreto à compressão diagonal.

O modelo de cálculo da NBR 6118:2007 propõe a verificação do cisalhamento em duas ou mais superfícies críticas definidas no entorno de áreas com carregamento concentrado.

Na primeira superfície crítica, (contorno C) do pilar ou da carga concentrada, deve ser verificada indiretamente a tensão de compressão diagonal do concreto através da tensão de cisalhamento.

Na segunda superfície crítica, (contorno C') afastada $2.d$ do pilar ou carga concentrada, deve ser verificada a capacidade da ligação à punção, associada à resistência à tração diagonal.

Caso haja necessidade, a ligação deve ser reforçada por armadura transversal.

A terceira superfície crítica, (contorno C''), apenas deve ser verificada quando for necessário colocar armadura transversal.

A tensão solicitante nas superfícies críticas C e C' para pilar interno com carregamento simétrico é dada por:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} \quad (2.36)$$

sendo:

$$d = (d_x + d_y)/2 \quad (2.37)$$

onde:

d é a altura útil da laje ao longo do contorno crítico C', externo ao contorno C da área de aplicação da força e deste distante $2 \cdot d$ no plano da laje;

d_x e d_y são as alturas úteis nas duas direções ortogonais;

u é o perímetro do contorno crítico C' ;

$u \cdot d$ é a área da superfície crítica;

F_{sd} é a força ou a reação concentrada de cálculo.

A força de punção F_{sd} pode ser reduzida da força distribuída aplicada na face oposta da laje, dentro do contorno considerado na verificação, C ou C' . A Figura 2.32 ilustra a disposição do perímetro crítico para pilares com diferentes posicionamentos em relação à laje.

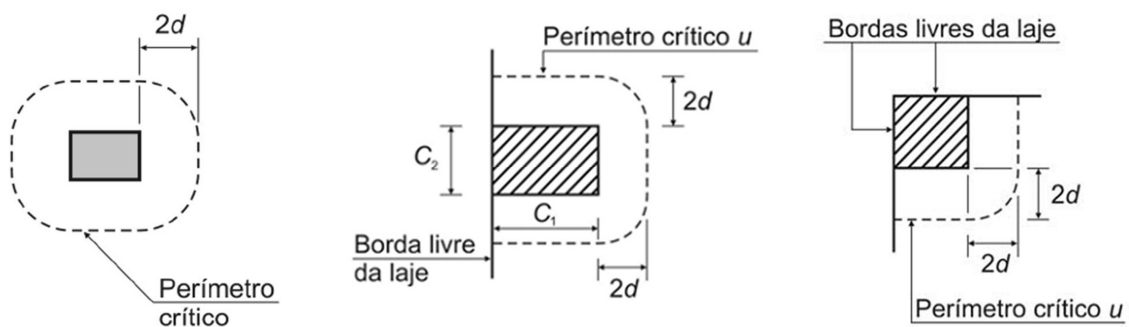


Figura 2.32 - Perímetro crítico para pilares internos, de borda e de canto (NBR 6118:2007)

Para o tratamento de furos, a norma altera o perímetro crítico a ser considerado, como mostrado na Figura 2.33. Furos situados a uma distância maior que “ $8d$ ” do perímetro do pilar devem ser desconsiderados.

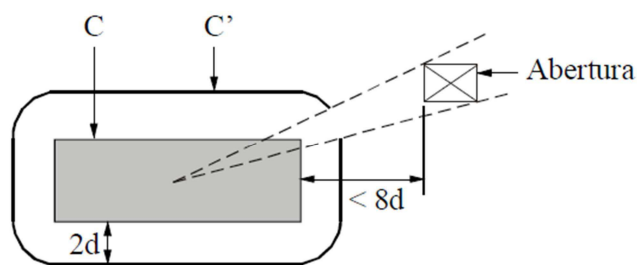


Figura 2.33 - Perímetro crítico para lajes com furos (NBR 6118:2007)

Quando for necessária a utilização de armadura transversal, deve-se estendê-la em contornos paralelos a C' até que em um contorno C'' , afastado $2d$ do último contorno de armadura, não seja mais necessária armadura de cisalhamento, isto é, $\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1}$. As Figuras 2.34 e 2.35 mostram detalhes dos perímetros de controle externos às armaduras de cisalhamento considerados pela NBR 6118:2007.

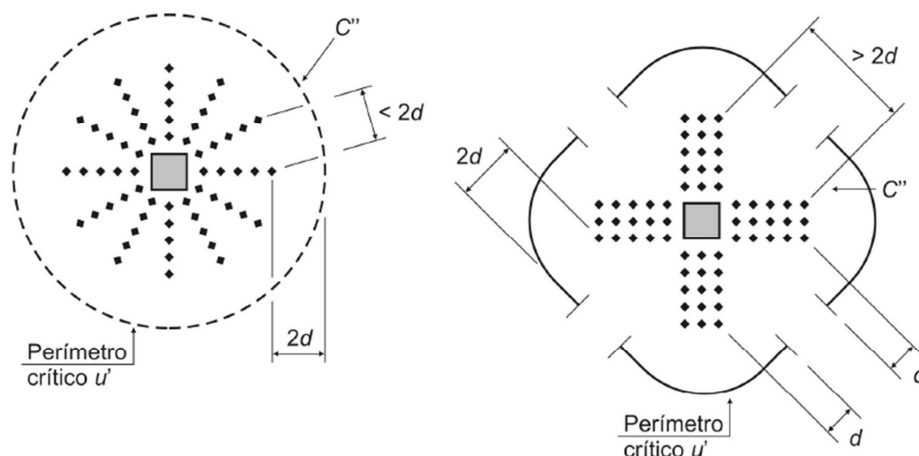


Figura 2.34 - Disposição da armadura de punção em planta e contorno da superfície crítica C'' (NBR 6118: 2007)

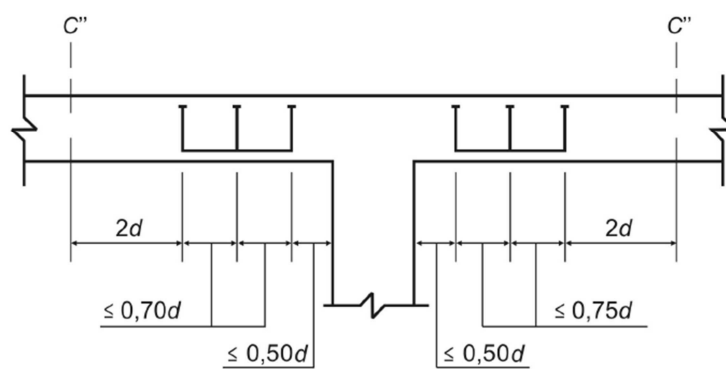


Figura 2.35 - Disposição da armadura de punção (NBR 6118: 2007)

No caso em que, além da força vertical, existe transferência de momento da laje para o pilar, o efeito de assimetria deve ser considerado de acordo com a expressão:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} + \frac{k \cdot M_{sd}}{W_p \cdot d} \quad (2.38)$$

onde:

k é o coeficiente que fornece a parcela de momento (M_{sd}) transmitida ao pilar por cisalhamento, que depende da relação C_1/C_2 .

O coeficiente K assume os valores indicados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Valores de K (NBR 6118:2007)

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

onde:

C_1 é a dimensão do pilar paralela à excentricidade da força;

C_2 é a dimensão do pilar perpendicular à excentricidade da força;

W_p é o módulo resistente da seção crítica e pode ser calculado desprezando a curvatura dos cantos do perímetro crítico, através da expressão:

$$W_p = \int_0^u |e|. dl \quad (2.39)$$

onde:

dl é o comprimento infinitesimal no perímetro crítico u ;

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

Para evitar uma ruptura por compressão diagonal do concreto na superfície crítica C (perímetro do pilar ou da área carregada multiplicado pela altura útil da laje) uma verificação deve ser feita para lajes com ou sem armadura de punção:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27. \alpha_v. f_{cd} \quad (2.40)$$

onde:

τ_{sd} é a tensão atuante ou de projeto;

τ_{Rd2} é a tensão resistente;

sendo:

$$\alpha_v = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (2.41)$$

Para evitar uma ruptura por punção da laje na superfície crítica C' (perímetro crítico u multiplicado pela altura útil da laje) em elementos estruturais ou trechos sem armadura de punção deve ser feita uma nova verificação:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13. \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right). (100. \rho. f_{ck})^{1/3} \quad (2.42)$$

sendo:

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \quad (2.43)$$

onde:

d é a altura útil da laje ao longo do contorno crítico C' da área de aplicação da força, em centímetros;

ρ é a taxa geométrica de armadura de flexão aderente (armadura não aderente deve ser desprezada);

ρ_x e ρ_y são as taxas de armadura nas duas direções ortogonais.

Para evitar uma ruptura por punção da laje na superfície crítica C' (perímetro crítico u multiplicado pela altura útil da laje) em elementos estruturais ou trechos com armadura de punção deve ser feita uma nova verificação:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \rho f_{ck})^{1/3} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha}{u \cdot d} \quad (2.44)$$

sendo:

$$s_r \leq 0,75 \cdot d \quad (2.45)$$

onde:

s_r é o espaçamento radial entre linhas de armadura de punção, não maior que $0,75 \cdot d$;

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

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

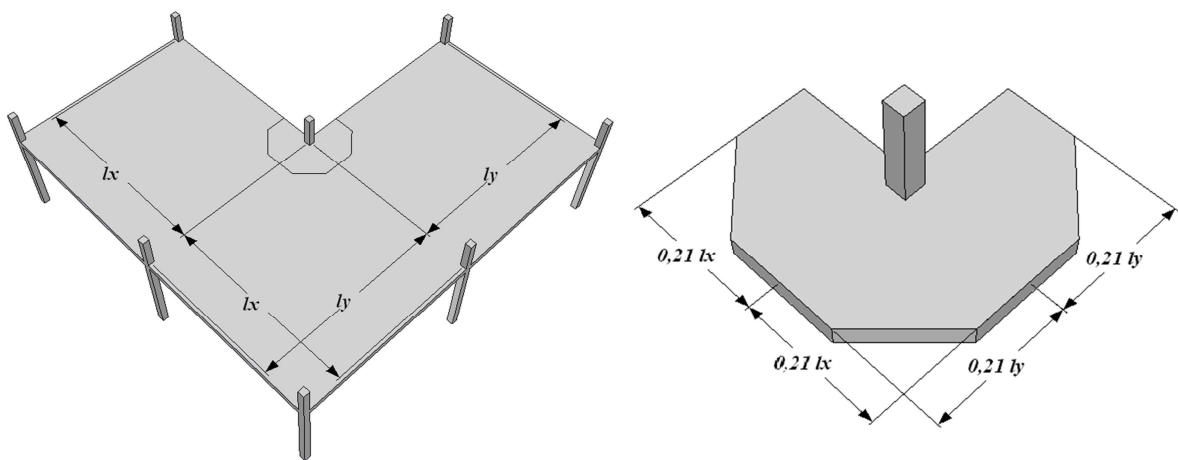
u é o perímetro crítico ou perímetro crítico reduzido no caso de pilares de borda ou canto.

f_{ywd} é a resistência de cálculo da armadura de punção, não maior do que 300 MPa para conectores ou 250 MPa para estribos (de aço CA50 ou CA60). Para lajes com espessura maior que 15 cm, esses valores podem ser aumentados conforme estabelece o item 19.4.2. da NBR 6118:2007.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A análise de um pavimento de lajes lisas em proporções reais até a ruptura em laboratório é uma atividade complexa que envolve custos elevados e requer infra-estrutura específica. Por questões de praticidade e economia, o estudo do fenômeno de punção tem sido normalmente realizado através de modelos locais.

O uso de modelos locais tem se mostrado eficiente para o estudo da maioria dos aspectos relevantes para o dimensionamento de lajes lisas. A Figura 3.1 apresenta a idealização dos modelos de ensaio desta pesquisa.



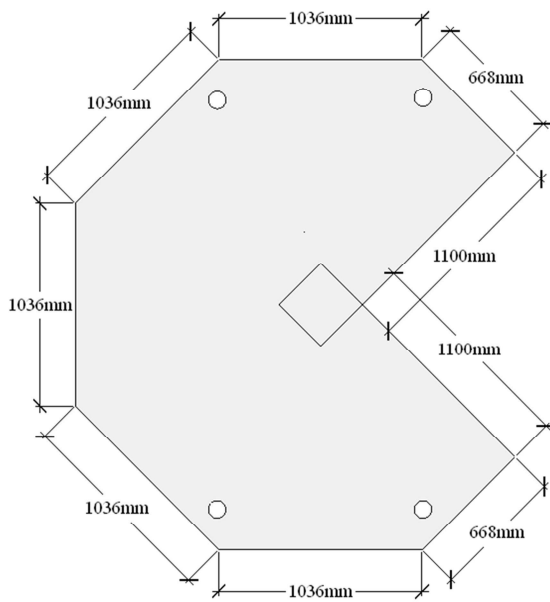
(a) Pavimento em lajes lisas

(b) Modelo com pilar de canto reentrante

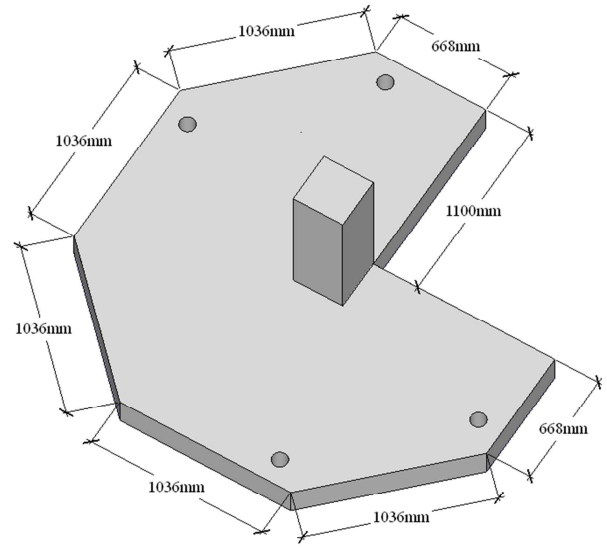
Figura 3.1 - Idealização dos modelos locais para análise experimental

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS

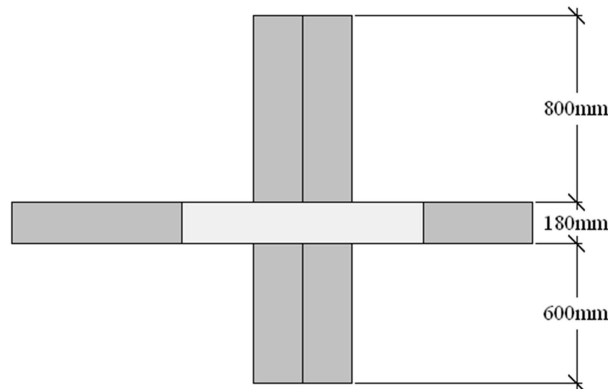
Os modelos ensaiados foram compostos por uma laje de concreto armado com espessura de 180 mm e um pilar de 1580 mm de altura, com seção transversal de 300 x 300 mm. A Figura 3.2 ilustra a geometria dos modelos. As dimensões foram definidas de modo a se adaptarem à estrutura de reação existente no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. A Tabela 3.1 apresenta as características dos modelos ensaiados.



(a) Vista superior



(b) Vista em perspectiva



(c) Vista lateral

Figura 3.2- Geometria dos modelos locais ensaiados

Tabela 3.1 - Características dos modelos

Modelo	e (mm)	Armadura de Cisalhamento		h (mm)
		Numero de Camadas de <i>studs</i>	Disposição	
LR01	525	-	-	181
LC02	350	3 camadas 10 ϕ 8mm	Radial	181
LC03	350	4 camadas 10 ϕ 10mm	Radial	180
LR04	350	-	-	180

Pilar de canto reentrante com seção transversal de 300 mm x 300 mm;
10 *studs* com 8 ou 10 mm de diâmetro por camada;
e = Excentricidade de carga.

3.2 ARMADURA DE FLEXÃO

A armadura de flexão dos modelos ensaiados foi composta por barras nervuradas de aço CA50 dobradas, dispostas na parte superior das lajes nas duas direções (armaduras principais). A armadura de flexão foi constituída de barras com diâmetro de 16 mm distribuídas a cada 95 mm em uma direção e a cada 105 mm na outra direção, sendo que em ambas as direções foram feitos ganchos em forma de “u”, que se constituíam da própria extremidade da barra conformada a frio com o objetivo de garantir a ancoragem das armaduras de flexão. O espaçamento foi idealizado de tal modo a se ter a mesma resistência à flexão em ambas as direções ortogonais, ocorrendo no entanto uma redistribuição das barras da armadura de flexão na região próxima ao pilar devido à ocorrência de armadura de cisalhamento nos modelos LC02 e LC03, mantendo-se, no entanto a quantidade total de barras em cada direção. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam um projeto geral das armaduras de flexão das lajes.

Em todos os modelos a armadura inferior das lajes foi composta por barras nervuradas de aço CA50 retas com diâmetro de 12,5 mm distribuídas alternadamente nas duas direções de forma a encontrar-se com a terminação do gancho de ancoragem da armadura superior. A armadura inferior (armadura de combate ao colapso progressivo) foi projetada visando-se evitar fissuras no transporte dos modelos e manter consolidada a ligação laje-pilar após a ruptura por punção.

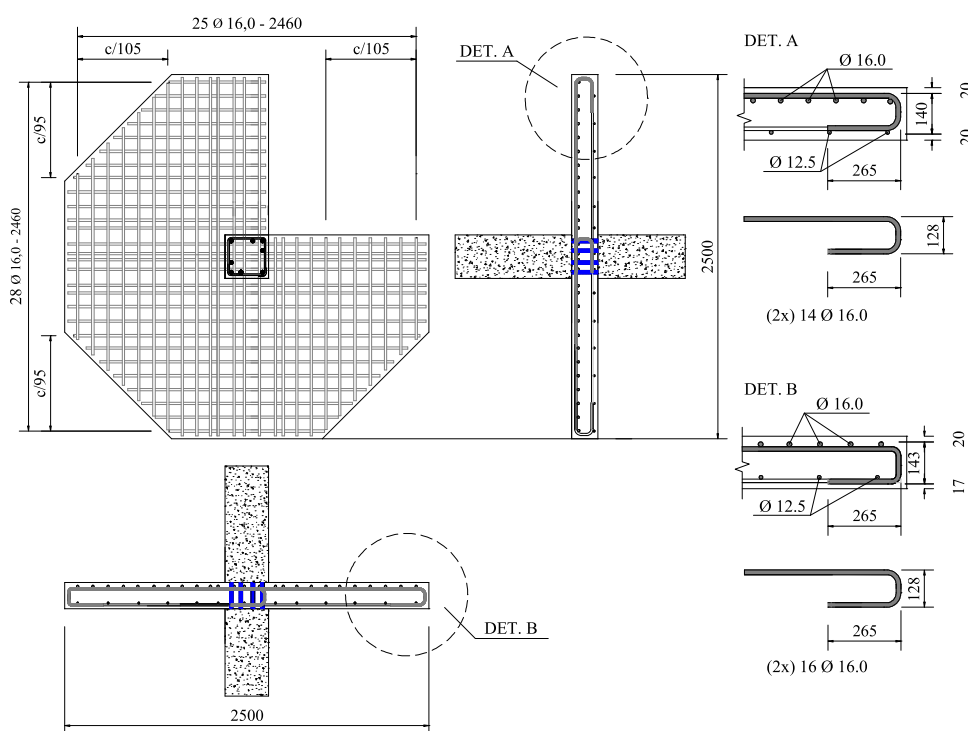


Figura 3.3 - Armadura superior de flexão dos modelos

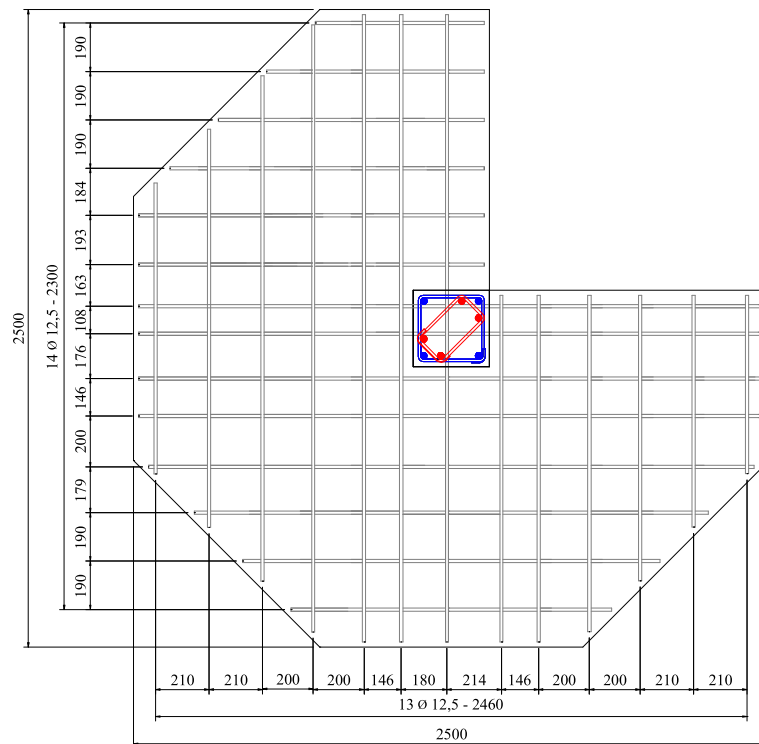


Figura 3.4 - Armadura inferior de flexão dos modelos

Foi adotado um cobrimento de 20 mm para as barras na face superior e de 17 mm para as armaduras na face inferior, tendo sido utilizadas 4 barras de aço de 8,0 mm de diâmetro dobradas (“caranguejos”) que serviram para apoiar a armadura de flexão superior à base das formas a fim de garantir esses espaçamentos. Os valores da taxa de armadura foram calculados segundo a Equação 3.1.

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \quad (3.1)$$

onde

A_s é a área de aço da armadura de flexão;

b_w é a largura da seção de concreto considerada para o cálculo, aqui considerada como

$$b_w = c + 2 \cdot (3 \cdot d);$$

d é a altura útil da laje;

c é o lado do pilar quadrado.

3.3 ARMADURA DE CISALHAMENTO

As armaduras de cisalhamento utilizadas nessa pesquisa foram os *double headed studs*. Armaduras que se caracterizam por possuírem como ancoragem duas placas circulares de aço, com diâmetro geralmente igual a $3 \cdot \phi_w$, sodadas ou moldadas nas extremidades das barras dos *studs*, onde ϕ_w é o diâmetro da barra do *stud*.

As armaduras utilizadas nessa pesquisa foram fabricadas por profissionais da própria Universidade de Brasília, no Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica, visto que este tipo de armadura ainda não é comercializada no Brasil. Para facilitar o processo de fabricação e baratear os custos, foram feitas algumas simplificações no projeto das armaduras. As extremidades de ancoragem dos *studs* comerciais são normalmente formadas utilizando-se o próprio aço da barra que compõe o *stud* e sua geometria resultante é um tronco de cone.

O processo de fabricação utilizado consistiu em fatiar barras de aço 1020 com diâmetro aproximadamente igual a $3 \cdot \phi_w$, mantendo-se uma espessura h_{st} constante de 10 mm. Depois de fatiadas, essas peças de aço foram furadas e as barras de aço que iriam formar o corpo do *stud* foram posicionadas. Posteriormente, utilizando-se um processo de soldagem MIG, as barras de aço foram unidas com as chapas de ancoragem. Os *studs* foram então unidos em grupos com dois ou no máximo três elementos através de barras chatas de aço e foram instalados após a montagem das armaduras de flexão. A Figura 3.5 apresenta detalhes das armaduras de cisalhamento utilizadas nesta pesquisa. Já na Figura 3.6 é possível observar detalhes das armaduras de cisalhamento utilizadas nos modelos LC02 e LC03.

Nos modelos LC02 e LC03, onde foram empregadas armaduras de cisalhamento, adotou-se 3 e 4 camadas de *studs* respectivamente, sempre com distribuição radial. A Figura 3.7 apresenta detalhes da distribuição dos *studs* nos modelos LC02 e LC03.

Para todos os modelos deste trabalho foi adotado um sistema de coordenadas locais com o intuito de referenciar o posicionamento dos pontos de instrumentação.

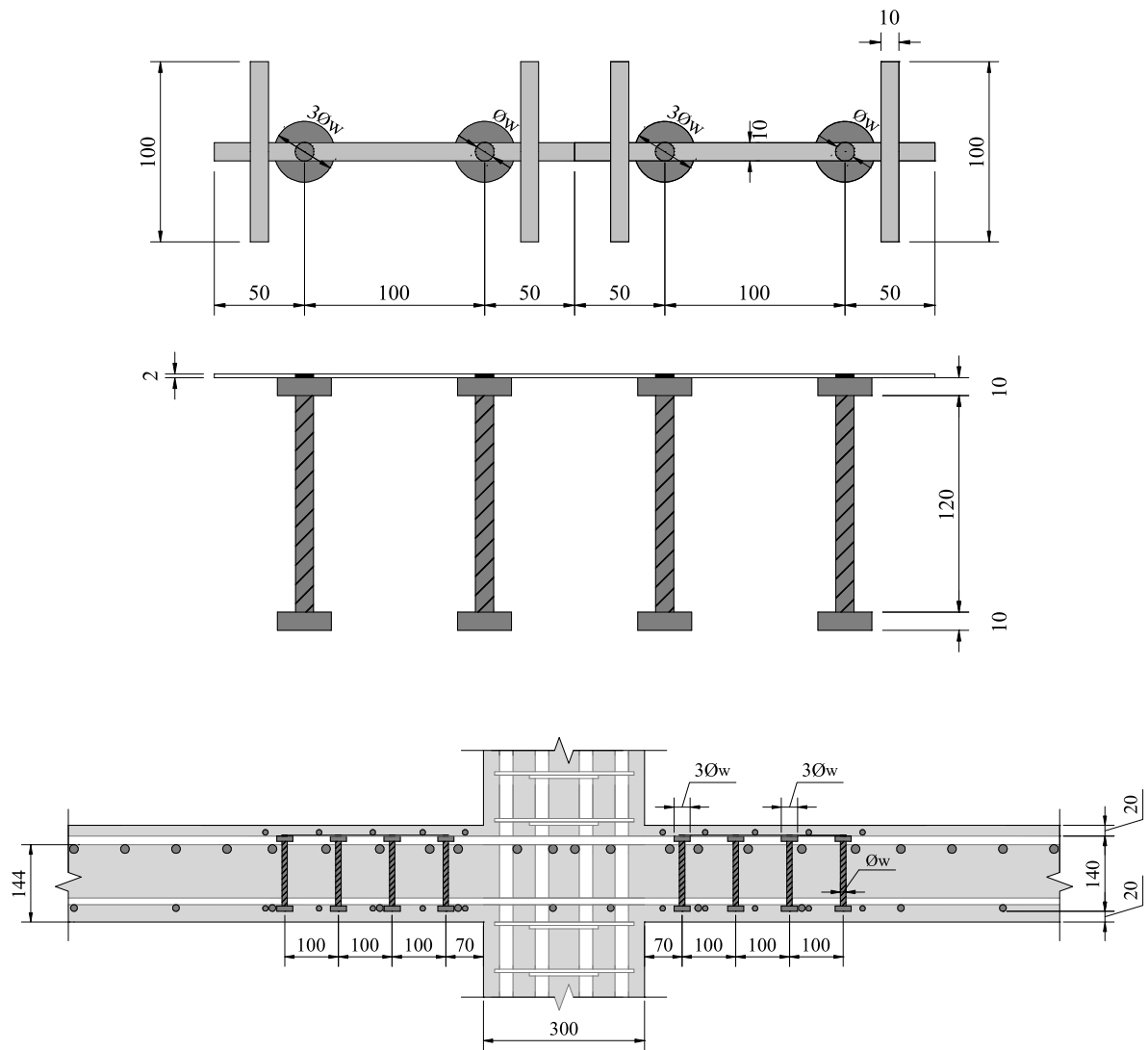
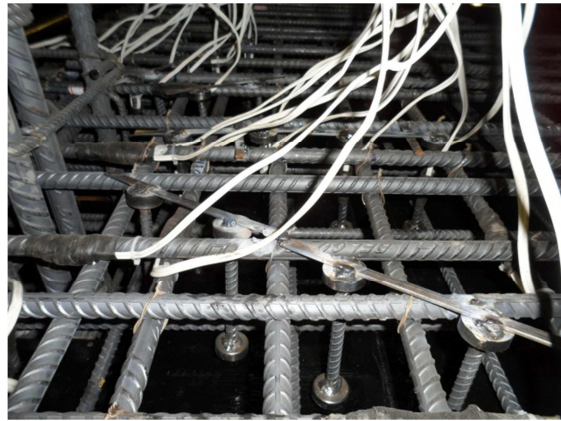
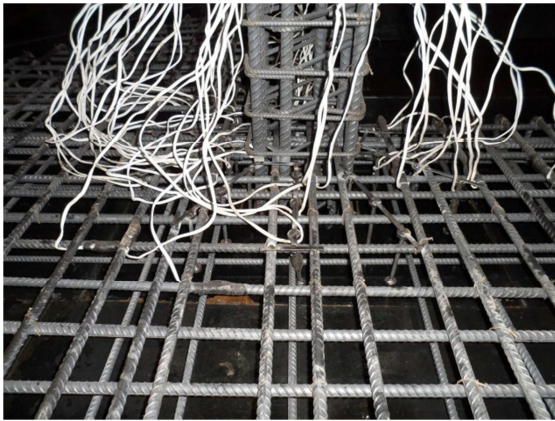


Figura 3.5 - Projeto das armaduras de cisalhamento



(a) *Studs* com trilhos



(b) Modelo LC02

(c) Modelo LC03

Figura 3.6- Detalhes das armaduras de cisalhamento

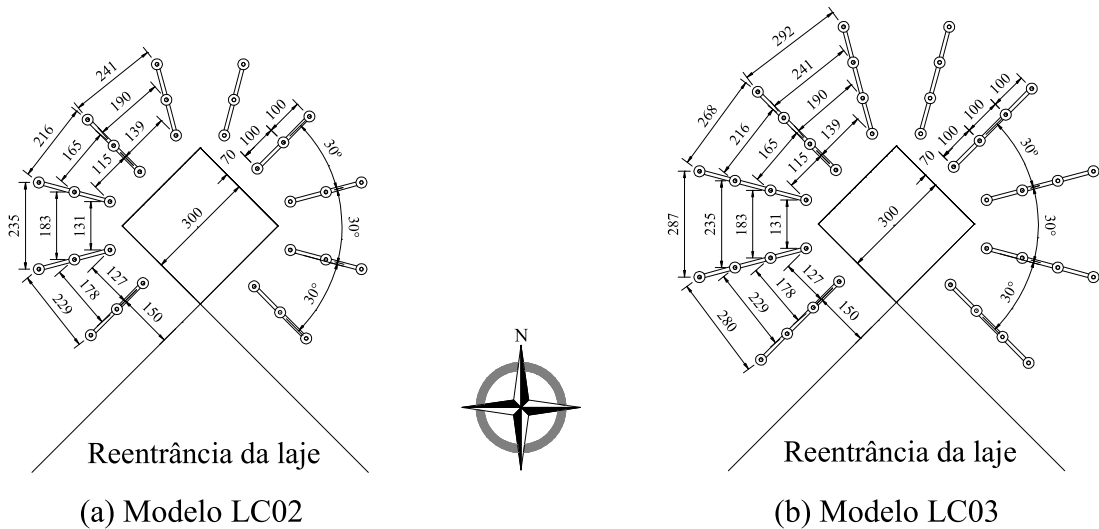


Figura 3.7 - Distribuição dos *studs* nos modelos LC02 e LC03

3.4 ARMADURA DOS PILARES

A armadura dos pilares foi composta por barras nervuradas de aço CA50 com 25 mm de diâmetro na direção longitudinal e por dois tipos de estribos de 10 mm de diâmetro espaçados a cada 100 mm, buscando-se assim evitar uma eventual ruptura do pilar perante os grandes esforços de flexão devido ao desbalanceamento do carregamento. Para a armadura longitudinal dos pilares foram utilizadas barras dobradas em “U” e em “L” para compor a armadura, a fim de se evitar a possibilidade de uma ruptura localizada por problemas de ancoragem. O dobramento destas barras não seguiu as recomendações da NBR 6118:2007, uma vez que isso inviabiliza o uso de barras de 25 mm de diâmetro nestes pilares. Os resultados mostraram que estas armaduras foram adequadas, pois mesmo sob elevados níveis de sollicitação, não foram observadas fissuras nos pilares dos modelos. Detalhes das armaduras utilizadas nos pilares podem ser observados na Figura 3.8.

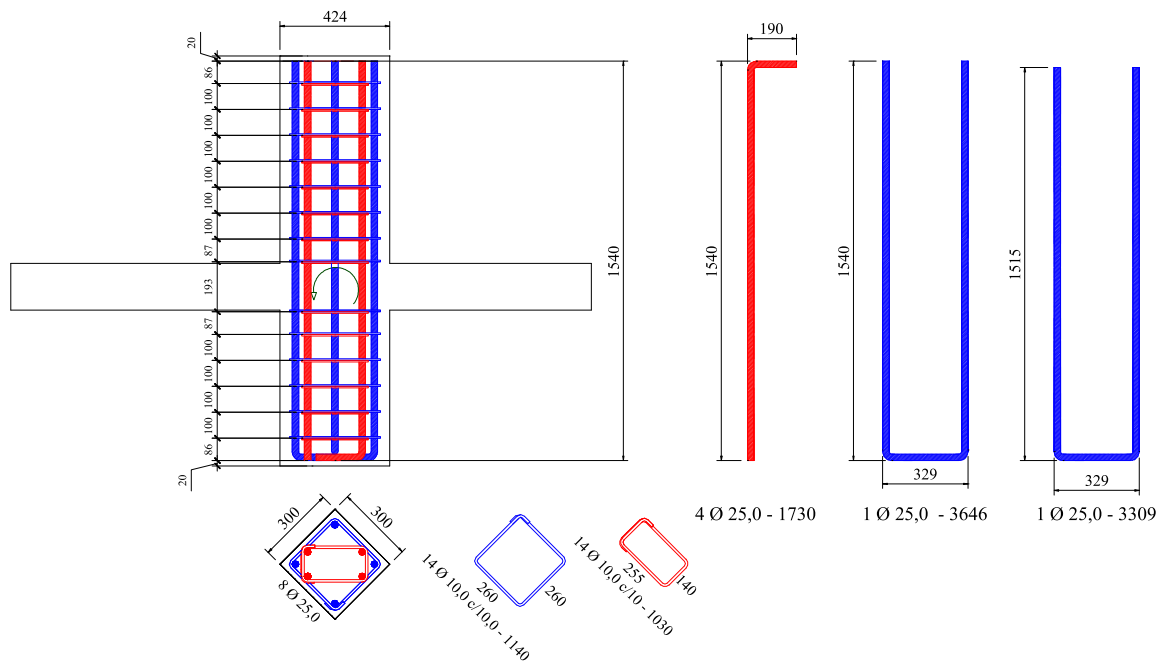


Figura 3.8 - Projeto de armadura dos pilares

3.5 FÔRMAS

As fôrmas utilizadas para os modelos de ligação laje-pilar foram feitas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília em estrutura metálica. Foram projetados moldes internos que foram dispostos em 4 fôrmas quadradas existentes, adaptando-as para a conformação dos modelos ensaiados. O molde interno compõe-se de quatro perfis metálicos dobrados com comprimentos de 1035 mm e 1100 mm e altura de 180 mm fixados através de chapas soldadas às chapas que compõe o fundo da forma. Para o fundo

de cada fôrma foram dispostas oito chapas de 6 mm de espessura com dimensões de 1000x1000 mm, soldadas e apoiadas sobre vigas metálicas, deixando-se um espaço de 1000x1000 mm no local de passagem do pilar. Sobre as chapas de fundo foram fixados os perfis usados para a obtenção da geometria requerida para a laje dos modelos. O Apêndice I apresenta o projeto das fôrmas metálicas.

As fôrmas dos pilares foram produzidas em madeira, em duas partes, uma para a parte inferior do pilar e outra para a parte superior, de modo a se adequarem à fôrma metálica. A Figura 3.9 apresenta detalhes das fôrmas construídas.



(a) Forma das Lajes



(b) Forma dos Pilares

Figura 3.9 - Detalhes das formas

3.6 INSTRUMENTAÇÃO

3.6.1 Deslocamentos Verticais

Os deslocamentos verticais dos modelos foram obtidos em 12 pontos da laje e 4 pontos envolta do pilar, nas proximidades da superfície inferior da laje, utilizando-se quinze transdutores de variação de deslocamento linear (LVDTs) fabricados pela empresa HBM e um potenciômetro fabricado pela empresa GEFTRAN. Os LVDTs foram posicionados abaixo da laje, em contato com a superfície inferior, em pontos localizados em eixos que faziam ângulos de 45 ou 90 graus com as faces do pilar de cada modelo. O potenciômetro foi posicionado na parte superior da laje em um ponto sobre o eixo que passa pelos vértices do pilar e que é ortogonal ao eixo de simetria dos modelos. Quatro LVDTs foram utilizados para monitoramento dos deslocamentos verticais do pilar, próximo à laje. Para isso foi utilizado um artefato composto por duas cantoneiras de abas iguais com 50 mm de aba, interligadas por meio de duas barras rosqueadas e quatro porcas sextavadas, que foi

posicionado 30 mm abaixo da superfície inferior da laje. Os pontos monitorados foram sempre os mesmos para permitir a comparação dos resultados dos diferentes modelos. A Figura 3.10 apresenta os pontos onde foram monitorados os deslocamentos verticais nos modelos, a Figura 3.11 e a Figura 3.12 mostram detalhes dos LVDTs e do potenciômetro utilizados durante os ensaios.

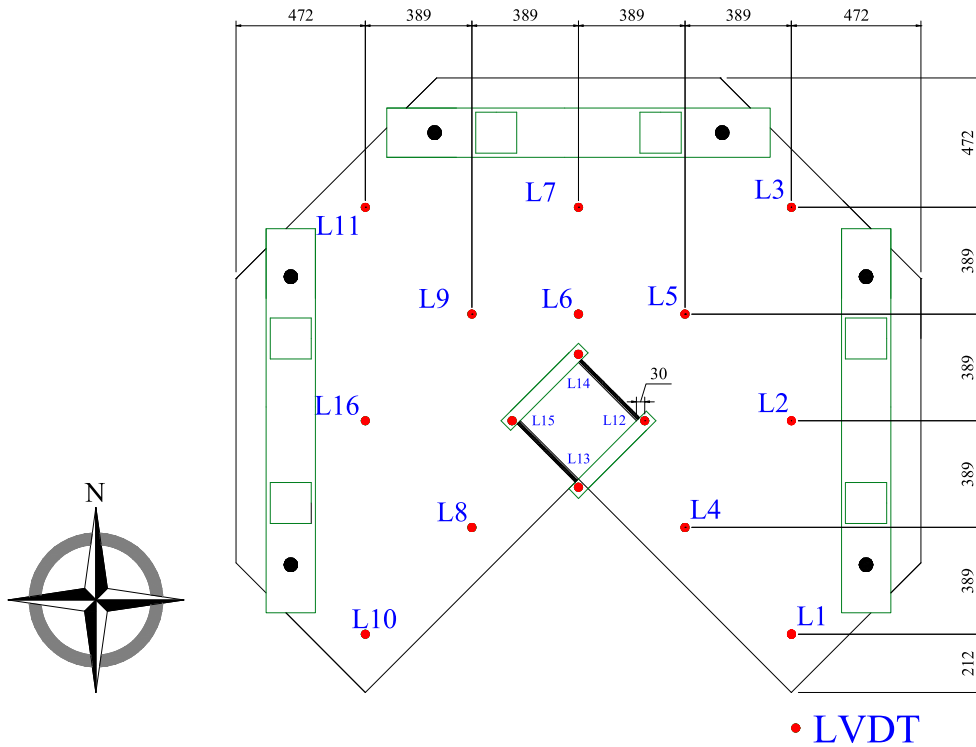
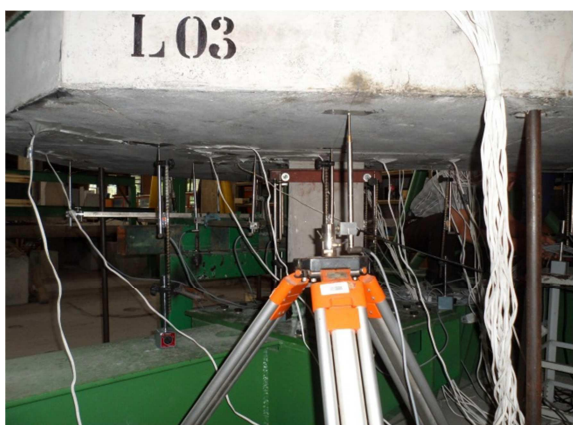


Figura 3.10 - Posicionamento dos LVDTs nos modelos



(a) Sistema de suporte dos LVDTs



(b) Detalhe dos LVDTs

Figura 3.11- LVDTs utilizados para medir os deslocamentos verticais



(a) Sistema de suporte do Potenciômetro

(b) Detalhes do Potenciômetro

Figura 3.12 - Potenciômetro utilizado para medir deslocamento vertical do ponto L16

Os deslocamentos verticais das bordas das lajes também foram monitorados em duas posições. Para isso, foram utilizadas duas régua graduadas em milímetros posicionadas nas extremidades dos modelos e perpendicularmente sobre os eixos que interceptam os vértices dos pilares dos modelos. A Figura 3.13 mostra detalhes do projeto de posicionamento das régua durante os ensaios e a Figura 3.14 apresenta o posicionamento das régua no modelo LR04.

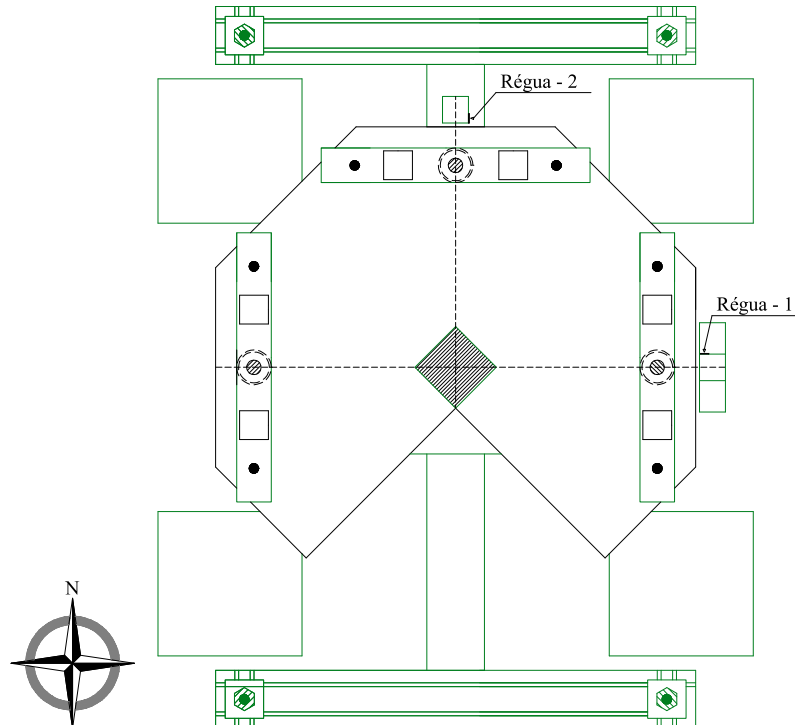


Figura 3.13 - Projeto de posicionamento das régua

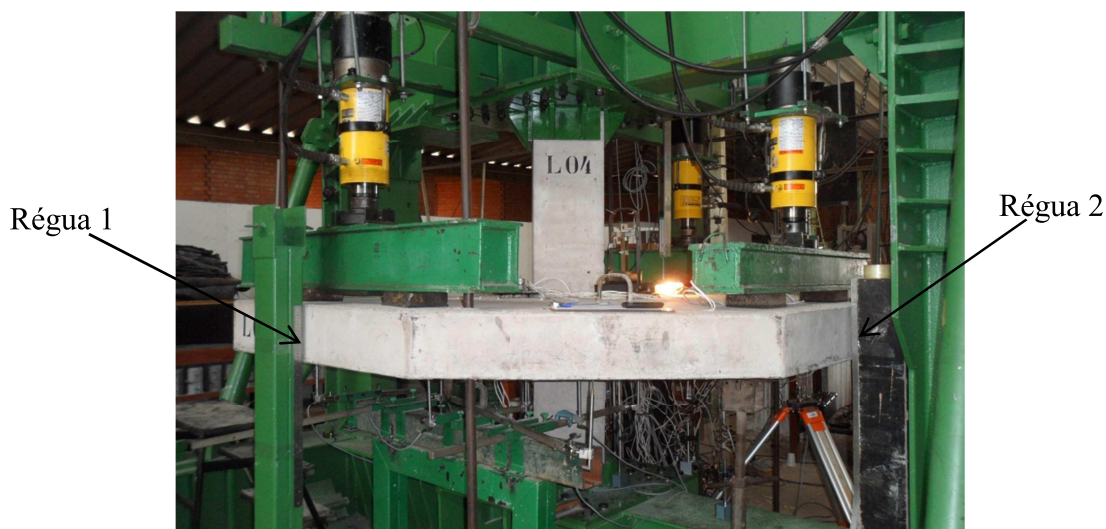


Figura 3.14 - Posicionamento das régua no modelo LR04

3.6.2 Deformação nas Armaduras e na superfície do Concreto

Foram monitoradas as deformações nas armaduras de flexão, cisalhamento e também na superfície do concreto, a fim de acompanhar o comportamento das lajes durante todas as fases de carregamento. A medição destas deformações foi feita utilizando-se extensômetros elétricos de resistência. Nas armaduras de flexão e de cisalhamento foram utilizados extensômetros do tipo KFG-5-120-C1-11, medindo (9,4x2,8) mm, fabricados pela empresa *Kyowa Electronic Instruments*. Foram posicionados dois extensômetros em cada seção das barras de flexão superiores próximas ao pilar, em posições diametralmente opostas, buscando eliminar possíveis efeitos de flexão localizada nas barras e um extensômetro para cada ponto das demais barras distribuídas que compõem a armadura de flexão superior e inferior. Para as barras com dois extensômetros por seção, a deformação apresentada para cada seção consiste da média aritmética dos resultados registrados nos pares de extensômetros.

O principal objetivo era determinar com segurança a que proximidade de uma ruptura por flexão as lajes chegaram durante os ensaios. Para isso, foi necessário acompanhar, ao longo da seção, se estas armaduras atingiram a tensão de escoamento, observando-se a intensidade das deformações nas armaduras nas duas direções da laje.

As barras e o concreto foram devidamente preparados para a fixação dos extensômetros. As barras foram limadas e lixadas com o objetivo de eliminar as saliências na região de fixação, tendo-se o cuidado de não danificar a seção nominal.

Com a superfície lisa foi feita limpeza com álcool isopropílico objetivando-se retirar todos os resíduos presentes na superfície de instrumentação das barras. Então os extensômetros foram colados um a um com adesivo de cianoacrilato, procurando-se dispô-los diametralmente opostos e na mesma seção da barra.

Após a fixação dos extensômetros, cada terminal (ponta) foi soldado à ponta de um cordão flexível paralelo, que por sua vez foi preso à barra por meio de braçadeiras plásticas. Depois de soldados os terminais, a região da solda foi protegida contra atrito e choques mecânicos por uma camada de resina epóxi que também funcionou como isolamento elétrico. Esse conjunto foi envolvido por uma camada de silicone para proteção mecânica e em seguida realizou-se a proteção com fita isolante de auto fusão. Na Figura 3.15 são apresentadas as etapas do procedimento de colagem dos extensômetros nas barras de aço.



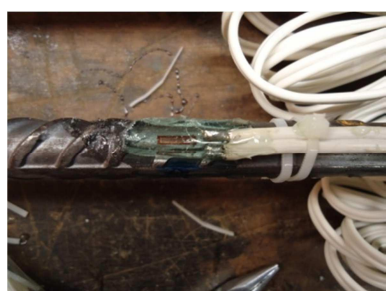
(a) Limpeza da superfície lixada



(b) Colagem dos extensômetros



(c) Soldagem dos terminais dos extensômetros



(d) Proteção e isolamento com resina epóxi



(e) Proteção mecânica com silicone



(f) Proteção mecânica com fita isolante de auto-fusão

Figura 3.15 - Procedimento de colagem dos extensômetros

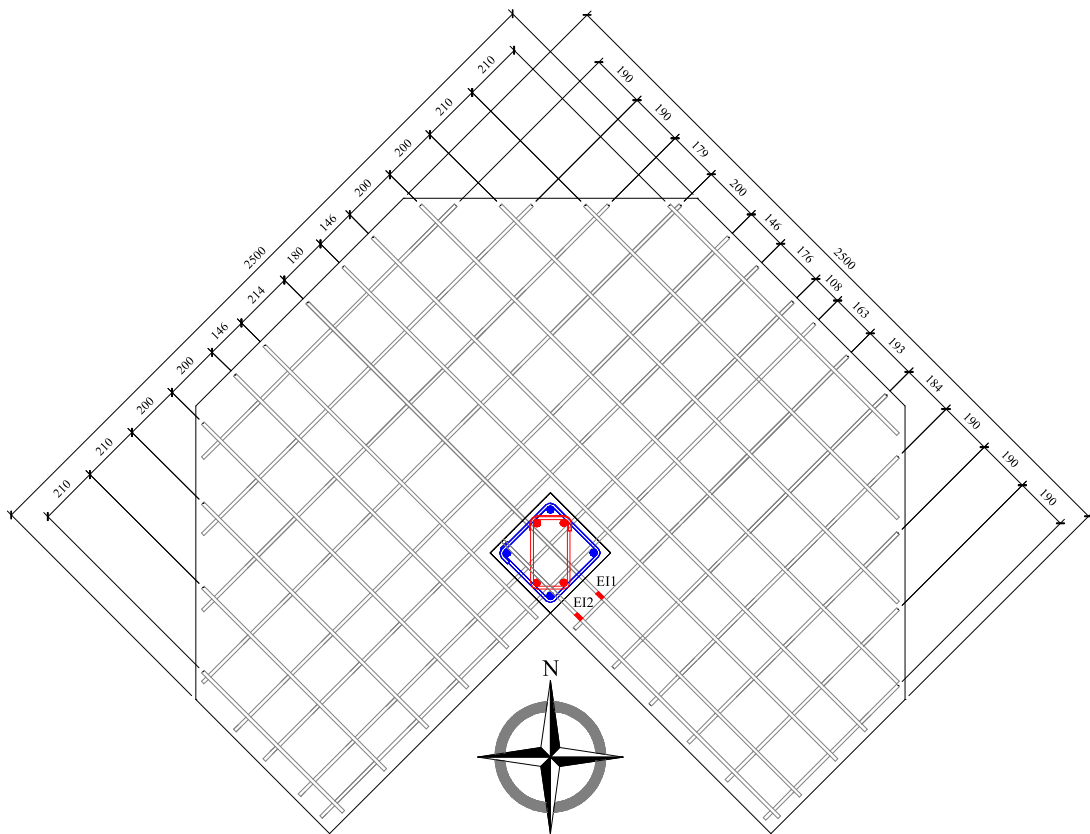
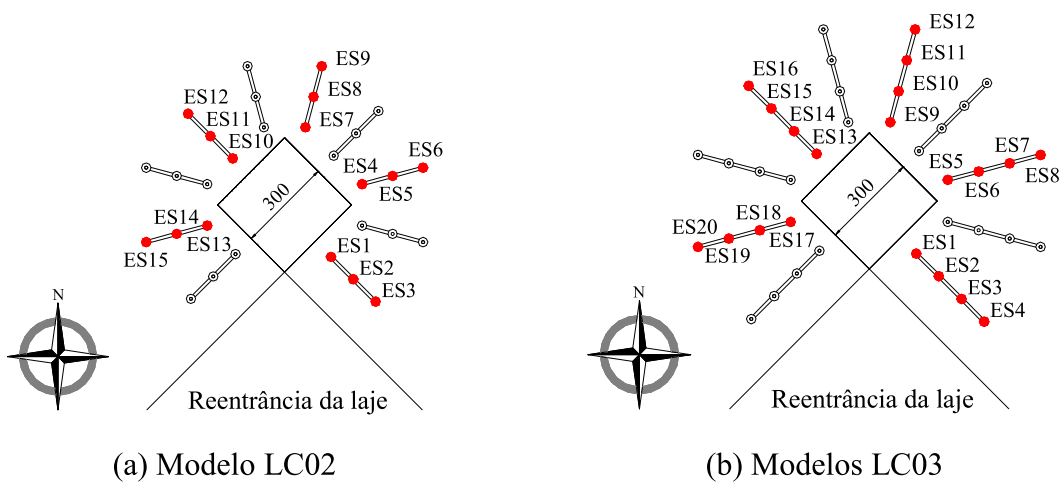


Figura 3.17 - Posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão inferior



(a) Modelo LC02

(b) Modelos LC03

Figura 3.18 - Posicionamento dos extensômetros nos *studs*

As deformações na superfície inferior das lajes também foram monitoradas, a fim de se verificar a possibilidade de ruptura por flexão, porém causada por esmagamento do concreto. Para tal, foram utilizados extensômetros do tipo KC-70-120-A1-11 posicionados em nove pontos orientados segundo dois eixos das lajes. Os extensômetros mais próximos do pilar foram posicionados a 25 mm do perímetro deste. A Figura 3.19 apresenta detalhes da disposição dos extensômetros na superfície inferior das lajes.

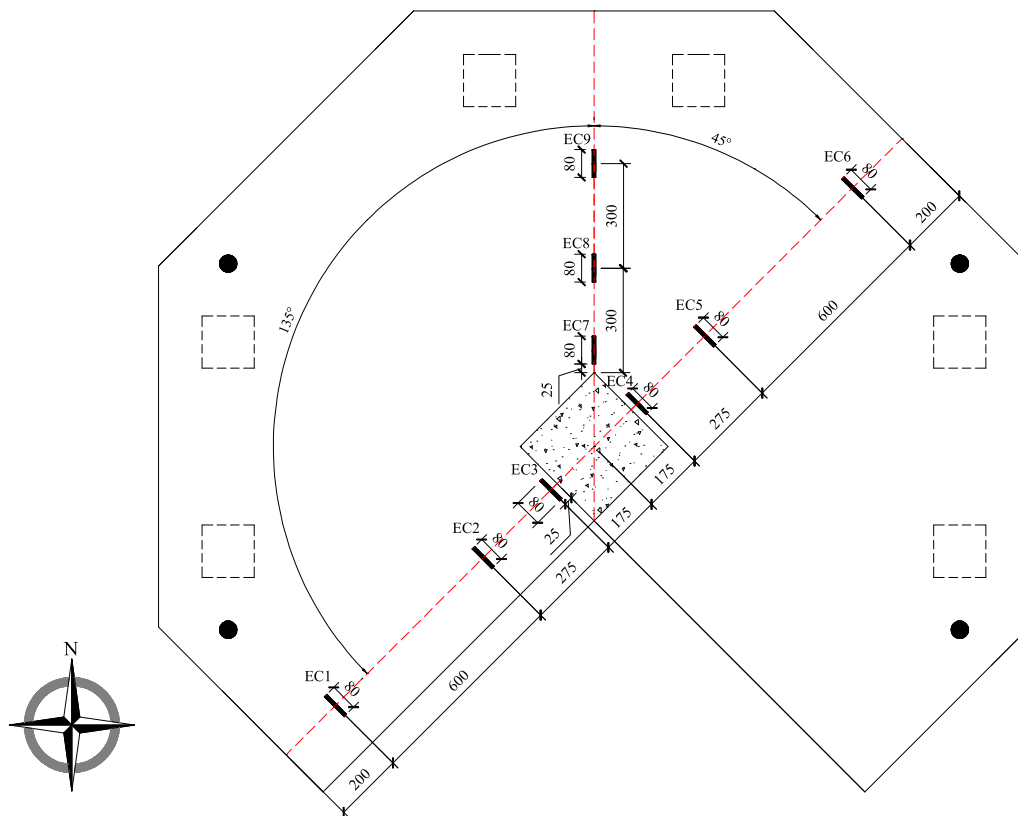


Figura 3.19 - Posicionamento dos extensômetros na superfície do concreto

3.6.3 Rotação da Laje

A rotação das lajes dos modelos foi monitorada através de dois inclinômetros, um com nível de bolha e outro de pêndulo construído na Universidade de Brasília. Os dois inclinômetros foram posicionados nas proximidades dos pilares dos modelos, na superfície superior da laje. Foram monitoradas as rotações das lajes no eixo de simetria dos modelos e no eixo ortogonal ao de simetria. A Figura 3.20 mostra os inclinômetros utilizados nessa pesquisa e a Figura 3.21 apresenta detalhes do posicionamento nos modelos.



Figura 3.20 - Detalhe dos inclinômetros

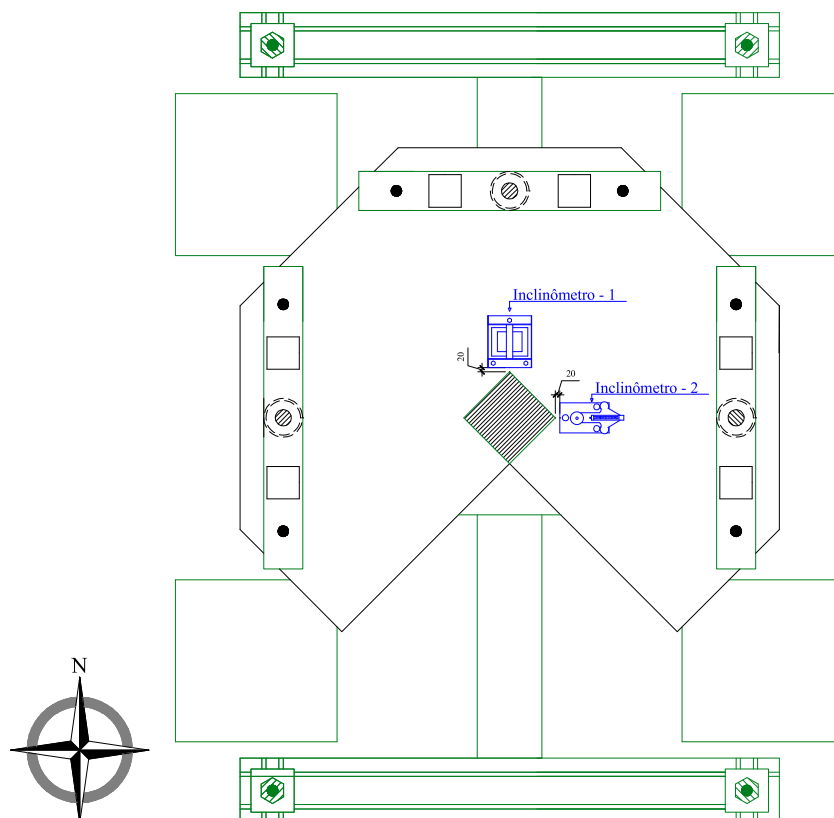


Figura 3.21 - Posicionamento dos inclinômetros (dimensões em milímetro)

Os resultados de deslocamento vertical obtidos com as régulas posicionadas nas bordas das lajes dos modelos também foram utilizados para obtenção das rotações nas extremidades dos modelos nas mesmas direções de posicionamento dos inclinômetros.

3.7 SISTEMA DE ENSAIO

Várias alternativas foram estudadas até que se chegasse ao sistema de ensaio desenvolvido para esta pesquisa. Devido às limitações impostas pela laje de reação do laboratório, verificou-se que a maneira mais eficiente e econômica de conduzir os ensaios dos modelos seria utilizando o pórtico de reação existente. Foi necessário ainda adaptar neste pórtico um dispositivo para restringir a translação dos segmentos de pilar, conforme apresentado no Apêndice J.

O sistema de ensaio utilizado nesta pesquisa foi composto pelo pórtico de reação existente no Laboratório de Estruturas, por 3 atuadores hidráulicos da marca ENERPAC, todos com capacidade de 1000 kN; 3 conjuntos de células de carga e indicadores digitais fabricados pela *Kratos Equipamentos Industriais Ltda.*, com capacidade de 1000 kN e com precisão

de 1 kN; 3 rótulas de aço, posicionadas entre o êmbolo dos atuadores hidráulicos e as vigas metálicas, com o objetivo de compensar a rotação provocada pelo deslocamento da borda da laje devido a aplicação das cargas; 2 bombas hidráulicas elétricas ENERPAC para acionamento dos atuadores hidráulicos; 3 vigas metálicas rígidas para distribuição do carregamento aplicado pelos cilindros hidráulicos em 2 chapas de aço, totalizando 6 pontos de aplicação de carga; 4 tirantes de aço com $\phi = 32 \text{ mm}$, usados como dispositivos de reação para os carregamentos aplicados pelos atuadores na direção L-O do sistema de ensaios; conexões metálicas de aço acopladas ao pórtico de reação do laboratório para a restrição da translação dos segmentos de pilar. Na Figura 3.22 é possível observar detalhes da configuração de ensaio dos modelos e na Figura 3.23 são apresentados equipamentos e acessórios utilizados durante os ensaios dos modelos.

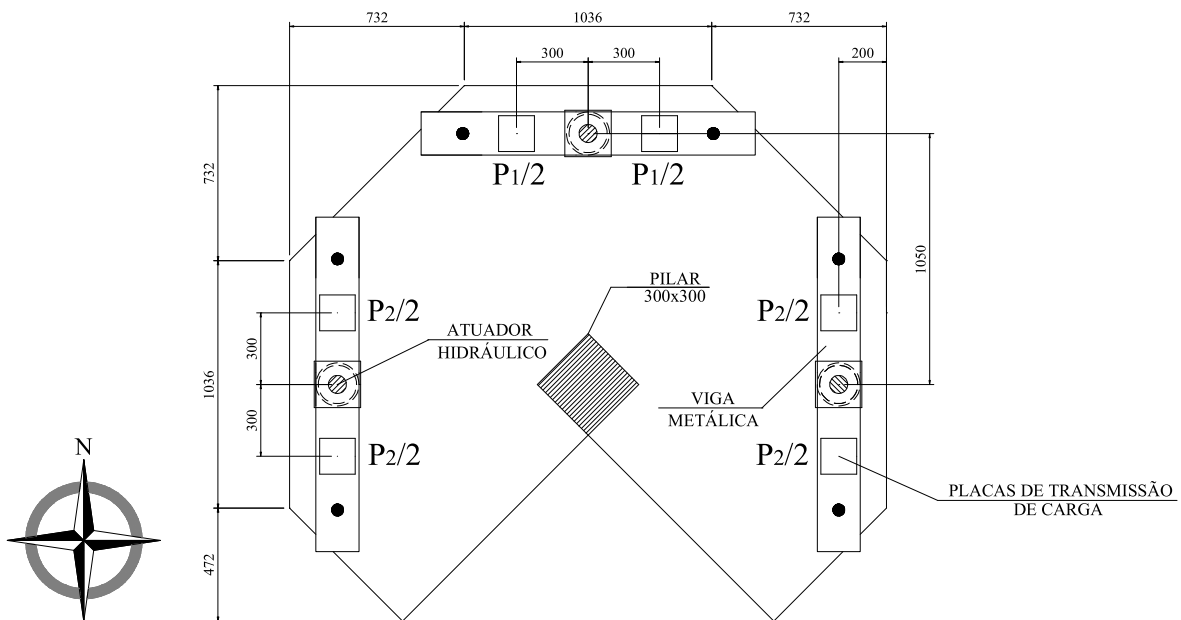


Figura 3.22 - Sistema de ensaio: vista superior



(a) Atuador hidráulico e célula de Carga



(b) Indicadores das células de carga



(c) Bombas hidráulicas



(d) Viga metálica de distribuição

Figura 3.23 - Detalhes do Sistema de Ensaio

O sistema utilizado para aquisição de dados dos LVDTs e dos extensômetros nas armaduras de flexão, cisalhamento e na superfície de concreto na face inferior da laje, foi composto por 10 módulos do sistema de aquisição *Spider 8*, modelos SR30 e SR55, fabricados pela empresa HBM, interligados em cascata e ligados a 2 computadores e módulos de aquisição *ADS2000*, cada um ligado a um computador. O software de aquisição de dados utilizado para os módulos *Spider 8* foi o CATMAN versão 4.5 e para os módulos *ADS2000* utilizou-se o software de aquisição de dados AqDados 7. A Figura 3.24 e a Figura 3.25 mostram vista superior e vista lateral que compõem o projeto desenvolvido para o sistema de ensaio dos modelos da pesquisa. Na Figura 3.26 e na Figura 3.27 apresenta-se uma vista frontal e uma vista em 3D do projeto. Na Figura 3.28 é possível ver como ficou este sistema no laboratório durante o ensaio do modelo LC03. Detalhes do sistema de aquisição de dados podem ser vistos na Figura 3.29.

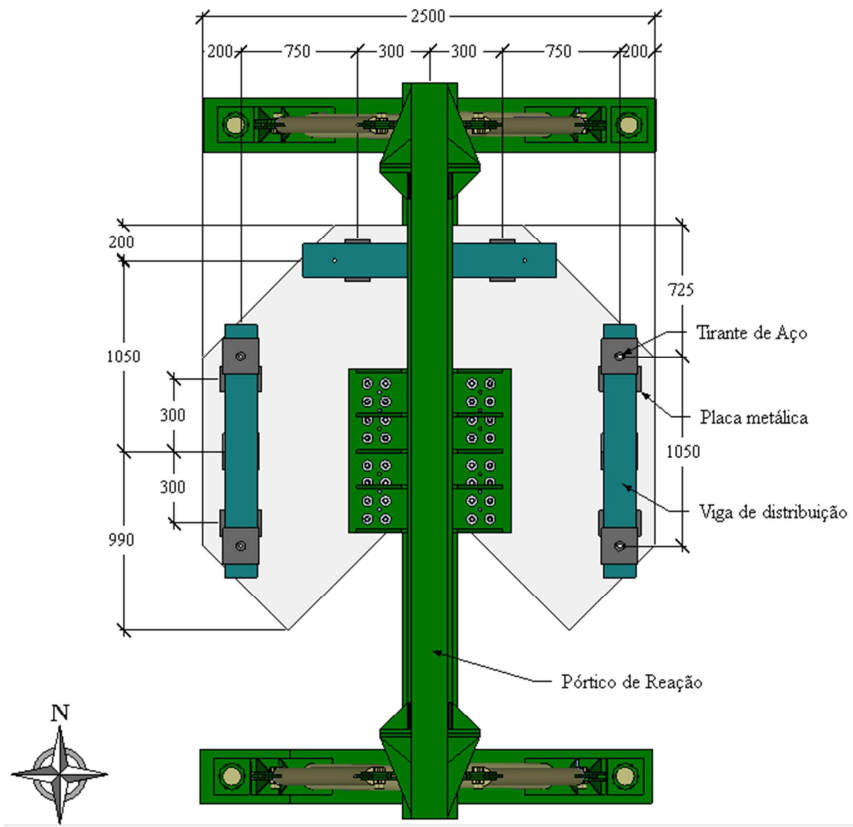


Figura 3.24 - Sistema de ensaio: vista superior

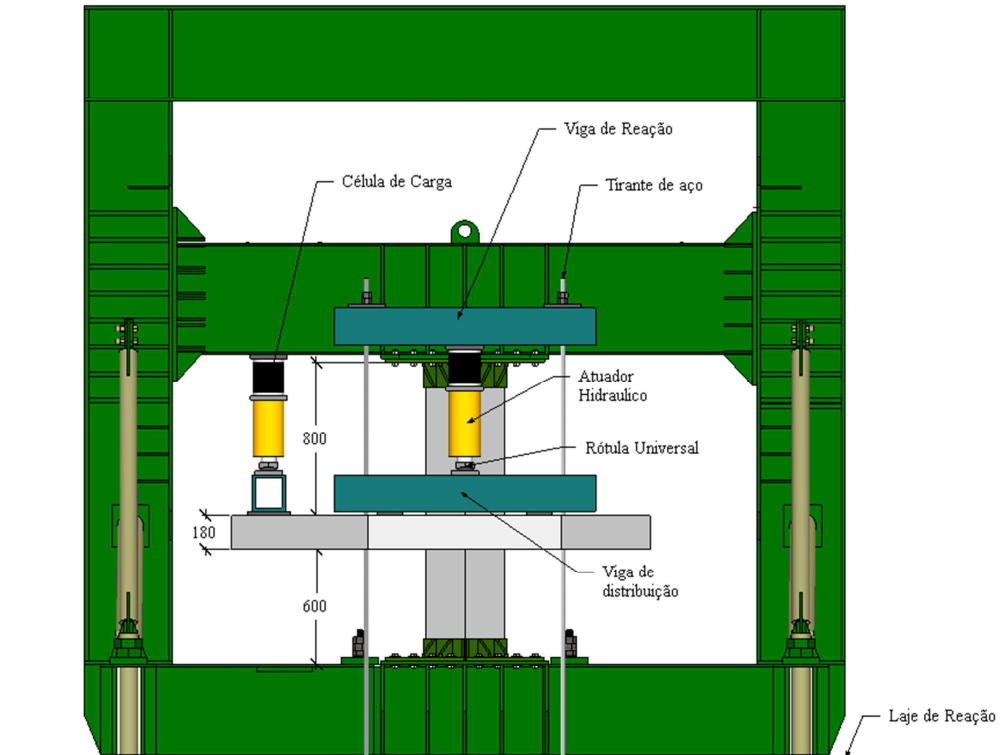


Figura 3.25 - Sistema de ensaio: vista lateral

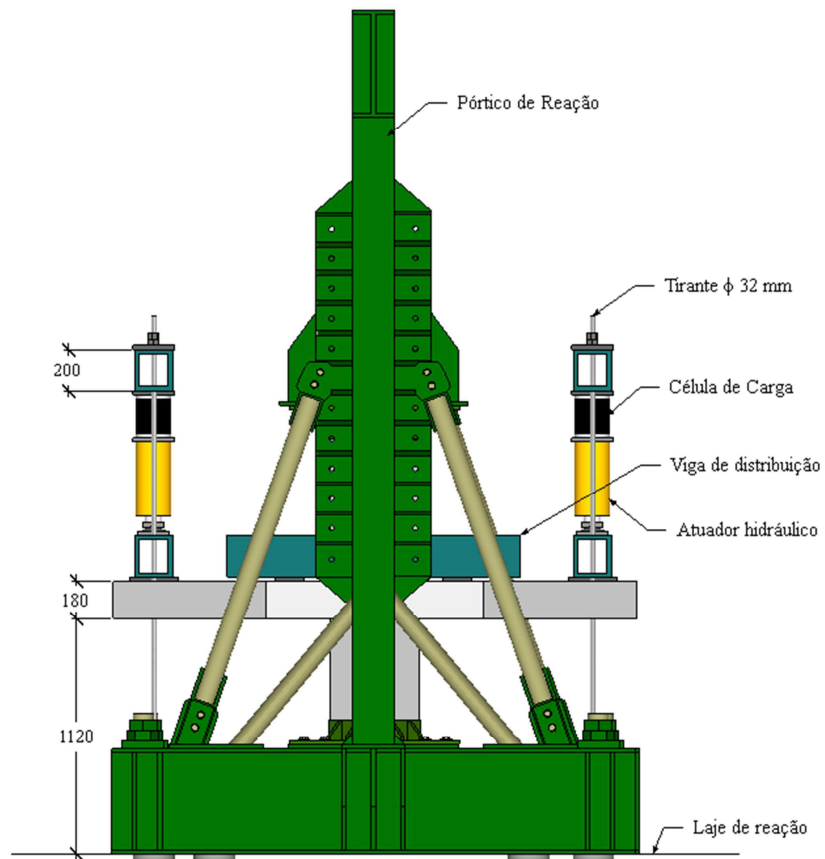


Figura 3.26 - Sistema de ensaio: vista frontal

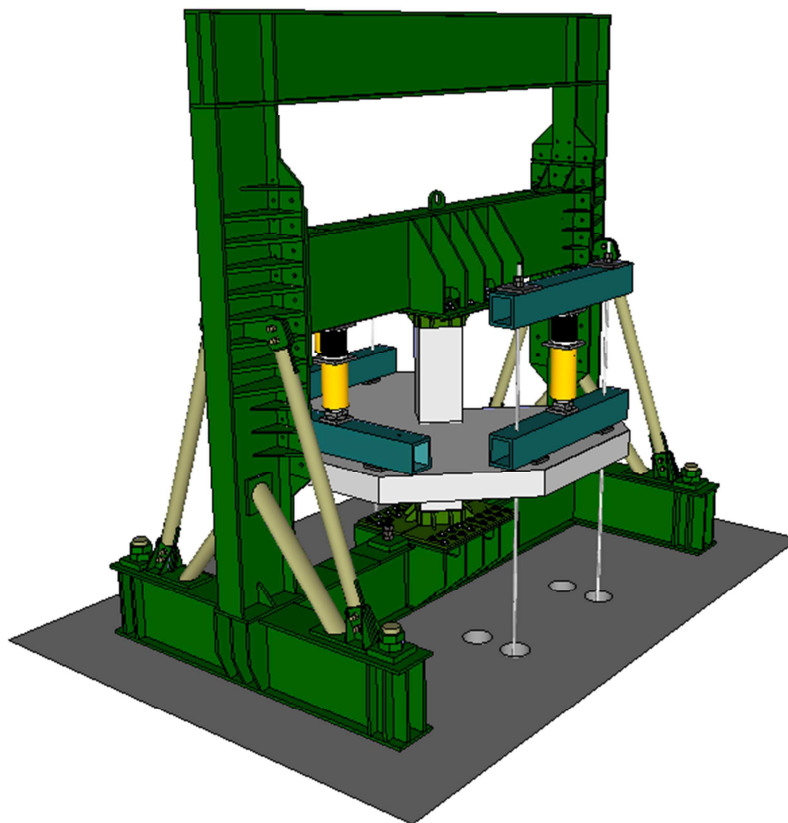


Figura 3.27 - Sistema de ensaio: vista 3D



Figura 3.28 - Foto do sistema de ensaio da laje LC03



(a) Módulos *Spider 8*



(b) Módulos *ADS2000*



(c) Vista do sistema interligado

Figura 3.29 - Sistema de aquisição de dados

3.8 MONTAGEM DOS ENSAIOS

Para facilitar a etapa de montagem dos ensaios e também primando pela segurança ao longo dos ensaios, foram utilizados alguns dispositivos para suporte de equipamentos como atuadores hidráulicos e células de carga. O atuador hidráulico e sua respectiva célula de carga na direção N-S ficaram permanentemente fixados na viga vazada do pórtico de reação. Os atuadores e células localizados na direção L-O também foram fixados em vigas metálicas que eram retiradas para o posicionamento dos modelos no pórtico de reação. Para inserir e retirar os modelos de ensaio no pórtico de reação foram utilizados 2 pórticos metálicos e 2 tubos de aço, utilizados para permitir que os modelos rolassem para dentro e para fora do pórtico de ensaio.

Antes dos modelos serem posicionados e fixados dentro do pórtico de ensaios foram locadas e posicionadas, sobre a laje de cada modelo, as 6 chapas metálicas utilizadas para distribuir o carregamento na laje. Acima destas chapas foram posicionadas 3 vigas metálicas, com a função de distribuir para as chapas o carregamento aplicado pelos atuadores hidráulicos, e 3 rótulas universais, usadas para compensar a rotação das vigas de distribuição devida ao deslocamento da laje. Após estes procedimentos executou-se o transporte e fixação dos modelos no pórtico de reação. Após fixados os modelos no pórtico foram posicionados os 4 tirantes de aço, sendo estes travados em suas extremidades com 2 chapas de aço e porcas sextavadas. O travamento dos tirantes foi feito de forma a deixá-los com uma folga suficiente apenas para permitir que, quando acionados os atuadores hidráulicos, o sistema de aplicação de carga se erguesse até se soltar dos braços metálicos que serviram apenas de suporte para as vigas de reação superiores, localizadas na direção L-O. O peso dos equipamentos apoiados sobre a laje foi estimado em 5,5 kN.

O carregamento foi aplicado na direção vertical, no sentido de cima para baixo, em passos de carga que variaram de acordo com o modelo ensaiado, para os modelos com armadura de cisalhamento e no modelo LR04 foram adotados passos de carga de 15 kN e para o modelo LR01 foram aplicados passos de carga de 16 kN.

3.9 MOLDAGEM E CURA

Os modelos foram concretados monoliticamente com a utilização de concreto usinado com resistência estimada de projeto de 40 MPa. A Figura 3.30 apresenta detalhes do processo de concretagem dos modelos.



Figura 3.30 - Concretagem dos Modelos

Foram feitos testes de abatimento de tronco de cone para a verificação da consistência do concreto, onde se obteve o resultado de 12,0 cm de abatimento em relação ao cone de Abrams.

Durante a concretagem foram moldados, além dos modelos, 36 corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, os quais foram utilizados para a determinação das propriedades mecânicas do concreto (resistência a tração, resistência a compressão e módulo de elasticidade do concreto).

Para todos os modelos foram concretados inicialmente a parte inferior do pilar, seguido da concretagem da laje. Depois se colocou a fôrma da parte superior do pilar e por ultimo a parte superior do pilar foi concretada. Após concretados os modelos receberam acabamento na superfície superior das lajes e na superfície superior do pilar.

Cerca de 5 horas após o término da concretagem iniciou-se o processo de cura dos modelos e dos corpos de prova. O processo adotado tanto para os modelos como para os corpos de prova foi o mesmo e constitui de colocar tecidos de algodão sobre toda a superfície de concreto que estivesse diretamente exposta, os quais foram molhados inicialmente a cada 3 horas nos 3 primeiros dias de cura e 2 vezes por dia durante outros 4 dias. Logo após a

molhagem das lajes e dos corpos de prova, estes elementos foram cobertos por uma lona plástica, que teve a função de auxiliar a retenção da umidade em torno das peças de concreto. A Figura 3.31 apresenta particularidades do processo de cura.



Figura 3.31 - Cura dos modelos

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos através da realização da série de ensaios descrita no Capítulo 3. São apresentados: deslocamentos verticais; deformações na superfície do concreto; deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento; mapeamento das fissuras de flexão visíveis durante os ensaios; e a inclinação e localização da superfície de ruptura de cada laje. Apresentam-se ainda as cargas de ruptura observadas ao final de cada ensaio, as quais em conjunto com os resultados descritos acima possibilitam a definição do modo de ruptura de cada laje. As cargas e os modos de ruptura observados em cada ensaio serão utilizados no Capítulo 5 para avaliar a eficiência dos métodos teóricos apresentados pela NBR 6118:2007, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2008.

4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

4.1.1 Concreto

Os modelos e os corpos de prova foram concretados no mesmo dia, onde foram moldados 36 corpos de prova cilíndricos medindo 100 mm x 200 mm que foram utilizados nos ensaios de caracterização do concreto quanto a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade tangente inicial.

Os ensaios de compressão simples seguiram as recomendações da norma NBR 5739:1994, os ensaios de compressão diametral atenderam as exigências da NBR 7222:1994 e para os ensaios de determinação do módulo de elasticidade tangente inicial utilizou-se a norma NBR 8522:2003.

Todos os corpos de prova foram ensaiados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM) após 113 dias da realização da concretagem dos modelos e dos corpos de prova. Para a determinação das resistências à compressão ($f_{c,m}$) e à tração ($f_{ct,m}$) foram ensaiados 12 e 9 corpos de provas respectivamente e para determinação do módulo de elasticidade tangente inicial ($E_{tan,m}$) foram ensaiados 6 corpos de prova, onde foram consideradas as médias dos resultados dos ensaios dos corpos de prova para cada propriedade. Nas Tabelas 4.1 a 4.3 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os corpos de prova e a Tabela 4.4 apresenta um resumo das propriedades mecânicas do concreto utilizado na pesquisa.

Tabela 4.1 - Ensaio de Compressão

Ensaio	Massa (kg)	Ø (mm)	h (mm)	A (cm ²)	P _u (kgf)	f _{cj} (MPa)
CP1	3,622	100,6	197,5	79,5	45.860	57,7
CP2	3,621	101,3	197,3	80,6	46.655	57,9
CP3	3,621	101,6	197,0	81,1	43.610	53,8
CP4	3,639	101,4	198,6	80,7	48.485	60,1
CP5	3,629	101,3	197,6	80,6	46.245	57,4
CP6	3,632	100,9	196,7	79,9	44.235	55,4
CP7	3,654	102,2	198,4	82,0	46.720	57,0
CP8	3,622	101,0	197,6	80,2	43.375	54,1
CP9	3,611	100,5	197,4	79,3	48.560	61,2
CP10	3,334	100,7	194,6	79,7	49.110	61,7
CP11	3,632	100,7	196,9	79,6	46.765	58,7
CP12	3,301	100,2	196,8	78,8	47.075	59,7
Média						57,9
Desvio Padrão						2,6

Tabela 4.2 - Ensaio de Tração por Compressão Diametral

Ensaio	Massa (kg)	Ø (mm)	h (mm)	A (cm ²)	P _u (kgf)	f _{ct} (MPa)
CP1	3,657	102,0	197,3	81,6	13.120	4,2
CP2	3,589	101,5	197,0	80,8	9.510	3,0
CP3	3,573	102,0	196,6	81,7	9.860	3,1
CP4	3,564	101,1	196,1	80,3	9.430	3,0
CP5	3,622	102,1	198,1	81,9	10.440	3,3
CP6	3,658	101,5	198,6	80,9	11.470	3,7
CP7	3,618	101,6	198,0	81,0	8.640	2,8
CP8	3,607	102,0	198,3	81,7	12.150	3,9
CP9	3,639	100,7	198,4	79,7	10.360	3,3
Média						3,4
Desvio Padrão						0,5

Tabela 4.3 - Ensaio de Módulo de Elasticidade

Ensaio	Massa (kg)	Ø (mm)	h (mm)	A (cm ²)	P _u (kgf)	f _c (MPa)	E _{tan} (GPa)
CP1	3,581	100,9	195,5	79,9	39.090	48,9	28,0
CP2	3,578	103,4	193,9	83,9	41.390	49,3	28,9
CP3	3,562	101,8	194,6	81,4	37.350	45,9	29,8
CP4	3,560	102,3	194,1	82,1	39.090	47,6	29,8
CP5	3,574	101,3	194,1	80,6	39.630	49,1	27,2
CP6	3,600	101,3	194,7	80,7	38.165	47,3	30,1
Média						48,0	29,0
Desvio Padrão						1,3	1,1

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do Concreto

Modelo	Idade de ensaio dos Modelos (dias)	Idade de ensaio dos Corpos de Prova (dias)	$f_{c,m}$ (MPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$E_{tan,m}$ (Mpa)
LR01	97	113	57,9	3,4	29,0
LC02	99	113			
LC03	103	113			
LR04	111	113			

4.1.2 Aço

Para a execução das armaduras de flexão e cisalhamento dos modelos ensaiados foram utilizadas barras de aço CA50 das quais foram retirados 3 corpos de prova para cada diâmetro de barra, com comprimento de aproximadamente 50 cm, para a realização dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do aço.

Utilizou-se uma prensa EMIC DL30000 e o software Tesc versão 3.04 para a realização dos ensaios de tração axial no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília, seguindo as recomendações da norma NBR 6892:2002. A Figura 4.1 apresenta detalhes do esquema de ensaio utilizado.

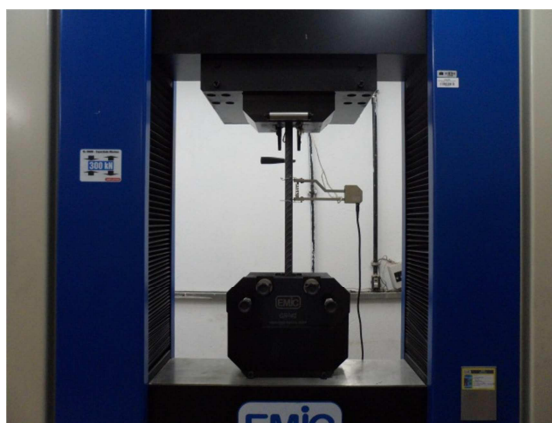


Figura 4.1 - Ensaio de tração do aço

Para a determinação das propriedades mecânicas do aço utilizou-se a média dos resultados dos três corpos de prova de cada diâmetro. Na Figura 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios das barras utilizadas na execução das armaduras de flexão e na Figura 4.3 são apresentados os resultados dos ensaios dos corpos de prova retirados das barras da armadura de cisalhamento. A Tabela 4.5 sintetiza as propriedades mecânicas do aço utilizado nas lajes.

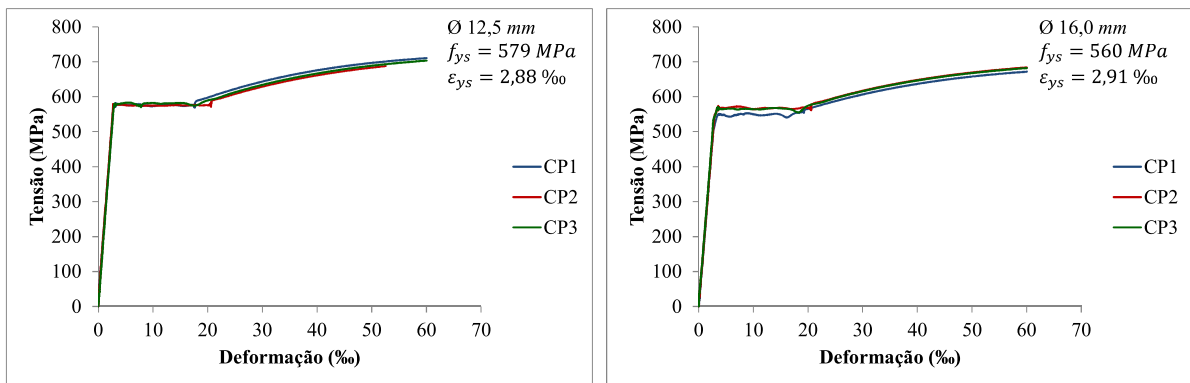


Figura 4.2 - Curvas tensão-deformação do aço das armaduras de flexão

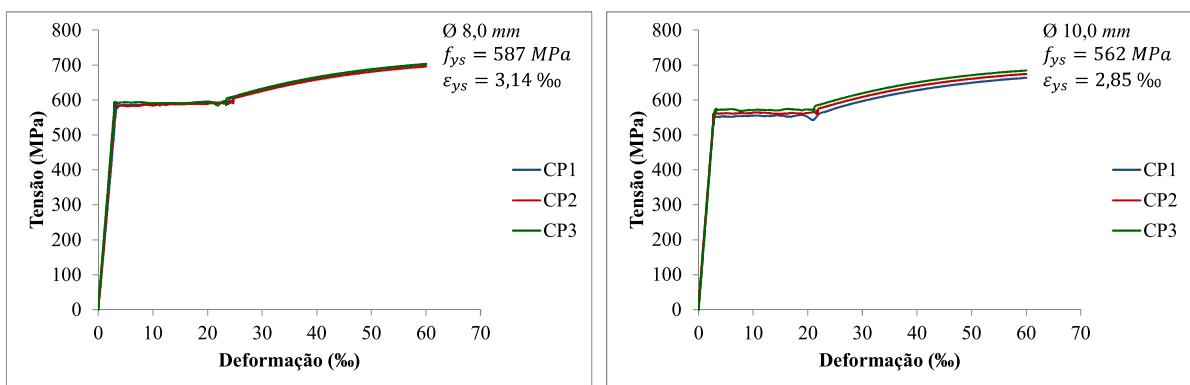


Figura 4.3 - Curva tensão-deformação do aço das armaduras de cisalhamento

Tabela 4.5 - Propriedades mecânicas do aço utilizado nas lajes

\varnothing (mm)	f_{ys} (MPa)	ε_{ys} (‰)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
8,0	587	3,14	716	188
10,0	562	2,85	685	197
12,5	579	2,88	724	201
16,0	560	2,91	702	192

4.2 CARGAS DE RUPTURA

Como descrito no Capítulo 3 o carregamento foi aplicado nos modelos através de 3 atuadores hidráulicos posicionados em linha com 3 células de carga. A carga última de cada laje é obtida através da soma das cargas de ruptura obtidas nos 3 indicadores digitais das células de carga. A Tabela 4.6 apresenta os valores das cargas últimas dos modelos.

Tabela 4.6 - Carga de ruptura das lajes

Modelo	P_2/P_1	Armadura de Cisalhamento	h (mm)	f_{cm}	P_u (kN)
LR01	0,5	-	181	57,9	300
LC02	1,0	3 camadas 10 ϕ 8mm	181	57,9	488
LC03	1,0	4 camadas 10 ϕ 10mm	180	57,9	550
LR04	1,0	-	180	57,9	347
Laje Poligonal com 1036 mm de lado Pilar de canto reentrante com seção transversal de 300 mm x 300 mm 10 <i>studs</i> com 8 ou 10 mm de diâmetro por camada					

4.3 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os deslocamentos verticais dos modelos foram monitorados em 16 pontos ao longo dos eixos destes elementos utilizando-se 15 LVDTs e um potenciômetro. Em todos os modelos foram monitorados os mesmos pontos a fim de permitir a comparação direta entre os resultados observados. A leitura dos deslocamentos foi feita no decorrer dos ensaios pelo sistema de aquisição de dados, descrito no Capítulo 3, em intervalos entre cada passo de carga. Próximo ao final dos ensaios optou-se por interromper as leituras tanto dos deslocamentos verticais como das fissuras de flexão, a fim de não comprometer a carga última das lajes e manter a integridade dos LVDTs perante a ocorrência de ruptura por punção.

A decisão de interromper estas leituras foi tomada com base nos resultados das deformações no aço e no concreto, na própria leitura das flechas e também se utilizando as cargas de ruptura estimadas antes da realização dos ensaios. Após os ensaios verificou-se que a interrupção nas leituras das flechas e das fissuras ocorreu a dois ou três passos da carga da ruptura das lajes. Na Figura 4.4 até a Figura 4.19 são apresentados os deslocamentos verticais das lajes para diferentes passos de carga até aquele mais próximo à ruptura, já os gráficos de carga versus deslocamento são apresentados da Figura 4.20 à Figura 4.23. As posições dos pontos de medição foram apresentadas na Figura 3.10.

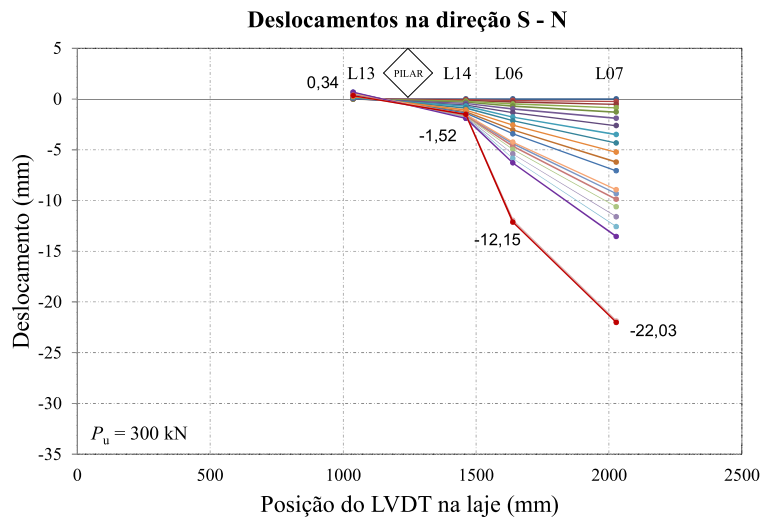


Figura 4.4 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LR01

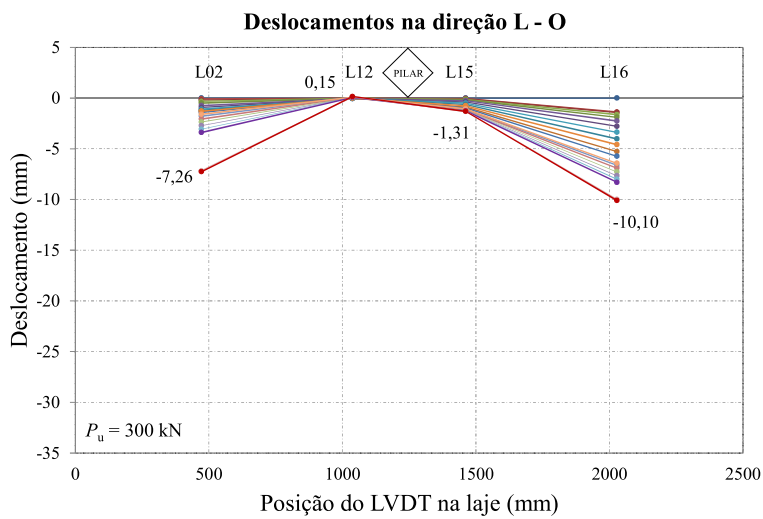


Figura 4.5 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LR01

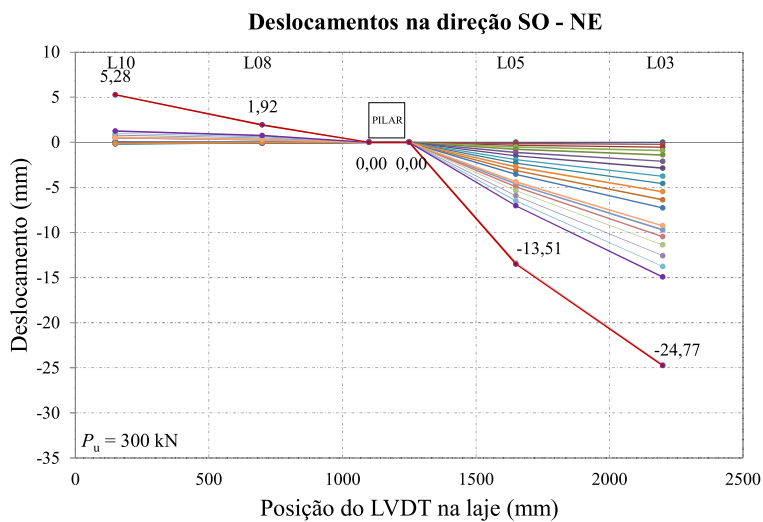


Figura 4.6 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LR01

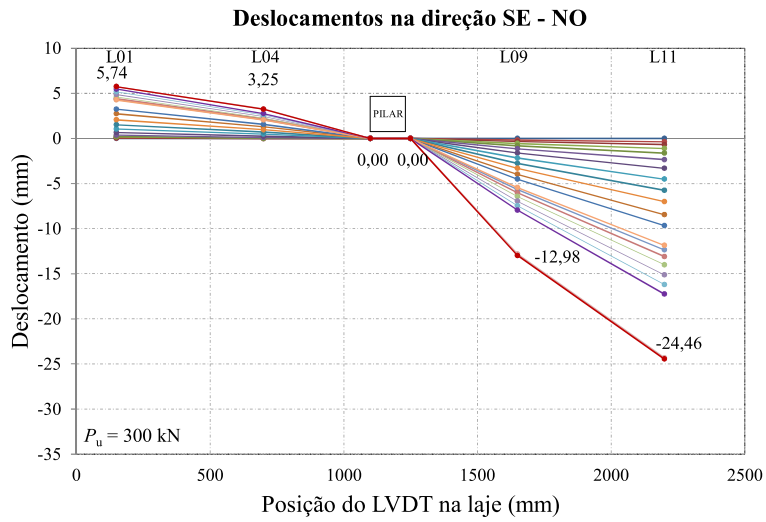


Figura 4.7 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LR01

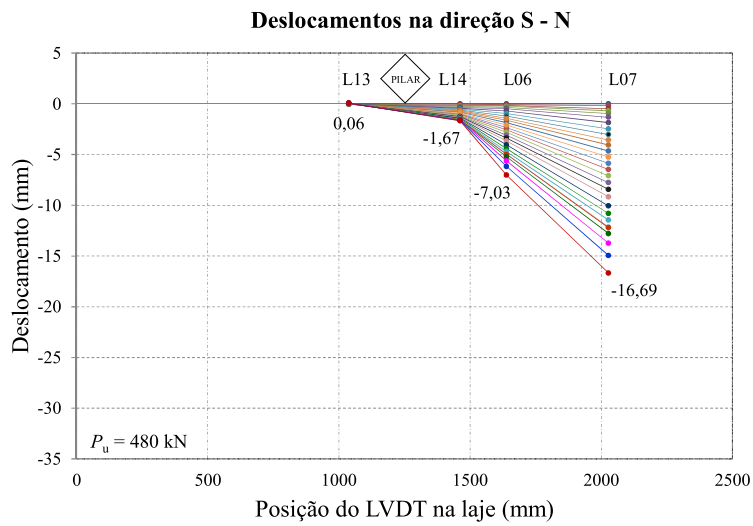


Figura 4.8 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LC02

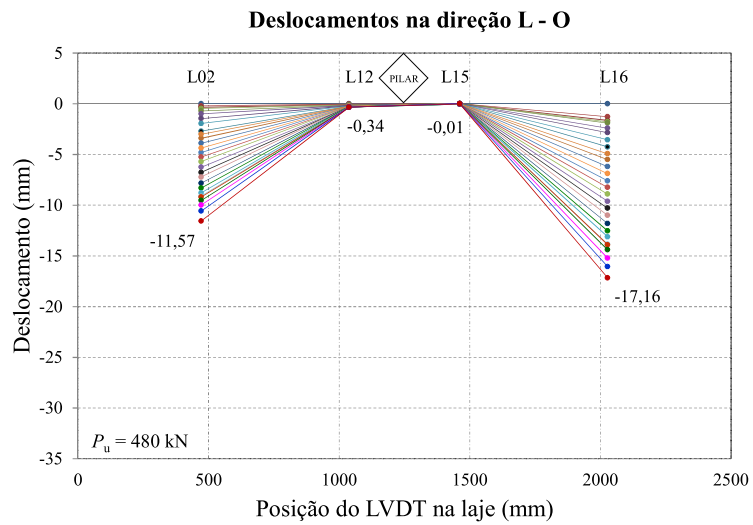


Figura 4.9 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LC02

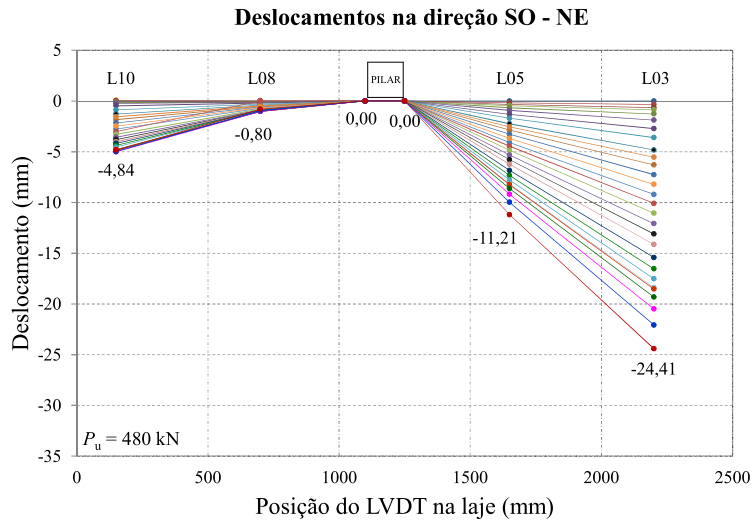


Figura 4.10 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LC02

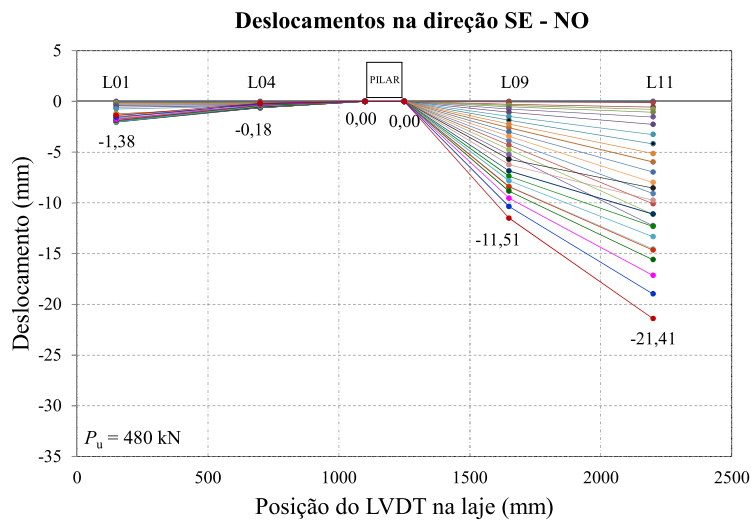


Figura 4.11 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LC02

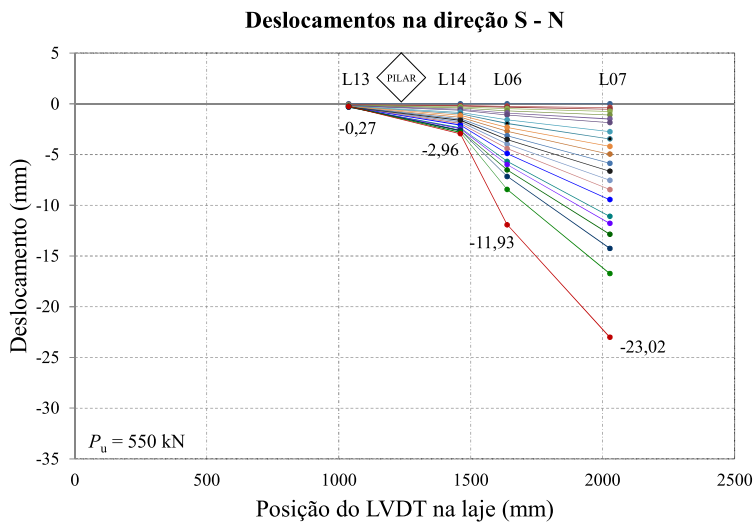


Figura 4.12 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LC03

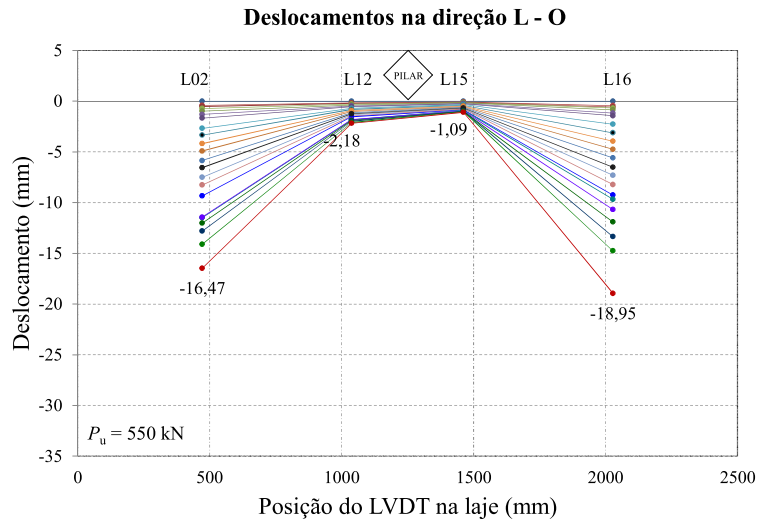


Figura 4.13 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LC03

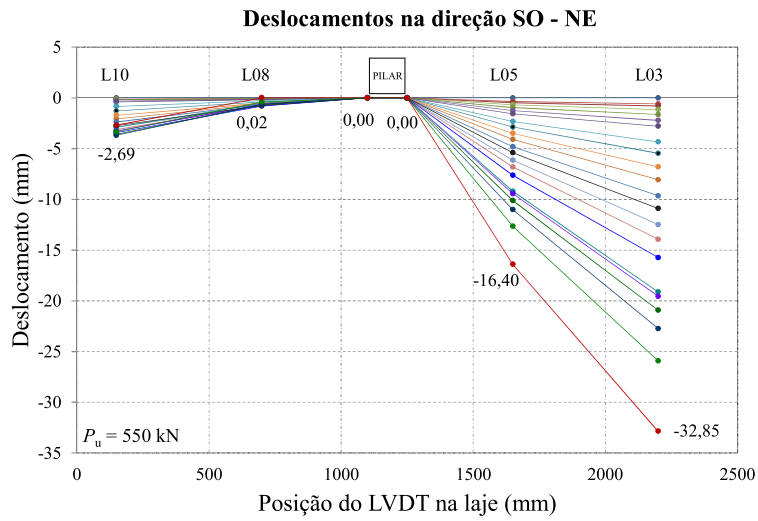


Figura 4.14 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LC03

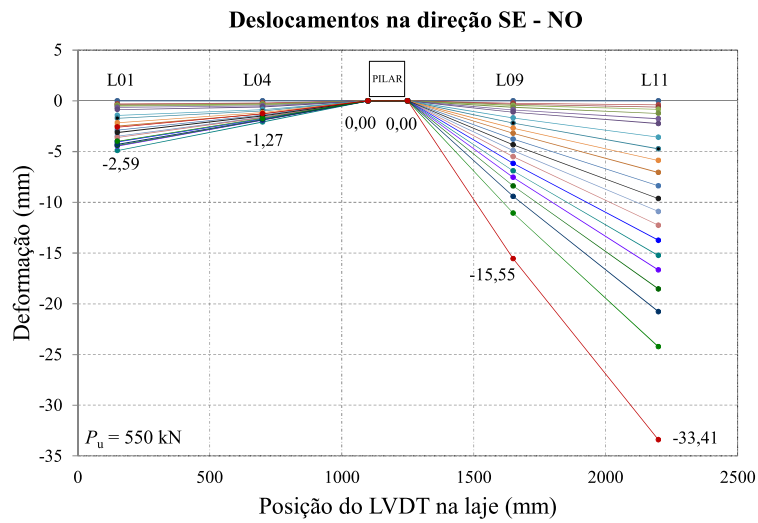


Figura 4.15 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LC03

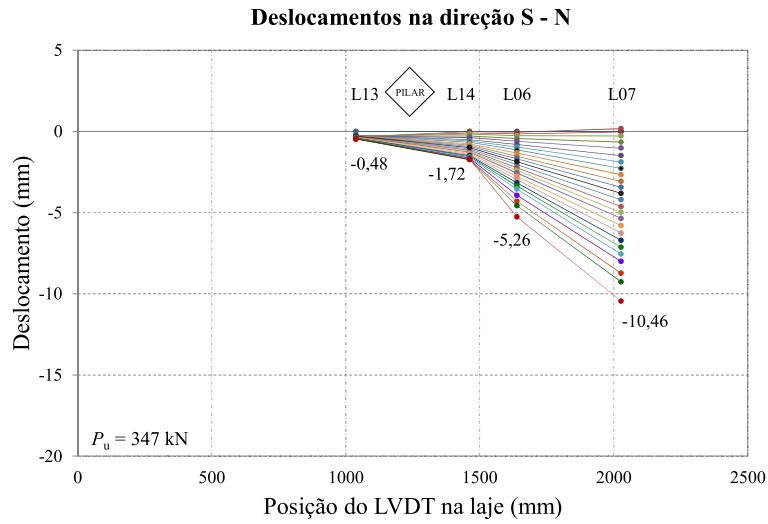


Figura 4.16 - Deslocamentos verticais na direção S-N do modelo LR04

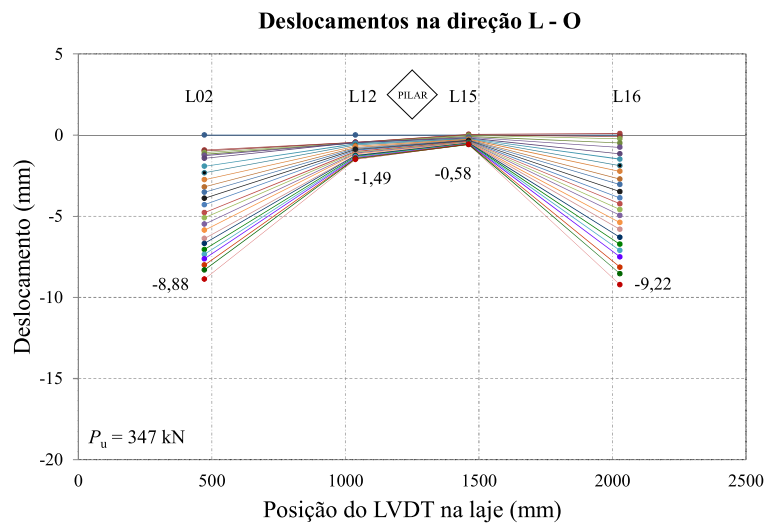


Figura 4.17 - Deslocamentos verticais na direção L-O do modelo LR04

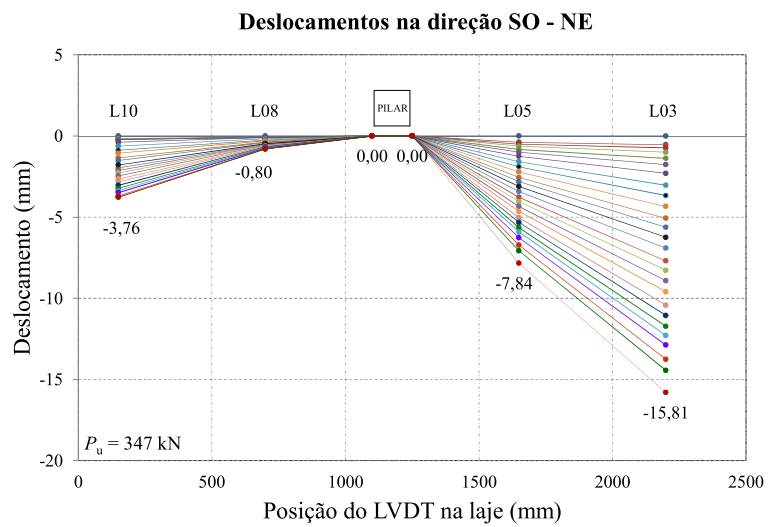


Figura 4.18 - Deslocamentos verticais na direção SO-NE do modelo LR04

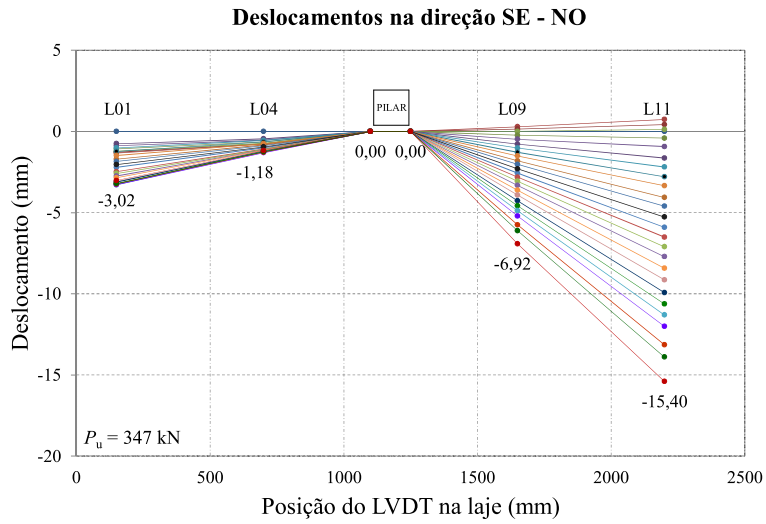


Figura 4.19 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO do modelo LR04

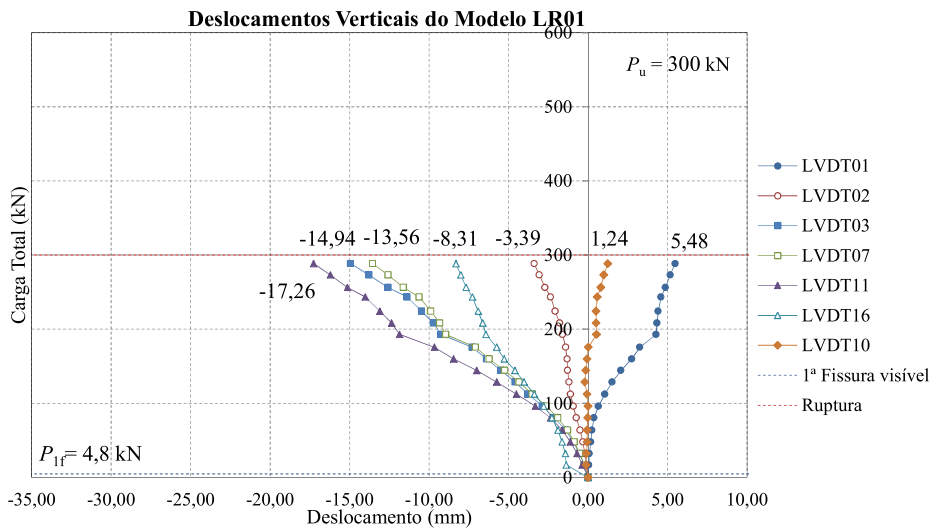


Figura 4.20 - Carga versus deslocamento do Modelo LR01

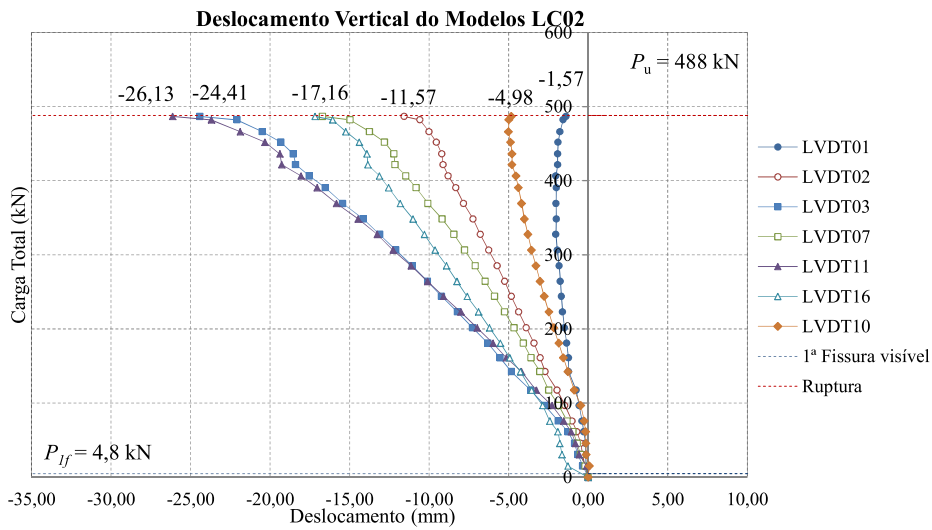


Figura 4.21 - Carga versus deslocamento do Modelo LC02

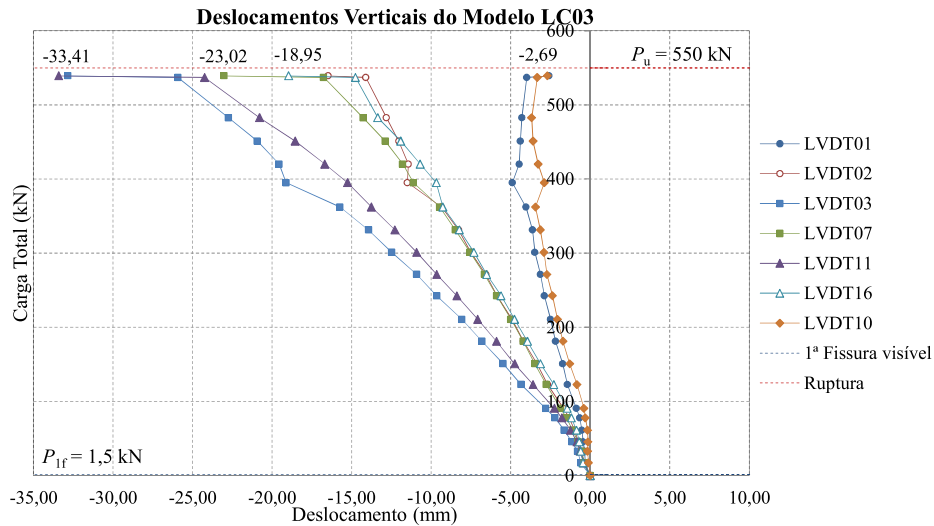


Figura 4.22 - Carga versus deslocamento do Modelo LC03

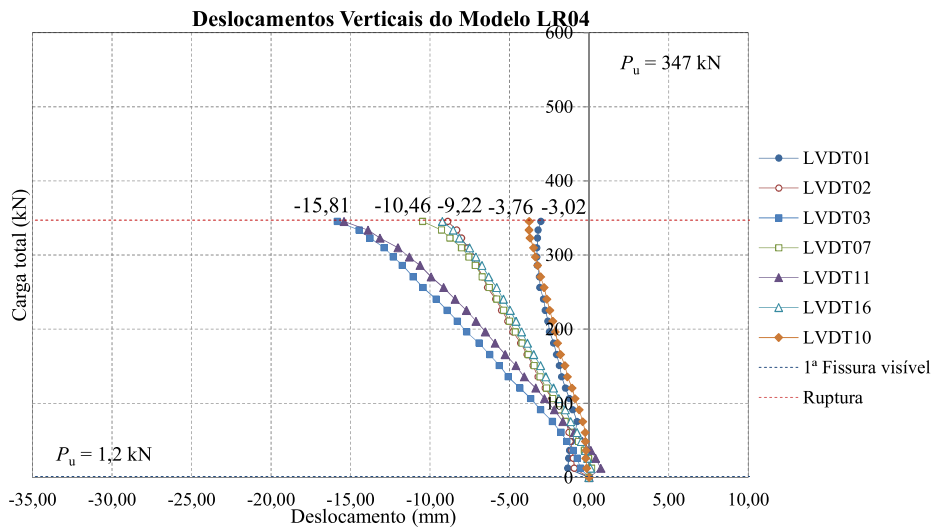


Figura 4.23 - Carga versus deslocamento do Modelo LR04

Para cada passo de carga foram monitorados também os deslocamentos verticais na aresta inferior da borda N-S e na aresta inferior de uma das bordas na direção L-O de todos os modelos através de duas réguas graduadas em milímetros posicionadas próximas às bordas das lajes através de suportes metálicos e de madeira. As Figuras 4.24 à 4.27 apresentam os deslocamentos verticais obtidos para cada passo de carga durante os ensaios das lajes. O posicionamento das réguas é dado na Figura 3.13.

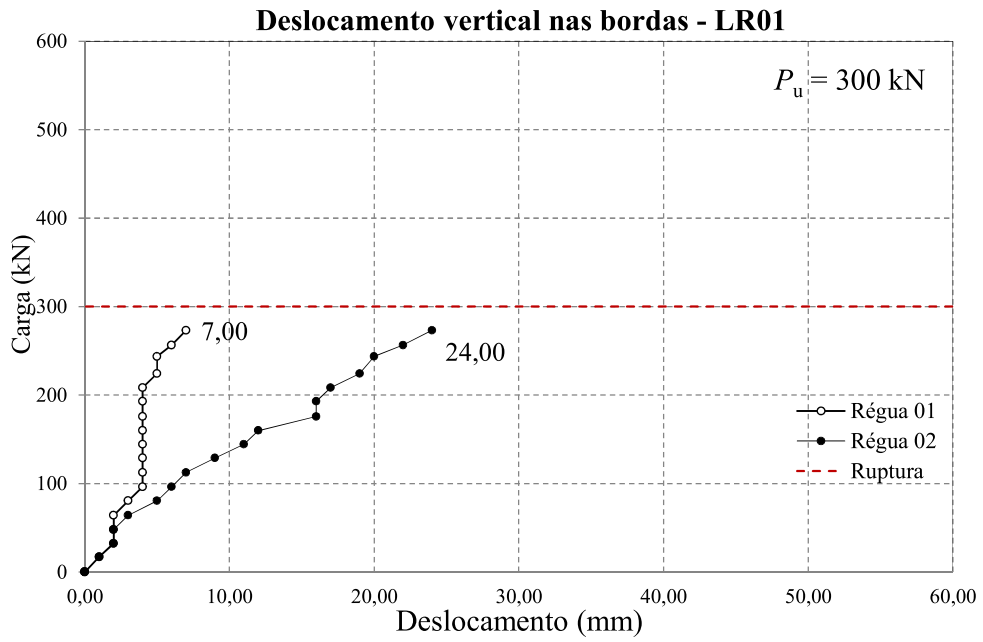


Figura 4.24- Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LR01

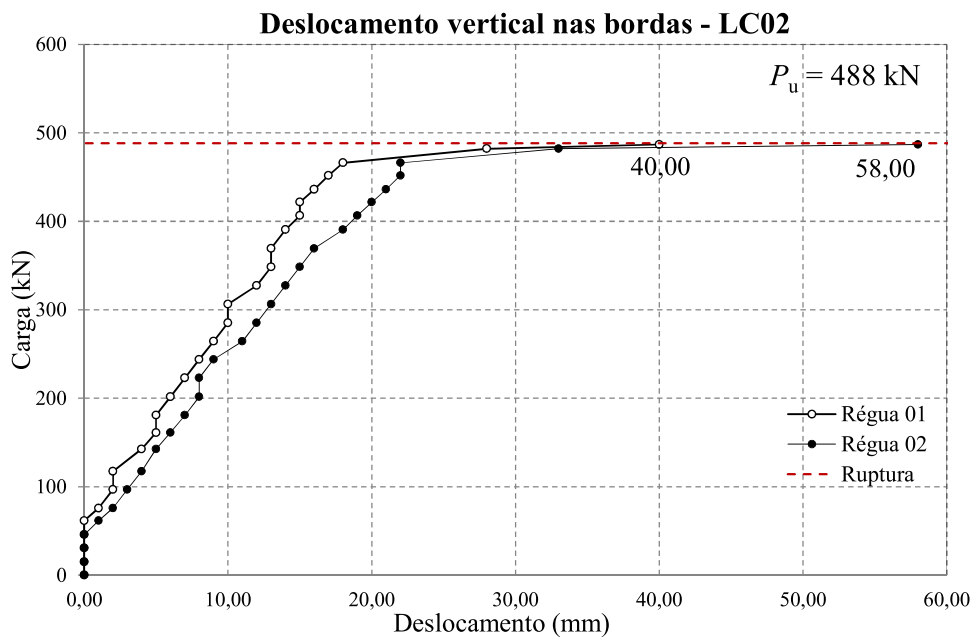


Figura 4.25 - Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LC02

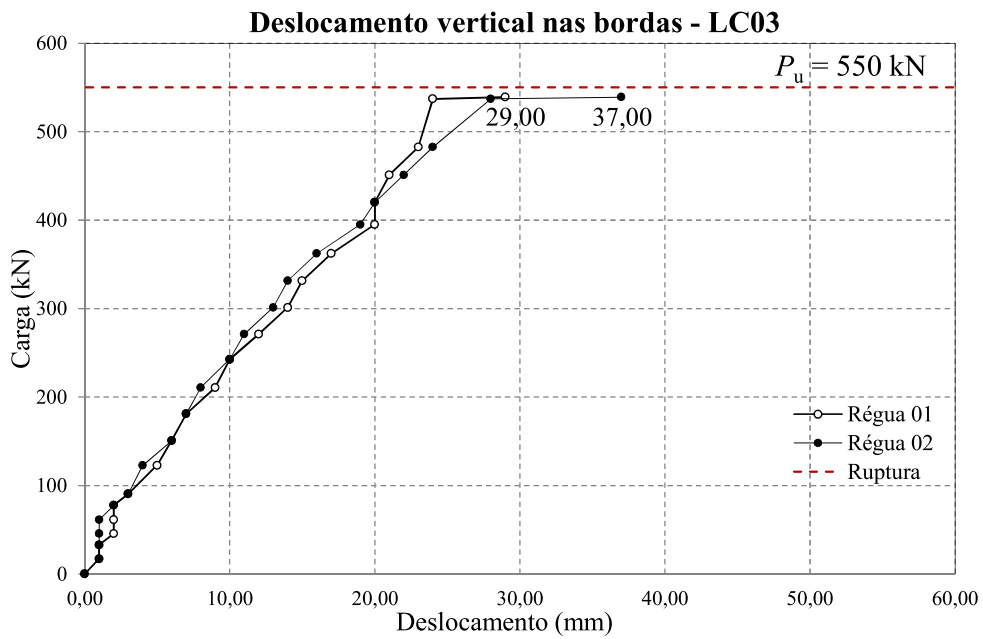


Figura 4.26- Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LC03

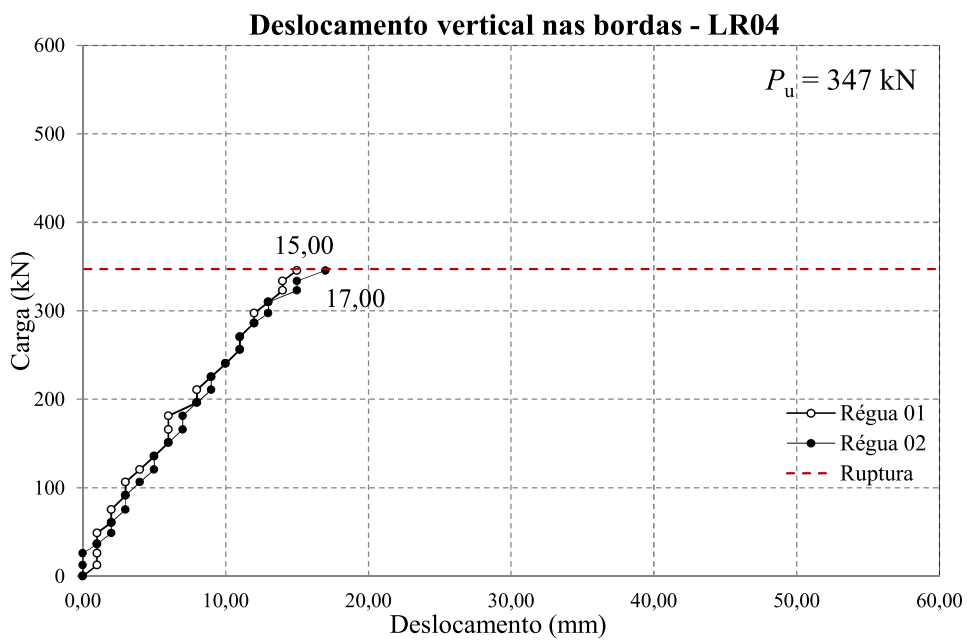


Figura 4.27 - Deslocamentos verticais nas bordas do modelo LR04

4.4 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE FLEXÃO

As deformações foram monitoradas nas duas direções da armadura de flexão, em 27 pontos na armadura superior e 2 pontos na armadura inferior das lajes, posicionados principalmente nas proximidades do pilar.

Na Figura 4.28 até a Figura 4.51 são apresentados gráficos das deformações nas armaduras de flexão posicionadas na parte superior e inferior da laje em função da posição de cada barra, para diferentes estágios de carregamento. Esses gráficos permitem avaliar a distribuição dos esforços de flexão ao longo da seção transversal da laje, facilitando a visualização do quão próximo de uma ruptura por flexão, devido ao escoamento das armaduras, cada laje chegou. Já na Figura 4.52 até a Figura 4.63 são apresentadas as curvas de carga x deformação para as armaduras de flexão. A localização dos pontos de medição foi mostrada nas Figuras 3.16 e 3.17.

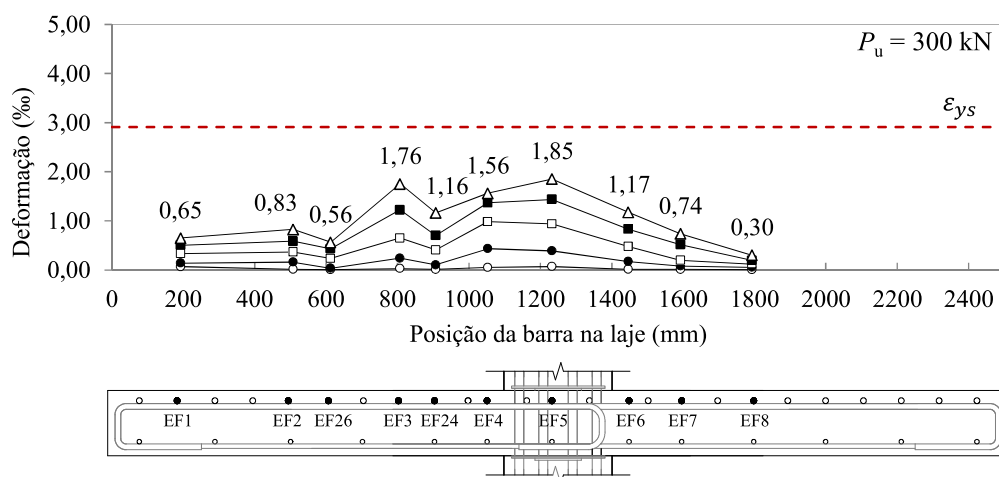


Figura 4.28 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01

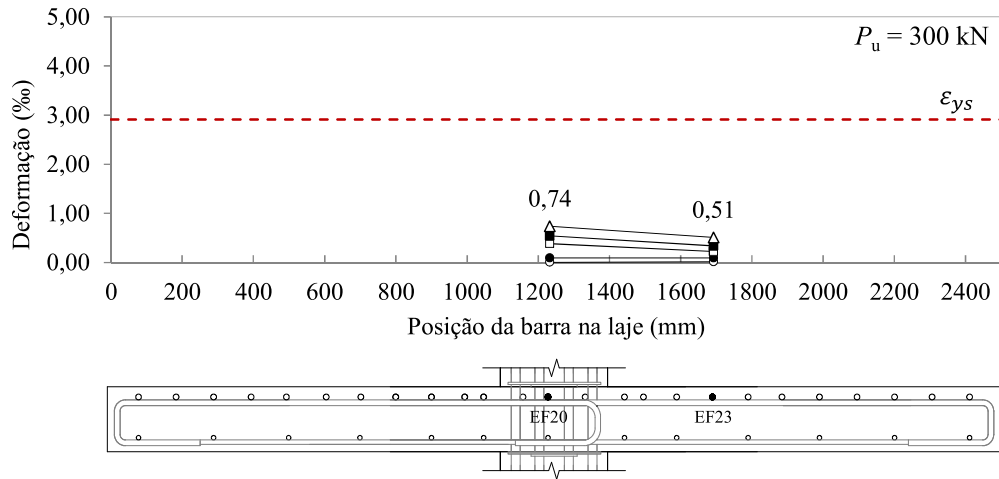


Figura 4.29 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01

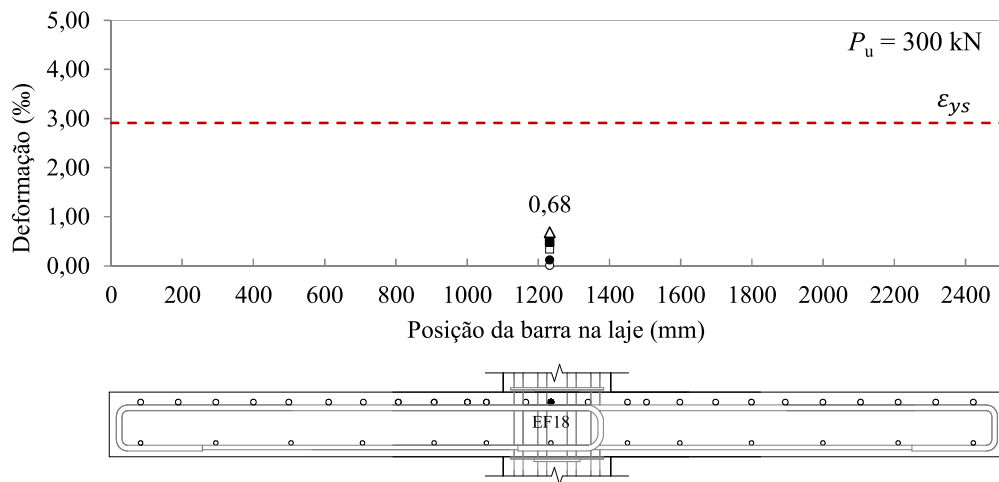


Figura 4.30 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01

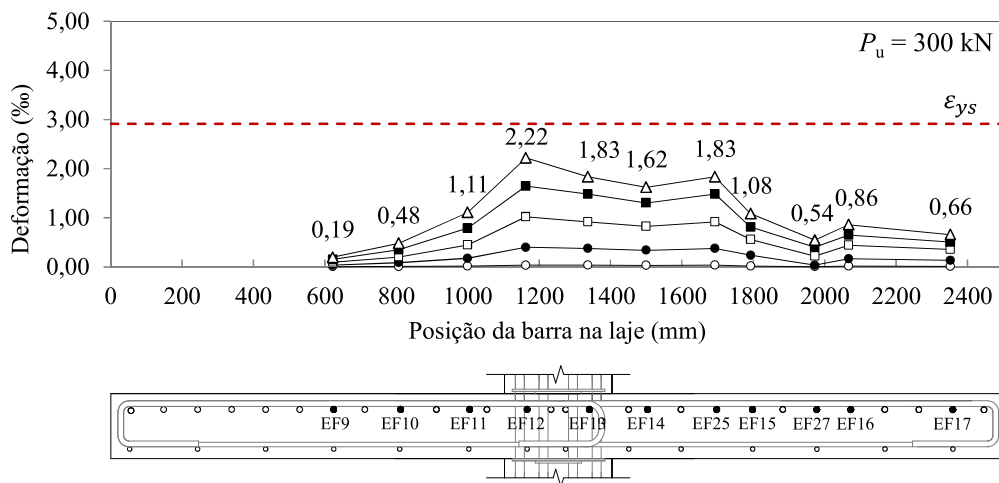


Figura 4.31 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01

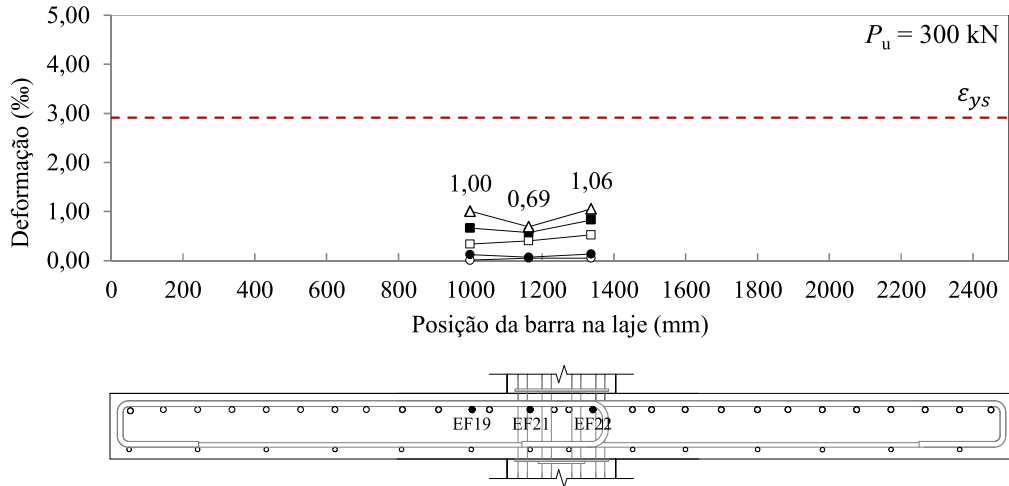


Figura 4.32 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01

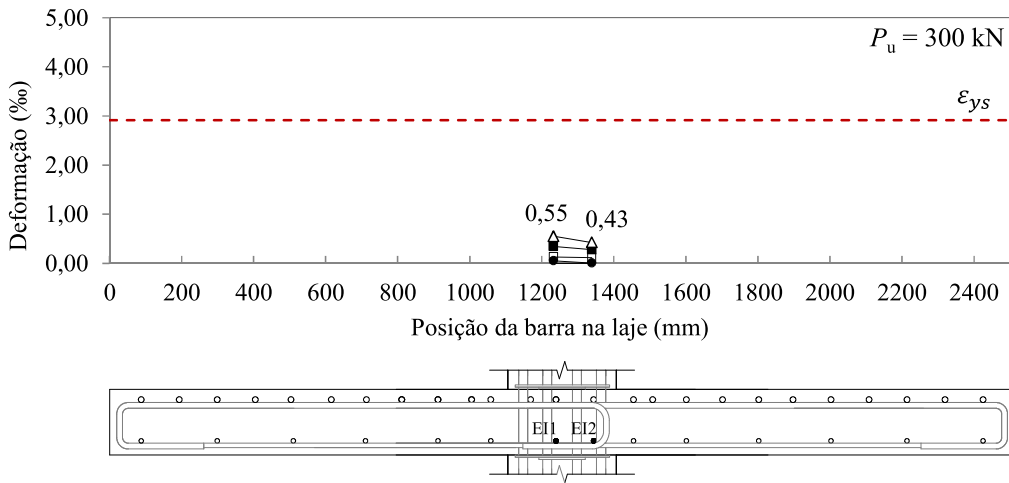


Figura 4.33 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR01

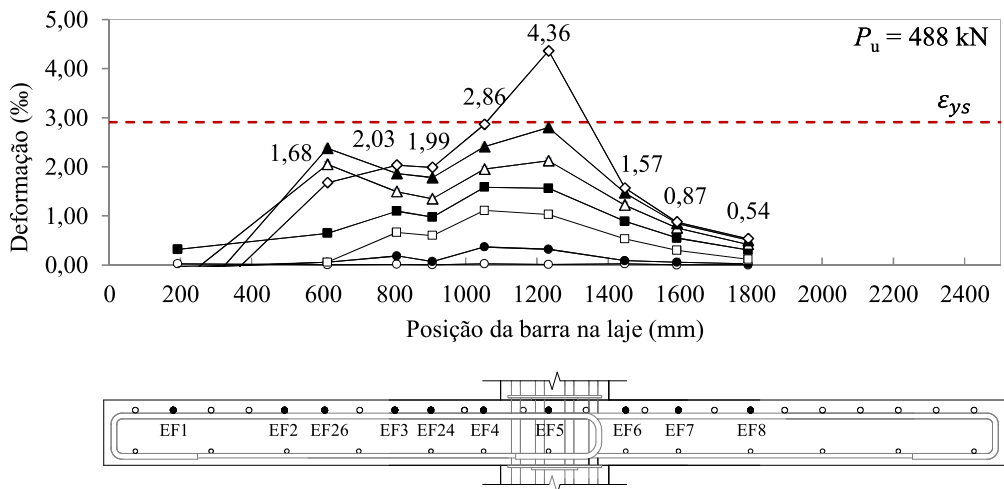


Figura 4.34 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02

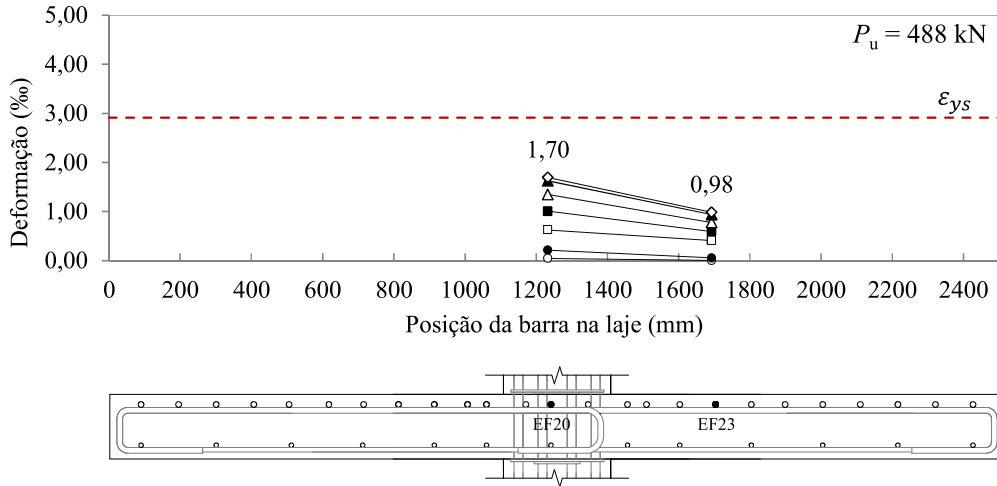


Figura 4.35 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02

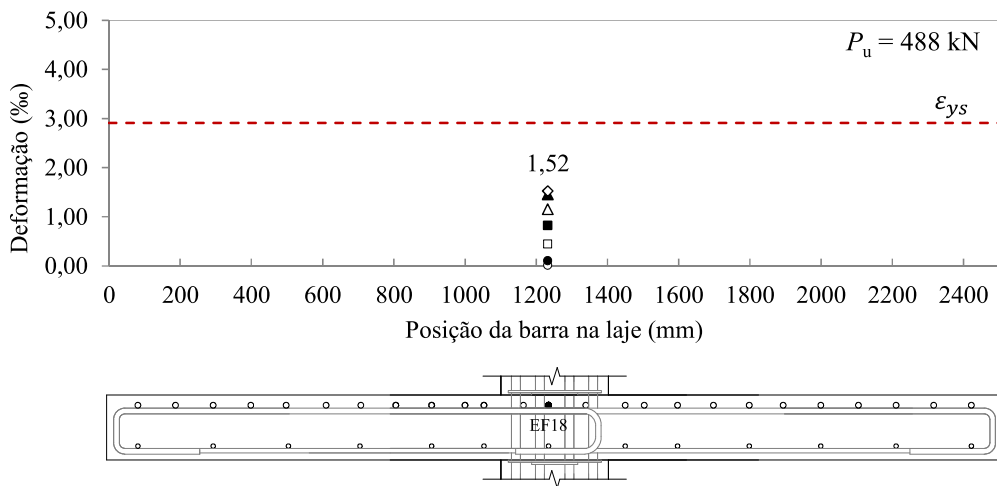


Figura 4.36 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02

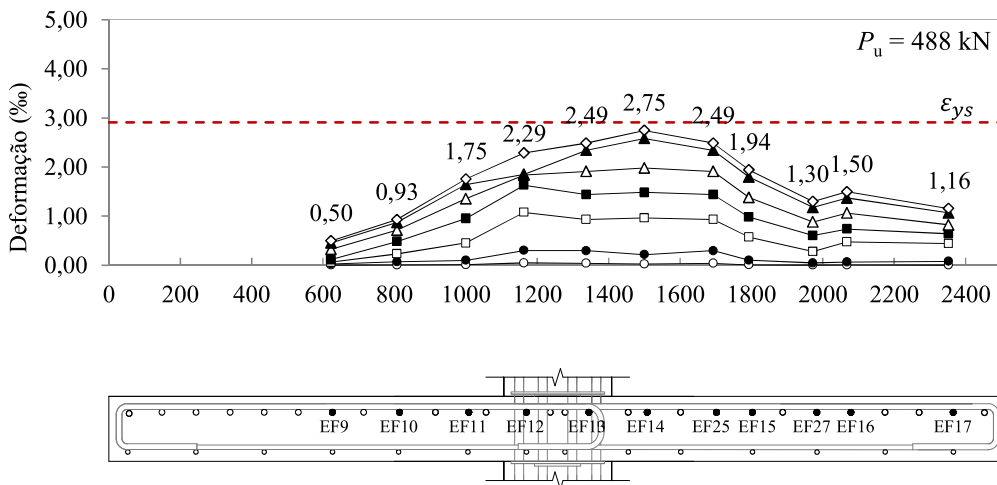


Figura 4.37 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02

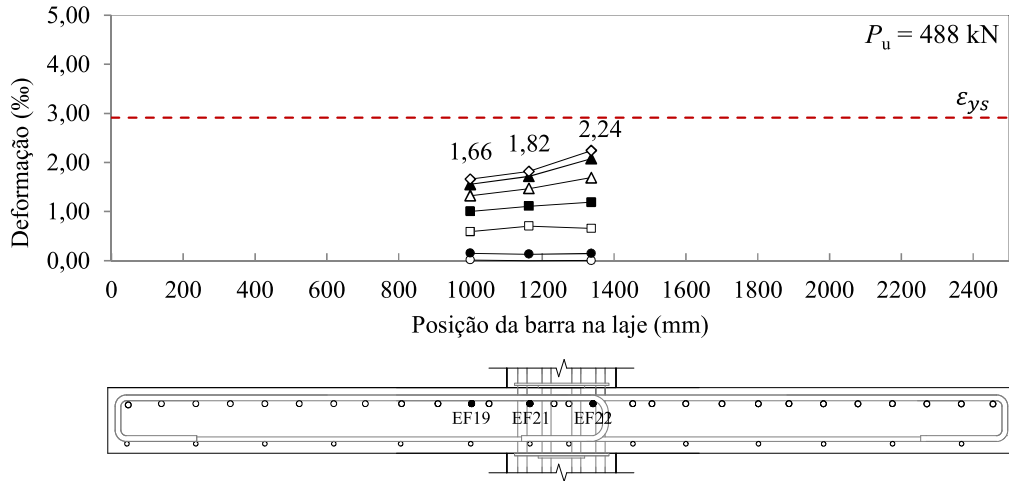


Figura 4.38 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02

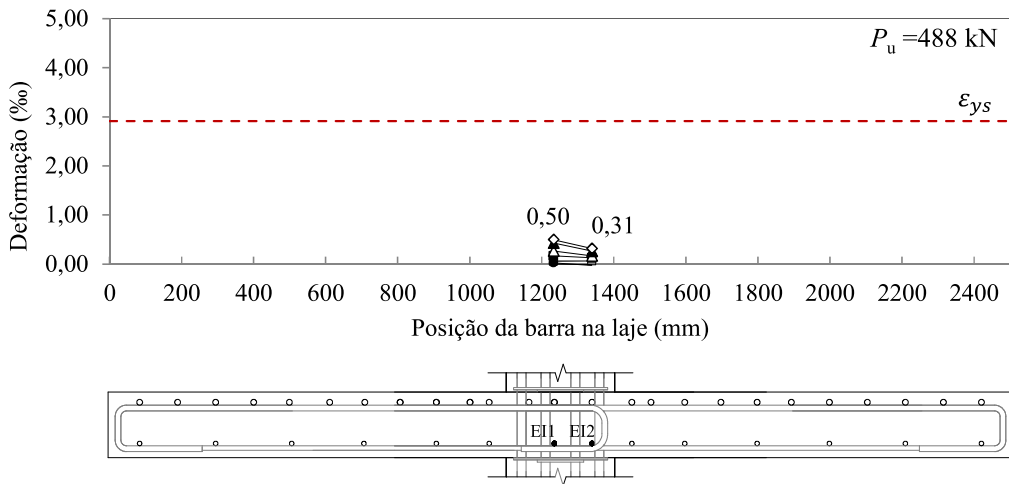


Figura 4.39 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC02

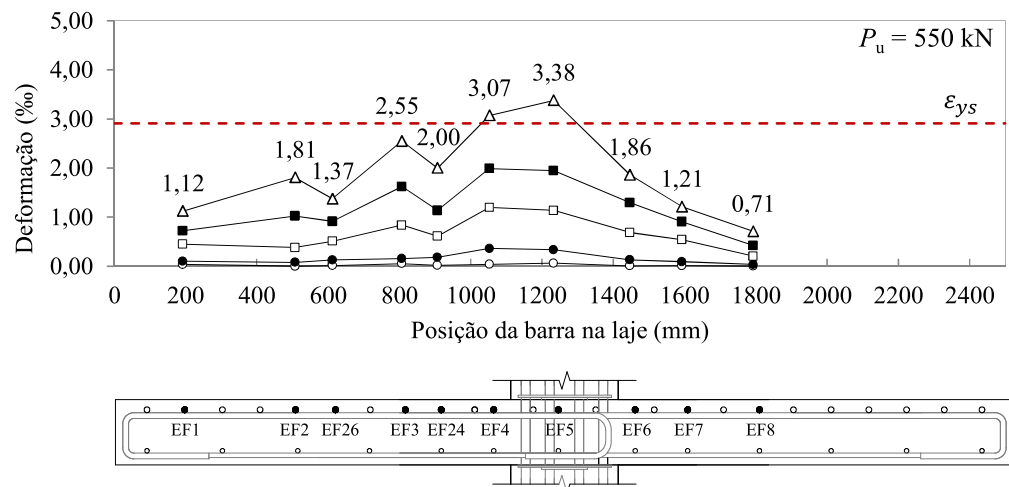


Figura 4.40 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03

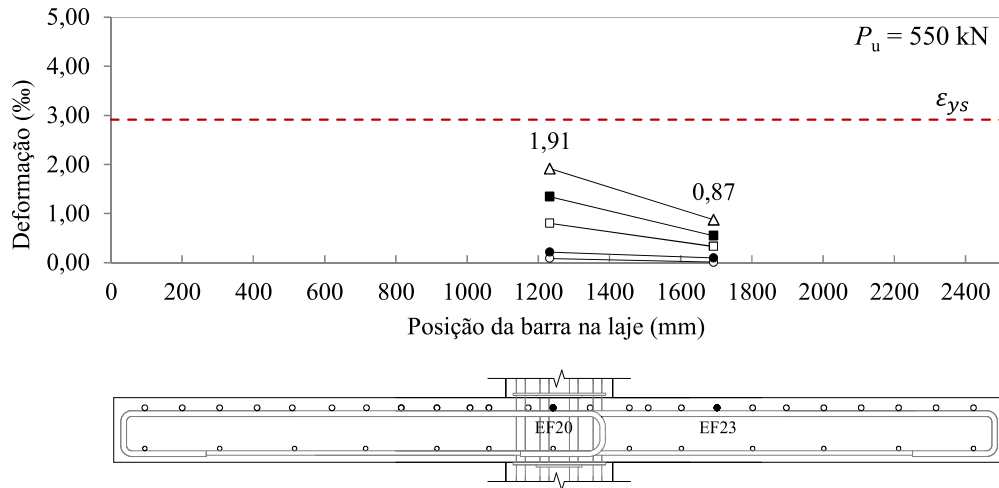


Figura 4.41 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03

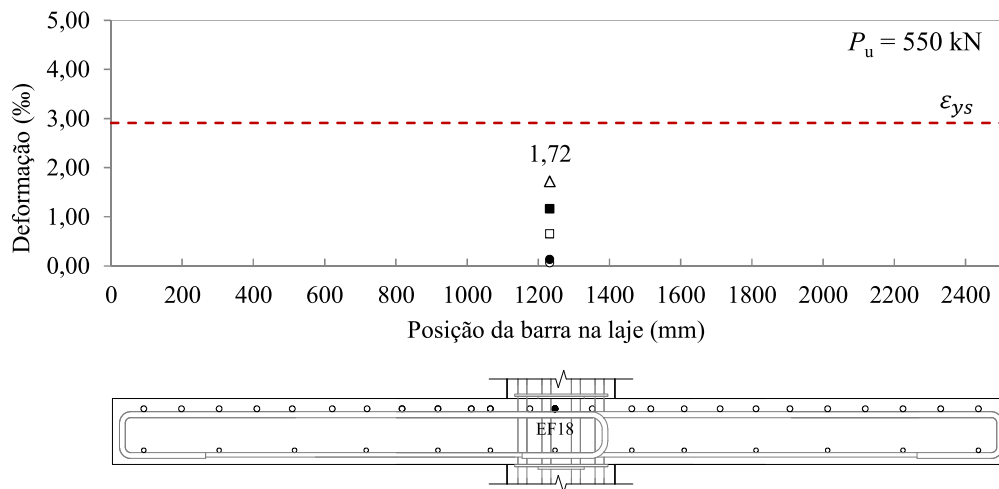


Figura 4.42 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03

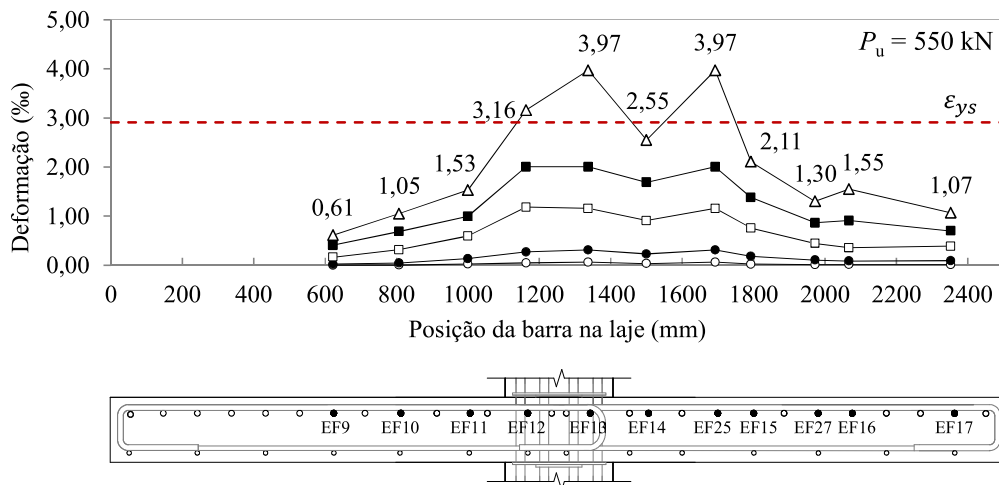


Figura 4.43 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03

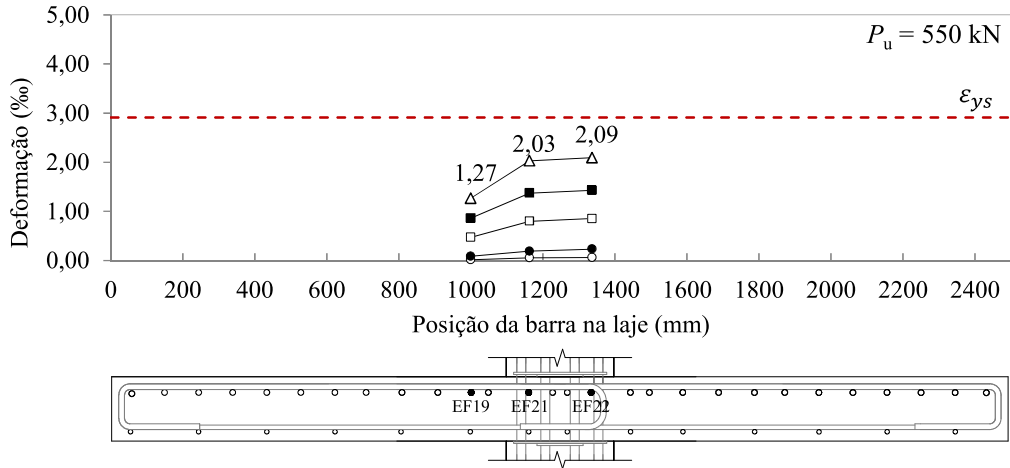


Figura 4.44 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03

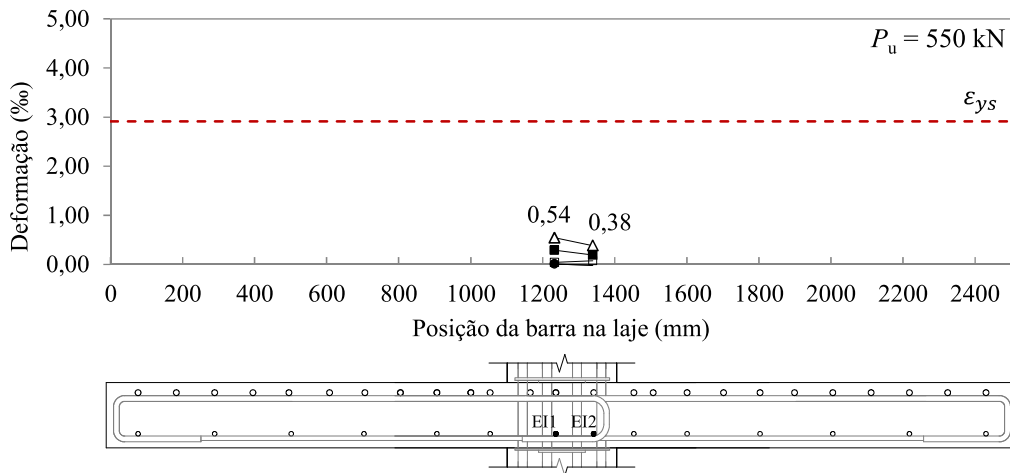


Figura 4.45 - Deformação na armadura de flexão do modelo LC03

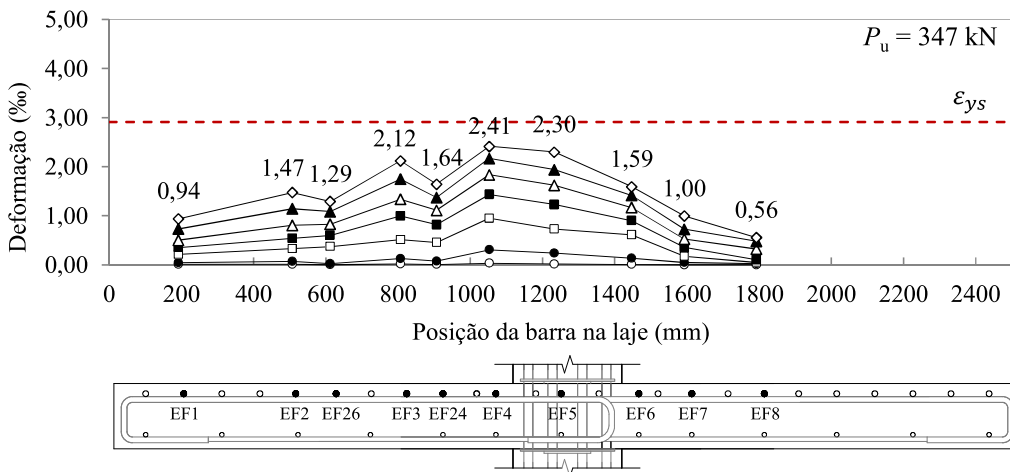


Figura 4.46 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04

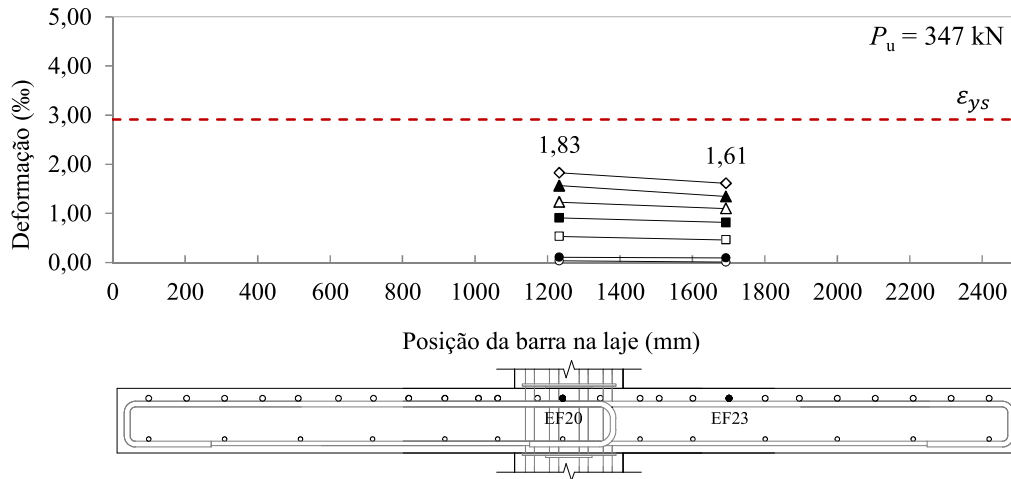


Figura 4.47 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04

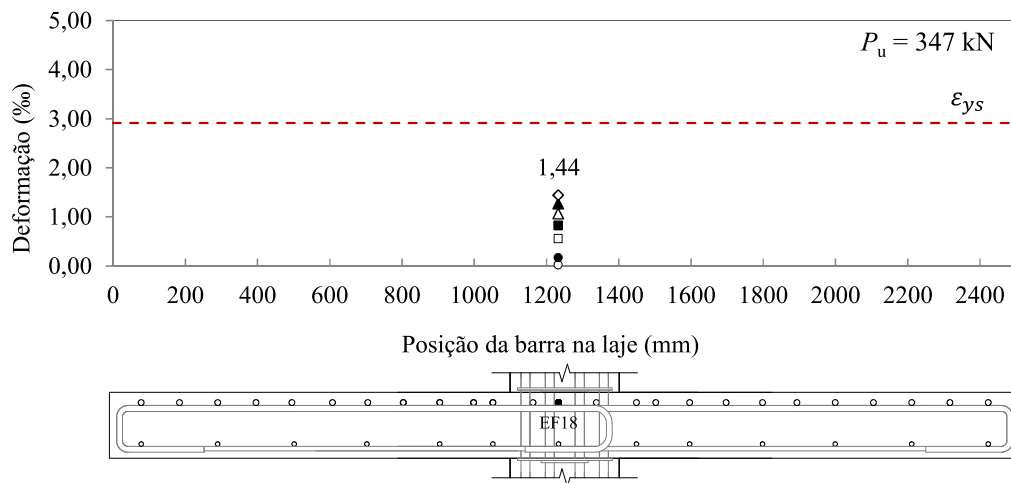


Figura 4.48 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04

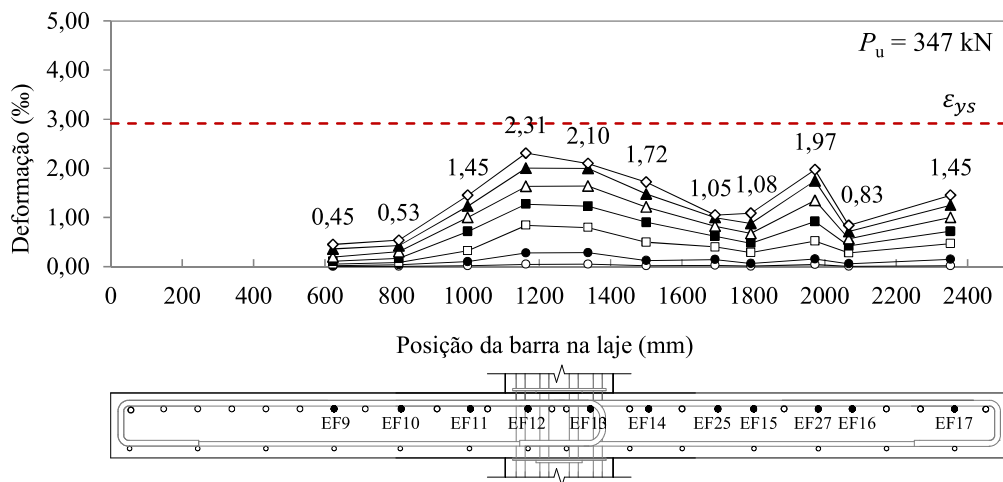


Figura 4.49 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04

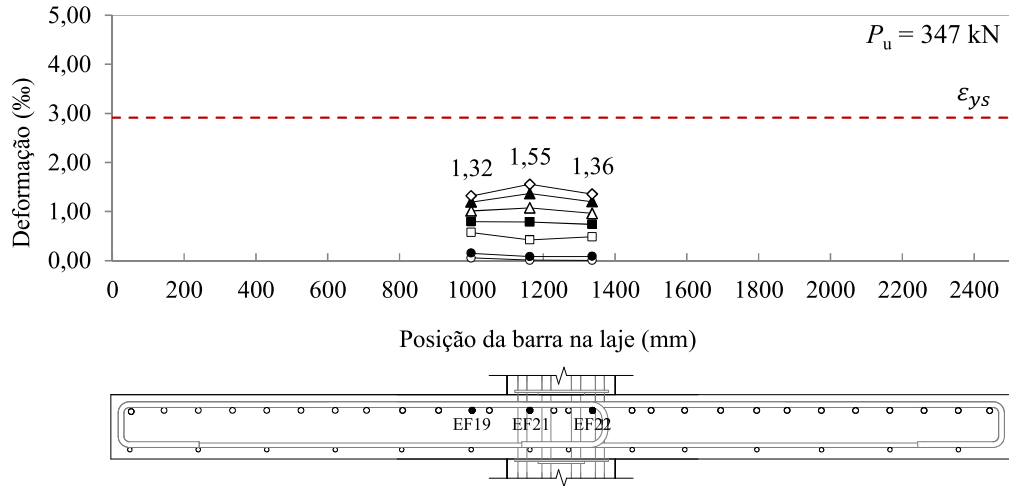


Figura 4.50 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04

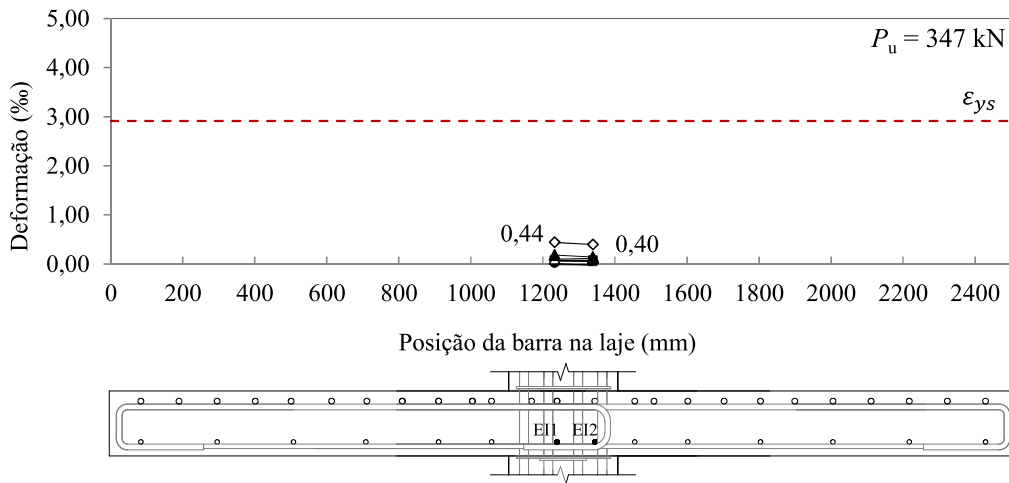


Figura 4.51 - Deformação na armadura de flexão do modelo LR04

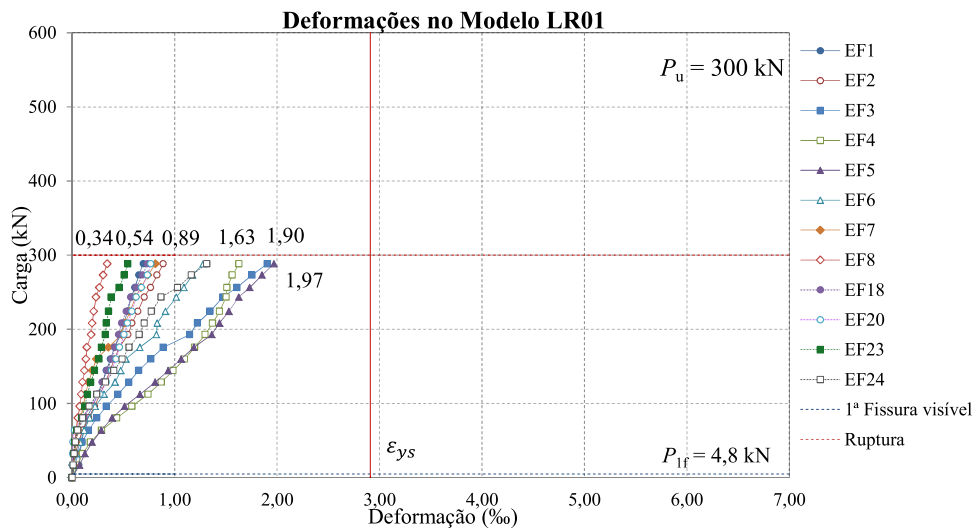


Figura 4.52 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR01

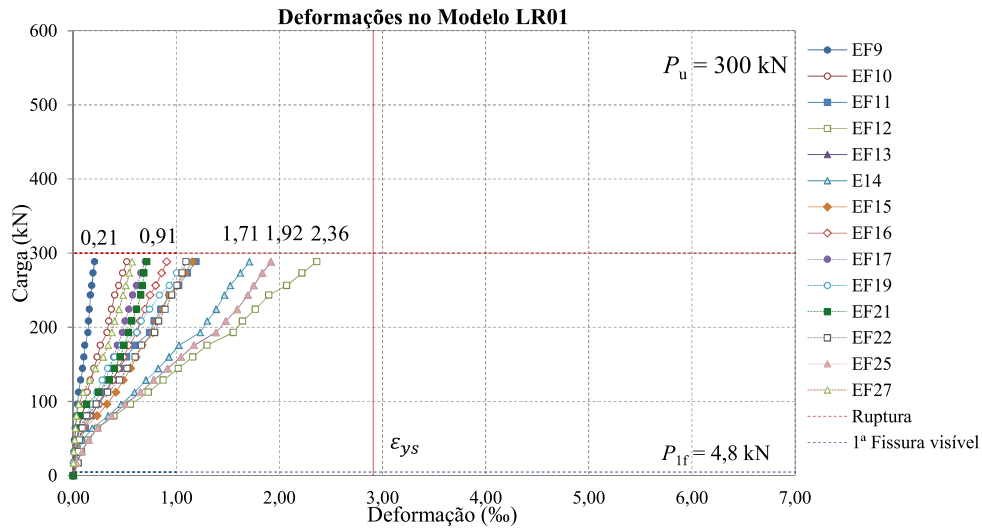


Figura 4.53 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR01

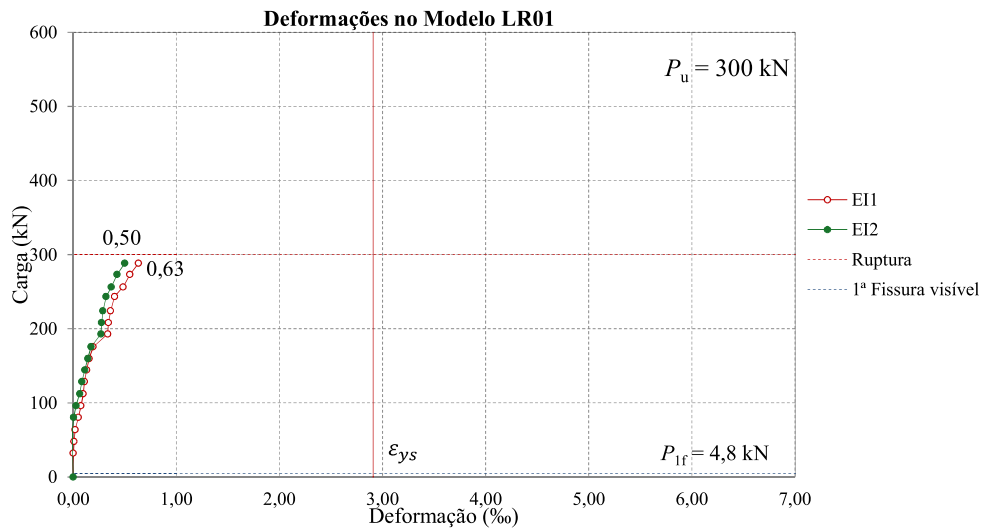


Figura 4.54 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR01

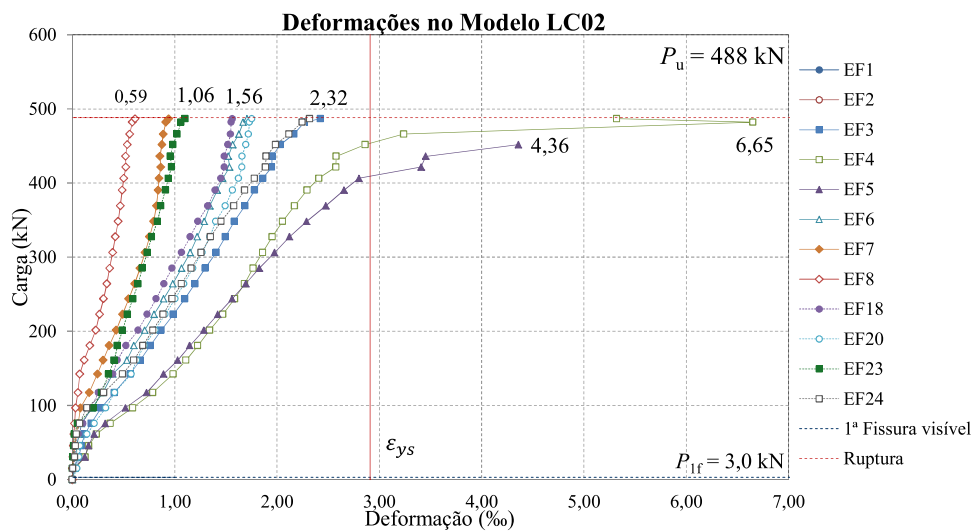


Figura 4.55 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC02

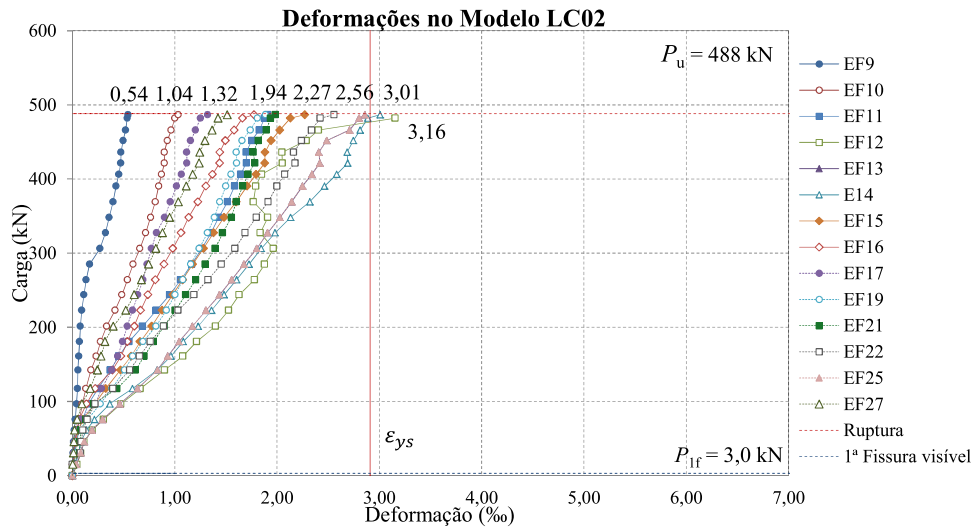


Figura 4.56 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC02

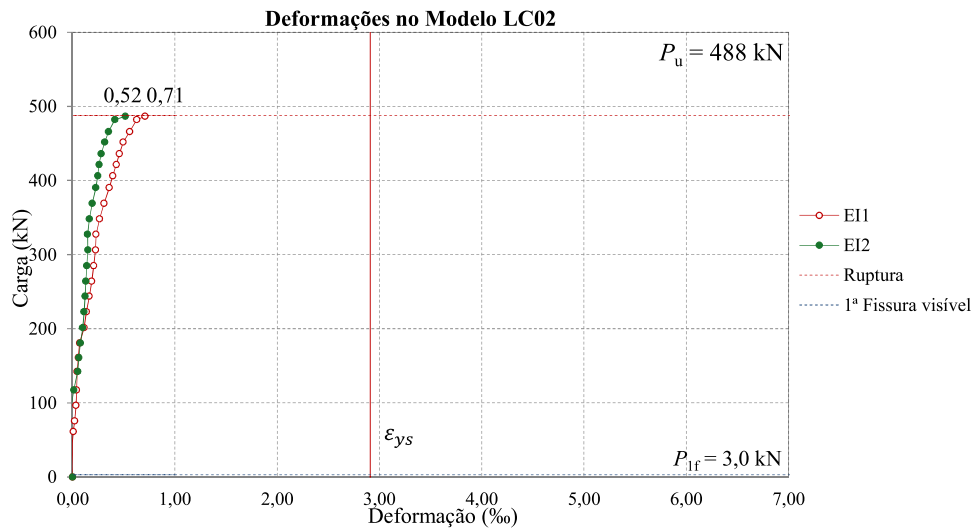


Figura 4.57 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC02

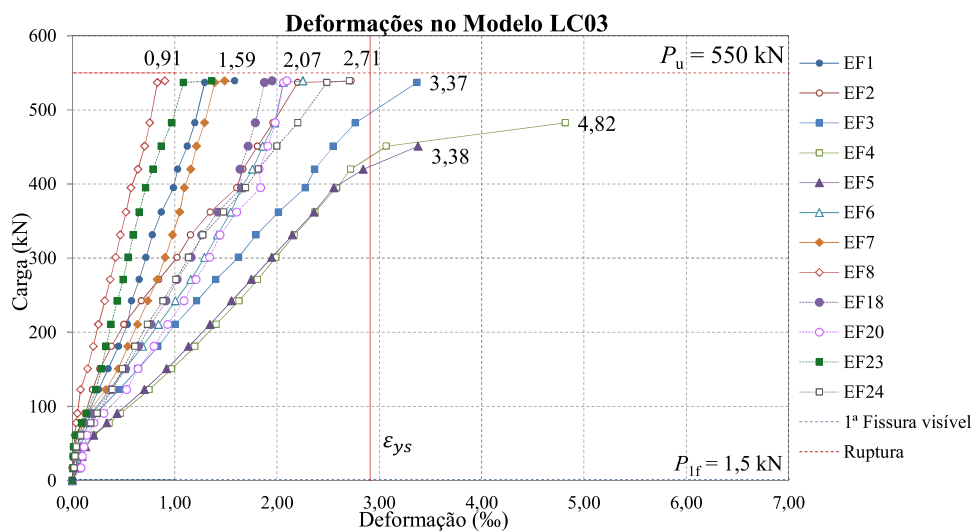


Figura 4.58 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC03

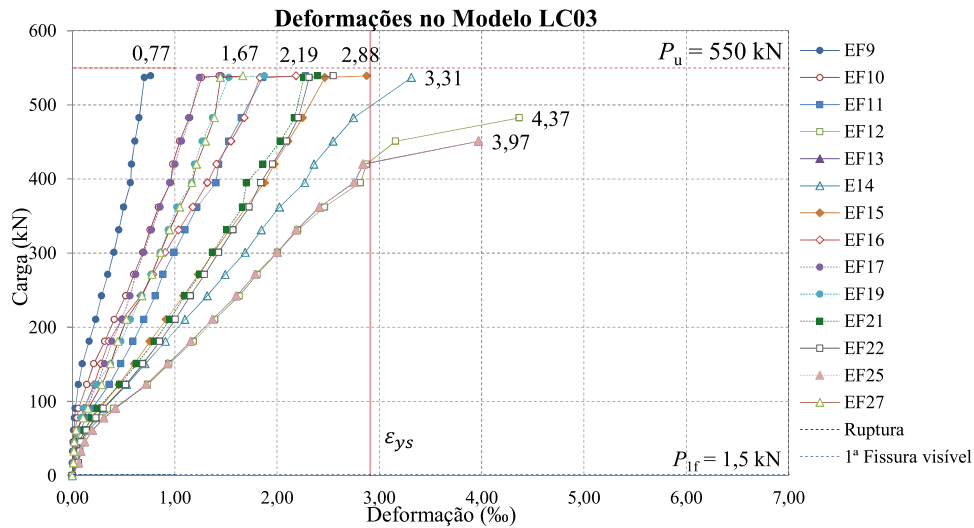


Figura 4.59 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC03

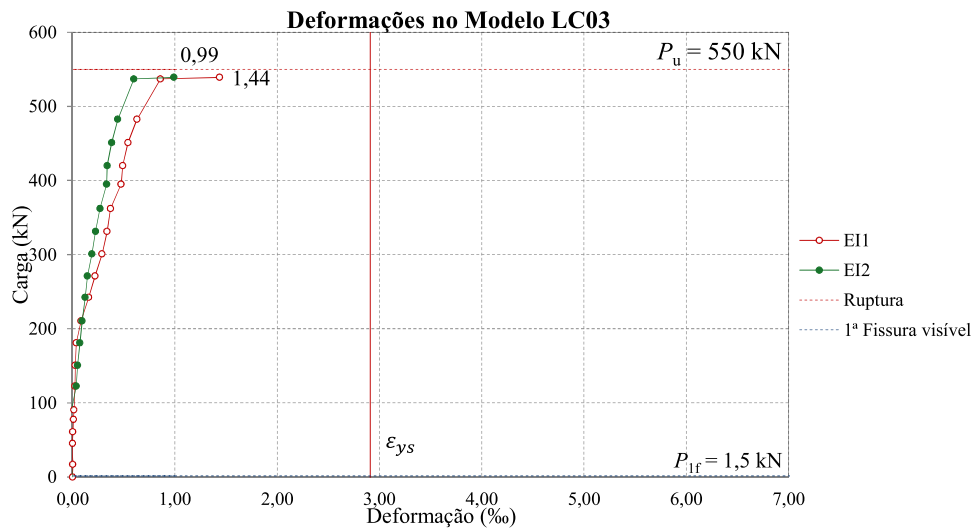


Figura 4.60 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LC03

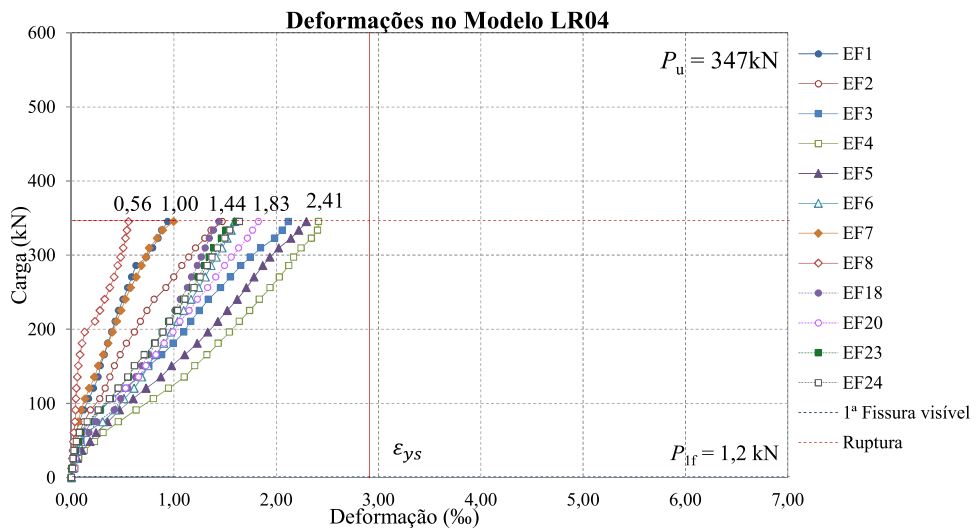


Figura 4.61 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR04

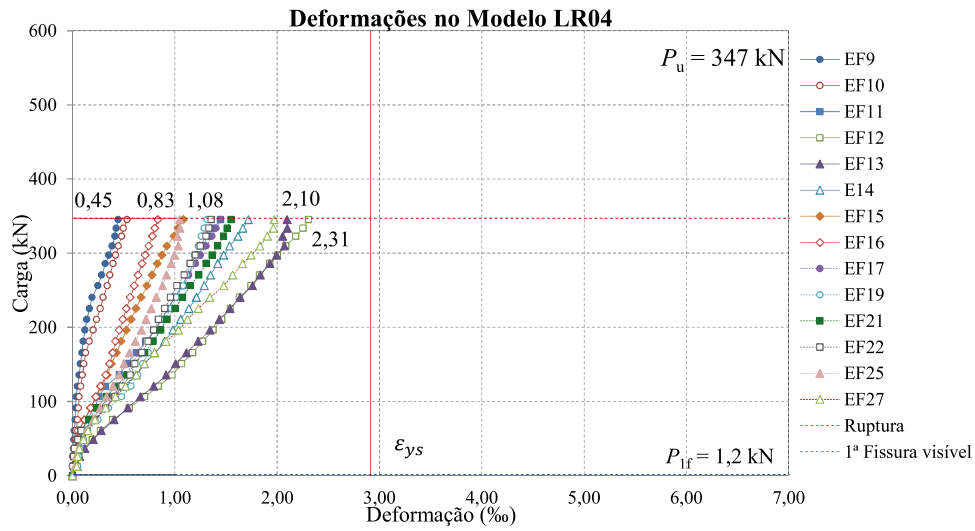


Figura 4.62 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR04

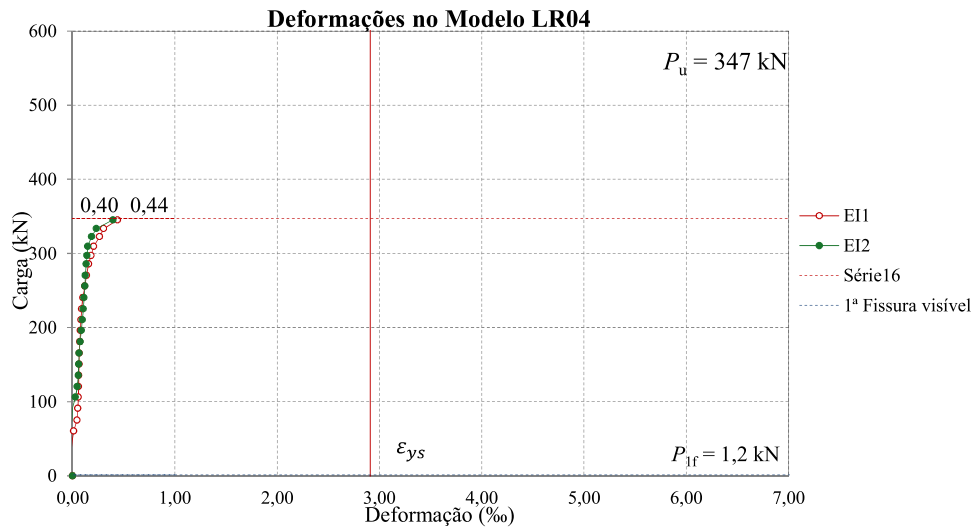


Figura 4.63 - Carga versus deformação na armadura de flexão do modelo LR04

4.5 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE CISLHAMENTO (*STUDS*)

Foram dispostas armaduras de cisalhamento nos modelos LC02 e LC03 com 3 e 4 camadas de *studs* dispostos de forma radial. Todas as camadas tiveram *studs* instrumentados para 5 linhas da armadura de cisalhamento, onde se posicionou dois extensômetros diametralmente opostos na barra de cada *stud* e o resultado da deformação de cada *stud*, para determinado passo de carga, é a média dos resultados registrados dos dois extensômetros a não ser que haja falha de algum extensômetro da armadura de cisalhamento durante os ensaios. Os gráficos das deformações na armadura de cisalhamento, juntamente com os valores de carga no momento da ruptura, são apresentados nas figuras que se seguem (Figura 4.64 à Figura 4.70).

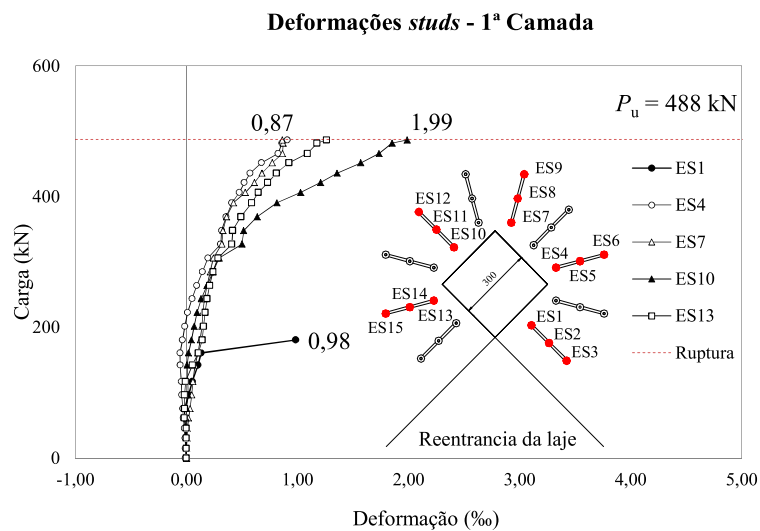


Figura 4.64 - Deformações na 1ª camada de *studs* do modelo LC02

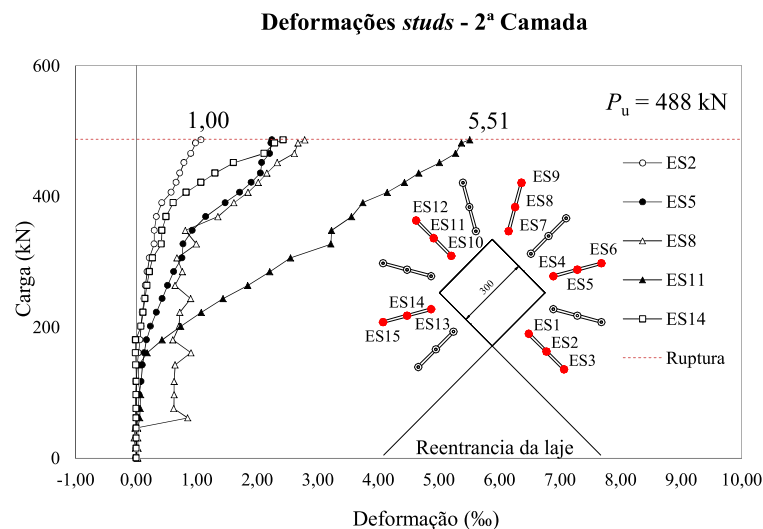


Figura 4.65 - Deformações na 2ª camada de *studs* do modelo LC02

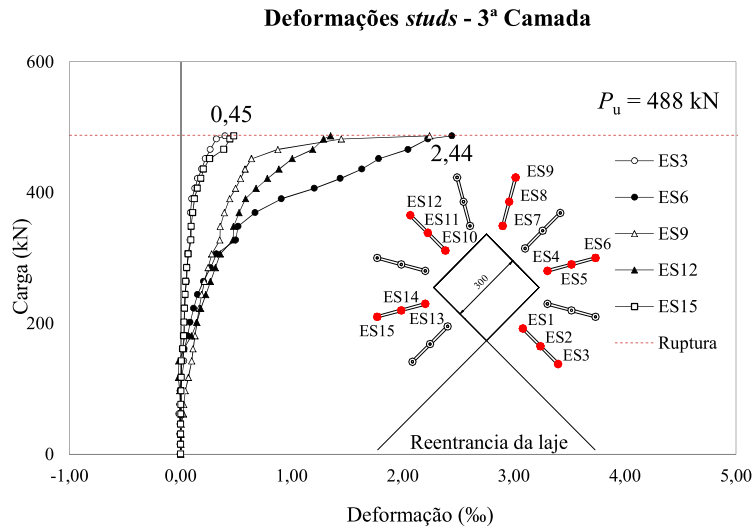


Figura 4.66 - Deformações na 3ª camada de *studs* do modelo LC02

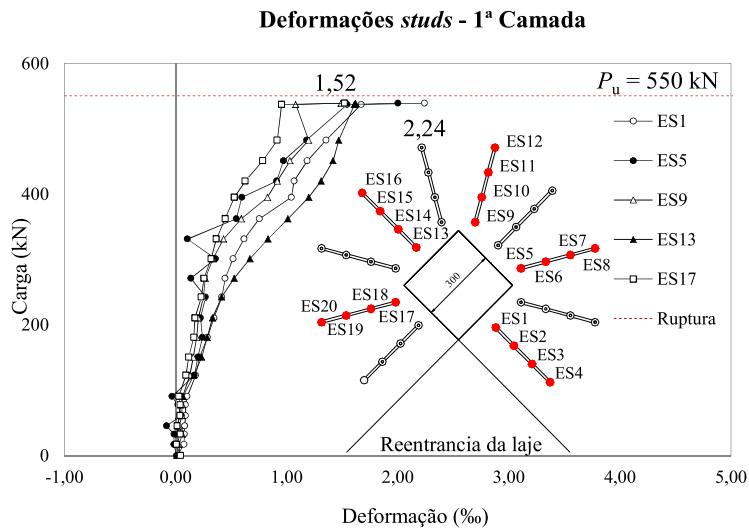


Figura 4.67 - Deformações na 1ª camada de *studs* do modelo LC03

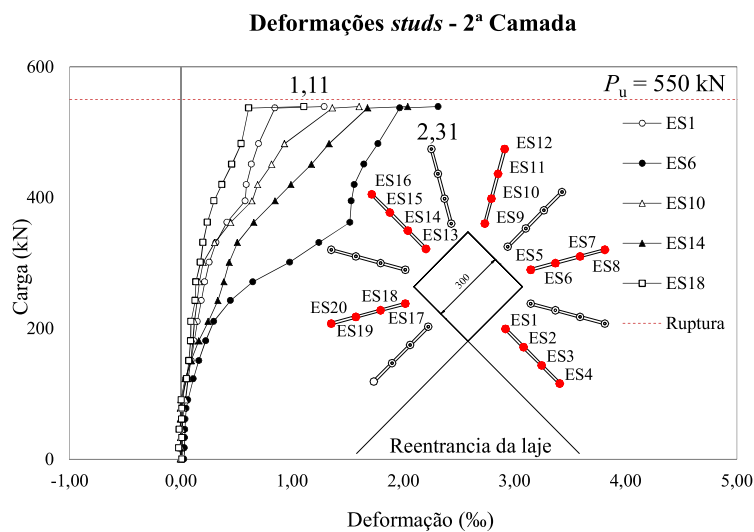


Figura 4.68 - Deformações na 2ª camada de *studs* do modelo LC03

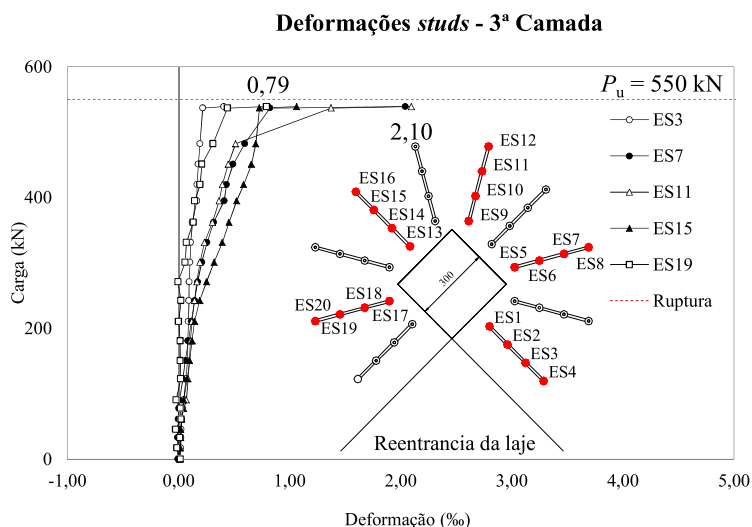


Figura 4.69 - Deformações na 3ª camada de studs do modelo LC03

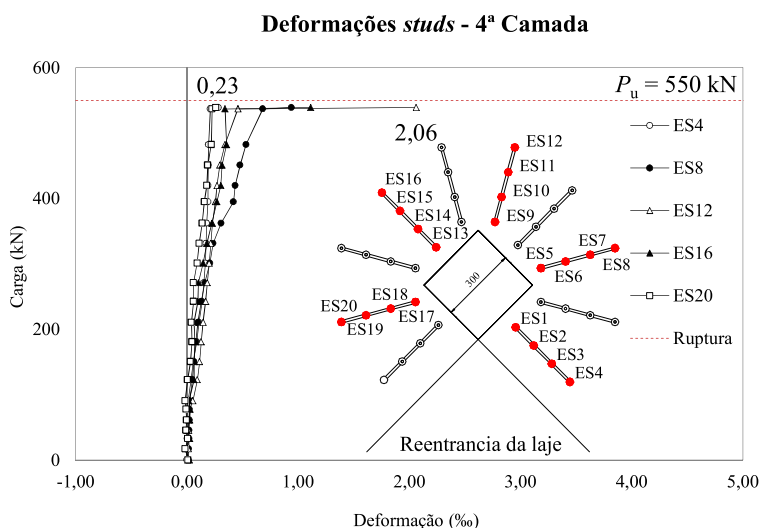


Figura 4.70 - Deformações na 4ª camada de studs do modelo LC03

4.6 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO

As deformações no concreto foram obtidas através de extensômetros elétricos de resistência posicionados na superfície inferior das lajes, próximos às faces dos pilares e em eixos que cruzam a laje. Os extensômetros foram posicionados nos eixos das lajes e dispostos de modo a registrarem as deformações tangenciais (EC1, EC2, EC3, EC4, EC5 e EC6) e radiais (EC7, EC8 e EC9) em relação às faces do pilar.

A seguir são apresentados os resultados de deformação obtidos através dos extensômetros posicionados nas superfícies de concreto inferiores das lajes e os respectivos valores de carga no momento do registro das deformações (Figura 4.71 à 4.74).

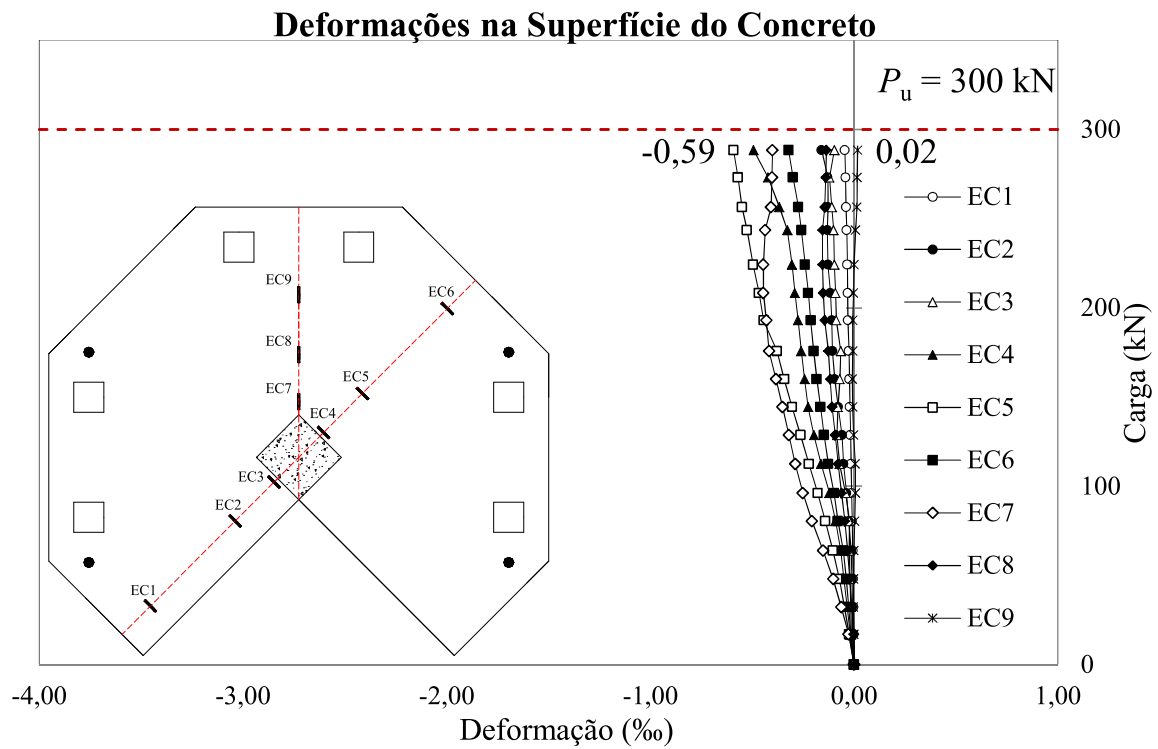


Figura 4.71 - Deformações na superfície do concreto do modelo LR01

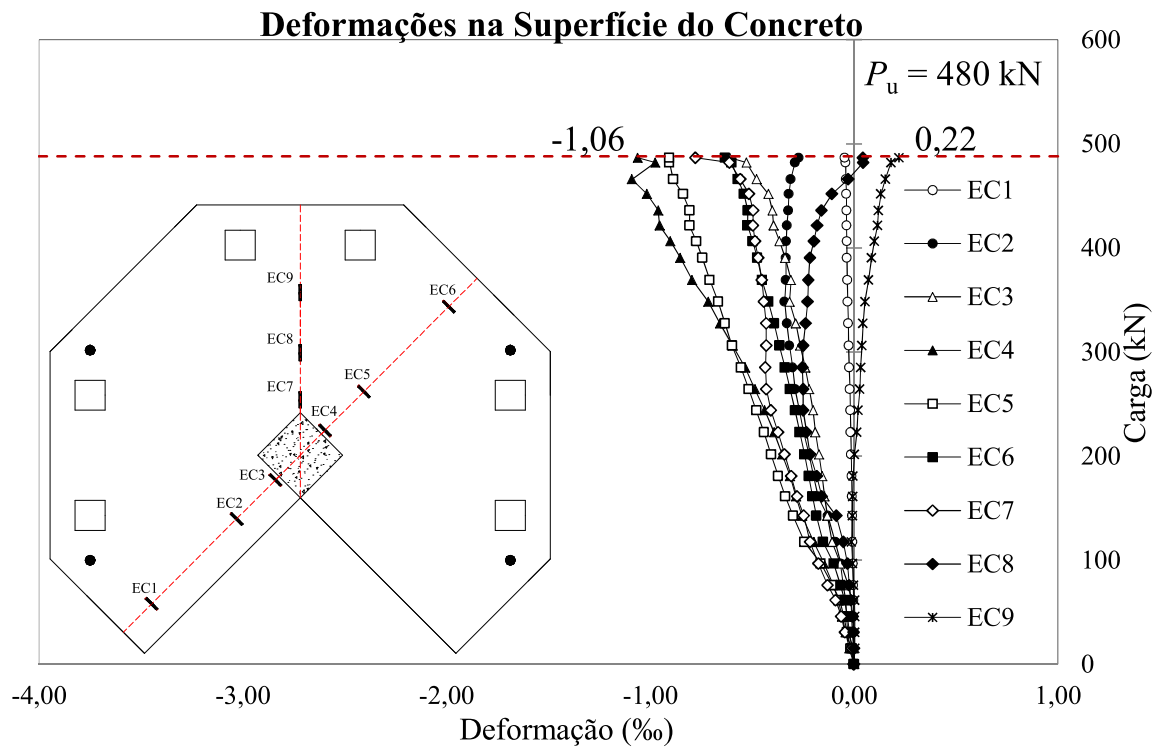


Figura 4.72 - Deformações na superfície do concreto do modelo LC02

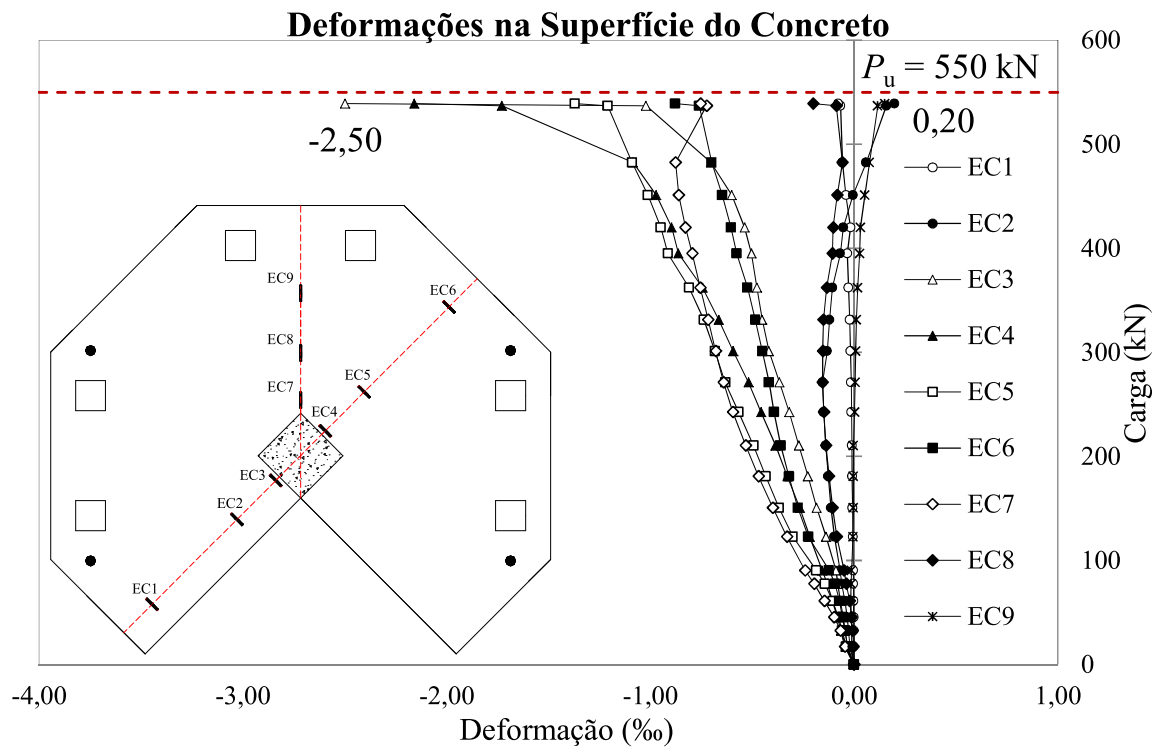


Figura 4.73 - Deformações na superfície do concreto do modelo LC03

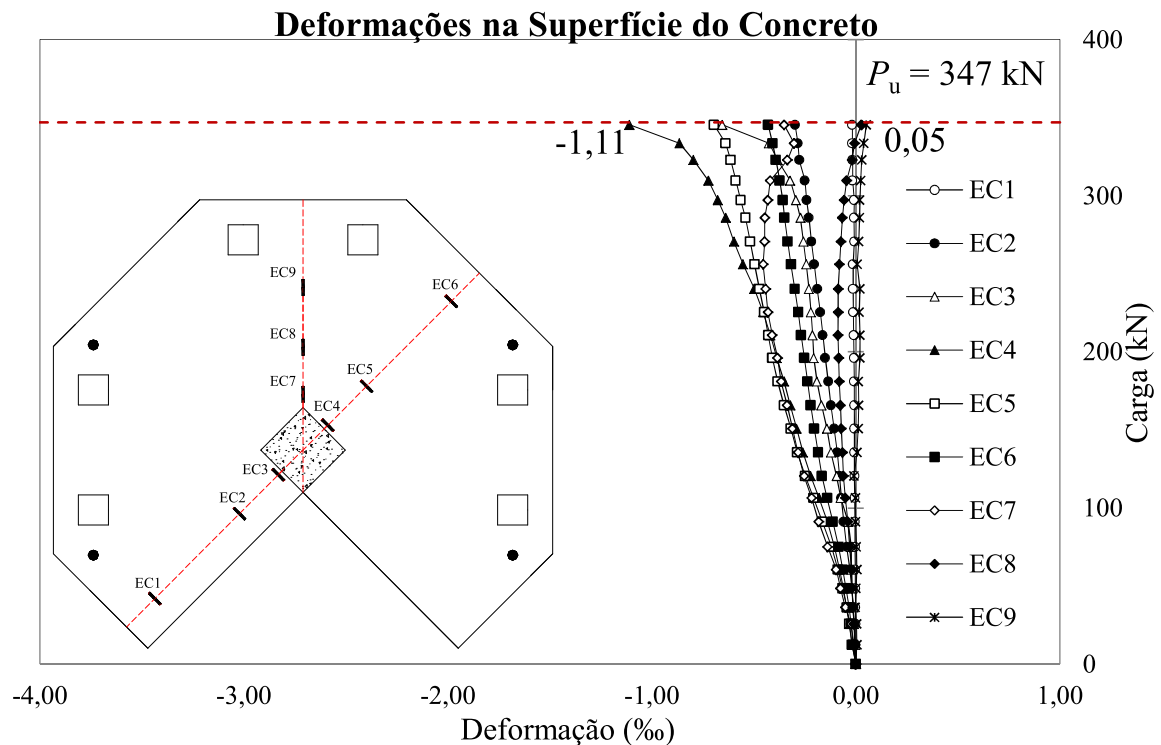


Figura 4.74 - Deformações na superfície do concreto do modelo LR04

4.7 ROTAÇÕES DAS LAJES

Acima da laje de cada modelo ensaiado foram dispostos dois inclinômetros, um de nível de bolha e um de pêndulo desenvolvido na Universidade de Brasília.

As rotações foram obtidas nas proximidades do pilar para as direções dos dois eixos que contêm as diagonais da seção do pilar. Para cada passo de carga aplicado nos modelos foram realizadas leituras de rotação das lajes, obtidas manualmente para o inclinômetro de nível de bolha e com o sistema de aquisição de dados para o inclinômetro de pêndulo. As Figuras 4.75 à 4.78 apresentam as rotações observadas para as lajes de cada modelo durante os ensaios.

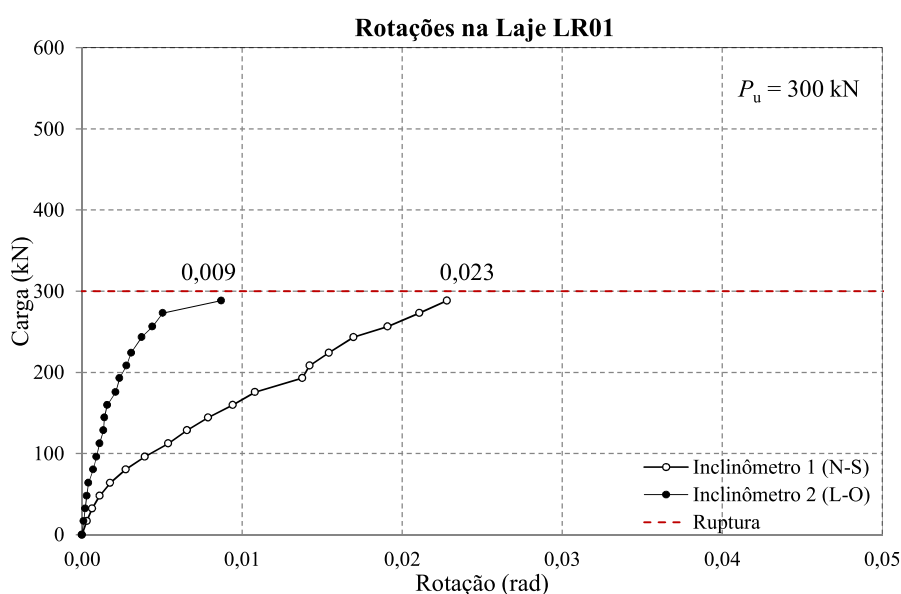


Figura 4.75 - Rotações na laje LR01

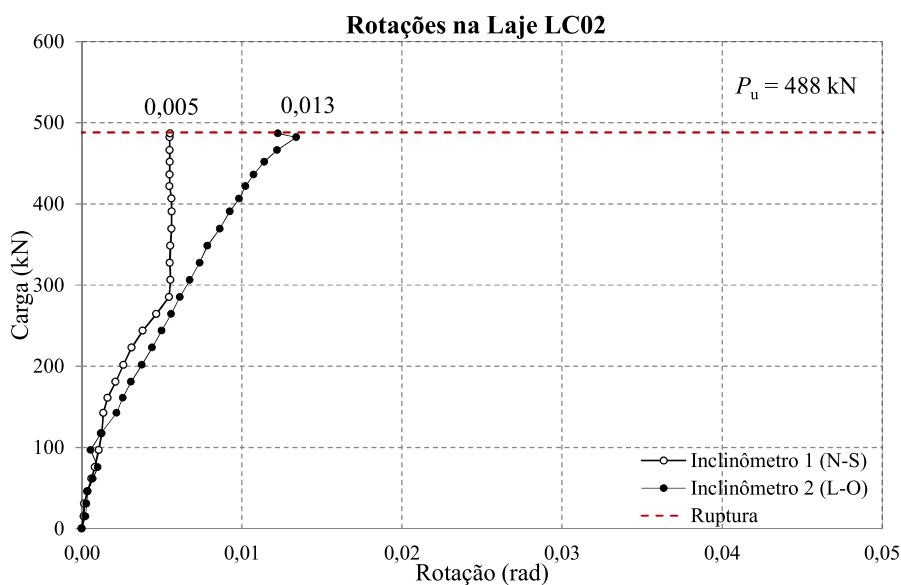


Figura 4.76 - Rotações na laje LC02

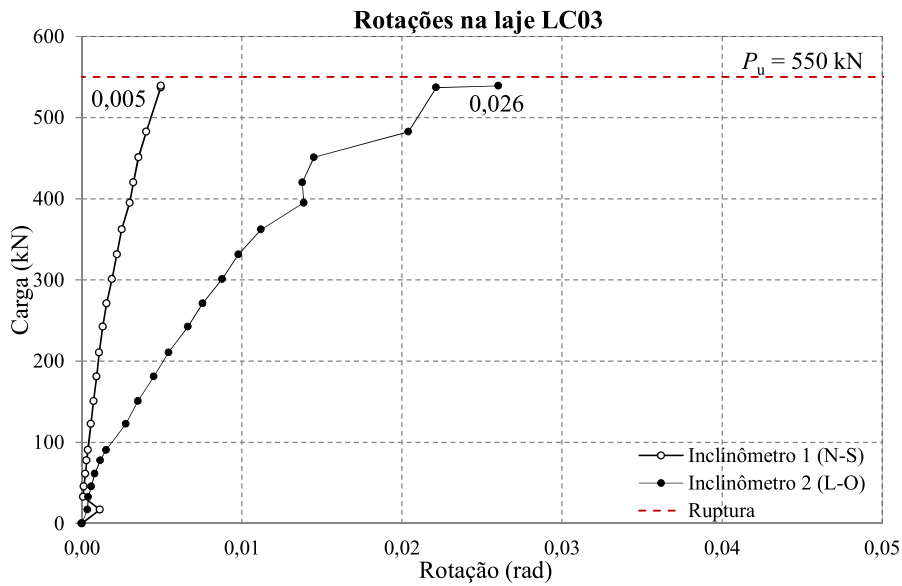


Figura 4.77 - Rotações na laje LC03

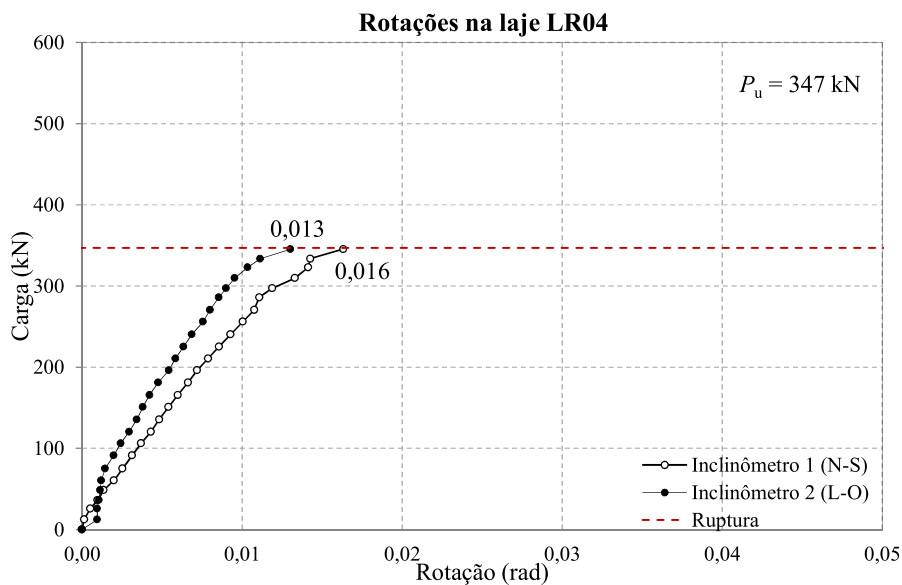


Figura 4.78 - Rotações na laje LR04

4.8 MAPA DE FISSURAÇÃO

Durante os ensaios o carregamento foi aplicado em passos de carga em torno de 16 kN para o modelo LR01 e 15 kN para os modelos LC02, LC03 e LR04. Após a aplicação de cada passo de carga houveram intervalos para registro das deformações no aço, no concreto, leitura das flechas através do sistema de aquisição de dados e acompanhamento da fissuração de cada modelo. As primeiras fissuras a surgirem na laje foram fissuras de flexão, localizadas na região em torno do pilar. Nas Figuras 4.79 à 4.82 são apresentados os mapas de fissuração dos quatro modelos após a realização dos ensaios.



Figura 4.79 - Configuração de fissuras do modelo LR01



Figura 4.80 - Configuração de fissuras do modelo LC02

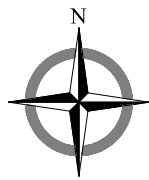


Figura 4.81 - Configuração de fissuras do modelo LC03

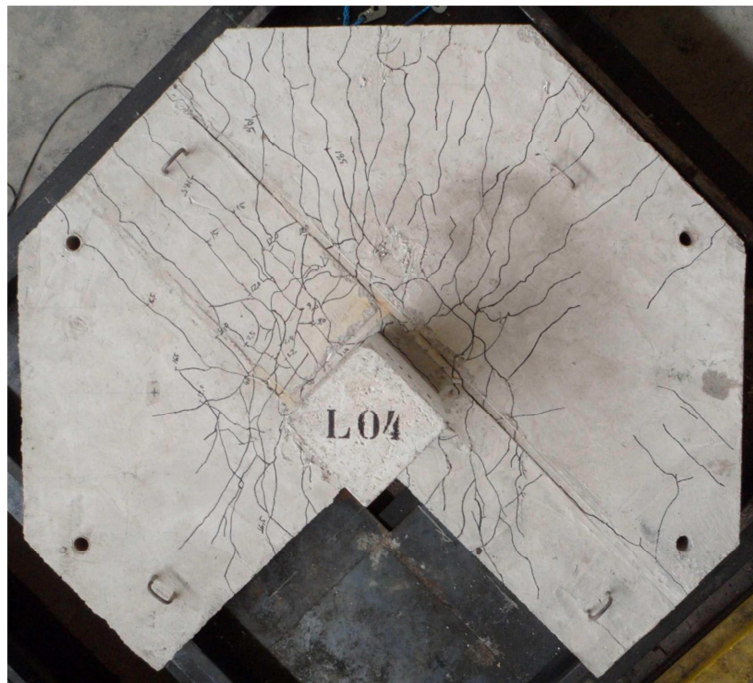
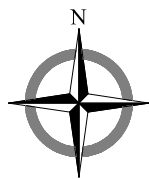


Figura 4.82 - Configuração de fissuras do modelo LR04

São apresentados nas Figuras 4.83 à 4.86 o aspecto das fissuras observadas na reentrância das lajes após a ruptura dos modelos.



Figura 4.83 – Aspecto das fissuras na reentrância da laje LR01

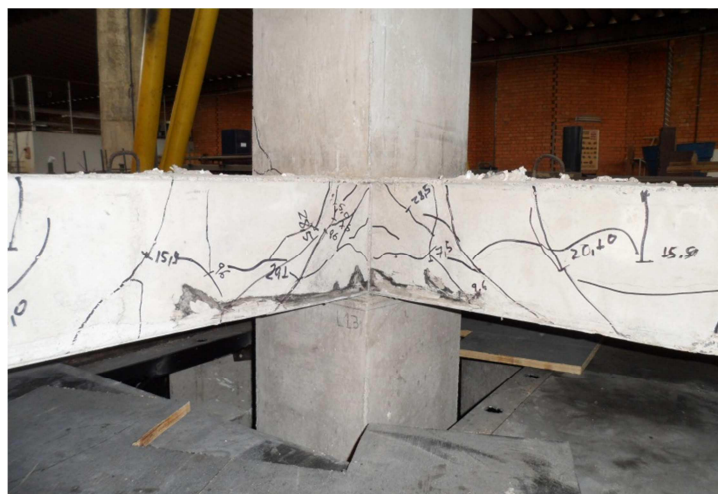


Figura 4.84 - Aspecto das fissuras na reentrância da laje LC02



Figura 4.85 - Aspecto das fissuras na reentrância da laje LC03

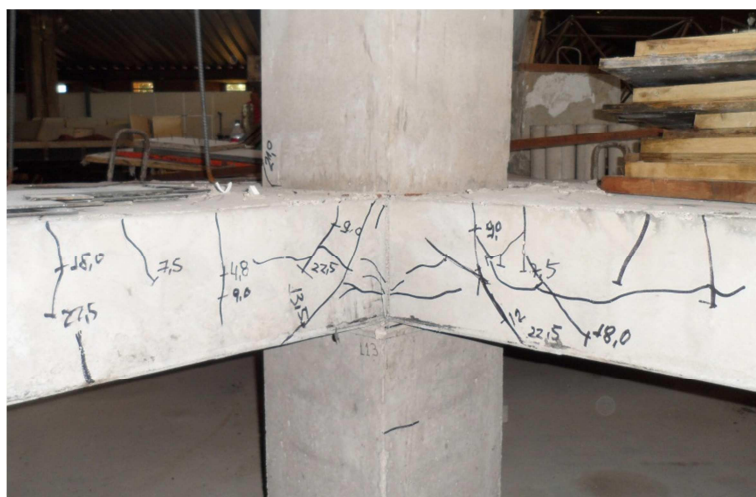


Figura 4.86 - Aspecto das fissuras na reentrância da laje LR04

4.9 RESUMO DOS RESULTADOS

Os resultados experimentais quanto aos valores máximos de deslocamentos verticais, deformação nas armaduras de flexão e de cisalhamento, deformação do concreto e carregamento de ruptura são resumidos na Tabela 4.7 e Tabela 4.8.

Tabela 4.7 - Resumo dos resultados experimentais (deslocamentos verticais e deformação na armadura de flexão)

Modelo	P_2/P_1	Armadura de Cisalhamento	h (mm)	f_{cm} (Mpa)	P_u (kN)	LVDT _{max}		$\epsilon_{f,max}$	
						LVDT	Desloc. (mm)	ϵ_f	Def. (10^{-3})
LR01	0,5	-	181	57,9	300	3	-24,77	12	2,36
LC02	1,0	3 camadas 10 ϕ 8mm	181	57,9	488	3	-18,53	26	4,36
LC03	1,0	4 camadas 10 ϕ 10mm	180	57,9	550	11	-33,41	4	4,82
LR04	1,0	-	180	57,9	347	3	-15,81	4	2,41

Laje Poligonal com 1036 mm de lado;
Pilar de canto reentrante com seção transversal de 300 mm x 300 mm;
10 *studs* com 8 ou 10 mm de diâmetro por camada de armadura de cisalhamento;
 ϵ_f é o numero do extensômetro mais solicitado;
O posicionamento de P_1 e P_2 é dado na Figura 3.22.

Tabela 4.8 - Resumo dos resultados experimentais (deformações na armadura de cisalhamento e na superfície do concreto)

Modelo	P_2/P_1	Nº de Cam.	f_{cm} (Mpa)	P_u (kN)	$\epsilon_{sc1,máx}$ (10^{-3})	$\epsilon_{sc2,máx}$ (10^{-3})	$\epsilon_{sc3,máx}$ (10^{-3})	$\epsilon_{sc4,máx}$ (10^{-3})	$\epsilon_{c,máx}$	
									e_c	Def. (10^{-3})
LR01	0,5	-	57,9	300	-	-	-	-	5	-0,59
LC02	1,0	3	57,9	488	1,99	5,51	2,44	-	4	-1,06
LC03	1,0	4	57,9	550	2,24	2,31	2,10	2,06	3	-2,50
LR04	1,0	-	57,9	347	-	-	-	-	4	-1,11

Laje Poligonal com 1036 mm de lado;
Pilar de canto reentrante com seção transversal de 300 mm x 300 mm;
10 *studs* com 8 ou 10 mm de diâmetro por camada de armadura de cisalhamento;
 $\epsilon_{sc,máx}$ é a máxima deformação obtida para cada camada da armadura de cisalhamento;
 e_c é o numero do extensômetro mais solicitado na superfície do concreto.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises dos resultados experimentais obtidos com os ensaios dos modelos. Serão realizadas análises quanto ao comportamento dos modelos no decorrer dos ensaios e em relação à reconhecidos códigos de projetos de estruturas, como o Eurocode 2:2004, ACI 318:2008 e NBR 6118:2007, tendo como objeto de análise as variações das deformações das barras da armadura de flexão, da armadura de cisalhamento, dos deslocamentos verticais, das cargas últimas e modos de ruptura obtidos nos ensaios.

Os modelos ensaiados foram divididos em grupos de acordo com os parâmetros envolvidos na pesquisa. O Grupo 1 é composto pelos modelos LR01 e LR04 que não apresentam armadura de cisalhamento, apenas variação na proporção das cargas aplicadas em cada modelo, sendo P_1/P_2 igual a 0,5 para o modelo LR01 e 1,0 para o modelo LR04. O Grupo 2 tem como elementos os modelos LC02 e LC03 que apresentam armadura de cisalhamento do tipo *double-headed stud* com distribuição radial e variação no número de camadas, com três e quatro camadas para os modelos LC02 e LC03 respectivamente. A Tabela 5.1 apresenta o resumo dos grupos formados para as análises e as Figuras 5.1 e 5.2 mostram as variáveis para cada modelo.

Tabela 5.1 - Grupos e parâmetros analisados.

GRUPOS	MODELOS	EM COMUM	VARIÁVEL DE ENSAIO
Grupo 1	LR01 e LR04	Sem armadura de cisalhamento	Relação P_2/P_1
Grupo 2	LC02 e LC03	Com armadura de cisalhamento e mesma Excentricidade de carga	Quantidade de camadas e diâmetro das armaduras de cisalhamento

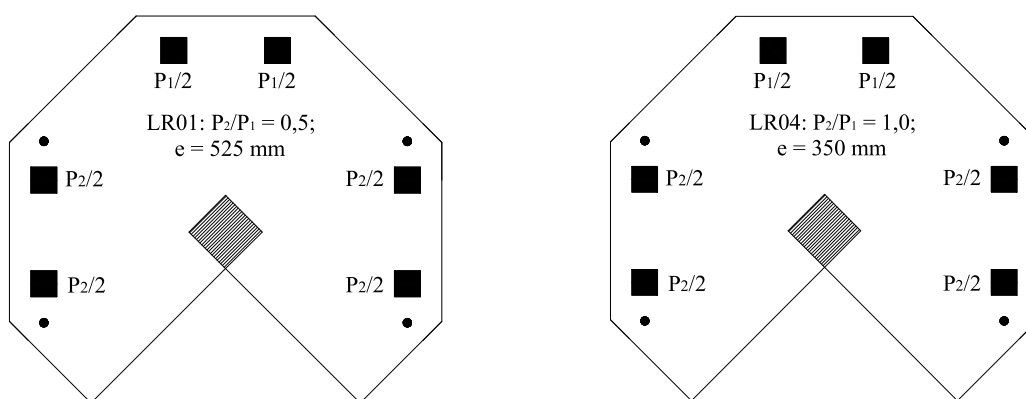


Figura 5.1 - Resumo das características dos modelos do Grupo 1

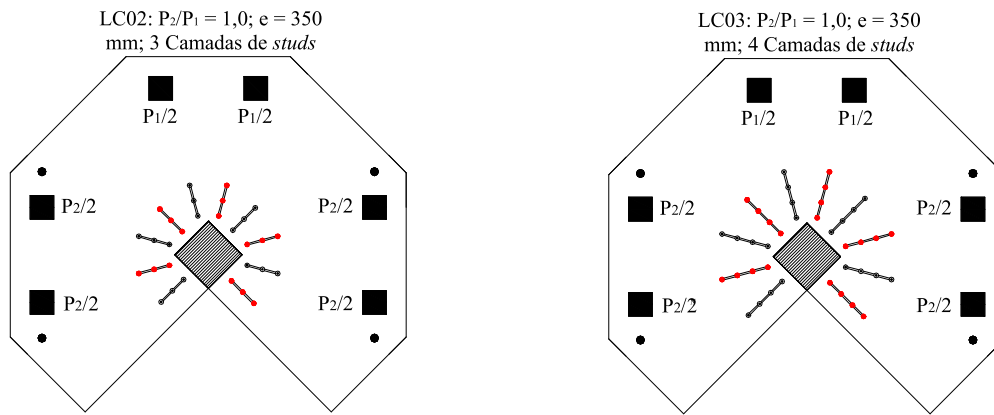


Figura 5.2 - Resumo das características dos modelos do Grupo 2

5.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Considerando as leituras de deslocamentos verticais durante os ensaios, pode-se notar que o modelo LC03 apresentou maiores deflexões para todas as direções de disposição dos LVDTs, com valores máximos de 23,02 mm na direção S-N, 18,95 mm na direção L-O, 32,85 mm na direção SO-NE e 33,41 mm na direção SE-NO. Para os modelos do Grupo 1, a laje LR01, onde houve uma maior transferência de momento, apresentou maiores deslocamentos verticais em todas as direções de posicionamento dos LVDTs, com valores máximos de 22,03 mm na direção S-N, 10,10 mm na direção L-O, 24,77 na direção SO-NE e 24,46 mm na direção SE-NO.

Devido à menor razão entre as cargas aplicadas P_2 e P_1 , houve, no modelo LR01, levantamento da laje nas direções SO-NE e SE-NO registrado pelos LVDTs L10, L8, L1 e L4, conforme apresentado nas Figuras 5.5 e 5.6. A Tabela 5.2 e a Tabela 5.3 apresentam os valores de deslocamentos máximos para os quatro modelos nas direções de medição consideradas e as Figuras 5.3 à 5.6 apresentam gráficos comparativos para os deslocamentos registrados no instante próximo da ruptura de cada modelo.

Para os modelos LC02, LC03 e LR04 os deslocamentos verticais registrados no instante próximo da ruptura de cada modelo apresentaram quase sempre valores maiores para os modelos com maiores cargas de ruptura, assim o modelo LC03 apresentou os maiores deslocamentos para os pontos ao redor dos pilares, com valores máximos de 2,96 mm para a direção S-N e 2,18 mm na direção L-O. O modelo LR01 apresentou comportamento próprio devido a maior intensidade de momento desbalanceado incidente, como pode ser constatado nas Figuras 5.3 à 5.6.

Tabela 5.2 - Deslocamentos verticais nas direções S-N e L-O

Direção	S - N				L - O			
LVDT	LVDT 13	LVDT 14	LVDT 06	LVDT 07	LVDT 02	LVDT 12	LVDT 15	LVDT 16
LR01	0,34	-1,52	-12,15	-22,03	-7,26	0,15	-1,31	-10,10
LC02	0,06	-1,67	-7,03	-16,69	-11,57	-0,34	-0,01	-17,16
LC03	-0,27	-2,96	-11,93	-23,02	-16,47	-2,18	-1,09	-18,95
LR04	-0,48	-1,72	-5,26	-10,46	-8,88	-1,49	-0,58	-9,22

Valores em milímetros

Tabela 5.3 - Deslocamentos verticais nas direções SO-NE e SE-NO

Direção	SO - NE				SE - NO			
LVDT	LVDT 10	LVDT 08	LVDT 05	LVDT 03	LVDT 01	LVDT 04	LVDT 09	LVDT 11
LR01	5,28	1,92	-13,51	-24,77	5,74	3,25	-12,98	-24,46
LC02	-4,84	-0,80	-11,21	-24,41	-1,38	-0,18	-11,51	-26,13
LC03	-2,69	0,02	-16,40	-32,85	-2,59	-1,27	-15,55	-33,41
LR04	-3,76	-0,80	-7,84	-15,81	-3,02	-1,18	-6,92	-15,40

Valores em milímetros

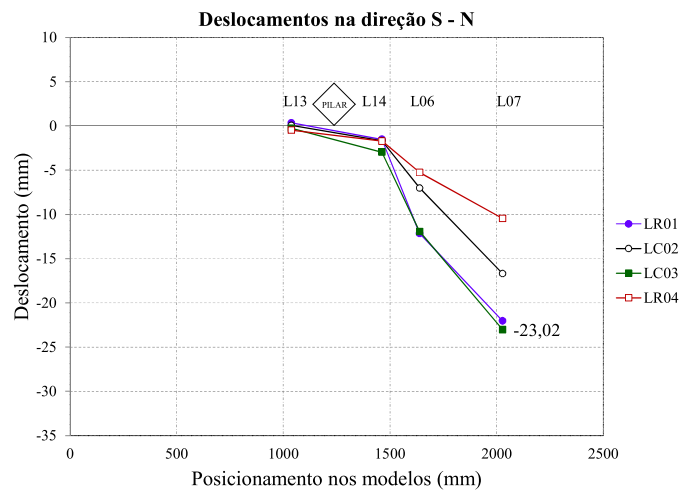


Figura 5.3 – Deslocamentos verticais máximos na direção S-N dos modelos ensaiados

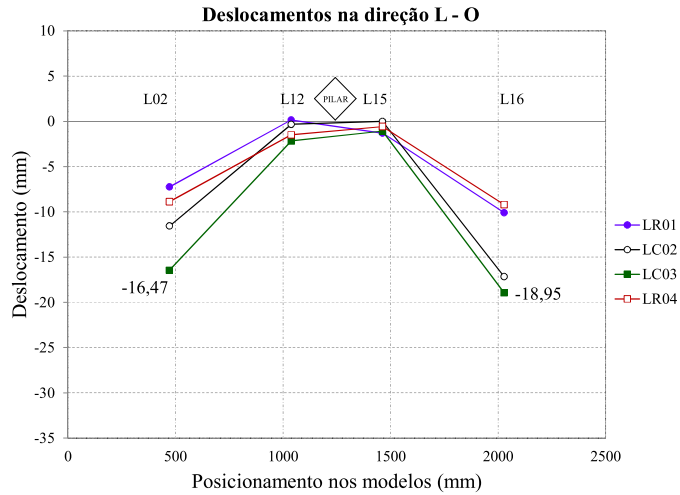


Figura 5.4 - Deslocamentos verticais máximos na direção L-O dos modelos ensaiados

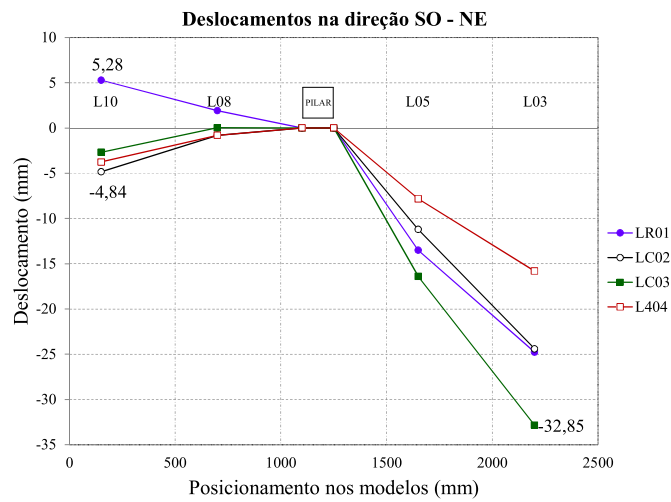


Figura 5.5 - Deslocamentos verticais máximos na direção SO-NE dos modelos ensaiados

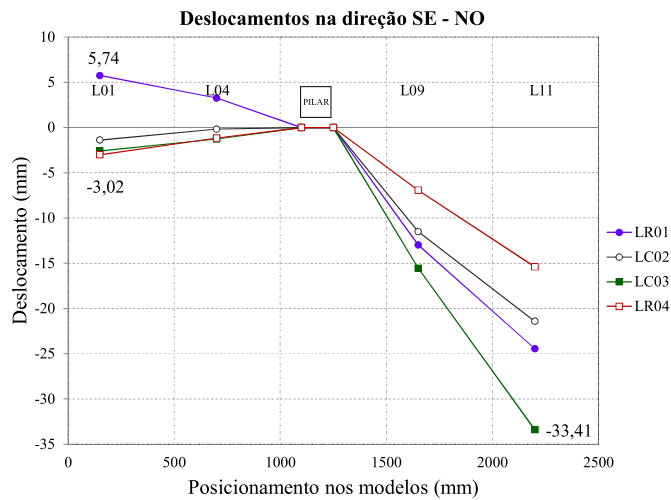


Figura 5.6 - Deslocamentos verticais máximos na direção SE-NO dos modelos ensaiados

Quanto aos deslocamentos registrados na borda N-S e em uma borda na direção L-O, constatou-se que, para todos os modelos, os maiores valores de deslocamento verticais foram registrados pela régua 2, posicionada na direção N-S, devido à transferência de momento da laje para o pilar nesta direção.

Para a direção N-S observou-se que, em relação aos modelos do Grupo 1, os modelos do Grupo 2 apresentaram maiores deslocamentos verticais na borda da laje, devido à maior carga resistente proporcionada pelo uso da armadura de cisalhamento. As lajes LC02 e LC03 apresentaram, respectivamente, valores máximos de deslocamento vertical na borda igual a 58 mm e 37 mm. Quanto aos modelos do Grupo 1 observou-se que o modelo LR01 apresentou maiores valores de deslocamento vertical na borda N-S em relação ao modelo LR04, devido à maior excentricidade de carga aplicada nessa direção ($e=525$ mm). Para as lajes LR01 e LR04 foram registrados valores máximos de deslocamento vertical na borda N-S iguais a 24 mm e 17 mm, respectivamente. A Figura 5.7 apresenta os deslocamentos verticais registrados no decorrer dos ensaios dos modelos para a aresta inferior da borda N-S.

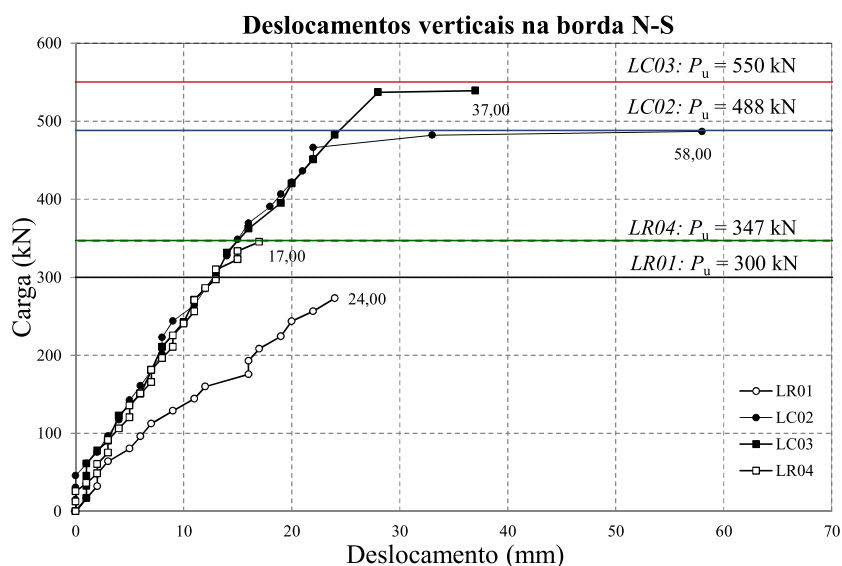


Figura 5.7 - Deslocamento vertical na borda N-S para os modelos ensaiados

Para a direção L-O, na qual os deslocamentos verticais foram obtidos com a régua 1, posicionada próxima da borda L, constatou-se que os maiores deslocamentos verticais também ocorreram para os modelos do Grupo 2, sendo registrado, próximo da ruptura, valores máximos de deslocamento vertical iguais a 40 mm e 29 mm para as lajes LC02 e LC03, respectivamente. Para as lajes do Grupo 1, ao contrário do observado na direção N-S, ocorreram maiores deslocamentos verticais na direção L-O para o modelo LR04, com

15 mm, enquanto que para o modelo LR01 foi observado 7 mm de deslocamento vertical para o passo de carga com valor mais próximo ao da carga de ruptura. A Figura 5.8 apresenta os deslocamentos verticais registrados no decorrer dos ensaios dos modelos para a aresta inferior da borda L (leste) dos modelos.

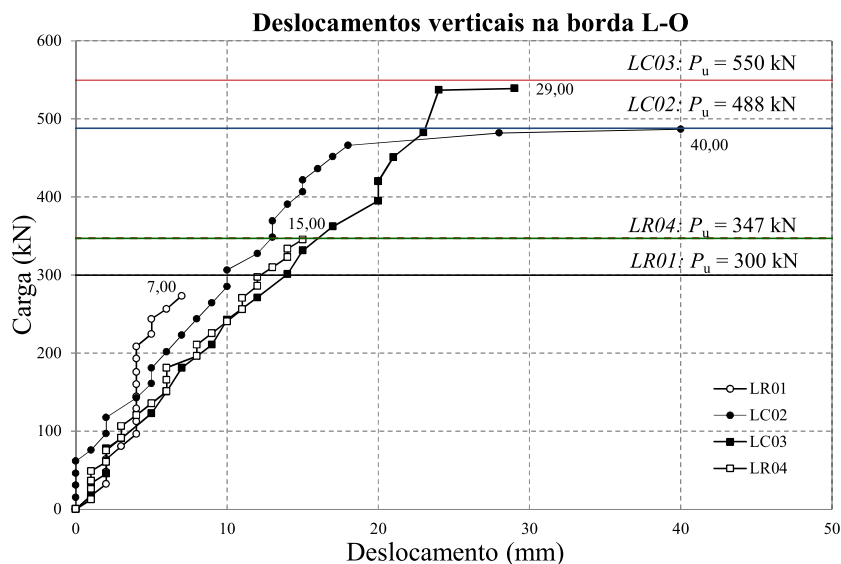


Figura 5.8 - Deslocamento vertical em uma das bordas na direção L-O para os modelos ensaiados

5.2 DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO

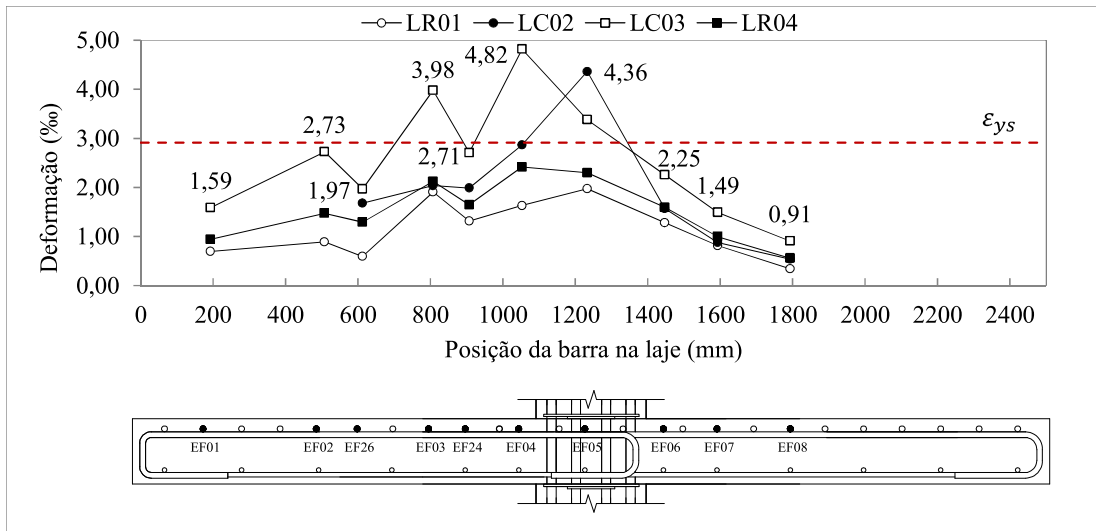
Com os resultados obtidos através dos extensômetros posicionados nas armaduras de flexão superior e inferior pôde-se constatar que os modelos que apresentaram deformações específicas mais acentuadas foram os pertencentes ao Grupo 2, onde a armadura de cisalhamento mostrou-se bastante eficiente, o que foi comprovado com o aumento das cargas resistentes dos modelos LC02 e LC03, que apresentaram vários pontos de escoamento na aço para a armadura de flexão superior. Os modelos do Grupo 1 não apresentaram pontos instrumentados com deformações específicas do aço superiores ao limite de escoamento. Os pontos de escoamento do aço da armadura de flexão se deram principalmente nas proximidades do pilar, como pode ser constatado através dos gráficos comparativos apresentado nas Figura 5.9 e 5.10. A deformação de escoamento do aço foi obtida com a seguinte equação:

$$\sigma_y = \varepsilon_y \cdot E_s \rightarrow \varepsilon_y = 2,91 \text{ ‰} \quad (5.1)$$

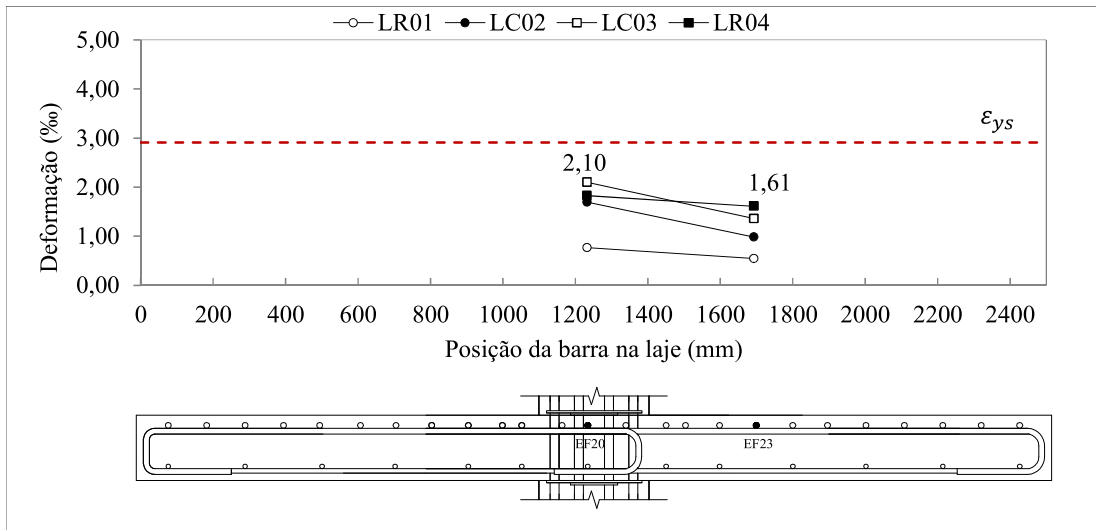
onde:

$f_y = 560 \text{ MPa}$ (tensão de escoamento do aço);

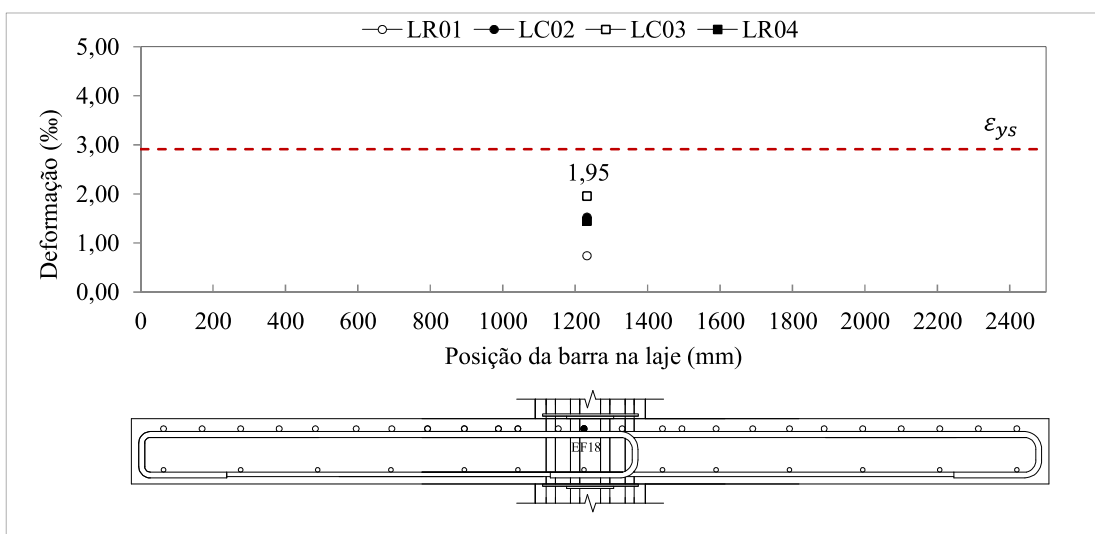
$E_s = 192.000 \text{ MPa}$ (módulo de elasticidade do aço).



(a)

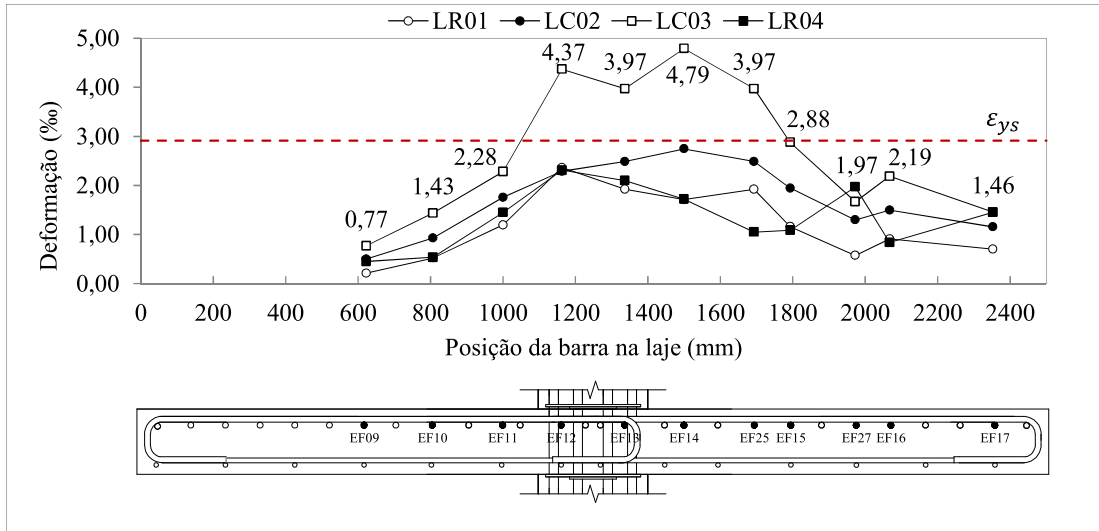


(b)

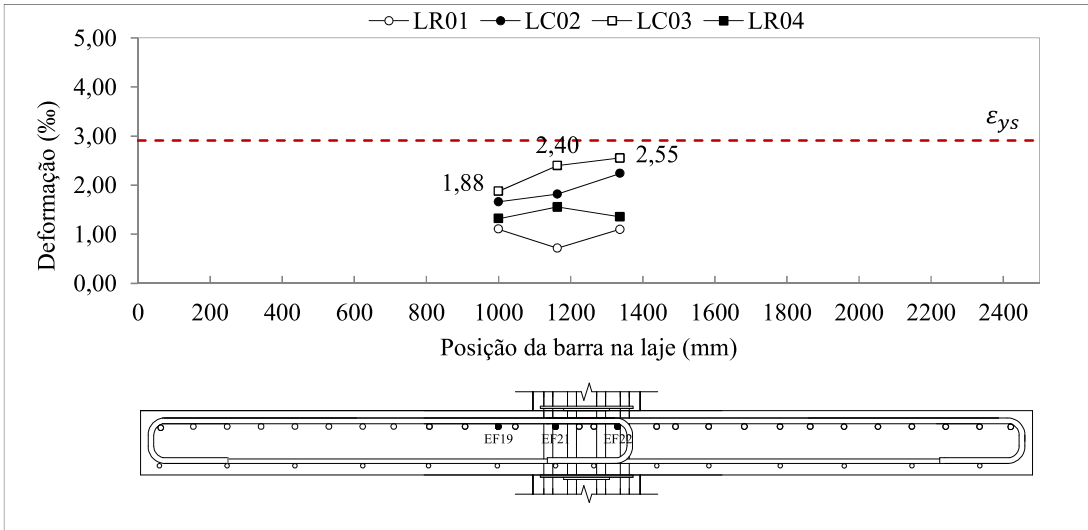


(c)

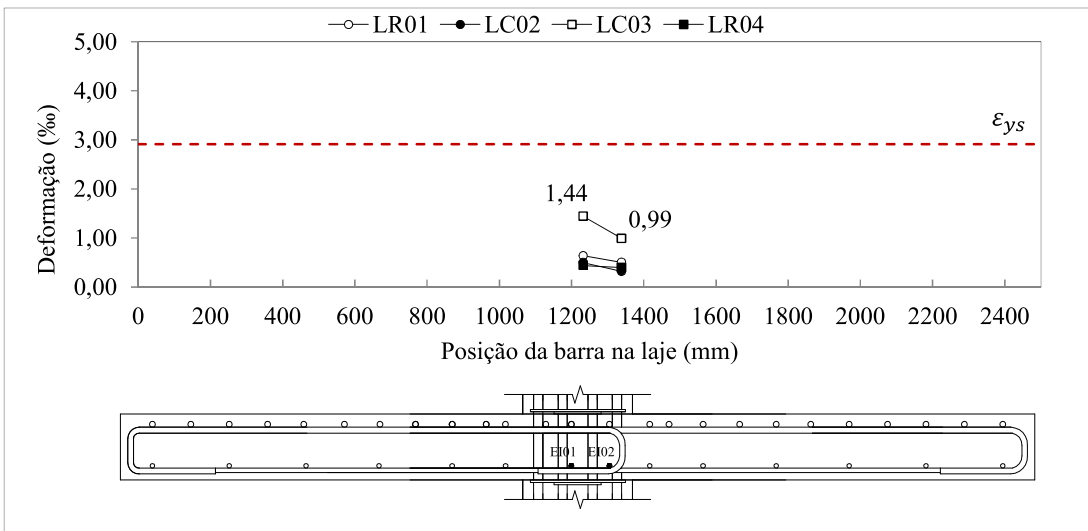
Figura 5.9 - Deformações na armadura de flexão superior na direção NO-SE



(a)



(b)



(c)

Figura 5.10 - Deformações na armadura de flexão superior na direção SO-NE

Para os quatro modelos ensaiados, a armadura de flexão inferior não apresentou pontos instrumentados que apresentassem escoamento do aço. No modelo LC03 constatou-se maior solicitação da armadura de flexão inferior.

A Tabela 5.4 apresenta os extensômetros que registraram os pontos mais solicitados da armadura de flexão superior e inferior e os respectivos valores de deformação específica no aço para intensidades de carga próximas da carga de ruptura.

Tabela 5.4 - Extensômetros mais solicitados na armadura de flexão

Modelo	Localização	Direção	Ext.	Deformação (%)
LR01	Superior	NO-SE	EF5	1,97
		SO-NE	EF12	2,36
	Inferior	-	EI1	0,63
LC02	Superior	NO-SE	EF5	4,36
		SO-NE	EF14	2,75
	Inferior	-	EI1	0,50
LC03	Superior	NO-SE	EF4	4,82
		SO-NE	EF14	4,79
	Inferior	-	EI1	1,44
LR04	Superior	NO-SE	EF4	2,41
		SO-NE	EF12	2,31
	Inferior	-	EI1	0,44

5.3 ARMADURA DE CISALHAMENTO

Observou-se pelas deformações específicas nas armaduras de cisalhamento que o modelo LC02 foi o único que apresentou escoamento nos *studs*, sendo que a camada de armadura de cisalhamento mais solicitada foi a 2ª camada, onde foi registrada, pelo extensômetro equivalente ES11, a deformação máxima de 5,51%.

Os *studs* que compuseram as camadas da armadura de cisalhamento do modelo LC03 não apresentaram deformações específicas superiores a 2,50%, sendo que a camada mais solicitada para este modelo foi a 1ª camada, onde foi registrado, pelo extensômetro equivalente ES1, o valor máximo de deformação igual a 2,24%.

Comparando-se o comportamento das armaduras de cisalhamento para os modelos LC02 e LC03 pôde-se constatar que a 2ª e 3ª camadas de *studs* do espécime LC02 foram mais solicitadas que no modelo LC03. As camadas de *studs* que apresentaram menores valores

de deformação específica do aço foram as camadas 1 e 4 para os modelos LC02 e LC03, respectivamente.

A Figura 5.11 apresenta a disposição dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento dos modelos LC02 e LC03, onde também é mostrada a numeração das linhas de *studs* que foram consideradas na plotagem dos gráficos da Figura 5.12. A Tabela 5.5 apresenta os extensômetros que registraram os máximos valores de deformação específica na armadura de cisalhamento e seus respectivos valores.

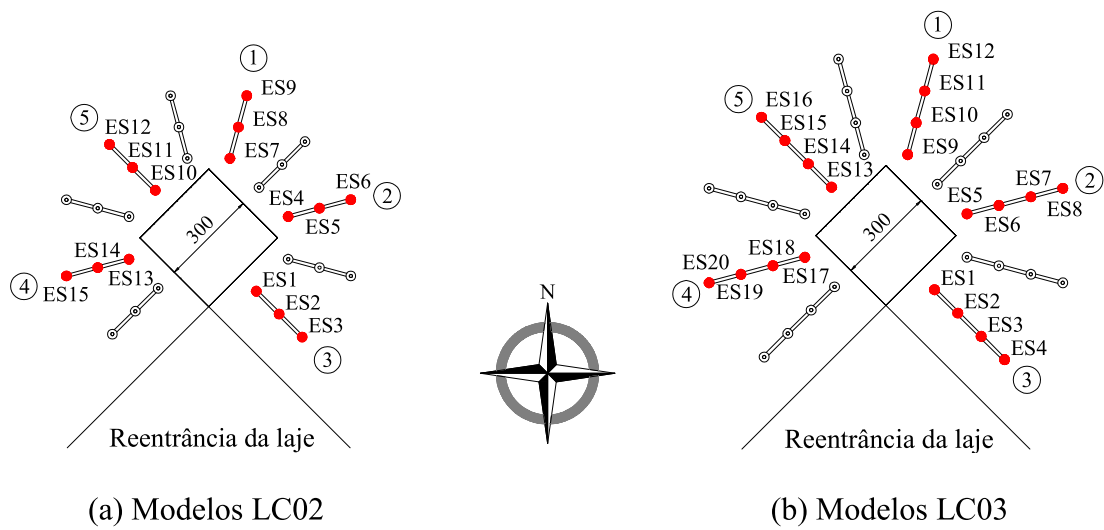
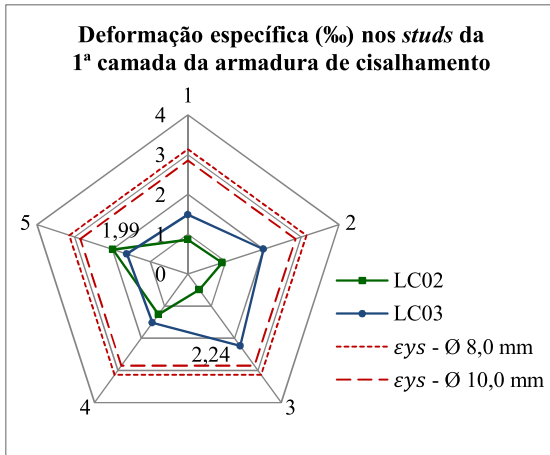
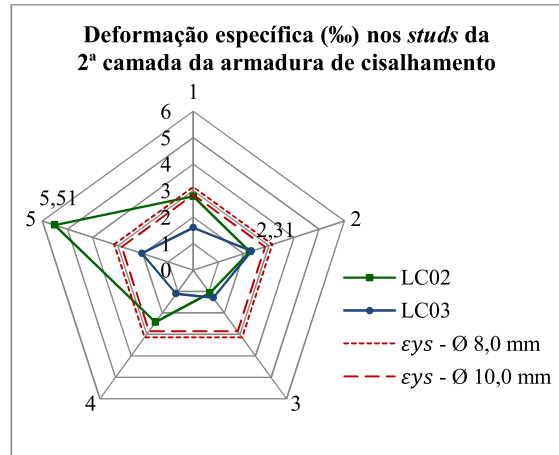


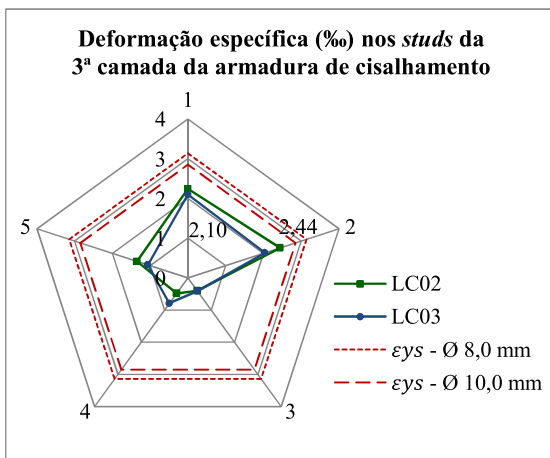
Figura 5.11 - Disposição dos extensômetros na armadura de cisalhamento



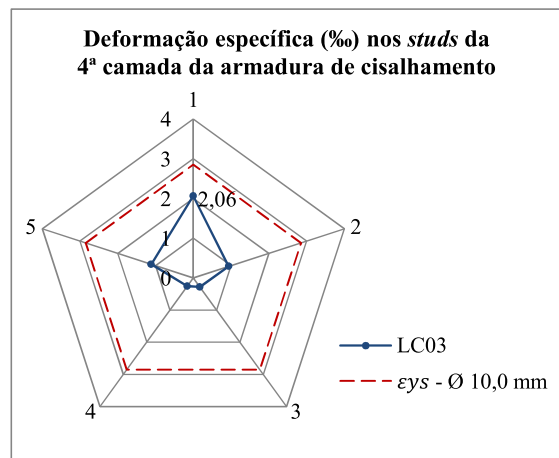
(a) Deformações na 1ª camada de studs



(b) Deformações na 2ª camada de studs



(c) Deformações na 3ª camada de studs



(d) Deformações na 4ª camada de studs

Figura 5.12 - Deformações registradas pelos extensômetros da armadura de cisalhamento

Tabela 5.5 - Valores máximos de deformação na armadura de cisalhamento

Modelo	Posição	Ext.	Deformação (‰)
LC02	Camada 1	ES10	1,99
	Camada 2	ES11	5,51
	Camada 3	ES6	2,44
LC03	Camada 1	ES1	2,24
	Camada 2	ES6	2,31
	Camada 3	ES11	2,10
	Camada 4	ES12	2,06

Obs: a camada 1 é a mais próxima do pilar e a camada 4 a mais distante.

5.4 DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

De acordo com as leituras de deformação dos extensômetros do concreto, constata-se que os pontos onde ocorreram maiores deformações à compressão foram os localizados nas proximidades do pilar, onde foram posicionados os extensômetros EC3, EC4, EC5 e EC7, sendo observadas grandes deformações relativas para o ponto onde posicionou-se o extensômetro EC6. No modelo LC03 foram registradas as maiores deformações de compressão para o concreto, onde a máxima deformação registrada foi de 2,50 ‰ na posição do extensômetro EC3.

Os modelos do Grupo 2 foram os que apresentaram maiores deformações registradas, denotando assim uma maior ductilidade dos modelos LC02 e LC03 em comparação com os modelos do Grupo 1, onde o modelo LR04 apresentou maiores valores de deformação à compressão para todos os pontos monitorados com exceção do ponto do extensômetro EC1, que apresentou pequenos valores de deformação para os quatro modelos. A Figura 5.13 resume o comportamento de todos os extensômetros posicionados na superfície inferior das lajes dos modelos para carregamentos próximos à carga de ruptura de cada modelo.

Constatou-se a ocorrência de flexão em torno da direção SO-NE dos modelos na parte norte da laje, observada a partir das deformações dos extensômetros EC4, EC5 e EC6, com provável comportamento similar na direção SE-NO. Até bem próximo da ruptura os extensômetros EC4 e EC5 apresentavam deformações semelhantes e EC6 deformações um pouco menores.

Observando o comportamento registrado pelos extensômetros posicionados na superfície inferior das lajes dos modelos pôde-se notar que alguns extensômetros apresentaram comportamento de tração para os carregamentos com intensidade próxima da carga de ruptura dos modelos. O extensômetro EC9 registrou tração para todos os modelos ensaiados, o extensômetro EC8 registrou comportamento de tração para os modelos LC02 e LR04 e o extensômetro EC2 registrou deformações de alongamento para o modelo LC02, como pode ser observado na Figura 5.13.

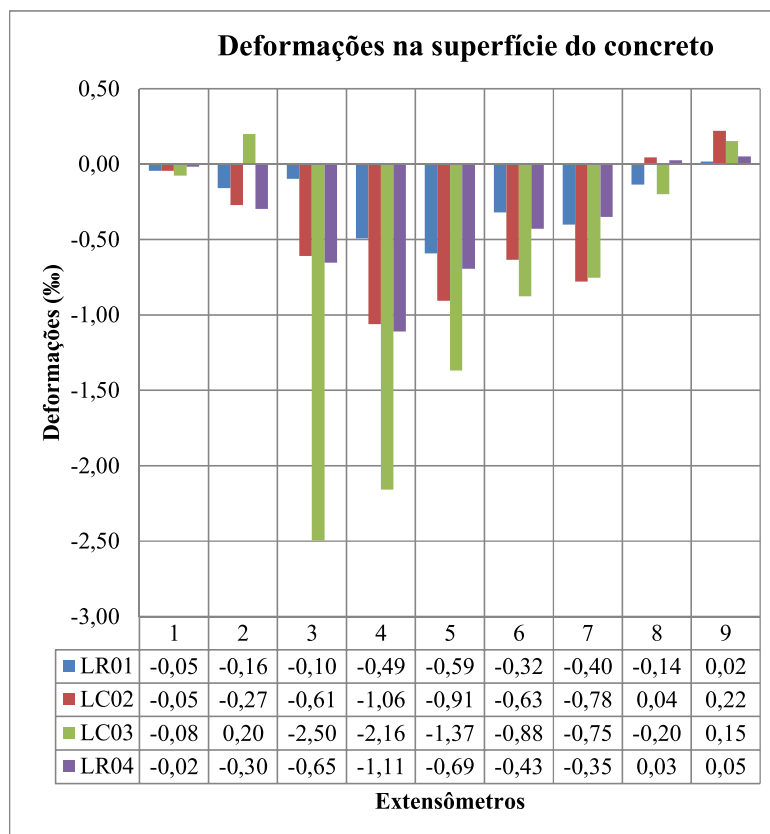


Figura 5.13 - Deformações na superfície inferior do concreto

5.5 ROTAÇÕES DAS LAJES

Considerando os valores de rotação das lajes obtidos com dois inclinômetros, um de bolha e outro de pêndulo, constatou-se que os modelos sem armadura de cisalhamento sofreram maiores rotação na direção N-S, em relação à direção L-O e em comparação com os modelos com armadura de cisalhamento, com o máximo valor de inclinação obtido para o modelo LR01, com 0,023 rad registrado em instante próximo à ruptura. Isto pode ser explicado pela maior transferência de momento da laje para o pilar devido à menor razão entre as cargas P_2 e P_1 aplicadas e principalmente pela menor restrição às aberturas de fissuras nas proximidades da conexão entre a laje e o pilar devido a ausência das armaduras de cisalhamento. Os menores valores de inclinação foram registrados pelo inclinômetro de bolha na direção L-O dos modelos LR01 e LR04, onde o valor mínimo registrado em instante próximo da ruptura foi de 0,009 rad para o modelo LR01.

Nos modelos onde houve o emprego de armaduras de cisalhamento, LC02 e LC03, observou-se que as menores inclinações, em instantes próximos da ruptura, foram obtidas na direção N-S, sendo que nesta direção o máximo valor de inclinação foi de 0,006 rad em

ambos os modelos. Tal comportamento pode ser explicado devido à maior rigidez conferida aos modelos, nas proximidades do pilar, na direção N-S devido ao emprego das armaduras de cisalhamento, que proporcionaram uma maior restrição de rotação devido à sua eficiência em limitar a abertura de fissuras nas proximidades da conexão entre a laje e o pilar dos modelos. Por limitações do inclinômetro de pêndulo utilizado para acompanhamento das rotações das lajes dos modelos, pôde-se acompanhar os ângulos de rotação na direção N-S da laje do modelo LC02 apenas até o 16º passo de carga aplicado e com base nos resultados obtidos até este passo de carga realizaram-se os comentários quanto às rotações da laje deste modelo.

Quanto às rotações na direção L-O, foram obtidas maiores inclinações para os modelos com armadura de cisalhamento, LC02 e LC03, que atingiram a ruptura com maiores cargas aplicadas e onde se evidenciou menor eficiência das armaduras de cisalhamento nesta região em torno do pilar quanto à restrição das inclinações. A Figura 5.14 apresenta detalhes dos valores de rotação obtidos para as lajes dos modelos para um valor de carga total aplicada próximo da carga de ruptura de cada modelo.

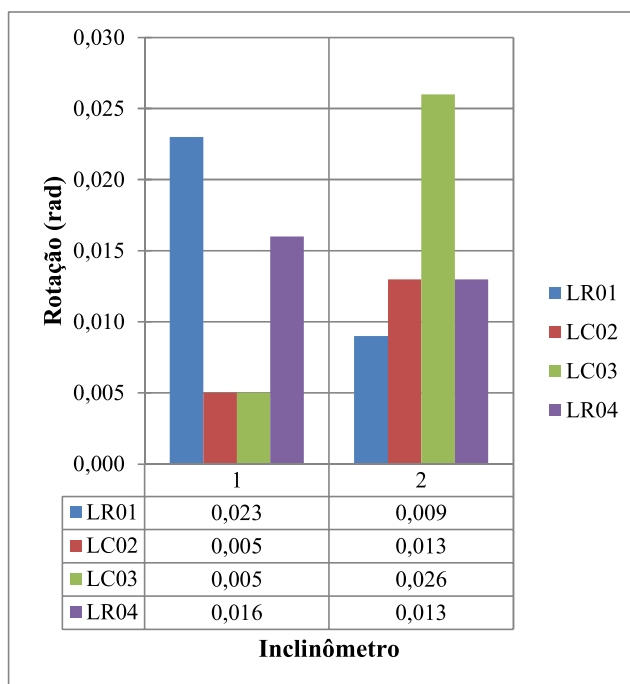


Figura 5.14 - Rotações das lajes dos modelos

A partir da Figura 5.14 observa-se que os modelos LR01 e LR04 foram os que apresentaram maiores rotações na direção N-S, tendo o modelo LR01 apresentado maior rotação na ruptura, devido principalmente ao maior carregamento aplicado pelo atuador

hidráulico nesta direção em relação ao carregamento aplicado na direção L-O, onde a carga aplicada por cada atuador correspondeu à metade da carga aplicada pelo atuador hidráulico na direção N-S.

5.6 PADRÃO DE FISSURAÇÃO DOS MODELOS

Quanto à carga de ruptura pôde-se constatar, com os ensaios realizados, que os modelos do Grupo 2 obtiveram maiores valores de carga de ruptura, sendo $P_{u,LC02} = 488$ kN e $P_{u,LC03} = 550$ kN. Para os modelos do Grupo 1, a laje LR01 apresentou menor valor de carga de ruptura, $P_{u,LR01} = 300$ kN, em decorrência da maior transferência de momento da laje para o pilar, enquanto o modelo LR04, onde a relação das cargas aplicadas $P_1/P_2 = 1$, apresentou $P_u = 347$ kN.

Fissuração mais intensa foi observada para os modelos do Grupo 2, sendo o modelo LC03 o que apresentou maior incidência de fissuras. Para o Grupo 1 o modelo LR04 apresentou menos fissuração na direção L-O.

Antes da realização dos ensaios dos modelos as fissuras de retração foram previamente marcadas com auxílio de um lápis de carpinteiro. Durante o ensaio do modelo LR01 observou-se que as primeiras fissuras tangenciais ocorreram com carregamento total aplicado de 4,8 kN. As fissuras de torção, nas bordas da reentrância da laje começaram a surgir quando o carregamento total aplicado foi igual a 16 kN e com o carregamento aplicado de 3,2 kN começaram a surgir fissuras radiais. O aparecimento de fissuras estabilizou-se para cargas incidentes superiores a 24 kN e a partir de então observou-se apenas o aumento das aberturas de fissuras já existentes.

Para o modelo LC02 as primeiras fissuras a surgirem foram fissuras axiais, com carregamento total incidente de 3 kN, no decorrer do ensaio foram observadas fissuras tangenciais que começaram a surgir com carga incidente de 3,0 kN e fissuras de torção que começaram a se desenvolver com 9,5 kN de carregamento atuante. Com carregamento atuante de 13,8 kN a primeira fissura visível chegou à borda da laje e com 43,5 kN não observou-se o surgimento de novas fissuras.

A maior capacidade resistente do modelo LC03, devido as armaduras de cisalhamento, ocasionou maior incidência de fissuras, que começaram a surgir axialmente com 1,5 kN de carregamento atuante, seguidas do surgimento de fissuras tangenciais e de torção com 3 kN

e 21 kN respectivamente. Com 18 kN de carga incidente a primeira fissura chegou à borda da laje e aos 21 kN de carga atuante deu-se a estabilização do modelo quanto ao surgimento de fissuras, onde a partir de então observou-se apenas o aumento da abertura das fissuras existentes.

Com as observações quanto ao padrão de fissuração no decorrer do ensaio da laje LR04 constatou-se que as primeiras fissuras a surgirem foram de natureza axial, com carregamento total de 1,2 kN. Com o aumento da carga incidente para 2,4 kN começaram a surgir fissuras tangenciais que foram seguidas do surgimento de fissuras de torção, que começaram a se desenvolver com 13,5 kN de carregamento atuante. A partir do carregamento incidente igual a 10,5 kN, correspondente ao oitavo passo de carga, não houve mais surgimento de fissuras, somente o aumento da abertura das fissuras já existentes. A Tabela 5.6 apresenta um resumo do surgimento das fissuras com respectivos valores de carga para cada laje ensaiada.

Tabela 5.6 - Cargas correspondentes ao surgimento de fissuras

Modelo	1ª Fissura radial (kN)	1ª Fissura tangencial (kN)	1ª Fissura de torção (kN)	Carga de ruptura (kN)
LR01	3,2	4,8	16,0	300,0
LC02	3,0	3,5	9,5	488,0
LC03	1,5	3,0	21,0	550,0
LR04	1,2	2,4	13,5	347,0

5.7 CARGAS E MODOS DE RUPTURA

Neste item serão feitas análises quanto aos resultados experimentais de cargas de ruptura obtidos para cada modelo e cargas de ruptura calculadas pelas normas de projeto estrutural: NBR 6118:2007, ACI 318:2008 e Eurocode 2:2004.

Os modos de ruptura de cada modelo foram determinados de acordo com análises dos resultados das deformações na superfície do concreto, nas armaduras de flexão, nas armaduras de cisalhamento e do padrão de fissuração. A Tabela 5.7 apresenta as cargas de ruptura dos quatro modelos ensaiados e os modos de ruptura das lajes.

Tabela 5.7 - Cargas últimas e modos de ruptura dos modelos

Modelo	e (mm)	Nº de camadas	h (mm)	d (mm)	ρ (%)	P_u (kN)	Modo de Ruptura
LR01	525	0	181	144,0	1,4	300,0	P
LC02	350	3	181	144,0	1,4	488,0	FP
LC03	350	4	180	144,0	1,4	550,0	FP
LR04	350	0	180	144,0	1,4	347,0	P

Obs:
 $f_{ys} = 560$ MPa;
 $f_{yw} = 587$ MPa para $\varnothing_w = 8,0$ mm;
 $f_{yw} = 562$ MPa para $\varnothing_w = 10,0$ mm;
 $s_0 = 70$ mm; $s_r = 100$ mm; $\varnothing_w = 8,0$ mm para LC02 e 10,0 mm para LC03;
d é a altura útil da laje;
P: punção; FP: flexo-punção.

Comparações entre os resultados de cargas últimas obtidos com os ensaios e as estimativas de resistência segundo as normas de projeto estrutural (NBR 6118:2007, ACI 318:2008 e Eurocode 2:2004) são apresentadas nas Tabelas 5.8 à 5.10. Nas Figuras 5.15 à 5.27 são apresentados gráficos que correlacionam as cargas de ruptura obtidas nos ensaios (P_u) com as cargas resistentes obtidas de acordo com as normas abordadas nesta pesquisa, assim como os perímetros de controle para lajes lisas com pilares de canto reentrante. Os parâmetros de cálculo das estimativas de resistência segundo as normas de projeto estrutural para as lajes ensaiadas nesta pesquisa são apresentados no Apêndice G.

5.7.1 NBR 6118:2007

As cargas últimas obtidas nos ensaios serão comparadas com as cartas últimas obtidas com a NBR 6118:2007, considerando a restrição quanto à tensão de escoamento do aço (f_y) que será obtida de acordo com interpolação numérica prevista no item 19.4.2 da NBR 6118:2007. A Figura 5.15 apresenta detalhes dos perímetros de controle segundo a NBR 6118:2007 para lajes lisas com pilares de canto reentrante sem e com camadas radiais de *studs*.

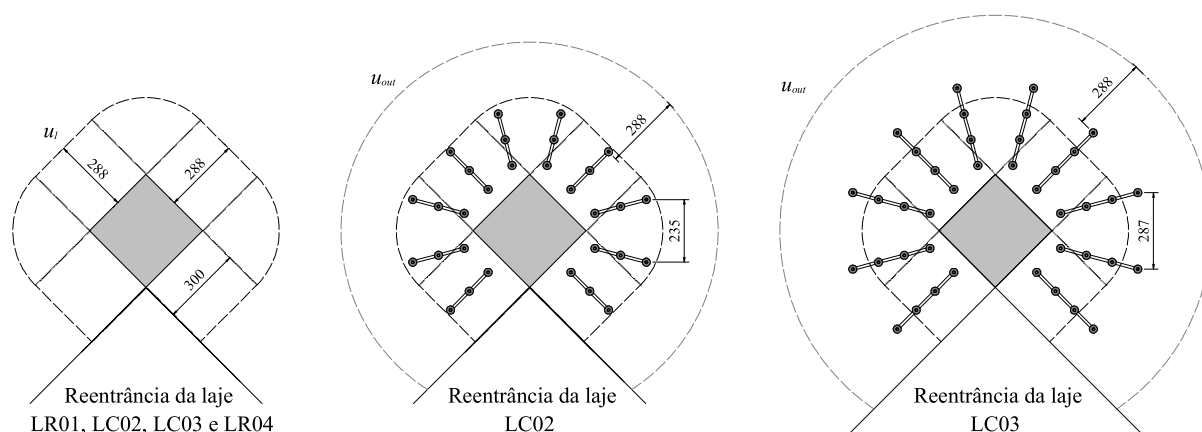


Figura 5.15 – Perímetros de controle segundo a NBR 6118:2007

Tabela 5.8 - Cargas de punção segundo a NBR 6118:2007 para todos os modelos

Modelo	F_c (kN)	F_{sk} (kN)	$F_{sk,out}$ (kN)	F_{calc} (kN)	P_u (kN)	P_u/F_c	P_u/F_{sk}	$P_u/F_{sk,out}$	Provável Ruptura
LR01	284,2	-	-	284,2	300,0	1,06	-	-	-
LC02	-	458,7	397,3	397,3	488,0	-	1,06	1,23	Fora
LC03	-	566,2	423,0	423,0	550,0	-	0,97	1,30	Fora
LR04	348,0	-	-	348,0	347,0	1,00	-	-	-

Obs.:

F_c é a carga estimada para lajes sem armadura de cisalhamento;
 F_{sk} é a carga estimada dentro da região de armadura de cisalhamento;
 $F_{sk,out}$ é a carga estimada fora da região de armadura de cisalhamento;
 P_u é a carga última de ruptura obtida experimentalmente.

Através dos resultados de carga de ruptura obtidos em laboratório e os resultados obtidos através do modelo de cálculo da NBR 6118:2007, foram elaboradas as Figuras 5.16 e 5.17 que apresentam a relação entre as cargas últimas de ensaio e as estimadas pela NBR 6118:2007, considerando lajes lisas de concreto armado com pilares de canto reentrante.

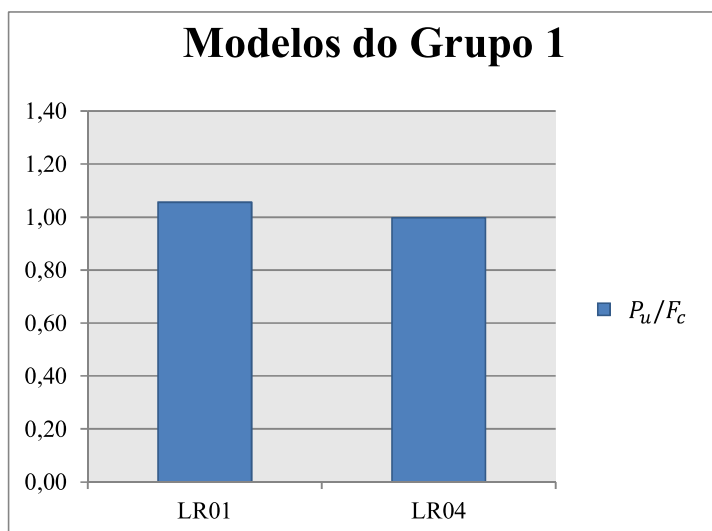


Figura 5.16 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura estimadas para o Grupo 1 de acordo com a NBR 6118:2007

De acordo com a Figura 5.16 observa-se que os resultados de resistência à punção para os modelos do Grupo 1, previstos de acordo com a NBR 6118:2007, mostram-se próximos aos valores observados em laboratório, porém o valor da carga de ruptura estimada para o modelo LR04 apresentou valor superior ao observado em laboratório, o que mostra a possibilidade de ruptura inesperada para modelos com menores excentricidades de carga na direção da bissetriz da reentrância, enquanto que para o modelo LR01 a carga de ruptura estimada pela NBR 6118:2007 se mostrou 5,3% menor em relação à carga de ruptura observada em laboratório.

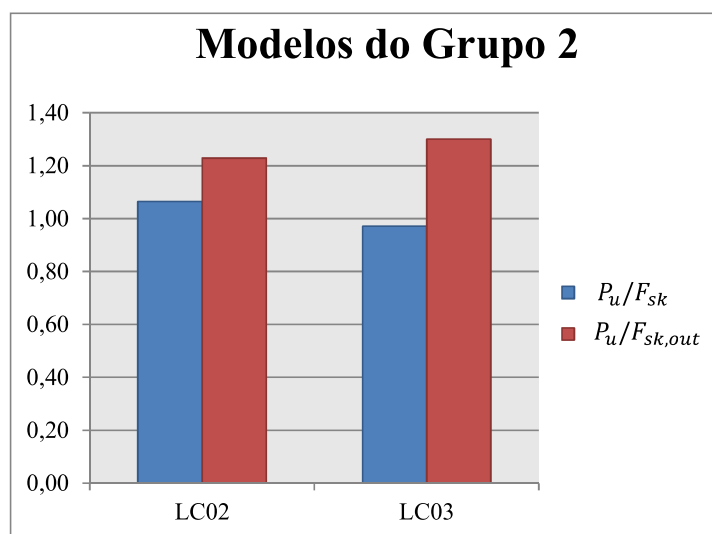


Figura 5.17 – Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura dentro e fora da região de armadura de cisalhamento de acordo com a NBR 6118:2007

Através do exposto na Figura 5.17 pode-se observar que as prescrições normativas para os modelos do Grupo 2 apresentam valores de carga de ruptura inferiores aos observados em laboratório. Para o Grupo 2 os resultados de carga de ruptura obtidos através da NBR 6118:2007 apresentaram-se condizentes com os observados em laboratório, com uma reserva resistente de 18,6% para o modelo LC02 e de 23% para o modelo LC03 em relação às cargas de ruptura obtidas nos ensaios de cada modelo.

De acordo com as cargas de ruptura obtidas segundo a NBR 6118:2007, constata-se que as maiores reservas de resistência são para os modelos com armadura de cisalhamento, cuja ruptura foi prevista fora da região das armaduras de cisalhamento.

5.7.2 Eurocode 2:2004

A análise dos resultados obtidos de acordo com as prescrições do Eurocode 2:2004 e os obtidos nos ensaios será feita considerando as restrições quanto à tensão efetiva na armadura de cisalhamento e ao parâmetro k (*size effect*), cujo o valor deve ser menor ou igual a 2,0. A Figura 5.18 apresenta detalhes dos perímetros de controle segundo o Eurocode 2:2004 para lajes lisas com pilares de canto reentrante sem e com camadas radiais de *studs*.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (5.2)$$

onde:

d é a altura útil da laje.

$$f_{yw,ef} = 1,15 \cdot (250 + 0,25 \cdot d) \leq f_{ywd} \quad (5.3)$$

onde:

f_{ywd} é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento.

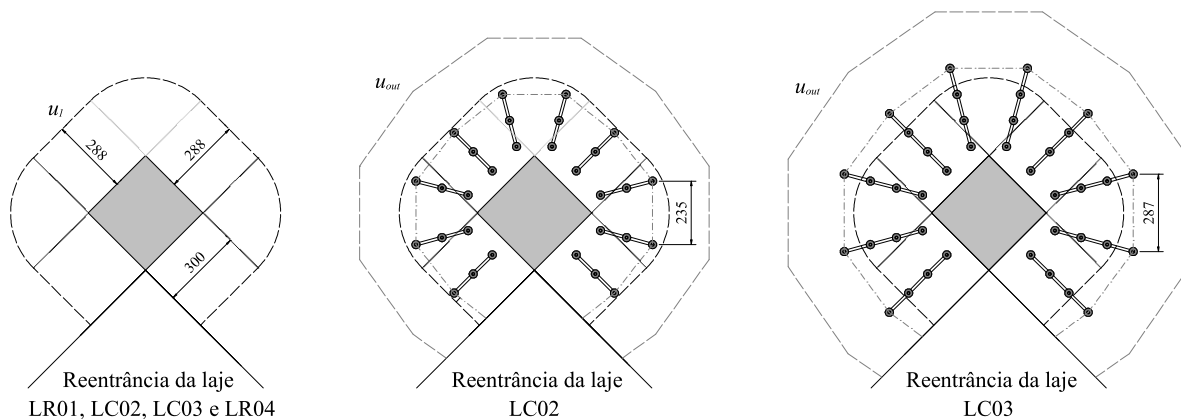


Figura 5.18 - Perímetros de controle segundo o Eurocode 2:2004

Tabela 5.9 - Cargas de punção pelo Eurocode 2:2004 para todos os modelos

Modelo	$V_{R,C}$ (kN)	$V_{Rk,cs}$ (kN)	$V_{Rk,out}$ (kN)	P_u (kN)	$P_u/V_{R,C}$	$P_u/V_{Rk,cs}$	$P_u/V_{Rk,out}$	Provável Ruptura
LR01	282,6	-	-	300,0	1,06	-	-	-
LC02	-	485,4	534,1	488,0	-	1,01	0,91	dentro
LC03	-	609,3	654,3	550,0	-	0,90	0,84	dentro
LR04	353,7	-	-	347,0	0,98	-	-	-

Obs:

$V_{Rk,cs}$ é a carga de ruptura estimada dentro da região de armadura de cisalhamento;

$V_{Rk,out}$ é a carga de ruptura estimada fora da região de armadura de cisalhamento;

$V_{R,C}$ é a carga de ruptura para lajes sem armadura de cisalhamento;

P_u é a carga última de ensaio.

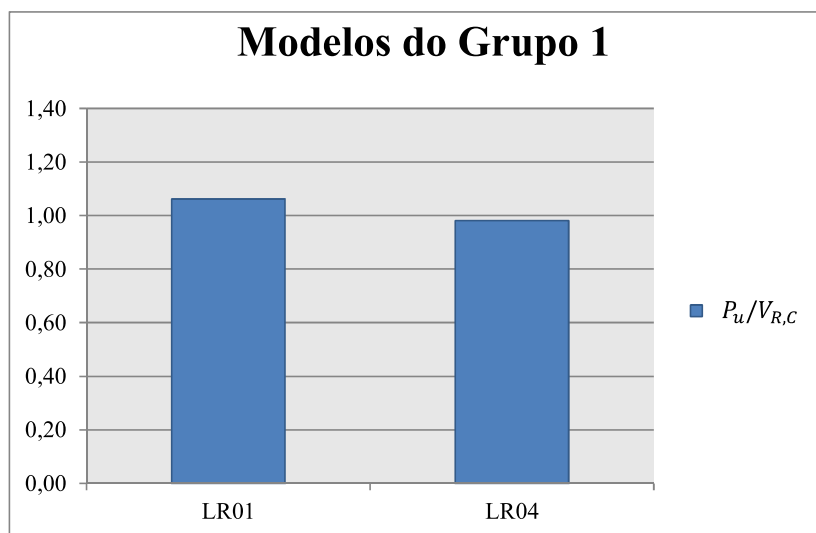


Figura 5.19 - Relação entre a carga última de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura estimadas para o Grupo 1 de acordo com o Eurocode 2:2004

A Figura 5.19 mostra que para os modelos do Grupo 1 o comportamento segundo a relação entre as cargas de ruptura estimadas pelo Eurocode 2:2004 e as observadas em laboratório

é semelhante ao observado considerando a relação entre as estimativas da NBR 6118:2007 e as cargas de ruptura obtidas em laboratório.

O modelo LR01 apresentou carga de ruptura observada em laboratório de 300 kN e carga de ruptura estimada pelo Eurocode 2:2004 de 282,6 kN, o que comprova uma margem de segurança de 5,8 % da carga estimada em relação à carga de ruptura obtida no ensaio da laje LR01.

Para o modelo LR04 observou-se que a carga de ruptura prevista de acordo com o Eurocode 2:2004 apresentou-se superior ao valor do carregamento de ruptura obtido em laboratório, assim, como observado de acordo com as estimativas da NBR 6118:2007, existe o risco de ruptura inesperada por punção em conexões de lajes lisas e pilares de canto reentrante, considerando as estimativas de carga de ruptura do Eurocode 2:2004.

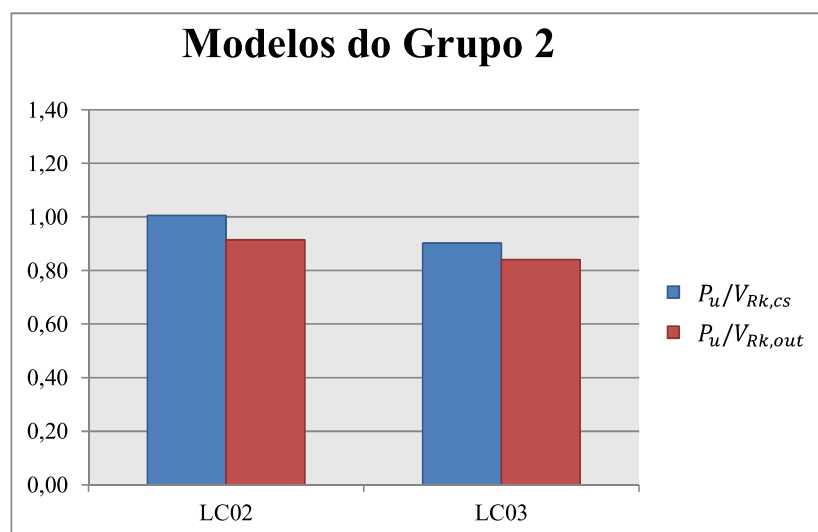


Figura 5.20 - Relação entre a carga última de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura dentro e fora da região de armadura de cisalhamento de acordo com o Eurocode 2:2004.

Para os modelos do Grupo 2 observou-se que as cargas de ruptura obtidas de acordo com o Eurocode 2:2004 apresentam-se próximas às observada nos ensaios dos modelos. A carga de ruptura prevista para o modelo LC02 apresenta-se 2,6 kN inferior à carga de ruptura experimental, o que mostra uma boa aproximação na estimativa de carga e com um valor a favor da segurança.

Quanto ao modelo LC03, a carga de ruptura experimental foi menor do que a estimada segundo o EC2, o que mostra risco de ruptura inesperada por punção cruzando a armadura de cisalhamento.

Ao contrario do previsto pela NBR 6118:2007, a posição de ruptura prevista pelo Eurocode 2:2004 para os modelos com armadura de cisalhamento ocorre na região das armaduras de cisalhamento.

5.7.3 ACI 318:2008

Na tabela 5.10 são apresentados os valores de carga obtidos de acordo com o modelo de cálculo do ACI 318:2008, são apresentados também os valores das relações feitas entre as cargas obtidas nos ensaios das lajes e as estimadas pelo ACI 318:2008. A Figura 5.21 mostra detalhes dos perímetros de controle segundo o ACI 318:2008 para lajes lisas com pilares de canto reentrante sem e com a disposição de camadas radiais de *studs*.

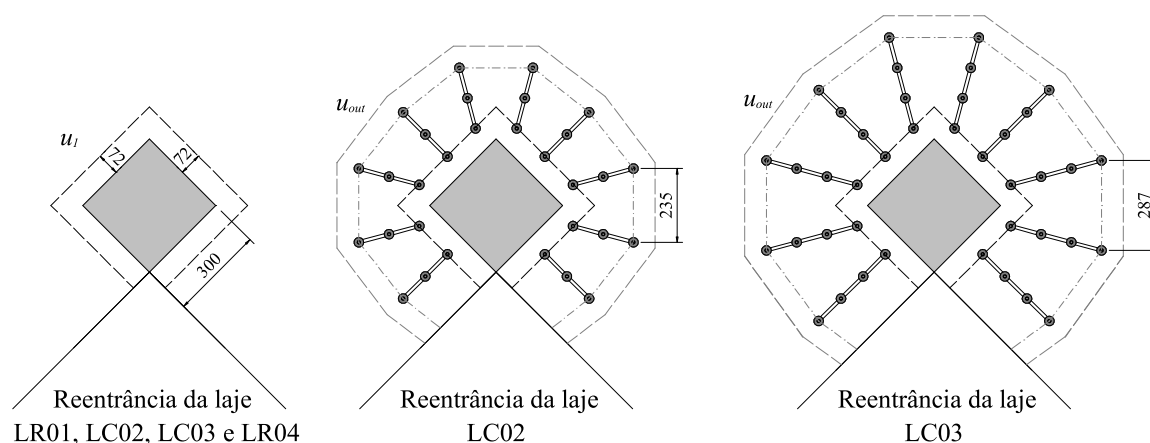


Figura 5.21 - Perímetros de controle segundo o ACI 318:2008

Tabela 5.10 - Cargas de punção pelo ACI 318:2008 para todos os modelos

Modelo	$V_{u,k}$ (kN)	$V_{uk,out}$ (kN)	P_u (kN)	P_u/V_{uk}	$P_u/V_{uk,out}$	Provável Ruptura
LR01	236,0	-	300,0	1,27	-	-
LC02	422,4	384,6	488,0	1,16	1,27	fora
LC03	485,9	416,3	550,0	1,13	1,32	fora
LR04	309,5	-	347,0	1,12	-	-

Obs:
 V_{uk} é a carga de ruptura estimada dentro da região de armadura de cisalhamento;
 $V_{uk,out}$ é a carga de ruptura estimada fora da região de armadura de cisalhamento;
 P_u é a carga última de ensaio.

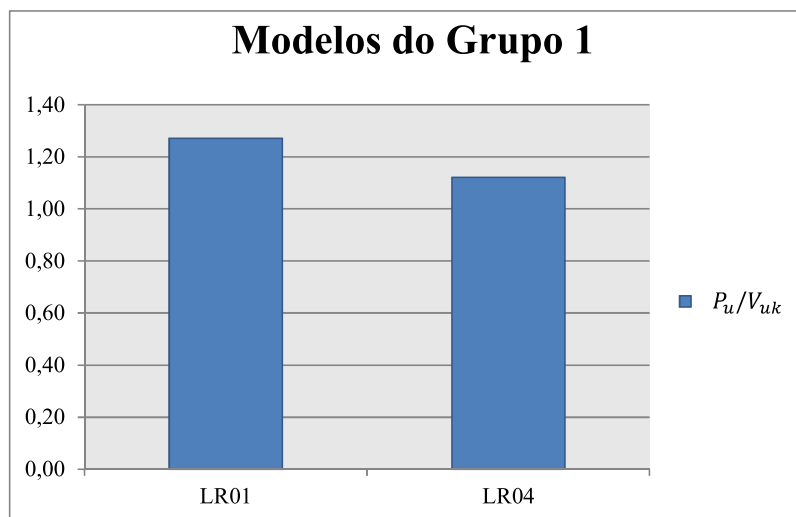


Figura 5.22 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura estimadas para o Grupo 1 de acordo com o ACI 318:2008

Os resultados de carga de ruptura obtidos segundo o ACI 318:2008 para o Grupo 1 foram os mais conservadores, considerando as três normas de projeto estrutural analisadas nesta pesquisa. Observou-se uma diferença, a favor da segurança, entre os carregamentos de ruptura estimados e experimentais de 64 kN para o modelo LR01, com maior excentricidade de carga, e de 37,5 kN para o modelo LR04.

Diferente do observado para a NBR 6118:2007 e para o Eurocode 2:2004, as estimativas normativas para carga de ruptura do ACI 318:2008 apresentam-se inferiores para o modelo LR04 em relação às cargas de ruptura obtidas experimentalmente, demonstrando menor risco de uma ruptura por punção para esta configuração de conexão entre laje lisa e pilar de canto reentrante dimensionada segundo o ACI 318:2008.

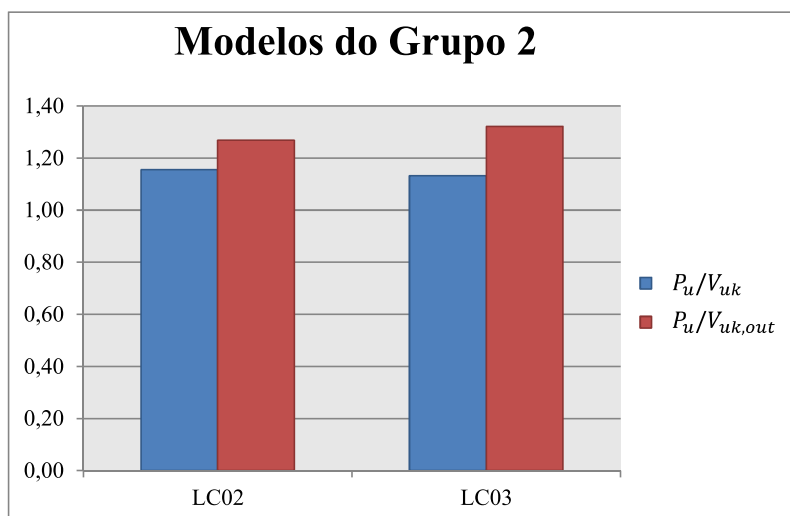


Figura 5.23 - Relação entre a carga ultima de ensaio, P_u , e as cargas de ruptura dentro e fora da região de armadura de cisalhamento de acordo com o ACI 318:2008

Para os modelos do Grupo 2 observa-se que, assim como na NBR 6118:2007, os menores valores de carga resistente foram obtidos para rupturas consideradas fora da região de armaduras de cisalhamento, com maiores diferenças observadas a favor da segurança para os valores de carga estimados segundo o ACI 318:2008 para o modelo LC03, com uma diferença entre os valores estimados de carga de ruptura e experimentalmente obtidos de 133,7 kN.

As relações entre as cargas últimas experimentais e estimadas para uma ruptura fora da região de armaduras de cisalhamento foram próximas de 1,27 para o modelo LC02 e de 1,32 para o modelo LC03, como pode ser constatado na Figura 5.23. Assim, para os modelos considerados de conexão entre laje lisa e pilar de canto reentrante com armadura de cisalhamento, o ACI 318:2008 apresentou resultados de carga resistente das lajes inferiores aos observados experimentalmente, havendo assim menor possibilidade da ocorrência de ruptura por punção em lajes lisas de concreto armado com os mesmos parâmetros considerados nos modelos do Grupo 2, considerando as estimativas do ACI 318:2008.

5.7.4 Análise dos resultados dos ensaios e das prescrições normativas quanto às cargas de ruptura.

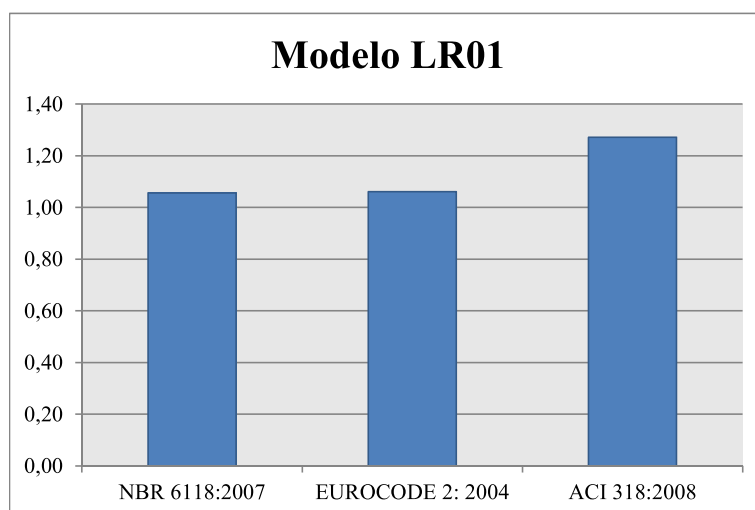


Figura 5.24 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LR01

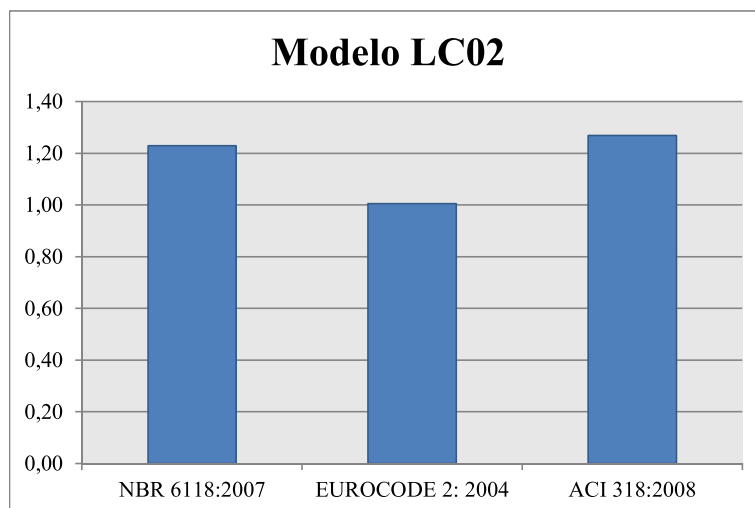


Figura 5.25 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LC02

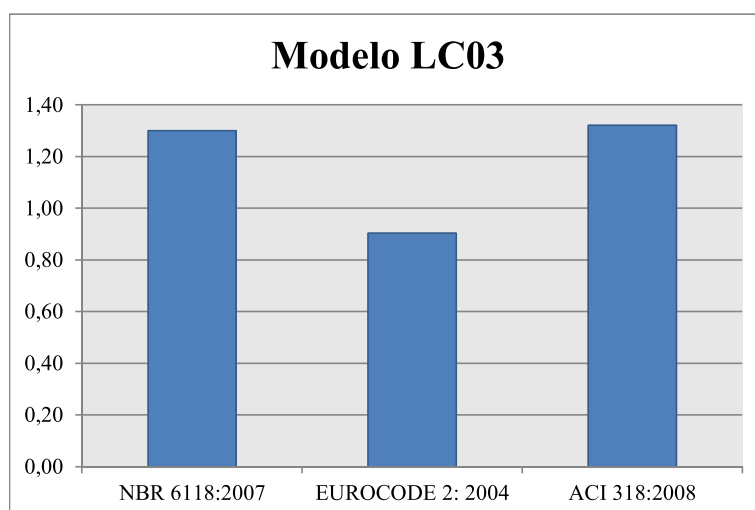


Figura 5.26 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LC03

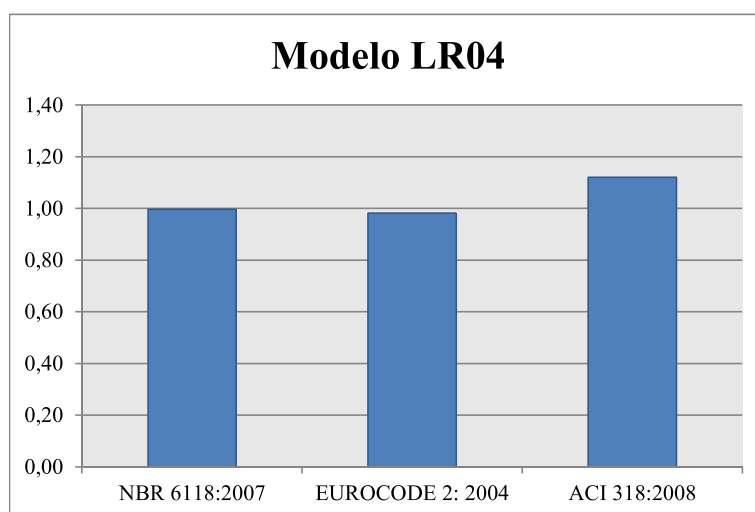


Figura 5.27 - Relação de carga última de ensaio e carga última obtida com as normas de projeto para o modelo LR04

Com a análise dos dados expostos conclui-se que para os modelos do Grupo 1, sem armadura de cisalhamento, as estimativas normativas da NBR 6118:2007 e do Eurocode 2:2004 apresentaram valores de cargas resistentes à punção mais próximos aos obtidos experimentalmente. Os valores obtidos através da NBR 6118:2007 e do Eurocode 2:2004 foram semelhantes entre si, como pode ser observado nas Figuras 5.24 a 5.27, já os valores de resistência à punção obtidos pelo ACI apresentaram-se inferiores aos observados experimentalmente, mostrando que as recomendações do ACI apresentaram-se as mais conservadoras para todos os modelos ensaiados.

Para os modelos do Grupo 2, com armadura de cisalhamento do tipo *stud* e mesma excentricidade de carga, observa-se que os resultados de carga resistente à punção obtidos através da NBR 6118:2007 foram mais conservadores em relação aos resultados obtidos para os modelos do Grupo 1. O Eurocode 2:2004 apresentou valor de carga resistente condizente com o valor observado experimentalmente para o modelo LC02, enquanto que para o modelo LC03 os resultados estimados de resistência à punção foram superiores aos observados em laboratório.

Para conexões de lajes lisas de concreto armado com pilares de canto reentrante com os parâmetros considerados nesta pesquisa o ACI 318:2008 apresentou estimativas de resistência à punção mais conservadoras, considerando as prescrições normativas abordadas neste trabalho.

6 ANÁLISE NUMÉRICA

Ensaaios experimentais são de fundamental importância no estudo e compreensão de fenômenos que necessitam de esclarecimentos quanto a diversos parâmetros. No caso do estudo do fenômeno de punção os resultados experimentais são de grande importância na validação e aprimoramento dos métodos teóricos de estimativa de resistência, apesar das limitações quanto aos resultados que geralmente são obtidos em pontos específicos do modelo experimental e quanto aos elevados custos na construção e ensaio de modelos de laboratório. Quanto a esses aspectos, a realização de estudos numéricos é de grande valia na análise do fenômeno de punção, pois, desde que o modelo numérico apresente-se calibrado pode-se obter resultados para o modelo como um todo que podem servir de complementação para as análises experimentais.

Neste capítulo serão apresentados resultados de análise numérica considerando o comportamento elástico-linear do concreto sem armaduras, realizada com o uso de ferramentas computacionais que se baseiam no método dos elementos finitos para a análise estrutural.

6.1 MODELO NUMÉRICO

A modelagem numérica foi realizada através do software *Ansys v.11*, onde foram feitas simulações numéricas do tipo estrutural estática para modelos compostos por elementos sólidos. A geometria do modelo idealizado para ensaio foi discretizada utilizando-se o elemento SOLID65 (*3-D Reinforced Concrete Solid*) que é ilustrado na Figura 6.1 e é usado para modelagem 3-D de estruturas de concreto, com ou sem barras de reforço. É um elemento que possui oito nós e três graus de liberdade por nó: translação nas direções x, y e z.

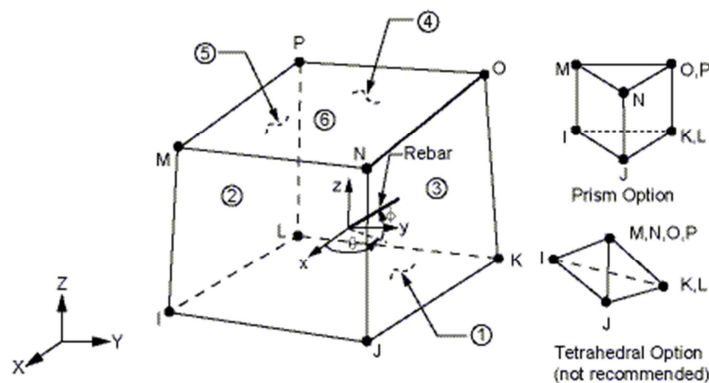


Figura 6.1 - Elemento sólido SOLID65 (Biblioteca do ANSYS)

As propriedades dos materiais utilizadas no modelo de elementos finitos estão na Tabela 6.1

Tabela 6.1 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo

Propriedades do concreto	Símbolo	Valor	Unidade
Resistencia à compressão	f_{cm}	58	MPa
Módulo de Elasticidade	E	22.000	MPa
Massa específica	ρ	2500	kg/m ³
Coefficiente de Poisson	ν	0,20	-

As condições de contorno do modelo compõem-se da restrição de translação na direção z na face inferior do pilar e restrição de translação nas direções x e y nas faces do pilar até uma distância de 120 mm a contar das extremidades do pilar. A Figura 6.2 apresenta detalhes da geometria obtida com a modelagem computacional. A discretização do modelo em elementos finitos foi feita com 9008 nós e 41.083 elementos como mostrado na Figura 6.3.

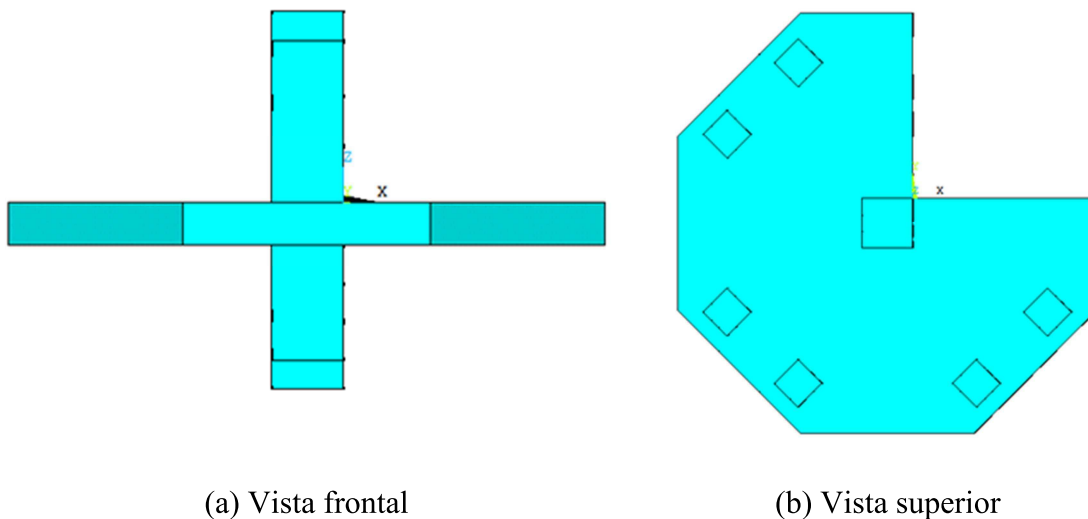
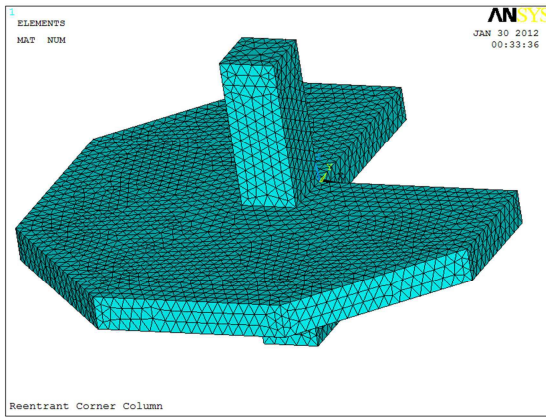
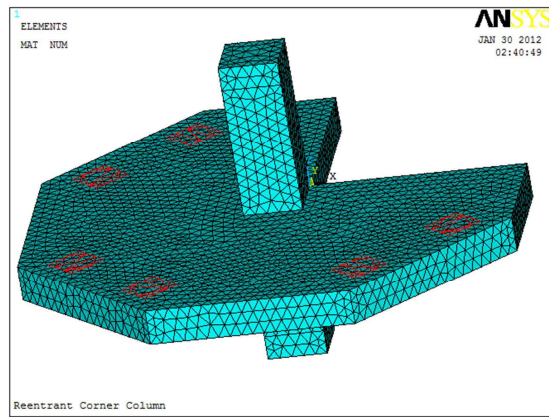


Figura 6.2 - Modelagem computacional



(a) Discretização do modelo



(b) Pontos de aplicação de carga

Figura 6.3 - Malha adotada para análise em elementos finitos

Foram feitas análises estáticas para os modelos considerando as duas excentricidades de carga empregadas nos ensaios experimentais, 525 mm para o modelo LR01 e 350 mm para os modelos LR04, LC02 e LC03, com a aplicação das cargas de ruptura observadas em laboratório para os modelos LR01 e LR04, considerando a distribuição do carregamento em áreas correspondentes às das chapas de transmissão de carga utilizadas nos ensaios. As Figuras 6.4 e 6.5 mostram o comportamento da estrutura quanto aos deslocamentos verticais para os diferentes carregamentos aplicados.

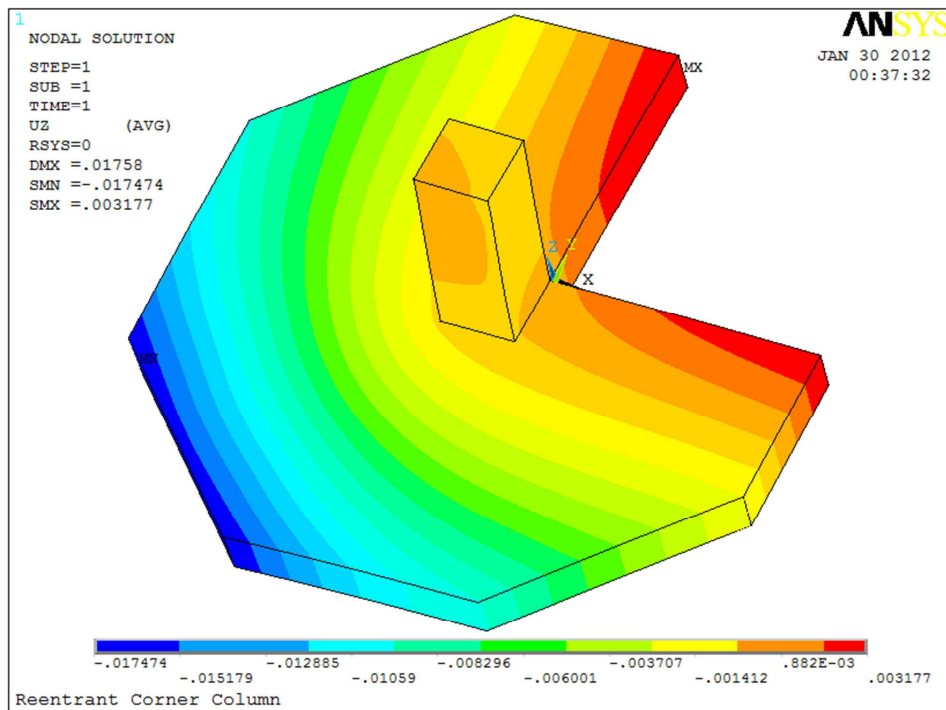


Figura 6.4 - Deslocamento na direção z (valores em metro) para o modelo LR01

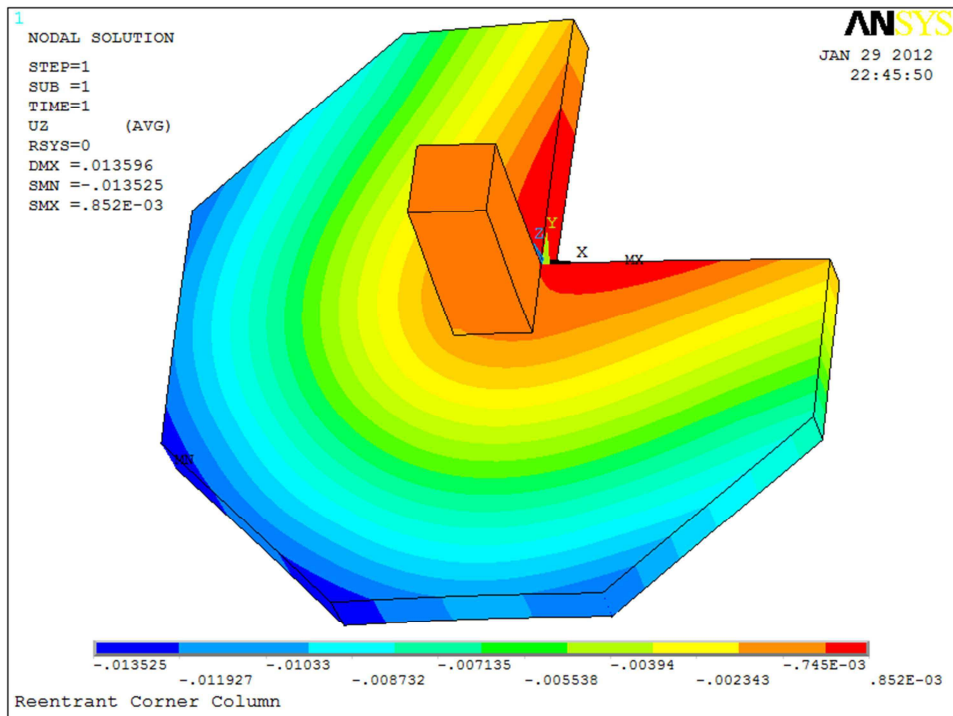
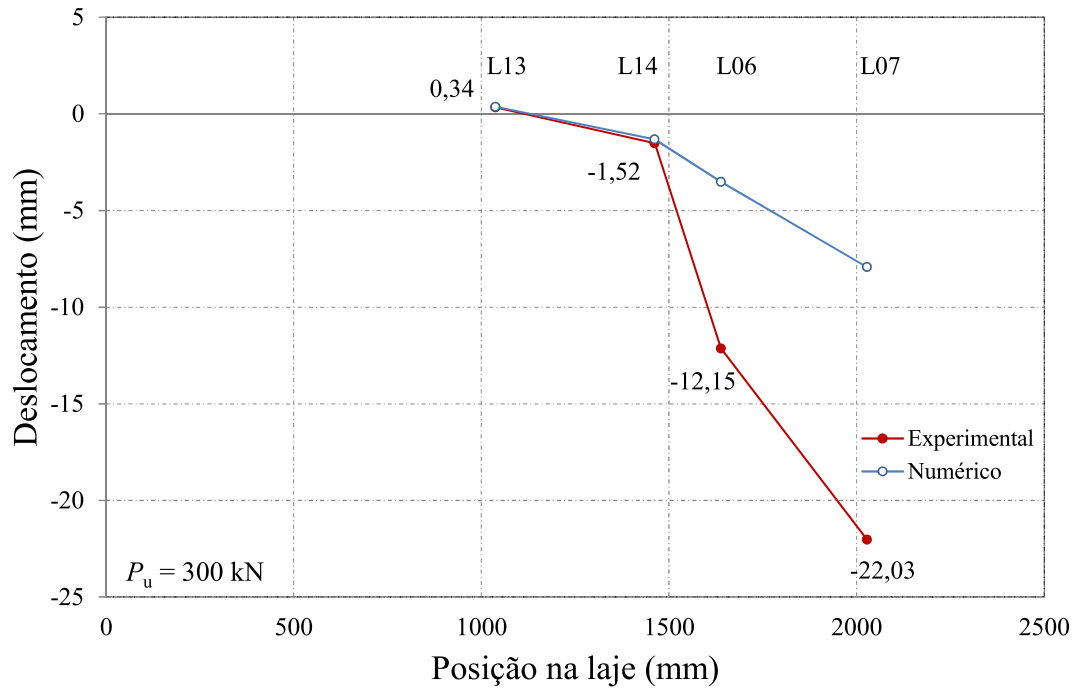


Figura 6.5 - Deslocamento na direção z (valores em metro) para o modelo LR04

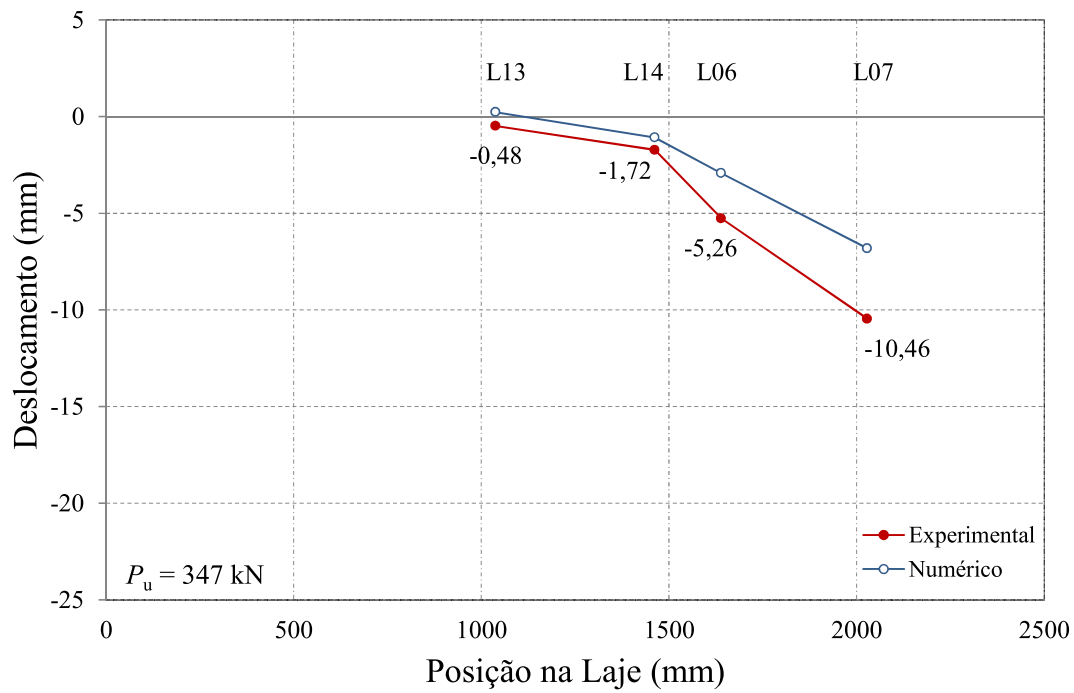
Observou-se que a deformada na direção z apresentou aspecto predominantemente convexo na direção dos dois eixos (x e y) e simetria em relação ao eixo que passa pela diagonal do pilar e que é a bissetriz do ângulo de reentrância da laje. As Figuras 6.6 a 6.8 apresentam análise comparativa entre os resultados obtidos no estudo numérico e os obtidos com os ensaios dos modelos no que diz respeito aos deslocamentos verticais para os pontos monitorados pelos LVDTs (transdutores de variação de deslocamento linear).

Deslocamentos na direção S - N



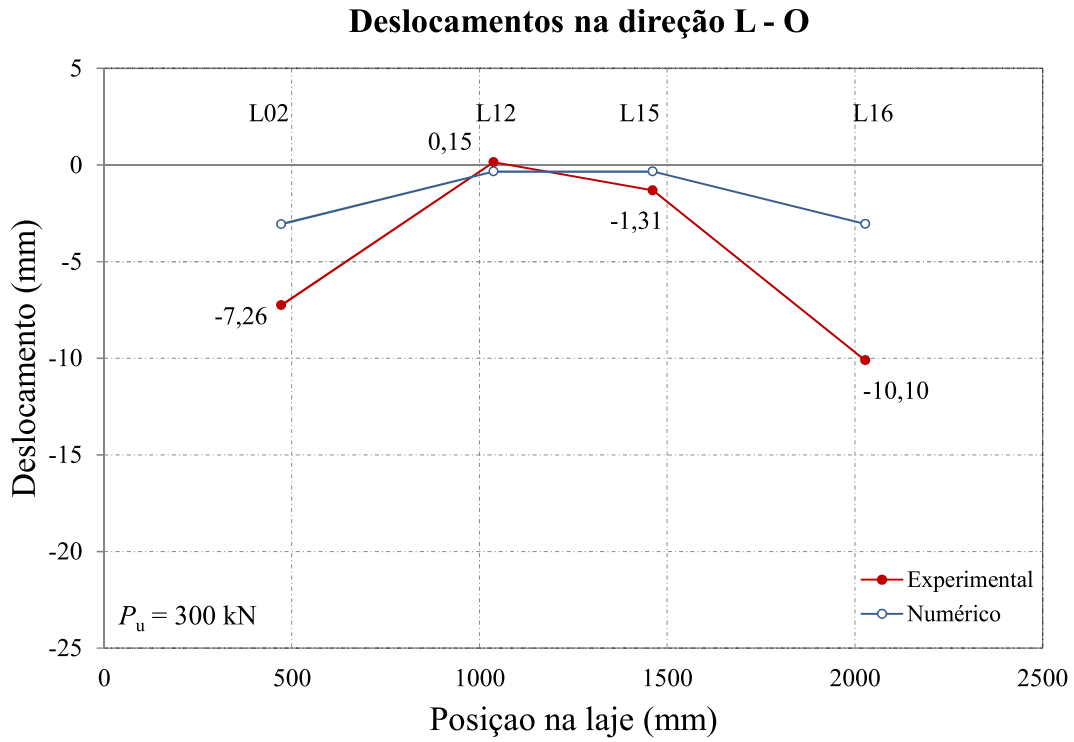
(a) Laje LR01

Deslocamentos na direção S - N

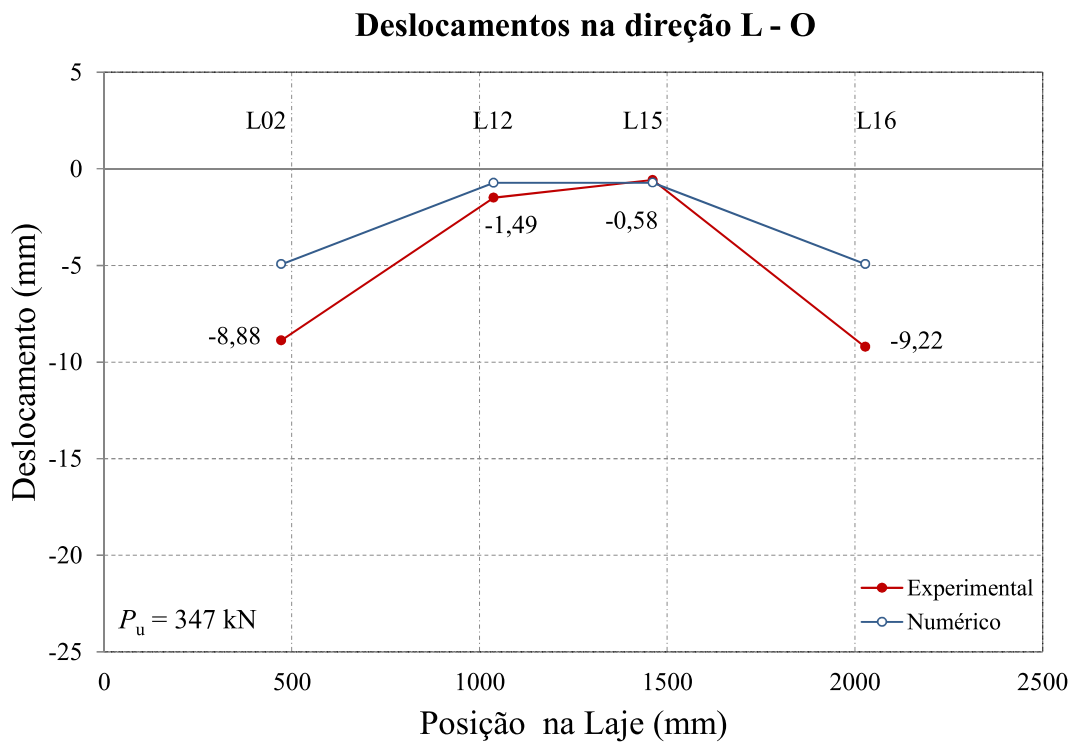


(b) Laje LR04

Figura 6.6 - Deslocamentos verticais na direção S-N



(a) Laje LR01



(b) Laje LR04

Figura 6.7 - Deslocamentos verticais na direção L-O

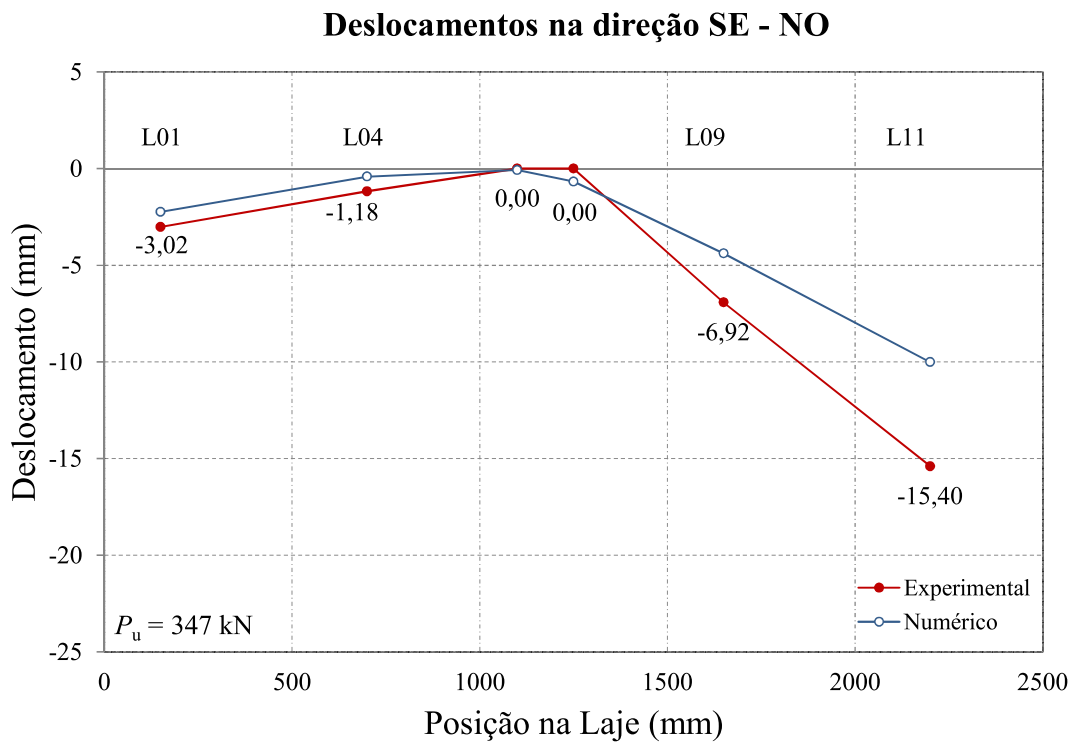
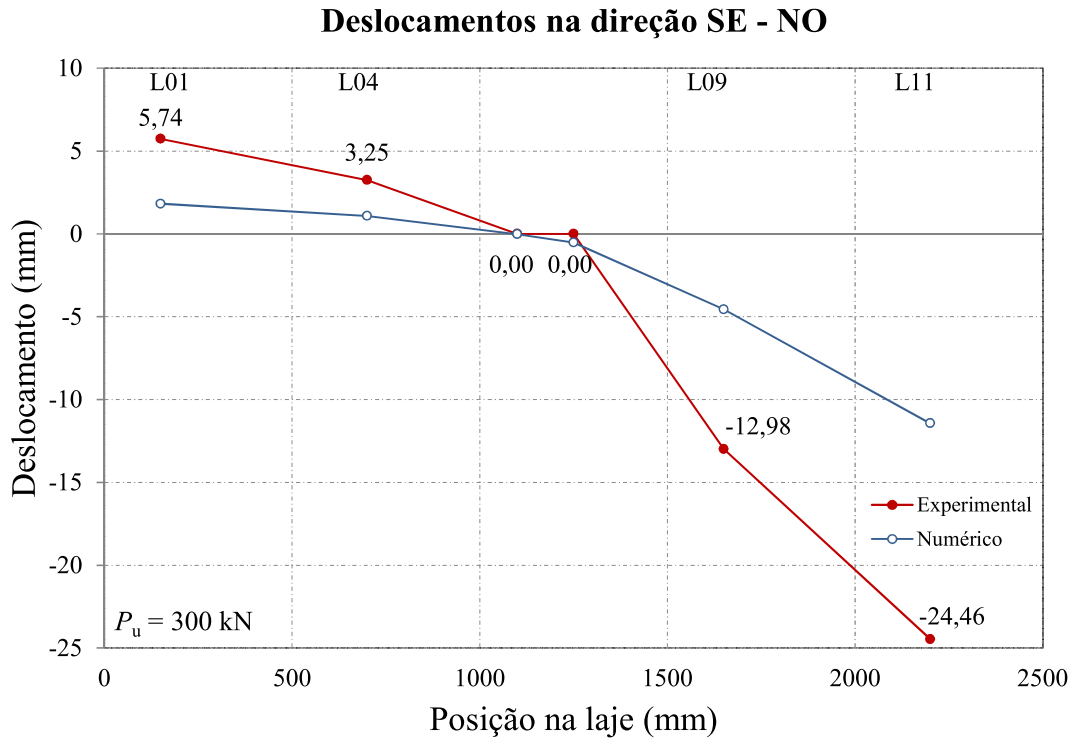


Figura 6.8 - Deslocamentos verticais na direção SE-NO

De acordo com resultados expostos para a análise comparativa constata-se que os modelos numéricos representaram bem o comportamento da estrutura para todas as direções analisadas, porém os valores de deslocamento apresentam-se inferiores no modelo em elementos finitos comparando-se com os observados nos ensaios experimentais, devido às simplificações feitas na modelagem quanto ao comportamento do concreto, que foi admitido como elástico-linear o que não acontece realmente em ensaios conduzidos até a ruptura como os realizados no estudo de punção abordado nesta pesquisa. A Tabela 6.2 apresenta os valores obtidos nos ensaios e nos modelos numéricos para deslocamentos verticais das lajes LR01 e LR04.

Tabela 6.2 - Deslocamentos verticais

Direção	LVDT	LR01		LR04	
		Exp. (mm)	Num. (mm)	Exp. (mm)	Num. (mm)
S-N	L13	0,34	0,36	-0,48	0,24
	L14	-1,52	-1,33	-1,72	-1,08
	L06	-12,15	-3,52	-5,26	-2,92
	L07	-22,03	-7,93	-10,46	-6,81
L-O	L02	-7,26	-3,06	-8,88	-4,94
	L12	0,15	-0,34	-1,49	-0,72
	L15	-1,31	-0,34	-0,58	-0,72
	L16	-10,10	-3,05	-9,22	-4,93
SE-NO	L01	5,74	1,82	-3,02	-2,23
	L04	3,25	1,09	-1,18	-0,41
	L09	-12,98	-4,55	-6,92	-4,39
	L11	-24,46	-11,43	-15,40	-10,02

De acordo com a análise comparativa dos resultados de deslocamento vertical, constatou-se que para a laje LR01 a maior discrepância de resultados foi obtida para a posição do LVDT 07 na direção S-N com uma diferença de 64% em relação ao resultado experimental e para a laje LR04 a maior diferença entre os resultados numérico e experimental de deslocamentos verticais foi obtida para a posição do LVDT 11 localizado na direção SE-NO, com uma diferença de 35% em relação ao resultado experimental.

7 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados experimentais apresentados e analisados em capítulos anteriores deste trabalho. As principais variáveis da pesquisa foram: a quantidade de camadas de armadura de cisalhamento do tipo *stud* e a excentricidade de carga na ligação.

Foram feitas comparações e análises entre os resultados experimentais dos modelos ensaiados, distribuídos em dois grupos, o primeiro com 2 lajes sem armadura de cisalhamento e com diferentes excentricidades de carga na direção N-S e o segundo com 2 lajes com armadura de cisalhamento e mesma excentricidade de carga na direção N-S. Os resultados obtidos nesta pesquisa com os ensaios das 4 lajes foram comparados entre si.

Os resultados de cargas de ruptura experimentais foram comparados com as estimativas do Eurocode 2:2004, ACI 318:2008 e NBR 6118:2007. As estimativas de resistência à punção obtidas com o Eurocode 2:2004 e a NBR 6118:2007 apresentaram valores próximos aos obtidos experimentalmente. O ACI 318:2008 apresentou as estimativas de resistência mais conservadoras em relação aos resultados obtidos em laboratório.

7.1 COMPORTAMENTO DAS LAJES

7.1.1 Modo, carga e superfície de ruptura

Os modos de ruptura observados foram punção e flexo-punção, que foram definidos de acordo com análise dos valores de deformação das armaduras de cisalhamento e flexão, de deformação do concreto na superfície inferior da laje e do padrão de fissuração de cada modelo.

Para as lajes LR01 e LR04 observou-se ruptura por punção, onde não foram constatados pontos de escoamento na armadura de flexão e as deformações na superfície de concreto inferior das lajes apresentaram valores inferiores ao valor da deformação última de compressão no concreto, a qual é definida pelo Eurocode 2:2004 como 3,5‰ para concretos com resistência inferior a 50 MPa. Para estes modelos foram observados padrões de fissuração menos intensos que nos modelos com disposição de armadura de cisalhamento.

Para as lajes LC03 e LC02 observou-se a ocorrência de ruptura por flexo-punção, com escoamento de alguns pontos das barras da armadura de flexão nas proximidades dos pilares. Os extensômetros do concreto próximos ao pilar registraram os maiores valores de deformação, principalmente os extensômetros EC3 e EC4. Estes modelos apresentaram um padrão de fissuração mais intenso, com superfície de ruptura apresentando-se mais nitidamente na reentrância das lajes.

A maior transferência de momento para o modelo LR01 (excentricidade de 525 mm) ocasionou redução da carga resistente desta laje em 13,5 % em relação à laje LR04 que apresentava excentricidade de 350 mm, mesma taxa de armadura de flexão e relação entre o carregamento atuante $P_2/P_1 = 1$.

A armadura de cisalhamento utilizada (*double headed studs*) nas lajes LC02 e LC03 possibilitou o aumento na carga de ruptura de 41% para o modelo LC02 e 58% para o modelo LC03 em relação à laje LR04, que apresentava mesma taxa de armadura de flexão e mesma excentricidade de carga.

7.1.2 Deslocamentos verticais

Na direção em que foi aplicado momento houve maior rotação e a região oposta à reentrância da laje se deslocou no sentido de aplicação da carga e os bordos da reentrância da laje seguiram o mesmo movimento para os modelos LC02, LC03 e LR04, enquanto que na laje LR01 observou-se que houve deslocamento das bordas da reentrância no sentido oposto ao da aplicação da carga.

Observou-se que os maiores valores de deslocamentos verticais últimos foram obtidos para o modelo LC03, que apresentou maior carga de ruptura.

As lajes LC02, LC03 e LR04, que apresentavam a mesma excentricidade de carga ($e=350\text{mm}$), apresentaram também mesma configuração de deslocamentos verticais para todas as direções, com deslocamentos observados no mesmo sentido da aplicação das cargas.

A utilização de armadura de cisalhamento proporcionou aumento de ductilidade das lajes, maiores cargas de ruptura e maior incidência de fissuras para os modelos LC02 e LC03 em relação às lajes sem armadura de cisalhamento.

7.1.3 Deformação das armaduras de flexão e dos *studs*

As deformações na armadura de flexão das lajes com armadura de cisalhamento foram maiores em relação aos modelos sem armadura de cisalhamento, observando-se as maiores deformações nos pontos instrumentados próximos ao pilar. O modelo LC03, com maior quantidade de camadas de armadura de cisalhamento, foi o que apresentou maior número de pontos monitorados com deformações superiores à de escoamento do aço.

Para os modelos com armadura de cisalhamento observou-se que as maiores deformações ocorreram na segunda camada de *studs*, na laje LC02 observou-se a ocorrência de deformações maiores que a de escoamento do aço, quanto à laje LC03 observou-se que nenhuma camada de armadura de cisalhamento apresentou *studs* com deformações superiores à de escoamento do aço.

7.1.4 Deformações do concreto

Foram posicionados extensômetros elétricos para monitoramento de 9 pontos na superfície inferior de concreto das lajes. Através de análise comparativa dos resultados obtido quanto às deformações observou-se que os maiores valores foram registradas pelos extensômetros EC3 e EC4 posicionados tangencialmente à seção do pilar, constatou-se também que para o grupo com mesma excentricidade de carga (350 mm) houveram maiores deformações de compressão para os modelos com armadura de cisalhamento, com deformações máximas de 2,50‰ no modelo LC03 e 1,06‰ no modelo LC02.

Para os modelos sem armadura de cisalhamento observou-se que a menor excentricidade de carga aplicada no modelo LR04 provocou maiores deformações nos pontos monitorados da superfície de concreto inferior das lajes, com valor máximo de 1,10‰ registrado pelo extensômetro EC4.

Para todos os modelos ensaiados constatou-se a ocorrência de flexão em torno da direção SO-NE na parte norte da laje, observada a partir das deformações dos extensômetros EC4, EC5 e EC6, com provável comportamento similar na direção SE-NO. Até bem próximo da ruptura os extensômetros EC4 e EC5 apresentaram deformações semelhantes e EC6 deformações um pouco menores.

7.1.5 Inclinações das lajes

Com os valores de rotação obtidos para as lajes dos modelos nas proximidades dos pilares, através dos dois inclinômetros usados na pesquisa, foram observadas, em instantes próximos da ruptura, maiores rotações na direção N-S para as lajes dos modelos LR01 e LR04, sem armadura de cisalhamento, onde se observou maiores rotações nesta direção para o modelo LR01, que apresentou, durante a execução do ensaio, cargas aplicadas pelo atuador posicionado na direção N-S com intensidades duas vezes maiores do que as cargas aplicadas pelos atuadores posicionados na direção L-O, onde o máximo valor de rotação registrado foi de 0,023 rad na direção N-S em instante próximo da ruptura.

Para os modelos o qual a concepção envolveu o emprego de armaduras de cisalhamento, LC02 e LC03, observou-se que as maiores rotações ocorrem na direção L-O, com o máximo valor de 0,26 rad registrado em instantes próximos da ruptura do modelo LC03, que apresentou maior carga de ruptura dentre os modelos ensaiados. Constata-se assim a eficiência das armaduras de cisalhamento na rotação das lajes nas proximidades dos pilares na direção N-S, devido sua capacidade de restringir a abertura das fissuras inclinadas que surgem nas proximidades da ligação entre laje e pilar.

7.1.6 Normas de projeto

Os resultados das estimativas normativas do Eurocode 2:2004 e da NBR 6118:2007 apresentaram valores semelhantes entre si e próximos aos valores de carga de ruptura obtidos experimentalmente. No entanto, para os modelos com armadura de cisalhamento, a NBR 6118:2007 aponta ruptura na região fora das armaduras de cisalhamento para os modelos LC02 e LC03, enquanto que as estimativas do Eurocode 2:2004 indicam ruptura no interior da região das armaduras de cisalhamento.

Para as conexões de lajes lisas de concreto armado com pilares de canto reentrante com os parâmetros considerados nesta pesquisa as estimativas de resistência à punção obtidas através do ACI 318:2008 foram as mais conservadoras para todos os modelos ensaiados. Para os modelos com armadura de cisalhamento as estimativas do ACI 318:2008 indicam uma ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento.

7.1.7 Análise numérica

Foram feitas análises estáticas para os modelos considerando as duas excentricidades de carga empregadas nos ensaios experimentais, 525 mm para o modelo LR01 e 350 para os modelos LR04, LC02 e LC03, com a aplicação das cargas de ruptura observadas em laboratório para os modelos LR01 e LR04, considerando a distribuição do carregamento em áreas correspondentes às das chapas de transmissão de carga utilizadas nos ensaios.

Comparando os resultados de deslocamentos verticais observados na análise numérica e os obtidos experimentalmente observou-se que os modelos numéricos apresentaram aspectos de deformada na direção vertical semelhantes aos observados em laboratório, porém os valores de deslocamento apresentaram-se inferiores no estudo numérico comparando-se com os resultados obtidos com os LVDTs devido às simplificações feitas na modelagem quanto ao comportamento do concreto, que foi admitido como elástico-linear o que não acontece realmente em ensaios conduzidos até a ruptura como os realizados no estudo de punção abordado nesta pesquisa.

7.2 SISTEMA DE ENSAIO

O sistema de ensaio utilizado tornou possível a aplicação e controle de carregamentos simétricos e assimétricos, possibilitando a transferência de momento fletor da laje para o pilar, comportando-se de maneira satisfatória para todos os carregamentos e com bom desempenho do sistema hidráulico empregado na aplicação das cargas.

As conexões metálicas de restrição dos pilares se mostraram eficientes, garantindo a estabilidade do sistema de ensaio e a restrição das translações das extremidades dos pilares.

O sistema de aquisição de dados utilizado na pesquisa se mostrou satisfatório quanto à monitoração dos extensômetros, LVDTs e inclinômetro.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Efetuar estudo numérico através do método dos elementos finitos com modelos discretizados com elementos sólidos, de placa e de barra considerando comportamento linear e não-linear dos materiais, modelagem da armadura de flexão e de cisalhamento, com diferentes níveis de refinamento da malha de elementos finitos.

Desenvolver modelos teóricos que descrevam o comportamento de lajes lisas com pilares de reentrância considerando a transferência de momento nas duas direções e diferentes quantidades e disposições de armadura de cisalhamento.

Realizar ensaios com transferência de momentos em duas direções, variando a excentricidade de carga, com o intuito de avaliar e contribuir com as normas de projeto estrutural.

Analisar o comportamento das lajes com diferentes quantidades, disposições e tipos de armaduras de cisalhamento visando avaliar a eficiência e as limitações para cada caso.

Estudar modificações nos métodos de cálculo para que estes representem melhor os resultados obtidos para conexões de lajes lisas reentrantes, inclusive considerando a influência das armaduras de cisalhamento na resistência à punção.

Realizar ensaios considerando pilares retangulares e circulares com diferentes perímetros nas ligações entre lajes lisas de concreto armado e pilares de canto reentrante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 318, **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary**, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.

ACI 412.1R-99, **Shear-Reinforcement for Slabs**. Reported by Joint ACI-ASCE Committee 421, ACI, Farmington Hills, Michigan, 1999.

ALBUQUERQUE, E. J. P. **Punção em Lajes Lisas com Armadura de Cisalhamento e Pilares de Centro Retangulares**. Brasília, 2010. 205f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

ALVES, F. W. **Punção em Lajes Cogumelo Protendidas com Cabos não Aderentes e Pilares não Alinhados**. Brasília, 2002. 174f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023. **Informação e Documentação – Referências – Elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6892. **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522. **Concreto – Determinação do módulo de deformação elástica e diagrama tensão deformação – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

CARVALHO, A. L. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Protendido com Cabos Não-Aderentes e Armadura de Cisalhamento**. Brasília, 2005. Tese de Doutorado (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. volume 2. 1.ed. São Paulo: Pini, 2009. 589p.

CLÍMACO, J. C. TEATINI de S. **Estruturas de Concreto Armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2.ed. Brasília: Universidade de Brasília, 2008. 410p.

Comité Euro-International du Béton. **CEB-FIP Model Code 2010**. London, Thomas Telford, 2010.

CORDOVIL, F. A. B. **Punção em Placas de Concreto Armado**. São Paulo, 1995. 393f. Tese de Doutorado (Doutorado em Estruturas), Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CORDOVIL, Fábio Armando Botelho. **Lajes de Concreto Armado: punção**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1997. 225p.

CORREA, G. S. **Puncionamento em Lajes Cogumelo Protendidas com Cabos Aderentes**. Brasília, 2001. 153f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

DECHKA, D. C. **Response of Shear-Stud-Reinforced Continuous Slab-Column Frames to Seismic Loads**. Alberta, Canada, 2001. 347p. Thesis (ph.D) - University of Calgary.

DILGER, W.H., GHALI, A., **Shear Reinforcement for Concrete Slabs**, ASCE Journal of Structural Division, Proceedings, V. 107, No. ST12, Dec. 1981, pp. 2403-2420.

EDER, M. A., VOLLUM, R. L. ELGHAZOULI A. Y., ABDEL-FATTAH T. **Modelling and experimental assessment of punching shear in flat slabs with shearheads**. Journal of Engineering Structures, V.32, 2010, pp 3911-3924.

ELGABRY, A.A., GHALI, A. **Tests on concrete slab-column connections with stud-shear reinforcement subjected to shear-moment transfer**. ACI Structural Journal, v. 84, n.5, Sept-Oct, 1987, p. 433-442.

Eurocode 2 – EUROPEAN STANDARD. **Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings**. European Committee for Standardization. Brussels, 2004.

FELICIANO, F.M.H. **Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Pilares de Borda e Excentricidade Externa**. Brasília, 2011. 149f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

FERREIRA, M. P. **Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados**. Brasília, 2010. Tese de Doutorado (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

FERREIRA, M. P. **Análise experimental de lajes lisas unidirecionais de concreto armado ao puncionamento simétrico ou assimétrico**. Belém, 2006. 217f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 1.ed. São Paulo: Pini, 1995. 382p.

GRAF, O. **Tests of Reinforced Concrete Slabs Under Concentrated Load Applied Near One Support (Versuche Über Die Widerstandsfähigkeit Von Eisenbetonplatten Unter Konzentrierter Last Nahe Einem Uflager)**. Deutscher Ausschuss für Eisenbeton, Heft 73 Berlin, pp 28. 1933.

GUANDALINI, Stefano. **Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios**. ACI Structural Journal, January-February 2009. N° 106-S10.

GUANDALINI, S. **Poinçonnement Symétrique des Dalles en Béton Armé**. France, 2005. 287p. Thèse (Doctat) – École Polytechnique Fédéral de Lausanne.

HBD PUNCHING SHEAR REINFORCEMENT. **Halfen Punching Shear Reinforcement Concrete**. September 2010.

Hottinger Baldwin Messtechnik. **Catman 4.5**, HBM Software, Operating Manual, 2003.

Hottinger Baldwin Messtechnik. **Manual de operação Spider8 e Spider8-30**, HBM, 2003.

LANGOHR, P.H.; GHALI, A.; DILGER, W.H. **Special shear reinforcement for concrete flat plates**. Journal of the American Concrete Institute, v.73, n.3, 1976, p.141-146.

KIM, H. S., LEE, D. G. **Efficient analysis of flat slab structures subjected to lateral loads**. Journal of Engineering Structures, v.27, 2005, p. 251-263.

KINNUNEN, S.; NYLANDER, H. **Punching of concrete slabs without shear reinforcement**. Meddelande NR 38. Institutionen för Byggnadsstatik, Kungl. Tekniska Högskolans, Stockholm, 1960.

KINNUNEN, S. **Punching of Concrete Slabs With Two-way Reinforcement Whit Special Reference to Dowel Effect and Deviation of Reinforcement from Polar Symmetry**. Meddeland N° 41, Institutionen för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolans, Stockholm, 1963.

MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete – Mechanics and Design**. Second Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

MELGES, J. L. P. **Análise Experimental da Punção em Lajes de Concreto Armado e Protendido**. São Carlos, 2001. 233f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MELO, G. S. S. A. **Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure**. London, England, 1990. 214p. Thesis (PhD) - Polytechnic of Central London.

MENÉTREY, P. **Synthesis of punching failure in reinforce concrete**. Cement & Concrete Composites. V. 24, 2002, pp. 497-507.

MIRZAEI, Y. **Post-Punching Behavior of Reinforced Concret Slabs**. Lausanne, Suisse, 2010. 137p. Thèse (Doctoral) - École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

MOE, J., **Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings Under Concentrated Loads**. Development Departament Bulletin D47, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, Apr. 1961, 129p.

MOKHTAR, A.; GHALI, A.; DILGER, W. **Stud shear reinforcement for flat concrete plates**. Journal of the American Concrete Institute, v. 82, n.5, 1985, p.676-683.

NAAMAN, Antonie E. **Prestressed Concrete Analysis and Design: Fundamentals**. 2.ed. Michigan: Techno Press 3000, 2004. 1072p.

OLIVEIRA, D. R. C. **Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto de Alta Resistência com Armadura Inclinada de Punção**. Brasília, 1998. 137f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

GOMES, H. P. **Puncionamento em lajes lisas protendidas com pilares de extremidade e momentos desbalanceados nas duas direções**. Brasília, 2010. 309f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

RAMOS, A.; REGAN, P. E. **Punching of flat slabs with in-plane forces**. Journal of Engineering Structures. V. 33, 2011, pp. 894-902.

REGAN, P. E., **Punching Shear in Reinforced Concrete**. Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information, No. 168, Jan. 1985, 232 pp.

REGAN, P.E., **Behavior of reinforced concrete flat slabs**. Report 89, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA); London, Feb. 1981, p 89.

REGAN, P. E., **Shear Reinforcement of Flat Slabs**, International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs – Proceeding, TRITA-BKN, Bulletin 57, 2000, pp. 24-31.

REGAN, P. E.; BRAESTRUP, M. W., **Punching Shear in Reinforced Concrete**. Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information, No. 168, Jan. 1985, 232 pp.

REGAN, P.E., WALKER, P.R. e ZAKARIA, K.A.A (*Apud* ALEXANDER & SIMONDS, 1986). **Tests of Reinforced Concrete Flat Slabs**. CIRIA Project RP 220. Polytechnic of Central London. United Kingdom, 1979.

RICHART, F. E. **Reinforced Concrete Wall and Column Footing**. ACI Journal, vol. 45, n° 2, p.97-127, p. 237-260, November, 1948.

RUIZ, M. F.; MUTTONI, A. **Applications of Critical Shear Crack Theory to Punching of Reinforced Concrete Slabs with Transverse Reinforcement**. ACI Structural Journal, July-August, 2009. N° 106-S46.

REGAN, P. E., SAMADIAN, F., **Shear Reinforcement Against Punching in Reinforced Concret Flat Slabs**. The Structural Engineer. V. 79, No. 10, May 2001, pp. 24-31.

SANTOS, V. C. F. **Resistência ao Puncionamento de Lajes Cogumelo de Concreto Armado**. Brasília, 1995. 48f. Projeto Final de Graduação – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

SEIBLE, F.; GHALI, A.; DILGER, W.H. **Preassembled shear reinforcing units for flat plates**. Journal of the American Concrete Institute, v.77, n.1, 1980, p.28-35.

SHEHATA, I. A. E. M. **Theory of Punching in Concrete Slabs**. London, England, 1985. 150p. Thesis (PhD) - Polytechnic of Central London.

SILVA, R. J. C. **Punção em Lajes Cogumelo Protendidas com Cordoalhas não-aderentes e Pilares de Diferentes Dimensões**. Brasília, 2005. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

TALBOLT, A. N. **Reinforced Concrete Wall Footings and Column Footings**. Bulletin 67, March 1913. 1-114, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, 1913.

Shöck Bauteile GmbH. **The Schöck Bole Punching Shear Reinforcement System**. Technical Information Schöck Bole. June, 2004.

TRAUTWEIN, L. M. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento “Stud” Interno e Tipo Estribo Inclinado**. Brasília, 2001. 165f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

TRAUTWEIN, L. M., **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Análise Experimental e Numérica**. São Paulo, 2006. 350f. Tese (Doutorado em Estruturas). Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

TIMOSHENKO, S. P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. W. **Theory of Plates and Shells**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1940. 429p.

VILLAVERDE B., V. **Punção em Lajes Cogumelo Protendidas com Cabos não-aderentes e Pilares com Pequeno Desalinhamento**. Brasília, 2003. 183f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

VILLAVERDE B., V. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Protendido com Cabos Não-Aderentes na Ligação Laje-Pilar de Borda**. Brasília, 2008. 337f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

XIAO, R. Y., O’FLAHERTY T. **Finite-element analysis of tested concrete connections**. Computers & Structures, V. 78, 2000, pp 247-255.

APÊNDICES

A. EVOLUÇÃO DAS CARGAS ATÉ A RUPTURA

Da Tabela A.1 à Tabela A.4 são apresentados os valores dos passos de carga que foram aplicados em cada modelo até que se atingisse a carga de ruptura das lajes. A Figura A.1 apresenta o posicionamento dos atuadores hidráulicos no modelo.

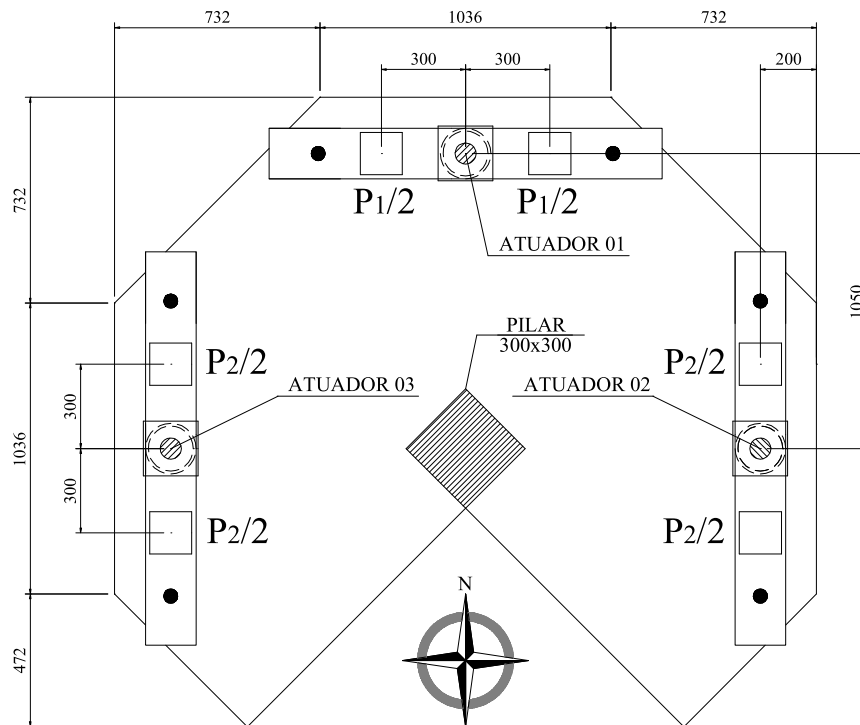


Figura A. 1 - Posicionamento dos atuadores hidráulicos

Tabela A. 1 - Evolução de cargas para o modelo LR01

Passo de Carga	Atuador 01 (kN)	Atuador 02 (kN)	Atuador 03 (kN)	Carga Total (kN)
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	8,1	4,2	4,6	16,9
2	16,0	8,1	8,1	32,2
3	23,9	12,0	12,0	47,9
4	32,0	16,0	15,9	63,9
5	40,0	20,3	20,1	80,4
6	47,8	24,2	24,1	96,1
7	56,1	28,3	28,0	112,4
8	63,8	32,5	32,4	128,7
9	72,0	36,3	36,0	144,3
10	79,9	40,0	40,0	159,9
11	87,7	44,0	44,0	175,7
12	96,5	48,3	48,1	192,9
13	104,0	52,1	52,2	208,3
14	112,1	56,0	56,1	224,2
15	123,0	60,2	60,3	243,5
16	128,3	64,1	64,0	256,4
17	136,2	68,5	68,4	273,1
18	144,2	72,1	72,1	288,4
RUPTURA	146,0	77,0	77,0	300,0

Tabela A. 2 - Evolução de cargas para o modelo LC02

Passo de Carga	Atuador 01 (kN)	Atuador 02 (kN)	Atuador 03 (kN)	Carga Total (kN)
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	5,0	5,0	5,0	15,0
2	10,0	10,3	10,3	30,6
3	15,3	15,2	15,2	45,7
4	20,5	20,5	20,4	61,4
5	25,4	25,1	25,2	75,7
6	32,0	32,3	32,4	96,7
7	39,1	38,8	39,4	117,3
8	45,4	49,0	48,1	142,5
9	53,9	53,5	53,6	161,0
10	60,3	60,1	60,3	180,7
11	67,2	67,1	67,2	201,5
12	74,3	74,4	74,2	222,9
13	81,6	81,1	81,1	243,8
14	88,2	88,0	88,0	264,2
15	95,1	95,0	95,0	285,1
16	102,2	102,0	102,0	306,2
17	109,0	109,3	109,1	327,4
18	116,5	115,8	116,0	348,3
19	123,5	123,3	122,4	369,2
20	130,4	130,0	130,1	390,5
21	135,4	135,9	135,1	406,4
22	140,8	140,3	140,4	421,5
23	144,8	145,7	145,5	436,0
24	151,1	150,5	150,2	451,8
25	156,0	155,0	155,0	466,0
26	161,9	160,0	160,1	482,0
27	164,0	161,3	161,4	486,7
RUPTURA	164,0	162,0	162,0	488,0

Tabela A. 3 - Evolução de cargas para o modelo LC03

Passo de Carga	Atuador 01 (kN)	Atuador 02 (kN)	Atuador 03 (kN)	Carga Total (kN)
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	5,8	5,3	6,0	17,1
2	10,0	10,7	12,0	32,7
3	15,2	15,1	15,1	45,4
4	20,5	20,4	20,2	61,1
5	26,0	25,1	26,5	77,6
6	30,2	30,1	30,2	90,5
7	41,7	40,9	40,1	122,7
8	50,5	50,1	50,0	150,6
9	60,5	60,2	60,2	180,9
10	70,1	70,3	70,2	210,6
11	80,9	81,3	80,3	242,5
12	90,1	90,3	90,7	271,1
13	100,7	100,2	100,2	301,1
14	110,7	110,6	110,0	331,3
15	120,2	121,4	120,6	362,2
16	131,7	132,3	131,0	395,0
17	140,6	139,7	139,7	420,0
18	150,0	150,3	150,7	451,0
19	160,9	160,6	161,0	482,5
20	199,8	168,5	168,7	537,0
21	178,0	181,5	179,6	539,1
RUPTURA	183,0	183,5	183,5	550,0

Tabela A. 4 - Evolução de cargas para o modelo LR04

Passo de Carga	Atuador 01 (kN)	Atuador 02 (kN)	Atuador 03 (kN)	Carga Total (kN)
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	3,9	4,3	4,1	12,3
2	8,0	8,4	9,2	25,6
3	12,1	12,0	12,1	36,2
4	16,1	16,1	16,3	48,5
5	20,2	20,2	20,1	60,5
6	25,1	25,0	25,0	75,1
7	30,3	30,5	30,4	91,2
8	35,1	35,4	35,8	106,3
9	40,3	40,0	40,1	120,4
10	45,2	45,1	45,2	135,5
11	50,5	50,2	50,1	150,8
12	55,0	55,3	55,3	165,6
13	60,3	60,0	60,7	181,0
14	65,0	65,5	65,6	196,1
15	70,5	70,1	70,0	210,6
16	75,0	75,2	75,1	225,3
17	80,0	80,2	80,1	240,3
18	85,3	85,5	85,2	256,0
19	90,2	90,0	90,3	270,5
20	95,1	95,4	95,4	285,9
21	99,1	99,0	99,0	297,1
22	103,2	103,5	103,0	309,7
23	108,0	107,4	107,4	322,8
24	111,2	111,2	111,1	333,5
25	115,0	115,1	115,2	345,3
RUPTURA	115,6	115,7	115,7	347,0

B. DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS LAJES

Nas Tabelas B.1 a B.4 são apresentados os valores dos deslocamentos verticais registrados pelos LVDTs e pelo potenciômetro para as 16 posições monitoradas de cada modelo para cada passo de carga aplicado.

Tabela B. 1 - Deslocamentos verticais no modelo LR01

Passo de Carga	Carga (kN)	LVDT 01 (mm)	LVDT 02 (mm)	LVDT 03 (mm)	LVDT 04 (mm)	LVDT 05 (mm)	LVDT 06 (mm)	LVDT 07 (mm)	LVDT 08 (mm)	LVDT 09 (mm)	LVDT 10 (mm)	LVDT 11 (mm)	LVDT 12 (mm)	LVDT 13 (mm)	LVDT 14 (mm)	LVDT 15 (mm)	LVDT 16 (mm)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,69	0,04	-0,08	-0,22	-0,01	-0,14	-0,14	-0,24	-0,10	-0,19	-0,13	-0,37	-0,01	-0,01	-0,06	-0,04	-1,37
2	3,22	0,08	-0,21	-0,54	0,00	-0,32	-0,29	-0,53	-0,09	-0,35	-0,10	-0,68	-0,02	0,00	-0,13	-0,07	-1,42
3	4,79	0,17	-0,33	-0,92	0,02	-0,53	-0,49	-0,87	-0,10	-0,56	-0,06	-1,11	-0,02	0,00	-0,21	-0,12	-1,64
4	6,39	0,24	-0,50	-1,40	0,04	-0,78	-0,70	-1,29	-0,12	-0,81	-0,06	-1,63	-0,03	0,01	-0,31	-0,18	-1,89
5	8,04	0,37	-0,74	-2,12	0,10	-1,13	-0,98	-1,90	-0,12	-1,15	-0,02	-2,35	-0,03	0,03	-0,43	-0,26	-2,27
6	9,61	0,66	-0,93	-2,86	0,26	-1,50	-1,34	-2,63	-0,04	-1,62	0,01	-3,31	-0,05	0,07	-0,59	-0,37	-2,78
7	11,24	1,05	-1,11	-3,77	0,48	-1,93	-1,78	-3,50	-0,03	-2,17	-0,07	-4,50	-0,05	0,11	-0,70	-0,50	-3,37
8	12,87	1,51	-1,20	-4,58	0,71	-2,30	-2,15	-4,34	-0,03	-2,76	-0,21	-5,74	-0,03	0,17	-0,88	-0,64	-4,03
9	14,43	2,07	-1,29	-5,48	0,97	-2,72	-2,57	-5,24	-0,01	-3,31	-0,14	-7,00	-0,02	0,24	-1,08	-0,76	-4,59
10	15,99	2,74	-1,32	-6,39	1,30	-3,15	-3,05	-6,22	0,02	-3,97	-0,07	-8,46	0,03	0,35	-1,23	-0,89	-5,27
11	17,57	3,26	-1,41	-7,28	1,57	-3,55	-3,43	-7,08	0,02	-4,50	0,02	-9,66	0,06	0,44	-1,38	-0,97	-5,74
12	19,29	4,28	-1,60	-9,25	2,06	-4,40	-4,26	-8,95	0,30	-5,44	0,53	-11,85	0,07	0,54	-1,55	-1,07	-6,43
13	20,83	4,34	-1,78	-9,73	2,11	-4,62	-4,41	-9,33	0,29	-5,67	0,51	-12,36	0,08	0,56	-1,60	-1,11	-6,62
14	22,42	4,41	-2,06	-10,47	2,17	-4,95	-4,65	-9,89	0,31	-6,01	0,50	-13,09	0,07	0,58	-1,66	-1,13	-6,91
15	24,35	4,58	-2,36	-11,38	2,27	-5,37	-4,97	-10,63	0,37	-6,43	0,58	-14,02	0,07	0,61	-1,73	-1,17	-7,27
16	25,64	4,87	-2,71	-12,58	2,43	-5,94	-5,43	-11,61	0,49	-6,95	0,80	-15,13	0,07	0,63	-1,79	-1,20	-7,67
17	27,31	5,17	-3,07	-13,78	2,60	-6,50	-5,87	-12,58	0,61	-7,46	0,99	-16,21	0,06	0,66	-1,85	-1,23	-8,00
18	28,84	5,48	-3,39	-14,94	2,76	-7,05	-6,31	-13,56	0,75	-7,95	1,24	-17,26	0,06	0,66	-1,92	-1,27	-8,31

Tabela B. 2 - Deslocamentos verticais no modelo LC02

Passo de Carga	Carga (kN)	LVD1 (mm)	LVD2 (mm)	LVD3 (mm)	LVD4 (mm)	LVD5 (mm)	LVD6 (mm)	LVD7 (mm)	LVD8 (mm)	LVD9 (mm)	LVD10 (mm)	LVD11 (mm)	LVD12 (mm)	LVD13 (mm)	LVD14 (mm)	LVD15 (mm)	LVD16 (mm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	15,00	0,13	0,22	0,33	0,08	0,18	0,08	0,18	-0,02	0,06	-0,07	0,11	0,04	0,00	0,06	0,00	1,27
2	30,60	0,16	0,35	0,65	0,13	0,33	0,15	0,48	0,07	0,28	0,12	0,56	0,08	0,03	0,15	0,00	1,65
3	45,70	0,17	0,46	0,86	0,16	0,46	0,23	0,68	0,08	0,39	0,14	0,79	0,10	0,03	0,20	0,00	1,78
4	61,40	0,27	0,70	1,27	0,23	0,67	0,35	0,95	0,09	0,53	0,17	1,07	0,13	0,04	0,27	0,00	1,90
5	75,70	0,38	1,00	1,87	0,29	0,92	0,49	1,32	0,12	0,74	0,24	1,53	0,16	0,05	0,34	0,00	2,41
6	96,70	0,57	1,46	2,73	0,38	1,30	0,71	1,86	0,18	1,07	0,47	2,27	0,19	0,04	0,43	0,00	2,86
7	117,30	0,75	1,94	3,60	0,43	1,70	0,96	2,47	0,30	1,48	0,87	3,26	0,21	0,03	0,52	0,00	3,56
8	142,50	1,23	2,71	4,83	0,60	2,23	1,23	3,03	0,41	1,86	1,27	4,18	0,24	0,03	0,60	0,00	4,26
9	161,00	1,23	3,01	5,53	0,58	2,54	1,43	3,58	0,47	2,25	1,56	5,14	0,24	0,03	0,68	0,00	4,93
10	180,70	1,35	3,40	6,30	0,61	2,87	1,63	4,07	0,53	2,60	1,84	5,98	0,24	0,02	0,75	0,00	5,51
11	201,50	1,49	3,89	7,26	0,63	3,27	1,85	4,66	0,59	3,02	2,17	6,98	0,25	0,02	0,83	0,00	6,20
12	222,90	1,60	4,37	8,22	0,64	3,68	2,10	5,25	0,65	3,44	2,47	8,00	0,25	0,02	0,91	0,00	6,89
13	243,80	1,68	4,82	9,21	0,63	4,08	2,35	5,88	0,71	3,89	2,76	9,09	0,25	0,02	0,99	0,00	7,60
14	264,20	1,74	5,25	10,09	0,63	4,45	2,57	6,47	0,00	4,32	3,02	10,09	0,25	0,01	1,06	0,00	8,25
15	285,10	1,82	5,71	11,06	0,62	4,86	2,81	7,10	0,80	4,76	3,28	11,13	0,26	0,01	1,13	0,00	8,90
16	306,20	1,94	6,25	12,08	0,63	5,32	3,10	7,77	0,86	5,25	3,57	12,26	0,29	0,01	1,20	0,00	9,62
17	327,40	2,03	6,78	13,11	0,63	5,78	3,38	8,43	0,89	5,71	3,79	13,26	0,30	0,00	1,27	-0,03	10,30
18	348,30	2,00	7,23	14,14	0,58	6,24	3,67	9,18	0,92	6,24	4,01	14,46	0,30	-0,01	1,34	-0,04	11,01
19	369,20	2,02	7,83	15,43	0,55	6,84	4,05	10,07	0,93	6,86	4,18	15,83	0,31	-0,01	1,40	-0,03	11,81
20	390,50	2,00	8,32	16,53	0,50	7,35	4,43	10,81	0,96	7,38	4,39	17,04	0,32	-0,03	1,46	-0,03	12,54
21	406,40	2,03	8,80	17,53	0,48	7,80	4,69	11,46	0,97	7,83	4,54	18,05	0,32	-0,04	1,51	-0,02	13,11
22	421,50	1,92	9,12	18,39	0,40	8,19	4,97	12,14	1,02	8,37	4,79	19,26	0,33	-0,05	1,56	-0,03	13,85
23	436,00	1,92	9,20	18,53	0,40	8,25	4,99	12,22	1,02	8,43	4,78	19,38	0,33	-0,04	1,55	0,00	13,91
24	451,80	1,88	9,54	19,33	0,36	8,63	5,23	12,80	1,02	8,85	4,88	20,32	0,33	-0,05	1,59	0,00	14,39
25	466,00	1,78	10,00	20,49	0,30	9,20	5,64	13,74	1,02	9,55	5,01	21,88	0,34	-0,06	1,63	0,00	15,23
26	482,00	1,57	10,58	22,08	0,22	9,98	6,18	14,96	0,95	10,37	4,98	23,68	0,33	-0,06	1,65	0,00	16,06
27	486,70	1,38	11,57	24,41	0,18	11,21	7,03	16,69	0,80	11,51	4,84	26,13	0,34	-0,06	1,67	-0,01	17,16

Tabela B. 3 - Deslocamentos verticais no modelo LC03

Passo de Carga	Carga (kN)	LVD1 (mm)	LVD2 (mm)	LVD3 (mm)	LVD4 (mm)	LVD5 (mm)	LVD6 (mm)	LVD7 (mm)	LVD8 (mm)	LVD9 (mm)	LVD10 (mm)	LVD11 (mm)	LVD12 (mm)	LVD13 (mm)	LVD14 (mm)	LVD15 (mm)	LVD16 (mm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	17,10	-0,30	-0,41	-0,58	-0,22	-0,35	-0,24	-0,36	-0,08	-0,23	-0,11	-0,41	-0,18	-0,09	-0,18	-0,09	-0,44
2	32,70	-0,36	-0,52	-0,79	-0,26	-0,47	-0,34	-0,52	-0,09	-0,33	-0,17	-0,62	-0,21	-0,09	-0,23	-0,11	-0,58
3	45,40	-0,44	-0,72	-1,14	-0,32	-0,67	-0,48	-0,76	-0,08	-0,44	-0,13	-0,83	-0,28	-0,11	-0,31	-0,14	-0,68
4	61,10	-0,53	-0,98	-1,63	-0,40	-0,95	-0,69	-1,10	-0,09	-0,64	-0,16	-1,23	-0,38	-0,14	-0,43	-0,18	-0,86
5	77,60	-0,65	-1,31	-2,21	-0,50	-1,26	-0,91	-1,49	-0,13	-0,89	-0,30	-1,77	-0,47	-0,17	-0,54	-0,23	-1,17
6	90,50	-0,86	-1,68	-2,79	-0,61	-1,56	-1,11	-1,86	-0,16	-1,10	-0,39	-2,25	-0,54	-0,19	-0,63	-0,26	-1,44
7	122,70	-1,43	-2,68	-4,34	-0,86	-2,32	-1,57	-2,76	-0,28	-1,69	-0,83	-3,59	-0,71	-0,22	-0,84	-0,34	-2,27
8	150,60	-1,72	-3,34	-5,46	-0,98	-2,87	-1,94	-3,47	-0,40	-2,19	-1,28	-4,74	-0,81	-0,24	-0,99	-0,42	-3,12
9	180,90	-2,17	-4,18	-6,79	-1,15	-3,49	-2,32	-4,21	-0,51	-2,70	-1,70	-5,88	-0,92	-0,27	-1,15	-0,48	-3,94
10	210,60	-2,48	-4,92	-8,07	-1,27	-4,09	-2,71	-4,98	-0,58	-3,21	-2,06	-7,07	-1,03	-0,28	-1,32	-0,54	-4,74
11	242,50	-2,88	-5,85	-9,65	-1,40	-4,82	-3,14	-5,87	-0,65	-3,78	-2,37	-8,38	-1,15	-0,30	-1,48	-0,61	-5,59
12	271,10	-3,13	-6,56	-10,90	-1,48	-5,40	-3,53	-6,65	-0,73	-4,33	-2,72	-9,64	-1,23	-0,31	-1,63	-0,67	-6,50
13	301,10	-3,48	-7,50	-12,48	-1,60	-6,13	-3,98	-7,55	-0,75	-4,90	-2,90	-10,91	-1,35	-0,32	-1,79	-0,73	-7,30
14	331,30	-3,62	-8,27	-13,93	-1,64	-6,81	-4,42	-8,47	-0,77	-5,51	-3,13	-12,27	-1,44	-0,32	-1,94	-0,78	-8,22
15	362,20	-4,04	-9,35	-15,73	-1,78	-7,62	-4,90	-9,45	-0,81	-6,17	-3,43	-13,75	-1,54	-0,32	-2,09	-0,84	-9,26
16	395,00	-4,89	-11,49	-19,12	-2,09	-9,21	-5,70	-11,11	-0,53	-6,90	-2,88	-15,25	-1,83	-0,34	-2,39	-0,88	-9,67
17	420,00	-4,46	-11,43	-19,55	-1,91	-9,44	-6,01	-11,79	-0,63	-7,54	-3,27	-16,68	-1,82	-0,32	-2,48	-0,95	-10,68
18	451,00	-4,39	-12,03	-20,92	-1,88	-10,11	-6,52	-12,87	-0,67	-8,40	-3,59	-18,54	-1,89	-0,29	-2,62	-1,01	-11,90
19	482,50	-4,29	-12,81	-22,73	-1,84	-11,01	-7,18	-14,27	-0,63	-9,42	-3,68	-20,78	-1,98	-0,27	-2,66	-0,98	-13,35
20	537,00	-3,99	-14,11	-25,92	-1,73	-12,65	-8,46	-16,75	-0,40	-11,07	-3,32	-24,24	-2,10	-0,26	-2,83	-1,02	-14,76
21	539,10	-2,59	-16,47	-32,85	-1,27	-16,40	-11,93	-23,02	0,02	-15,55	-2,69	-33,41	-2,18	-0,27	-2,96	-1,09	-18,95

Tabela B. 4 - Deslocamentos verticais no modelo LR04

Passo de Carga	Carga (kN)	LVDT 01 (mm)	LVDT 02 (mm)	LVDT 03 (mm)	LVDT 04 (mm)	LVDT 05 (mm)	LVDT 06 (mm)	LVDT 07 (mm)	LVDT 08 (mm)	LVDT 09 (mm)	LVDT 10 (mm)	LVDT 11 (mm)	LVDT 12 (mm)	LVDT 13 (mm)	LVDT 14 (mm)	LVDT 15 (mm)	LVDT 16 (mm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
1	1,23	-1,34	-0,92	-0,54	-0,78	-0,39	-0,05	0,17	-0,08	0,29	-0,15	0,74	-0,44	-0,33	-0,01	0,05	0,10
2	2,56	-1,28	-0,98	-0,73	-0,76	-0,49	-0,14	-0,03	-0,10	0,15	-0,21	0,42	-0,46	-0,33	-0,08	0,02	-0,09
3	3,62	-1,22	-1,08	-1,00	-0,73	-0,63	-0,26	-0,28	-0,08	0,01	-0,18	0,13	-0,48	-0,31	-0,16	-0,02	-0,23
4	4,85	-1,08	-1,18	-1,38	-0,65	-0,82	-0,43	-0,65	-0,08	-0,24	-0,23	-0,41	-0,49	-0,29	-0,28	-0,08	-0,49
5	6,05	-0,88	-1,26	-1,77	-0,53	-1,00	-0,59	-1,03	-0,06	-0,48	-0,24	-0,93	-0,47	-0,26	-0,38	-0,13	-0,75
6	7,51	-0,75	-1,43	-2,30	-0,45	-1,25	-0,80	-1,49	-0,09	-0,78	-0,39	-1,64	-0,46	-0,24	-0,50	-0,18	-1,15
7	9,12	-1,02	-1,92	-3,04	-0,55	-1,59	-0,96	-1,89	-0,17	-1,02	-0,62	-2,18	-0,53	-0,23	-0,59	-0,21	-1,49
8	10,63	-1,23	-2,32	-3,67	-0,64	-1,90	-1,14	-2,28	-0,25	-1,28	-0,88	-2,79	-0,60	-0,24	-0,67	-0,24	-1,89
9	12,04	-1,48	-2,75	-4,34	-0,75	-2,22	-1,33	-2,67	-0,30	-1,51	-1,06	-3,35	-0,68	-0,25	-0,76	-0,26	-2,23
10	13,55	-1,71	-3,20	-5,07	-0,83	-2,55	-1,52	-3,08	-0,38	-1,81	-1,36	-4,07	-0,76	-0,26	-0,84	-0,28	-2,72
11	15,08	-1,85	-3,52	-5,63	-0,88	-2,82	-1,68	-3,44	-0,41	-2,03	-1,52	-4,60	-0,82	-0,28	-0,92	-0,31	-3,04
12	16,56	-2,03	-3,89	-6,25	-0,95	-3,11	-1,86	-3,82	-0,47	-2,30	-1,79	-5,27	-0,87	-0,29	-0,99	-0,33	-3,48
13	18,10	-2,22	-4,29	-6,91	-1,00	-3,42	-2,04	-4,21	-0,50	-2,57	-1,97	-5,90	-0,93	-0,30	-1,07	-0,35	-3,87
14	19,61	-2,48	-4,78	-7,70	-1,08	-3,78	-2,24	-4,63	-0,52	-2,82	-2,12	-6,51	-1,01	-0,31	-1,15	-0,38	-4,24
15	21,06	-2,58	-5,10	-8,28	-1,11	-4,04	-2,40	-4,99	-0,54	-3,07	-2,28	-7,10	-1,06	-0,32	-1,21	-0,39	-4,59
16	22,53	-2,74	-5,49	-8,92	-1,14	-4,34	-2,57	-5,36	-0,57	-3,32	-2,47	-7,71	-1,11	-0,33	-1,28	-0,42	-4,96
17	24,03	-2,86	-5,86	-9,60	-1,16	-4,65	-2,76	-5,80	-0,59	-3,62	-2,65	-8,43	-1,16	-0,34	-1,35	-0,44	-5,39
18	25,60	-3,09	-6,38	-10,43	-1,23	-5,03	-2,97	-6,27	-0,62	-3,92	-2,83	-9,14	-1,23	-0,37	-1,42	-0,47	-5,80
19	27,05	-3,12	-6,68	-11,06	-1,22	-5,33	-3,17	-6,72	-0,67	-4,27	-3,04	-9,93	-1,27	-0,40	-1,48	-0,49	-6,30
20	28,59	-3,24	-7,06	-11,73	-1,24	-5,64	-3,37	-7,14	-0,71	-4,58	-3,23	-10,63	-1,31	-0,41	-1,55	-0,51	-6,73
21	29,71	-3,28	-7,35	-12,29	-1,24	-5,92	-3,56	-7,55	-0,73	-4,88	-3,38	-11,30	-1,35	-0,43	-1,60	-0,52	-7,11
22	30,97	-3,28	-7,63	-12,88	-1,32	-6,27	-3,93	-8,01	-0,75	-5,21	-3,49	-12,01	-1,39	-0,44	-1,65	-0,54	-7,51
23	32,28	-3,23	-8,01	-13,76	-1,27	-6,73	-4,30	-8,73	-0,80	-5,75	-3,70	-13,14	-1,43	-0,45	-1,70	-0,56	-8,15
24	33,35	-3,20	-8,32	-14,45	-1,25	-7,08	-4,58	-9,28	-0,81	-6,11	-3,78	-13,89	-1,45	-0,46	-1,74	-0,57	-8,54
25	34,53	-3,02	-8,88	-15,81	-1,18	-7,84	-5,26	-10,46	-0,80	-6,92	-3,76	-15,40	-1,49	-0,48	-1,72	-0,58	-9,22

C. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO E DE CISALHAMENTO

Da Tabela C1 a C12 são apresentados os valores de deformação registrados nas armaduras de flexão e de cisalhamentos, obtidos através de extensômetros elétricos e monitorados pelo sistema de aquisição de dados. Os resultados são expostos para cada passo de carga aplicado.

Tabela C. 1 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LR01 (EF1 a EF14)

Passo de Carga	Carga (Kn)	EF1 (%)	EF2 (%)	EF3 (%)	EF4 (%)	EF5 (%)	EF6 (%)	EF7 (%)	EF8 (%)	EF9 (%)	EF10 (%)	EF11 (%)	EF12 (%)	EF13 (%)	EF14 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
1	16,90	0,07	0,02	0,03	0,05	0,07	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,03
2	32,20	0,07	0,03	0,05	0,10	0,12	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08	0,08	0,05
3	47,90	0,10	0,06	0,10	0,18	0,19	0,08	0,04	0,03	0,01	0,03	0,07	0,14	0,15	0,09
4	63,90	0,11	0,10	0,16	0,29	0,28	0,12	0,06	0,04	0,02	0,05	0,12	0,24	0,24	0,19
5	80,40	0,14	0,16	0,24	0,44	0,39	0,17	0,08	0,06	0,03	0,08	0,17	0,40	0,37	0,34
6	96,10	0,20	0,22	0,33	0,58	0,51	0,22	0,11	0,07	0,04	0,11	0,24	0,56	0,50	0,46
7	112,40	0,25	0,27	0,45	0,74	0,66	0,31	0,13	0,09	0,05	0,14	0,30	0,73	0,65	0,60
8	128,70	0,30	0,32	0,55	0,87	0,81	0,42	0,16	0,10	0,07	0,17	0,38	0,87	0,78	0,71
9	144,30	0,33	0,37	0,65	0,99	0,94	0,47	0,20	0,12	0,09	0,20	0,45	1,02	0,92	0,83
10	159,90	0,37	0,41	0,77	1,10	1,06	0,52	0,24	0,13	0,10	0,23	0,52	1,16	1,05	0,93
11	175,70	0,41	0,46	0,89	1,20	1,19	0,66	0,35	0,14	0,11	0,26	0,60	1,30	1,17	1,03
12	192,90	0,48	0,55	1,15	1,30	1,36	0,82	0,48	0,19	0,14	0,33	0,74	1,55	1,39	1,23
13	208,30	0,51	0,58	1,22	1,37	1,44	0,83	0,52	0,19	0,15	0,35	0,79	1,64	1,48	1,30
14	224,20	0,54	0,64	1,35	1,44	1,53	0,91	0,56	0,21	0,16	0,37	0,85	1,77	1,59	1,39
15	243,50	0,58	0,70	1,47	1,50	1,63	1,02	0,62	0,23	0,17	0,40	0,93	1,90	1,69	1,47
16	256,40	0,61	0,77	1,61	1,51	1,73	1,09	0,67	0,27	0,18	0,44	1,02	2,07	1,75	1,52
17	273,10	0,65	0,83	1,76	1,56	1,85	1,17	0,74	0,30	0,19	0,48	1,11	2,22	1,83	1,62
18	288,40	0,69	0,89	1,90	1,63	1,97	1,28	0,81	0,34	0,21	0,52	1,19	2,36	1,92	1,71

Tabela C. 2 - Deformação na armadura de flexão superior do modelo LR01 (EF15 a EF27)

Passo de Carga	Carga (kN)	EF15 (%)	EF16 (%)	EF17 (%)	EF18 (%)	EF19 (%)	EF20 (%)	EF21 (%)	EF22 (%)	EF23 (%)	EF24 (%)	EF25 (%)	EF26 (%)	EF27 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	16,90	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
2	32,20	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
3	47,90	0,06	0,05	0,04	0,02	0,04	0,01	0,05	0,06	0,03	0,03	0,04	0,01	0,02
4	63,90	0,11	0,09	0,06	0,05	0,07	0,02	0,05	0,09	0,05	0,06	0,07	0,02	0,02
5	80,40	0,23	0,16	0,13	0,12	0,12	0,09	0,07	0,13	0,09	0,10	0,13	0,03	0,03
6	96,10	0,33	0,25	0,20	0,17	0,18	0,18	0,13	0,22	0,12	0,17	0,22	0,06	0,05
7	112,40	0,41	0,32	0,26	0,24	0,23	0,27	0,25	0,34	0,15	0,24	0,30	0,10	0,10
8	128,70	0,49	0,39	0,31	0,29	0,28	0,33	0,35	0,45	0,18	0,33	0,39	0,17	0,16
9	144,30	0,56	0,44	0,35	0,34	0,34	0,38	0,40	0,52	0,22	0,41	0,48	0,23	0,22
10	159,90	0,61	0,49	0,39	0,38	0,40	0,43	0,46	0,60	0,26	0,49	0,57	0,31	0,29
11	175,70	0,67	0,54	0,43	0,42	0,47	0,46	0,50	0,66	0,29	0,56	0,63	0,36	0,34
12	192,90	0,77	0,62	0,48	0,45	0,62	0,51	0,54	0,79	0,32	0,66	0,73	0,40	0,38
13	208,30	0,81	0,65	0,50	0,48	0,66	0,54	0,57	0,83	0,34	0,70	0,77	0,43	0,40
14	224,20	0,87	0,70	0,54	0,53	0,74	0,58	0,61	0,89	0,35	0,77	0,85	0,47	0,44
15	243,50	0,93	0,75	0,58	0,57	0,84	0,62	0,66	0,96	0,38	0,87	0,93	0,50	0,48
16	256,40	1,01	0,80	0,62	0,62	0,93	0,68	0,67	1,01	0,46	1,03	0,99	0,53	0,51
17	273,10	1,08	0,86	0,66	0,68	1,00	0,74	0,69	1,06	0,51	1,16	1,06	0,56	0,54
18	288,40	1,16	0,91	0,70	0,74	1,10	0,77	0,72	1,10	0,54	1,31	1,12	0,59	0,57

Tabela C. 3 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC02 (EF1 a EF14)

Passo de Carga	Carga (kN)	EF1 (%)	EF2 (%)	EF3 (%)	EF4 (%)	EF5 (%)	EF6 (%)	EF7 (%)	EF8 (%)	EF9 (%)	EF10 (%)	EF11 (%)	EF12 (%)	EF13 (%)	EF14 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	15,00	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,05	0,04	0,03
2	30,60	-0,07	0,02	0,07	0,12	0,12	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,08	0,08	0,06
3	45,70	-0,11	0,04	0,09	0,16	0,16	0,04	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0,11	0,12	0,08
4	61,40	-0,14	0,08	0,12	0,24	0,21	0,07	0,04	0,01	0,02	0,05	0,07	0,19	0,19	0,14
5	75,70	-0,06	0,23	0,18	0,37	0,32	0,09	0,06	0,02	0,03	0,07	0,10	0,30	0,30	0,22
6	96,70	0,05	1,12	0,28	0,59	0,52	0,19	0,08	0,03	0,04	0,10	0,16	0,47	0,46	0,37
7	117,30	0,06	-9,33	0,41	0,79	0,73	0,30	0,16	0,05	0,05	0,13	0,25	0,66	0,64	0,59
8	142,50	-0,22	-9,33	0,57	0,99	0,89	0,39	0,24	0,07	0,06	0,18	0,37	0,90	0,83	0,83
9	161,00	-0,03	-9,33	0,66	1,11	1,03	0,53	0,30	0,12	0,06	0,23	0,45	1,08	0,93	0,96
10	180,70	0,01	-9,33	0,76	1,23	1,15	0,60	0,36	0,17	0,07	0,28	0,55	1,21	1,04	1,08
11	201,50	0,01	-9,33	0,87	1,34	1,29	0,71	0,43	0,23	0,08	0,34	0,69	1,40	1,17	1,23
12	222,90	0,23	-9,33	0,99	1,47	1,42	0,80	0,49	0,27	0,09	0,42	0,82	1,53	1,31	1,36
13	243,80	0,32	-9,33	1,10	1,59	1,56	0,89	0,55	0,30	0,11	0,48	0,95	1,63	1,44	1,48
14	264,20	-0,08	-9,33	1,20	1,68	1,69	0,98	0,61	0,34	0,13	0,54	1,06	1,78	1,56	1,61
15	285,10	0,09	-9,33	1,30	1,77	1,83	1,07	0,66	0,36	0,17	0,59	1,17	1,88	1,68	1,73
16	306,20	0,09	-9,33	1,41	1,86	1,98	1,15	0,71	0,39	0,27	0,66	1,26	1,96	1,80	1,85
17	327,40	-0,37	-9,33	1,49	1,95	2,12	1,22	0,75	0,42	0,32	0,72	1,35	1,84	1,91	1,98
18	348,30	0,00	-9,33	1,58	2,06	2,29	1,29	0,79	0,45	0,36	0,76	1,43	1,91	2,03	2,13
19	369,20	-0,18	-9,33	1,69	2,17	2,48	1,34	0,82	0,47	0,40	0,81	1,52	1,77	2,14	2,32
20	390,50	-1,68	-9,33	1,78	2,29	2,66	1,42	0,84	0,49	0,43	0,84	1,59	1,79	2,25	2,47
21	406,40	-1,10	-9,33	1,86	2,41	2,80	1,47	0,85	0,50	0,45	0,87	1,65	1,85	2,34	2,58
22	421,50	-1,32	-9,33	1,95	2,58	3,41	1,54	0,86	0,52	0,47	0,90	1,70	2,05	2,42	2,69
23	436,00	-1,60	-9,33	1,95	2,58	3,45	1,52	0,86	0,52	0,48	0,90	1,70	2,05	2,41	2,69
24	451,80	-1,24	-9,33	2,03	2,86	4,36	1,57	0,87	0,54	0,50	0,93	1,75	2,29	2,49	2,75
25	466,00	-2,02	-9,33	2,16	3,24	-8,18	1,63	0,89	0,56	0,52	0,97	1,83	2,41	2,71	2,81
26	482,00	-0,88	-9,33	2,27	6,65	-8,18	1,67	0,91	0,59	0,54	1,00	1,88	3,16	2,80	2,89
27	486,70	-3,30	-9,33	2,43	5,32	-8,18	1,71	0,94	0,61	0,54	1,04	1,91	-2,75	2,86	3,01

Tabela C. 4 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC02 (EF15 a EF27)

Passo de Carga	Carga (kN)	EF15 (%)	EF16 (%)	EF17 (%)	EF18 (%)	EF19 (%)	EF20 (%)	EF21 (%)	EF22 (%)	EF23 (%)	EF24 (%)	EF25 (%)	EF26 (%)	EF27 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	15,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
2	30,60	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,07	0,08	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01
3	45,70	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,07	0,08	0,09	0,01	0,03	0,04	0,02	0,01
4	61,40	0,06	0,04	0,04	0,06	0,07	0,14	0,08	0,10	0,02	0,04	0,06	0,03	0,02
5	75,70	0,10	0,07	0,08	0,10	0,15	0,21	0,13	0,14	0,05	0,07	0,09	0,06	0,05
6	96,70	0,22	0,14	0,23	0,18	0,27	0,33	0,21	0,22	0,20	0,14	0,17	0,03	0,09
7	117,30	0,33	0,22	0,28	0,26	0,39	0,41	0,43	0,40	0,28	0,31	0,32	-0,07	0,17
8	142,50	0,47	0,39	0,39	0,39	0,51	0,57	0,62	0,56	0,35	0,49	0,51	0,00	0,25
9	161,00	0,57	0,47	0,44	0,44	0,59	0,63	0,70	0,66	0,41	0,60	0,62	0,06	0,28
10	180,70	0,66	0,54	0,49	0,52	0,69	0,70	0,79	0,76	0,44	0,69	0,70	0,13	0,32
11	201,50	0,78	0,61	0,54	0,64	0,82	0,81	0,90	0,89	0,49	0,79	0,81	0,23	0,40
12	222,90	0,88	0,67	0,59	0,73	0,92	0,91	1,01	1,03	0,54	0,89	0,91	0,56	0,52
13	243,80	0,98	0,74	0,64	0,82	1,00	1,00	1,11	1,19	0,59	0,97	1,01	0,65	0,60
14	264,20	1,08	0,81	0,69	0,89	1,08	1,09	1,21	1,33	0,64	1,07	1,10	1,06	0,68
15	285,10	1,18	0,90	0,73	0,97	1,16	1,18	1,30	1,46	0,68	1,16	1,19	1,12	0,74
16	306,20	1,28	0,98	0,77	1,07	1,24	1,27	1,40	1,59	0,73	1,26	1,28	1,93	0,82
17	327,40	1,38	1,06	0,82	1,15	1,32	1,34	1,47	1,69	0,77	1,35	1,37	2,05	0,88
18	348,30	1,48	1,14	0,90	1,23	1,39	1,40	1,55	1,80	0,83	1,45	1,47	4,43	0,95
19	369,20	1,60	1,23	0,96	1,32	1,44	1,49	1,60	1,91	0,86	1,58	1,59	4,60	1,04
20	390,50	1,71	1,31	1,02	1,40	1,50	1,57	1,67	2,00	0,91	1,69	1,69	-9,04	1,11
21	406,40	1,80	1,37	1,07	1,45	1,55	1,62	1,72	2,08	0,94	1,78	1,78	2,38	1,18
22	421,50	1,88	1,44	1,12	1,49	1,61	1,66	1,78	2,18	0,97	1,89	1,87	1,84	1,24
23	436,00	1,88	1,44	1,12	1,49	1,60	1,66	1,77	2,16	0,96	1,89	1,88	1,80	1,25
24	451,80	1,94	1,50	1,16	1,52	1,66	1,70	1,82	2,24	0,98	1,99	1,96	1,68	1,30
25	466,00	2,03	1,58	1,20	1,55	1,74	1,72	1,90	2,34	1,02	2,12	2,06	1,60	1,37
26	482,00	2,13	1,66	1,25	1,55	1,81	1,73	1,94	2,42	1,06	2,25	2,17	1,63	1,42
27	486,70	2,27	1,78	1,32	1,56	1,89	1,75	1,98	2,56	1,10	2,32	2,33	1,74	1,51

Tabela C. 5 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC03 (EF1 a EF14)

Passo de Carga	Carga (kN)	EF1 (%)	EF2 (%)	EF3 (%)	EF4 (%)	EF5 (%)	EF6 (%)	EF7 (%)	EF8 (%)	EF9 (%)	EF10 (%)	EF11 (%)	EF12 (%)	EF13 (%)	EF14 (%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	17,1	0,04	0,00	0,05	0,04	0,06	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,06	0,04
2	32,7	0,04	0,01	0,07	0,06	0,09	0,03	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,07	0,08	0,05
3	45,4	0,05	0,02	0,09	0,11	0,13	0,05	0,03	0,02	0,01	0,02	0,05	0,10	0,12	0,08
4	61,1	0,07	0,05	0,11	0,21	0,21	0,08	0,05	0,02	0,01	0,03	0,08	0,16	0,19	0,14
5	77,6	0,10	0,08	0,16	0,36	0,34	0,13	0,09	0,04	0,02	0,05	0,13	0,27	0,31	0,23
6	90,5	0,15	0,13	0,23	0,47	0,44	0,18	0,15	0,05	0,03	0,06	0,19	0,40	0,42	0,30
7	122,7	0,26	0,20	0,46	0,75	0,70	0,36	0,33	0,08	0,06	0,14	0,36	0,74	0,72	0,53
8	150,6	0,35	0,27	0,64	0,97	0,92	0,51	0,45	0,15	0,10	0,21	0,47	0,94	0,93	0,71
9	180,9	0,45	0,38	0,84	1,20	1,14	0,69	0,54	0,20	0,16	0,32	0,59	1,18	1,16	0,91
10	210,6	0,54	0,50	1,01	1,41	1,35	0,84	0,64	0,26	0,23	0,41	0,70	1,39	1,37	1,10
11	242,5	0,58	0,68	1,22	1,63	1,56	1,01	0,74	0,32	0,29	0,52	0,81	1,63	1,60	1,32
12	271,1	0,65	0,85	1,40	1,81	1,75	1,16	0,83	0,37	0,35	0,60	0,89	1,81	1,79	1,49
13	301,1	0,72	1,02	1,62	1,99	1,95	1,29	0,91	0,42	0,41	0,69	1,00	2,00	2,00	1,69
14	331,3	0,78	1,16	1,80	2,17	2,15	1,42	0,98	0,47	0,45	0,76	1,10	2,20	2,19	1,85
15	362,2	0,87	1,35	2,02	2,37	2,36	1,55	1,05	0,52	0,50	0,84	1,22	2,46	2,42	2,02
16	395	0,99	1,61	2,28	2,58	2,56	1,65	1,09	0,57	0,57	0,96	1,40	2,82	2,75	2,27
17	420	1,03	1,67	2,37	2,72	2,84	1,76	1,16	0,64	0,58	0,98	1,43	2,88	2,84	2,36
18	451	1,12	1,81	2,55	3,07	3,38	1,86	1,21	0,71	0,61	1,05	1,53	3,16	3,97	2,55
19	482,5	1,20	1,96	2,77	4,82	-8,29	1,98	1,29	0,76	0,65	1,14	1,65	4,37	-7,51	2,75
20	537	1,29	2,20	3,37	-7,77	-8,29	2,06	1,39	0,83	0,70	1,26	1,86	-8,18	-7,51	3,31
21	539,1	1,59	2,73	-8,05	-7,77	-8,29	2,25	1,49	0,91	0,77	1,43	2,28	-8,18	-7,51	-7,42

Tabela C. 6 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LC03 (EF15 a EF27)

Passo de Carga	Carga (kN)	EF15 (%)	EF16 (%)	EF17 (%)	EF18 (%)	EF19 (%)	EF20 (%)	EF21 (%)	EF22 (%)	EF23 (%)	EF24 (%)	EF25 (%)	EF26 (%)	EF27 (%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	17,1	0,02	0,02	0,01	0,06	0,01	0,08	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
2	32,7	0,03	0,02	0,02	0,07	0,02	0,10	0,07	0,07	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02
3	45,4	0,06	0,04	0,03	0,08	0,03	0,11	0,07	0,08	0,01	0,04	0,04	0,02	0,02
4	61,1	0,12	0,06	0,05	0,09	0,05	0,14	0,12	0,14	0,03	0,08	0,07	0,05	0,04
5	77,6	0,18	0,09	0,09	0,13	0,08	0,21	0,19	0,23	0,09	0,18	0,19	0,13	0,10
6	90,5	0,27	0,11	0,14	0,19	0,11	0,31	0,24	0,30	0,14	0,24	0,25	0,18	0,15
7	122,7	0,45	0,21	0,24	0,39	0,23	0,53	0,46	0,52	0,23	0,39	0,41	0,33	0,29
8	150,6	0,61	0,28	0,31	0,52	0,37	0,64	0,63	0,69	0,28	0,49	0,52	0,43	0,37
9	180,9	0,76	0,36	0,39	0,65	0,47	0,80	0,80	0,85	0,33	0,61	0,64	0,51	0,45
10	210,6	0,92	0,49	0,48	0,77	0,57	0,93	0,95	1,01	0,38	0,73	0,77	0,60	0,53
11	242,5	1,09	0,67	0,56	0,92	0,68	1,09	1,10	1,15	0,44	0,89	0,92	0,74	0,68
12	271,1	1,23	0,79	0,62	1,03	0,77	1,21	1,25	1,29	0,50	1,01	1,03	0,82	0,78
13	301,1	1,38	0,91	0,70	1,16	0,86	1,34	1,37	1,43	0,55	1,14	1,14	0,91	0,86
14	331,3	1,53	1,04	0,77	1,27	0,94	1,44	1,51	1,57	0,60	1,28	1,26	0,99	0,95
15	362,2	1,70	1,18	0,86	1,42	1,02	1,61	1,66	1,73	0,65	1,48	1,40	1,10	1,05
16	395	1,88	1,32	0,95	1,65	1,17	1,84	1,70	1,84	0,72	1,69	1,58	1,22	1,17
17	420	1,97	1,41	1,00	1,64	1,19	1,83	1,86	1,96	0,79	1,82	1,64	1,28	1,21
18	451	2,11	1,55	1,07	1,72	1,27	1,91	2,03	2,09	0,87	2,00	1,82	1,37	1,30
19	482,5	2,25	1,68	1,15	1,79	1,37	1,98	2,17	2,21	0,97	2,20	2,02	1,49	1,39
20	537	2,47	1,83	1,24	1,88	1,53	2,07	2,26	2,31	1,09	2,49	2,29	1,64	1,45
21	539,1	2,88	2,19	1,46	1,95	1,88	2,10	2,40	2,55	1,36	2,71	2,81	1,97	1,67

Tabela C. 7 - Deformações na armadura de flexão superior do modelo LR04 (EF1 a EF14)

Passo de Carga	Carga (kN)	EF1 (%)	EF2 (%)	EF3 (%)	EF4 (%)	EF5 (%)	EF6 (%)	EF7 (%)	EF8 (%)	EF9 (%)	EF10 (%)	EF11 (%)	EF12 (%)	EF13 (%)	EF14 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	12,30	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,05	0,02
2	25,60	0,00	0,02	0,04	0,07	0,06	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,07	0,07	0,03
3	36,20	0,01	0,03	0,06	0,13	0,10	0,06	0,03	0,01	0,01	0,02	0,05	0,11	0,12	0,05
4	48,50	0,03	0,05	0,09	0,23	0,18	0,09	0,04	0,02	0,01	0,03	0,07	0,19	0,20	0,09
5	60,50	0,05	0,07	0,13	0,31	0,24	0,14	0,05	0,02	0,02	0,03	0,10	0,27	0,28	0,12
6	75,10	0,07	0,12	0,20	0,46	0,35	0,30	0,06	0,03	0,03	0,05	0,14	0,39	0,41	0,20
7	91,20	0,12	0,19	0,28	0,63	0,47	0,43	0,09	0,04	0,03	0,06	0,22	0,55	0,54	0,27
8	106,30	0,17	0,28	0,40	0,80	0,60	0,51	0,13	0,04	0,04	0,06	0,26	0,71	0,66	0,37
9	120,40	0,22	0,33	0,51	0,95	0,73	0,61	0,17	0,05	0,05	0,08	0,32	0,84	0,79	0,49
10	135,50	0,26	0,38	0,66	1,10	0,87	0,69	0,22	0,06	0,06	0,10	0,46	0,97	0,92	0,62
11	150,80	0,28	0,42	0,76	1,21	0,98	0,75	0,26	0,07	0,08	0,11	0,53	1,07	1,01	0,70
12	165,60	0,32	0,48	0,88	1,32	1,11	0,82	0,31	0,08	0,09	0,13	0,62	1,17	1,11	0,80
13	181,00	0,35	0,54	0,99	1,43	1,23	0,90	0,36	0,10	0,11	0,16	0,71	1,27	1,23	0,90
14	196,10	0,39	0,62	1,10	1,54	1,33	0,97	0,40	0,13	0,12	0,20	0,81	1,38	1,35	0,98
15	210,60	0,43	0,67	1,16	1,64	1,43	1,04	0,44	0,23	0,14	0,23	0,87	1,46	1,44	1,06
16	225,30	0,46	0,74	1,25	1,74	1,52	1,10	0,48	0,28	0,16	0,27	0,94	1,54	1,54	1,14
17	240,30	0,50	0,81	1,34	1,84	1,62	1,17	0,53	0,32	0,19	0,30	1,00	1,63	1,64	1,21
18	256,00	0,55	0,92	1,46	1,94	1,71	1,24	0,58	0,37	0,25	0,34	1,07	1,74	1,76	1,29
19	270,50	0,59	1,00	1,55	2,03	1,78	1,31	0,63	0,42	0,28	0,37	1,13	1,83	1,84	1,35
20	285,90	0,63	1,08	1,65	2,12	1,87	1,36	0,68	0,45	0,32	0,40	1,19	1,93	1,93	1,42
21	297,10	0,73	1,15	1,75	2,17	1,94	1,41	0,73	0,48	0,36	0,42	1,23	2,00	2,00	1,48
22	309,70	0,79	1,21	1,85	2,25	2,03	1,47	0,76	0,51	0,39	0,45	1,27	2,09	2,07	1,54
23	322,80	0,85	1,30	1,99	2,35	2,14	1,52	0,84	0,53	0,41	0,48	1,33	2,18	2,05	1,62
24	333,50	0,88	1,36	2,06	2,41	2,22	1,56	0,89	0,54	0,43	0,50	1,37	2,25	2,10	1,67
25	345,30	0,94	1,47	2,12	2,41	2,30	1,59	1,00	0,56	0,45	0,53	1,45	2,31	2,10	1,72

Tabela C. 8- Deformações na armadura de flexão superior do modelo LR04 (EF15 a EF27)

Passo de Carga	Carga (kN)	EF15 (%)	EF16 (%)	EF17 (%)	EF18 (%)	EF19 (%)	EF20 (%)	EF21 (%)	EF22 (%)	EF23 (%)	EF24 (%)	EF25 (%)	EF26 (%)	EF27 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	12,30	0,01	0,00	0,02	0,02	0,05	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,04
2	25,60	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,05
3	36,20	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	0,05	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,07
4	48,50	0,04	0,04	0,08	0,09	0,11	0,08	0,06	0,05	0,07	0,05	0,03	0,02	0,11
5	60,50	0,06	0,05	0,15	0,17	0,15	0,11	0,08	0,09	0,09	0,08	0,04	0,03	0,15
6	75,10	0,11	0,12	0,20	0,25	0,25	0,18	0,16	0,22	0,17	0,15	0,10	0,07	0,22
7	91,20	0,17	0,18	0,32	0,42	0,35	0,26	0,24	0,33	0,28	0,26	0,26	0,20	0,32
8	106,30	0,23	0,23	0,40	0,48	0,48	0,41	0,33	0,42	0,38	0,37	0,38	0,31	0,42
9	120,40	0,28	0,27	0,47	0,55	0,57	0,53	0,42	0,48	0,46	0,46	0,46	0,37	0,52
10	135,50	0,34	0,33	0,53	0,63	0,64	0,66	0,53	0,56	0,56	0,55	0,54	0,46	0,62
11	150,80	0,38	0,36	0,58	0,69	0,69	0,73	0,60	0,61	0,62	0,62	0,59	0,50	0,70
12	165,60	0,43	0,39	0,65	0,76	0,74	0,83	0,71	0,68	0,72	0,71	0,64	0,55	0,80
13	181,00	0,48	0,42	0,72	0,82	0,79	0,91	0,79	0,74	0,81	0,82	0,68	0,60	0,92
14	196,10	0,53	0,46	0,80	0,90	0,86	0,99	0,86	0,79	0,89	0,89	0,74	0,66	1,04
15	210,60	0,57	0,49	0,86	0,95	0,90	1,06	0,92	0,84	0,95	0,96	0,78	0,71	1,12
16	225,30	0,62	0,53	0,93	1,01	0,96	1,15	1,00	0,90	1,03	1,04	0,84	0,77	1,23
17	240,30	0,67	0,56	1,00	1,06	1,01	1,23	1,07	0,96	1,10	1,11	0,89	0,83	1,34
18	256,00	0,73	0,60	1,09	1,13	1,08	1,33	1,15	1,02	1,19	1,20	0,97	0,90	1,48
19	270,50	0,78	0,64	1,14	1,17	1,11	1,41	1,24	1,09	1,24	1,26	1,04	0,97	1,57
20	285,90	0,83	0,68	1,20	1,23	1,16	1,50	1,31	1,15	1,30	1,33	1,10	1,04	1,66
21	297,10	0,88	0,71	1,25	1,27	1,20	1,56	1,36	1,20	1,35	1,37	1,15	1,09	1,75
22	309,70	0,92	0,74	1,31	1,31	1,23	1,63	1,42	1,25	1,39	1,43	1,20	1,14	1,83
23	322,80	0,99	0,78	1,36	1,35	1,26	1,72	1,48	1,30	1,47	1,50	1,26	1,20	1,90
24	333,50	1,03	0,80	1,40	1,39	1,29	1,77	1,51	1,33	1,51	1,55	1,30	1,24	1,96
25	345,30	1,08	0,83	1,45	1,44	1,32	1,83	1,55	1,36	1,61	1,64	1,34	1,29	1,97

Tabela C. 9 - Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LR01

Passo de Carga	Carga (kN)	EI1a (%)	EI2a (%)
0	0,00	0,00	0,00
1	16,90	0,00	0,00
2	32,20	0,00	-0,01
3	47,90	0,01	-0,01
4	63,90	0,02	-0,01
5	80,40	0,05	0,00
6	96,10	0,08	0,03
7	112,40	0,10	0,06
8	128,70	0,11	0,08
9	144,30	0,13	0,11
10	159,90	0,15	0,14
11	175,70	0,19	0,17
12	192,90	0,33	0,27
13	208,30	0,34	0,28
14	224,20	0,36	0,29
15	243,50	0,40	0,32
16	256,40	0,48	0,37
17	273,10	0,55	0,43
18	288,40	0,63	0,50

Tabela C. 10 - Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LC02

Passo de Carga	Carga (kN)	EI1a (‰)	EI2a (‰)
0	0,00	0,00	0,00
1	15,00	0,00	-0,01
2	30,60	0,00	-0,02
3	45,70	0,00	-0,02
4	61,40	0,01	-0,03
5	75,70	0,02	-0,03
6	96,70	0,03	-0,01
7	117,30	0,04	0,01
8	142,50	0,04	0,05
9	161,00	0,06	0,06
10	180,70	0,07	0,08
11	201,50	0,11	0,10
12	222,90	0,14	0,11
13	243,80	0,16	0,12
14	264,20	0,19	0,13
15	285,10	0,21	0,14
16	306,20	0,23	0,15
17	327,40	0,26	0,16
18	348,30	0,31	0,19
19	369,20	0,36	0,23
20	390,50	0,39	0,25
21	406,40	0,43	0,26
22	421,50	0,46	0,28
23	436,00	0,46	0,29
24	451,80	0,50	0,31
25	466,00	0,56	0,35
26	482,00	0,63	0,41
27	486,70	0,71	0,52

Tabela C. 11 - Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LC03

Passo de Carga	Carga (kN)	EI1a (‰)	EI2a (‰)
0	0,00	0,00	0,00
1	17,10	0,00	-0,01
2	32,70	0,00	-0,02
3	45,40	0,00	-0,02
4	61,10	0,00	-0,03
5	77,60	0,01	-0,02
6	90,50	0,01	-0,01
7	122,70	0,02	0,04
8	150,60	0,03	0,05
9	180,90	0,04	0,07
10	210,60	0,08	0,09
11	242,50	0,16	0,12
12	271,10	0,22	0,15
13	301,10	0,29	0,19
14	331,30	0,34	0,23
15	362,20	0,37	0,27
16	395,00	0,47	0,33
17	420,00	0,49	0,34
18	451,00	0,54	0,38
19	482,50	0,63	0,44
20	537,00	0,86	0,60
21	539,10	1,44	0,99

Tabela C. 12- Deformações na armadura de flexão inferior do modelo LR04

Passo de Carga	Carga (kN)	EI1a (%)	EI2a (%)
0	0,00	0,00	0,00
1	12,30	-0,01	-0,02
2	25,60	-0,02	-0,02
3	36,20	-0,01	-0,03
4	48,50	0,00	-0,03
5	60,50	0,01	-0,03
6	75,10	0,04	-0,01
7	91,20	0,05	0,00
8	106,30	0,06	0,03
9	120,40	0,06	0,05
10	135,50	0,06	0,06
11	150,80	0,06	0,06
12	165,60	0,07	0,06
13	181,00	0,07	0,08
14	196,10	0,08	0,09
15	210,60	0,08	0,10
16	225,30	0,09	0,11
17	240,30	0,10	0,11
18	256,00	0,12	0,12
19	270,50	0,14	0,13
20	285,90	0,16	0,13
21	297,10	0,18	0,14
22	309,70	0,21	0,15
23	322,80	0,26	0,19
24	333,50	0,30	0,23
25	345,30	0,44	0,40

D. DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

Da Tabela D.1 a Tabela D.4 são apresentados os valores de deformações registradas na superfície inferior da laje de cada modelo, monitorados em 9 pontos através do sistema de aquisição de dados composto por módulos *Spider 8* e *ADS2000*.

Tabela D. 1 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LR01

Passo de Carga	Carga (kN)	EC1 (%)	EC2 (%)	EC3 (%)	EC4 (%)	EC5 (%)	EC6 (%)	EC7 (%)	EC8 (%)	EC9 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	16,90	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	0,00	0,00
2	32,20	0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,05	-0,03	-0,06	-0,01	0,00
3	47,90	0,00	-0,01	-0,02	-0,05	-0,07	-0,04	-0,10	-0,02	0,00
4	63,90	-0,01	-0,01	-0,02	-0,07	-0,10	-0,05	-0,15	-0,03	0,00
5	80,40	-0,01	-0,03	-0,02	-0,09	-0,14	-0,08	-0,21	-0,05	0,00
6	96,10	-0,01	-0,04	-0,04	-0,12	-0,18	-0,10	-0,25	-0,06	0,01
7	112,40	-0,01	-0,05	-0,07	-0,16	-0,22	-0,13	-0,29	-0,08	0,01
8	128,70	-0,02	-0,06	-0,08	-0,20	-0,26	-0,15	-0,32	-0,09	0,00
9	144,30	-0,02	-0,08	-0,08	-0,23	-0,30	-0,16	-0,35	-0,11	-0,01
10	159,90	-0,02	-0,10	-0,07	-0,24	-0,34	-0,18	-0,38	-0,12	-0,01
11	175,70	-0,03	-0,11	-0,07	-0,26	-0,38	-0,20	-0,42	-0,13	-0,01
12	192,90	-0,03	-0,11	-0,09	-0,27	-0,44	-0,21	-0,43	-0,14	-0,01
13	208,30	-0,03	-0,12	-0,09	-0,29	-0,47	-0,22	-0,45	-0,15	0,00
14	224,20	-0,03	-0,13	-0,10	-0,31	-0,50	-0,24	-0,45	-0,15	0,00
15	243,50	-0,04	-0,13	-0,10	-0,33	-0,53	-0,26	-0,44	-0,15	0,01
16	256,40	-0,04	-0,13	-0,11	-0,37	-0,55	-0,27	-0,41	-0,14	0,01
17	273,10	-0,04	-0,13	-0,12	-0,42	-0,57	-0,30	-0,40	-0,14	0,02
18	288,40	-0,05	-0,16	-0,10	-0,49	-0,59	-0,32	-0,40	-0,14	0,02

Tabela D. 2 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LC02

Passo de Carga	Carga (kN)	EC1 (%)	EC2 (%)	EC3 (%)	EC4 (%)	EC5 (%)	EC6 (%)	EC7 (%)	EC8 (%)	EC9 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	15,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00
2	30,60	0,00	-0,01	-0,03	-0,04	-0,03	-0,02	-0,04	0,00	0,00
3	45,70	0,00	-0,01	-0,04	-0,06	-0,05	-0,03	-0,06	-0,01	0,00
4	61,40	0,00	-0,02	-0,04	-0,08	-0,07	-0,05	-0,09	-0,01	0,00
5	75,70	0,00	-0,03	-0,05	-0,10	-0,10	-0,07	-0,13	-0,02	0,00
6	96,70	-0,01	-0,07	-0,07	-0,15	-0,16	-0,10	-0,17	-0,03	-0,01
7	117,30	-0,01	-0,09	-0,11	-0,20	-0,24	-0,15	-0,22	-0,05	-0,01
8	142,50	-0,01	-0,13	-0,13	-0,25	-0,30	-0,18	-0,25	-0,09	-0,01
9	161,00	-0,01	-0,18	-0,14	-0,28	-0,34	-0,20	-0,28	-0,16	-0,01
10	180,70	-0,01	-0,20	-0,16	-0,31	-0,37	-0,22	-0,31	-0,18	0,00
11	201,50	-0,01	-0,22	-0,17	-0,35	-0,41	-0,24	-0,34	-0,22	0,00
12	222,90	-0,02	-0,25	-0,19	-0,39	-0,44	-0,27	-0,37	-0,23	0,01
13	243,80	-0,02	-0,27	-0,20	-0,44	-0,48	-0,29	-0,41	-0,25	0,02
14	264,20	-0,02	-0,29	-0,22	-0,49	-0,52	-0,31	-0,43	-0,25	0,03
15	285,10	-0,02	-0,30	-0,24	-0,53	-0,56	-0,34	-0,44	-0,25	0,03
16	306,20	-0,03	-0,32	-0,26	-0,60	-0,60	-0,37	-0,43	-0,25	0,04
17	327,40	-0,03	-0,33	-0,29	-0,66	-0,63	-0,39	-0,43	-0,24	0,04
18	348,30	-0,03	-0,34	-0,32	-0,72	-0,67	-0,42	-0,44	-0,23	0,05
19	369,20	-0,03	-0,33	-0,31	-0,79	-0,71	-0,45	-0,45	-0,22	0,07
20	390,50	-0,03	-0,33	-0,34	-0,85	-0,74	-0,47	-0,47	-0,22	0,09
21	406,40	-0,04	-0,33	-0,37	-0,90	-0,77	-0,50	-0,49	-0,20	0,10
22	421,50	-0,04	-0,33	-0,39	-0,95	-0,81	-0,52	-0,50	-0,18	0,12
23	436,00	-0,04	-0,32	-0,40	-0,96	-0,81	-0,52	-0,49	-0,16	0,12
24	451,80	-0,04	-0,32	-0,42	-1,02	-0,84	-0,54	-0,52	-0,11	0,13
25	466,00	-0,04	-0,31	-0,48	-1,09	-0,89	-0,57	-0,56	-0,03	0,15
26	482,00	-0,04	-0,29	-0,53	-0,98	-0,91	-0,60	-0,61	0,05	0,18
27	486,70	-0,05	-0,27	-0,61	-1,06	-0,91	-0,63	-0,78	0,04	0,22

Tabela D. 3 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LC03

Passo de Carga	Carga (kN)	EC1 (%)	EC2 (%)	EC3 (%)	EC4 (%)	EC5 (%)	EC6 (%)	EC7 (%)	EC8 (%)	EC9 (%)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	17,1	0,00	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04	-0,03	-0,04	0,00	-0,01
2	32,7	0,00	-0,03	-0,04	-0,06	-0,06	-0,04	-0,07	-0,01	-0,01
3	45,4	0,00	-0,03	-0,05	-0,08	-0,08	-0,06	-0,10	-0,01	-0,01
4	61,1	0,00	-0,05	-0,07	-0,11	-0,10	-0,07	-0,15	-0,02	-0,02
5	77,6	0,00	-0,06	-0,08	-0,13	-0,14	-0,09	-0,20	-0,04	-0,01
6	90,5	0,00	-0,07	-0,09	-0,16	-0,18	-0,12	-0,24	-0,05	-0,01
7	122,7	-0,01	-0,10	-0,14	-0,22	-0,30	-0,22	-0,33	-0,08	-0,01
8	150,6	-0,01	-0,11	-0,18	-0,27	-0,37	-0,28	-0,40	-0,11	0,00
9	180,9	-0,01	-0,13	-0,23	-0,33	-0,43	-0,32	-0,47	-0,12	0,00
10	210,6	-0,01	-0,14	-0,27	-0,39	-0,49	-0,36	-0,53	-0,14	0,00
11	242,5	-0,01	-0,15	-0,32	-0,46	-0,57	-0,39	-0,59	-0,15	0,00
12	271,1	-0,01	-0,15	-0,37	-0,52	-0,63	-0,42	-0,64	-0,15	0,01
13	301,1	-0,02	-0,13	-0,42	-0,59	-0,68	-0,45	-0,68	-0,15	0,01
14	331,3	-0,02	-0,12	-0,45	-0,66	-0,74	-0,48	-0,72	-0,15	0,01
15	362,2	-0,03	-0,11	-0,48	-0,74	-0,81	-0,52	-0,75	-0,13	0,02
16	395	-0,03	-0,07	-0,50	-0,86	-0,91	-0,58	-0,79	-0,11	0,03
17	420	-0,02	-0,05	-0,54	-0,89	-0,95	-0,60	-0,83	-0,10	0,03
18	451	-0,04	0,00	-0,60	-0,97	-1,01	-0,65	-0,86	-0,08	0,05
19	482,5	-0,06	0,06	-0,70	-1,08	-1,09	-0,70	-0,88	-0,06	0,08
20	537	-0,07	0,16	-1,02	-1,73	-1,21	-0,76	-0,72	-0,09	0,12
21	539,1	-0,08	0,20	-2,50	-2,16	-1,37	-0,88	-0,75	-0,20	0,15

Tabela D. 4 - Deformações na superfície inferior da laje do modelo LR04

Passo de Carga	Carga (kN)	EC1 (%)	EC2 (%)	EC3 (%)	EC4 (%)	EC5 (%)	EC6 (%)	EC7 (%)	EC8 (%)	EC9 (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	12,30	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,01
2	25,60	0,00	-0,01	-0,01	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	0,00
3	36,20	0,00	-0,01	-0,01	-0,04	-0,04	-0,03	-0,05	-0,01	0,00
4	48,50	0,00	-0,02	-0,02	-0,06	-0,07	-0,05	-0,08	-0,02	0,00
5	60,50	0,00	-0,03	-0,02	-0,08	-0,09	-0,06	-0,10	-0,02	0,01
6	75,10	0,00	-0,04	-0,02	-0,11	-0,12	-0,08	-0,14	-0,03	0,00
7	91,20	0,00	-0,06	-0,04	-0,14	-0,16	-0,11	-0,18	-0,04	0,00
8	106,30	-0,01	-0,07	-0,07	-0,18	-0,21	-0,14	-0,22	-0,05	0,00
9	120,40	-0,01	-0,08	-0,09	-0,22	-0,25	-0,17	-0,25	-0,06	-0,01
10	135,50	-0,01	-0,09	-0,12	-0,26	-0,29	-0,19	-0,28	-0,07	0,01
11	150,80	-0,01	-0,11	-0,14	-0,29	-0,32	-0,20	-0,31	-0,07	0,01
12	165,60	-0,01	-0,12	-0,17	-0,32	-0,35	-0,22	-0,34	-0,08	0,01
13	181,00	-0,01	-0,14	-0,19	-0,35	-0,38	-0,24	-0,37	-0,08	0,01
14	196,10	-0,01	-0,15	-0,21	-0,39	-0,41	-0,25	-0,38	-0,08	0,02
15	210,60	-0,01	-0,16	-0,21	-0,42	-0,43	-0,27	-0,41	-0,09	0,02
16	225,30	-0,01	-0,17	-0,22	-0,45	-0,45	-0,28	-0,43	-0,09	0,02
17	240,30	-0,01	-0,19	-0,23	-0,50	-0,47	-0,30	-0,44	-0,09	0,02
18	256,00	-0,01	-0,20	-0,24	-0,55	-0,50	-0,32	-0,45	-0,08	0,01
19	270,50	-0,01	-0,22	-0,26	-0,60	-0,52	-0,33	-0,45	-0,07	0,01
20	285,90	-0,01	-0,23	-0,27	-0,64	-0,54	-0,35	-0,45	-0,07	0,02
21	297,10	-0,01	-0,24	-0,29	-0,68	-0,56	-0,36	-0,43	-0,06	0,02
22	309,70	-0,02	-0,25	-0,32	-0,72	-0,59	-0,37	-0,42	-0,04	0,02
23	322,80	-0,02	-0,28	-0,38	-0,80	-0,61	-0,39	-0,34	-0,02	0,03
24	333,50	-0,02	-0,28	-0,43	-0,86	-0,64	-0,41	-0,30	-0,01	0,04
25	345,30	-0,02	-0,30	-0,65	-1,11	-0,69	-0,43	-0,35	0,03	0,05

E. INCLINAÇÕES DAS LAJES

As inclinações das lajes foram obtidas através de dois inclinômetros, um de pêndulo desenvolvido na Universidade de Brasília e um de nível de bolha. São apresentados nas Tabelas E.1 a E.4 os resultados das inclinações obtidas para cada passo de carga aplicado nos modelos, sendo que os ângulos são expressos em radianos.

Tabela E. 1 - Inclinações da laje LR01

Passo de Carga	Carga (kN)	CLIN 01 (rad)	CLIN 02 (rad)
0	0	0,000	0,000
1	16,9	0,000	0,000
2	32,2	0,001	0,000
3	47,9	0,001	0,000
4	63,9	0,002	0,000
5	80,4	0,003	0,001
6	96,1	0,004	0,001
7	112,4	0,005	0,001
8	128,7	0,007	0,001
9	144,3	0,008	0,001
10	159,9	0,009	0,002
11	175,7	0,011	0,002
12	192,9	0,014	0,002
13	208,3	0,014	0,003
14	224,2	0,015	0,003
15	243,5	0,017	0,004
16	256,4	0,019	0,004
17	273,1	0,021	0,005
18	288,4	0,023	0,009

Tabela E. 2- Inclinações da laje LC02

Passo de Carga	Carga (kN)	CLIN 01 (rad)	CLIN 02 (rad)
0	0,00	0,000	0,000
1	15,00	0,000	0,000
2	30,60	0,000	0,000
3	45,70	0,000	0,000
4	61,40	0,001	0,001
5	75,70	0,001	0,001
6	96,70	0,001	0,001
7	117,30	0,001	0,001
8	142,50	0,001	0,002
9	161,00	0,002	0,003
10	180,70	0,002	0,003
11	201,50	0,003	0,004
12	222,90	0,003	0,004
13	243,80	0,004	0,005
14	264,20	0,005	0,006
15	285,10	0,005	0,006
16	306,20	0,006	0,007
17	327,40	0,005	0,007
18	348,30	0,006	0,008
19	369,20	0,006	0,009
20	390,50	0,006	0,009
21	406,40	0,006	0,010
22	421,50	0,005	0,010
23	436,00	0,005	0,011
24	451,80	0,005	0,011
25	466,00	0,005	0,012
26	482,00	0,005	0,013
27	486,70	0,006	0,012

Tabela E. 3- Inclinações da laje LC03

Passo de Carga	Carga (kN)	CLIN 01 (rad)	CLIN 02 (rad)
0	0,00	0,000	0,000
1	17,10	0,001	0,000
2	32,70	0,000	0,000
3	45,40	0,000	0,001
4	61,10	0,000	0,001
5	77,60	0,000	0,001
6	90,50	0,000	0,002
7	122,70	0,001	0,003
8	150,60	0,001	0,004
9	180,90	0,001	0,005
10	210,60	0,001	0,005
11	242,50	0,001	0,007
12	271,10	0,002	0,008
13	301,10	0,002	0,009
14	331,30	0,002	0,010
15	362,20	0,002	0,011
16	395,00	0,003	0,014
17	420,00	0,003	0,014
18	451,00	0,004	0,015
19	482,50	0,004	0,020
20	537,00	0,005	0,022
21	539,10	0,005	0,026

Tabela E. 4 - Inclinações da laje LR04

Passo de Carga	Carga (kN)	CLIN 01 (rad)	CLIN 02 (rad)
0	0,00	0,000	0,000
1	12,30	0,000	0,001
2	25,60	0,001	0,001
3	36,20	0,001	0,001
4	48,50	0,001	0,001
5	60,50	0,002	0,001
6	75,10	0,003	0,001
7	91,20	0,003	0,002
8	106,30	0,004	0,002
9	120,40	0,004	0,003
10	135,50	0,005	0,003
11	150,80	0,005	0,004
12	165,60	0,006	0,004
13	181,00	0,007	0,005
14	196,10	0,007	0,005
15	210,60	0,008	0,006
16	225,30	0,009	0,006
17	240,30	0,009	0,007
18	256,00	0,010	0,008
19	270,50	0,011	0,008
20	285,90	0,011	0,009
21	297,10	0,012	0,009
22	309,70	0,013	0,010
23	322,80	0,014	0,010
24	333,50	0,014	0,011
25	345,30	0,016	0,013

F. DESLOCAMENTOS VERTICAIS NAS BORDAS DAS LAJES

Durante a execução dos ensaios dos modelos foram dispostas réguas graduadas em milímetros em duas bordas das lajes com o intuito de acompanhar os deslocamentos verticais com a evolução dos passos de carga. As Tabelas F.1 a F.4 apresentam os resultados de deslocamentos verticais para as bordas de cada modelo ensaiado.

Tabela F. 1 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LR01

Passo de Carga	Carga (kN)	Régua 1 (mm)	Régua 2 (mm)
0	0,00	182	182
1	0,00	182	182
2	16,90	183	183
3	32,20	184	184
4	47,90	184	184
5	63,90	184	185
6	80,40	185	187
7	96,10	186	188
8	112,40	186	189
9	128,70	186	191
10	144,30	186	193
11	159,90	186	194
12	175,70	186	198
13	192,90	186	198
14	208,30	186	199
15	224,20	187	201
16	243,50	187	202
17	256,40	188	204
18	273,10	189	206

Tabela F. 2 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LC02

Passo de Carga	Carga (kN)	Régua 1 (mm)	Régua 2 (mm)
0	0	191	185
1	15	191	185
2	30,6	191	185
3	45,7	191	185
4	61,4	191	186
5	75,7	192	187
6	96,7	193	188
7	117,3	193	189
8	142,5	195	190
9	161	196	191
10	180,7	196	192
11	201,5	197	193
12	222,9	198	193
13	243,8	199	194
14	264,2	200	196
15	285,1	201	197
16	306,2	201	198
17	327,4	203	199
18	348,3	204	200
19	369,2	204	201
20	390,5	205	203
21	406,4	206	204
22	421,5	206	205
23	436	207	206
24	451,8	208	207
25	466	209	207
26	482	219	218
27	486,7	231	243

Tabela F. 3 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LC03

Passo de Carga	Carga (kN)	Régua 1 (mm)	Régua 2 (mm)
0	0	184	185
1	17,1	185	186
2	32,7	185	186
3	45,4	186	186
4	61,1	186	186
5	77,6	186	187
6	90,5	187	188
7	122,7	189	189
8	150,6	190	191
9	180,9	191	192
10	210,6	193	193
11	242,5	194	195
12	271,1	196	196
13	301,1	198	198
14	331,3	199	199
15	362,2	201	201
16	395	204	204
17	420	204	205
18	451	205	207
19	482,5	207	209
20	537	208	213
21	539,1	213	222

Tabela F. 4 - Deslocamentos verticais nas bordas da laje LR04

Passo de Carga	Carga (kN)	Régua 1 (mm)	Régua 2 (mm)
0	0	181	186
1	12,3	182	186
2	25,6	182	186
3	36,2	182	187
4	48,5	182	188
5	60,5	183	188
6	75,1	183	189
7	91,2	184	189
8	106,3	184	190
9	120,4	185	191
10	135,5	186	191
11	150,8	187	192
12	165,6	187	193
13	181	187	193
14	196,1	189	194
15	210,6	189	195
16	225,3	190	195
17	240,3	191	196
18	256	192	197
19	270,5	192	197
20	285,9	193	198
21	297,1	193	199
22	309,7	194	199
23	322,8	195	201
24	333,5	195	201
25	345,3	196	203

G. CARGAS, MODOS DE RUPTURA E PARÂMETROS NORMATIVOS

São apresentados nas Tabelas G.1 a G.6 os resultados de cargas obtidos segundo os modelos de cálculo das normas analisadas neste trabalho, acompanhadas das cargas de ruptura observadas nos ensaios dos modelos e dos parâmetros de cálculo considerados.

Tabela G. 1 - Parâmetros para cálculo de resistência estimada pela NBR 6118:2007

Modelo	u_0 (mm)	u_1 (mm)	u_{out} (mm)	h (mm)	d_x (mm)	d_y (mm)	d (mm)	ρ_x (%)	ρ_y (%)	ρ (%)	f_{ck} (MPa)	s_r (mm)	A_{sw} (mm ²)	α_v	α (°)	f_{yw} (MPa)	C_1 (mm)	C_2 (mm)	K	W_p (mm ²)
LR01	900	2557	-	181	136	152	144	0,014	0,014	0,014	57,9	100	-	0,76848	90	0,0	300	300	0,60	658631,0
LC02	900	2557	3299,93	181	136	152	144	0,014	0,014	0,014	57,9	100	502,65	0,76848	90	319,4	300	300	0,60	658631,0
LC03	900	2557	3770,43	180	136	152	144	0,014	0,014	0,014	57,9	100	785,40	0,76848	90	319,4	300	300	0,60	658631,0
LR04	900	2557	-	180	136	152	144	0,014	0,014	0,014	57,9	100	-	0,76848	90	0,0	300	300	0,60	658631,0

Tabela G. 2 - Cargas de ruptura estimadas pela NBR 6118:2007

Modelo	Armadura de cisalhamento	e (mm)	F_c (kN)	F_{sk} (kN)	$F_{sk,out}$ (kN)	Carga de Ensaio P_u (kN)	P_u/F_c	P_u/F_{sk}	$P_u/F_{sk,out}$	Ruptura	Posição da Ruptura
LR01	Nenhuma	525,00	284,20	-	-	300,00	1,06	-	-	P	-
LC02	3 Camadas	350,00	-	458,75	397,29	488,00	-	1,06	1,23	FP	fora
LC03	4 Camadas	350,00	-	566,21	423,01	550,00	-	0,97	1,30	FP	fora
LR04	Nenhuma	350,00	348,02	-	-	347,00	1,00	-	-	P	-

Tabela G. 3 - Parâmetros para cálculo de resistência estimada pelo Eurocode 2:2004

Laje	u_0 (mm)	u_1 (mm)	u_{out} (mm)	h (mm)	d_x (mm)	d_y (mm)	d (mm)	β	ρ_x	ρ_y	ρ	f_{ck} (MPa)	s_r (mm)	A_{sw} (mm ²)	v	α (°)	$f_{y,ef}$ (MPa)	C_1 (cm)	C_2 (cm)	k	K	W_p (mm ²)	$V_{Rk,c}$ (Mpa)
LR01	900	2557	-	181	136	152	144	2,03	0,014	0,014	0,0140	57,9	100	-	0,84	90	0,0	300	300	2,00	0,6	658631	1,56
LC02	900	2557	3299,93	181	136	152	144	1,622	0,014	0,014	0,0140	57,9	100	502,65	0,84	90	328,9	300	300	2,00	0,6	658631	1,56
LC03	900	2557	3770,43	180	136	152	144	1,622	0,014	0,014	0,0140	57,9	100	785,40	0,84	90	328,9	300	300	2,00	0,6	658631	1,56
LR04	900	2557	-	180	136	152	144	1,622	0,014	0,014	0,0140	57,9	100	-	0,84	90	0,0	300	300	2,00	0,6	658631	1,56

Tabela G. 4- Cargas de ruptura estimadas pelo Eurocode 2:2004

Laje	e (mm)	Armadura de cisalhamento	$V_{R,C}$ (kN)	$V_{Rk,cs}$ (kN)	$V_{Rk,out}$ (kN)	P_u (kN)	$P_u/V_{R,C}$	$P_u/V_{Rk,cs}$	$P_u/V_{Rk,out}$	Ruptura	Posição da ruptura
LR01	525,00	Nenhuma	282,62	-	-	300,0	1,06	-	-	P	-
LC02	350,00	3 Camadas	-	485,41	534,09	488,0	-	1,01	0,91	FP	dentro
LC03	350,00	4 Camadas	-	609,25	654,35	550,0	-	0,90	0,84	FP	dentro
LR04	350,00	Nenhuma	353,65	-	-	347,0	0,98	-	-	P	-

Tabela G. 5 - Parâmetros para cálculo de resistência estimada pelo ACI 318M:2008

Laje	u (mm)	h (mm)	d _x (mm)	d _y (mm)	d (mm)	b ₀ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b _{out} (mm)	β	A _c (mm ²)	γ _f	γ _v	c _{AB}	S _r	f _{ck} (MPa)	f _{yt} (MPa)	A _v (mm ²)	α _s	c ₁ (mm)	c ₂ (mm)	Φ (mm)
LR01	900	181	136	152	144	1632	444	444	-	1,0	235008,0	0,6	0,4	222	100	57,9	0,0	-	40	300	300	1,0
LC02	900	181	136	152	144	1632	444	444	2727,30	1,0	235008,0	0,6	0,4	222	100	57,9	413,7	502,65	40	300	300	1,0
LC03	900	180	136	152	144	1632	444	444	3190,50	1,0	235008,0	0,6	0,4	222	100	57,9	413,7	785,40	40	300	300	1,0
LR04	900	180	136	152	144	1632	444	444	-	1,0	235008,0	0,6	0,4	222	100	57,9	0,0	-	40	300	300	1,0

Tabela G. 6 - Cargas de ruptura estimadas pelo ACI 318:2008

Laje	e (mm)	Armadura de cisalhamento	V _{u,k} (kN)	V _{uk,out} (kN)	P _u (kN)	P _u /V _{uk}	P _u /V _{uk,out}	Ruptura	Posição da Ruptura
LR01	525	Nenhuma	235,96	-	300,00	1,27	-	P	-
LC02	350	3 Camadas	422,37	384,57	488,00	1,16	1,27	FP	fora
LC03	350	4 Camadas	485,90	416,34	550,00	1,13	1,32	FP	fora
LR04	350	Nenhuma	309,45	-	347,00	1,12	-	P	-

H. DISTRIBUIÇÃO DAS ARMADURAS

São apresentados nas Figuras H.1 a H.3 detalhes da disposição das armaduras de flexão, cisalhamento e do pilar dos modelos.

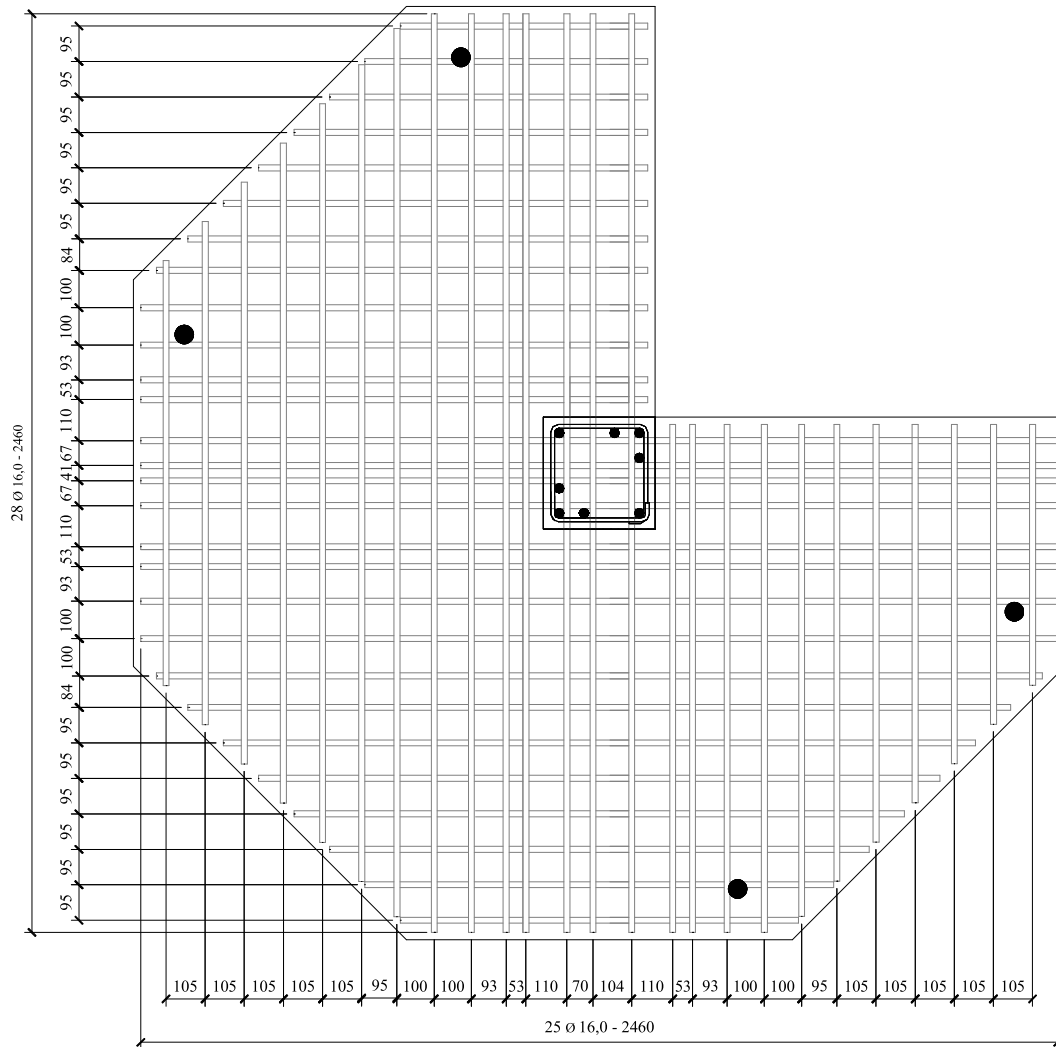
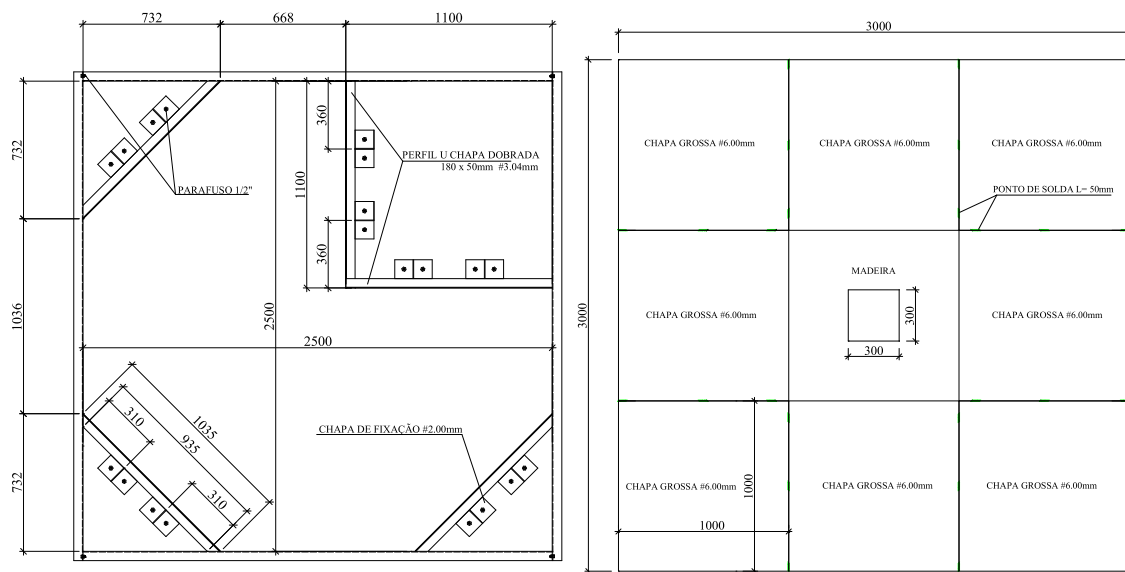


Figura H. 1 - Armaduras das lajes LR01 e LR04

I. PROJETO DAS FÔRMAS METÁLICAS UTILIZADAS NA PESQUISA



(a) Molde da fôrma

(b) Chapas de base da fôrma

Figura I. 1 - Projeto de fôrmas

J. DISPOSITIVO DE TRAVAMENTO DOS PILARES

Da Figura J.1 a Figura J.8 são apresentados detalhes do sistema de fixação dos pilares, desenvolvido pelo professor Yosiaki Nagato para o travamentos dos modelos no pórtico de reação.

J.1 - TRAVAMENTO INFERIOR DOS MODELOS;

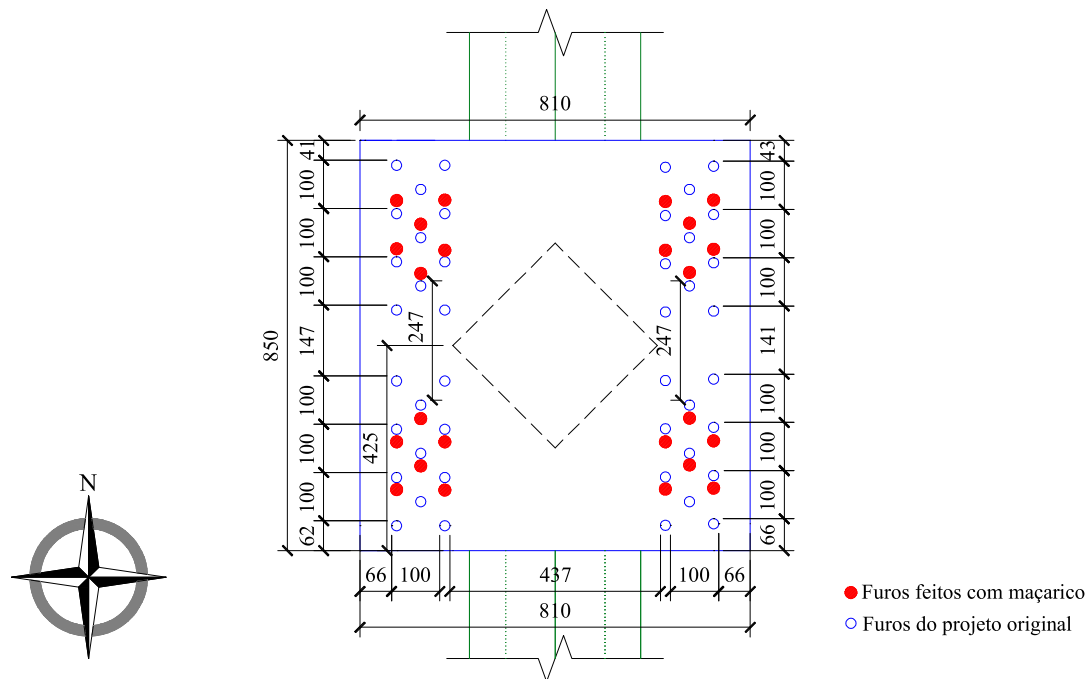


Figura J. 1 - Detalhe da chapa inferior do portico de reação

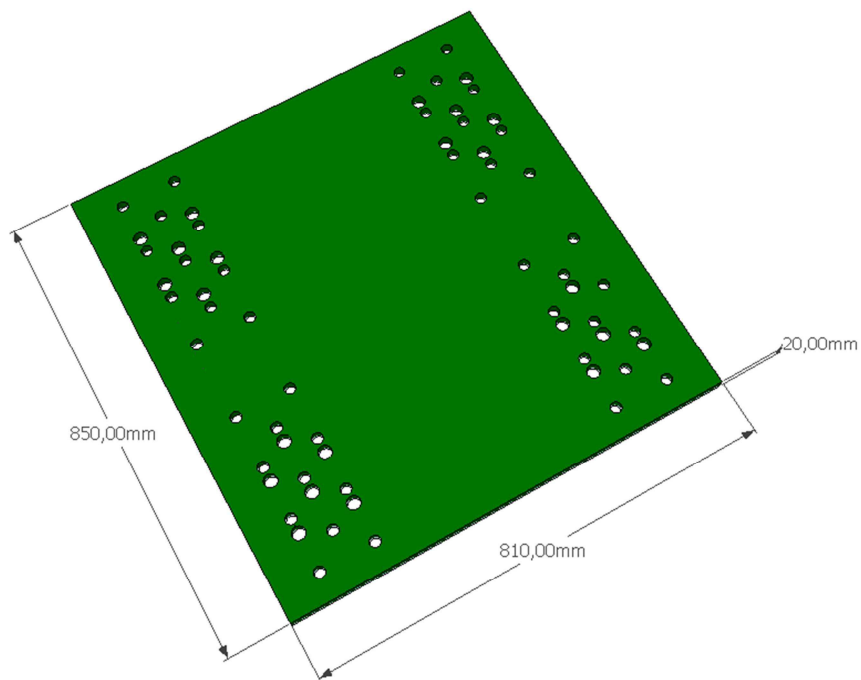
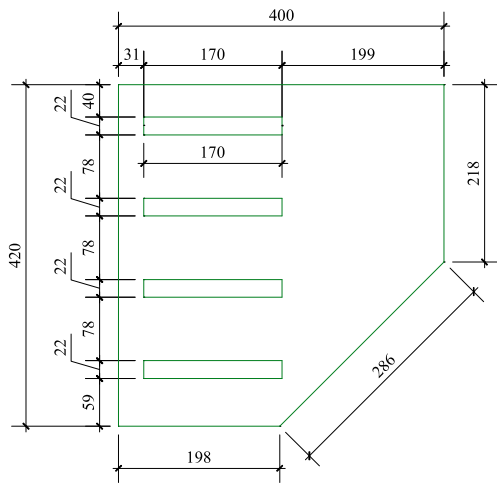
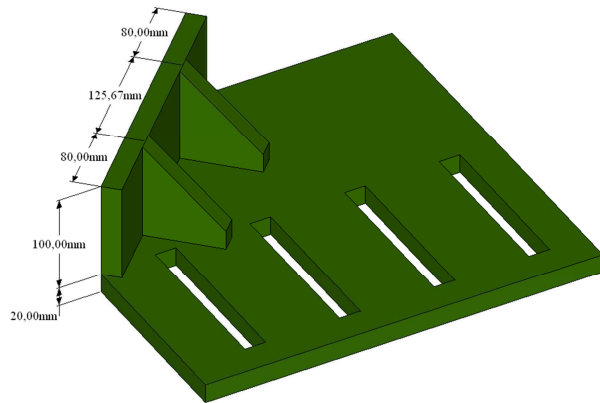


Figura J. 2- Chapa de base em perspectiva

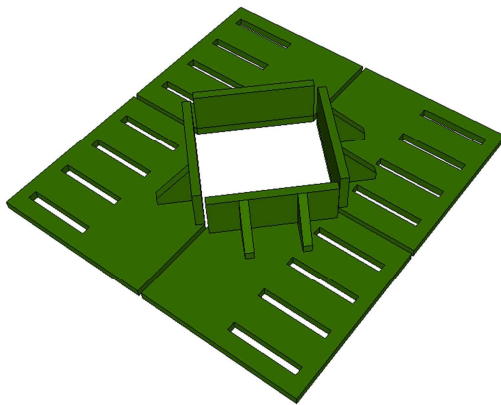


(a) Projeto da chapa inferior

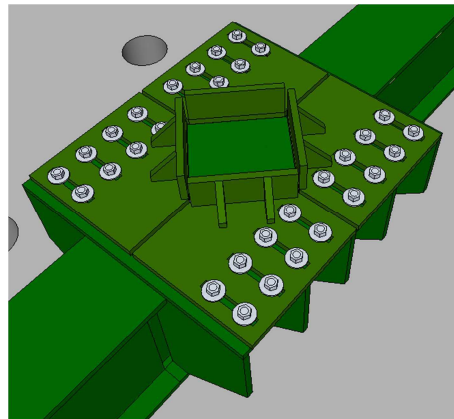


(b) Vista em perspectiva

Figura J. 3 - Detalhe das peças da conexão inferior

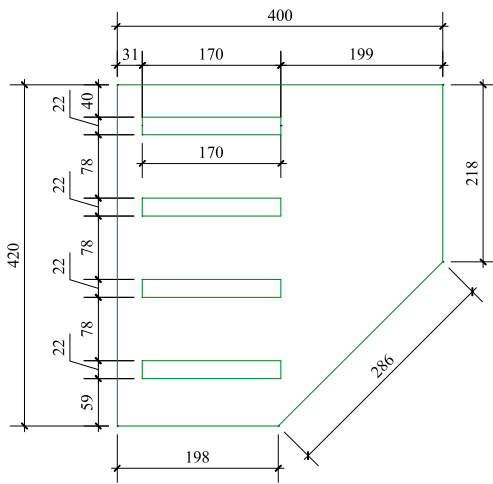


(a) Detalhes da Conexão

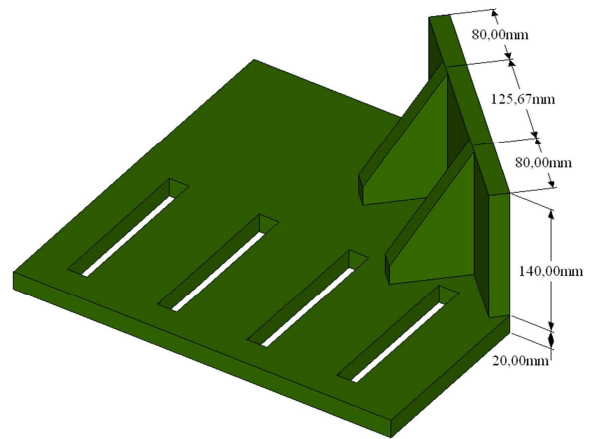


(b) Posicionamento

Figura J. 4 - Detalhes da conexão de travamento inferior dos modelos

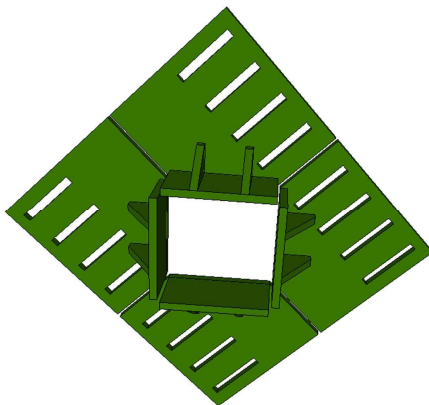


(a) Projeto da chapa inferior

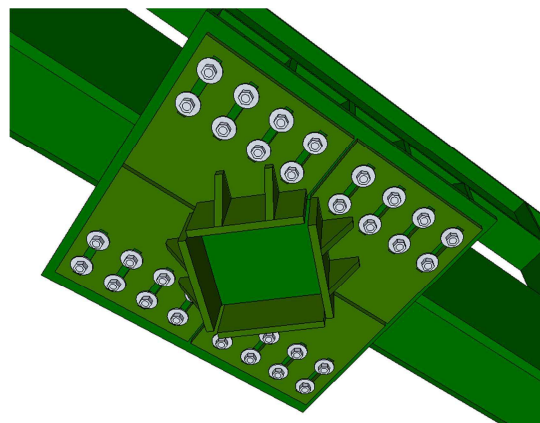


(b) Vista em perspectiva

Figura J. 7 - Detalhe das peças da conexão superior



(a) Detalhes da conexão



(b) Posicionamento

Figura J. 8- Detalhes da conexão de travamento superior dos modelos