

**ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS
DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM
FIBRA DE CARBONO (PRFC) COMO ARMADURA DE CISALHAMENTO.**

ANTONIO WAGNER DE LIMA

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

**ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS
DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM
FIBRA DE CARBONO (PRFC) COMO ARMADURA DE CISALHAMENTO.**

ANTONIO WAGNER DE LIMA

ORIENTADOR: GUILHERME SALES S. A. MELO (Ph.D, UnB)

CO-ORIENTADOR: YOSIAKI NAGATO (D. Sc., UnB)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.DM-008/12

BRASÍLIA/DF: ABRIL-2012

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

ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC) COMO ARMADURA DE CISALHAMENTO.

ANTONIO WAGNER D E LIMA

DISSERTAÇÃO 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 Soares de A. Melo, PhD. (UnB)
(Orientador)

Prof. Yosiaki Nagato, D.Sc. (UnB)
(Examinador interno)

Prof. Denio Ramam Carvalho de Oliveira, D.Sc (UFPA)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 28 DE JUNHO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, ANTONIO WAGNER DE

Estudo experimental e analítico de punção em lajes lisas de concreto armado utilizando Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) como armadura de cisalhamento. [Distrito Federal] 2012.

xxiv, 166p., 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

3. Lajes lisas de concreto armado

I. ENC/FT/UnB

2. PRFC

4. Armadura de cisalhamento

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, A. W.; Estudo experimental e analítico de punção em lajes lisas de concreto armado utilizando Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) como armadura de cisalhamento.

Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. 166p. Publicação E.DM-008A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, DF, 166p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Antonio Wagner de Lima

TÍTULO: Estudo experimental e analítico de punção em lajes lisas de concreto armado utilizando Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) como armadura de cisalhamento.

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.

Antonio Wagner de Lima
Setor colina, bloco K, apto 304, asa norte.
70.904-111 Brasília - DF- Brasil
e-mail: wagnercivil@yahoo.com.br

Dedicado aos meus avós, Natanael Pereira de Lima e Severina Pereira de Lima (em memória) e aos meus pais, Severina Luciene de Lima e Raimundo Gomes de Queiroz, Pessoas que me ensinaram os reais valores da vida.

AGRADECIMENTOS

Em fim, é chegado o grande momento. No fechamento de uma pesquisa de mestrado não podemos jamais deixar de nos remetermos ao início de tudo e lembrarmos-nos dos obstáculos superados, das conquistas e dos aprendizados. O convívio diário com pessoas tão especiais aqui encontradas nos faz perceber que não se trata de um processo singular nem tão pouco individual. Experiências, aprendizados e grandes lembranças que levarei pra vida toda, e assim agradeço desde já de forma generalizada a todos que comigo conviveram nos últimos 2 anos.

Primeiramente agradeço a Deus pela benção da vida.

Agradeço imensamente aos pais, Raimundão e Luciene, e aos meus avós, Natanael e Severina pelos ensinamentos da vida e dos verdadeiros valores morais. Agradeço a toda minha família que se mostrou solidária em todos os momentos, em especial aos meus irmãos Junior e Angélica e minha sobrinha Wélica. Agradeço descomedidamente aos professores Guilherme S.S. de Azevedo Melo e Yosiaki Nagato pela confiança, oportunidade do convívio, dos ensinamentos e pelo tempo desprendido à orientação desta pesquisa.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PECC que tanto contribuíram para a formação deste profissional.

Agradeço à Universidade de Brasília pela oportunidade da realização desta pesquisa.

Agradeço aos órgãos fomentadores CAPES e CNPq que possibilitaram a realização deste trabalho através auxílio financeiro, assim como agradeço também a empresa BASF S/A que forneceu parte dos materiais utilizados no programa experimental desta pesquisa.

Agradeço aos funcionários do Laboratório de Estruturas - Labest da Universidade de Brasília - UnB, Adelmo, Francisco, Júlio, Leandro e Magno, que em muito contribuíram para a realização de todo o programa experimental deste trabalho. Também despendo atenção especial ao Professor Elton Bauer, chefe do Laboratório de Ensaio de Materiais – LEM, e aos funcionários Severino e Valderi, que nos ajudaram nos ensaios de caracterização de materiais e confecção das formas de madeira.

De forma especial, torno público o imenso apreço e reconhecimento ao amigo Galileu pela parceria, e especial nos últimos 12 meses. Foram dias e noites sem fins de

pesquisas, estudos e trabalhos braçais, renúncias e conquistas. Agradeço e muito o seu companheirismo e paciência para com este que nem sempre foi tão passivo quanto.

Agradeço a todos os amigos que se fizeram tão importante nesta conquista, Anderson, Igor, Hileana, João Paulo, Keyte, Adriana, Ramon, Sebastião, Milena, Nívia, Elaine, Fernandinha, e em especial aos grandes amigos Dyorgge, Morgana, Nazaré e Nailde, pessoas com quem dividi a maior parcela do meu tempo nos últimos 2 (dois) anos. Sou muito grato a Eva Veloso, secretária do PECC, pelo auxílio constante e fundamental despendido aos dissentes deste programa.

Agradeço aos meus irmãos “tortos”, Guilherme, Felipe, Gustavo e Thaty, autora desta nova modalidade de parentesco, a dona Zelita e Sr. Antonio, que hoje são parte da minha família. Aos meus parentes moradores de Brazlândia, que carinhosamente me receberam e foram tão importantes nos momentos mais conturbados aqui vividos.

"A personalidade criadora deve pensar e julgar por si mesma, porque o progresso moral da sociedade depende exclusivamente da sua independência."

Albert Einstein

RESUMO

ESTUDO EXPERIMENTAL E ANALÍTICO DE PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC) COMO ARMADURA DE CISALHAMENTO.

Autor: Antonio Wagner de Lima

Orientador: Guilherme Sales Soares de A. Melo, Ph.D. (UnB)

Co-orientador: Yosiaki Nagato, D.Sc. (UnB)

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 28 de junho de 2012

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo experimental e analítico de lajes lisas de concreto armado reforçadas ao puncionamento com a utilização de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) como armadura de cisalhamento. A utilização de laminados de PRFC como alternativa no combate à punção em lajes lisas é simples, requer pouco tempo para aplicação e não altera a estética da laje.

A técnica de reforço consiste em se colar fitas fabricadas com manta de PRFC através de furos verticais nas lajes, de modo a se formar um laço completo entre dois furos subsequentes como “pontos de costura” na região próxima ao pilar.

Para avaliação da técnica, foi elaborado um programa experimental que prevê a execução e ensaio de 04 (quatro) modelos de conexão laje-pilar. A laje tem dimensões de 2500 mm x 2500 mm x 180 mm e os pilares centrados são quadrados de 300 mm x 300 mm. Um dos modelos não foi reforçado para comparação com os demais. Para os outros três modelos, variou-se a distribuição dos furos e o padrão de ancoragem, mantendo-se constante a área de reforço por perímetro de reforço.

Para o estudo analítico, devido ao pioneirismo da técnica de reforço, ainda não existem prescrições normativas disponíveis na literatura que tratem especificamente da utilização de PRFC como armadura de cisalhamento em lajes. Ante o exposto, será utilizada nesta pesquisa uma adaptação das recomendações dos principais códigos, nacional e internacionais, no dimensionamento à punção (ABNT NBR 6118:2007, *ACI* 318:2008 e *EUROCODE* 2:2004), associados às recomendações do *ACI* 440 2R:02. Esta última trata apenas do reforço de estruturas de concreto armado utilizando polímeros reforçados com fibras.

Experimentalmente, os resultados obtidos mostraram que a técnica aplicada foi eficiente, resultando em ganho tanto na capacidade de carga quanto na ductilidade dos modelos reforçados em relação ao modelo de controle. O reforço aplicado resultou em ganhos na resistência ao cisalhamento de até 56% em relação à carga apresentada pelo modelo sem reforço.

Palavras-chaves: *Punção, PRFC, Lajes lisas de concreto armado, Armadura de cisalhamento.*

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF PUNCHING IN PLAIN CONCRETE SLABS USING POLYMERS OF CARBON FIBER REINFORCED (CFRP) HOW TO SHEAR REINFORCEMENT.

Author: Antonio Wagner de Lima

Supervisor: Guilherme Sales Soares de A. Melo, PhD (UnB).

Co-Supervisor: Yosiaki Nagato, D.Sc. (UnB)

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, June 28, 2012

This dissertation presents an experimental and analytical study of flat slabs of reinforced concrete with the use of polymers reinforced with carbon fiber (CFRP) as shear reinforcement. The use of CFRP laminates as an alternative against punching in flat slabs is simple, requires little time to implement and does not alter the aesthetics of the slab.

The technique consists in passing CFRP strips through vertical holes in the slabs in order to form a complete bond between two following holes as "stitches" in the region close to the column.

To evaluate the technique, it was developed an experimental program that provides the implementation and the test of four (04) models of slab-column connection. The slab has dimensions of 2500 mm x 2500 mm x 180 mm and the centred column has square cross-section of 300 mm x 300 mm. One model was not reinforced in shear. For the other three models varied the distribution pattern of holes and anchor, with a constant area for reinforcing the perimeter of the reinforced

In the analytical study, since it pioneered technique of reinforcement, there are no prescriptive requirements available in the literature that specifically addresses the use of CFRP as shear reinforcement in slabs. Based on the foregoing, this research will be used to adapt the recommendations of the major codes, national and international scale in the punching (ABNT NBR 6118:2007, ACI 318:2008 and EUROCODE 2:2004), associated with the recommendations of ACI 440 2R: 02. The last one deals only with the strengthening of reinforced concrete structures using fiber reinforced polymers.

Experimentally, the results showed that the technique applied was efficient, resulting in the increasing of the load capacity and ductility of the reinforced models compared to

the control model. Strengthening applied resulted in gains in shear strength of up to 56% compared to the load presented by the model without reinforcement.

Keywords: *Punching, CFRP, Flat slabs of reinforced concrete, Shear reinforcement.*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Generalidades.....	1
1.2.	Justificativa	5
1.3.	Objetivos.....	6
1.4.	Metodologia da pesquisa	6
1.5.	Estrutura do trabalho.....	7
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1.	Considerações gerais.....	8
2.2.	Punção.....	8
2.3.	Desenvolvimento histórico	9
2.4.	Parâmetros que influenciam na resistência ao puncionamento	14
2.4.1.	Resistência do concreto à compressão.....	14
2.4.2.	Taxa de armadura de flexão.....	15
2.4.3.	Geometria e dimensões do pilar	15
2.4.4.	Size effect – Efeito de tamanho.....	16
2.4.5.	Armadura de cisalhamento	16
2.5.	Trabalhos realizados	20
2.5.1.	Baris Binici e Oguzhan Bayrak (2005).....	20
2.5.2.	Widianto, Y. Tian, J. Argudo, Oguzhan Bayrak, J. O. Jirsa (2006).....	25
2.5.3.	Kyriakos Sissakis e Shamim A. Sheikh (2007).....	26
2.5.4.	H. Erdogan, B. Binici E G. Ozcebe (2010)	30
2.6.	Prescrições normativas	35
2.6.1.	Considerações gerais	35
2.6.2.	Recomendações do ACI 440 2R:02 - <i>Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures</i>	35
2.6.3.	ACI 318R:08 - <i>Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary</i>	37
2.6.4.	EUROCODE 2:2004 - Design of concrete structures	39
2.6.5.	ABRT NBR 6118:2007 -Projeto de estruturas de concreto – Procedimento 42	
2.6.6.	Determinação da Resistência à flexão - V_{flex}	43
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
3.1.	Considerações iniciais.....	45
3.2.	Descrições dos modelos ensaiados	46
3.3.	Armadura de flexão	48
3.4.	Armadura de cisalhamento	50
3.4.1.	PRFC	50
3.4.2.	Execução dos furos nos modelos para instalação do reforço	51
3.4.3.	Ferramentas utilizadas no preparo e aplicação do reforço	53

3.4.4.	Aplicação do reforço	56
3.5.	Armadura do pilar	61
3.6.	Formas	61
3.7.	Concretagem	62
3.8.	Instrumentação	64
3.8.1.	Deformações específicas nas armaduras de flexão e de cisalhamento.....	65
3.8.2.	Deformações específicas no concreto.....	71
3.8.3.	Deslocamentos verticais	72
3.9.	Procedimentos de ensaio.....	74
3.9.1.	Sistema de aquisição de dados.....	74
3.9.2.	Estrutura de reação	75
3.9.3.	Aplicação das cargas	76
3.9.4.	Cargas	79
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	80
4.1.	Caracterização dos materiais	80
4.1.1.	Concreto	80
4.1.2.	Aço	81
4.2.	Cargas últimas.....	82
4.3.	superfície de ruptura	83
4.4.	mapa de fissuração	86
4.5.	Deslocamentos verticais nas lajes.....	90
4.6.	Deformações específicas na superfície do concreto.	101
4.7.	Deformações específicas na amadura de flexão.	106
4.8.	Deformações específicas na amadura de cisalhamento - PRFC.....	112
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	121
5.1.	Análise dos Resultados experimentais.....	121
5.1.1.	Deslocamentos verticais nos modelos	121
5.1.2.	Deformações no concreto	122
5.1.3.	Deformações nas armaduras de flexão	124
5.1.4.	Deformações nas armaduras de cisalhamento	126
5.1.5.	Mapa de fissuração	127
5.1.6.	Cargas últimas	127
5.2.	Avaliação da adaptação de prescrições normativas disponíveis para serem utilizadas no cálculo de lajes reforçadas à punção com a utilização de PRFC	128
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
6.1.	Conclusões	131
6.1.1.	Eficácia do reforço.....	131
6.1.2.	Comparativo entre os modelos reforçados	131
6.1.3.	Avaliação da aplicabilidade das instruções normativas para o método de reforço proposto.....	131

6.1.4. Sistema de ensaio	132
6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	132
7. BIBLIOGRAFIA	133
APÊNDICE.....	134
APÊNDICE A - Estimativas de cargas e modos de rupturas das normas e valores experimentais.....	135
APÊNDICE A.1 – Estimativas para o ACI 38:2008.....	136
APÊNDICE A.2 – Estimativas para o EUROCODE 2:2004.....	136
APÊNDICE A.3 – Estimativas para o ABNT NBR 6118:2007.....	136
APÊNDICE B: Deslocamentos verticais nas lajes.....	137
APÊNDICE B.1 – Deslocamentos verticais no modelo L0-01.....	138
APÊNDICE B.2 – Deslocamentos verticais no modelo LC-S1.....	139
APÊNDICE B.3 – Deslocamentos verticais no modelo LC-S2.....	140
APÊNDICE B.4 – Deslocamentos verticais no modelo LR-S.....	141
APÊNDICE C: Deformações nas armaduras de flexão.....	142
APÊNDICE C.1 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo L0-01.....	144
APÊNDICE C.2 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo LC-S1.....	145
APÊNDICE C.3 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo LC-S2.....	146
APÊNDICE C.4 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo LR-S.....	147
APÊNDICE D: Deformações na superfície do concreto.....	148
APÊNDICE D.1 – Deformações na superfície do concreto para o modelo L0-01.....	149

APÊNDICE D.2 – Deformações na superfície do concreto para o modelo LC-S1.....	150
APÊNDICE D.3 – Deformações na superfície do concreto para o modelo LC-S2.....	151
APÊNDICE D.4 – Deformações na superfície do concreto para o modelo LR-S.....	152
APÊNDICE E: Deformações na armadura de cisalhamento – PRFC.....	153
APÊNDICE E.1 – Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S1.....	156
APÊNDICE E.2 – Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S2.....	157
APÊNDICE E.3 – Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LR-S.....	158
APÊNDICE F: Relatórios dos ensaios das barras de aço.....	159
APÊNDICE F.1 – Ensaio das barras de 8,0 mm.....	159
APÊNDICE F.2 – Ensaio das barras de 16,0 mm.....	160

Lista de símbolos

ρ_y	Taxa de armadura de flexão tracionada na direção y
ρ_x	Taxa de armadura de flexão tracionada na direção x
ρ	Taxa de armadura de flexão tracionada
A_s	Área de armadura de flexão tracionada
d	Altura útil da laje
S_0	Distância da primeira camada de armadura de cisalhamento até a face do pilar
S_r	Espaçamento entre as camadas de armadura de cisalhamento
f'_c	Resistência à compressão do concreto
f_{PRF}	Tensão do PRFC
f_u	Tensão de ruptura da barra
f_y	Tensão de escoamento da barra
V_n	Resistência ao cisalhamento nominal segundo ACI 440 2R:02
V_c	Parcela de resistência ao cisalhamento fornecida pelo concreto, segundo ACI 440 2R:02
V_s	Parcela de resistência ao cisalhamento fornecida pelo aço, segundo ACI 440 2R:02
V_{FRP}	Parcela de resistência ao cisalhamento fornecida pelo PRF, segundo ACI 440 2R:02
f_{PRF}	Tensão no PRF
E_{PRF}	Módulo de elasticidade do PRF
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
$V_{R,C}$	resistência à punção de uma laje sem armaduras de cisalhamento
$V_{R,cs}$	Carga última para uma laje com superfície de ruptura passando dentro da região reforçada ao cisalhamento
$V_{R,out}$	Carga última para uma laje com superfície de ruptura passando fora da região reforçada ao cisalhamento
$V_{R,max}$	Carga última para uma laje com ruptura por esmagamento da biela comprimida
A_{PRFC}	Área de armadura de cisalhamento por camada de reforço
$f_{y,PRFC}$	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento

u_{out}	Perímetro externo
u_1	Perímetro interno
β_c	Razão entre a maior e a menor dimensão do pilar
α_s	Constante que assume valor igual a 40 para o caso de pilares internos
ξ	<i>Size effect</i>
u_0	Perímetro do pilar
$u_{out,ef}$	Perímetro externo efetivo
$f_{yPRFC,ef}$	tensão efetiva na armadura de cisalhamento
f_{ym}	Tensão média de escoamento do aço registrada nos ensaios
ε_{ym}	Deformação média no escoamento do aço registrada nos ensaios
E_{ym}	Módulo de elasticidade médio do aço registrado nos ensaios
E_{PRFC}	Módulo de elasticidade do PRFC
E_F	Módulo de elasticidade da Fibra
E_M	Módulo de elasticidade da Matriz
V_F	Fração volumétrica da Fibra
V_M	Fração volumétrica da Matriz

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Variáveis dos modelos de lajes e propriedade dos materiais	23
Tabela 2.2 - Resumo dos resultados experimentais de Windianto, Tian, Argudo, Bayrak, Jirsa (2006).	25
Tabela 2.3 - Variáveis dos modelos de lajes e propriedade dos materiais (adaptada de SISSAKIS 2007)	28
Tabela 2.4- Resumo dos resultados experimentais (adaptada de SISSAKIS (2007)	29
Tabela 2.5 - Detalhe e descrição dos modelos (adaptada de Erdogan et al.(2010)).....	31
Tabela 2.6 - Propriedade dos materiais (adaptada de Erdogan et al. (2010)).....	31
Tabela 2.7 - Resumo dos resultados, (adaptada de Erdogan et al. (2010))	33
Tabela 2.8 - Comparação das prescrições normativas, (adaptada de Erdogan et al. (2010))	34
Tabela 3.1 - Características dos modelos ensaiados.....	48
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas dos materiais constituintes do compósito	51
Tabela 4.1- Caracterização do concreto.	80
Tabela 4.2 - resumo das cargas últimas dos modelos.....	83
Tabela 5.1 - Comportamento da armadura de flexão momentos antes da ruptura	126
Tabela 5.2 - Capacidade de carga e modo de ruptura segundo ACI-318:2008.....	129
Tabela 5.3 - Capacidade de carga e modo de ruptura segundo <i>EUROCODE 2</i> :2004..	129
Tabela 5.4 - Capacidade de carga e modo de ruptura segundo ABNT NBR 6118:2007	129

Lista de Figuras

Figura 1.1.1 - Ilustração de uma estrutura convencional em concreto armado (http://dussarrat-engenharia.blogspot.com/2009_07_01_archive.html).....	1
Figura 1.1.2 - Ilustração de uma estrutura em concreto armado com lajes lisas (http://dussarrat-engenharia.blogspot.com/2009_07_01_archive.html).....	1
Figura 1.1.3- Configuração de ruptura por cisalhamento com pilar quadrado.....	2
Figura 1.1.4 - Modelos de lajes lisas sem capitel e com capitel (Adaptado de Ferreira (2010))	3
Figura 1.1.5 - Vista 3D de modelo de laje reforçado com PRFC.....	4
Figura 1.1.6 - Detalhe do reforço	4
Figura 2.2.1 - Modo de ruptura de uma laje lisa sem armadura de cisalhamento-CEB- FIP/MC1990.....	9
Figura 2.3.1 - Sistema de lajes “cogumelo” de C.A. Turner (FERREIRA, 2010)	10
Figura 2.3.2 - Testes executados por Maillart (FERREIRA, 2010)	10
Figura 2.3.3 - Ruptura em estruturas com lajes lisas (adaptado de Binici, 2003).....	11
Figura 2.3.4 - Colapso do departamento de loja em Shampoong, na Coreia do Sul (GARDNER et. al., 2002)	11
Figura 2.3.5 - Colapso da 4a laje do edifício Pipers Row Car Park, Wolverhampton- Inglaterra (WOOD, 1997).....	11
Figura 2.3.6 - Visão geral dos pilares do edifício Pipers Row Car Park, Wolvehempton- Inglaterra (WOOD, 1997).....	12
Figura 2.3.7 - Obra na Asa Sul de Brasília-DF utilizando sistema estrutural com laje lisa	13
Figura 2.3.8 - Obra de 10 pavimentos em águas Claras-DF utilizando sistema estrutural com laje lisa.....	13
Figura 2.3.9 - Obra de 24 pavimentos em águas Claras-DF utilizando sistema estrutural com laje lisa.....	13
Figura 2.4.1 - Armaduras de cisalhamento do tipo estribos e barra dobrada, adaptada de Ferreira (2010).....	18
Figura 2.4.2 - Vista 3D de modelo reforçado com PRFC (reprodução da Figura 1.1.5) 19	19
Figura 2.4.3 - Detalhe do reforço (reprodução da Figura 1.1.6).....	19
Figura 2.4.4 - Arranjo para a distribuição de armadura de cisalhamento de forma radial (ABNT NBR 6118:2007)	19
Figura 2.4.5 - Arranjo para a distribuição de armadura de cisalhamento em forma de cruz (ABNT NBR 6118:2007)	19
Figura 2.5.1 - Protótipo do ensaio e detalhe da armadura de flexão, (BINICI et al., 2005)	21
Figura 2.5.2 - Padrão A de distribuição dos furos para reforço de PRFC, BINICI (2005)	22
Figura 2.5.3 - Padrão B de distribuição dos furos para reforço de PRFC, BINICI (2005)	22
Figura 2.5.4 - Detalhe da aplicação do PRFC (BINICI et al, 2005).....	22
Figura 2.5.5 - Desempenho dos modelos reforçados (BINICI et al, 2005).....	24
Figura 2.5.6 - Ruptura dos modelos reforçados (BINICI, 2005).....	24
Figura 2.5.7 - Modelo de reforço do tipo costura, WIDIANTO (2006).....	25
Figura 2.5.8 - Ilustração do modelo B5 (SISSAKIS et al, 2007)	27
Figura 2.5.9 - Padrões de furo utilizados na confecção dos modelos, SISSAKIS et al (2007)	27

Figura 2.5.10 - Modelo D4 antes e depois da aplicação do PRFC (SISSAKIS et al, 2007).....	28
Figura 2.5.11 - Detalhes de modelo típico, instrumentação e armadura de flexão, (adaptada de Erdogan et al. (2010)).....	32
Figura 2.5.12 - Modelos reforçados com N° pinos de PRFC, (adaptada de Erdogan et al. (2010))	33
Figura 2.6.1 - Verificação da resistência à punção (ACI 318:08).....	37
Figura 2.6.2 - Modos de rupturas (ACI 318:08).....	38
Figura 2.6.3 - Detalhes para distribuição da armadura de cisalhamento (ACI 318:08) .	39
Figura 2.6.4 - Verificação da resistência a punção (EC 2:2004).....	40
Figura 2.6.5 - Detalhes para distribuição da armadura de cisalhamento (EC 2:2004)...	42
Figura 2.6.6 - Detalhes típicos para arranjos com <i>studs</i> (ABNT NBR 6118:2007).....	43
Figura 2.6.7 - Linhas de rupturas adotadas para as lajes	44
Figura 3.1.1 - Modelo hipotético caracterizando a situação estudada- TRAUTWEN (2006)	45
Figura 3.2.1 - Modelos a serem ensaiados	47
Figura 3.2.2 – Modelos ensaiados	48
Figura 3.3.1 - Disposição das armaduras de flexão, superiores e inferiores	49
Figura 3.3.2 - Disposição das armaduras de flexão, superiores e inferiores.	50
Figura 3.4.1 – Resinas utilizadas na aplicação do reforço.....	50
Figura 3.4.2 - Ilustração do S_0 e do S_r para os modelos com armadura de cisalhamento distribuídas em cruz e de forma radial.....	52
Figura 3.4.3 - Preparo das formas e instalação de tubos de PVC.....	52
Figura 3.4.4 - Arredondamento dos cantos dos furos.....	53
Figura 3.4.5 – Ferramentas utilizadas no preparo da superfície do concreto: a) Lixadeira utilizada para regularizar a superfície de concreto, b) Furadeira utilizada para misturar os componentes das resinas, c) Jato de ar	54
Figura 3.4.6 – Processo de mistura das resinas	55
Figura 3.4.7 – Ferramentas utilizadas na aplicação do reforço: a) corte da FC 130, a)passagem da fibra pelo interior dos furos, c) aplicação das resinas, d) aplicação das resinas no interior dos furos.....	56
Figura 3.4.8 – Modelos LC-S2 e LR-S após aplicação do <i>MBrace Primer</i>	57
Figura 3.4.9 - Modelos LC-S1 e LR-S após aplicação do <i>MBrace putty</i>	57
Figura 3.4.10 - Fibras de FC 130 cortadas e prontas para serem aplicadas nos modelos	58
Figura 3.4.11 - Ferramenta utilizada para passagem das fibras pelo interior dos furos .	58
Figura 3.4.12 - Preparo do Saturant <i>MBrace</i>	58
Figura 3.4.13 - Aplicação do PRFC	58
Figura 3.4.14 – Modelos a serem reforçados.....	59
Figura 3.4.15 - Modelo LC-S1	59
Figura 3.4.16 - Modelo LC-S2	60
Figura 3.4.17- Modelo LR-S	60
Figura 3.5.1 - Armadura do pilar	61
Figura 3.5.2 - Detalhe da armadura do pilar.....	61
Figura 3.6.1 - Forma dos modelos ensaiados	62
Figura 3.7.1 - Abatimento do tronco de cone	63
Figura 3.7.2 - Moldagem dos corpos de prova.....	63
Figura 3.7.3 - Concretagem dos mmodelos	64
Figura 3.7.4 - Processo de cura do concreto.....	64
Figura 3.8.1 - Extensometria da armadura de flexão superior.....	65

Figura 3.8.2 - Extensometria da armadura de flexão inferior.....	66
Figura 3.8.3 - Barra de aço antes da instrumentação.....	67
Figura 3.8.4 - Barra apta à receber o extensômetro.....	67
Figura 3.8.5 - Barra devidamente instrumentada	67
Figura 3.8.6 - Barra após aplicação do Araldite	67
Figura 3.8.7 - Barra após aplicação do silicone.....	67
Figura 3.8.8 - Barra após aplicação da fita isolante.....	67
Figura 3.8.9 - Instrumentação na armadura de cisalhamento no modelo LC-S1	68
Figura 3.8.10 - Instrumentação na armadura de cisalhamento no modelo LC-S2	68
Figura 3.8.11 - Instrumentação na armadura de cisalhamento no modelo LR-S	69
Figura 3.8.12 - Soldagem dos Extensômetros aos fios.....	70
Figura 3.8.13 - Extensômetros a serem colados na armadura de cisalhamento	70
Figura 3.8.14 - Aplicação de adesivo epóxico no extensômetro	70
Figura 3.8.15 - Colagem do extensômetro na superfície do PRFC	70
Figura 3.8.16 - Extensômetros devidamente colado no reforço	70
Figura 3.8.17 - Proteção de silicone nos extensômetros do modelo LC-S1	70
Figura 3.8.18 - Extensometria no concreto dos modelos L0-01, LC-S1 e LC-S2.....	71
Figura 3.8.19 - Extensometria no concreto do modelo LR-S.....	71
Figura 3.8.20 - Limpeza da superfície do concreto para colagem do extensômetro	71
Figura 3.8.21 - Extensômetros colados na parte inferior do modelo de laje L0-01.	71
Figura 3.8.22 - Extensômetros colados na parte inferior do modelo de laje LC-S2.	72
Figura 3.8.23 - Extensômetros colados na parte inferior do modelo de laje LR-S.	72
Figura 3.8.24 - Distribuição dos LVDTs no modelo L0-01	73
Figura 3.8.25 - LVDTs no modelo L0-01	73
Figura 3.8.26 - LVDTs no modelo LC-S1	73
Figura 3.8.27 - LVDTs no modelo LC-S2	74
Figura 3.8.28 - LVDTs no modelo LR-S	74
Figura 3.9.1 - Sistema de controle visual de cargas	75
Figura 3.9.2 - Sistema de aquisição de dados.....	75
Figura 3.9.3 - Vista em 3D do esquema de ensaio no pórtico metálico	75
Figura 3.9.4 - Esquema de ensaio no pórtico metálico fixado na laje de reação.....	76
Figura 3.9.5 - Atuadores hidráulicos	77
Figura 3.9.6 - Bombas elétricas	77
Figura 3.9.7 - Aplicação do carregamento nos modelos distribuídos em 08 (oito) pontos	78
Figura 3.9.8 - Viga de reação e atuador hidráulico	78
Figura 3.9.9 - Célula de carga em conjunto com o atuador hidráulico.....	79
Figura 3.9.10 - Indicadores digitais utilizados para leituras das cargas a cada passo de carga.....	79
Figura 4.1.1 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 8$ mm	81
Figura 4.1.2 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm	82
Figura 4.3.1 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm	84
Figura 4.3.2 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm	85
Figura 4.3.3 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm	85
Figura 4.3.4 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm	86
Figura 4.4.1 - Padrão de fissuração do modelo L0-01.....	87
Figura 4.4.2 - Padrão de fissuração do modelo LC-S1.....	88
Figura 4.4.3 - Padrão de fissuração do modelo LC-S2.....	89
Figura 4.4.4 - Padrão de fissuração do modelo LR-S.....	90
Figura 4.5.1 - Distribuição dos LVDTs para leitura dos deslocamentos verticais	91

Figura 4.5.2 - Deslocamentos verticais na laje L0-01 - direção N-S	92
Figura 4.5.3 - Deslocamentos verticais na laje L0-01 - direção L-O	92
Figura 4.5.4 - Deslocamentos verticais na laje LC-S1 - direção N-S.....	93
Figura 4.5.5 - Deslocamentos verticais na laje LC-S1 - direção L-O	93
Figura 4.5.6 - Deslocamentos verticais na laje LC-S2 - direção N-S.....	94
Figura 4.5.7 - Deslocamentos verticais na laje LC-S2 - direção L-O	94
Figura 4.5.8 - Deslocamentos verticais na laje LR-S- direção N-S.....	95
Figura 4.5.9 - Deslocamentos verticais na laje LR-S - direção L-O	95
Figura 4.5.10 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- L0-01	96
Figura 4.5.11 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- LC-S1	97
Figura 4.5.12 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- LC-S2	97
Figura 4.5.13 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- LR-S	98
Figura 4.5.14 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar – L0-01	98
Figura 4.5.15 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar - LC-S1	99
Figura 4.5.16 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar - LC-S2	99
Figura 4.5.17 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar - LR-S	100
Figura 4.5.18 -Cargas x Deslocamentos verticais médios próximos às bordas para todos os modelos	100
Figura 4.6.1 - Extensometria do concreto nos modelos L0-01, LC-S1 e LC-S2	101
Figura 4.6.2 - Extensometria do concreto no modelo LR-S.....	101
Figura 4.6.3 - Gráfico Carga X Deformação no concreto - L0-01	102
Figura 4.6.4 - Gráfico Carga x Deformação no concreto - LC-S1	102
Figura 4.6.5 - Gráfico Carga x Deformação no concreto - LC-S2.....	103
Figura 4.6.6 - Gráfico Carga x Deformação no concreto - LR-S	103
Figura 4.6.7 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto – L0-01.....	104
Figura 4.6.8 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto - LC-S1	104
Figura 4.6.9 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto - LC-S2	105
Figura 4.6.10 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto - LR-S	105
Figura 4.7.1 - Deformações específicas na armadura de flexão - L0-01	107
Figura 4.7.2 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S1	107
Figura 4.7.3 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S2.....	108
Figura 4.7.4 - Deformações específicas na armadura de flexão - LR-S.....	108
Figura 4.7.5 - Deformações específicas na armadura de flexão - L0-01.....	109
Figura 4.7.6 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S1	110
Figura 4.7.7 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S2.....	110
Figura 4.7.8 - Deformações específicas na armadura de flexão - LR-S.....	111
Figura 4.7.9 - Deformação no aço ao longo do comprimento lateral de cada modelo, no momento próximo a ruptura.	111
Figura 4.8.1 Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LC-S1	113
Figura 4.8.2 Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LC-S2	113
Figura 4.8.3 Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LR-S (EFC01 a EFC06).....	114
Figura 4.8.4 - Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LR-S (EFC07 a EFC12).....	114
Figura 4.8.5 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S1.....	115
Figura 4.8.6 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S2.....	116
Figura 4.8.7 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LR-S (EFC01-EFC06)	116

Figura 4.8.8 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LR-S (EFC07-EFC12)	117
Figura 4.8.9 - Deformações na armadura de cisalhamento do 1º perímetro de reforço LR-S	117
Figura 4.8.10 - Deformações na armadura de cisalhamento do 2º perímetro de reforço LR-S	118
Figura 4.8.11 - Deformações na armadura de cisalhamento do 3º perímetro de reforço LR-S	118
Figura 4.8.12 - Deformações na armadura de cisalhamento do 4º perímetro de reforço LR-S	119
Figura 4.8.13 - Deformações na armadura de cisalhamento do 5º perímetro de reforço LR-S	119
Figura 4.8.14 - Deformações na armadura de cisalhamento do 6º perímetro de reforço LR-S	120
Figura 5.1.1 - Modelo de bielas e tirantes para ruptura por punção: a) Padrão de fissuras de uma laje depois da ruptura; b) Biela teórica e fissura crítica; c) Modelo teórico biela-tirante para ruptura por punção (MUTTONI, 2008)	123
Figura 5.2.1- Carga última dos modelos - experimental e estimativa das prescrições normativas analisadas	130
Figura 5.2.2 - Relação da carga última experimental e carga última estimada pelas prescrições normativas	130

Lista de Abreviaturas

PRF	Polímeros Reforçados com Fibras
PRFC	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
UnB	Universidade de Brasília
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais
PECC	Programa de pós Graduação em Estruturas e Construção Civil
<i>ACI</i>	<i>Institute of Concrete American</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
NBR	Norma Brasileira
LVDT	Transdutores de Variação de Deslocamento Linear
EUA	Estados Unidos da América
DF	Distrito Federal
<i>FRP</i>	<i>fiber reinforced polymers</i>
MPa	Mega pascal
CF	Fiber Carbon
PVC	Cloreto de Polivinila
CF	Carbon Fiber

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

Nos sistemas estruturais convencionais, as lajes se apóiam nas vigas e estas, por sua vez, se apoiam nos pilares. Neste caso, as cargas (acidentais e permanentes) que são aplicadas diretamente nas lajes se transmitem para as vigas, que as transferem para os pilares e, por fim, estes descarregam nas fundações (ver Figura 1.1.1).

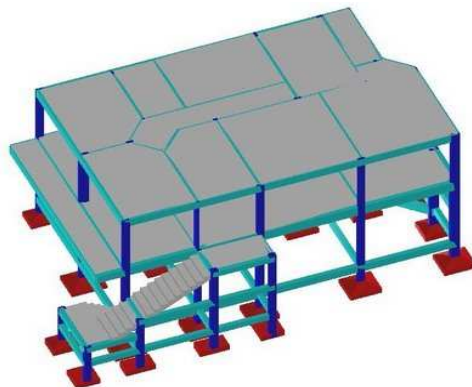


Figura 1.1.1 - Ilustração de uma estrutura convencional em concreto armado
(http://dussarrat-engenharia.blogspot.com/2009_07_01_archive.html)

Em se tratando de lajes lisas, ou seja, sem presença de vigas, as cargas verticais, acidentais e do peso próprio, que atuam sobre as lajes são descarregadas diretamente nos pilares. Neste caso, as lajes devem estar rigidamente ligadas aos pilares, conforme Figura 1.1.2.



Figura 1.1.2 - Ilustração de uma estrutura em concreto armado com lajes lisas
(http://dussarrat-engenharia.blogspot.com/2009_07_01_archive.html)

O sistema de lajes lisas de concreto armado vem sendo utilizado com maior frequência por apresentar uma série de vantagens quando comparado aos sistemas estruturais convencionais.

Entre as principais vantagens desse tipo de estrutura podemos citar a maior flexibilidade na hora de definir ambientes internos ou futuras alterações de *lay-out*. O sistema também permite a simplificação das formas e do cimbramento, simplificação das armaduras, reduzindo custos com mão-de-obra e materiais.

Dentre as desvantagens do sistema estrutural com lajes lisas, podemos ressaltar o aumento dos deslocamentos transversais da estrutura, a instabilidade global do edifício às ações laterais e, principalmente, a possibilidade da ruptura por punção, uma vez que esta pode se propagar e provocar a ruína parcial ou total da estrutura por colapso progressivo.

A ruptura por cisalhamento é caracterizada pela fratura brusca da laje ao longo de planos inclinados que se estende, a partir da interface laje-pilar, por toda espessura da laje. Em caso de pilares quadrados, a ruptura por puncionamento assume forma de tronco de pirâmide, conforme Figura 1.1.3.

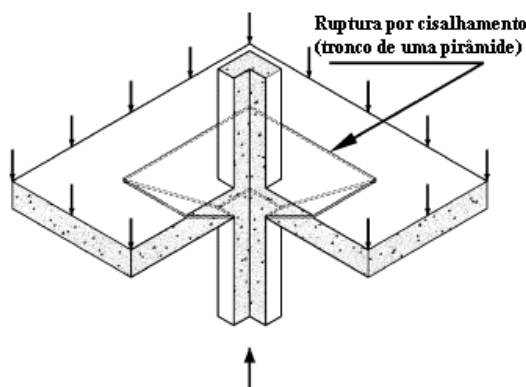


Figura 1.1.3- Configuração de ruptura por cisalhamento com pilar quadrado

Para se evitar a ruptura, é necessário que as tensões cisalhantes na região próxima ao pilar sejam amenizadas, e isso pode ser feito com o aumento da espessura da laje de uma forma completa, ou com uso de capitéis na região onde ocorre o esforço cisalhante, ou ainda com o aumento da capacidade resistente da laje, fazendo-se uso de concreto de alta resistência ou armadura de cisalhamento.

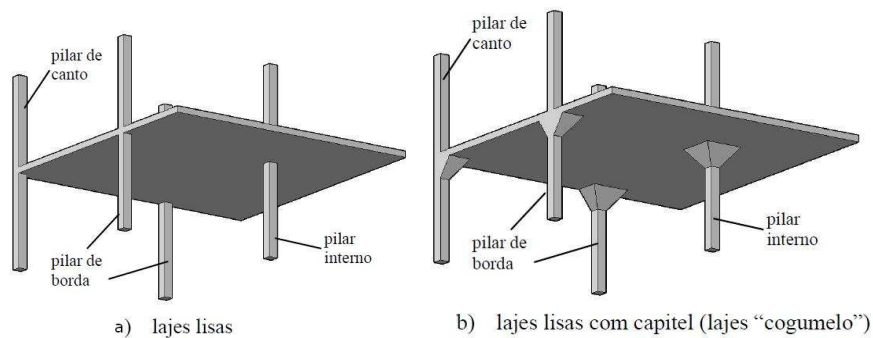


Figura 1.1.4 - Modelos de lajes lisas sem capitel e com capitel (Adaptado de Ferreira (2010))

Nos últimos anos, têm sido grandes os esforços dedicados à produção de materiais “alternativos” de reforço de estruturas de concreto armado, dentre os quais se destacam os polímeros reforçados com fibras (PRF), na tentativa de restabelecer as condições de uso das estruturas ou adaptá-las a novas condições de utilização. Na grande maioria dos casos, esses materiais têm sido utilizados para melhorar o desempenho de pilares de estruturas viárias, aumentando a ductilidade através do confinamento imposto pelo “encamisamento” das peças com os tecidos flexíveis ou com os laminados de fibras poliméricas aderidos ao substrato do concreto utilizando resina epóxica. Outra utilização comum do material é para o caso de vigas e lajes, como reforço de flexão, sendo necessários, em todos os casos, cuidados especiais, principalmente, devido aos problemas de deslizamentos na interface compósito/concreto e a aspectos relacionados à durabilidade das peças reforçadas.

A utilização de compósitos de PRFC (polímeros reforçados com fibra de carbono) como reforço em estruturas de concreto armado tem sido bastante estudada em todo o mundo, com ênfase maior no reforço à flexão. No entanto, alguns estudos da utilização de laminados de PRFC no reforço ao cisalhamento em lajes lisas já estão sendo realizados. As conexões laje-pilar nessas estruturas são, geralmente, a parte mais crítica pelo fato de estarem, nesta região, com grande concentração de esforços de cisalhamento.

As técnicas mais tradicionais para reforçar as conexões laje-pilar de concreto armado quanto ao cisalhamento incluem o uso de chapas de aço e parafusos, pinos de aço (*studs*) e o aumento da espessura da laje como um todo ou apenas na região próxima ao pilar (capitel). Esses procedimentos, variando em cada caso, podem apresentar alguns

inconvenientes como: difícil instalação, desagradável esteticamente e necessidade de grandes intervalos de tempo para o reforço da estrutura em uso.

A utilização de laminados de PRFC como alternativa para aumento da capacidade de carga para combate de punção em lajes lisas é bastante simples, requer pouco tempo para aplicação e os laminados não são susceptíveis à corrosão e não alteram a estética da laje, mantendo a espessura da mesma em ambas as faces.

A técnica consiste em se aplicar a manta de PRFC, através de furos verticais na laje, de modo a se formar um laço completo, fazendo com que uma tira de PRF atravesse a laje por entre dois furos adjacentes, de modo a costurá-la conforme mostrado na Figura 1.1.6.

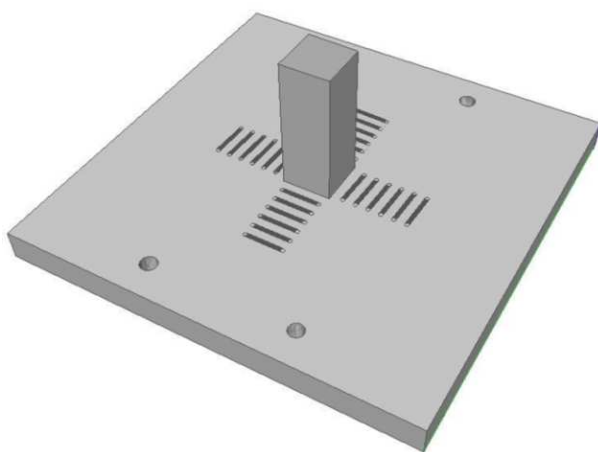


Figura 1.1.5 - Vista 3D de modelo de laje reforçada com PRFC

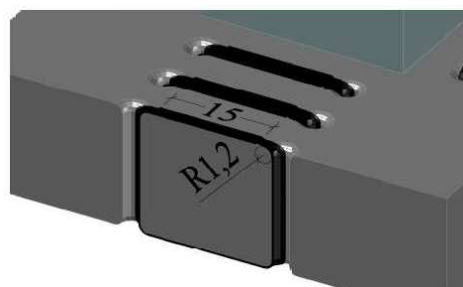


Figura 1.1.6 - Detalhe do reforço

O trabalho apresentado nesta dissertação de mestrado traz estudos experimentais e analíticos de modelos locais de lajes lisas de concreto armado, com pilares quadrados internos e carregamento simétrico, reforçadas ao puncionamento utilizando PRFC como armadura de cisalhamento. Para tanto, foram ensaiados 4 (quatro) modelos locais de lajes lisas de concreto armado, com dimensões de 2500 mm x 2500 mm x 180 mm e pilares de 300 mm x 300 mm. Dos 4 (quatro) modelos, 3 (três) foram reforçados ao cisalhamento e 1 (um) modelo não teve reforço e foi usado como modelo de controle. Os ensaios dos modelos desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília – UnB e os ensaios de caracterização do concreto e do aço

utilizados na confecção dos modelos foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais -LEM da mesma instituição.

1.2. JUSTIFICATIVA

O aumento no número de pesquisas realizadas sobre o reforço ao cisalhamento de estruturas de concreto armado tem se justificado pela necessidade de se conhecer com propriedade o comportamento desse sistema estrutural. Para o caso de reforço ao cisalhamento em lajes com laminados de PRFC, o número de pesquisas internacionais ainda é discreto. No Brasil, tem sido bem mais comum o estudo de reforço de estruturas de concreto armado com laminados de PRFC em outros elementos estruturais como vigas e pilares.

O Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil - PECC da Universidade de Brasília – UnB tem feito, recentemente, pesquisas voltadas ao estudo de reforço em vigas utilizando laminados de PRF, como o caso de CASTRO (2005) e SILVA FILHO (2005). Atualmente, alguns trabalhos de reforço de estruturas de concreto armado estão sendo desenvolvidos pelo PECC. Dentre eles, destacamos aqui a pesquisa do doutorando Galileu Silva Santos, que está analisando o reforço de lajes lisas ao puncionamento utilizando como armadura de cisalhamento laminados de PRFC.

Considerando as inúmeras vantagens apresentadas pela utilização desta técnica, esta pesquisa visa contribuir com o aumento do conhecimento no assunto e colaborar para um melhor entendimento do mecanismo de ruptura por puncionamento de lajes lisas de concreto armado.

Os métodos teóricos disponíveis para análise de estruturas de concreto armado ainda apresentam imprecisão na estimativa da resistência ao cisalhamento e do modo de ruptura das lajes lisas face ao puncionamento. Justifica-se também esta pesquisa pelo fato da mesma ser bastante relevante e atual, além de inovadora na comunidade científica brasileira por utilizar laminados de PRFC (polímeros reforçados com fibra de carbono) como armadura de cisalhamento em lajes.

1.3. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar, experimentalmente e analiticamente, o comportamento e a resistência ao cisalhamento de lajes lisas de concreto armado, com pilares quadrados e carregamento simétrico, utilizando laminados de PRFC como armadura de cisalhamento, bem como a eficiência da utilização desse material.

Faz parte dos objetivos específicos desta pesquisa, analisar e comparar os dados obtidos nos ensaios com as estimativas das proposições normativas da ABNT NBR 6118:2007 e alguns códigos internacionais como *ACI 318R:08 - Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* e *EUROCODE 2:2004 - Design of concrete structures*.

Esta pesquisa faz parte da primeira série de ensaios do doutorando Galileu Silva Santos e dá sequência aos estudos experimentais realizados pela Universidade de Brasília (UnB) sobre punção em lajes lisas de concreto armado, bem como de pesquisas realizadas utilizando PRF como material de reforço em estruturas de concreto armado.

1.4. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia empregada nesta pesquisa consistiu na confecção e ensaio de 04 (quatro) modelos locais de conexões laje-pilar, dos quais 3 (três) foram reforçados ao cisalhamento através da técnica de costura da laje na região próxima do pilar utilizando laminados de PRFC e 1 (um) modelo foi tido como controle e não reforçado. A confecção dos modelos e os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília - UnB.

Durante os ensaios foram medidas as deformações específicas nas armaduras de flexão e cisalhamento, e no concreto. Foram medidos também os deslocamentos verticais nos modelos usando LVDT's (Transdutores de Deslocamento Linear).

Uma vez realizados os ensaios, foi feita uma análise dos resultados experimentais no sentido de se avaliar o comportamento estrutural dos modelos quanto ao modo de ruptura, bem como a capacidade de carga.

Os resultados obtidos nos ensaios foram confrontados com os resultados previstos pelas prescrições normativas estabelecidas pelos seguintes códigos: ABNT NBR 6118:2007, *ACI 318:2008* e *EUROCODE 2:2004*.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 6 capítulos e cada um deles será exposto a seguir.

No capítulo 2, Será feita uma revisão bibliográfica com alguns trabalhos realizados no exterior sobre utilização de PRFC como armadura de cisalhamento em lajes lisas de concreto armado, bem como análise de códigos internacionais e nacional com recomendações que foram tomadas para calculo estimado das cargas de rupturas dos modelos em estudo, com e sem a armadura de cisalhamento.

O capítulo 3 (três) expõe todo o programa experimental, destacando todas as características e propriedades dos modelos ensaiados, do material utilizado no reforço e sua aplicação, bem como todo o esquema de ensaio juntamente com suas etapas e procedimentos adotados durante a realização dos mesmos.

No capítulo 4 (quatro), serão apresentados os resultados de caracterização dos materiais, das deformações específicas nas armaduras de flexão, de cisalhamento (PRFC) e no concreto, bem como os deslocamentos verticais nos modelos durante a realização dos ensaios, mapa de fissuração e cargas ultimas.

O capítulo 5 (cinco) traz uma análise dos resultados encontrados nos ensaios, bem como uma comparação das cargas ultimas com os valores analíticos estimados a partir das prescrições normativas.

No capítulo 6 (seis) são apresentadas as conclusões deste estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros baseadas na experiência adquirida durante toda a realização desta pesquisa.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e os apêndices.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo será apresentado o conceito de punção, o resumo de alguns estudos experimentais de lajes lisas de concreto armado utilizando laminados de PRFC como armadura de cisalhamento e prescrições normativas internacionais (ACI 318M-2008 e *EUROCODE* 2-2004) e nacional (ABNT NBR 6118:2007) para a verificação de punção, seguindo adaptações recomendadas pelo ACI 440 2R quando se trata da utilização de laminados de PRFC como armadura de cisalhamento.

2.2. PUNÇÃO

Segundo a ABNT NBR 6118/2007, punção é um Estado Limite Último, no entorno de forças concentradas, provocado por cisalhamento.

A punção é caracterizada pela atuação de uma força concentrada em uma determinada área de um elemento estrutural plano. A atuação dessa força provocará elevadas tensões cisalhantes na região próxima ao seu ponto de aplicação, podendo causar a ruptura desse elemento ou mesmo da estrutura como um todo. No caso de lajes lisas, em decorrência da ausência de vigas, a aplicação dessa força concentrada é realizada pelos pilares e a ruína ocorre justamente nas conexões laje-pilar.

O fato das lajes lisas descarregarem diretamente nos pilares faz com que surja, nas conexões laje-pilar, uma força cortante de grande intensidade, provocando assim altas tensões cisalhantes. Isso pode provocar a ruína por cisalhamento da ligação laje-pilar, caracterizando o fenômeno conhecido como punção. A Figura 2.2.1 mostra a superfície de ruptura por punção de uma laje lisa sem armadura de cisalhamento, com inclinação de 25° a 30°, de acordo com CEB-FIP/MC1990.

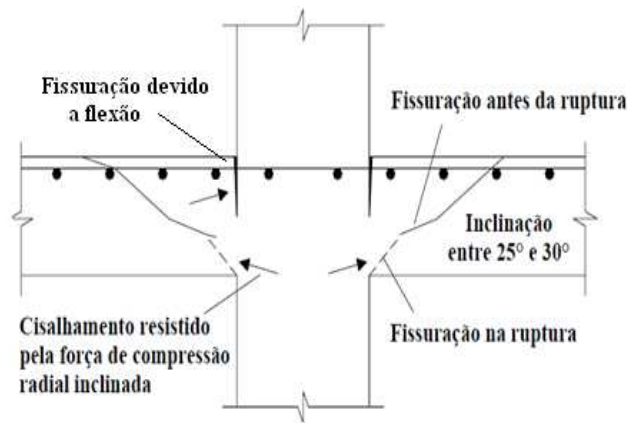


Figura 2.2.1 - Modo de ruptura de uma laje lisa sem armadura de cisalhamento-CEB-FIP/MC1990.

2.3. DESENVOLVIMENTO HISTÓRIO

O sistema de lajes lisas, que surgiu pela iniciativa do engenheiro C. A. P. Turner, em 1906, com a construção do edifício C. A. Bovey Building, Minneapolis, Minnesota, nos EUA, causou grande polêmica entre os engenheiros da época, sendo cegamente endossado por uns e fortemente combatido por outros, o que não impediu que se disseminasse (CARVALHO e PINHEIRO, 2009).

As lajes de Turner, por ele denominadas de lajes “cogumelo”, caracterizavam-se pela presença de capitéis na ligação laje-pilar e pelo uso de uma gaiola composta de barras de 32 mm de diâmetro, responsáveis pelo combate ao cisalhamento.

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), na Rússia, em 1908, o engenheiro A. F. Loleyt projetou, calculou e construiu um edifício de quatro pavimentos para depósito de produtos lácteos em Moscou. Nos demais países europeus, o primeiro exemplo é creditado a Maillart, que em 1910 construiu um edifício de lajes lisas em Zurique. A partir daí, a construção de edifícios com lajes lisas proliferou, sendo atualmente empregada em todo o mundo.

Detalhes do sistema de lajes “cogumelo” idealizado por Turner podem ser vistos na Figura 2.3.1. Na Figura 2.3.2 é ilustrada a série de ensaios conduzida por Maillart em 1908 que resultaram na sua patente do chamado sistema de pavimento sem vigas em 1909.

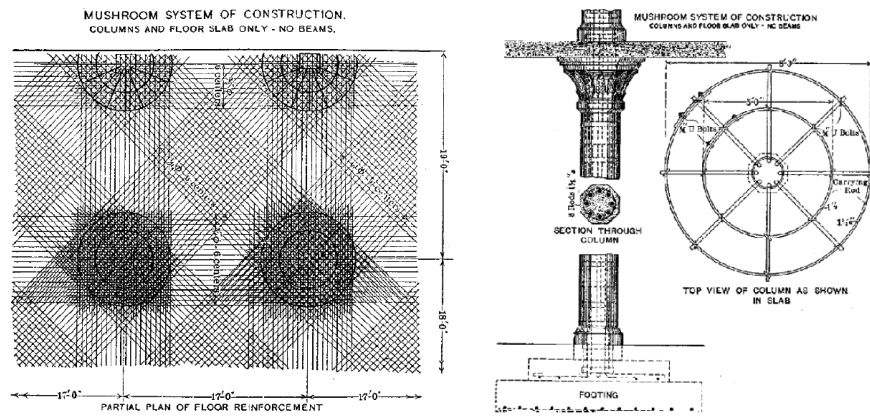


Figura 2.3.1 - Sistema de lajes “cogumelo” de C.A. Turner (FERREIRA, 2010)



Figura 2.3.2 - Testes executados por Maillart (FERREIRA, 2010)

De acordo com MELO (1990), o primeiro caso registrado de ruptura por punção foi o edifício *prest-o-lite*, em Indianápolis (1911), onde as lajes se desligaram completamente dos pilares, levando a estrutura à ruína. Outros casos de acidentes estruturais devido à punção têm sido registrados, como mostrado nas figuras a seguir.

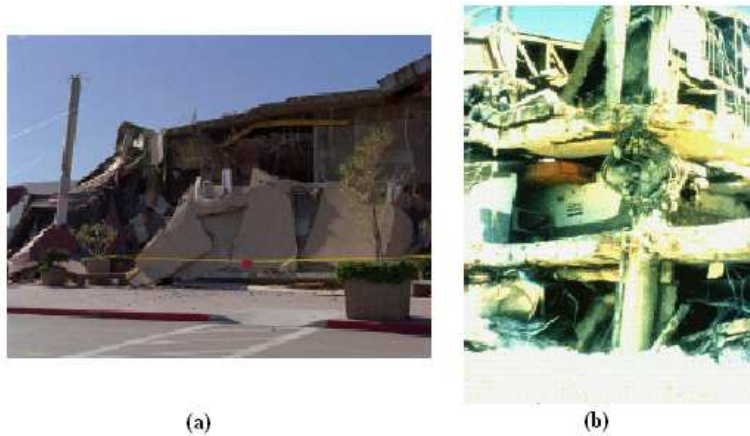


Figura 2.3.3 - Ruptura em estruturas com lajes lisas (adaptado de Binici, 2003)



Figura 2.3.4 - Colapso do departamento de loja em Shampoong, na Coréia do Sul (GARDNER et. al., 2002)



Figura 2.3.5 - Colapso da 4a laje do edifício Pipers Row Car Park, Wolverhampton-Inglaterra (WOOD, 1997)



Figura 2.3.6 - Visão geral dos pilares do edifício Pipers Row Car Park, Wolvehempton-Inglaterra (WOOD, 1997)

As primeiras recomendações normativas sobre lajes lisas eram baseadas em ensaios experimentais pioneiros realizados nos EUA. Segundo Melges (2001) o início dos estudos sobre a punção é atribuído a Talbot (1913), tendo ele ensaiado 197 sapatas sem armadura de cisalhamento e observado a ruína por punção em vinte delas.

Ainda segundo Melges (2001) o efeito da adição de armaduras de combate ao cisalhamento em lajes lisas de concreto foi testado pela primeira vez por Graf (1933). Em trabalhos posteriores como os de Gomes (1991) foi mostrada a grande eficiência de diferentes tipos de armaduras no combate à punção e que é possível dobrar a resistência de ligações laje-pilar, em função da quantidade e da disposição destas armaduras.

Nos dias atuais, a utilização do sistema estrutural do tipo laje-pilar tem sido bem frequente, tendo em vista que cada vez mais se conhecem mais detalhes acerca desta concepção estrutural. Da Figura 2.3.7 a Figura 2.3.9 são mostradas algumas imagens de construções atuais encontradas no Distrito Federal. Trata-se de dois complexos de obras e um prédio isolado, sendo o primeiro complexo composto por 04 (quatro) blocos de 06 (seis) pavimentos, o segundo complexo é formado por 12 (doze) prédios de 24 (vinte e quatro) pavimentos e, por fim, um outro prédio em execução em Águas Claras - DF.



Figura 2.3.7 - Obra na Asa Sul de Brasília-DF utilizando sistema estrutural com laje lisa



Figura 2.3.8 - Obra de 10 pavimentos em águas Claras-DF utilizando sistema estrutural com laje lisa



Figura 2.3.9 - Obra de 24 pavimentos em águas Claras-DF utilizando sistema estrutural com laje lisa

2.4. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO

A resistência à punção de lajes lisas de concreto armado é influenciada principalmente pela resistência à tração do concreto, pela taxa de armadura de flexão tracionada, pela geometria do pilar e pelo *size effect*, fator que leva em consideração a altura útil da laje. Outros fatores que influenciam significativamente na resistência à punção de ligações laje-pilar são o uso de armaduras de cisalhamento, condições de carregamento na laje (causando ou não momentos desbalanceados), furos ou descontinuidades na laje e até mesmo a posição do pilar.

De acordo com Melges (1995) existem basicamente três formas de se aumentar a resistência das ligações laje-pilar à punção: utilizando capitéis e/ou pastilhas, aumentando o valor da resistência do concreto, ou, ainda, utilizando armadura de cisalhamento.

A primeira opção geralmente é indesejável do ponto de vista arquitetônico e econômico. Já o aumento da resistência do concreto nem sempre é suficiente para elevar o nível da resistência da ligação aos valores desejados. Assim, o uso de armaduras é o mais indicado, pois, além de elevar a capacidade de carga ao cisalhamento da ligação laje-pilar, fornece-lhe ductilidade.

Em seguida, são tratados cada um desses elementos que influenciam na resistência ao cisalhamento em lajes lisas.

2.4.1. Resistência do concreto à compressão

A resistência da ligação laje pilar está relacionada à resistência do concreto à tração Fusco (1984). Comumente, os projetos estruturais são formulados a partir da resistência à compressão do concreto e as formulações normativas costumam relacionar a resistência à tração do concreto como função de sua resistência à compressão. Deste modo, é comum observar que as pesquisas experimentais correlacionam a resistência ao cisalhamento de lajes lisas de concreto armado com a resistência à compressão do concreto.

Um dos primeiros a tentar avaliar a influência da resistência do concreto na resistência a punção foi Graf (1933), quando o mesmo concluiu que não havia uma relação linear

entre o aumento da capacidade da ligação laje pilar e o aumento da resistência do concreto.

Moe (1961) propôs que a resistência a punção poderia ser expressa com uma função proporcional à raiz quadrada da resistência do concreto, proposição utilizada, até os dias atuais, pelo *ACI (American Concrete Institute)*.

Hallgren (1996), que analisou lajes com concreto de elevada resistência, concluiu em suas pesquisas que relacionar a resistência à punção com uma função proporcional a raiz quadrada da resistência à compressão do concreto tende a superestimar a sua influência.

2.4.2. Taxa de armadura de flexão

A taxa de armadura de flexão tracionada (ρ) é definida com a razão entre a área de armadura de flexão tracionada (A_s) pela área de concreto, que é expressa pelo produto da altura útil da laje (d) por uma largura a ser considerada. Regan (1996) definiu que a largura efetiva a ser considerada, na qual as armaduras de flexão irão contribuir para a resistência a punção, deve ser tomada afastada de $3.d$ das extremidades do pilar.

A taxa de armadura de flexão tracionada influencia a resistência à punção, principalmente nos casos de lajes sem armadura de cisalhamento.

Regan (1981) afirma que o aumento na quantidade de armaduras de flexão tem como efeito o aumento da zona comprimida e, conseqüentemente, na área de concreto não fissurado disponível para resistir ao cisalhamento. Além disso, a espessura das fissuras de flexão é reduzida, o que facilita a transferência de forças através do denominado engrenamento de agregados, podendo ainda aumentar o efeito pino.

2.4.3. Geometria e dimensões do pilar

A geometria e as dimensões dos pilares também afetam a resistência ao cisalhamento de uma laje, pois determinam a forma como as tensões se distribuem na ligação laje-pilar. Com relação ao formato dos pilares, pode-se observar que, para pilares retangulares, há uma concentração de tensões nos cantos, enquanto nos pilares circulares esta distribuição é uniforme, motivo pelo qual as lajes com pilares retangulares apresentam menor resistência que as lajes com pilares circulares (FERREIRA, 2010).

De acordo com Melges (2001) para pilares alongados, onde a relação entre lado maior e lado menor é superior a 2 (dois), a ruína é mais abrupta, o tamanho do cone de punção é menor e a resistência da ligação também é menor, quando comparados com pilares de seções quadradas. Isto também se deve ao fato de que as tensões se concentram nos cantos e nos menores lados do pilar.

2.4.4. Size effect – Efeito de tamanho

De acordo com Fusco (1984) a influência do efeito de tamanho geralmente é dada em função da altura útil da laje. Este efeito refere-se ao fato de que, em igualdade de outras condições, as lajes de menor altura útil são mais resistentes que as lajes mais espessas.

Este fato é, em princípio, justificável pela possibilidade de maior heterogeneidade do concreto das lajes mais espessas. Além disso, mesmo com uma mesma taxa de armadura longitudinal, nas lajes de maior espessura, a armadura de tração é menos eficiente no controle da abertura das fissuras ao longo de toda a altura da seção fissurada. Deste modo, a espessura da peça condiciona o engrenamento dos agregados, fazendo com que a altura útil também seja um fator que controla a resistência das lajes ao cisalhamento. Resultados experimentais mostram, no entanto, que a partir de uma determinada espessura, a influência da variação da altura útil deixa de ser significativa. Essa limitação da influência da espessura a um determinado valor decorre de um efeito de escala entre a altura útil da peça e o diâmetro máximo dos agregados empregados na fabricação do concreto.

2.4.5. Armadura de cisalhamento

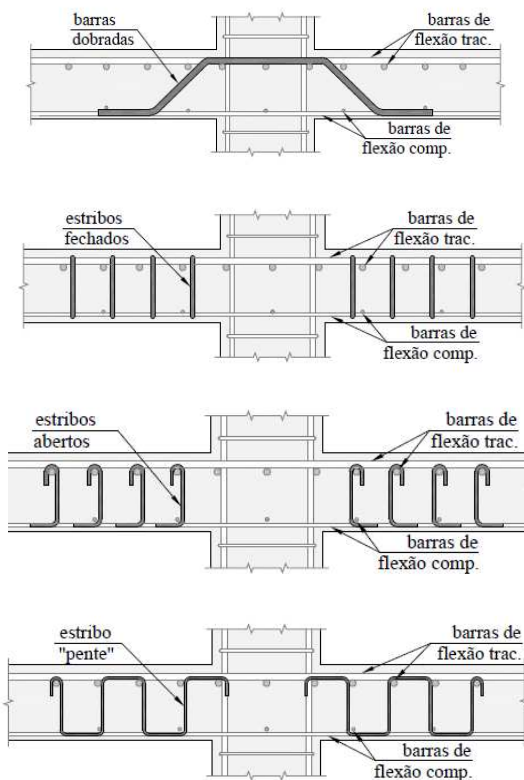
Os esforços de punção podem ser combatidos por armadura transversal colocada na região da ligação da laje com o pilar. Esse pode ser considerado o meio mais eficiente na elevação da resistência à punção.

Para serem consideradas eficientes do ponto de vista técnico, as armaduras de cisalhamento precisam atender aos critérios de ancoragem e praticidade de instalação.

Diversos tipos de armadura de cisalhamento já foram testados quanto à sua eficiência técnica e construtiva. As primeiras armaduras testadas no combate à punção foram barras dobradas (Figura 2.4.1a). Segundo Zambrana Vargas (1997) elas podem ser

bastante eficientes no combate à punção desde que sejam tomados cuidados a fim de evitar a ruptura por punção na região imediatamente posterior às barras dobradas.

Estribos também podem ser utilizados como armadura de cisalhamento em lajes, sendo os tipos mais comuns os estribos fechados (Figura 2.4.1b), estribos abertos (Figura 2.4.1c), estribos tipo “pente” (Figura 2.4.1d) e estribos inclinados (Figura 2.4.1e). Os estribos fechados e estribos do tipo “pente” podem ser de difícil colocação, interferindo na armadura de flexão e na armadura dos pilares, ao passo que estribos abertos com pernas simples tendem a apresentar problemas de ancoragem, mesmo que sejam usadas barras horizontais. Apenas os estribos inclinados mostraram-se eficientes no combate à punção, sendo, no entanto, pouco utilizados por questões construtivas. As armaduras do tipo pino, ilustradas nas Figuras 2.4.1f e 2.4.1g, são também bastante eficientes no combate a punção, sendo o tipo de armadura de cisalhamento mais popular para lajes devido ao fato de serem industrializadas e fornecidas por empresas especializadas, ou seja, não necessitando de serem confeccionadas nos canteiros de obras. Outra vantagem desse tipo de armadura de cisalhamento consiste no fato de ser a mais fácil de garantir o correto espaçamento entre as diferentes camadas de armadura, uma vez que os pinos são fixados em guias de aço.

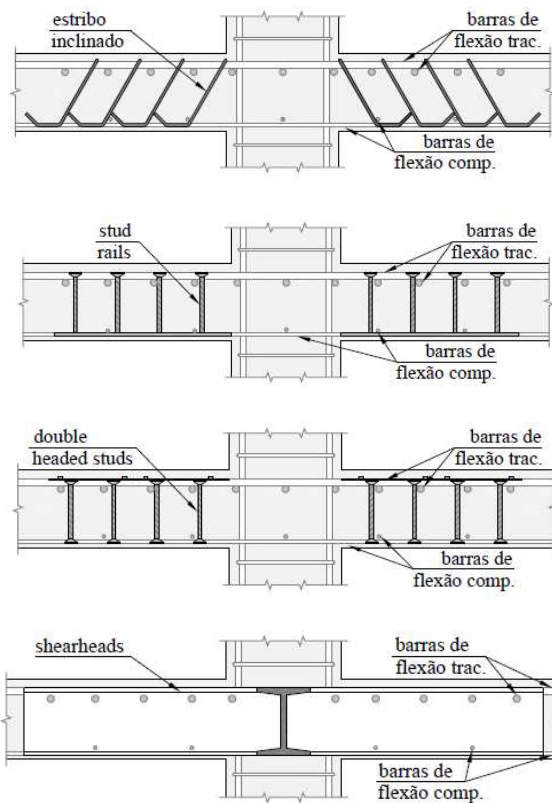


a) Barras dobradas

b) Estribos fechados

c) Estribos abertos

d) Estribo “pente”



e) Estribo inclinado

f) *Single-headed studs on rails*

g) *Double-headed studs*

h) *Shear-heads*

Figura 2.4.1 - Armaduras de cisalhamento do tipo estribos e barra dobrada, adaptada de Ferreira (2010)

Todos os tipos de armadura de cisalhamento acima citadas são comumente utilizados com materiais convencionais, como exemplo o aço. Para o caso deste trabalho, a armadura de cisalhamento em questão se assemelha à do tipo pino, uma vez que seu mecanismo de funcionamento é bastante parecido, no entanto foi empregado para resistir ao cisalhamento tecidos de PRFC, conforme ilustram as Figuras 2.4.2 e 2.4.3.

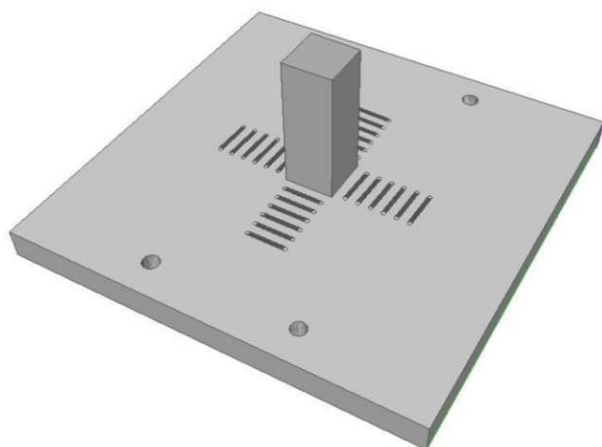


Figura 2.4.2 - Vista 3D de modelo reforçado com PRFC (reprodução da Figura 1.1.5)

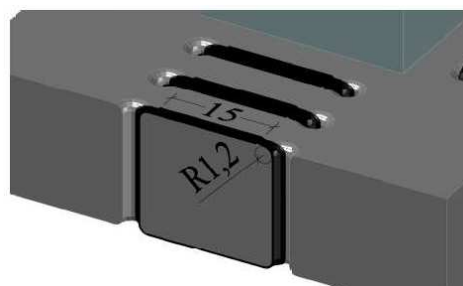


Figura 2.4.3 - Detalhe do reforço (reprodução da Figura 1.1.6)

Além do tipo de armadura de cisalhamento, a quantidade e o arranjo adotado para a distribuição das armaduras influencia a resistência à punção de lajes lisas. De acordo com Ferreira (2010) o arranjo ideal seria o radial (Figura 2.4.4) onde as armaduras de cisalhamento são distribuídas igualmente em torno da superfície de ruptura. 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 2.4.5.

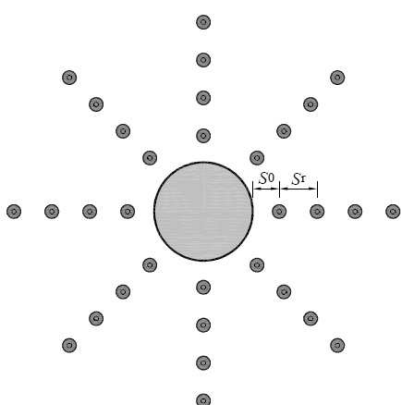


Figura 2.4.4 - Arranjo para a distribuição de armadura de cisalhamento de forma radial (ABNT NBR 6118:2007)

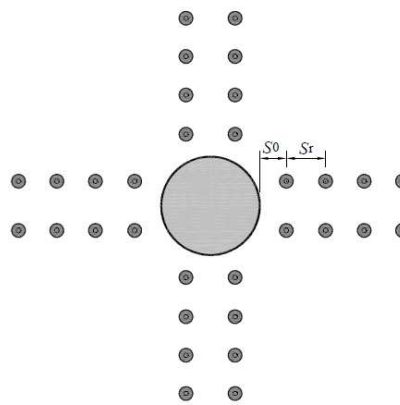


Figura 2.4.5 - Arranjo para a distribuição de armadura de cisalhamento em forma de cruz (ABNT NBR 6118:2007)

Segundo Ferreira (2010) o número de camadas onde as armaduras de cisalhamento serão utilizadas é outro parâmetro que pode influenciar significativamente o desempenho de uma ligação laje-pilar. A correta definição do tamanho da região onde é necessária a utilização de armaduras de cisalhamento é fundamental para evitar rupturas bruscas na parte externa à região armada ao cisalhamento.

Outros parâmetros importantes para a distribuição das armaduras de cisalhamentos são: a distância da primeira camada de armadura de cisalhamento até a face do pilar (S_0) e o espaçamento entre as camadas de armadura de cisalhamento (S_r). Limitações impostas a esses parâmetros são importantes, pois a resistência ao cisalhamento em lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento, rompendo dentro da região das armaduras, depende significativamente do número de barras cruzadas pela superfície de ruptura. No caso da primeira camada (S_0), o EUROCODE 2:2004 recomenda que essa distância seja, no mínimo, igual a $0,3 \cdot d$ e a NBR 6118:2007 recomenda que seu comprimento seja, no máximo, $0,5 \cdot d$. No que se refere ao espaçamento entre as camadas (S_r), estas mesmas normas recomendam uma distância máxima de $0,75 \cdot d$.

2.5. TRABALHOS REALIZADOS

No Brasil, inúmeros são os trabalhos realizados acerca do estudo da punção. O programa de pós-graduação em estruturas e construção civil da Universidade de Brasília tem realizado, com frequência, pesquisas relacionadas ao assunto. Podemos citar, dentre outros, OLIVEIRA (1998 e 2003), TRAUTWEIN (2001), SOUZA (2004 e 2008), BORGES (2004), VILLAVARDE BARBÁN (2008), HONORATO (2008), ALBUQUERQUE (2010), GOMES (2010) e FERREIRA (2010).

No entanto, quando se trata do uso de laminados de PRFC como armadura de cisalhamento, esse estudo se torna bem mais restrito. No Brasil não foi encontrado estudo com abordagens ao tema, de modo que as pesquisas analisadas neste trabalho foram realizadas por pesquisadores internacionais.

2.5.1. Baris Binici e Oguzhan Bayrak (2005)

Binici e Bayrak (2005) fizeram um estudo experimental para analisar o reforço das ligações laje-pilar em lajes lisas utilizando como armadura de cisalhamento estribos de PRFC. Foram produzidos 11 (onze) modelos de laje com dimensões de 2135 mm x 2135 mm x 152 mm. A armadura de flexão foi estimada de forma que a altura efetiva da

laje fosse de 114 mm e a taxa de armadura de flexão foi de 1,76 %. Na Figura 2.5.1 é mostrado o protótipo de ensaio e detalhes da armadura de flexão.

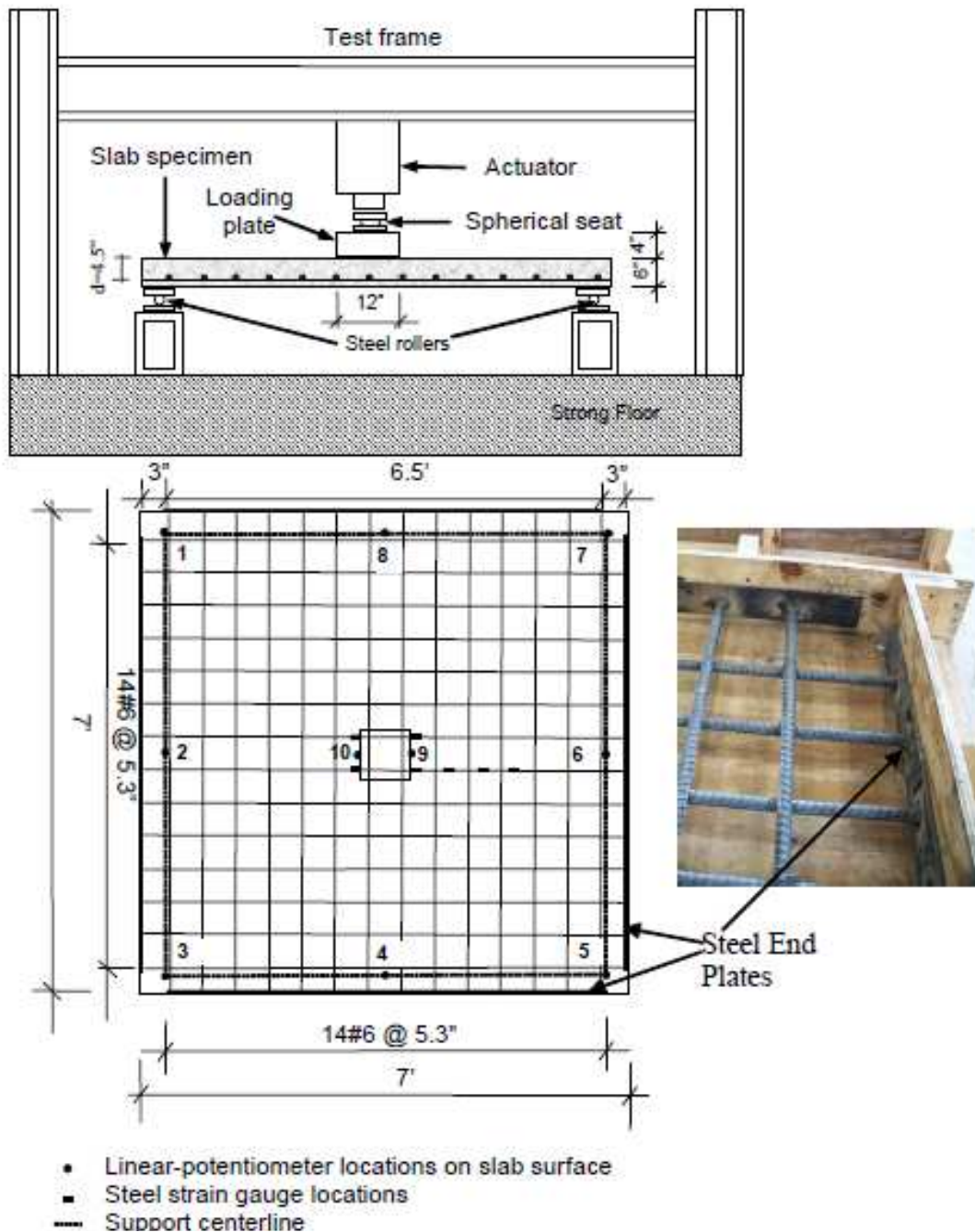


Figura 2.5.1 - Protótipo do ensaio e detalhe da armadura de flexão, (BINICI et al., 2005)

Foram testados 02 (dois) padrões de costuras de reforço para propiciar alternativas diferentes de armadura de cisalhamento. Os modelos do padrão “A” apresentavam a armadura de cisalhamento disposta em forma de cruz, conforme ilustra Figura 2.5.2 e o padrão “B”, que apresenta armadura de cisalhamento distribuída de forma radial, como mostrado na Figura 2.5.3.

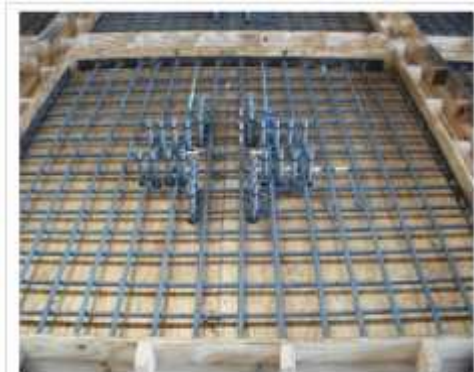


Figura 2.5.2 - Padrão A de distribuição dos furos para reforço de PRFC, BINICI (2005)



Figura 2.5.3 - Padrão B de distribuição dos furos para reforço de PRFC, BINICI (2005)

Uma das variáveis adotadas pelos autores foi o número de perímetros ou camadas de armadura de cisalhamento (4, 6 e 8 perímetros de reforço). Um detalhe da aplicação do reforço de PRFC está mostrado na Figura 2.5.4.

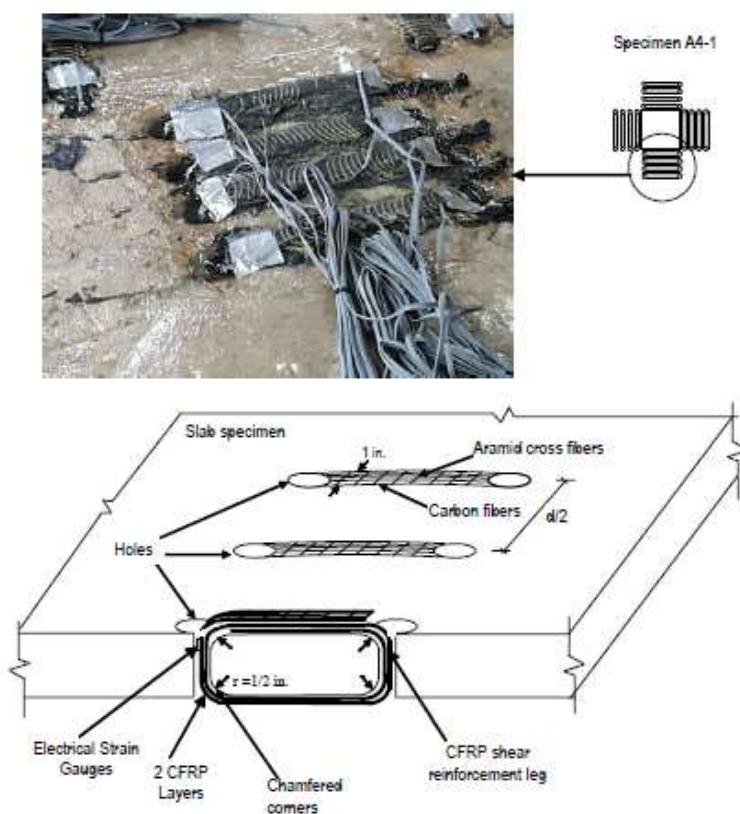


Figura 2.5.4 - Detalhe da aplicação do PRFC (BINICI et al, 2005)

A Tabela 2.1 resume os modelos e as propriedades dos materiais constituintes das lajes ensaiadas por Binici et al (2005).

Tabela 2.1 - Variáveis dos modelos de lajes e propriedade dos materiais

Autores	Ano	Modelos	Dimensão da laje (cm)	Dimensão do pilar (cm)	Tipo de ancoragem	Disposição	d (cm)	f'c (MPa)	Ø furos (mm)	Armadura de Flexão				PRFC
										fy (MPa)	fu (MPa)	As (diâm./Espaç.)	ρ %	
Baris Binici e Oguzhan Bayrak	2005	Control 1	213,5x213,5	30,5x30,5	-	-	11,4	28,3	-	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		Control 2	213,5x213,5	30,5x30,5	-	-	11,4	28,3	-	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		A4-1	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Cruz	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		A4-2	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Cruz	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		A4-3	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Cruz	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		A4-4	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Cruz	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		A6	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Cruz	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		A8	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Cruz	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		B4	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Radial	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
		B6	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Radial	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318
B8	213,5x213,5	30,5x30,5	Stitch	Radial	11,4	28,3	18,0	448	703	Ø 20,0 C/ 13,5	2,04	318		

onde:

d - altura útil da laje;

f'_c - resistência à compressão do concreto;

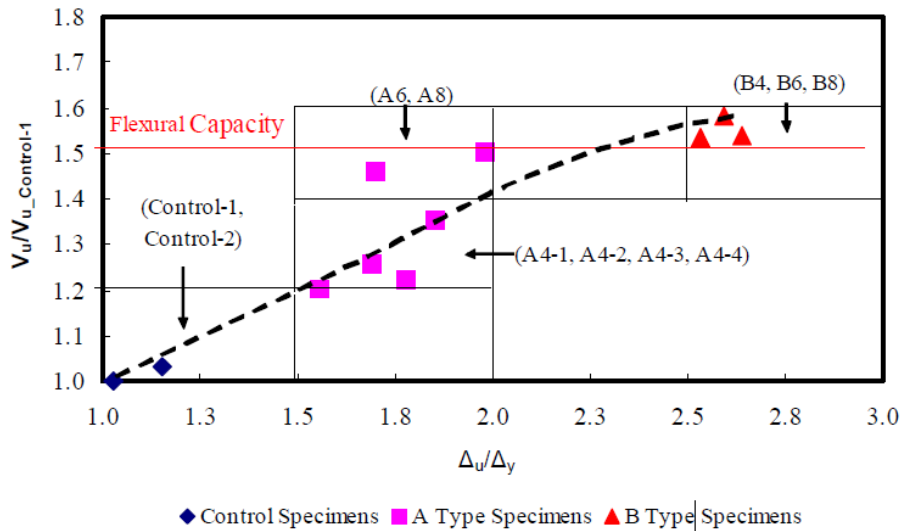
f_{PRF} – Resistência à do PRFC.

f_u - tensão de ruptura da barra

f_y - tensão de escoamento da barra;

ρ - taxa de armadura de flexão tracionada média da laje;

Os autores observaram que, para um mesmo potencial de reforço utilizado (padrão “A” e “B”), a resistência última e a ductilidade foram maiores nos modelos do padrão “B”, conforme Figura 2.5.5.



Δ_u : Central displacement at ultimate load
 Δ_y : Central displacement at first yielding of steel reinforcement

Figura 2.5.5 - Desempenho dos modelos reforçados (BINICI et al, 2005)

Quanto à ruptura, os autores observaram que os modelos A4-3 e A4-4 tiveram a ruptura dentro da área reforçada ao cisalhamento, enquanto os modelos B4, B6 e B8 romperam fora da área reforçada. Na Figura 2.5.6 estão representados alguns modos de ruptura dos modelos ensaiados.

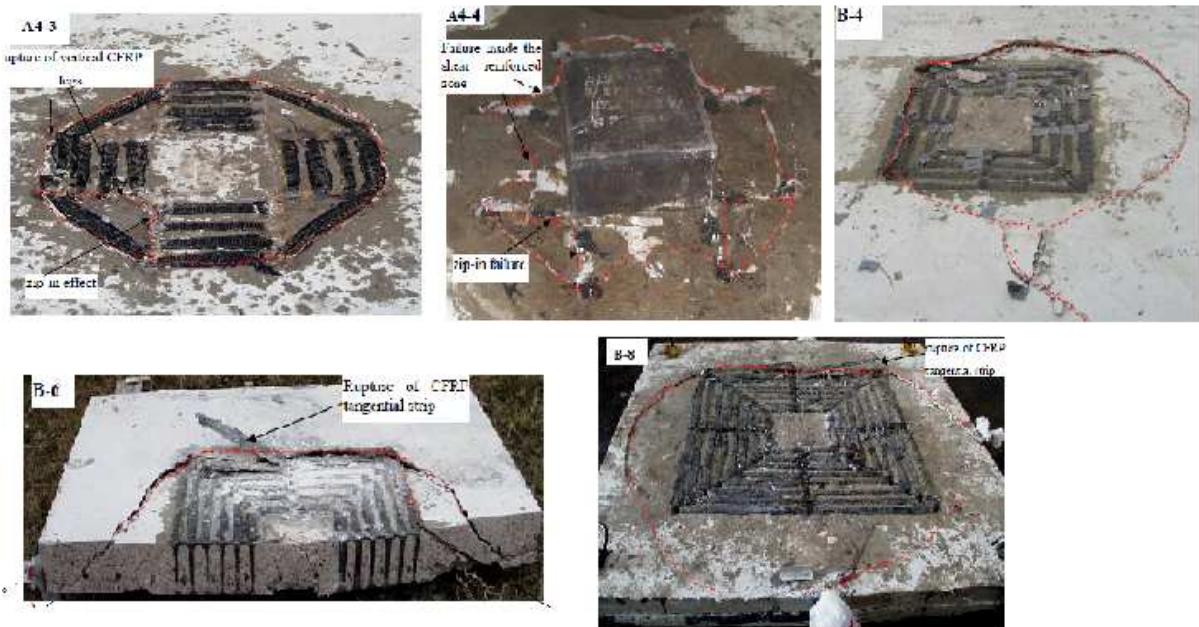


Figura 2.5.6 - Ruptura dos modelos reforçados (BINICI, 2005)

2.5.2. Widiyanto, Y. Tian, J. Argudo, Oguzhan Bayrak, J. O. Jirsa (2006)

Os autores ensaiaram 2 (dois) modelos para analisar a eficiência do reforço ao cisalhamento na região de ligações laje-pilar interno com pilares quadrados, utilizando como armadura de cisalhamento laminados de PRFC. Foram escolhidos 2 (dois) tipos de aplicação do reforço, sendo um do tipo costura (estribo em forma de costura da laje na região de cisalhamento) e o outro do tipo pino (que funciona como pino preenchendo todo o perímetro dos furos e ancorado com “placas” de PRFC cobrindo toda a região do reforço).



Figura 2.5.7 - Modelo de reforço do tipo costura, WIDIANTO (2006)

Tabela 2.2 - Resumo dos resultados experimentais de Windianto, Tian, Argudo, Bayrak, Jirsa (2006).

Specimen Number	Specimen name	Test program	f_c (cylinder) (psi)	% slab top steel within $(c+3h)^*$	punching load, V (kip)	ACI critical shear perimeter, b_o (in)		failure stress at critical perimeter, $v = V/(b_o d)$	shear stress, $v = V/(b_o d)$
1	LRstG0.5	Lateral loading up to 1.25%	4930	0,5	86,5	84**	135****	2,93/ f_c	1,83/ f_c
		Rehabilitated by external CFRP stirrups, then punched							
2	LRshG0.5	Lateral loading up to 1.25%	4630	0,5	97,5	84		3,41/ f_c	
		Rehabilitated by CFRP sheets, then punched							

* $c=16"$ (column dimension of the specimen), $h=6"$ (slab thickness of the specimen)

** $b_o=84"$ was calculated for the critical perimeter $d/2$ away from the column face ($d=5"$).

*** $b_o=148"$ was calculated for the critical perimeter $d/2$ away from the edge of steel collars ($d=5"$).

**** $b_o=135"$ was calculated for the critical perimeter $d/2$ away from the outermost CFRP stirrup ($d=5"$).

Após analisar os resultados, os autores constataram que a instalação dos reforços, tanto do tipo costura quanto pino, resultou em um aumento na resistência ao cisalhamento na ligação laje-pilar, bem como na melhora da capacidade residual pós-puncionamento.

A aplicação de PRFC no modelo costura aumentou a capacidade de deformação da conexão, enquanto que o modelo pino diminuiu essa capacidade de deformação.

2.5.3. Kyriakos Sissakis e Shamim A. Sheikh (2007)

Sissakis e Sheikh (2007) avaliaram 28 (vinte e oito) lajes simplesmente apoiadas em suas 04 (quatro) bordas com carregamento concêntrico aplicado monotonicamente até sua ruptura. Destes modelos, 24 (vinte e quatro) foram reforçados ao cisalhamento com laminados de PRFC.

Todos os modelos de lajes ensaiados possuíam as mesmas dimensões externas (1500 mm X 1500 mm). As barras para as armaduras de flexão utilizadas foram, segundo nomenclatura canadense, 15 M (área transversal de 0,31 in²) e 20M (área transversal de 0,465 in²) o que equivale a 16 mm e 20 mm de diâmetro respectivamente na nomenclatura brasileira de barras de aço. A espessura efetiva do modelo foi de 120 mm (4,75 in). A Figura 2.5.8 mostra o modelo B5 com aplicação da carga, bem como especificação de reforço. A placa de aplicação de carga possui dimensões de 200 mm x 20 mm em planta e altura de 100 mm.

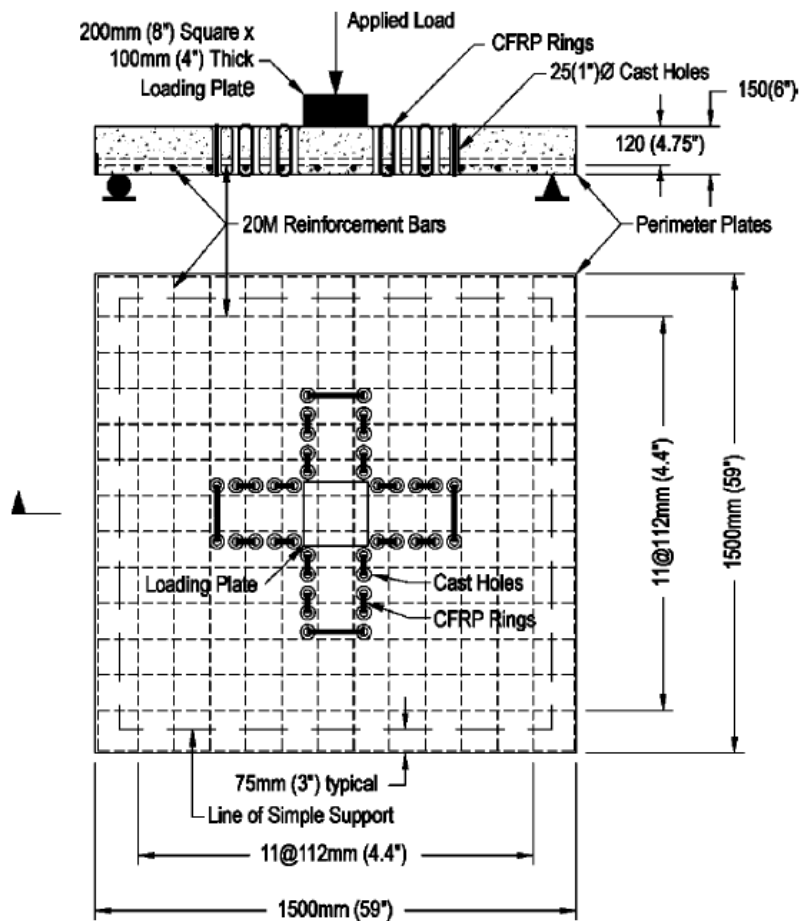


Figura 2.5.8 - Ilustração do modelo B5 (SISSAKIS et al, 2007)

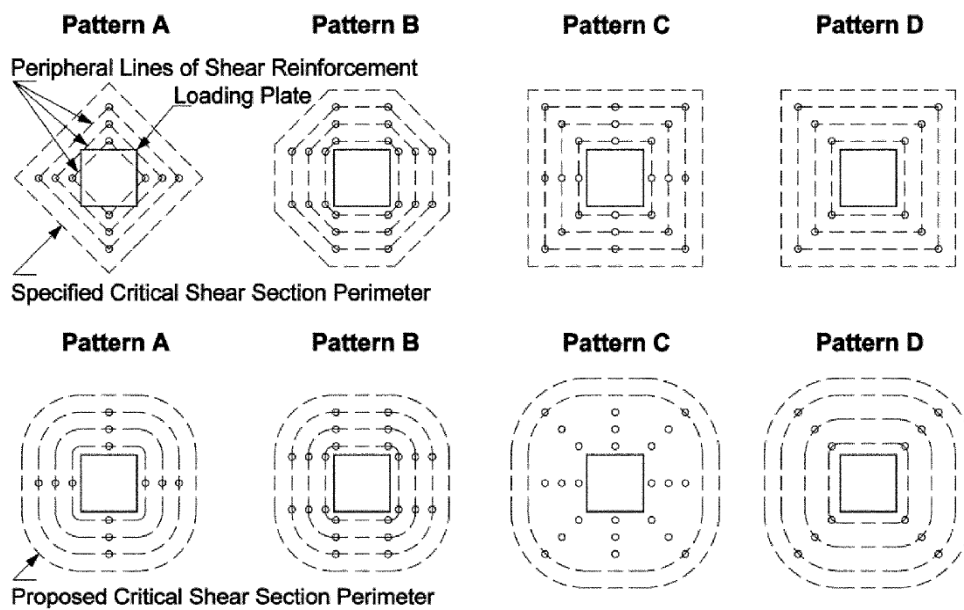


Figura 2.5.9 - Padrões de furo utilizados na confecção dos modelos, SISSAKIS et al (2007)

O número de camadas de armadura de cisalhamento aplicada aos modelos variou entre 3 (três) e 6 (seis). A Figura 2.5.10 mostra o modelo D4 antes e depois da aplicação do reforço de PRFC. A Tabela 2.3 resume os modelos e as propriedades dos materiais constituintes.

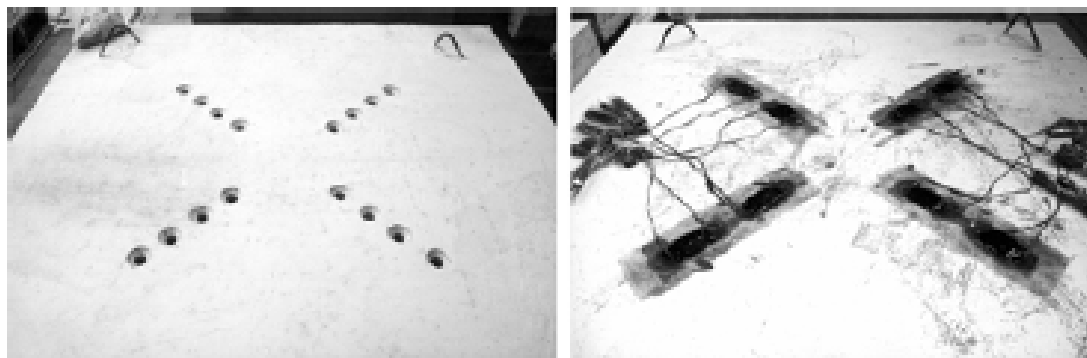


Figura 2.5.10 - Modelo D4 antes e depois da aplicação do PRFC (SISSAKIS et al, 2007)

Tabela 2.3 - Variáveis dos modelos de lajes e propriedade dos materiais (adaptada de SISSAKIS 2007)

Autores	Ano	Modelos	Dimensão da laje (cm)	Dimensão do pilar (cm)	Tipo de ancoragem	Disposição	d (cm)	f' _c (MPa)	Ø furos (mm)	Armadura de Flexão				PRFC
										f _y (MPa)	f _u (MPa)	A _s (diâm./Espaç.)	ρ %	
Kyriakos Sissakis e Shamim A. Sheikh	2007	Control 1	150x150	20x20	-	-	12	42,6	-	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		A ₄ '	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	42,6	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		Control 2	150x150	20x20	-	-	12	36,1	-	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		A ₃ '	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	36,1	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		B ₃ '	150x150	20x20	Stitch	Cruz	12	36,1	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		B ₄ '	150x150	20x20	Stitch	Cruz	12	36,1	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		C ₃ '	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	36,1	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		C ₄ '	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	36,1	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		D ₃ '	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	36,1	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		D ₄ '	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	36,1	25,0	428	730	Ø 16,0 C/ 11,2	1,50	290
		Control 3	150x150	20x20	-	-	12	34,5	-	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		A ₃	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		A ₅	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		B ₃	150x150	20x20	Stitch	Cruz	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		B ₅	150x150	20x20	Stitch	Cruz	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		C ₃	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		C ₅	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		D ₃	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		D ₅	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	34,5	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		Control 4	150x150	20x20	-	-	12	26,6	-	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		A4	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		A6	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		B4	150x150	20x20	Stitch	Cruz	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		B6	150x150	20x20	Stitch	Cruz	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		C4	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		C6	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		D4	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290
		D6	150x150	20x20	Stitch	Radial	12	26,6	25,0	480	623	Ø 20,0 C/ 11,2	2,34	290

Os resultados experimentais estão resumidos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4- Resumo dos resultados experimentais (adaptada de SISSAKIS (2007))

Specimen	Test results		Ultimate Analysis									Failure within shear reinforcement (Y/N)
	U_{50} kJ	P_{TEST} kN	$\frac{P_{TEST}}{b_0 d \sqrt{f_c}}$ (MPa)	$\frac{P_{TEST}}{b d \sqrt{f_c}}$ (MPa)	$\frac{P_{TEST}}{b_0 d \sqrt{f_c} \phi_0}$ (MPa)	$\frac{P_{TEST}}{b d \sqrt{f_c} \phi_0}$ (MPa)	$\frac{P_{TEST}}{P_V}$	$\frac{P_{TEST}}{P_V}$	$\frac{P_{TEST}}{P_V}$	$\frac{U_{50}}{(CONT)}$	$\frac{P_{TEST}}{P_{CONT}}$	
Control 1	4,00	575,00	0,57	0,57	0,41	0,41	0,90	1,74	1,25	—	—	—
Control 2	2,10	439,00	0,48	0,48	0,33	0,33	0,70	1,44	1,00	—	—	—
Control 3	1,80	476,00	0,53	0,53	0,31	0,31	0,49	1,60	0,89	—	—	—
Control 4	1,90	479,00	0,60	0,60	0,34	0,34	0,53	1,83	0,99	—	—	—
Average			—	0,55	—	0,35	—	1,65	1,03	—	—	—
Standart deviation			—	0,06	—	0,04	—	0,17	0,15	—	—	—
A ₃ '	5,30	591,00	0,64	0,37	0,44	0,25	0,94	2,20	1,37	2,52	1,35	N
A ₄ '	5,90	632,00	0,63	0,36	0,45	0,26	0,99	2,16	1,39	1,48	1,10	N
A ₃	4,00	646,00	0,72	0,48	0,42	0,27	0,67	2,90	1,44	2,22	1,36	Y
A ₄ '	4,60	595,00	0,75	0,43	0,42	0,23	0,66	2,58	1,24	2,42	1,24	Y
A ₅	6,40	671,00	0,74	0,37	0,43	0,21	0,69	2,22	1,10	3,56	1,41	N
A ₄	5,30	631,00	0,80	0,35	0,44	0,19	0,70	2,10	1,01	2,79	1,32	Y
Average			—	0,39	—	0,23	—	2,36	1,26	—	—	—
Standart deviation			—	0,05	—	0,03	—	0,31	0,17	—	—	—
B ₃ '	6,40	659,00	0,71	0,39	0,49	0,27	1,05	2,32	1,52	3,05	1,50	Y
B ₄ '	5,00	638,00	0,69	0,38	0,48	0,26	1,02	2,25	1,47	2,38	1,45	N
B ₃	5,50	744,00	0,82	0,52	0,48	0,29	0,77	3,13	1,66	3,06	1,56	N
B ₄	5,10	701,00	0,88	0,48	0,49	0,26	0,78	2,88	1,46	2,68	1,46	N
B ₅	10,50	791,00	0,88	0,42	0,51	0,23	0,82	2,49	1,30	5,83	1,66	N
B ₄	14,10	791,00	1,00	0,42	0,56	0,23	0,88	2,52	1,27	7,79	1,65	N
Average			—	0,43	—	0,26	—	2,60	1,45	—	—	—
Standart deviation			—	0,06	—	0,02	—	0,34	0,14	—	—	—
C ₃ '	5,80	612,00	0,66	0,29	0,46	0,20	0,98	1,72	1,16	2,76	1,39	Y
C ₄ '	7,30	673,00	0,73	0,32	0,51	0,22	1,08	1,89	1,28	3,48	1,53	N
C ₃	5,80	775,00	0,86	0,44	0,50	0,25	0,80	2,65	1,46	3,22	1,63	N
C ₄	7,60	781,00	0,99	0,43	0,55	0,23	0,87	2,55	1,34	4,00	1,63	N
C ₅	9,90	858,00	0,95	0,35	0,55	0,20	0,89	2,12	1,13	5,50	1,80	Y
C ₄	16,50	872,00	1,10	0,36	0,61	0,19	0,97	2,15	1,11	8,68	1,82	N
Average			—	0,36	—	0,21	—	2,18	1,24	—	—	—
Standart deviation			—	0,06	—	0,02	—	0,37	0,14	—	—	—
D ₃ '	3,10	550,00	0,60	0,26	0,41	0,18	0,88	1,54	1,04	1,48	1,25	Y
D ₄ '	5,50	605,00	0,66	0,28	0,45	0,20	0,97	1,70	1,15	2,62	1,38	Y
D ₃	4,10	616,00	0,68	0,35	0,40	0,20	0,64	2,11	1,16	2,28	1,29	Y
D ₄	4,10	634,00	0,80	0,35	0,45	0,19	0,70	2,07	1,09	2,16	1,32	Y
D ₅	4,40	617,00	0,68	0,25	0,40	0,14	0,64	1,52	0,81	2,44	1,30	Y

Os modelos de lajes reforçados com laminados de PRFC apresentaram um aumento substancial na resistência mecânica e na ductilidade. O aumento na força de cisalhamento chegou a 80%, enquanto a ductilidade teve um aumento em torno de 700%.

O aumento tanto na ductilidade quanto na resistência ao cisalhamento fica cada vez mais evidente com o aumento no número de camadas de armaduras de cisalhamento.

Dentro de um mesmo grupo de modelos de lajes, com o mesmo número de camadas de reforço, ou seja, armadura de cisalhamento, o maior espaçamento entre dois perímetros consecutivos de armaduras de cisalhamento não apresentou divergências quanto a força cisalhante ou ductilidade, mas causou um maior grau de fissuração do concreto e aumentou a probabilidade de falhas de cisalhamento dentro da zona reforçada com a armadura de cisalhamento.

2.5.4. H. Erdogan, B. Binici E G. Ozcebe (2010)

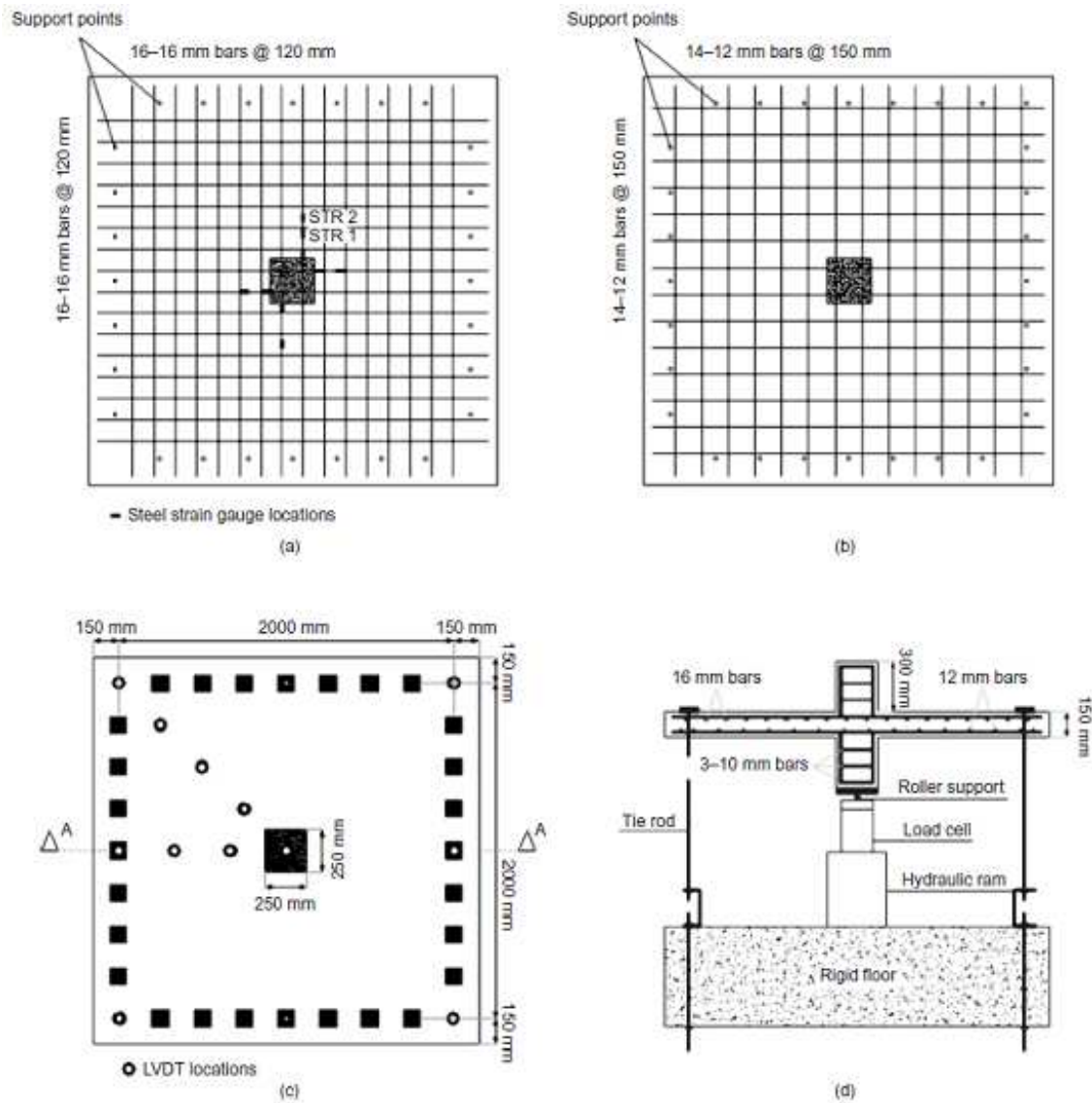
Os autores confeccionaram 7 (Sete) modelos de ligação laje-pilar interno de um pavimento de modo a simular o comportamento de uma estrutura de concreto armado sob forças de cisalhamento. Duas das sete amostras foram destinadas para controle. Estas amostras foram testadas sem qualquer intervenção de reforço. Os cinco modelos restantes foram reforçados com diferentes quantidades e padrões de pinos de PRFC. A ancoragem dos pinos de PRFC foi feita com a colagem de mantas de PRFC na superfície das lajes. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto, bem como as propriedades mecânicas das ferragens e do PRFC estão resumidas nas Tabela 2.5 e Tabela 2.6 respectivamente.

Tabela 2.5 - Detalhe e descrição dos modelos (adaptada de Erdogan et al.(2010))

Specimen	Concrete strength (Mpa)	CFRP dowel arrangement pattern	Number of CFRP dowels	Description
CS 1	35	-	-	Control specimen with one column stub
CS 2	32	-	-	Control specimen with two column stubs
IP3	33	Orthogonal	24	Three perimeters of CFRP dowels around the column stub
IP4	26	Orthogonal	32	Four perimeters of CFRP dowels around the column stub
IP5	31	Orthogonal	40	Five perimeters of CFRP dowels around the column stub
CWOS	31	Circular	28	CFRP dowels on circular paths without CFRP patches
CWS	30	Circular	28	CFRP dowels on circular paths with CFRP patches

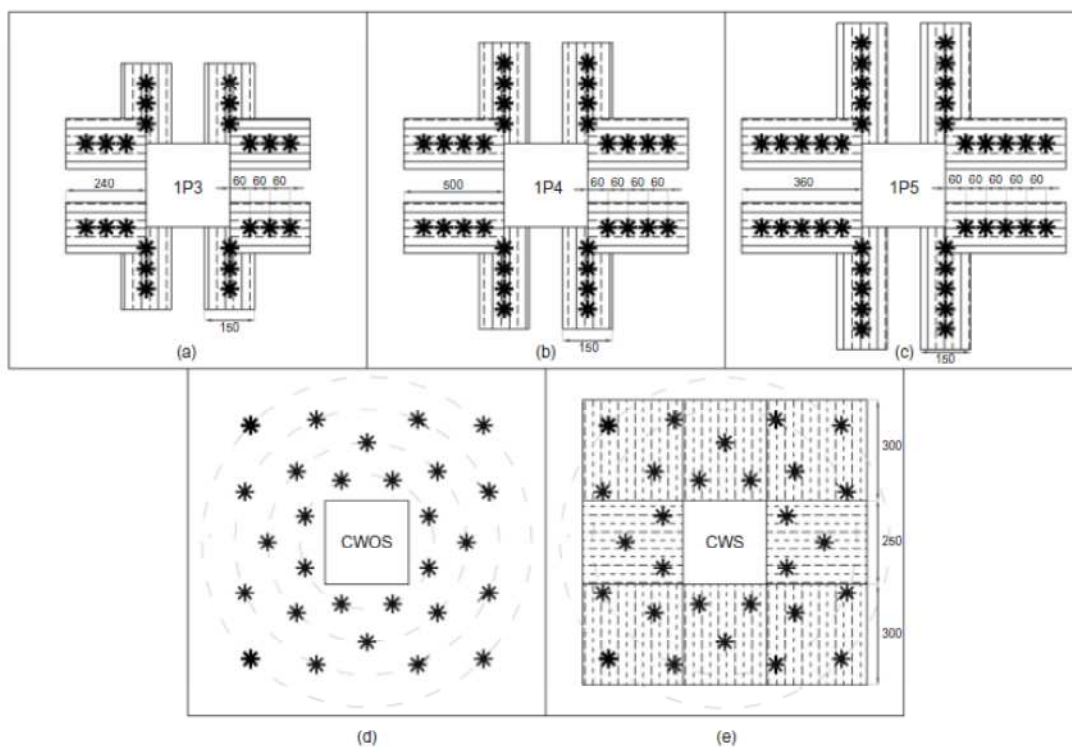
Tabela 2.6 - Propriedade dos materiais (adaptada de Erdogan et al. (2010))

Material	Elasticity modulus: Mpa	Yield stress: Mpa	Yield strain:	Ultimate tensile stress: Mpa	Ultimate tensile strain
10 mm steel bars	195000	430	0,0022	624	0,21
12 mm steel bars	195000	426	0,0022	661	0,19
16 mm steel bars	195000	448	0,0023	692	0,21
CFRP	230000	-	-	3450	0,015
Epoxy	3000	-	-	50	0,025
CFRP+Epoxy (composite)	72400	-	-	637	0,0088



a) Armadura de flexão b) Armadura de compressão c) Vista superior d) Corte A-A

Figura 2.5.11 - Detalhes de modelo típico, instrumentação e armadura de flexão, (adaptada de Erdogan et al. (2010))



: a) 24; b) 32; c) 40; d) 28; e) 28 pinos de PRFC

Figura 2.5.12 - Modelos reforçados com N° pinos de PRFC, (adaptada de Erdogan et al. (2010))

Um resumo dos resultados encontrados pelos autores estar ilustrado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Resumo dos resultados, (adaptada de Erdogan et al. (2010))

specimen	Failure load V_u : KN	V_{su} :KN	D_u : mm	V_{su} : KN	D_u : mm	V_{flex} : KN	V_{su}/V_{flex}	V_{sup} : KN	% increase in V_{su} w.r.t CS2	% increase in D_u w.r.t CS2	% increase in V_{sup} w.r.t CS2	Failure mode and location
CS 1	458	424	12,9	73	0,6	582	0,73	154	-	-	-	punching
CS 2	500	484	17,5	66	0,5	582	0,83	169	-	-	-	punching
1P3	601	573	35,5	93	0,8	582	0,98	270	18,4	102,9	59,8	punching and outside
1P4	571	614	35,9	69	0,8	582	1,05	398	27	105,1	135,5	punching and outside
1P5	657	646	49,1	114	0,9	582	1,11	398	33,4	180,6	135,5	punching flexure and outside
CWOS	594	585	34,2	57	0,6	582	1,01	267	20,9	95,4	58	punching and inside
CWS	592	592	31,8	98	0,8	582	1,02	230	22,3	81,7	36	punching and inside

Tabela 2.8 - Comparação das prescrições normativas, (adaptada de Erdogan et al. (2010))

Specimen	Test Results		ACI 318-05 predications			EUROCODE 2:2004 predications			BS 8110-97 predications			Comparasion		
	V _u : KN	Failure location	V _o : KN	V _i : KN	Failure location	V _o : KN	V _i : KN	Failure location	V _o : KN	V _i : KN	Failure location	V _{ACI} /V _{test}	V _{EC2} /V _{test}	V _{BS} /V _{test}
CS1	458	-	327	-	-	426	-	-	393	-	-	0,71	0,93	0,86
CS2	500	-	313	-	-	413	-	-	381	-	-	0,63	0,83	0,76
1P3	601	outside	504	581	outside	550	947	Outside	486	808	outside	0,84	0,91	0,81
1P4	571	outside	481	564	outside	561	923	Outside	500	778	outside	0,84	0,98	0,88
1P5	657	outside	561	577	outside	652	940	Outside	584	800	outside	0,85	0,99	0,89
CWOS	594	inside	598	346	inside	680	578	Inside	695	595	inside	0,58	0,97	1,00
CWS	592	inside	589	342	inside	672	574	Inside	687	590	inside	0,58	0,97	1,00
									Mean			0,71	0,97	0,88
									Standard deviation			0,12	0,05	0,08

Após a análise dos resultados, os autores chegaram a algumas conclusões. São elas:

a) O valor da carga máxima e o valor dos deslocamentos na carga de ruptura foram aumentados para até 1,33 e 2,80 vezes, respectivamente. A ruptura de natureza frágil passou a ser do tipo moderadamente frágil, comparada com os modelos de controle.

b) a disposição dos “pinos” de PRFC, bem como o espaçamento entre as camadas de reforço ao redor do pilar influenciaram no modo de ruptura dos modelos reforçados. Os modelos 1P3, 1P4 e 1P5, que apresentaram distribuição do tipo em cruz, romperam fora da região reforçada, enquanto que os modelos CWOS e CWS, com distribuição radial, romperam dentro da região reforçada.

c) A capacidade de carga de pós-puncionamento dos modelos reforçados foi de até 2,4 vezes a capacidade de carga de pós-puncionamento dos modelos não reforçados. Verificou-se que, mesmo após a ruptura por cisalhamento, os modelos reforçados foram capazes de manter até 80% de sua capacidade de carga não reforçada. Os autores indicaram que essa característica indica uma boa alternativa para se evitar o colapso progressivo.

Ainda de acordo com os autores, as prescrições do ACI 318:2005 fornecem estimativas seguras para a capacidade de carga dos modelos reforçados. EUROCODE 2:2004 e BS 8110:1997, apresentam valores de estimativas com menor dispersão e uma melhor média para os valores de capacidade de carga.

Em função dos testes realizados, os autores concluíram que pedaços de PRFC colados na superfície dos modelos não apresentaram contribuições significativas quanto ao comportamento na ruptura por cisalhamento. Os modelos CWOS (sem tampas de PRFC) e CWS (com tampas de PRFC) são idênticos e apresentaram resultados semelhantes quando ensaiados.

2.6. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

2.6.1. Considerações gerais

O cálculo ou verificação da capacidade de carga de lajes lisas de concreto armado ao puncionamento, utilizando PRFC como armadura de cisalhamento, não é abordado em nenhuma instrução normativa. No entanto, a presente pesquisa se propõe a uma adaptação, tanto nas recomendações constantes na norma brasileira – ABNT NBR 6118:2007, quanto nas principais prescrições normativas internacionais – ACI 318:2008 e EUROCODE 2:2004- para o estudo de punção em lajes lisas de concreto armado. Tal adaptação se justifica e, ao mesmo tempo, se adéqua aos modelos analíticos tratados nos códigos normativos acima tratados em virtude do comportamento do material utilizado como reforço ao cisalhamento que se assemelha ao de pinos de aço.

2.6.2. Recomendações do ACI 440 2R:02 - *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*

O ACI 440.2R (2008) – *Design of Externally Bonded FRP Systems For Strengthening Concrete Structures* fornece orientação para a seleção, projeto e instalação de sistemas de PRF colados externamente para o reforço das estruturas de concreto. São apresentadas informações sobre as propriedades dos materiais, projeto, instalação, controle de qualidade e manutenção de sistemas de PRF. Estas informações podem ser usadas para selecionar um sistema de PRF para aumentar a resistência e a rigidez das vigas de concreto armado ou a ductilidade das colunas, além de outras aplicações.

As prescrições de projeto dadas por esta norma são o resultado de pesquisas realizadas principalmente em modelos de tamanho moderado.

Orientações sobre o cálculo do reforço ao cisalhamento devido ao efeito da utilização de laminados de PRF como armadura de cisalhamento em estruturas de concreto armado estão especificadas no ACI 440 2R e devem ser observadas. O ganho na resistência ao cisalhamento fornecido pela utilização de laminados de PRF é baseado em diversos fatores, onde podemos destacar: a geometria das peças e a resistência do concreto. No entanto, esse ganho deve ser limitado conforme especificações desta norma.

A resistência ao cisalhamento nominal de um elemento estrutural reforçado com laminados de PRF é determinada pela somatória das contribuições do reforço de PRF, do aço e do concreto, conforme equação 01.

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + V_{FRP}) \quad (01)$$

O processo de fixação mecânica deve ser executado de modo a desenvolver uma maior força de tração (Khalifa et al. 1999). A eficácia de tais fixações mecânicas, juntamente com o nível de tensão de tração, deve ser comprovada através de testes físicos representativos.

Com o intuito de se manter a integridade do concreto por ele confinado, esta norma limita a deformação final do PRF em 0,004. A abertura da fissura se torna muito grande para deformações específicas muito altas, e o efeito de engrenamento de agregados pode ser perdido, diminuindo significativamente a resistência do concreto ao esforço cortante. O fato de haver esta limitação da deformação última do reforço condiciona a tensão máxima no PRF de acordo com a equação 02 descrita a baixo.

$$f_{PRF} = 0,004 \cdot E_{PRF} \quad (02)$$

onde:

f_{PRF} é a tensão do PRF

E_{PRF} é o módulo de elasticidade do PRF

2.6.3. ACI 318R:08 - *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*

De acordo com o ACI 318:2008, a resistência ao punção em lajes lisas de concreto armado com pilares internos quadrados e carregamento centrado, deve ser analisada com a verificação das tensões cisalhantes em um perímetro de controle afastado $d/2$ da face do pilar ou das extremidades da área carregada, conforme Figura 2.6.1.

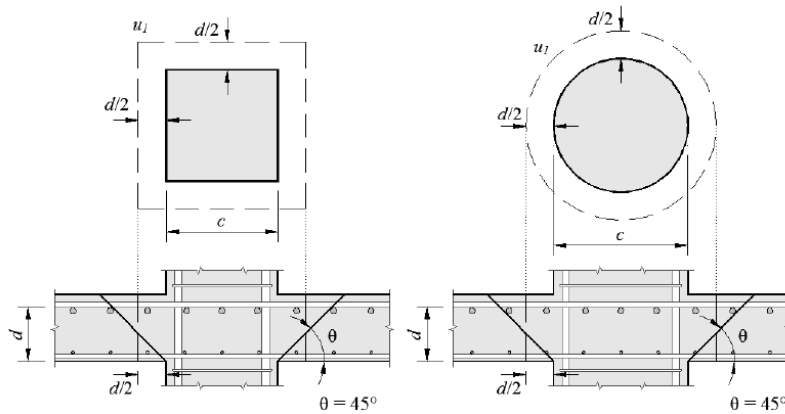


Figura 2.6.1 - Verificação da resistência à punção (ACI 318:08)

A resistência à punção de uma laje sem armaduras de cisalhamento é expressa pela equação 03, a partir do valor mínimo obtido.

$$V_{R,C} = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \\ \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{u_1} + 2\right) \cdot \frac{1}{12} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \\ \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \end{array} \right. \quad (03)$$

sendo:

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

α_s α_s é uma constante que assume valor igual a 40 para o caso de pilares internos ;

f'_c a resistência à compressão do concreto, e é limitada em no máximo 69 MPa;

u_1 é o comprimento de um perímetro de controle à $d/2$ da face do pilar;

d é a altura útil da laje;

Para lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento, esta norma recomenda a verificação de três possíveis modos de ruptura: superfície de ruptura cortando as armaduras de cisalhamento ($V_{R,cs}$); superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$); e ruptura por esmagamento da biela comprimida nas proximidades do pilar ($V_{R,max}$), detalhados conforme Figura 2.6.2.

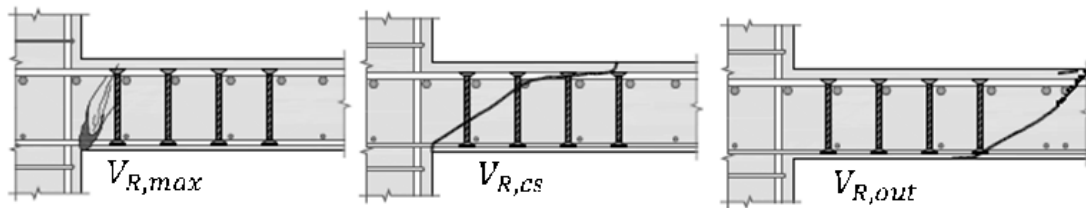


Figura 2.6.2 - Modos de rupturas (ACI 318:08)

$V_{R,cs}$ → Superfície de ruptura cortando as armaduras de cisalhamento;

$V_{R,out}$ → Superfície passando fora da região reforçada;

$V_{R,max}$ → Ruptura por esmagamento da biela comprimida do concreto nas proximidades do pilar.

$$V_{R,CS} = V_{R,C} + V_{R,S} \quad (04)$$

$$V_{R,CS} = \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d \right) + \left(\frac{d}{S_r} \cdot A_{PRFC} \cdot f_{y,PRFC} \right) \quad (05)$$

$$V_{R,out} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad (06)$$

$$V_{R,max} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{Se } S_r \leq 0,5 \cdot d \end{cases} \quad (07)$$

$$V_{R,max} = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot u_1 \cdot d & \text{Se } 0,5 \cdot d < S_r < 0,75 \cdot d \end{cases} \quad (08)$$

onde:

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

S_r é a distância entre camadas, ressaltando que d/s_r deve ser menor ou igual ao número total de camadas de armaduras de cisalhamento;

$f_{y,PRFC}$ é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, limitada pelo ACI 440 em 290MPa, devido a deformação última do PRFC $\leq 4\%$;

u_{out} é o perímetro externo definido à uma distância $d/2$ da camada mais externa de armaduras, conforme indicado na Figura 2.6.3.

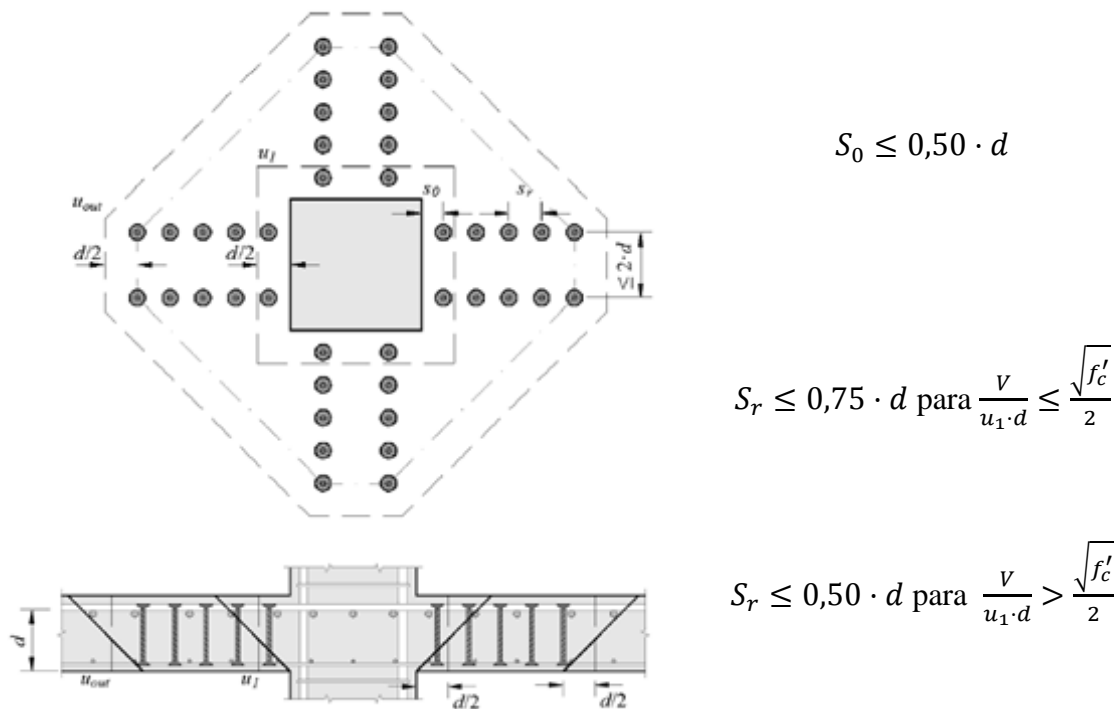


Figura 2.6.3 - Detalhes para distribuição da armadura de cisalhamento (ACI 318:08)

2.6.4. EUROCODE 2:2004 - Design of concrete structures

O *Eurocode 2* (2004) recomenda que a verificação da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento deve ser feita em um perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar ou área carregada, conforme indicado na Figura 2.6.4. Já a estimativa da resistência à punção de uma laje desse tipo pode ser feita utilizando-se a Equação 09.

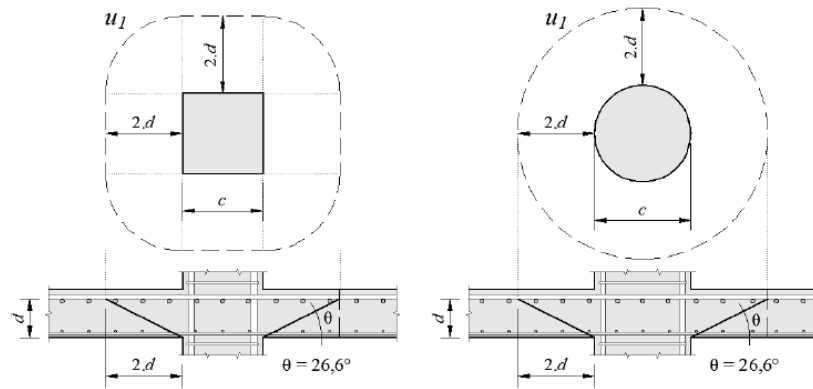


Figura 2.6.4 - Verificação da resistência a punção (EC 2:2004)

A quantificação dessa resistência ao puncionamento nesse tipo de conexão laje pilar sem armadura de cisalhamento é feita pela equação 09.

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f'_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad (09)$$

Sendo:

d → a altura efetiva da laje;

f'_c → é a resistência à compressão do concreto, que segundo o *Eurocode 2:2004* deve ser menor que 90 MPa, porém respeitando-se os limites estabelecidos pelos anexos de cada país membro da comunidade europeia;

ρ → é a taxa de armadura de flexão média da laje. $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$, onde ρ_x e ρ_y são a taxa de armadura de flexão na direção x e y, respectivamente. As barras consideradas no cálculo devem está em uma região afastada 3.d da face do pilar;

ξ → é o Size effect, assumido como $\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ (d em mm);

u_1 → é o comprimento do perímetro de controle afastado 2.d da face do pilar.

Nos casos de lajes com armaduras de cisalhamento, esta norma também recomenda a verificação de três possíveis modos de ruptura. O primeiro trata rupturas por cisalhamento dentro da região das armaduras e considera a resistência máxima devido à combinação das armaduras de cisalhamento e do concreto ($V_{R,cs}$ expresso pela Equação 10). O segundo refere-se à ruptura ocorrendo fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$ calculado segundo a Equação 11). Por fim, ainda recomenda a

verificação da resistência da biela comprimida próxima das extremidades do pilar ($V_{R,max}$ obtido pela Equação 12)

A Figura 2.6.5 apresenta alguns detalhes típicos recomendados por esta norma quando da utilização de armaduras de cisalhamento, podendo-se observar também alguns detalhes necessários para a definição do perímetro de controle externo às armaduras de cisalhamento (u_{out} e $u_{out,ef}$).

$$V_{R,CS} = 0,75 \cdot V_{R,C} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot A_{PRFC} \cdot f_{yPRFC,ef} \right) \quad (10)$$

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f'_c)^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \quad (11)$$

$$V_{R,max} = 0,3 \cdot f'_c \cdot \left(1 - \frac{f'_c}{250} \right) \cdot u_0 \cdot d \quad (12)$$

Sendo:

u_0 → é o perímetro do pilar ou área carregada;

u_1 → é o perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar ou área carregada;

u_{out} → é o comprimento do perímetro de controle afastado à $1,5 \cdot d$ da camada mais externa de armaduras de cisalhamento, respeitando-se um limite de $2 \cdot d$ para a distância máxima entre duas linhas concêntricas de *studs* concêntricos. No caso deste limite não ser atendido, deve ser utilizado o perímetro de controle externo efetivo ($u_{out,ef}$) conforme indicado na Figura 2.6.5.

S_r → é a distância entre camadas de armaduras de cisalhamento;

A_{PRFC} → é a área de armadura de cisalhamento por camada de reforço;

$f_{yPRFC,ef}$ → é a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, que deve ser calculado como $f_{yw,ef} = 1,15 \cdot (250 + 0,25 \cdot d) \leq f_{y,PRFC}$, dado em N/mm² e com d em mm.

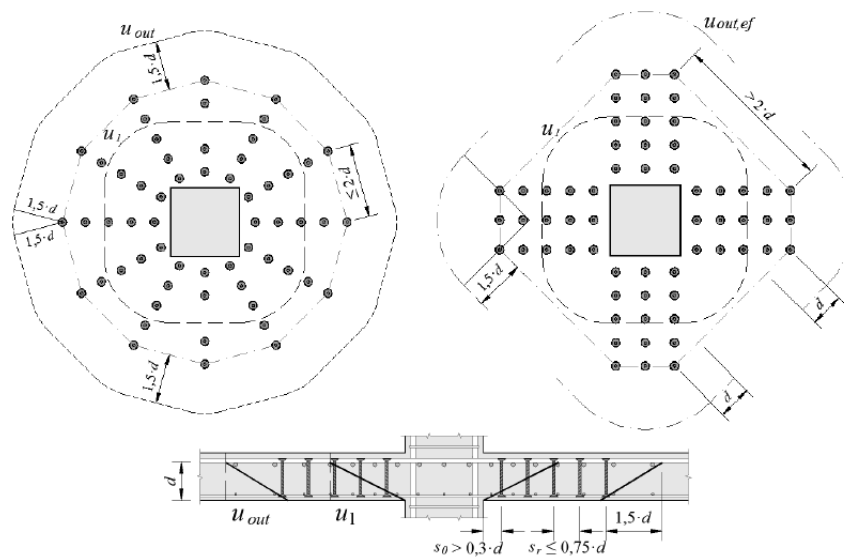


Figura 2.6.5 - Detalhes para distribuição da armadura de cisalhamento (EC 2:2004)

2.6.5. ABRT NBR 6118:2007 -Projeto de estruturas de concreto – Procedimento

O modelo analítico para verificação da resistência ao cisalhamento adotado pela norma brasileira é semelhante ao do *Eurocode 2* (2004). A resistência à punção da laje também deve ser avaliada nos perímetros de controle: u_0 , para a verificação indireta da resistência à compressão da biela próxima ao pilar; u_1 , para a verificação da resistência à tração diagonal; e u_{out} , apenas nos casos de lajes com armaduras de cisalhamento. A fim de não tornar essa seção muito repetitiva, esclareceremos aqui apenas as diferenças adotadas pela norma brasileira.

O *size effect*, calculado pela expressão $\xi = 1 + \sqrt{(200/d)}$ ($\xi = 1 + \sqrt{(200/d)}$ (d em mm), pode assumir valores superiores a 2,0.

A taxa de armadura a flexão pode assumir valor superior 2%.

No caso de $u_{out,ef}$, a geometria é a mesma adotada no *Eurocode 2* (2004), mas este perímetro também deve estar afastado à $2 \cdot d$ da última camada de armaduras e não $1,5 \cdot d$, como na norma anterior. Esses detalhes, bem como os espaçamentos para as armaduras são apresentados na Figura 2.6.6.

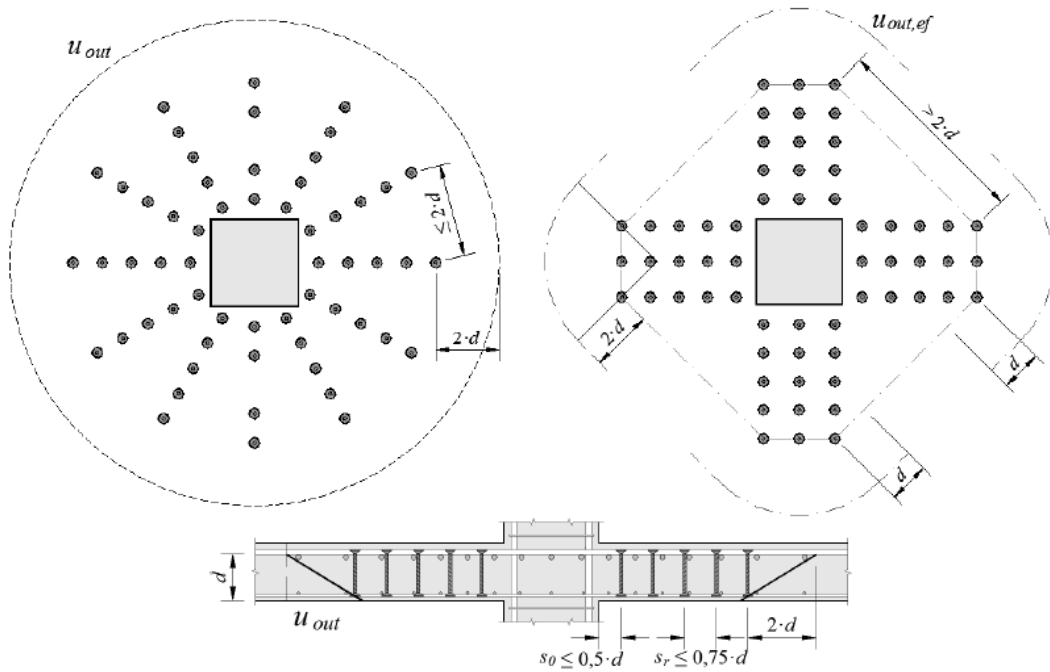


Figura 2.6.6 - Detalhes típicos para arranjos com *studs* (ABNT NBR 6118:2007).

2.6.6. Determinação da Resistência à flexão - V_{flex}

Para a determinação da resistência a flexão dos modelos de lajes, foi utilizada a teoria das linhas de rupturas expressa em uma formulação analítica usada por Guandalini et. al. (2009). Este método admite que a ruína das lajes só ocorre com a formação das linhas de plastificação. Se dá com a formação, nas seções planas, normais ao plano das lajes, do momento de plastificação, dando origem as charneiras plásticas.

A formulação analítica utilizada por Guandalini et. al. Está expressa pela equação 13.

$$P_{flex} = \frac{4m_u}{r_q(\cos\frac{\pi}{8} + \sin\frac{\pi}{8}) - c} \left(\frac{B^2 - Bc - \frac{c^2}{4}}{B - c} \right) \quad (13)$$

$$m_u = \rho f_y d^2 \left(1 - 0,5\rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (14)$$

Onde m_u é momento último. As variáveis B , C e r_q estão definidas na figura a baixo.

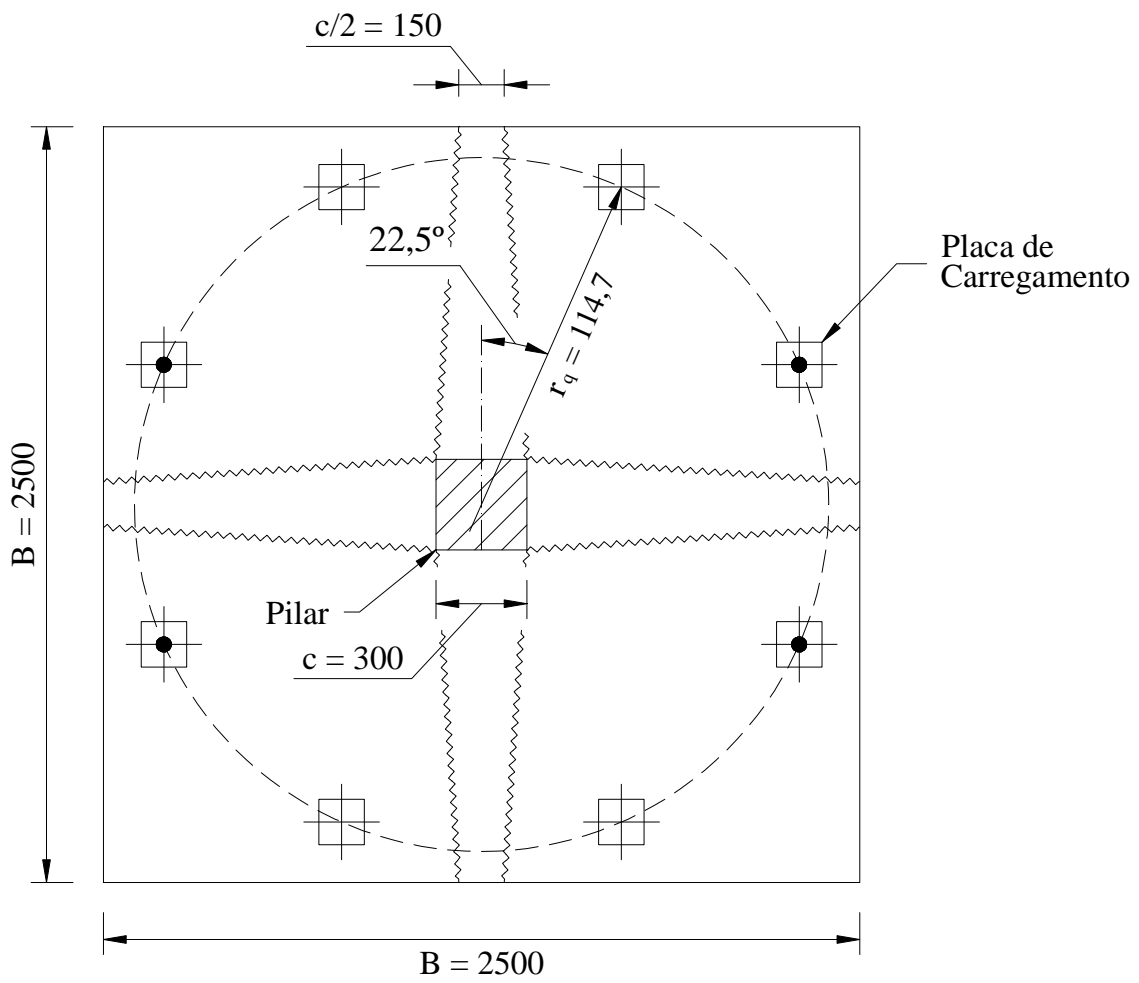


Figura 2.6.7 - Linhas de rupturas adotadas para as lajes

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho se propõe a analisar, experimentalmente, modelos locais de lajes lisas, procurando reproduzir uma situação semelhante à região de um pavimento de laje lisa no entorno de um pilar interno quadrado, com carregamento simétrico, utilizando como armadura de cisalhamento PRFC dispostos em situações variadas. A idealização destes modelos locais, para casos de ligação laje pilar interno, busca representar a região da laje no entorno do pilar que, em uma análise elástica, representa a região de momentos negativos. A Figura 3.1.1 mostra um modelo hipotético que caracteriza a situação estudada, assumindo que o momento fletor se anula a $0,20 \cdot L$ para cada lado do pilar entre 2 (dois) vãos iguais a L .

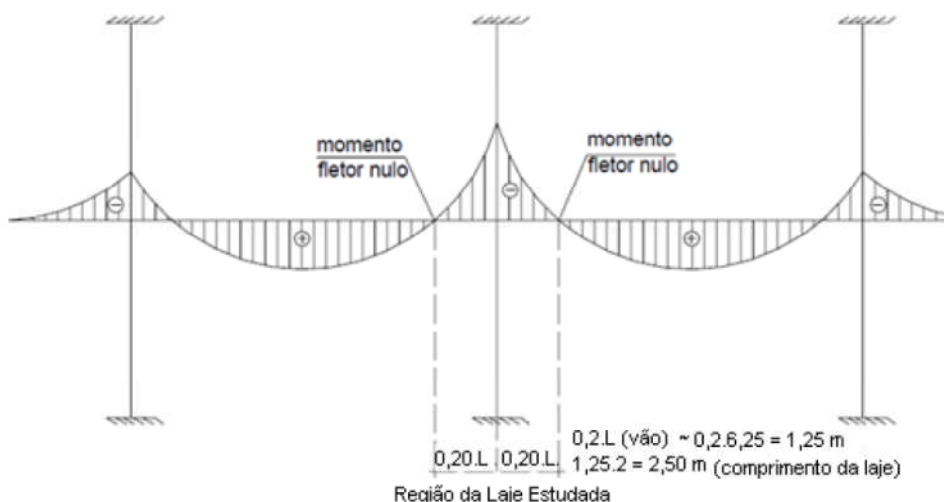


Figura 3.1.1 - Modelo hipotético caracterizando a situação estudada- TRAUTWEN (2006)

Os modelos foram dimensionados de modo que sua ruptura ocorresse por punção, apresentando uma taxa de armadura à flexão de 1,45% aproximadamente. Lajes cujas dimensões são semelhantes às dimensões reais de um pavimento, requerem um grau de complexidade e custo elevados para sua análise em laboratório.

Os ensaios realizados neste trabalho fazem parte da primeira série de ensaios do programa experimental da tese de doutorado de Galileu Silva Santos junto à Universidade de Brasília.

Depois de realizados os ensaios, os resultados foram comparados com as prescrições normativas estabelecidas pela ABNT NBR 6118:2007 e alguns dos importantes códigos internacionais como o ACI 318M-08 e o *EUROCODE 2:2004*.

Para realizar a análise, foram consideradas como variáveis a presença ou não de reforço ao cisalhamento, bem como a sua distribuição nos diferentes tipos modelos reforçados.

3.2. DESCRIÇÕES DOS MODELOS ENSAIADOS

Foram ensaiados 4 (quatro) modelos de lajes lisas no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília para análise da resistência ao cisalhamento e do comportamento de ligações laje-pilar quadrado interno com e sem armadura de cisalhamento para um carregamento centrado. Foram utilizados como armadura de cisalhamento laminados de PRFC. As dimensões escolhidas para os modelos locais foram definidas em função das dimensões da laje de reação do Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. As lajes ensaiadas apresentaram dimensões de 2500 mm de lado e uma altura de 180 mm, apresentadas na Figura 3.2.1.

Todos os modelos de lajes tinham pilares quadrados com dimensões de face de 300 mm e comprimentos de 800 mm e 600 mm nas partes superiores e inferiores, respectivamente.

A nomenclatura adotada para cada laje é composta por letras maiúsculas e caracteres numéricos. A letra L representa a palavra laje, o 0 significa que o modelo não foi reforçado, o C significa que a distribuição da armadura de cisalhamento é em cruz, o R significa que a distribuição da armadura de cisalhamento é de forma radial e o S significa que a aplicação do reforço é do tipo *stirrups* (costura). L0-01 é a laje modelo e não será reforçada ao cisalhamento, LC-S1 é a laje reforçada com distribuição em cruz com o 1º padrão de distribuição, LC-S2 é a laje reforçada em cruz com o 2º padrão de distribuição de reforço ao cisalhamento e LR-S é o modelo com reforço distribuído de forma radial.

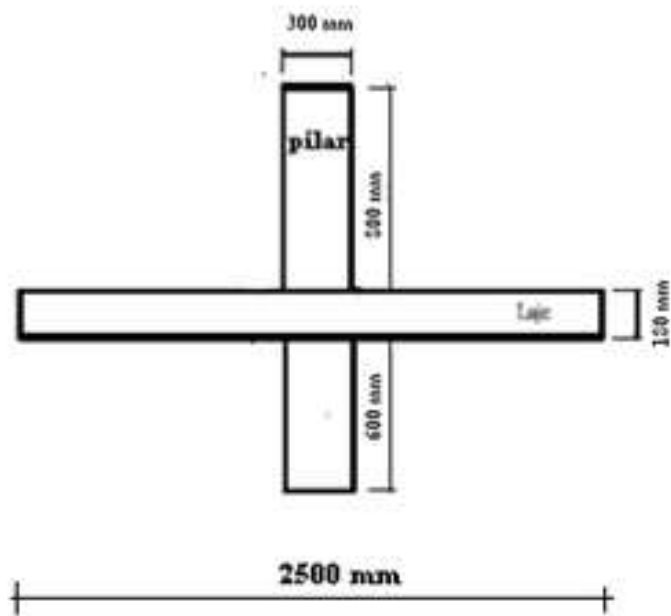
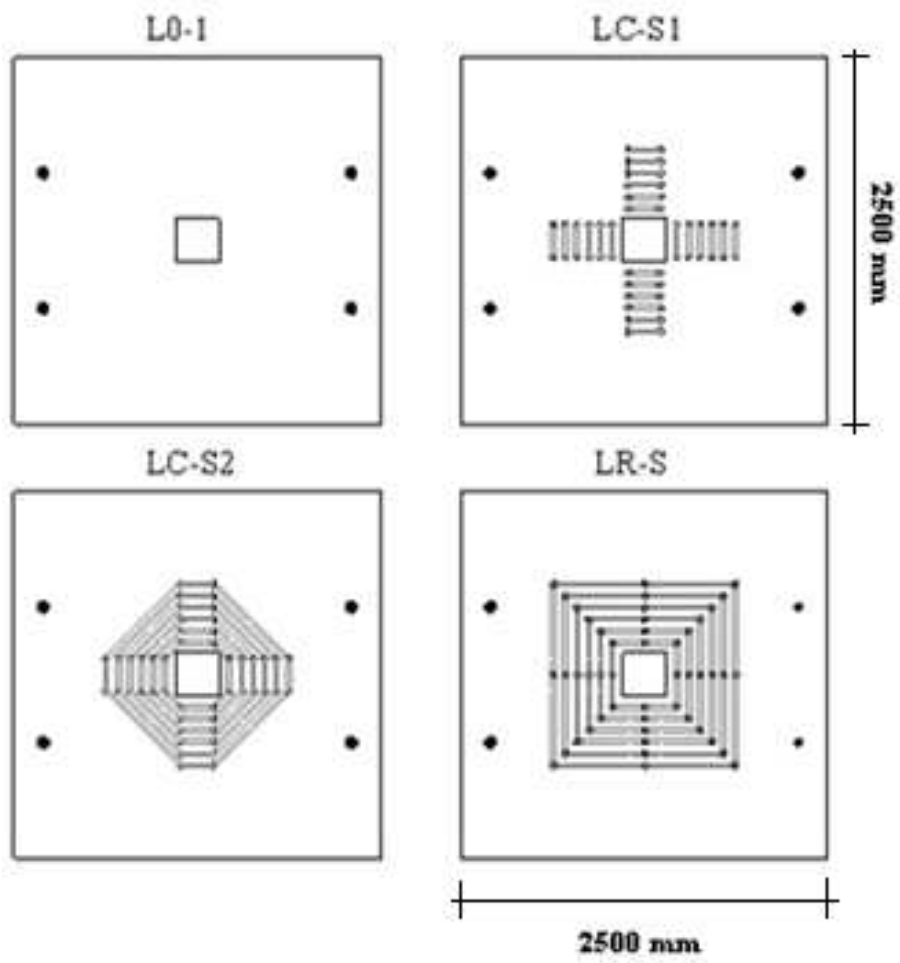


Figura 3.2.1 - Modelos a serem ensaiados



Figura 3.2.2 – Modelos ensaiados

As características dos modelos ensaiados estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características dos modelos ensaiados

Modelo	Dimensões do pilar (mm)	Dimensões da laje (mm)	Altura efetiva d (mm)	Nº perímetro de reforço	$A_{PRFC}/\text{perímetro}$ (mm ²)
L0-1	300	2500 x 2500 x180	144,2	-	-
LC-S1	300	2500 x 2500 x180	142,5	6	784
LC-S2	300	2500 x 2500 x180	144,2	6	784
LR-S	300	2500 x 2500 x180	144,9	6	784

3.3. ARMADURA DE FLEXÃO

As armaduras de flexão, superior e inferior, dos modelos ensaiados foram do tipo CA50. As armaduras superiores foram compostas por barras com diâmetro de 16 mm e

espaçamentos de 90 mm em uma direção (camada interna) e 100 mm na outra (camada externa). A utilização de espaçamentos diferentes, em cada direção de armadura de flexão, foi idealizada de modo a propiciar uma resistência à flexão igual nas duas direções (as alturas efetivas nos dois sentidos são diferentes).

As armaduras de flexão inferiores foram compostas por barras de 8 mm dispostas uniformemente nas duas direções com a função de evitar a formação de fissuras durante transporte e manter a ligação laje-pilar após a ruptura por cisalhamento. As disposições das armaduras de flexão, inferiores e superiores, estão ilustradas nas Figuras 3.3.1 e 3.3.2.

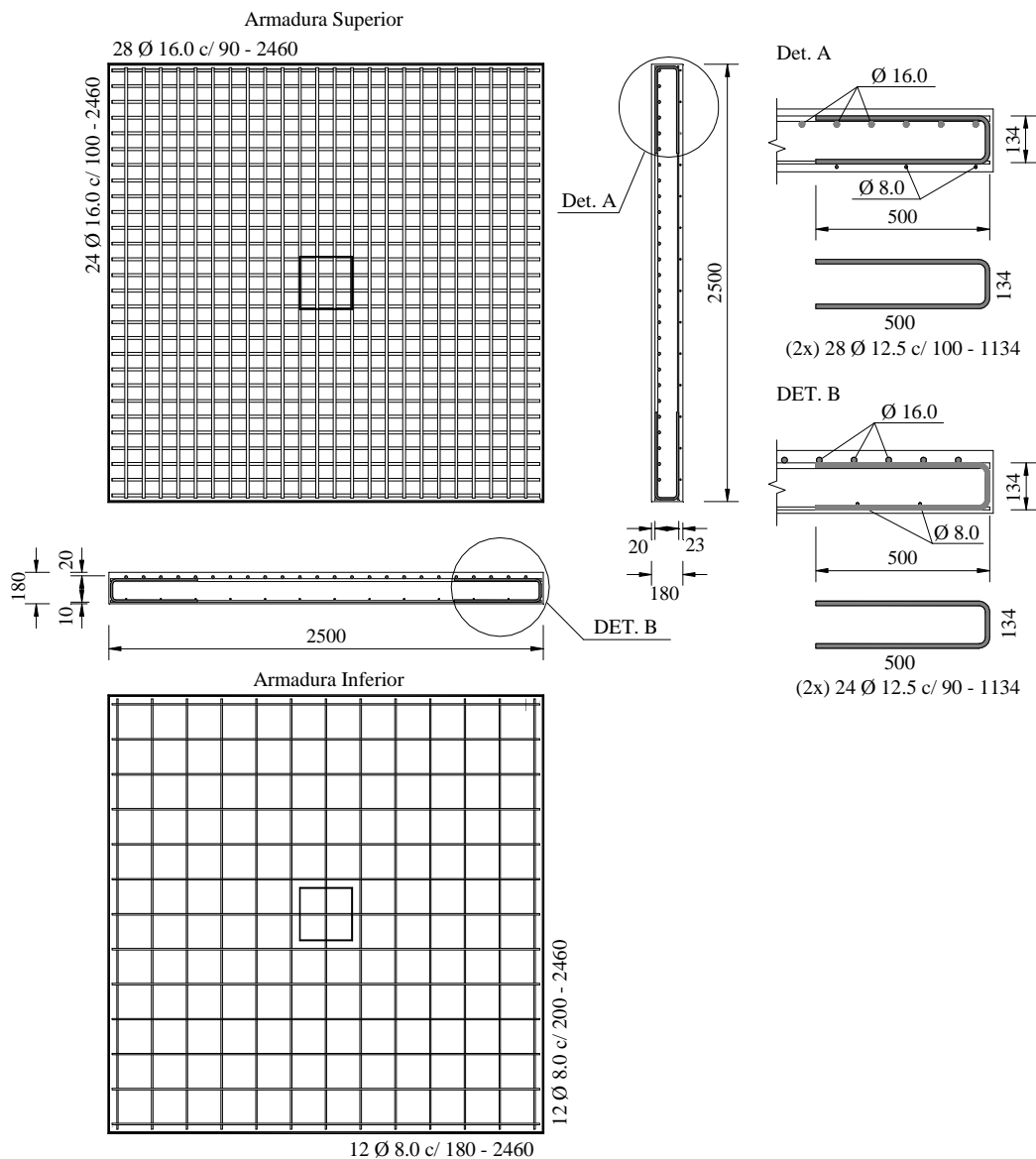


Figura 3.3.1 - Disposição das armaduras de flexão, superiores e inferiores



Figura 3.3.2 - Disposição das armaduras de flexão, superiores e inferiores.

3.4. ARMADURA DE CISALHAMENTO

Foi utilizado como armadura de cisalhamento o sistema de reforço com compósitos de fibra de carbono CF 130, composto por 4 (quatro) componentes básicos que, quando combinados, formam uma lâmina de polímeros reforçados com fibras (PRF) de alta resistência. As fibras de carbono foram colocadas com o auxílio de 3 (três) resinas base, que são: *Primer MBrace*, *MBrace Putty* e *Saturant MBrace*, cada uma delas compostas por duas partes, a parte A e a parte B, mostradas nas Figuras 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.



Figura 3.4.1 – Resinas utilizadas na aplicação do reforço

3.4.1. PRFC

O sistema compósito utilizado nesta pesquisa para o reforço ao cisalhamento dos modelos de lajes foi o MBrace® fornecido pela empresa BASF S/A. As propriedades mecânicas dos materiais constituintes, de acordo com as especificações do fabricante, são:

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas dos materiais constituintes do compósito

	Tecidos de FC – CF 130	MBrace Saturante
Resistência à Tração (MPa)	3800	14
Módulo de elasticidade (MPa)	227000	1138
Deformação Última (‰)	16,7	5,30

As propriedades mecânicas do sistema compósito podem ser estimadas a partir do conhecimento dos módulos de elasticidade e da fração volumétrica dos materiais constituintes fazendo-se uso da regra das misturas, descrita pela equação 13.

De acordo com o ACI 440 2R:2002, os PRFC que têm a resina aplicada manualmente apresentam uma fração volumétrica de fibra de carbono entre 25 a 40%.

$$E_{PRFC} = E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M \quad (15)$$

$$\text{Sendo que } V_F + V_M = 1 \quad (16)$$

Onde:

E_{PRFC} : Módulo de elasticidade do PRFC V_F : Fração volumétrica da Fibra
 E_F : Módulo de elasticidade da Fibra V_M : Fração volumétrica da Matriz
 E_M : Módulo de elasticidade da Matriz

3.4.2. Execução dos furos nos modelos para instalação do reforço

A aplicação do reforço em forma de tecido de PRFC ocorreu através de furos previamente instalados nos modelos de lajes antes da concretagem, conforme ilustra a Figura 3.4.3.

A execução desses furos foi feita com auxílio de tubos de PVC na forma, conforme ilustra a Figura 3.4.3. A Figura 3.4.3a ilustra as barras roscáveis já com as porcas instaladas. A Figura 3.4.3b ilustra a forma totalmente preparada para receber a armadura de flexão e posteriormente proceder a concretagem, para os modelos com distribuição da armadura de cisalhamento em cruz e, a Figura 3.4.3c ilustra a forma também totalmente pronta para o modelo com armadura de cisalhamento distribuída de forma radial. Para garantir a fixação dos tubos de PVC, foram instalados, na forma, barras roscáveis em formato de parafusos onde as porcas possuíam o diâmetro interno dos

tubos de PVC. Para facilitar a desforma, foi aplicado na parte externa dos tubos de PVC um desmoldante.

Os furos foram posicionados nas formas de modo que, após a concretagem, as armaduras de cisalhamento ficassem distribuídas de maneira a apresentar a primeira camada a uma distância S_0 igual a 70 mm a partir da face do pilar e a distância entre camadas S_r igual a 90 mm em todos os modelos, conforme Figura 3.4.2. A garantia dessas distâncias se deu pelo fato dos tubos terem sido fixados nas barras roscáveis já citadas. A colocação das porcas, tanto na parte inferior, quanto na parte superior das barras, proporcionou que os tubos de PVC ficassem fixos mesmo durante a concretagem, uma vez que as porcas possuíam um diâmetro externo exatamente a medida do diâmetro internos dos tubos.

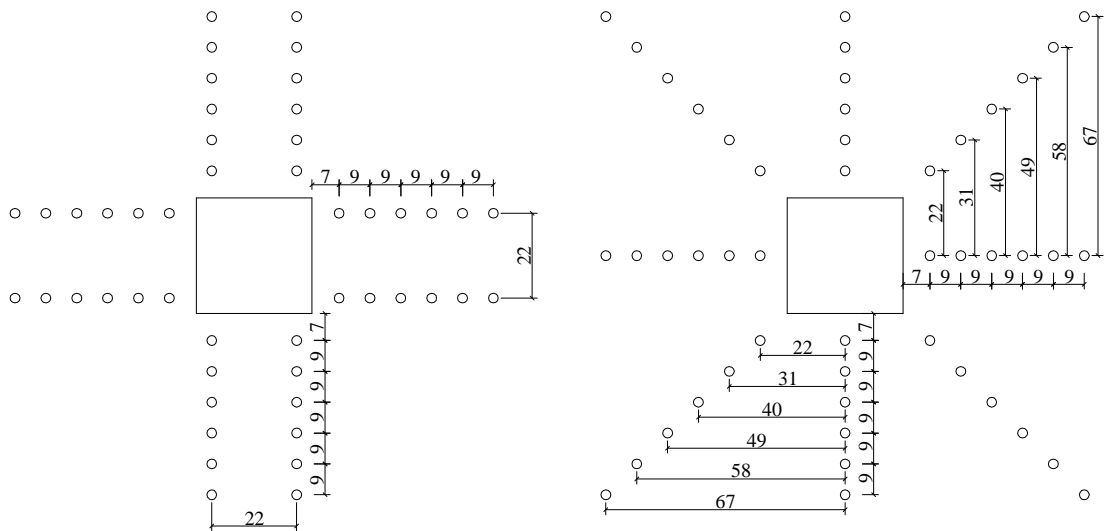


Figura 3.4.2 - Ilustração do S_0 e do S_r para os modelos com armadura de cisalhamento distribuídas em cruz e de forma radial.

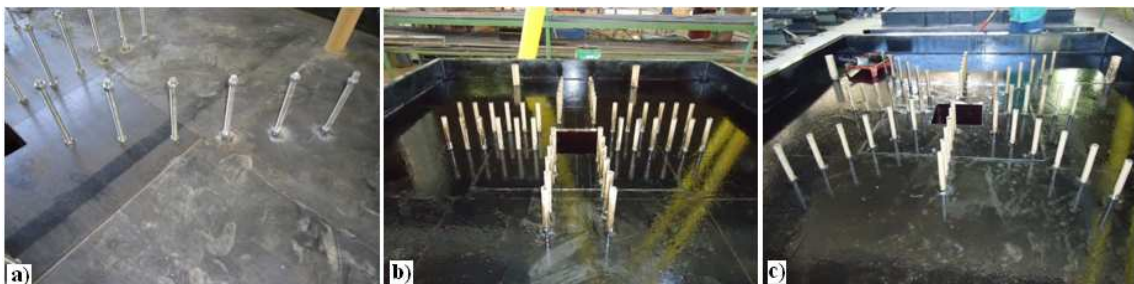


Figura 3.4.3 - Preparo das formas e instalação de tubos de PVC

3.4.3. Ferramentas utilizadas no preparo e aplicação do reforço

Durante o processo de aplicação do reforço foram utilizadas algumas ferramentas e equipamentos, alguns deles improvisados. Antes da aplicação do reforço é necessário que a superfície do substrato, ou seja, o concreto, esteja totalmente lisa e isenta de impurezas. Para tanto, foi utilizado uma lixadeira com disco diamantado para preparar a superfície do concreto que iria receber o reforço, retirando a camada de nata de cimento. Ainda se tratando da preparação do substrato, foi feito um trabalho de arredondamento nos cantos dos furos onde passaram as mantas flexíveis de PRFC. Tal procedimento tem por objetivo evitar a concentração de tensões nesta região e a possível ruptura precoce do material utilizado como reforço.

A Figura 3.4.4 ilustra o trabalho de abaulamento nos cantos dos furos para a remoção das arestas vivas. Esse procedimento foi realizado com auxílio de uma furadeira elétrica, portando em sua extremidade uma ponta montada de material abrasivo em forma de cone. Figura 3.4.5a mostra a ferramenta utilizada para a regularização da superfície do concreto que recebeu a aplicação do PRFC.



Figura 3.4.4 - Arredondamento dos cantos dos furos



Figura 3.4.5 – Ferramentas utilizadas no preparo da superfície do concreto: a) Lixadeira utilizada para regularizar a superfície de concreto, b) Furadeira utilizada para misturar os componentes das resinas, c) Jato de ar .

Alem da fibra de carbono, fez-se uso de outros 3 (três) componentes na aplicação do reforço. O *Primer MBrace*, *MBrace Putty* e o *Saturant MBrace*. Todos os 3 (três) componentes são compostos por 2 (dois) integrantes, a parte A e a parte B. Na mistura dos 2 (dois) integrantes da cada tipo de resina, a proporção indicada pelo fabricante é de 3 (três) partes do integrante A para 1 (uma) parte do integrante B, ou seja, 3:1. Para a mistura desses componentes, foi utilizada uma furadeira elétrica munida de uma haste em sua extremidade, conforme ilustra a Figura 3.4.5b. Seguindo orientações do fabricante, cada uma das resinas teve seus 2 (dois) componentes devidamente misturados por um intervalo de tempo de 3 (três) a 5 (cinco) minutos. A Figura 2.3.5c ilustra o processo de limpeza da superfície do concreto com jatos de ar, tanto no interior dos furos quanto na superfície dos modelos de lajes, utilizando um compressor.

A Figura 3.4.6 mostra a mistura dos dois componentes do *MBrace Primer*, *Putty MBrace* e *Saturant MBrace* respectivamente, fazendo-se sempre uso de recipientes plásticos individualizados para cada material e da furadeira com haste na extremidade para proporcionar uma adequada mistura dos componentes. Uma vez realizada a mistura das duas partes integrantes de cada resina, a aplicação da mesma deve se dar em até 20 (vinte) minutos, tempo que, segundo o fabricante, se inicia a pega.



Figura 3.4.6 – Processo de mistura das resinas

A aplicação das resinas na superfície do concreto teve o auxílio de outras ferramentas, como trincha de 25 mm (1”) e rolo de 50 mm (2”), além de alguns outros apetrechos improvisados que auxiliaram na passagem da fibra por dentro dos furos e na aplicação do *MBrace primer* no interior dos furos e impregnação do interior dos furos pelo *MBrace Primer* e *Saturant MBrace*.

A Figura 3.4.7a ilustra o processo de corte das tiras de fibra FC 130, fazendo-se uso de uma régua de madeira e estilete. A Figura 3.4.7b mostra a ferramenta produzida que foi utilizada na passagem das fibras pelo interior dos furos. A Figura 3.4.7c ilustra as ferramentas utilizadas para aplicação das três resinas, sendo que a trincha de 1” e o rolo de esponja de 2” foram utilizados para aplicação do *MBrace Primer* e do *Saturant MBrace*, enquanto que espátula de borracha foi utilizada na aplicação do *MBrace Putty*. A Figura 3.4.7d mostra uma ferramenta fabricada para se impregnar a superfície do concreto e da fibra FC 130 no interior dos furos pelas resinas *MBrace Primer* e *Saturant MBrace*.

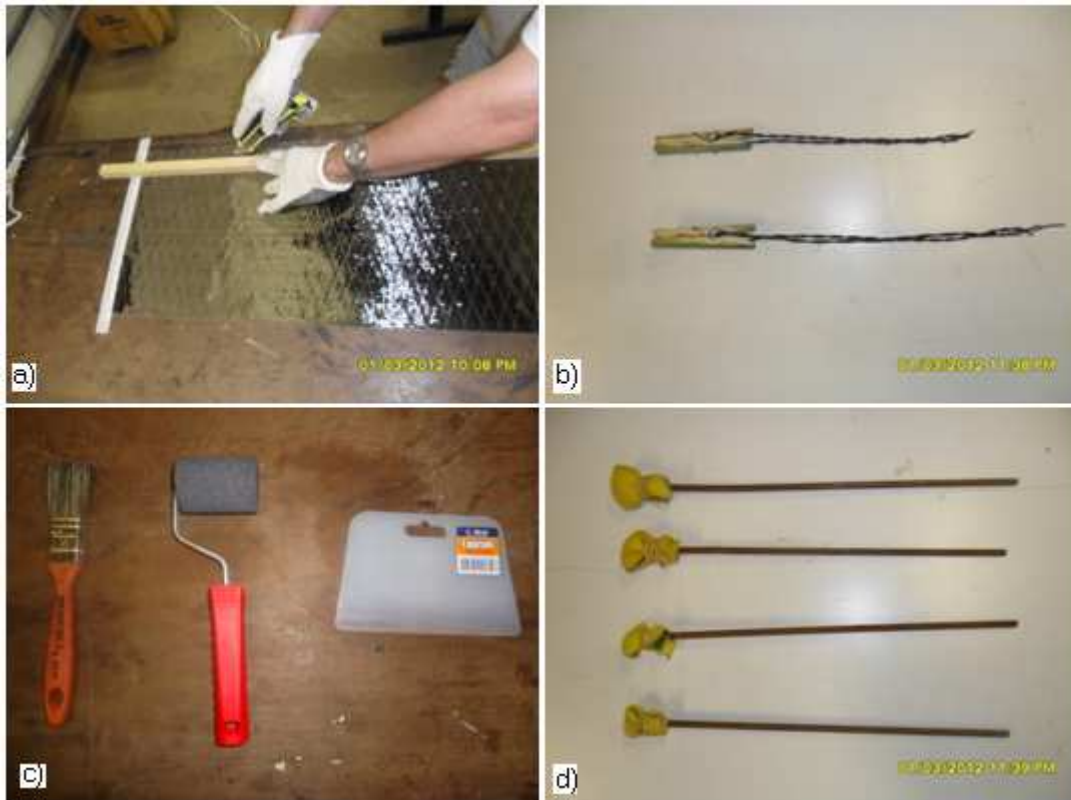


Figura 3.4.7 – Ferramentas utilizadas na aplicação do reforço: a) corte da FC 130, a)passagem da fibra pelo interior dos furos, c) aplicação das resinas, d) aplicação das resinas no interior dos furos.

3.4.4. Aplicação do reforço

Uma vez estando a superfície do substrato apta a receber o reforço, fez-se a aplicação do primeiro dos componentes, o *Primer MBrace*, que tem como função principal reforçar o substrato de concreto para receber a resina de saturação que impregnará a fibra CF 130. A Figura 3.4.8 mostra os modelos LC-S2 e LR-S já com a camada de *MBrace Primer* aplicada.

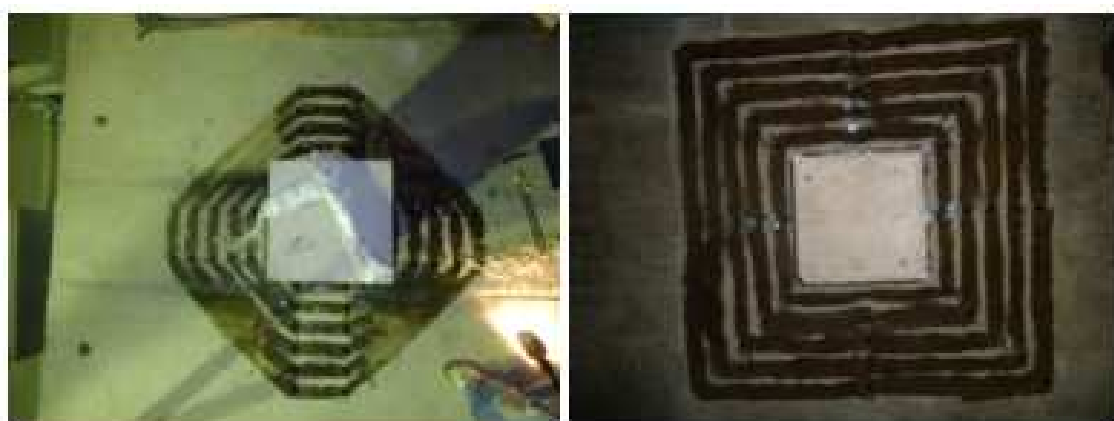


Figura 3.4.8 – Modelos LC-S2 e LR-S após aplicação do *MBrace Primer*

Finalizada a aplicação do *MBrace Primer*, fez-se a aplicação do Putty, que tem como finalidade a regularização da superfície, além de preencher fissuras. A aplicação desta resina foi feita apenas nos locais que se fazia necessária, conforme orientação do fabricante, uma vez que o material tem a finalidade única de corrigir imperfeições na superfície do substrato destinado a receber a fibra FC 130. A Figura 3.4.9 mostra os modelos LC-S1 e LR-S, após a aplicação do *MBrace Putty*.



Figura 3.4.9 - Modelos LC-S1 e LR-S após aplicação do *MBrace putty*

Depois de realizada a aplicação das resinas *MBrace Primer* e *MBrace putty*, os modelos estavam aptos a receber o devido reforço das fibras FC 130, que juntamente com a resina *Saturant MBrace* forma o PRFC. A Figura 3.4.10 ilustra as tiras de fibras FC 130 prontas para serem aplicadas nos modelos, enquanto que a Figura 3.4.11 mostra a ferramenta utilizada para a passagem das fibras pelo interior dos furos. A Figura 3.4.12 ilustra o processo de mistura do *Saturant MBrace*.



Figura 3.4.10 - Fibras de FC 130 cortadas e prontas para serem aplicadas nos modelos

Figura 3.4.11 - Ferramenta utilizada para passagem das fibras pelo interior dos furos

Figura 3.4.12 - Preparo do Saturant MBrace

A Figura 3.4.13 mostra os modelos LC-S1 e LC-S2, já com o laminado de PRFC devidamente aplicado. Para ancoragem do PRFC foi respeitado uma transpasse mínimo de 150 mm, conforme indicado no ACI 440 2R:2004.



Figura 3.4.13 - Aplicação do PRFC

Os 03 (três) modelos reforçados apresentam a mesma quantidade de armadura de cisalhamento por perímetro de reforço, bem como o mesmo numero de perímetros reforçados. A Figura 3.4.14 traz o projeto da distribuição da armadura de cisalhamento e as Figuras 3.4.15 a 3.4.17 ilustram os modelos LC-S1, LC-S2 e LR-S já reforçados.

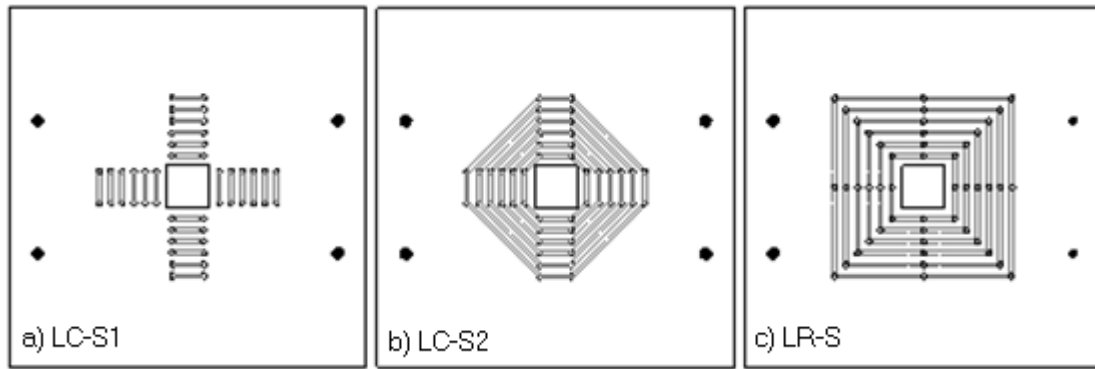


Figura 3.4.14 – Modelos a serem reforçados



Figura 3.4.15 - Modelo LC-S1

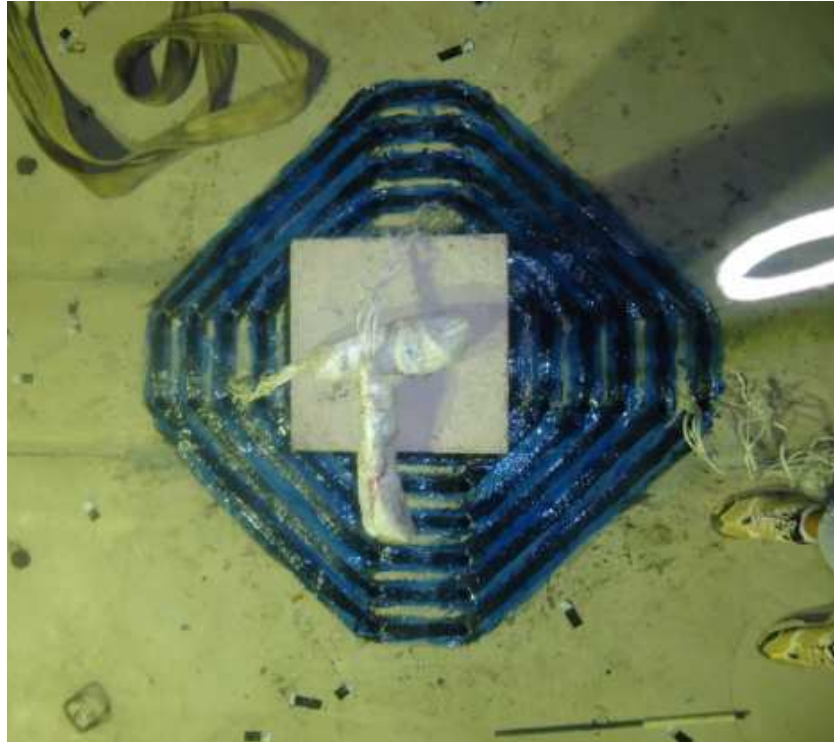


Figura 3.4.16 - Modelo LC-S2



Figura 3.4.17- Modelo LR-S

3.5. ARMADURA DO PILAR

A armadura do pilar foi composta por 8 Φ 20 mm, com estribos de Φ 8 mm espaçados a cada 100 mm, conforme Figura 3.5.1.

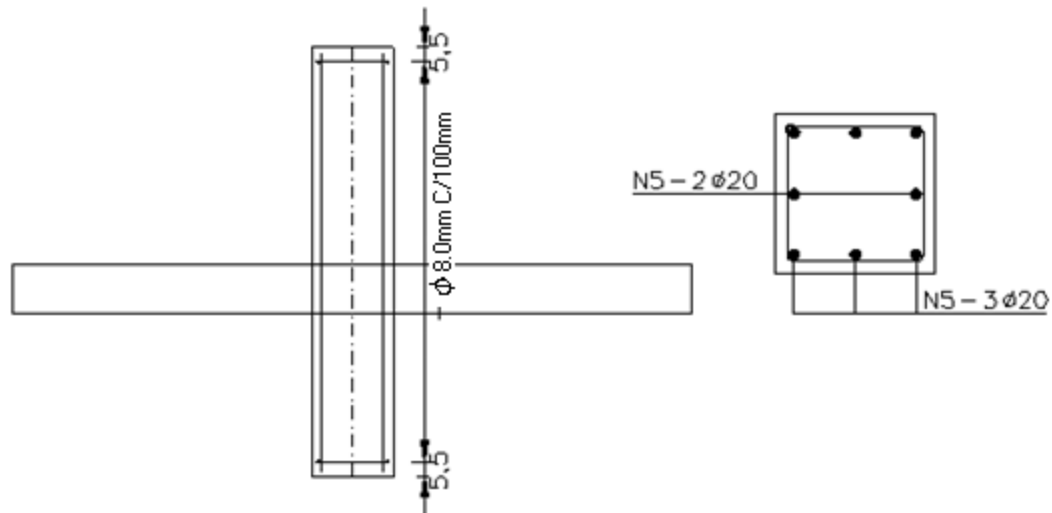


Figura 3.5.1 - Armadura do pilar



Figura 3.5.2 - Detalhe da armadura do pilar

3.6. FORMAS

As formas utilizadas na confecção dos modelos foram do tipo metálica e produzidas no laboratório de estruturas da universidade de Brasília e estão ilustradas nas Figura 3.6.1. Foram produzidas 4 (quatro) formas para que todos os modelos locais de conexão laje-pilar pudessem ser confeccionados simultaneamente.



Figura 3.6.1 - Forma dos modelos ensaiados

3.7. CONCRETAGEM

O concreto empregado na confecção dos modelos foi do tipo usinado e os 4 (quatro) modelos foram concretados monoliticamente. Para se verificar a consistência do concreto, foi feito o teste de abatimento de tronco de cone, seguindo recomendações da NBR-NM 67:1996 - Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme Figura 3.7.1. O resultado para o teste de abatimento do tronco de cone esperado era de $100 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ e o resultado obtido foi de 116 mm. Os corpos de prova foram moldados durante o processo de execução dos modelos de conexão laje-pilar, seguindo recomendações da NBR 5738: 2003 – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. A partir dos corpos de provas, que foram ensaiados no laboratório de ensaio de materiais da Universidade de Brasília, pode-se obter a resistência à tração e a resistência à compressão do concreto. A cura dos modelos, bem como dos corpos de provas, foi realizada seguindo recomendações da NBR 5738:2003 – Moldagem e cura de corpos de provas cilíndricos ou prismáticos de concreto. Tanto os modelos de lajes quanto os corpos de prova foram molhados a cada 3

(três) horas durante 7 (sete) dias. A Figura 3.7.2 mostra a produção dos corpos de prova e os corpos de prova já confeccionados.



Figura 3.7.1 - Abatimento do tronco de cone



Figura 3.7.2 - Moldagem dos corpos de prova

O lançamento do concreto se deu por uma bomba ligada ao caminhão betoneira e adensado por 2 (dois) vibradores de imersão com diâmetro de 35 mm.

A concretagem dos modelos se iniciou pela parte inferior dos pilares e, em seguida, foi concretado a laje. Por fim, após instalação da forma da parte superior do pilar, teve fim a concretagem do modelo local. Finalizada a concretagem do modelo, foi feito um acabamento na superfície da laje. Pode-se observar na até a Figura 3.7.3 o processo de concretagem dos modelos, e na Figura 3.7.4 o processo de cura dos modelos concretados.



Figura 3.7.3

Figura 3.7.3 - Concretagem dos modelos



Figura 3.7.4 - Processo de cura do concreto

3.8. INSTRUMENTAÇÃO

Durante toda a fase de carregamento, foram monitoradas as deformações específicas nas armaduras de flexão, de cisalhamento (PRFC) e no concreto, bem como os

deslocamentos em variados pontos das lajes, com o intuito de acompanhar o comportamento dos modelos.

3.8.1. Deformações específicas nas armaduras de flexão e de cisalhamento

A captação dessas deformações nas armaduras de flexão, bem como no PRFC, se deu através de extensômetros elétricos de resistência de $120,2 \pm 0,2\Omega$, tipo KFG-2-120-C1-11, com fator de calibração 2,10, fabricados pela *Kyowa Electronic Instruments*. As Figuras 3.8.1 e 3.8.2 mostram a extensometria adotada para as armaduras de flexão, superior e inferior.

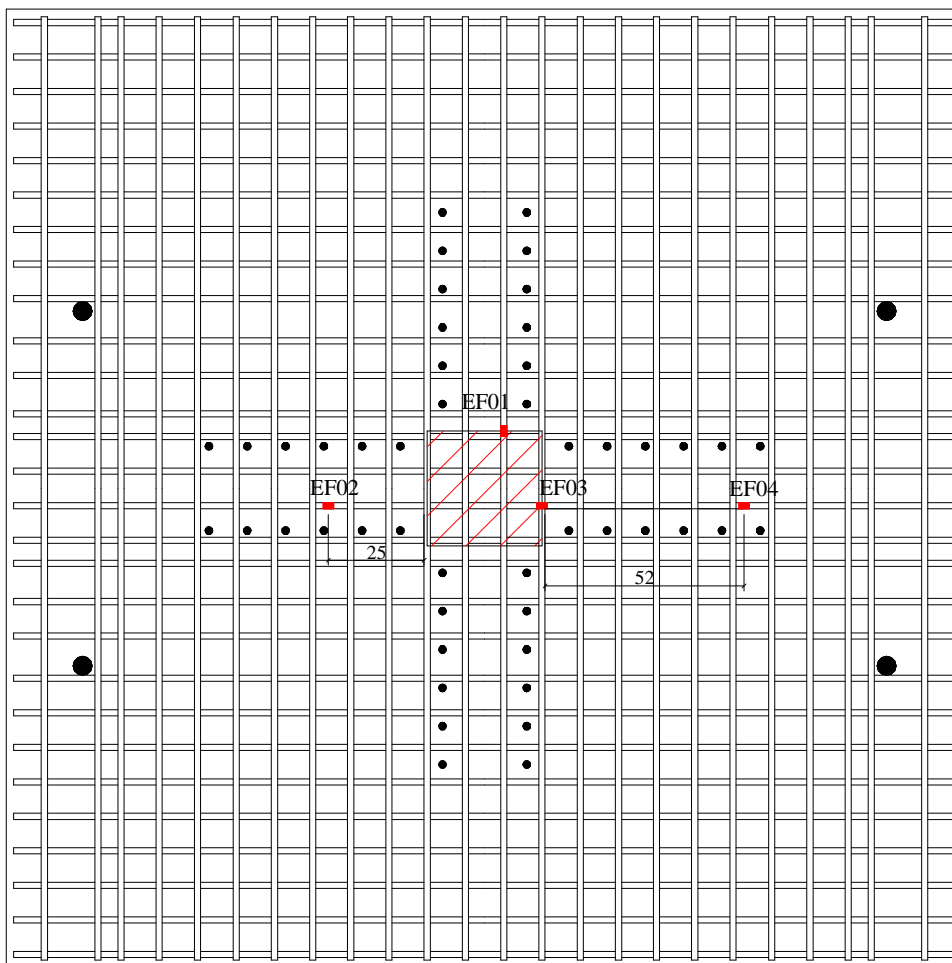


Figura 3.8.1 - Extensometria da armadura de flexão superior

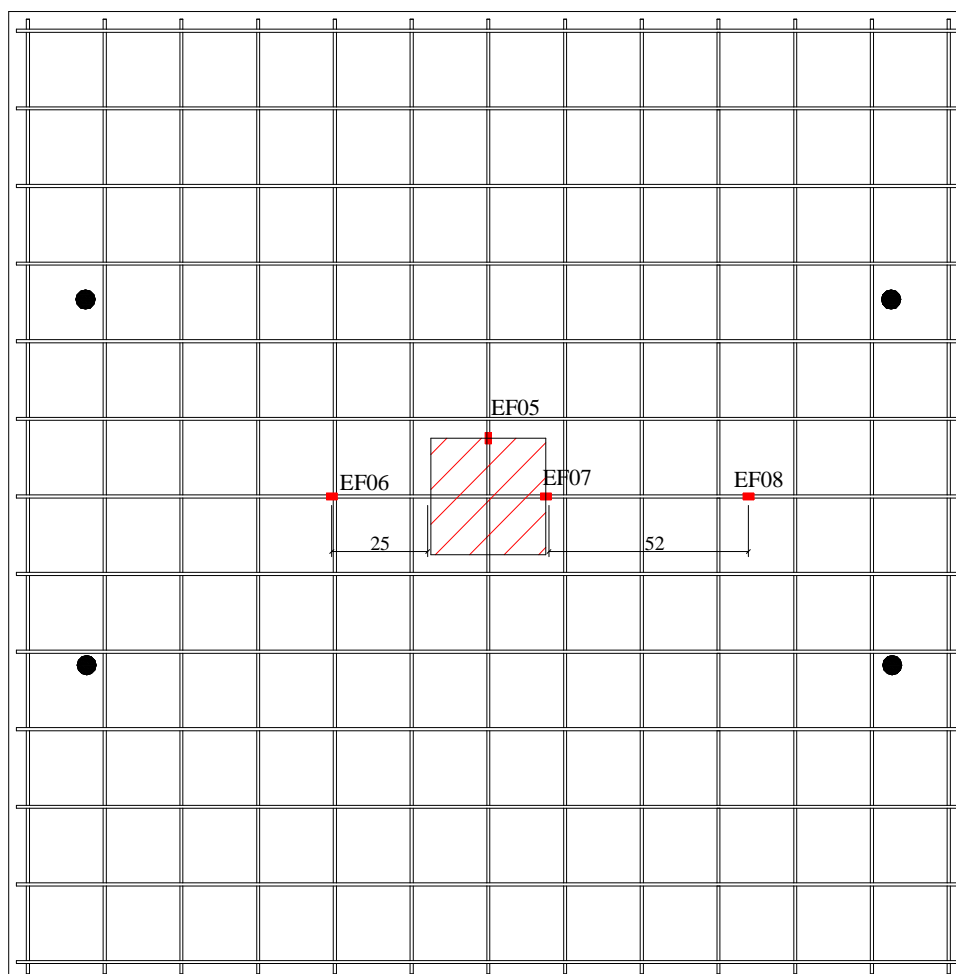


Figura 3.8.2 - Extensometria da armadura de flexão inferior

Em cada ponto instrumentado foram instalados 2 (dois) extensômetros diametralmente opostos. Antes de serem instrumentadas as barras foram lixadas e limpas com álcool isopropílico, para logo após serem colados os extensômetros. Uma vez colados os extensômetros com adesivo cianoacrilático, esses receberam uma proteção mecânica, constituída por uma camada de resina epóxica do tipo araldite, a fim de se evitar umidade e possíveis danos no elemento durante a concretagem dos modelos ou mesmo realização dos ensaios. Depois da camada de araldite, foi aplicada uma camada de silicone para proteger o extensômetro durante a concretagem dos modelos de possíveis avarias e, por ultimo, foi passada uma fita isolante para completar a proteção mecânica. A sequência desse procedimento vem mostrada nas Figuras 3.8.3 a 3.8.8.



Figura 3.8.3 - Barra de aço antes da instrumentação.



Figura 3.8.4 - Barra apta à receber o extensômetro.



Figura 3.8.5 - Barra devidamente instrumentada



Figura 3.8.6 - Barra após aplicação do Araldite



Figura 3.8.7 - Barra após aplicação do silicone



Figura 3.8.8 - Barra após aplicação da fita isolante.

Na instrumentação na armadura de cisalhamento foi utilizado o mesmo tipo de extensômetro usado para instrumentar as barras de flexão. A instrumentação dos modelos LC-S1, LC-S2 e LR-S está ilustrada nas Figuras 3.8.9 a 3.8.11.

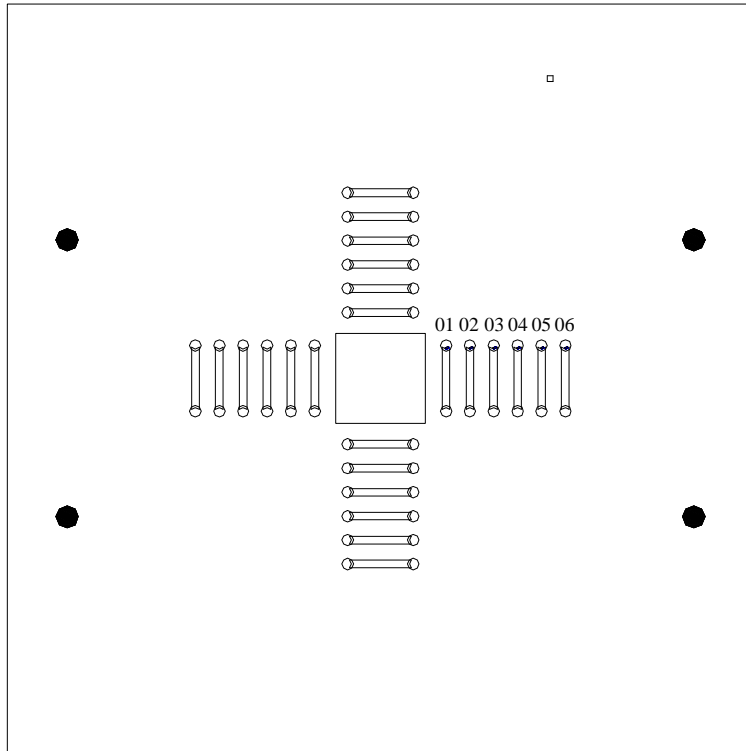


Figura 3.8.9 - Instrumentação na armadura de cisalhamento no modelo LC-S1

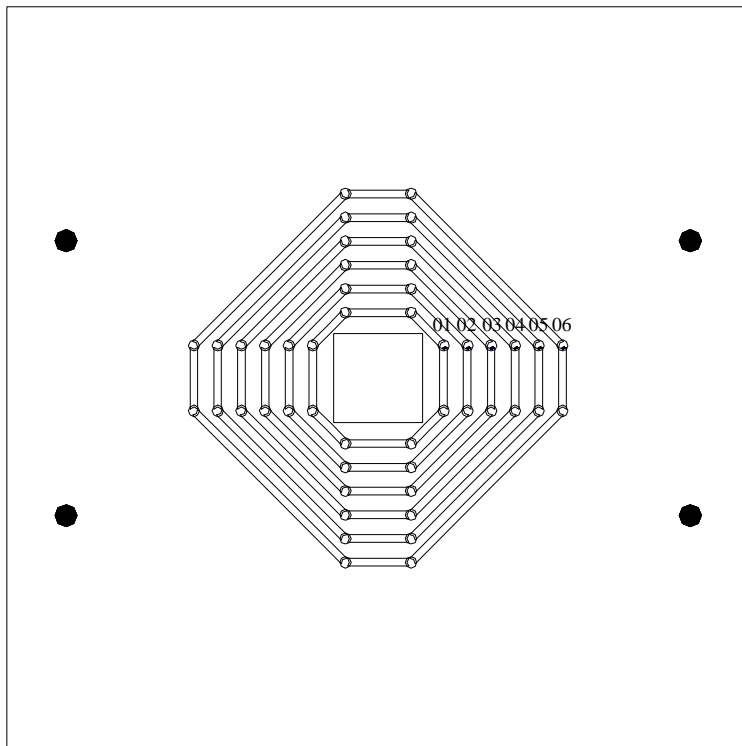


Figura 3.8.10 - Instrumentação na armadura de cisalhamento no modelo LC-S2

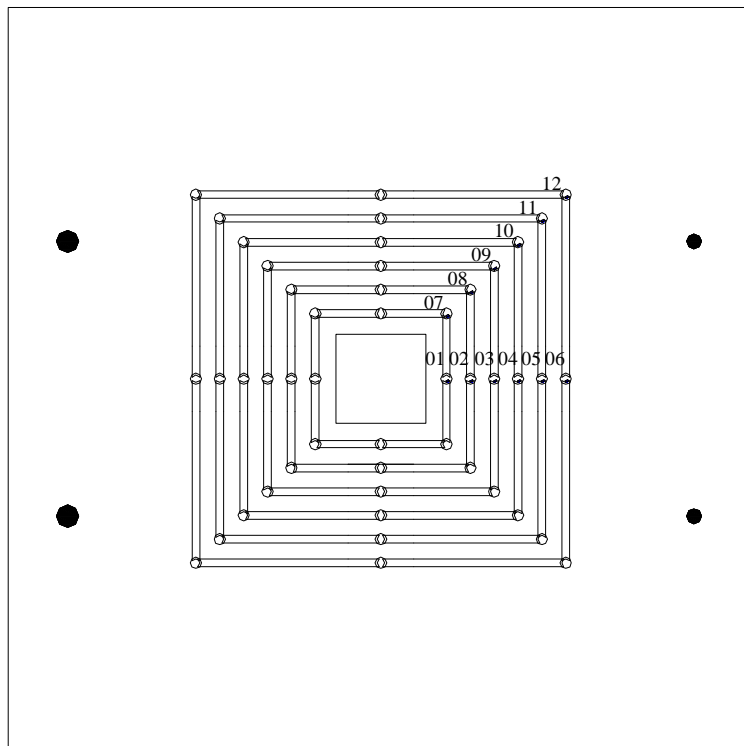


Figura 3.8.11 - Instrumentação na armadura de cisalhamento no modelo LR-S

A colagem dos extensômetros na armadura de cisalhamento foi feita na parte superior das tiras verticais dos laminados de PRFC, próximo à extremidade dos furos. A instalação dos extensômetros na parte superior dos furos foi feita em função da dificuldade que encontramos para posicioná-los na proximidade da metade da altura da laje, onde as medidas de deformações no PRFC seriam mais precisas. Após a colagem dos extensômetros foi feita uma proteção mecânica a partir da aplicação de uma camada de silicone, a fim de se evitar danos nos extensômetros durante o procedimento de preenchimentos dos furos com o graute de alta resistência. O procedimento adotado na colagem dos extensômetros na armadura de cisalhamento está detalhado nas Figuras 3.8.12 a 3.8.17.



Figura 3.8.12 - Soldagem dos Extensômetros aos fios



Figura 3.8.13 - Extensômetros a serem colados na armadura de cisalhamento



Figura 3.8.14 - Aplicação de adesivo epóxico no extensômetro



Figura 3.8.15 - Colagem do extensômetro na superfície do PRFC



Figura 3.8.16 - Extensômetros devidamente colado no reforço



Figura 3.8.17 - Proteção de silicone nos extensômetros do modelo LC-S1

3.8.2. Deformações específicas no concreto

As deformações específicas no concreto foram medidas durante os ensaios a partir da instalação de extensômetros elétricos do tipo KC-70-120-A1-11, também da marca *Kyowa*, de resistência $119,8\Omega \pm 0,2\Omega$ e fator de calibração 2,10. As Figuras 3.8.18 e 3.8.19 mostram a instalação dos extensômetros na face inferior das lajes. Para os modelos L0-01, LC-S1 e LC-S2, o eixo de cada extensômetro, radial e tangencial, coincidiu com o eixo do pilar, em cada laje. No caso do modelo LR-S, pelo fato de um dos furos por onde passaria o reforço está localizado exatamente na posição onde seria colocado o par de extensômetro, este foi deslocado para uma região próximo ao canto do pilar, conforme ilustra a Figura 3.8.19.

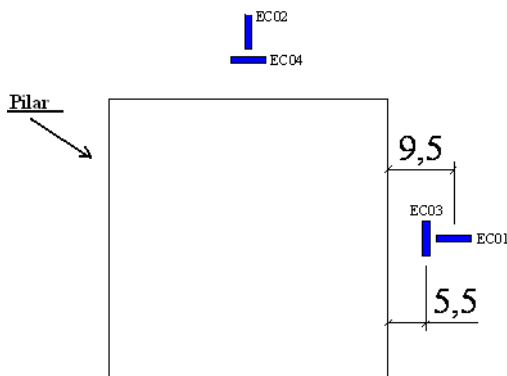


Figura 3.8.18 - Extensometria no concreto dos modelos L0-01, LC-S1 e LC-S2

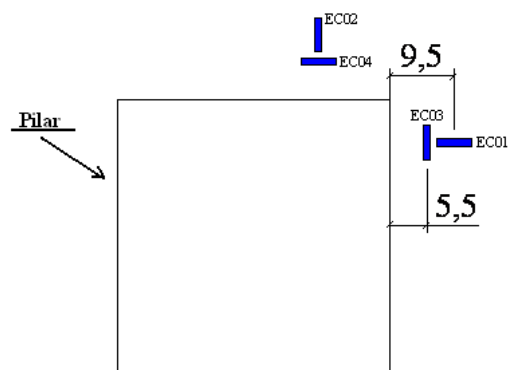


Figura 3.8.19 - Extensometria no concreto do modelo LR-S



Figura 3.8.20 - Limpeza da superfície do concreto para colagem do extensômetro



Figura 3.8.21 - Extensômetros colados na parte inferior do modelo de laje L0-01.



Figura 3.8.22 - Extensômetros colados na parte inferior do modelo de laje LC-S2.



Figura 3.8.23 - Extensômetros colados na parte inferior do modelo de laje LR-S.

3.8.3. Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais foram medidos através da instalação de LVDTs (Transdutores de Deslocamento Linear) da marca HBM do tipo K-WA-T050W-32K-K2-D1-2-8-005m. Os LVDTs possibilitaram que as leituras dos deslocamentos verticais nas lajes fossem feitas diretamente no sistema de aquisição de dados. Esses deslocamentos foram medidos em 12 (doze) pontos previamente selecionados, distribuídos conforme Figura 3.8.24 que mostra a distribuição dos LVDTs no modelo L0-01. No entanto, ressalta-se que essa mesma configuração foi utilizada em todos os modelos ensaiados.

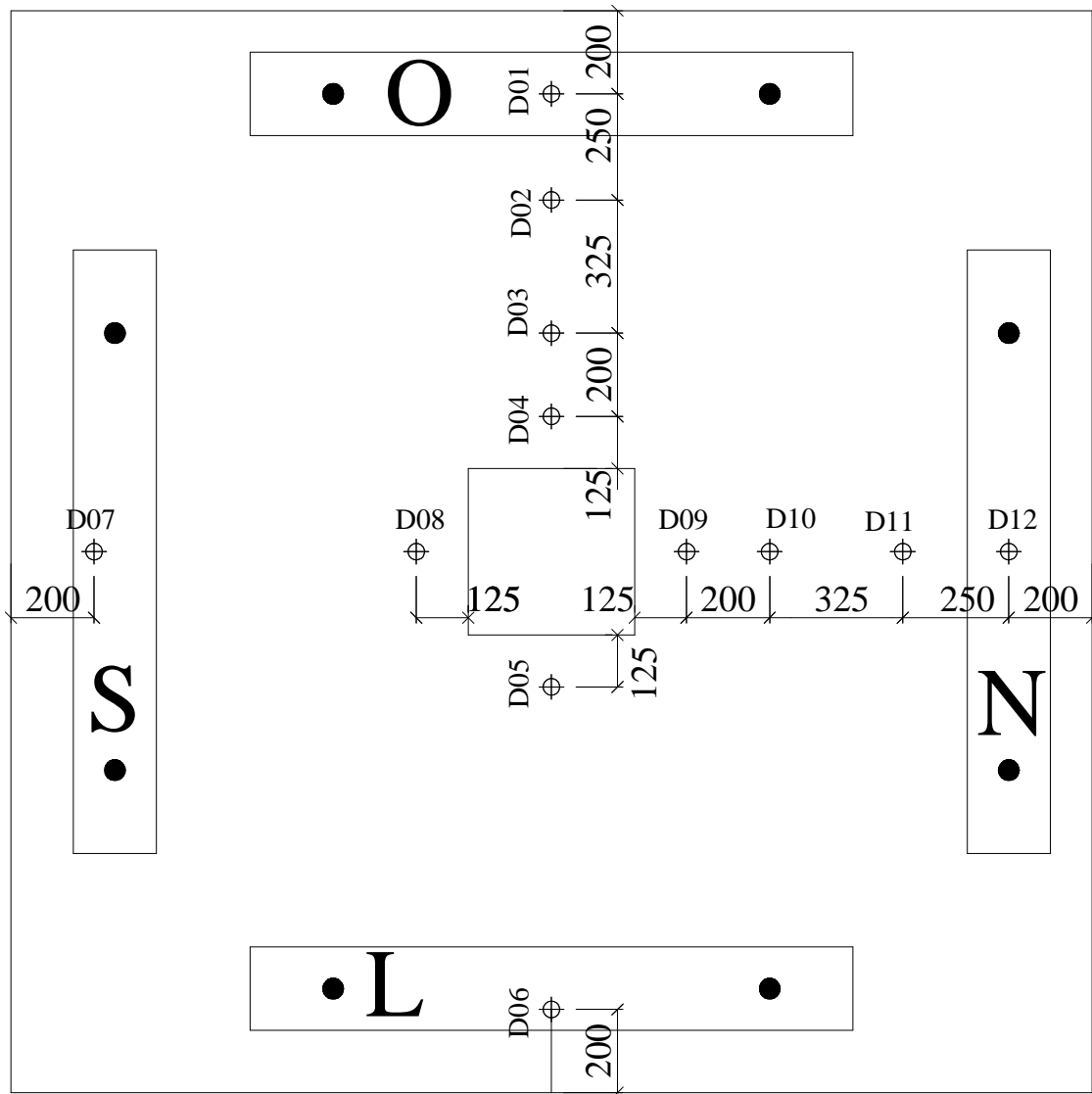


Figura 3.8.24 - Distribuição dos LVDTs no modelo L0-01



Figura 3.8.25 - LVDTs no modelo L0-01



Figura 3.8.26 - LVDTs no modelo LC-S1



Figura 3.8.27 - LVDTs no modelo LC-S2

Figura 3.8.28 - LVDTs no modelo LR-S

3.9. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.9.1. Sistema de aquisição de dados

Durante o transcurso do ensaio, a cada passo de carga aplicado, as leituras de todos os extensômetros, tanto das armaduras de flexão como de cisalhamento e do concreto, bem como dos LVDTs eram feitas a partir de um sistema de aquisição de dados do tipo SPIDER 8. O sistema foi composto por 7 (sete) módulos de aquisição interligados entre si, no caso do modelo L0-01, e 9 (nove) módulos de aquisição para os modelos reforçados. Tanto o processamento quanto o armazenamento dos dados foram realizados de forma semi-automática utilizando o programa CATMAN, na versão 4.5, que convertia os dados das leituras segundo calibração realizada previamente e armazenada no programa. O operador do sistema realizava apenas a ativação da aquisição dos dados a cada passo de carga realizado.



Figura 3.9.1 - Sistema de controle visual de cargas

Figura 3.9.2 - Sistema de aquisição de dados

3.9.2. Estrutura de reação

A realização dos ensaios se deu em um pórtico metálico montado sobre a laje de reação do laboratório de estruturas da universidade de Brasília. As Figuras 3.9.3 e 3.9.4 mostram o esquema de ensaio e o modelo já devidamente instalado no pórtico.

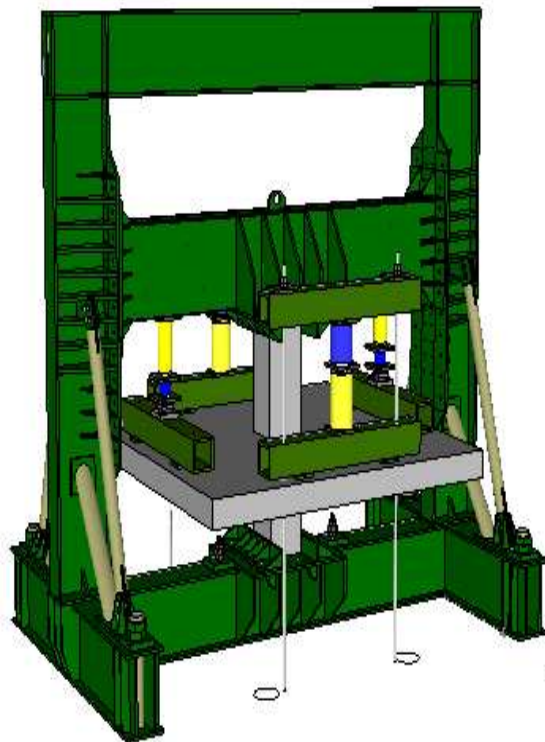


Figura 3.9.3 - Vista em 3D do esquema de ensaio no pórtico metálico



Figura 3.9.4 - Esquema de ensaio no pórtico metálico fixado na laje de reação

3.9.3. Aplicação das cargas

A aplicação das cargas se deu na direção vertical, de cima para baixo e em passos de cargas definidos, sendo nos 3 (três) primeiros de 20 kN e os demais de 40kN. As cargas foram geradas por 4 (quatro) atuadores hidráulicos, sendo acionados por 3 (três) bombas elétricas ligadas a um sistema de válvulas de bloqueio de ajuste fino. A Figura 3.9.5 mostra os 4 (quatro) atuadores hidráulicos, destacados na cor amarela, e a Figura 3.9.6 mostra as bombas elétricas.



Figura 3.9.5 - Atuadores hidráulicos



Figura 3.9.6 - Bombas elétricas

Como o carregamento aplicado nos modelos de laje foi simétrico, o esquema de distribuição do carregamento aplicado nas lajes foi a Figura 3.9.7, onde vemos que cada atuador hidráulico distribui sua parcela de carga em outros 2 (dois) pontos, através de vigas de reação, fazendo com que as cargas totais aplicadas nas lajes fossem distribuídas em 8 (oito) pontos distintos, de modo que se manteve o carregamento simétrico.

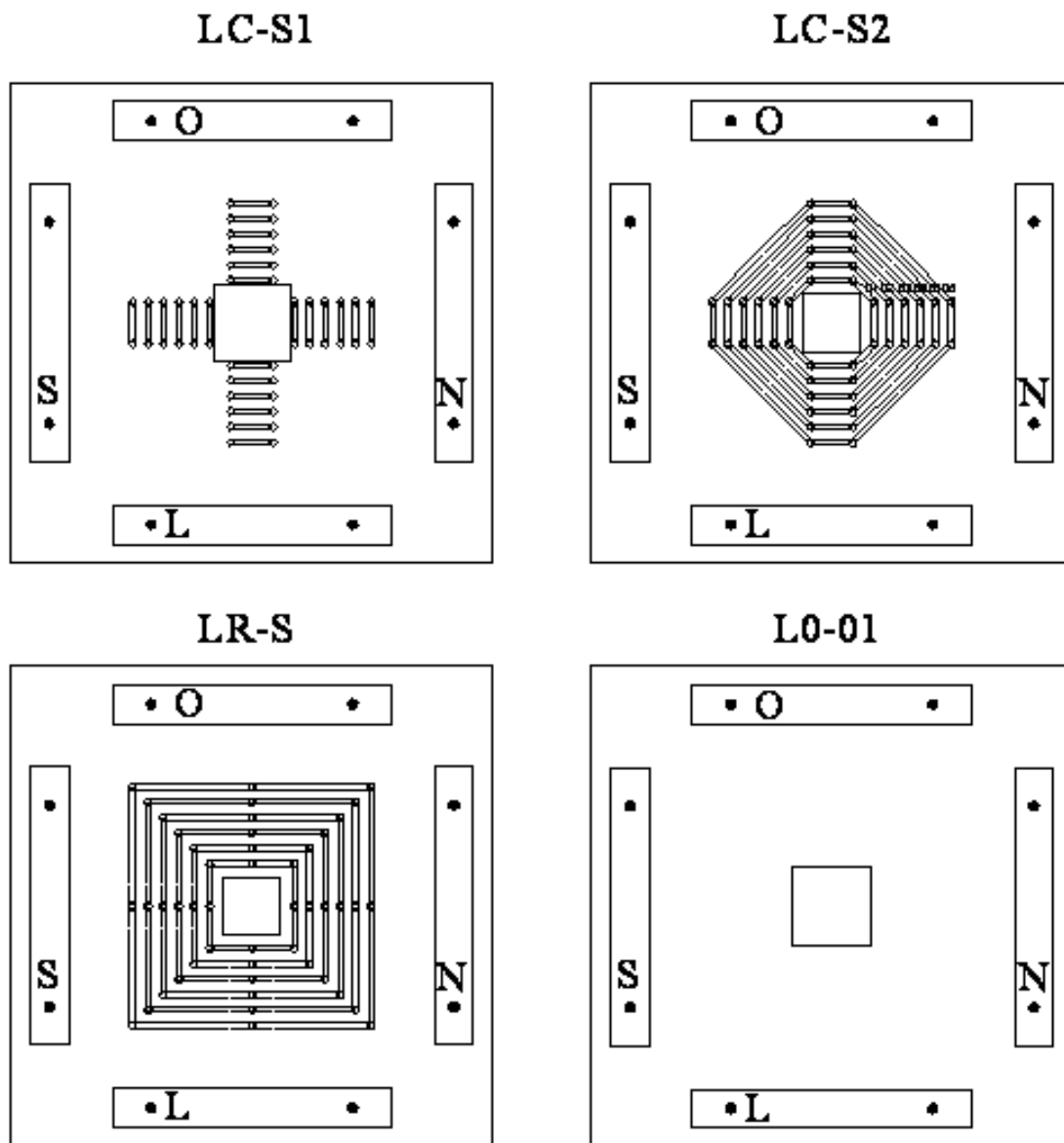


Figura 3.9.7 - Aplicação do carregamento nos modelos distribuídos em 08 (oito) pontos



Figura 3.9.8 - Viga de reação e atuador hidráulico

3.9.4. Cargas

O monitoramento da aplicação das cargas se deu através de células de cargas da marca KRATOS. Para tanto, foram utilizadas células de cargas com capacidade para 1000 kN, instaladas em cada um dos atuadores hidráulicos.

As leituras realizadas a cada passo de carga eram feitas a partir de indicadores digitais, também da marca KRATOS, de capacidade de 500 kN, conectados diretamente nas células de cargas.



Figura 3.9.9 - Célula de carga em conjunto com o atuador hidráulico



Figura 3.9.10 - Indicadores digitais utilizados para leituras das cargas a cada passo de carga

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios descritos no capítulo anterior.

Serão apresentados os resultados de caracterização dos materiais, os deslocamentos verticais nos modelos, as deformações específicas na superfície do concreto, nas armaduras de flexão e de cisalhamento, bem como a carga última de cada modelo.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Concreto

Os 4 (quatro) modelos de lajes foram concretados simultaneamente, no entanto, os ensaios ocorreram em 2 (duas) datas diferentes. Neste caso, se fez necessário a realização de ensaios de caracterização do concreto em datas próximas às datas da realização dos ensaios dos modelos de lajes. Primeiramente foi ensaiado apenas o modelo L0-01 e posteriormente os demais modelos.

Para a realização dos ensaios de caracterização do concreto foram utilizadas as seguintes normas: ABNT NBR 5739:2007, para a determinação da resistência à compressão; ABNT NBR 7222:1994, para a determinação da resistência à tração por compressão diametral. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 4.1 abaixo. Nesta pesquisa não foi realizado o ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto e quando necessário será adotada a fórmula em função da resistência à compressão do concreto.

Tabela 4.1- Caracterização do concreto.

MODELO	IDADE (dias)	f_{cj} (MPa)	f'_c (MPa)	f_{ct} (MPa)
L0-01	120	45,6	43,2	3,3
		47,8		
		36,1		
LC-S1 LC-S2 LR-S	300	50,0	50,0	3,1
53,5				
46,6				

4.1.2. Aço

Para a realização dos ensaios de caracterização do aço, foram retirados três corpos de prova de cada tipo de barra utilizada na armadura de flexão, sendo estas com diâmetros de 8 mm e 16 mm. Os ensaios de tração axial das barras de aço foram realizados seguindo orientações da ABNT NBR 6892:2002, sendo realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais- LEM da Universidade de Brasília. Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina da marca EMIC ligada a um computador responsável por toda aquisição dos dados dos ensaios. No APÊNDICE F estão os relatórios dos ensaios realizados.

Os resultados dos ensaios mostraram que o aço utilizado nas armaduras de flexão apresentou patamar de escoamento bem definido. Para a determinação das propriedades mecânicas das barras de aço foi utilizada a média dos resultados dos corpos de prova de cada diâmetro. A Figura 4.1.1 mostra os resultados obtidos para as barras de 8 mm e a Figura 4.1.2 mostra os resultados obtidos para as barras de diâmetro de 16 mm.

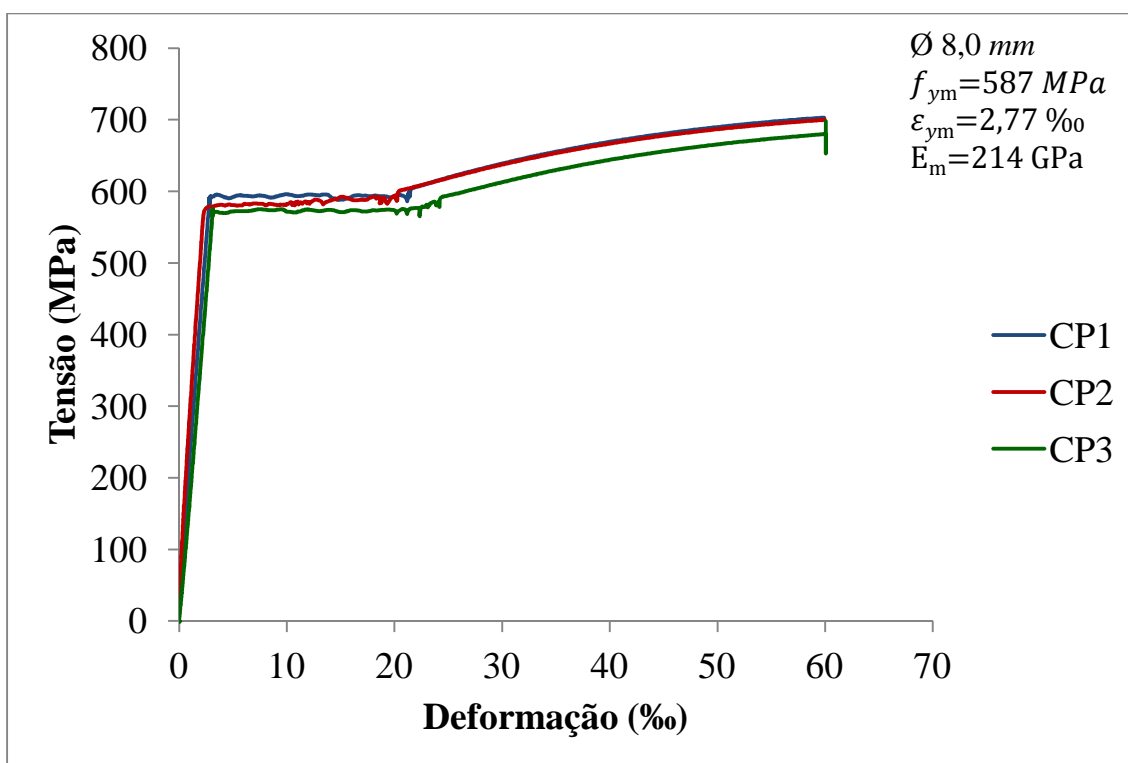


Figura 4.1.1 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 8 \text{ mm}$

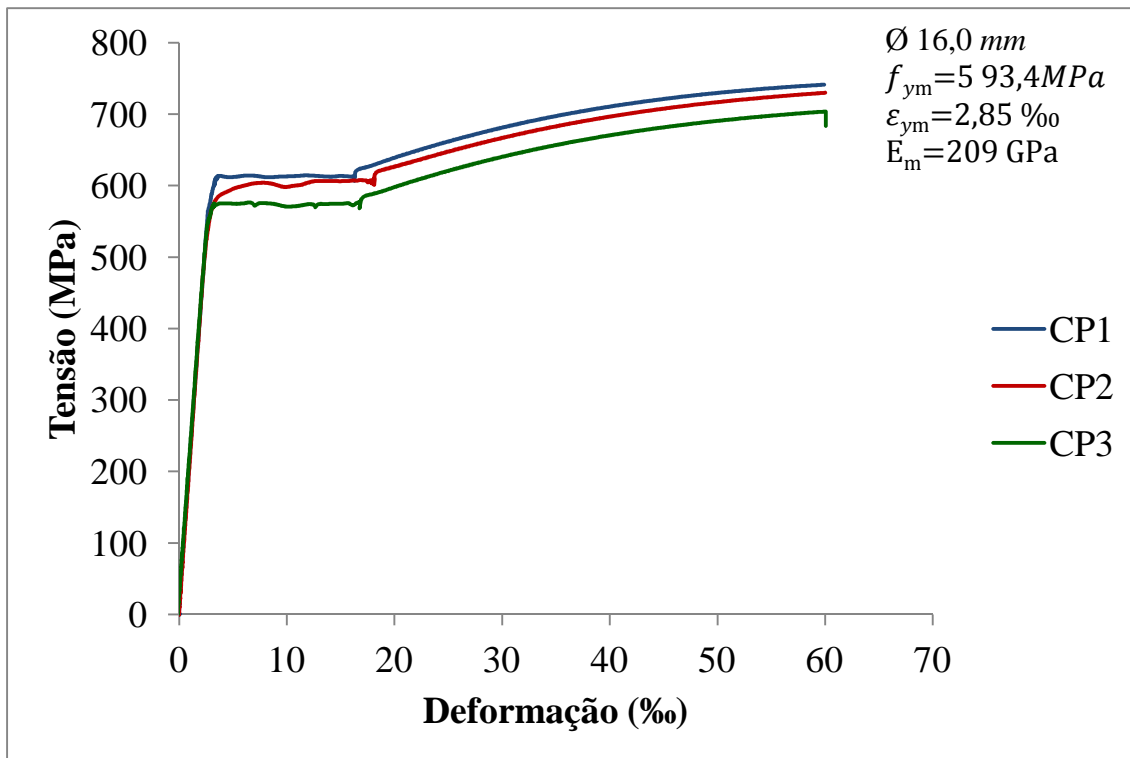


Figura 4.1.2 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16 \text{ mm}$

4.2. CARGAS ÚLTIMAS

O carregamento aplicado em todos os modelos foi simétrico e conforme descrito no item 3.9.3, especificamente de acordo como ilustra a Figura 3.9.7.

A carga última de cada modelo de laje foi obtida a partir da soma das cargas últimas lidas nos quatro indicadores digitais ilustrados na Figura 3.9.10, que estavam interligados às quatro células de carga que atuavam em conjunto com os atuadores hidráulicos mostrados na Figura 3.9.5. A Tabela 4.2 mostra um resumo da carga última de cada modelo.

Tabela 4.2 - resumo das cargas últimas dos modelos

Laje	h (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	P_{test} (kN)	Superfície de Ruptura	Pós-puncionamento (kN)
L0-1	180,0	144,2	1,45	37,1	571	-	-
LC-S1	180,0	142,5	1,48	50,0	803	dentro	340
LC-S2	180,0	144,2	1,45	50,0	892	dentro	542
LR-S	180,0	144,9	1,44	50,0	868	dentro	793

4.3. SUPERFÍCIE DE RUPTURA

Após a realização dos ensaios foram feitos cortes nos modelos para se verificar por onde passou a superfície de ruptura dos modelos reforçados. O esquema dos cortes está ilustrado na Figura 4.3.1.

A superfície de ruptura em cada um dos modelos reforçados está indicada nas figuras a baixo.

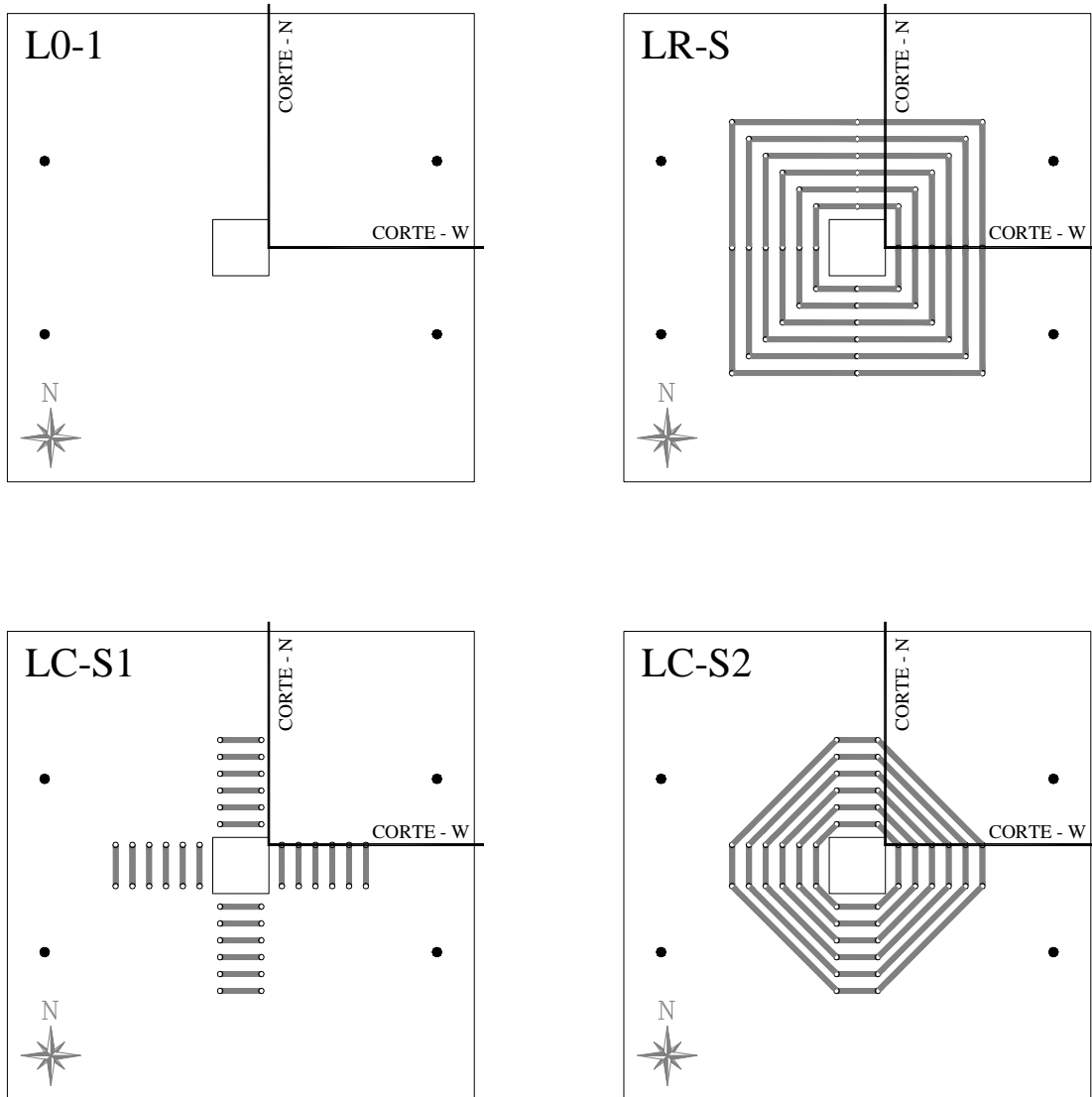


Figura 4.3.1 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm



Figura 4.3.2 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm



Figura 4.3.3 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm



Figura 4.3.4 - Curva Tensão - Deformação nas armaduras de flexão - $\Phi 16$ mm

4.4. MAPA DE FISSURAÇÃO

Durante a realização dos ensaios, a aplicação do carregamento foi feita em passos de cargas de 20 kN para os primeiros 3 passos de carga e de 40 kN para os demais, até próximo da ruptura, quando não se dava mais para precisar os passos de cargas. A cada passo de carga era dado um intervalo para se fazerem as leituras das deformações e deslocamentos, bem como para se realizar ao acompanhamento do desenvolvimento das fissuras nos modelos. Da Figura 4.4.1, a Figura 4.4.4 é mostrado o padrão de fissuras para cada modelo ensaiado.

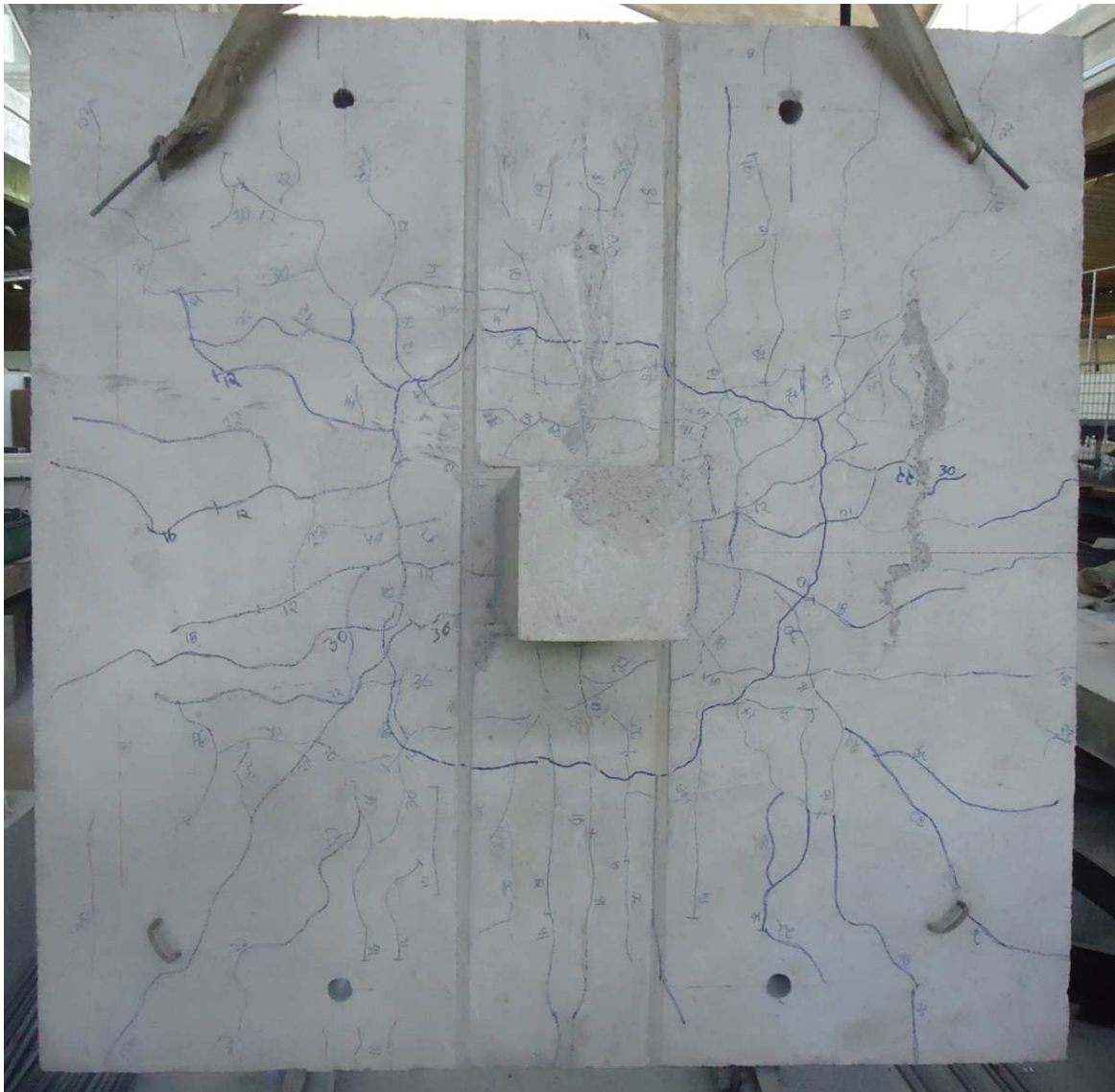


Figura 4.4.1 - Padrão de fissuração do modelo L0-01

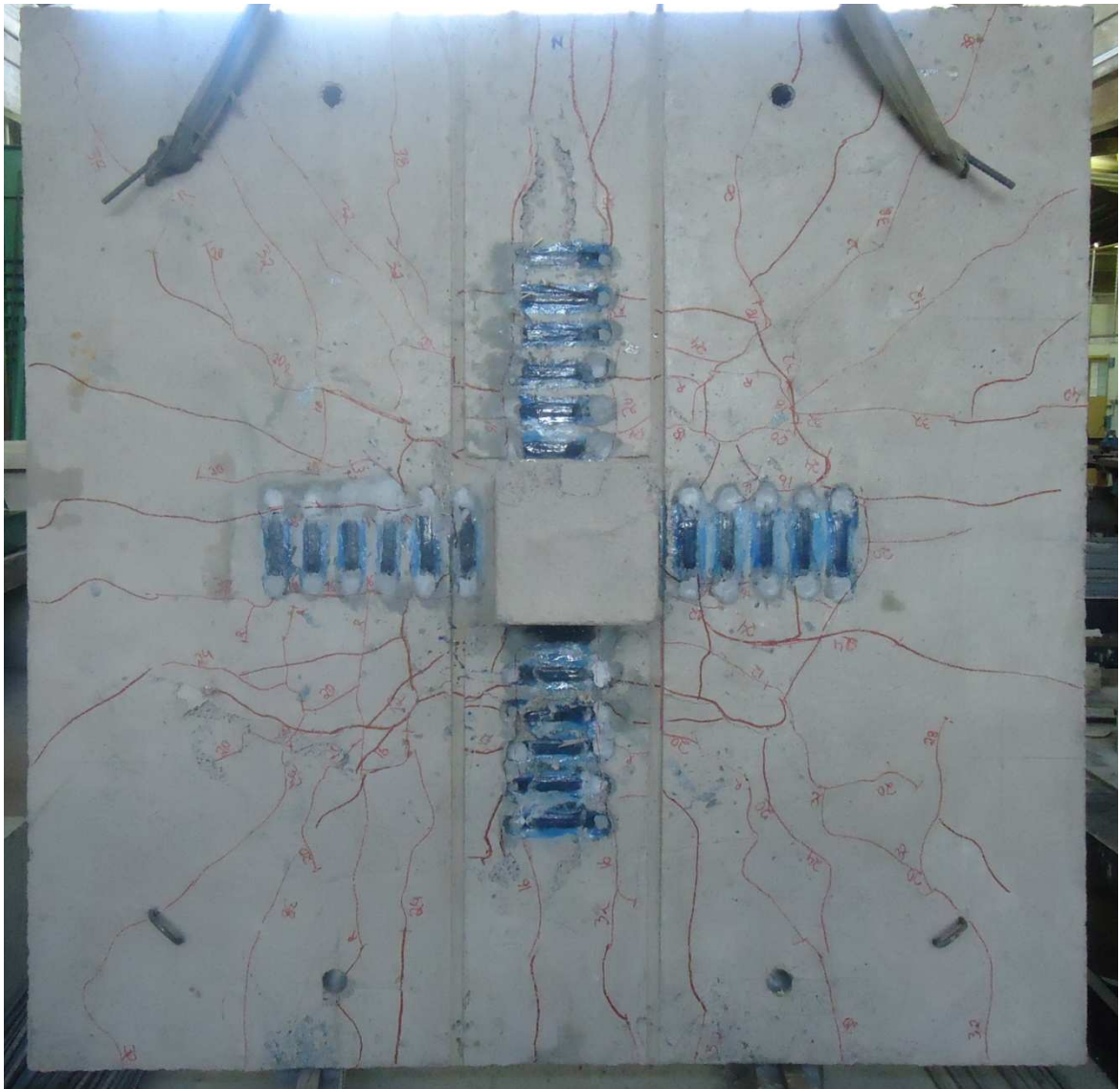


Figura 4.4.2 - Padrão de fissuração do modelo LC-S1

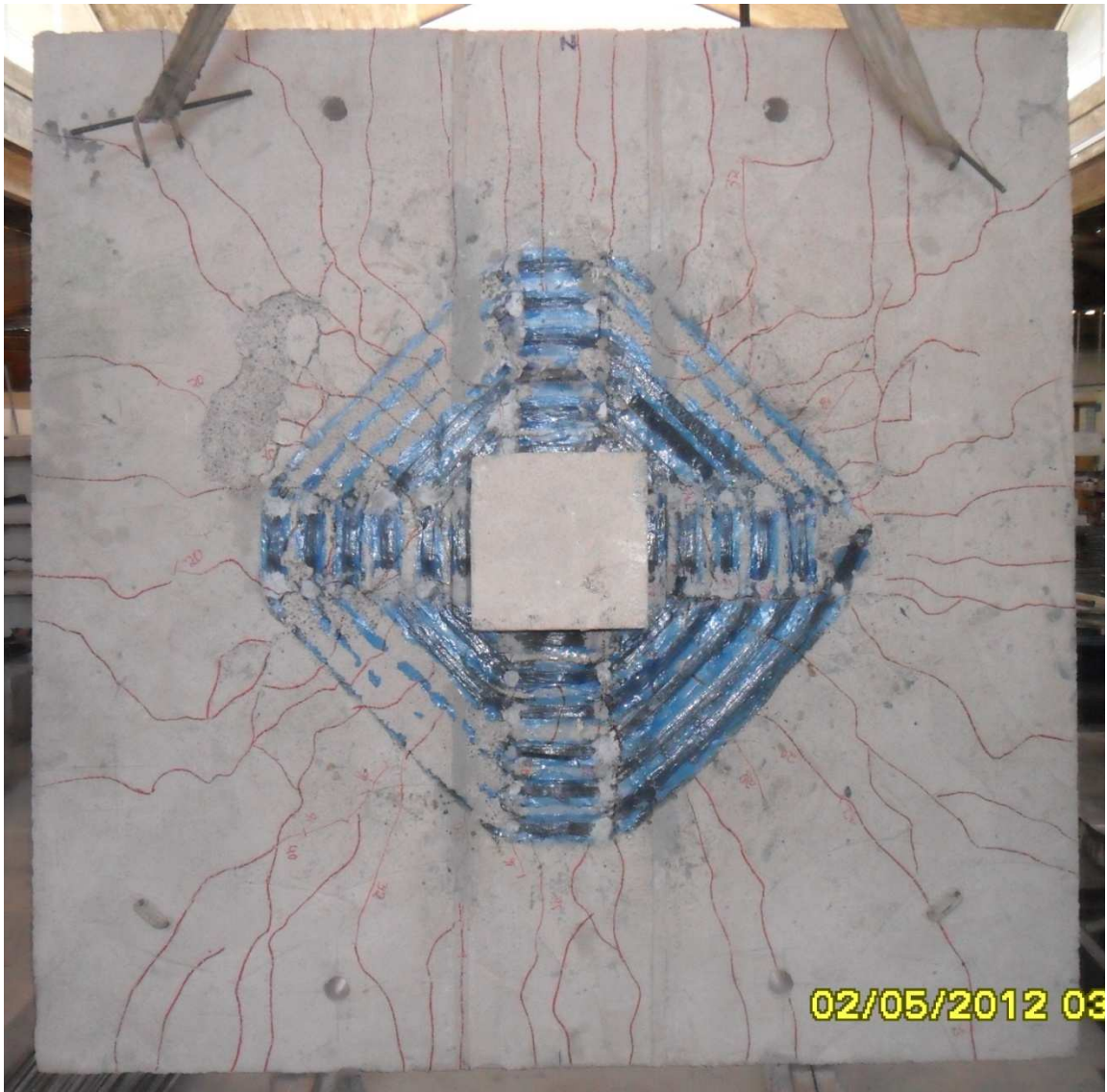


Figura 4.4.3 - Padrão de fissuração do modelo LC-S2

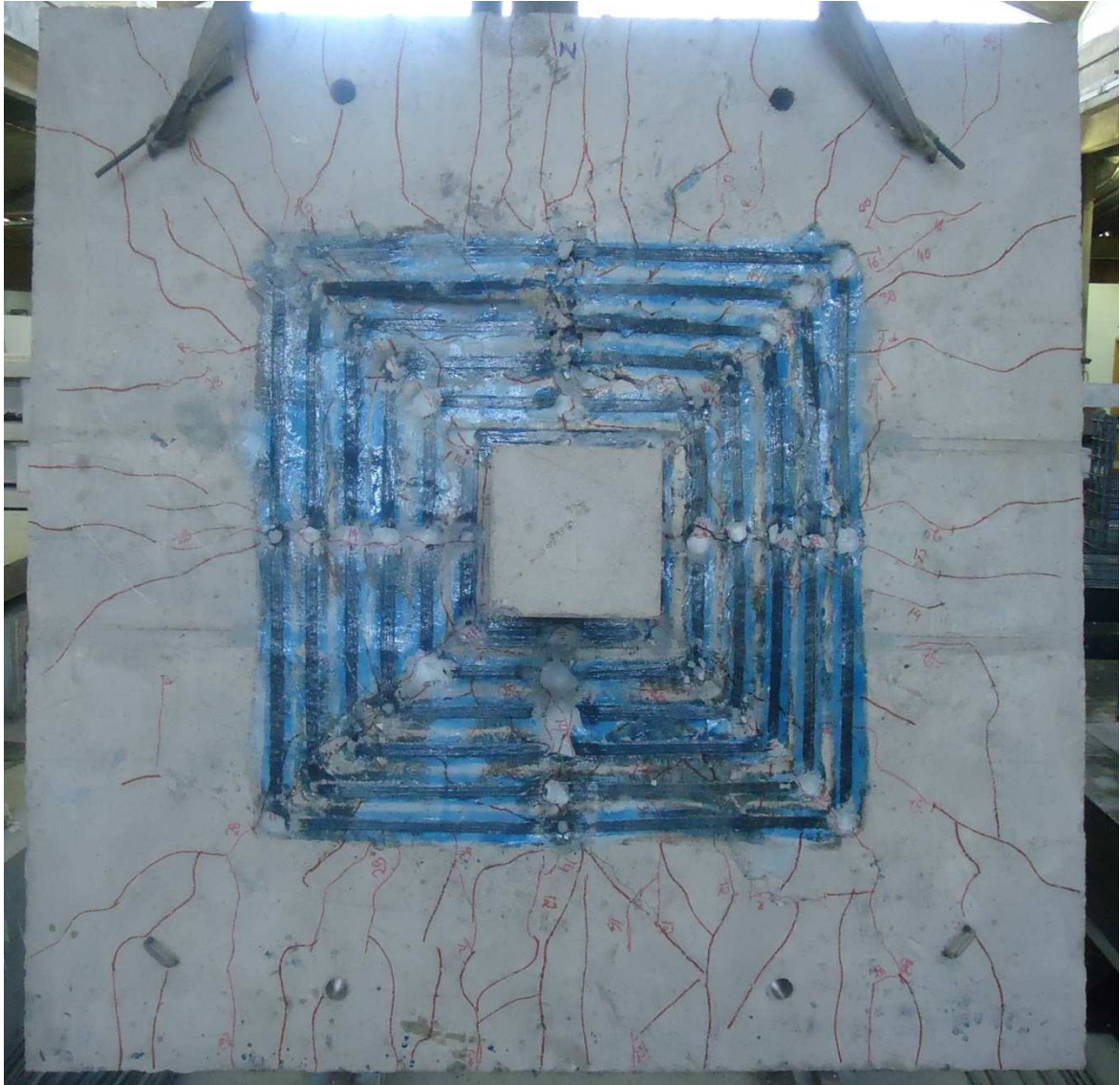


Figura 4.4.4 - Padrão de fissuração do modelo LR-S

4.5. DESLOCAMENTOS VERTICAIS NAS LAJES.

Os deslocamentos verticais foram monitorados em 12 (doze) pontos, distribuídos ao longo dos eixos de cada modelo, conforme Figura 4.5.1, fazendo-se uso de transdutores lineares de deslocamentos verticais- LVDT. A cada passo de carga, a partir de um único acionamento no sistema de aquisição de dados, eram feitas todas as leituras e armazenados simultaneamente todos os dados.

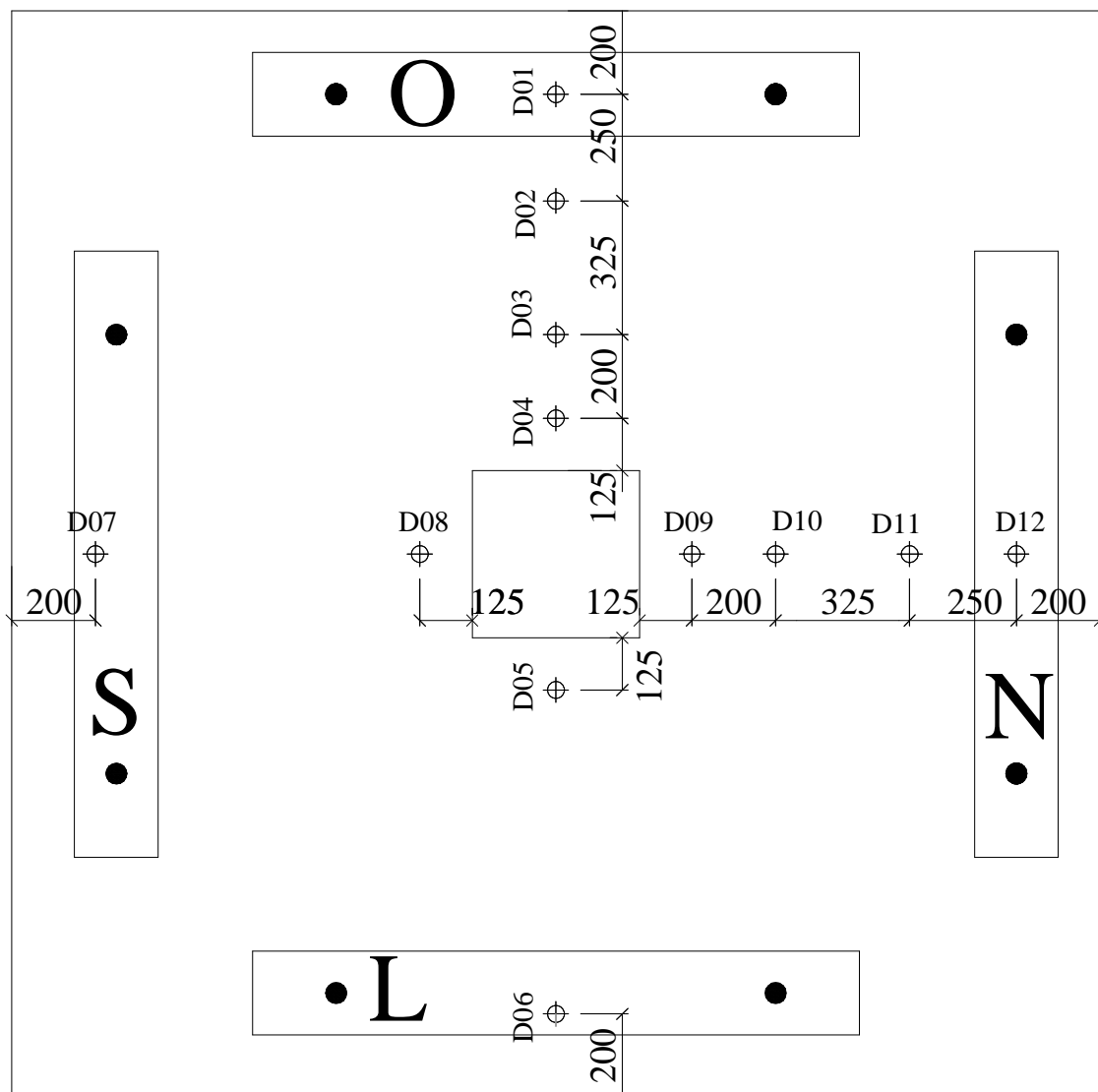


Figura 4.5.1 - Distribuição dos LVDTs para leitura dos deslocamentos verticais

Em determinado ponto, próximo à carga de ruptura dos modelos, optou-se pela retirada dos LVDT's para que os mesmos não viessem a ser danificados. Após a conclusão dos ensaios, verificou-se que a retirada dos LVDT's ocorreu há 3 (três) ou 4 (quatro) passos de carga antes da ruptura. Os deslocamentos verticais verificados nas lajes nas direções norte-sul e leste-oeste, para diferentes passos de cargas até o mais próximo da ruptura, estão ilustrados nas Figuras 4.4.2 a 4.4.9.

Deslocamentos na direção N-S

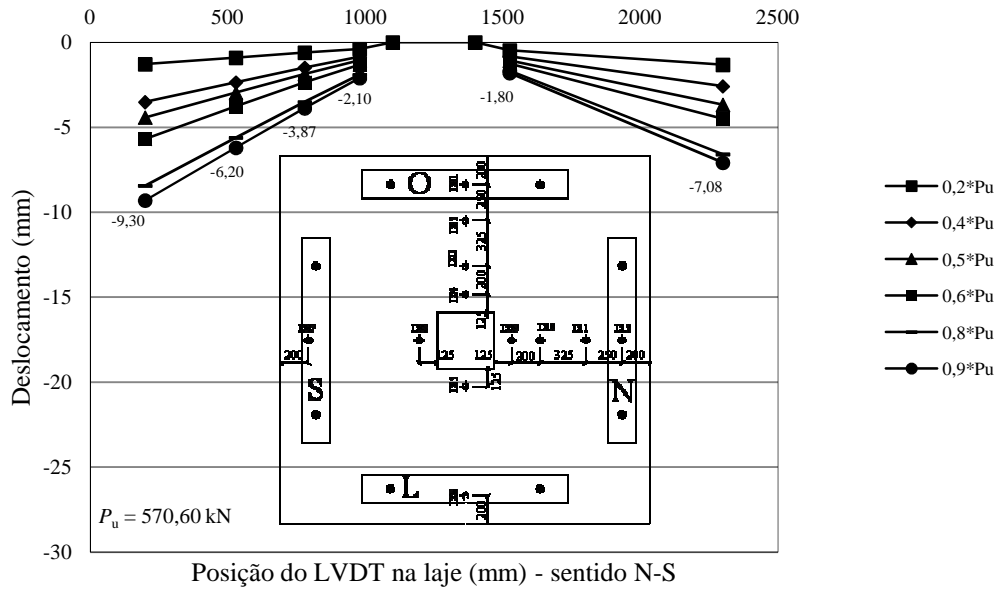


Figura 4.5.2 - Deslocamentos verticais na laje L0-01 - direção N-S

Deslocamentos na direção L-O

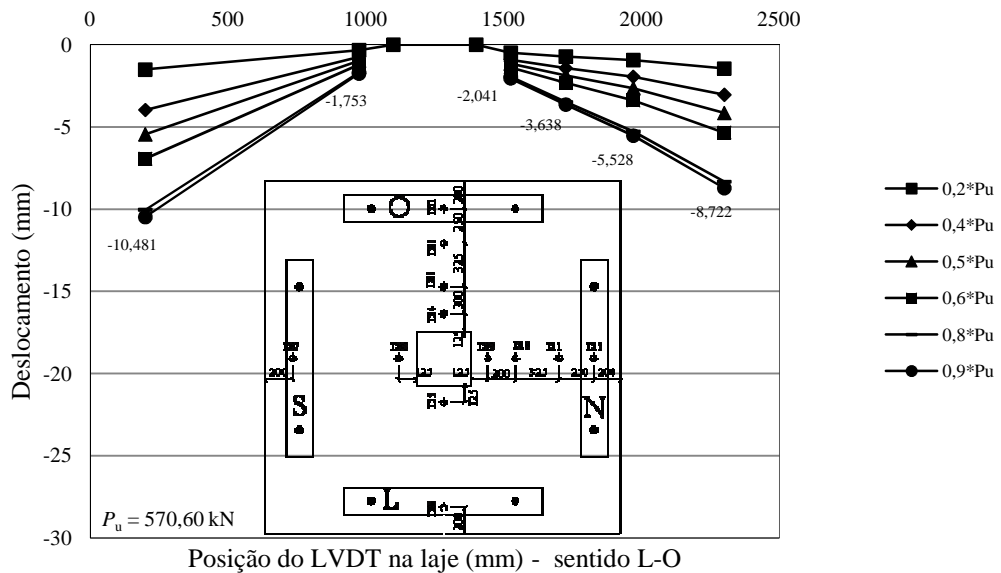


Figura 4.5.3 - Deslocamentos verticais na laje L0-01 - direção L-O

Deslocamentos na direção N-S

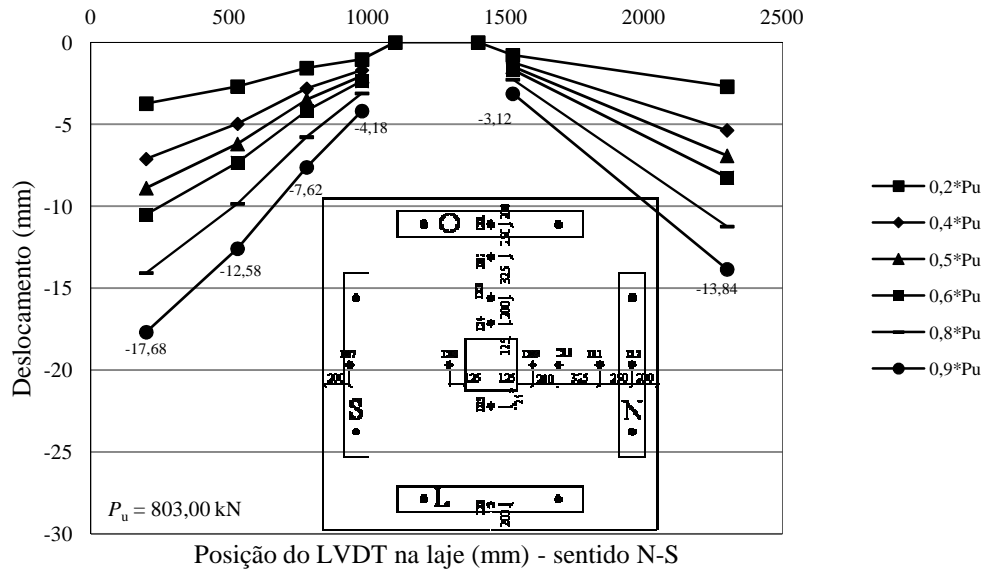


Figura 4.5.4 - Deslocamentos verticais na laje LC-S1 - direção N-S

Deslocamentos na direção L-O

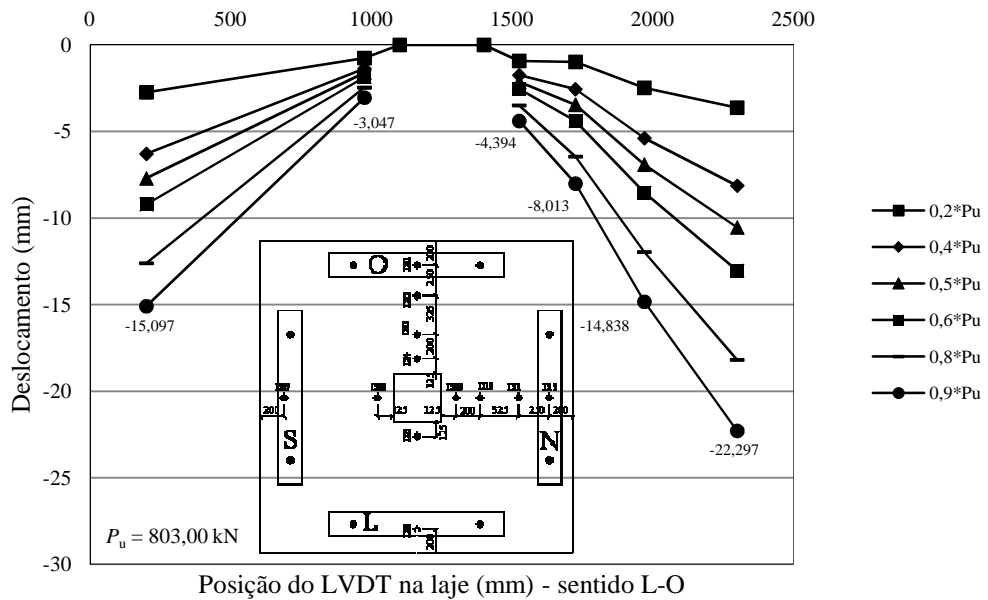


Figura 4.5.5 - Deslocamentos verticais na laje LC-S1 - direção L-O

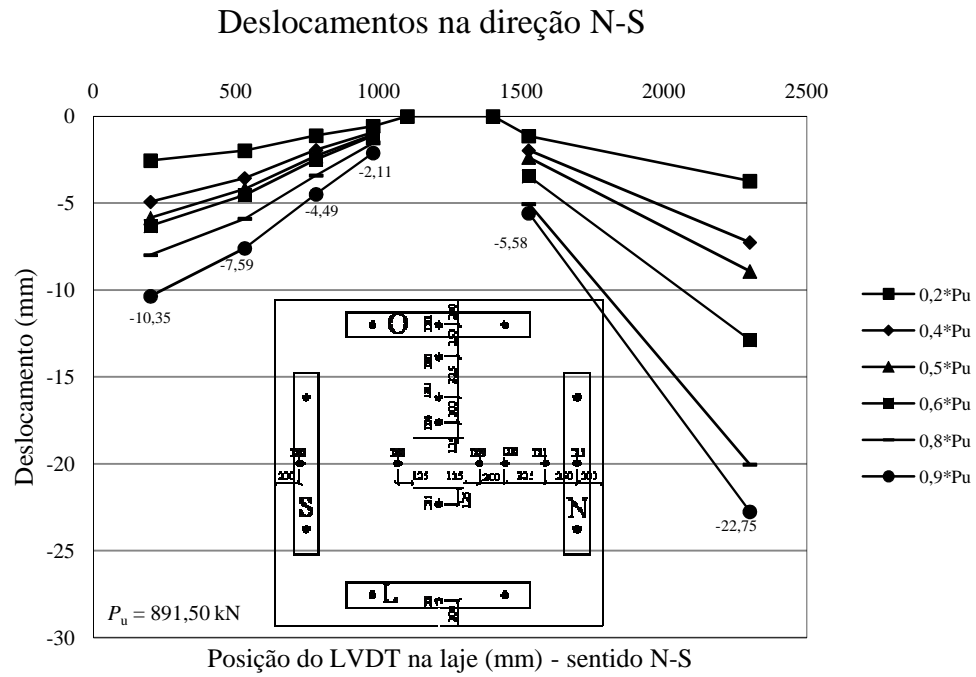


Figura 4.5.6 - Deslocamentos verticais na laje LC-S2 - direção N-S

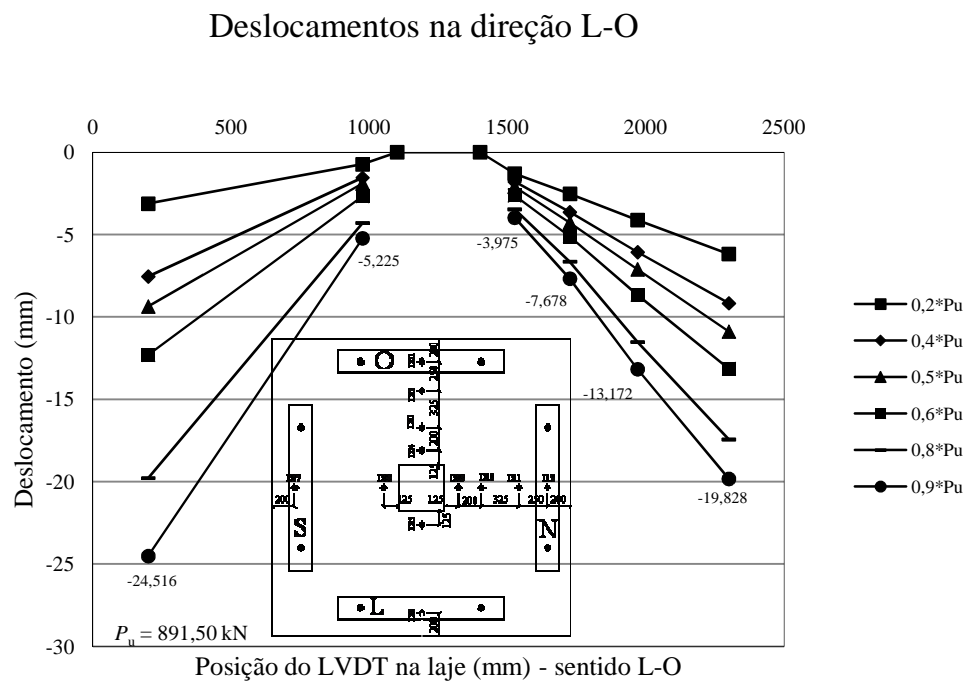


Figura 4.5.7 - Deslocamentos verticais na laje LC-S2 - direção L-O

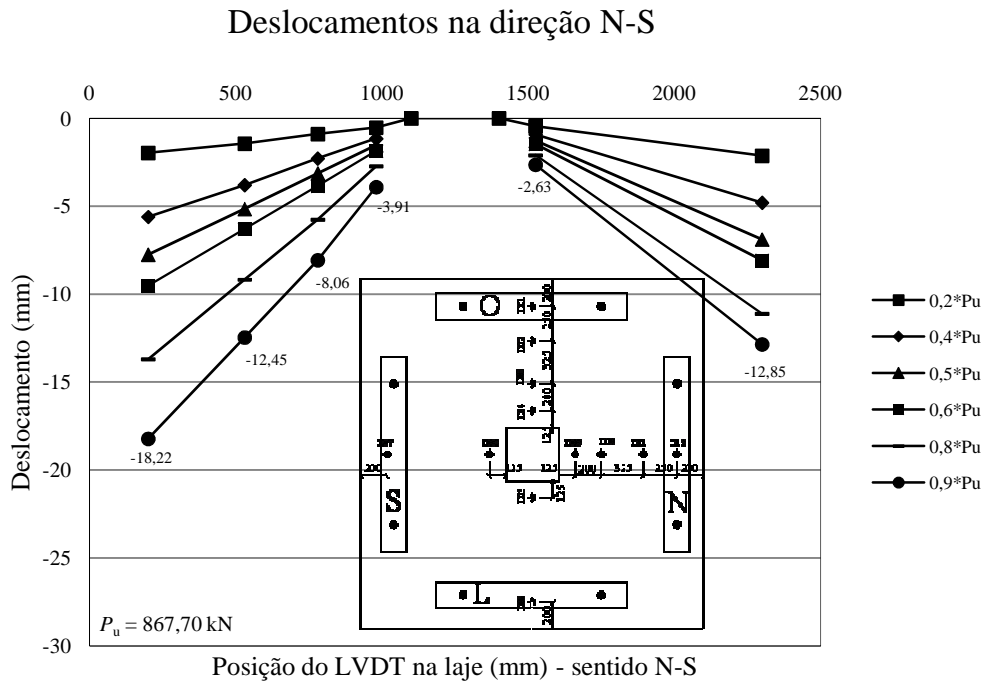


Figura 4.5.8 - Deslocamentos verticais na laje LR-S- direção N-S

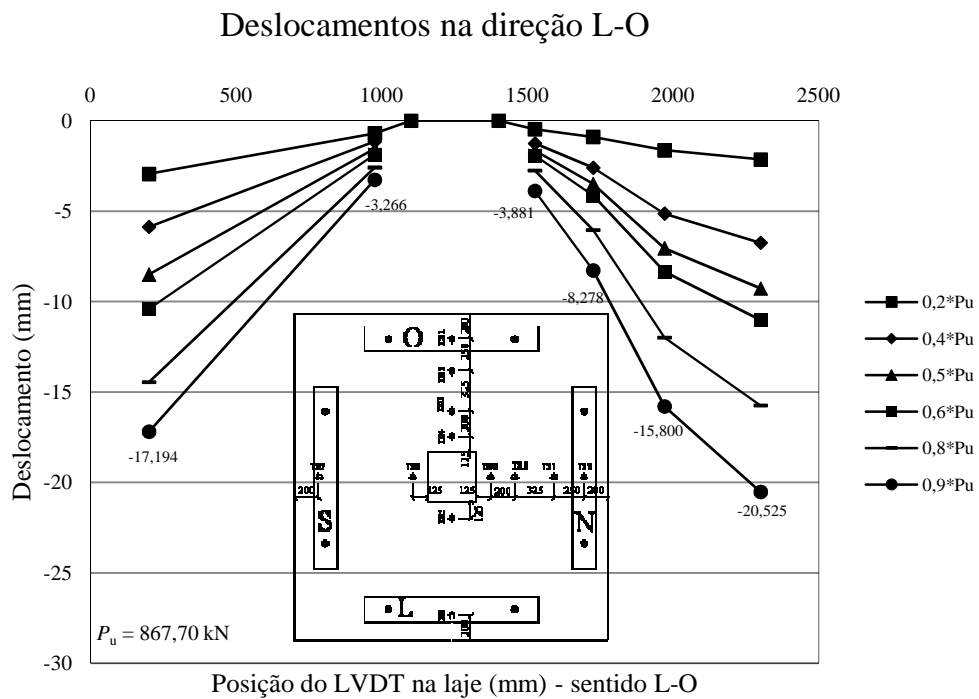


Figura 4.5.9 - Deslocamentos verticais na laje LR-S - direção L-O

DA Figura 4.5.10 a Figura 4.5.13 são mostrados os deslocamentos medidos pelos LVDTs 01, 06, 07 e 12 e da Figura 4.5.14 a Figura 4.5.17 são mostrados os deslocamentos verticais medidos pelos LVDTs 04, 05, 08 e 09, ilustrando os deslocamentos verticais nos pontos mais próximos das bordas dos modelos e nos pontos mais próximos do pilar respectivamente, para todos os modelos.

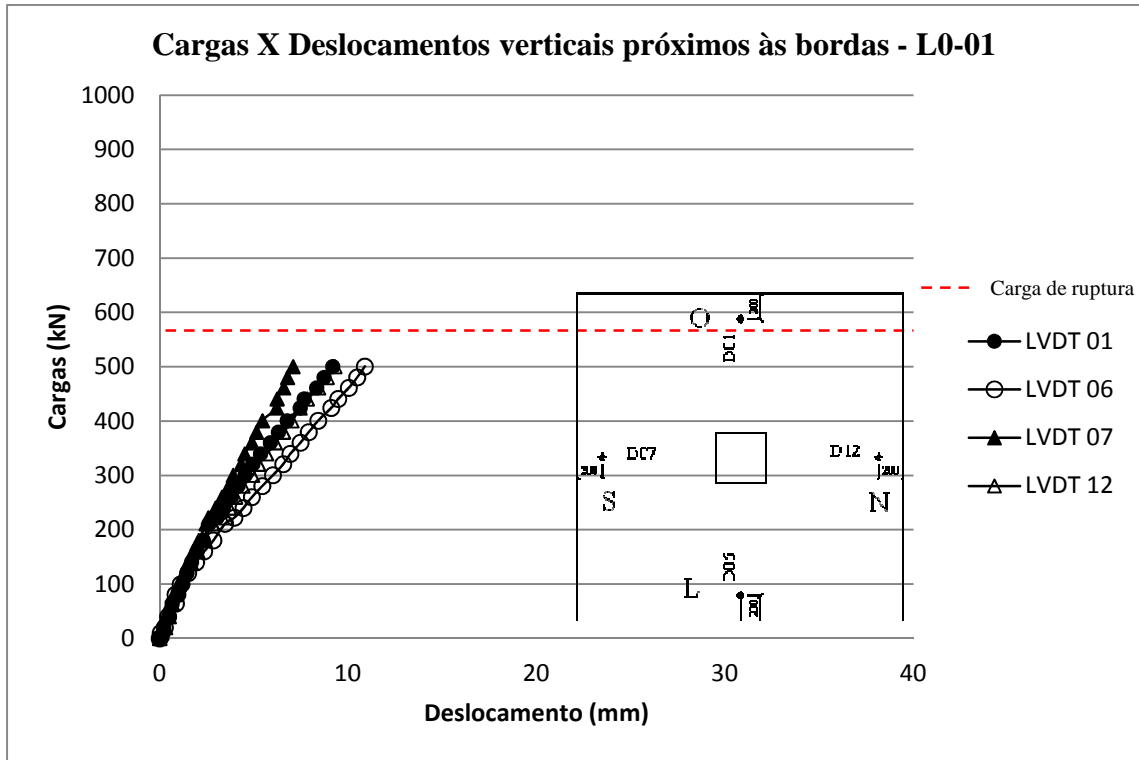


Figura 4.5.10 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- L0-01

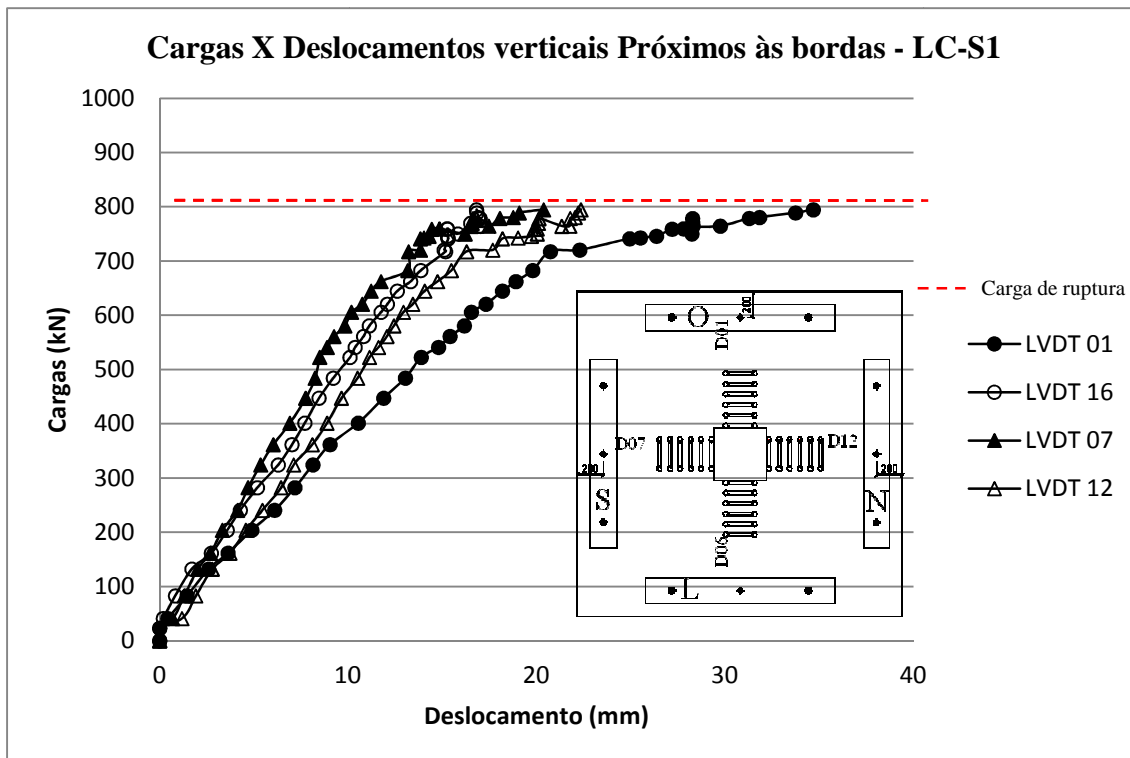


Figura 4.5.11 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- LC-S1

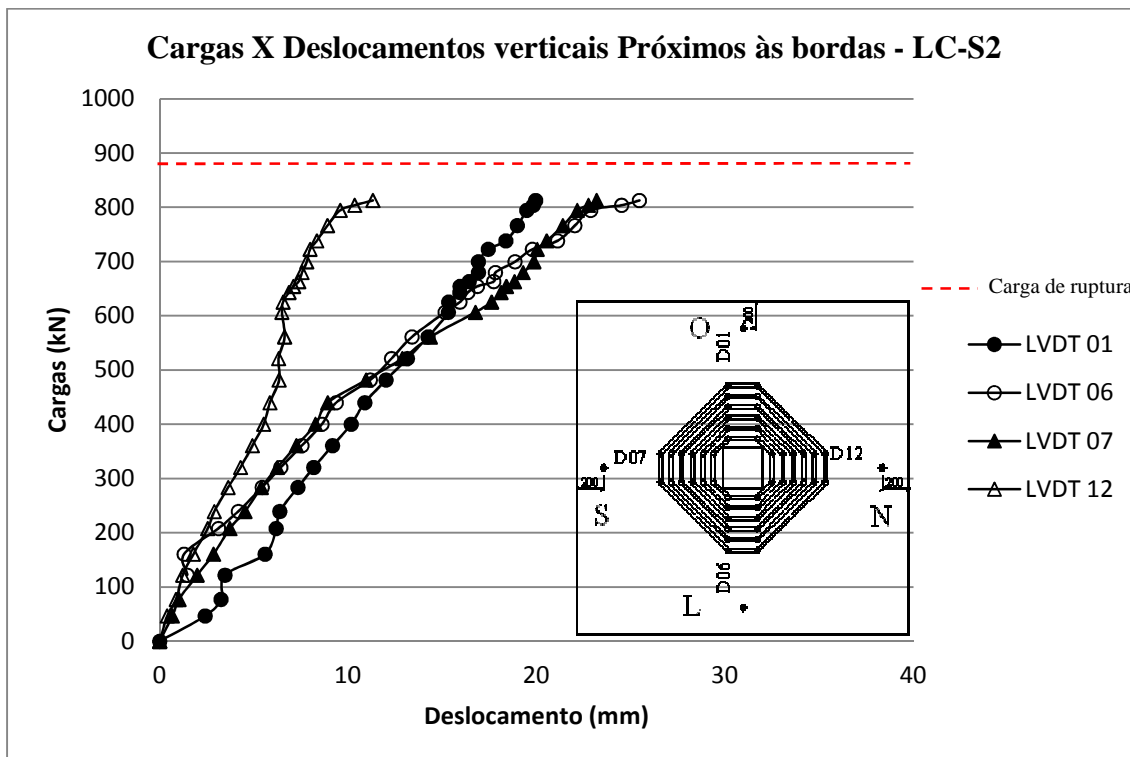


Figura 4.5.12 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- LC-S2

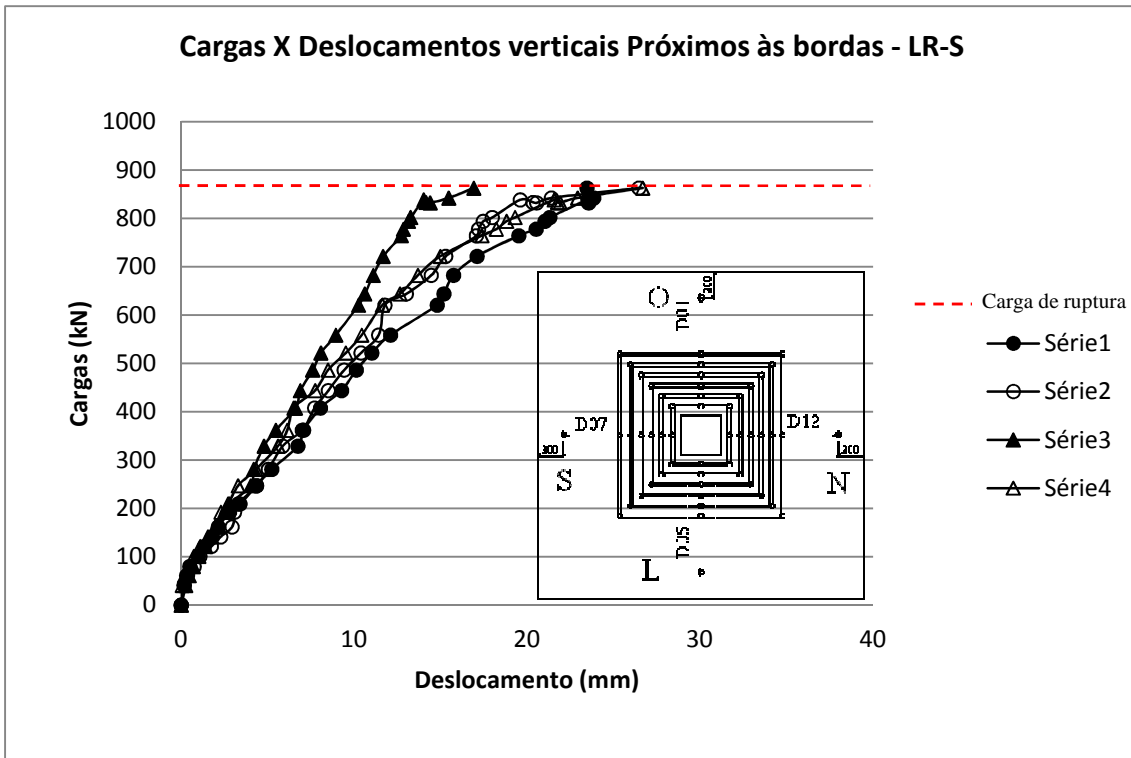


Figura 4.5.13 - Deslocamentos verticais próximos às bordas- LR-S

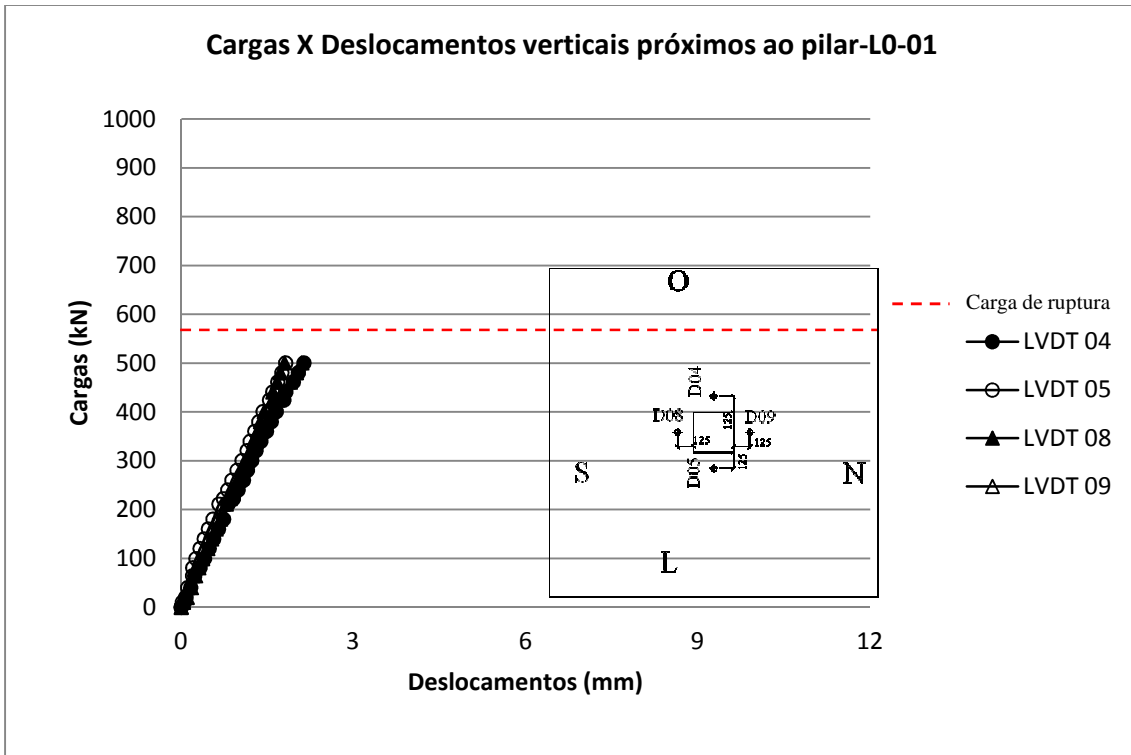


Figura 4.5.14 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar – L0-01

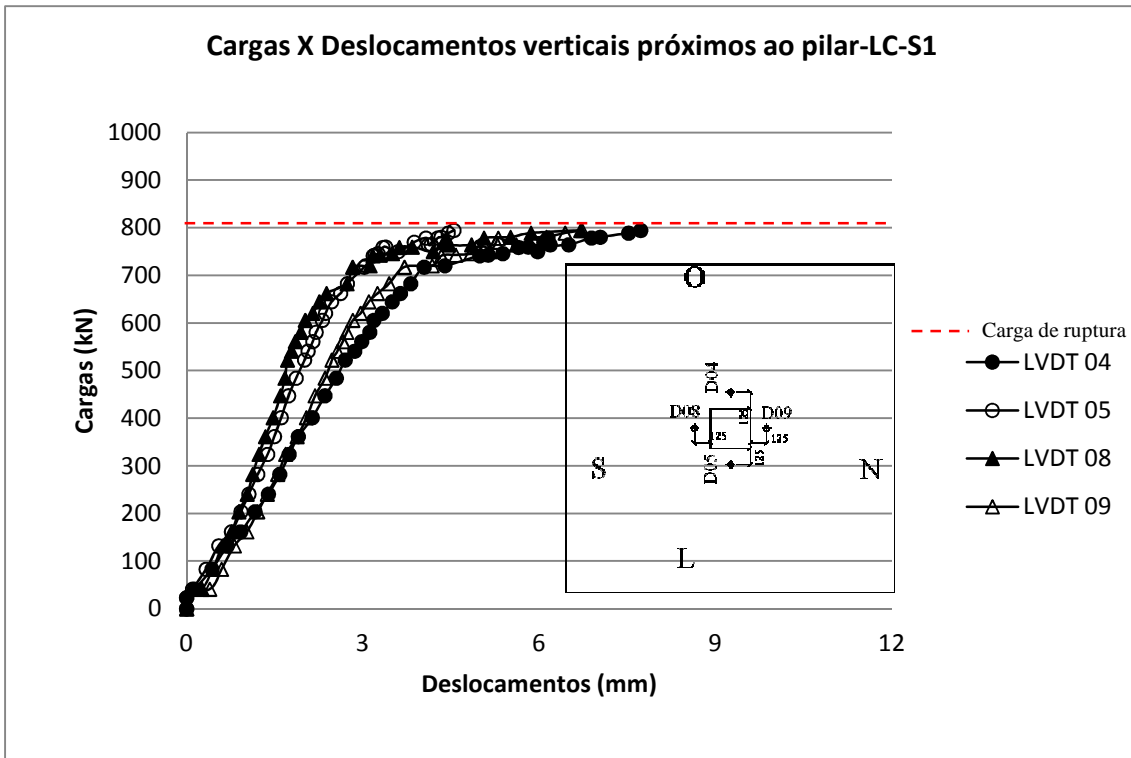


Figura 4.5.15 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar - LC-S1

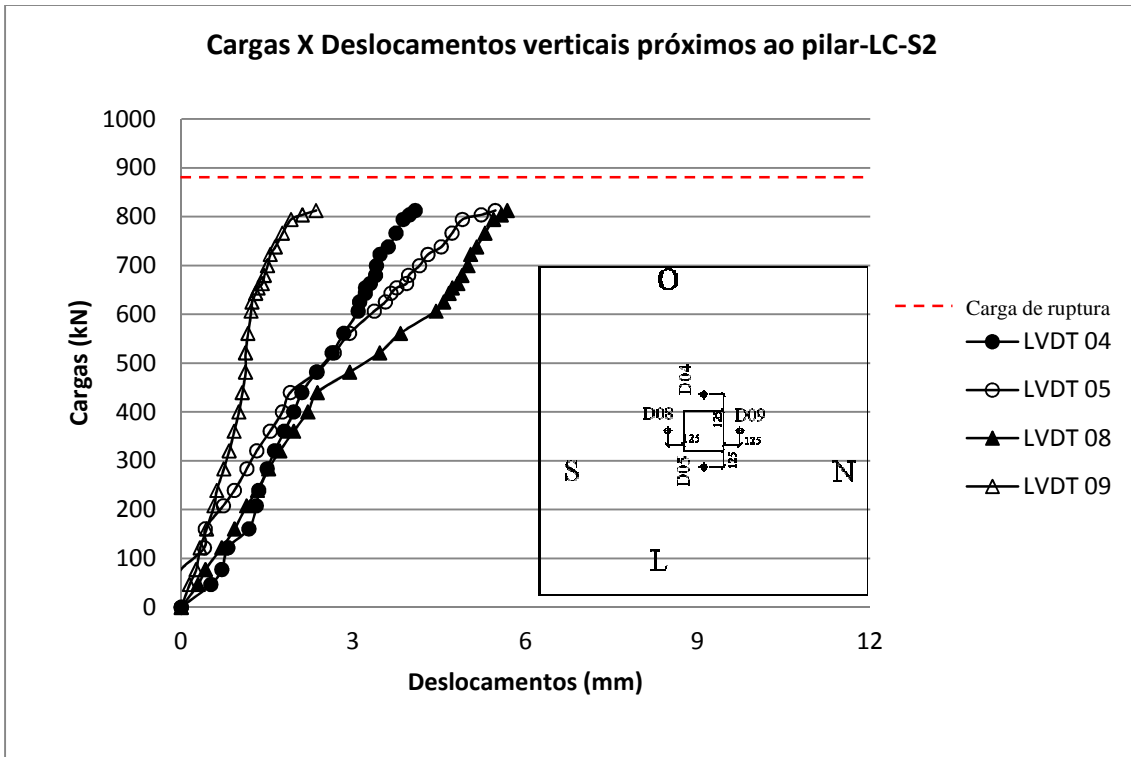


Figura 4.5.16 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar - LC-S2

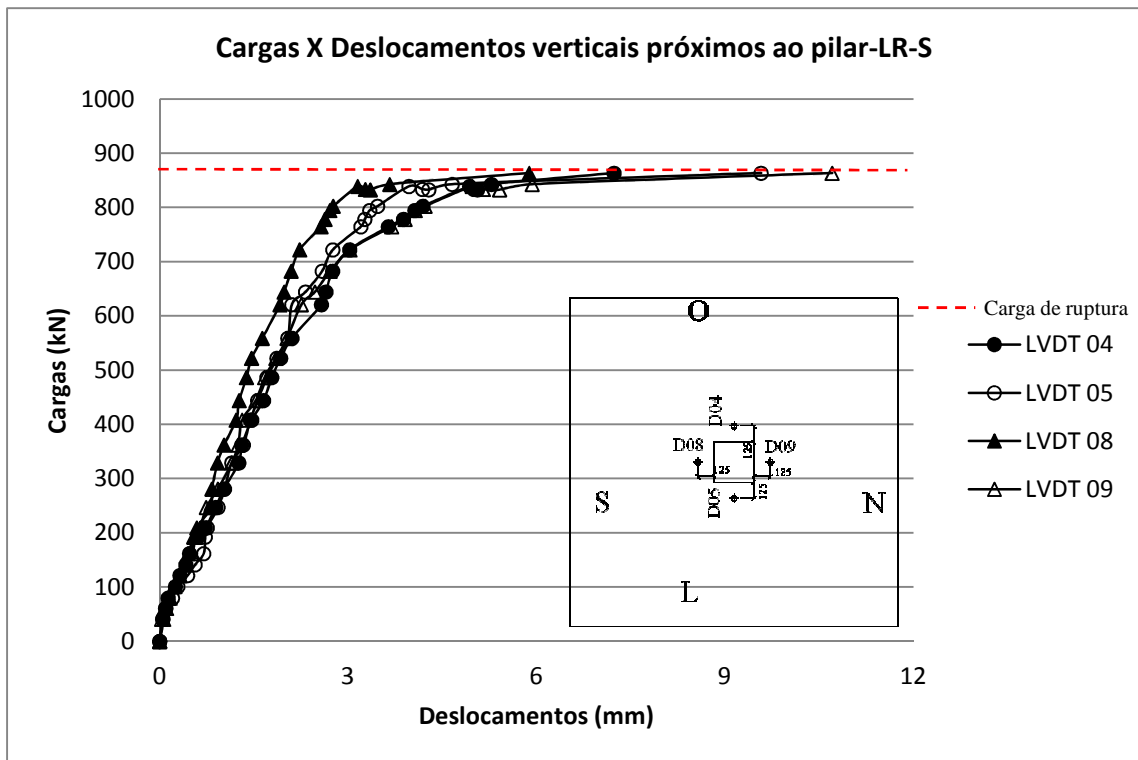


Figura 4.5.17 - Deslocamentos verticais próximos ao pilar - LR-S

Para uma melhor comparação, a Figura 4.5.18 mostra, simultaneamente, o gráfico dos deslocamentos verticais próximos às bordas em cada modelo, ao longo dos ensaios.

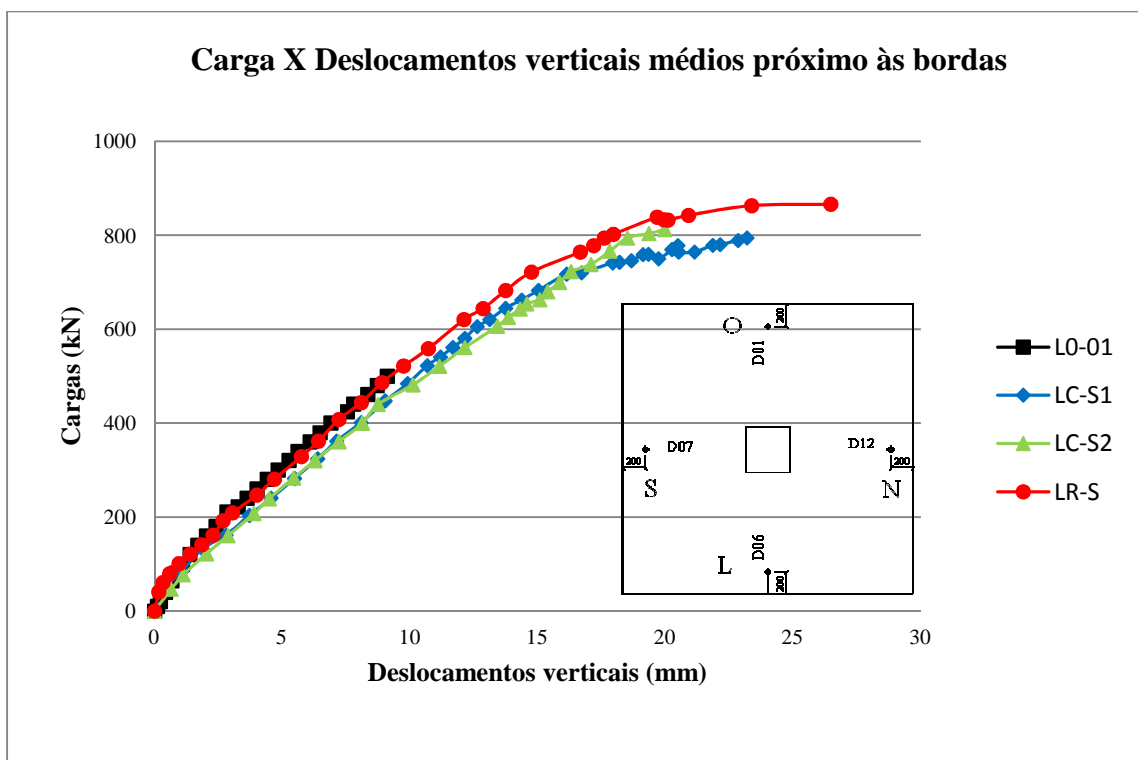


Figura 4.5.18 -Cargas x Deslocamentos verticais médios próximos às bordas para todos os modelos

4.6. DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO.

A medida das deformações específica no concreto foi obtida com extensômetros elétricos de resistência que foram posicionados na região próxima do pilar. A locação e posição desses extensômetros foram planejadas de modo a propiciar o acompanhamento das deformações radiais (EC01 e EC02) e tangenciais (EC03 e EC04) naquela região ao longo do desenvolvimento do ensaio. Foi instalado um par de extensômetros no eixo norte-sul e outro no leste-oeste do pilar, em cada modelo ensaiado, conforme ilustra a Figura 4.6.1. No entanto, para o modelo LR-S o par de extensômetros foi deslocado para o lado, conforme Figura 4.6.2, pelo fato da posição inicial coincidir com um dos furos onde foi aplicado o reforço. Pelo fato do carregamento, bem como os próprios modelos, ser simétrico e os pares de extensômetros se encontrarem em posições semelhantes, esperava-se por valores próximos para as medidas de cada modelo.

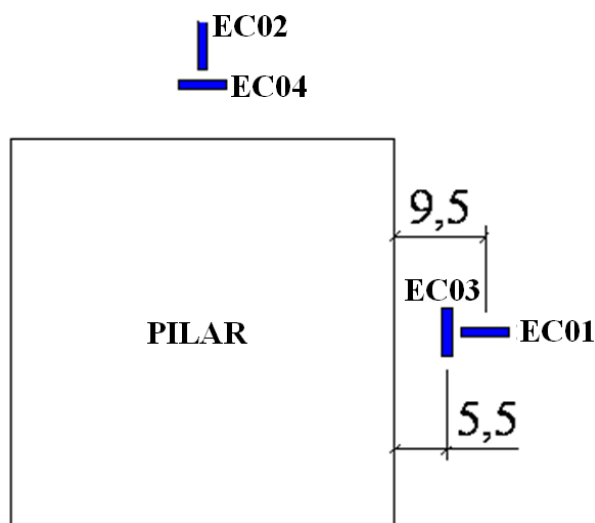


Figura 4.6.1 - Extensometria do concreto nos modelos L0-01, LC-S1 e LC-S2

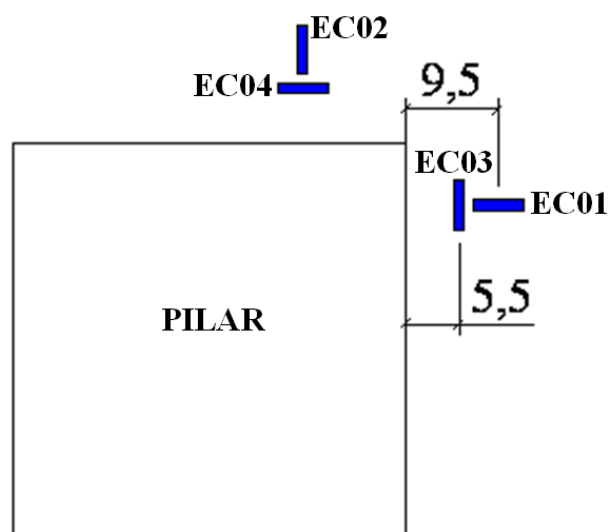


Figura 4.6.2 - Extensometria do concreto no modelo LR-S

Os extensômetros tangenciais foram posicionados a 55 mm da face do pilar, enquanto que os extensômetros radiais foram instalados a 95 mm da face do pilar.

Os valores encontrados para as deformações na superfície do concreto registrados pelos quatro extensômetros, em cada um dos modelos ensaiados, estão ilustrados nas Figuras 4.5.3 a 4.5.6.

Carga - Deformação na superfície do concreto - L0-01

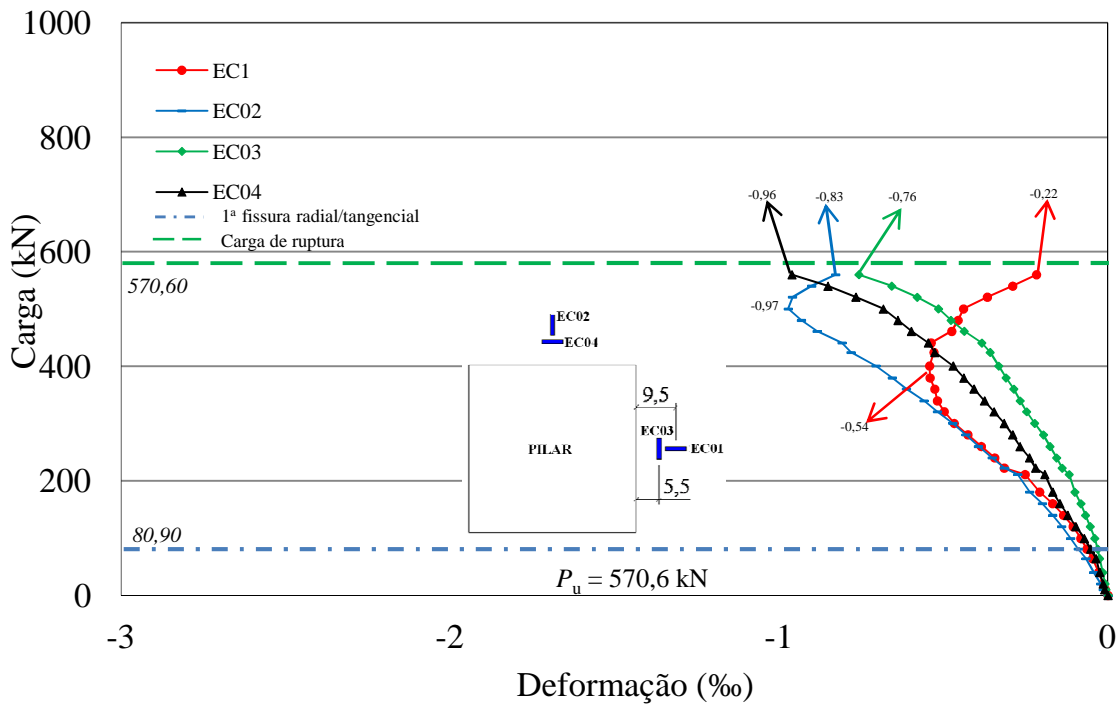


Figura 4.6.3 - Gráfico Carga X Deformação no concreto - L0-01

Carga - Deformação na superfície do concreto - LC-S1

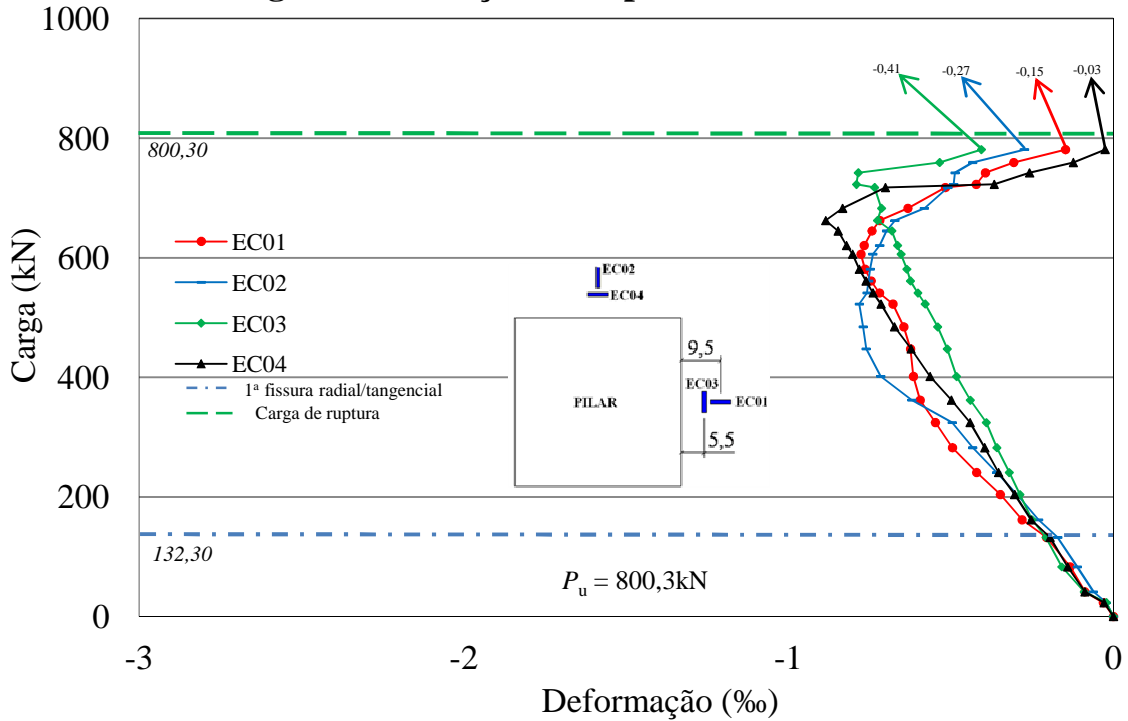


Figura 4.6.4 - Gráfico Carga x Deformação no concreto - LC-S1

Carga - Deformação na superfície do concreto - LC-S2

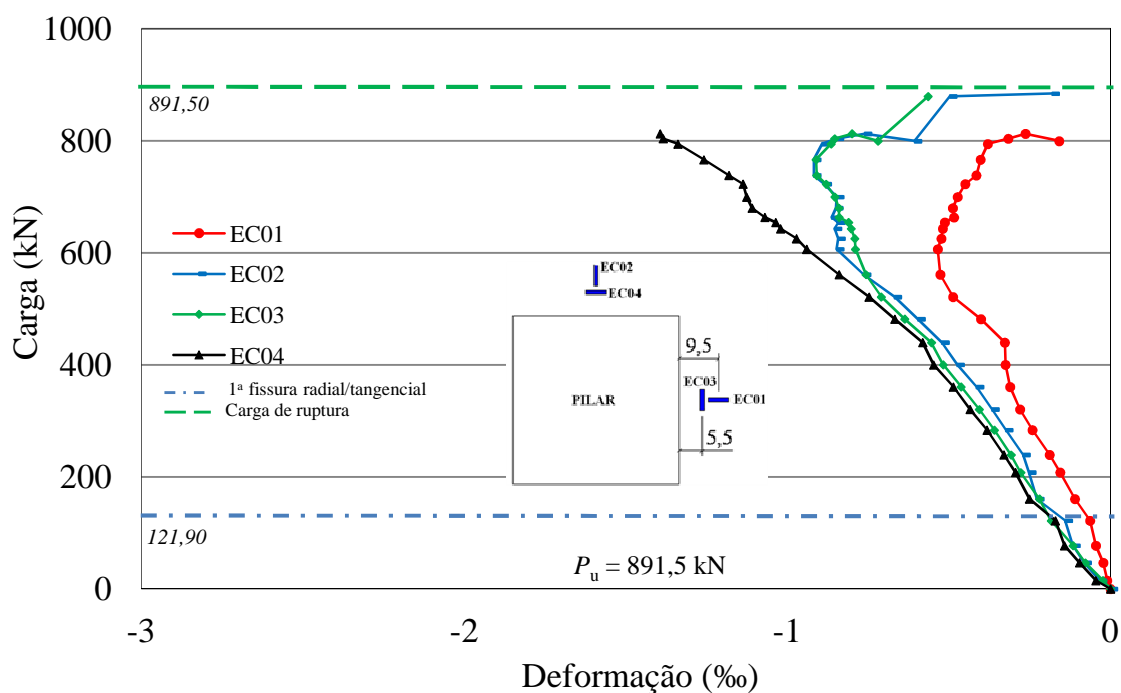


Figura 4.6.5 - Gráfico Carga x Deformação no concreto - LC-S2

Carga - Deformação na superfície do concreto - LR-S

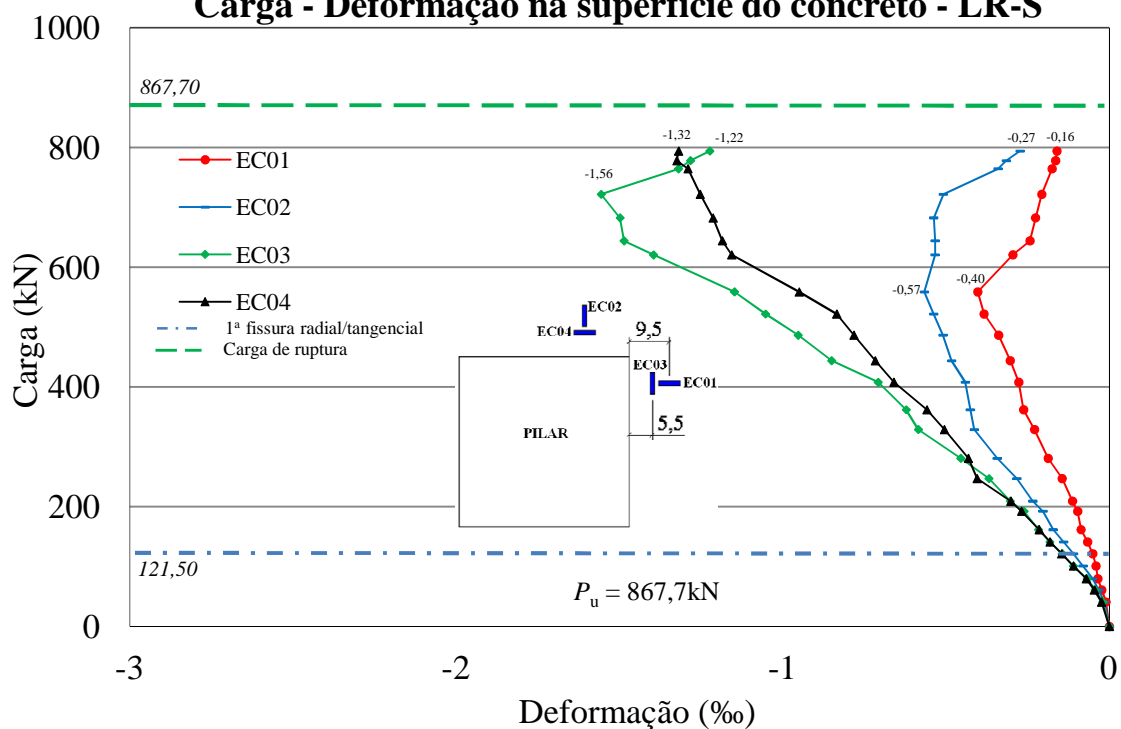


Figura 4.6.6 - Gráfico Carga x Deformação no concreto - LR-S

As Figuras 4.5.7 a 4.5.10 mostram os gráficos das deformações tangenciais e radiais médias no concreto, em função das cargas aplicadas, durante o ensaio. Os valores das

deformações tangenciais foram obtidos a partir da média dos extensômetros EC03 e EC04, enquanto que os valores das deformações radiais foram obtidos através da média do extensômetros EC01 e EC02, em cada modelo ensaiado.

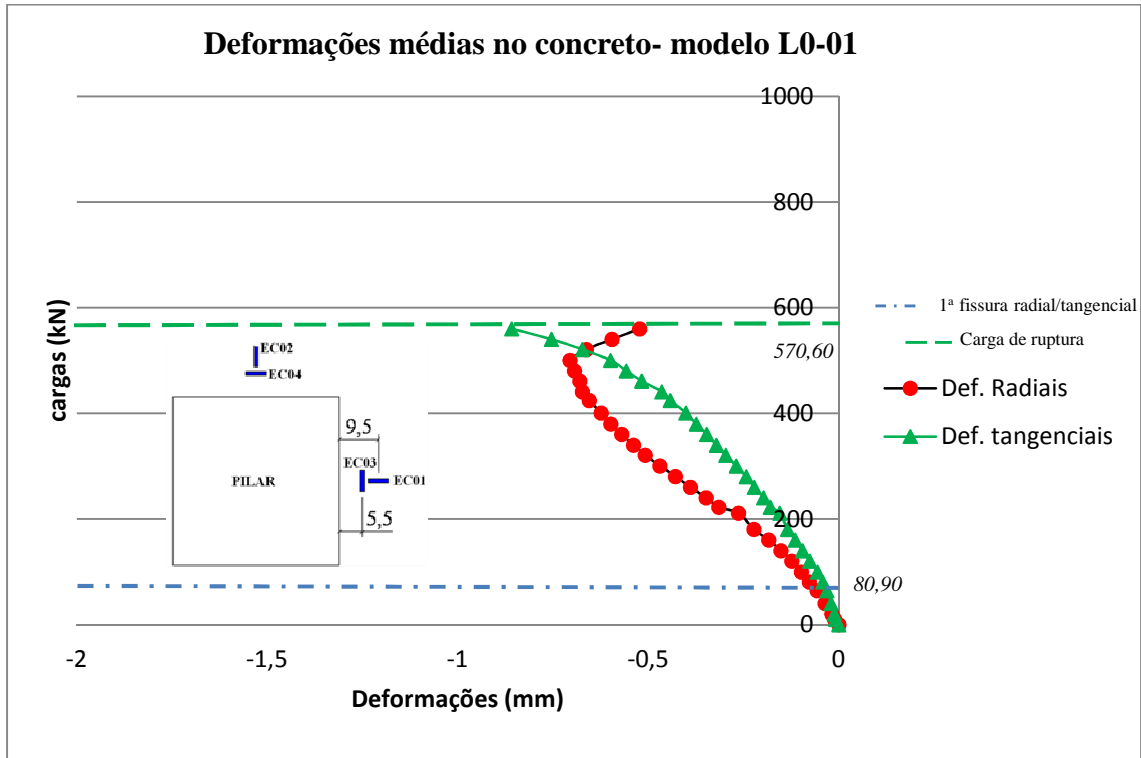


Figura 4.6.7 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto – L0-01

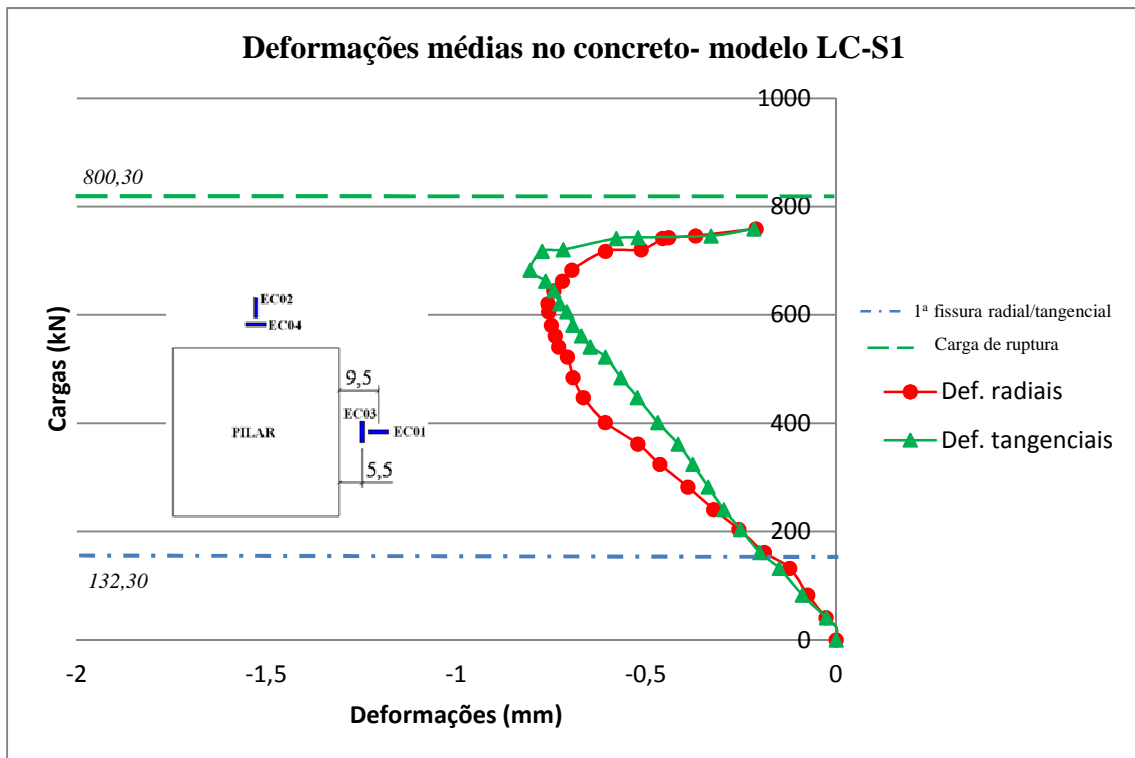


Figura 4.6.8 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto - LC-S1

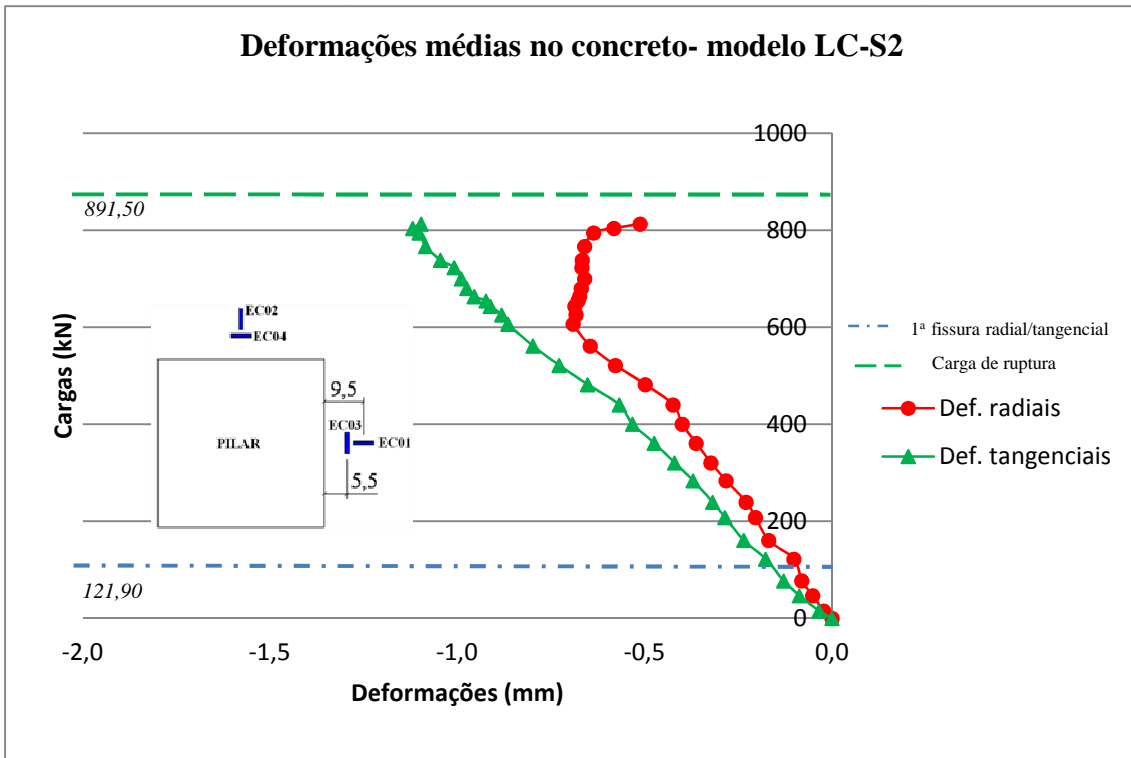


Figura 4.6.9 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto - LC-S2

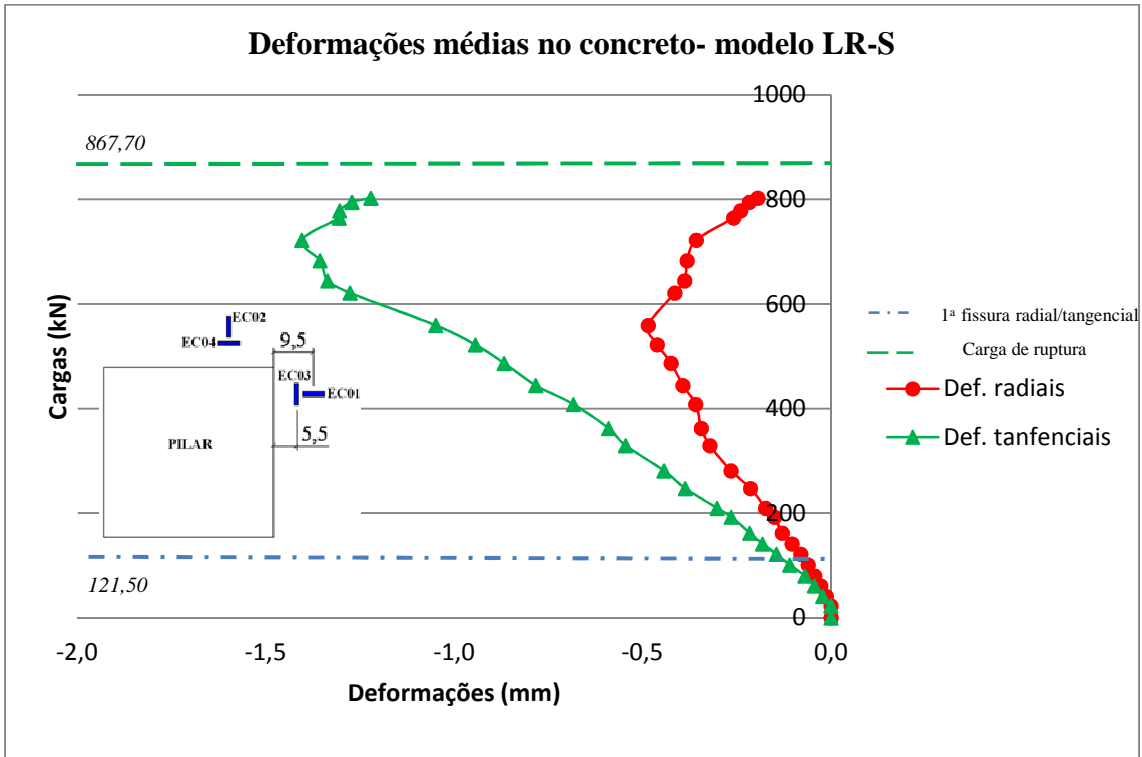


Figura 4.6.10 - Gráfico Carga x Deformação média no concreto - LR-S

4.7. DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NA AMADURA DE FLEXÃO.

As deformações nas armaduras de flexão foram monitoradas em quatro pontos distintos, tanto nas barras superiores quanto nas barras inferiores, conforme ilustram as Figuras 3.8.1 e 3.8.2. Em cada ponto instrumentado foram colados dois extensômetros diametralmente opostos, formando um par.

Tanto nas armaduras superiores como nas inferiores decidiu-se colocar um par de extensômetros em cada um dos sentidos, norte-sul e leste-oeste, passando pela face do pilar. Os pares de extensômetros EF01 e EF03 foram alocados justamente nas faces do pilar, portanto, eram esperados valores de deformações aproximadamente iguais para esses pares de extensômetros.

Os pares de extensômetros EF02 e EF04 foram colocados ao longo da mesma barra instrumentada por EF03, conforme se vê na Figura 3.8.1. Durante a fase de concepção da instrumentação, decidiu-se por instalar o par de extensômetros EF02 em uma posição simétrica à inicial, que seria entre os pares de extensômetros EF03 e EF04, distante 250 mm da face do pilar, a fim de se evitar um aglomerado de extensômetros e fios em um pequeno espaço da mesma barra de flexão e não prejudicar a aderência do concreto naquela região. No entanto, na confecção dos gráficos, ressaltamos que foi mantida a distância dos referidos pares de extensômetros à face do pilar. Da Figura 4.7.1 à Figura 4.7.4 são mostradas as deformações na armadura de flexão ao longo do comprimento de cada modelo.

O primeiro ponto de medida refere-se ao par de extensômetros EF03 faceando o pilar, já o segundo ponto é o par de extensômetros EF02, distante 250 mm da face do pilar. O terceiro ponto de captação de dados é o par de extensômetros EF04, distantes 520 mm da face do pilar.

Cargas x Deformações na armadura de flexão - L0-01

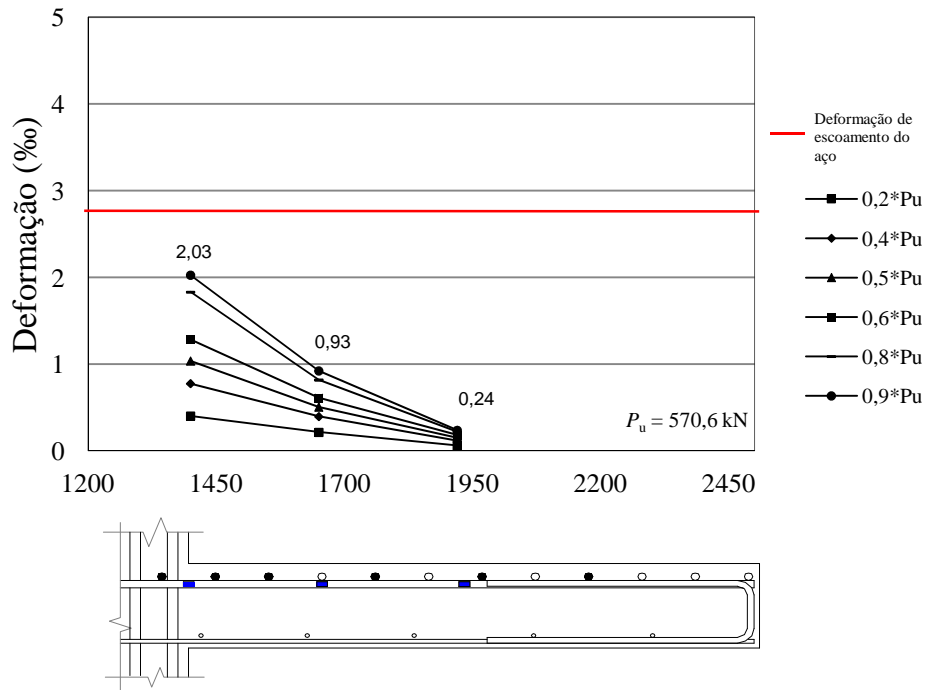


Figura 4.7.1 - Deformações específicas na armadura de flexão - L0-01

Cargas x Deformações na armadura de flexão - LC-S1

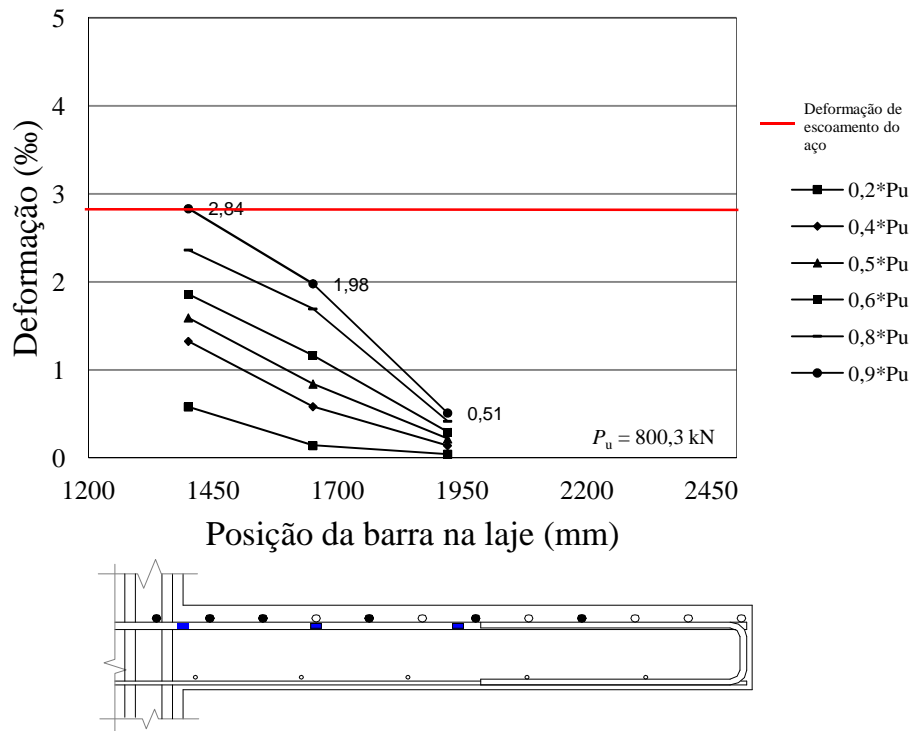


Figura 4.7.2 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S1

Cargas x Deformações na armadura de flexão - LC-S2

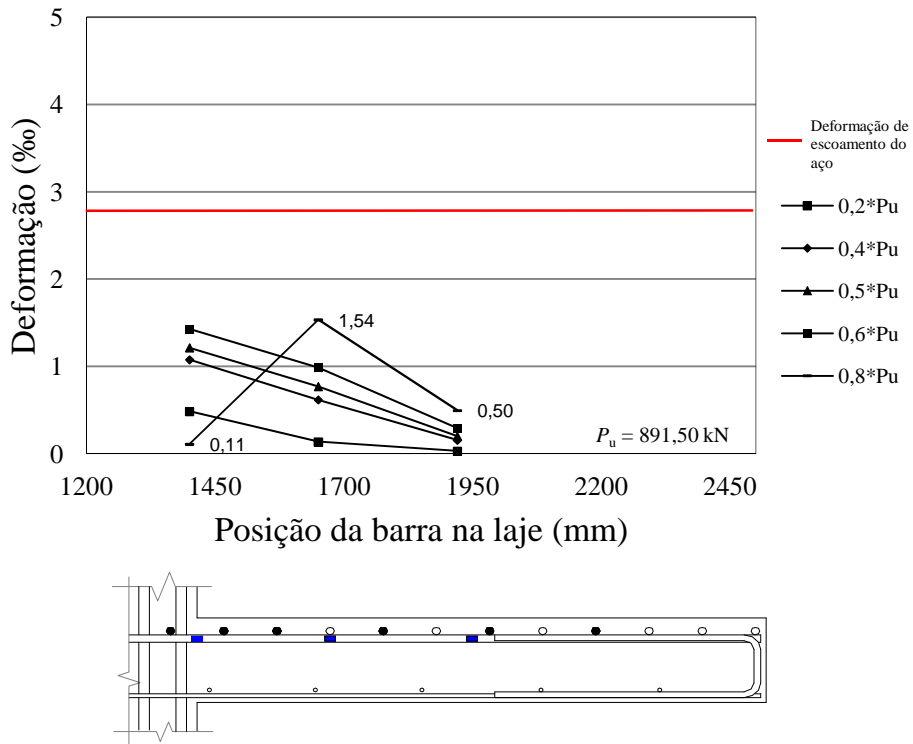


Figura 4.7.3 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S2

Cargas x Deformações na armadura de flexão - LR-S

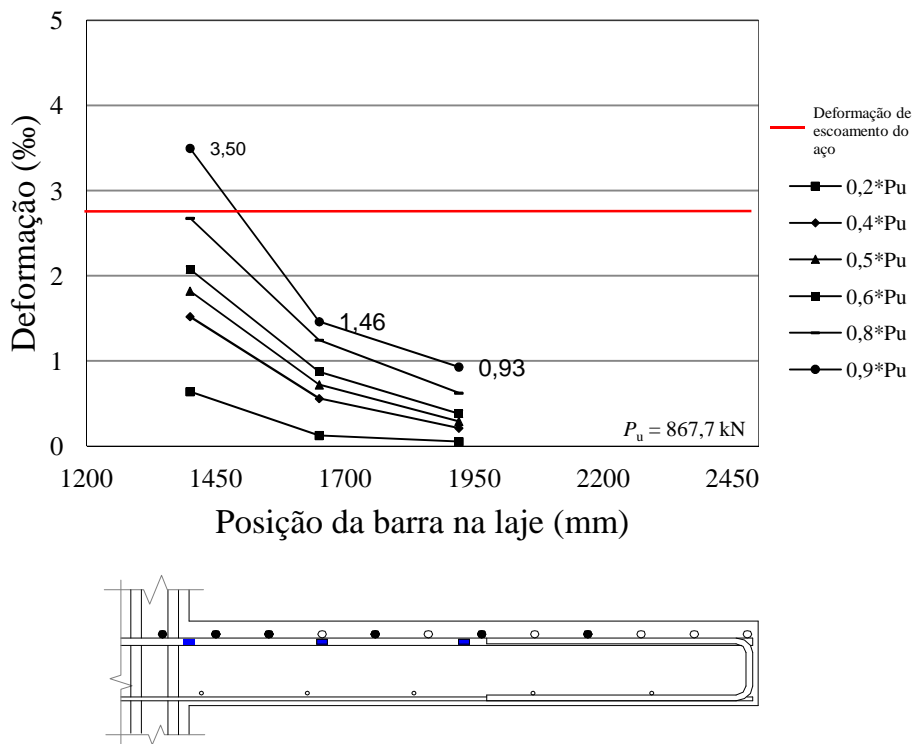


Figura 4.7.4 - Deformações específicas na armadura de flexão - LR-S

As Figuras 4.6.5 a 4.6.8 trazem os gráficos, de cada modelo ensaiado, do desenvolvimento das deformações específicas nas armaduras de flexão ao longo do ensaio, em cada passo de carga (posições dos extensômetros definidas nas figuras 3.8.1 e 3.8.2).

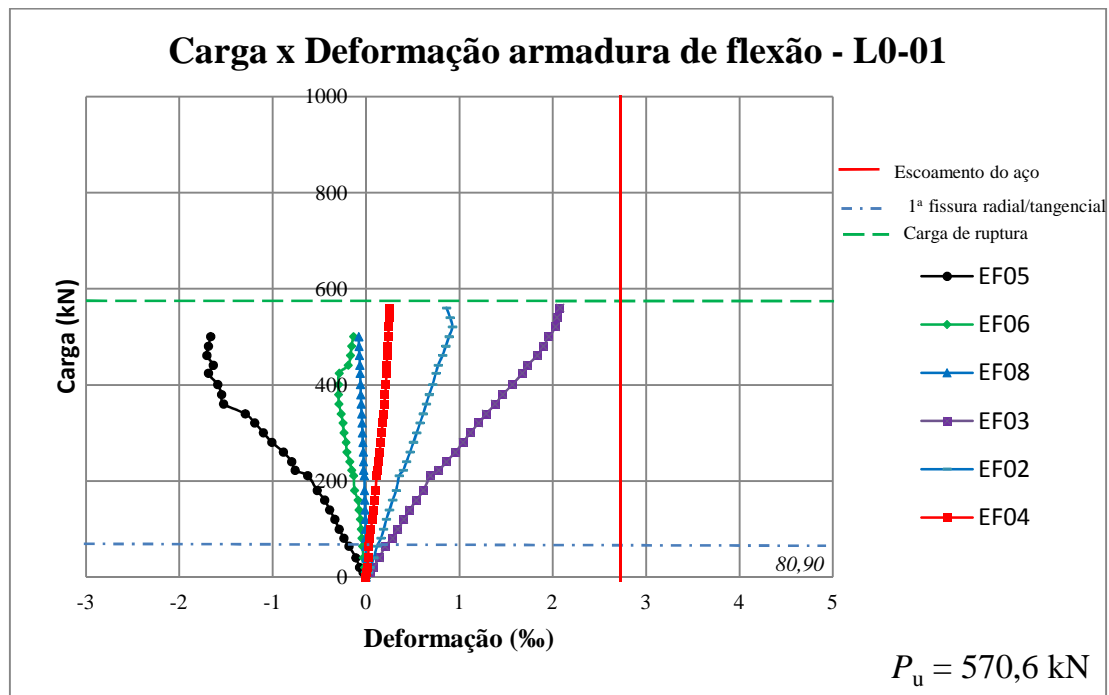


Figura 4.7.5 - Deformações específicas na armadura de flexão - L0-01

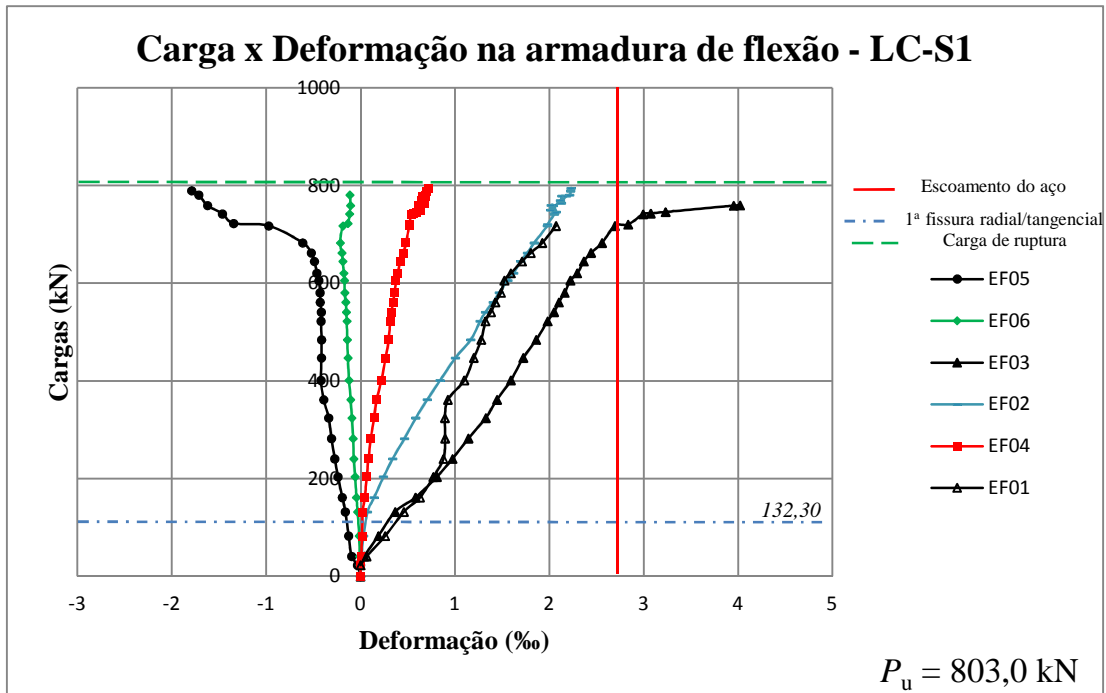


Figura 4.7.6 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S1

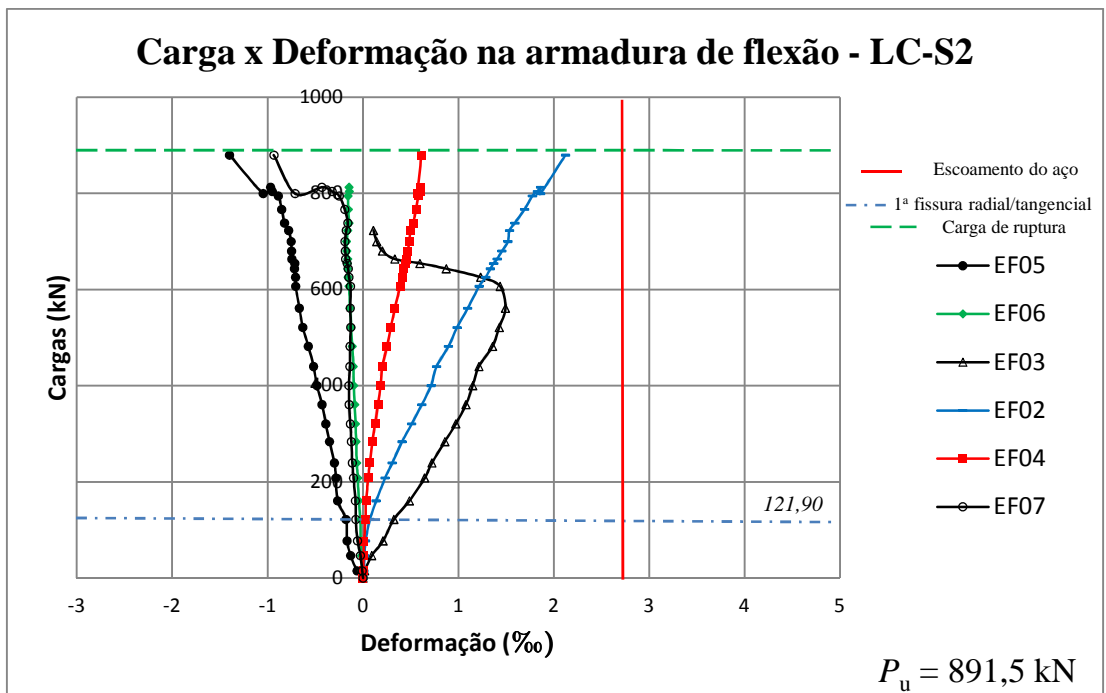


Figura 4.7.7 - Deformações específicas na armadura de flexão - LC-S2

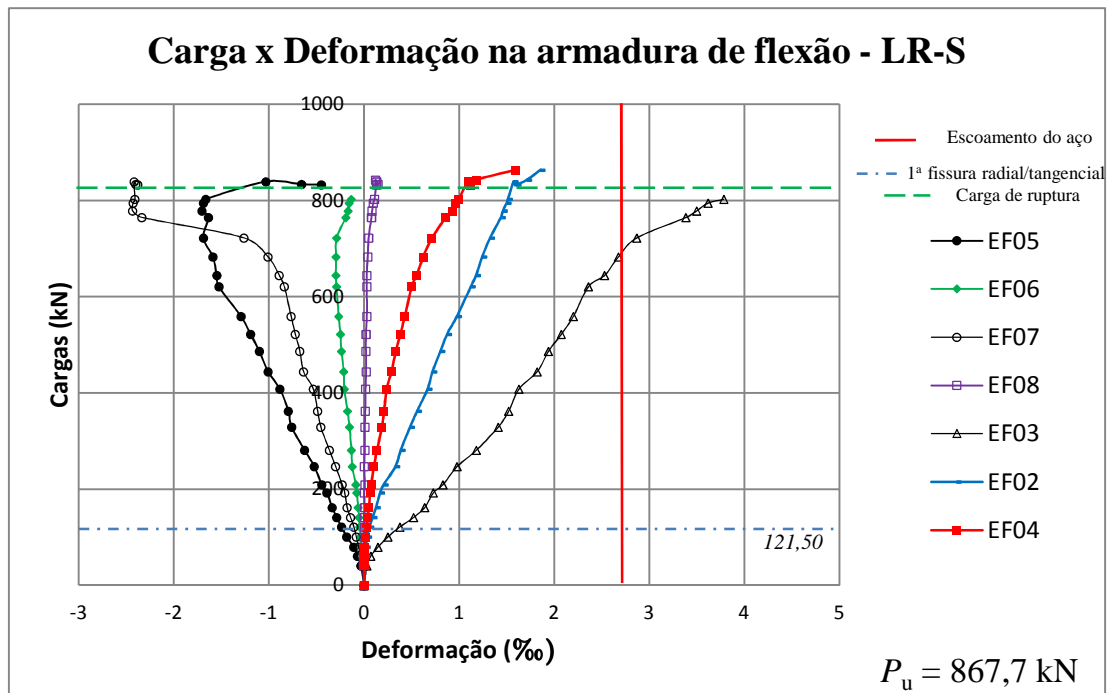


Figura 4.7.8 - Deformações específicas na armadura de flexão - LR-S

A Figura 4.7.9 mostra um gráfico com as deformações no aço em cada ponto da barra instrumentada, no momento mais próximo da ruptura de cada modelo ensaiado. A exceção fica para os dados do modelo LC-S2 que, para o carregamento de 879,50 kN, não apresentou dado no extensômetro EF03.

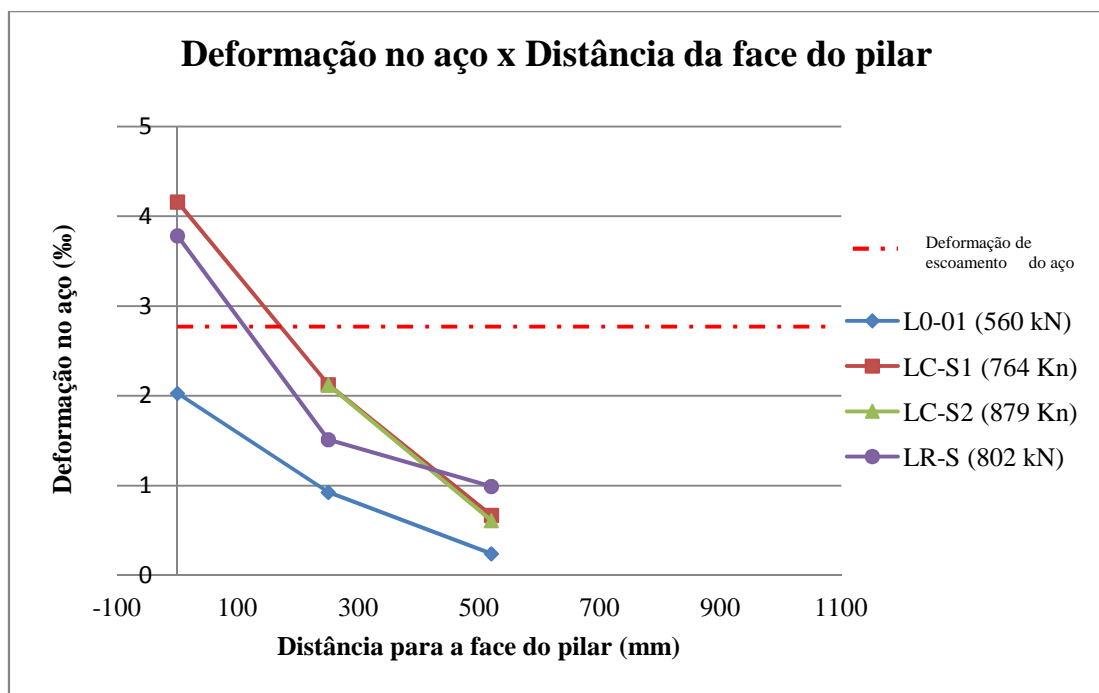


Figura 4.7.9 - Deformação no aço ao longo do comprimento lateral de cada modelo, no momento próximo a ruptura.

4.8. DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS NA AMADURA DE CISALHAMENTO - PRFC.

Em cada perímetro reforçado, foi instalado um extensômetro elétrico para se acompanhar as deformações específicas no PRFC durante o ensaio. Os extensômetros foram posicionados conforme ilustram as Figuras 3.8.9 a 3.8.11. Nos modelos LC-S1 e LC-S2, como a distribuição do reforço era em forma de cruz, foi instalado um único extensômetro por perímetro de reforço, ficando denominados os extensômetros de EFC01 A EFC06, partindo do perímetro mais próximo da face do pilar para o perímetro de reforço mais afastado. No caso do modelo LR-S, com distribuição da armadura de cisalhamento de forma radial, decidiu-se por instrumentar cada perímetro de reforço em dois pontos, sendo um passando por uma linha imaginária perpendicular a face do pilar e o outro ponto passando por uma linha imaginária concorrente à bissetriz da laje e, conseqüentemente do pilar, através dos extensômetros EFC07 a EFC12.

Da Figura 4.8.1 a Figura 4.8.4 são mostradas as deformações específicas, para cada modelo ensaiado, em cada perímetro de reforço ao longo do ensaio. As medidas dessas deformações foram escolhidas para os passos de carga de aproximadamente 20%, 40%, 50%, 60%, 80% e 90% da carga última de cada modelo. No caso do modelo LR-S, apresenta-se 2 (dois) gráficos pelo fato do mesmo ter sido instrumentado em duas posições em cada perímetro reforçado.

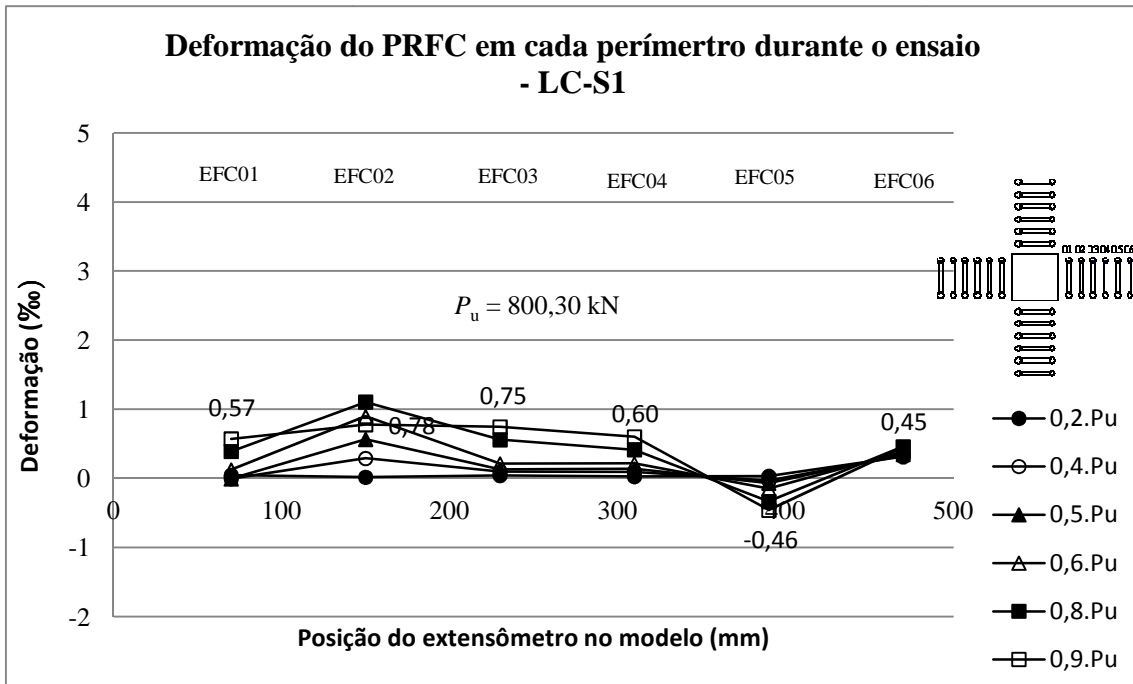


Figura 4.8.1 Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LC-S1

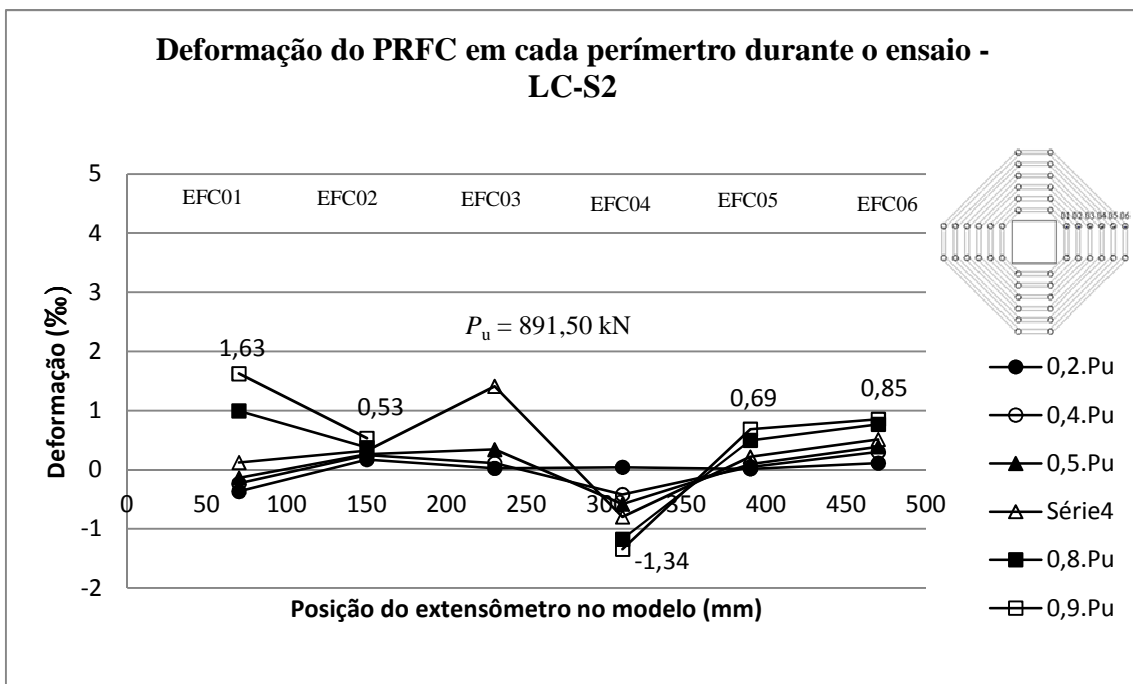


Figura 4.8.2 Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LC-S2

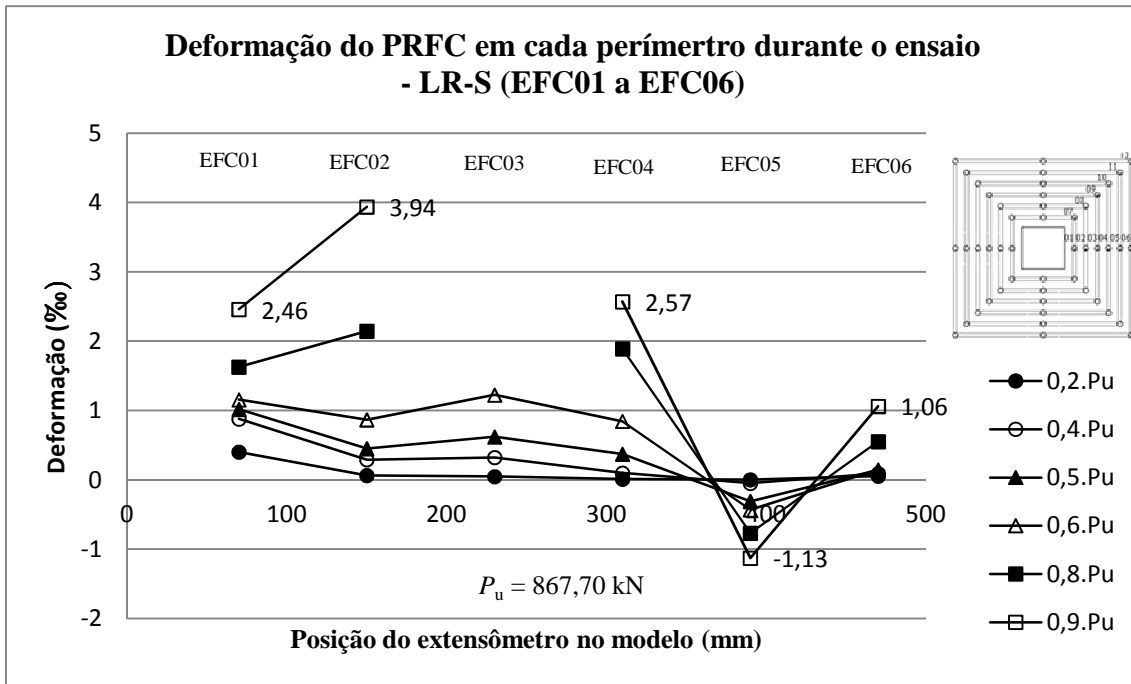


Figura 4.8.3 Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LR-S (EFC01 a EFC06)

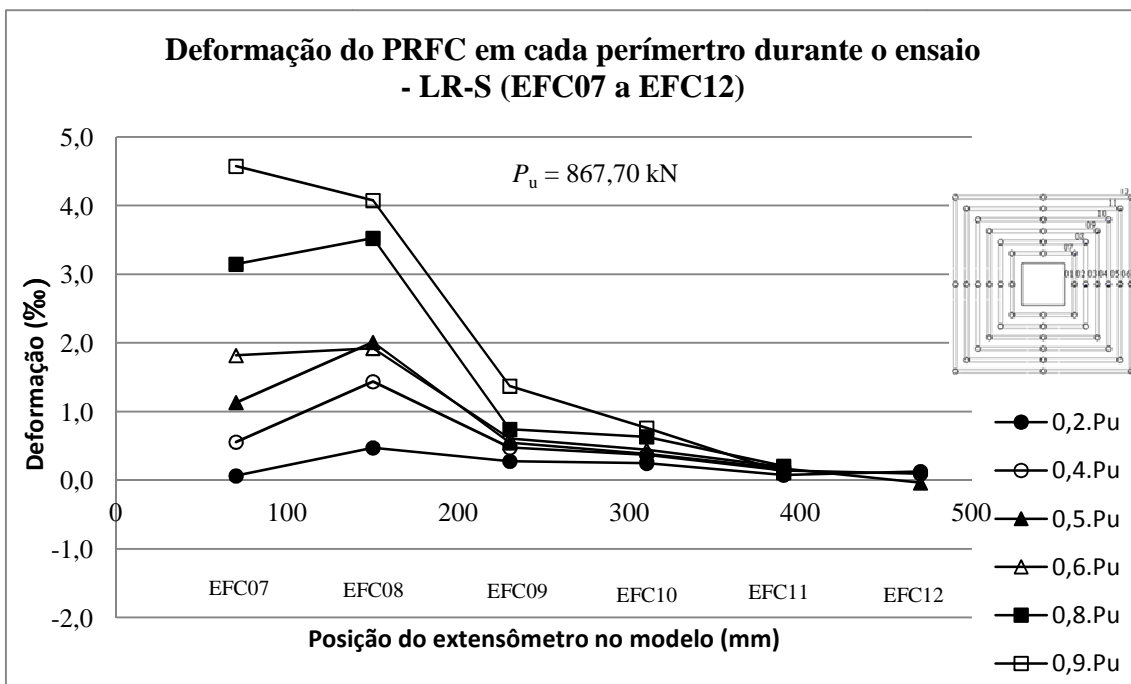


Figura 4.8.4 - Deformação da armadura de cisalhamento em cada perímetro de reforço durante o ensaio - LR-S (EFC07 a EFC12)

Da Figura 4.8.5 a Figura 4.8.8 são mostradas as deformações em cada perímetro de reforço ao longo do ensaio, em função do carregamento submetido, para cada modelo

reforçado. No caso do modelo LR-S, onde foram instalados 02 (dois) extensômetros por perímetro de reforço, temos nos gráficos das Figuras 4.7.7 e 4.7.8 as deformações na armadura de cisalhamento ilustrando essas deformações nos extensômetros EFC01 a EFC06 e EFC07 a EFC12 respectivamente. Da Figura 4.8.9 a Figura 4.8.14 são mostrados os gráficos das deformações na armadura de cisalhamento em cada perímetro reforçado.

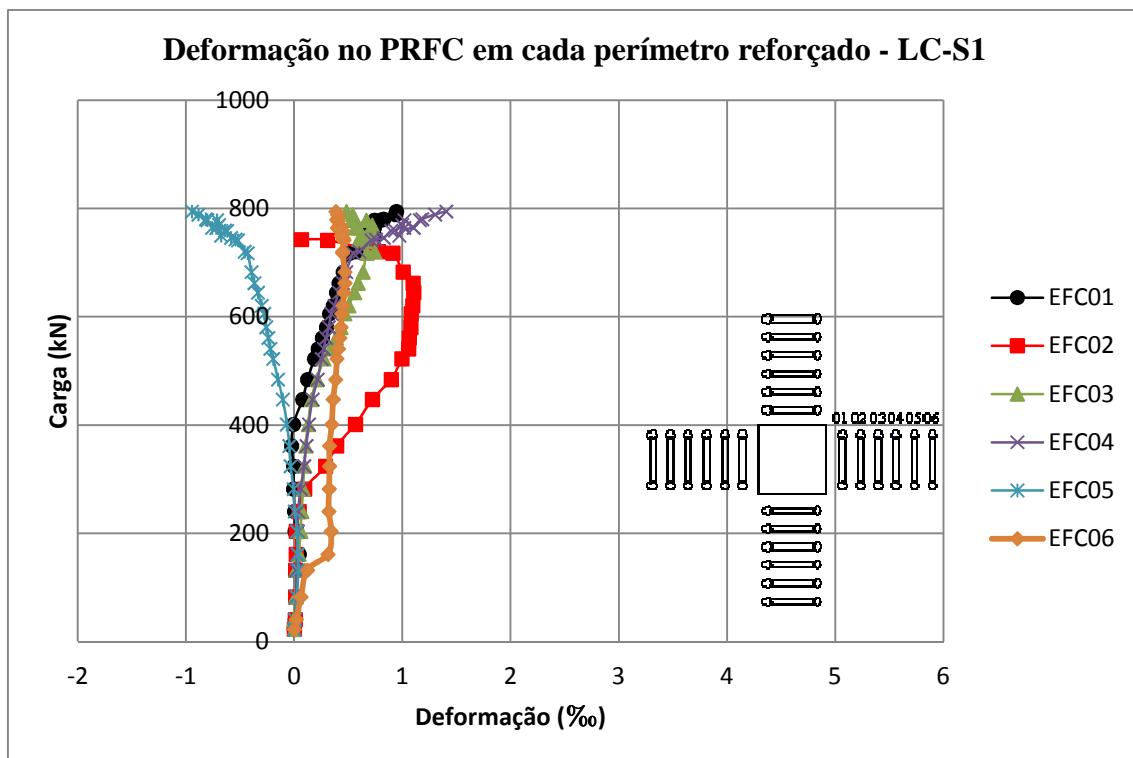


Figura 4.8.5 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S1

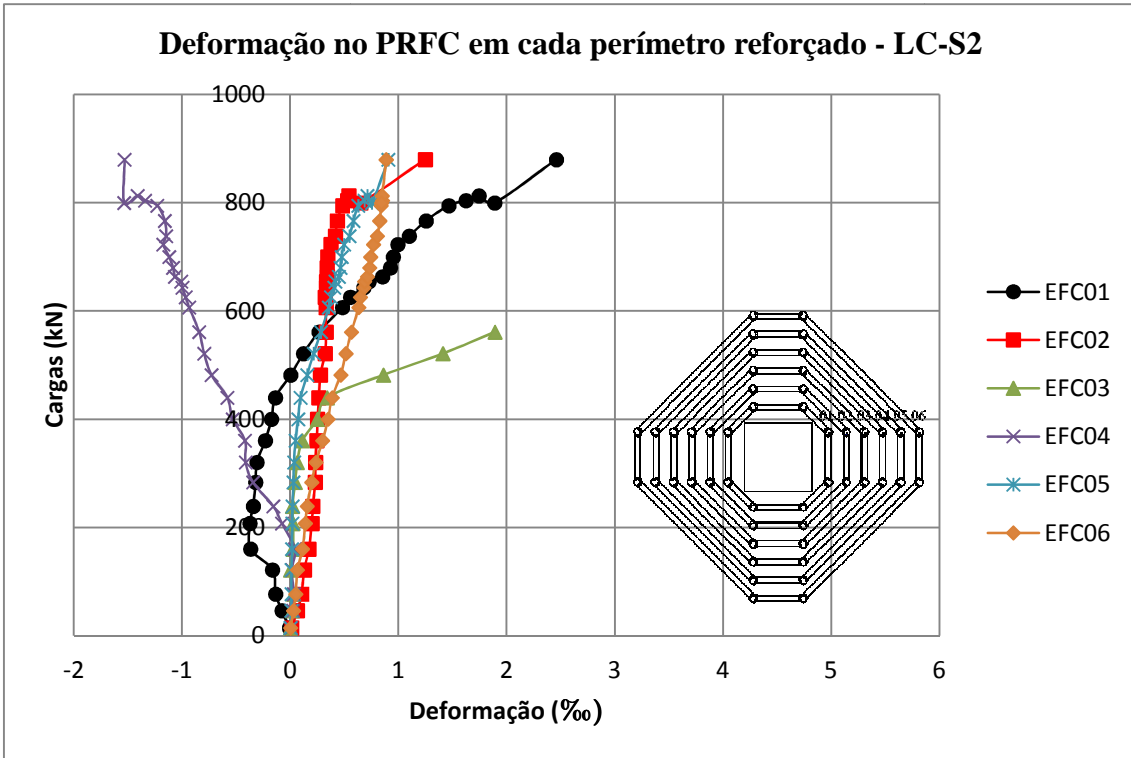


Figura 4.8.6 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S2

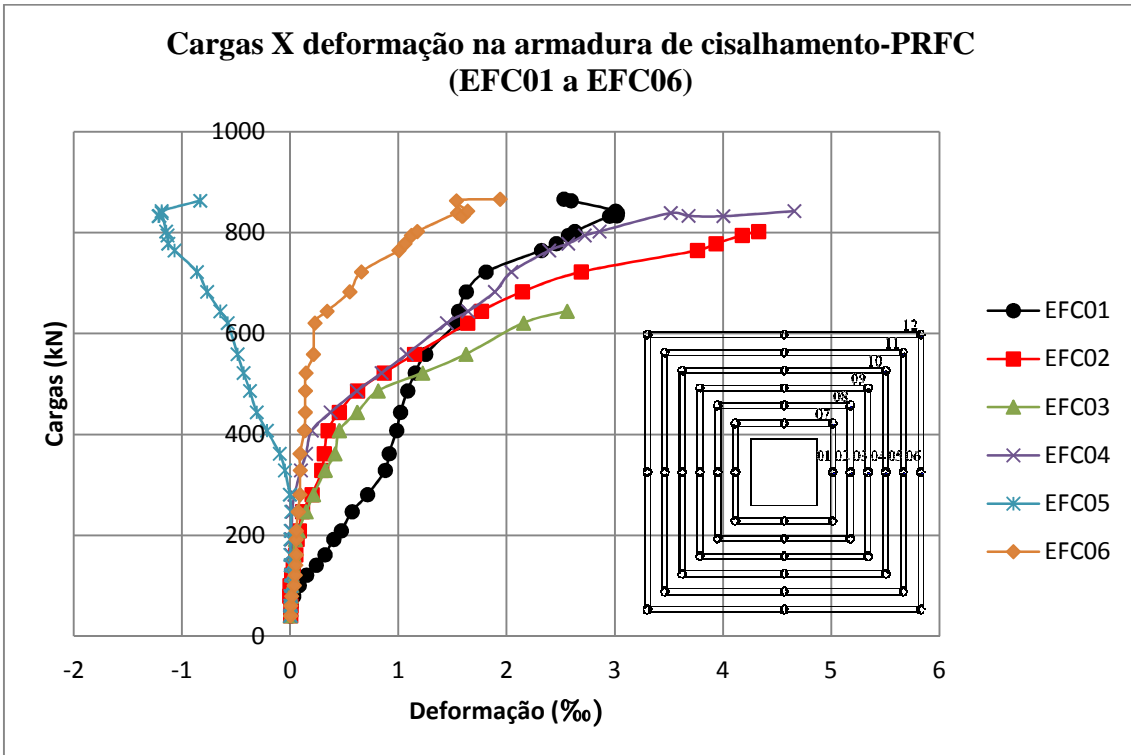


Figura 4.8.7 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LR-S (EFC01-EFC06)

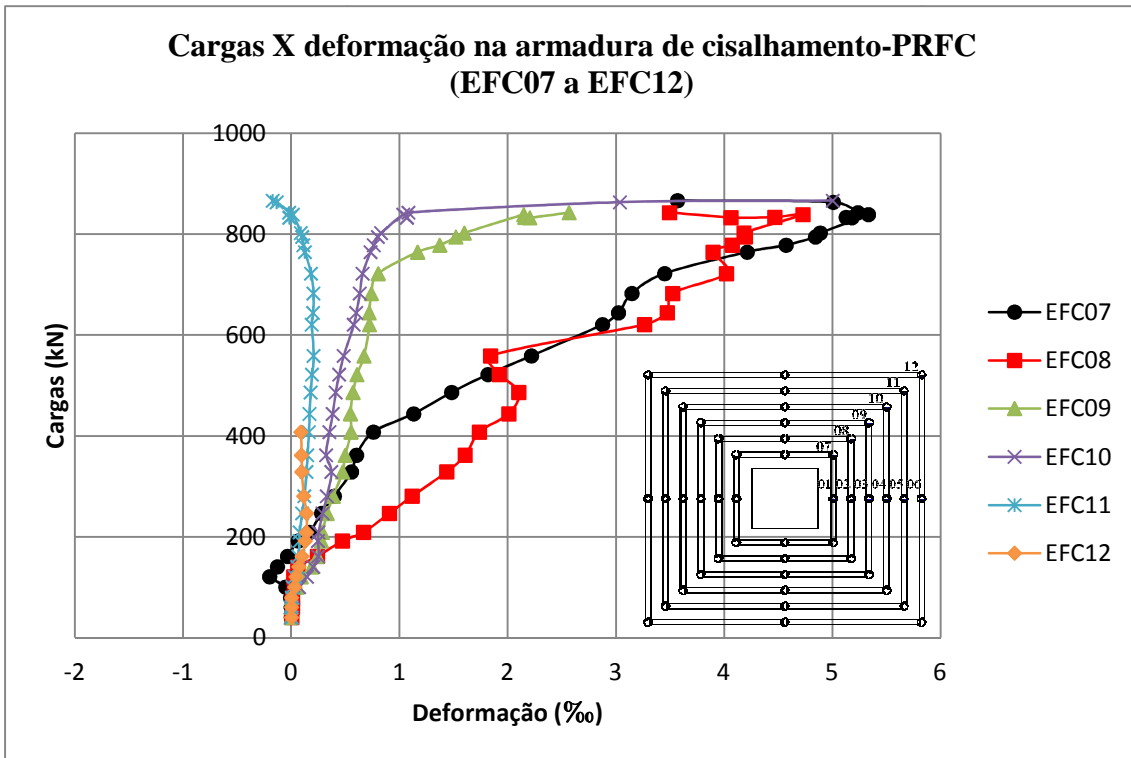


Figura 4.8.8 - Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LR-S (EFC07-EFC12)

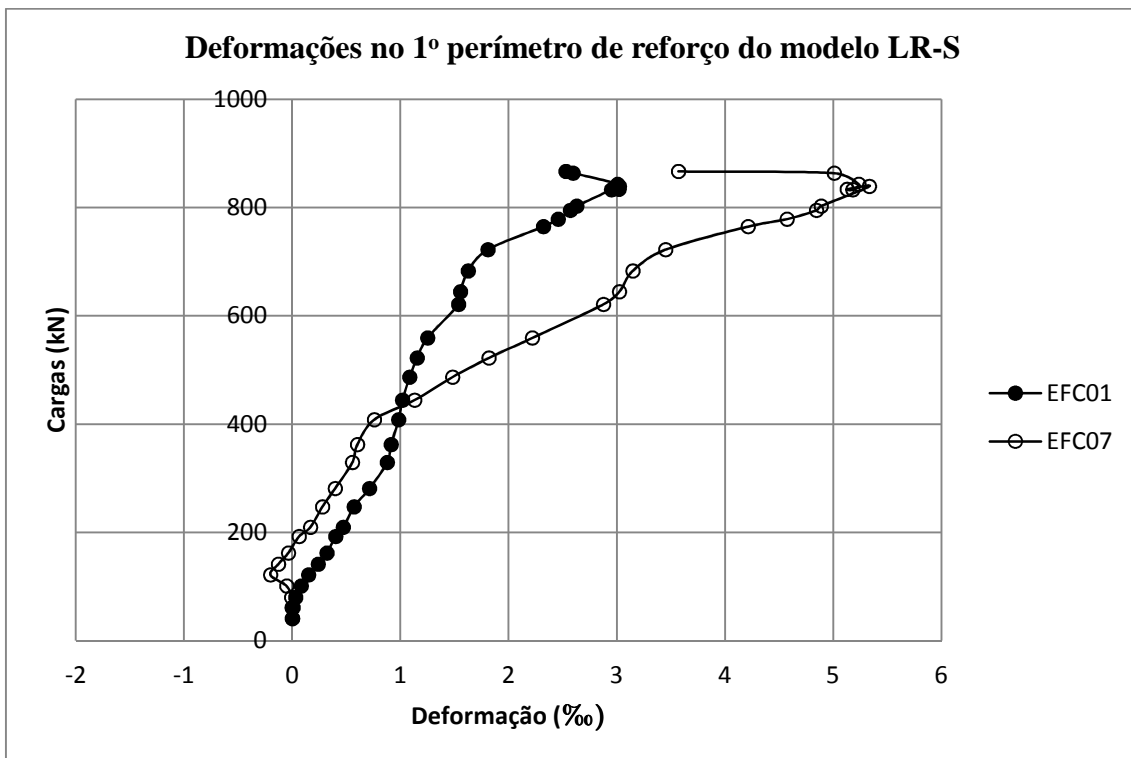


Figura 4.8.9 - Deformações na armadura de cisalhamento do 1º perímetro de reforço LR-S

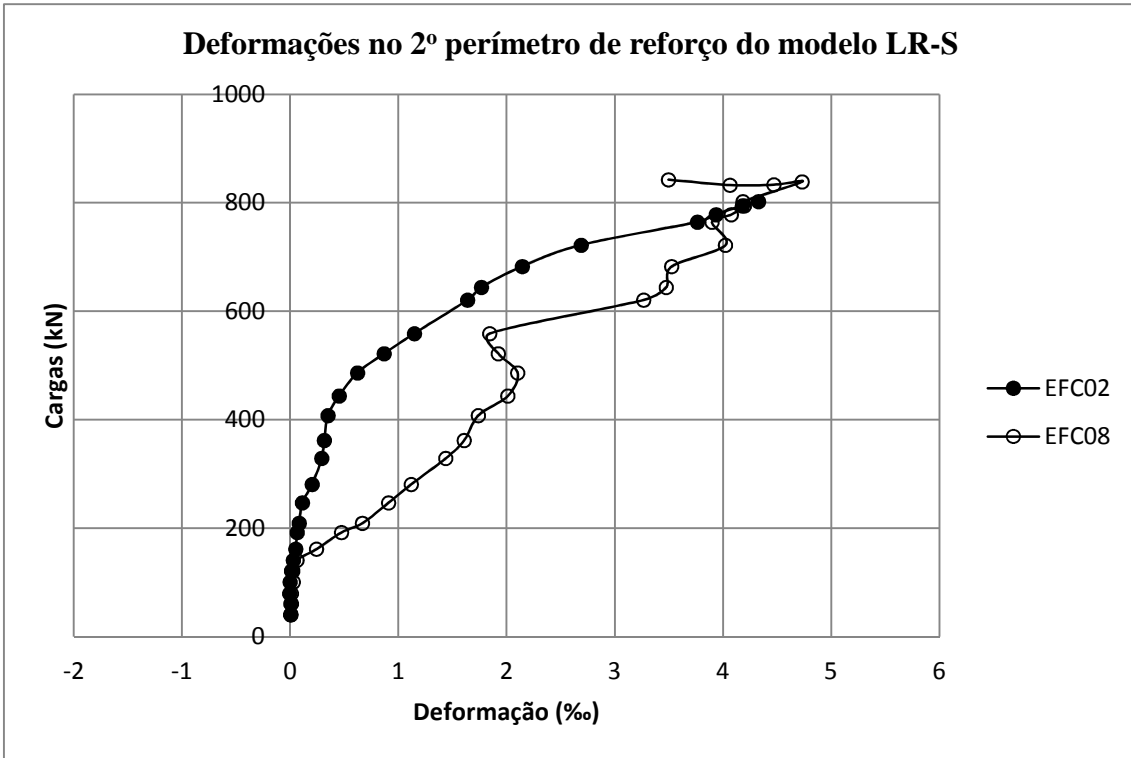


Figura 4.8.10 - Deformações na armadura de cisalhamento do 2º perímetro de reforço LR-S

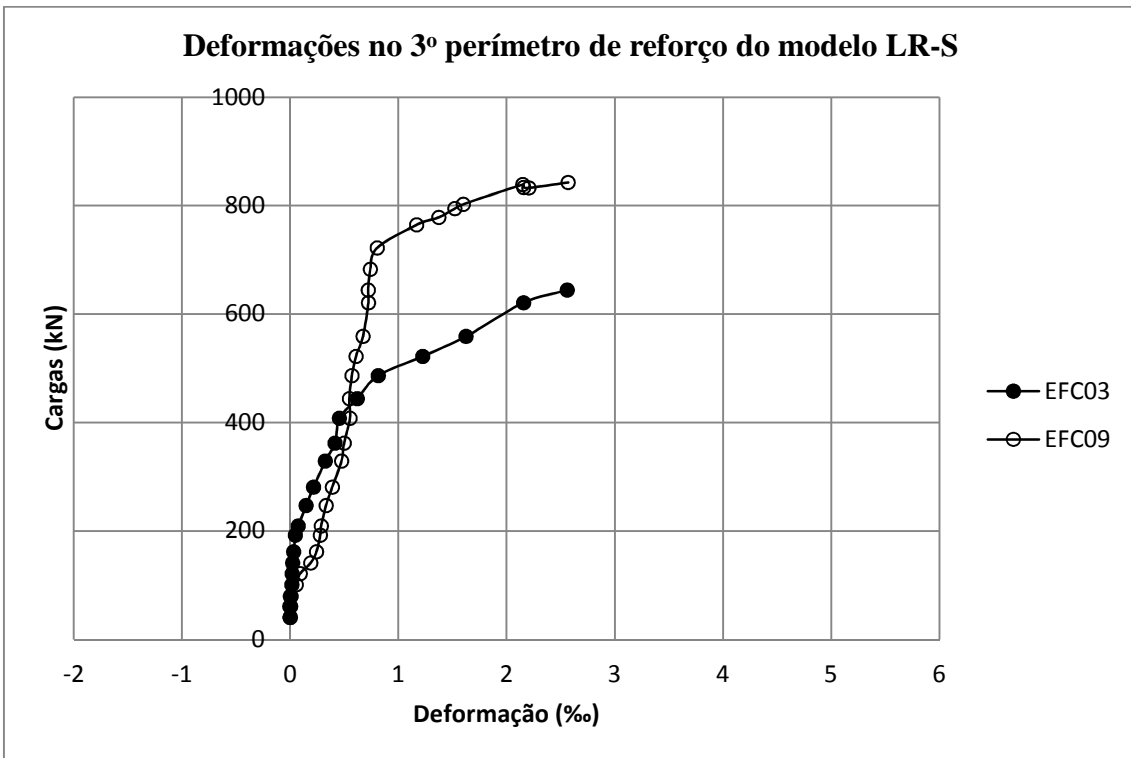


Figura 4.8.11 - Deformações na armadura de cisalhamento do 3º perímetro de reforço LR-S

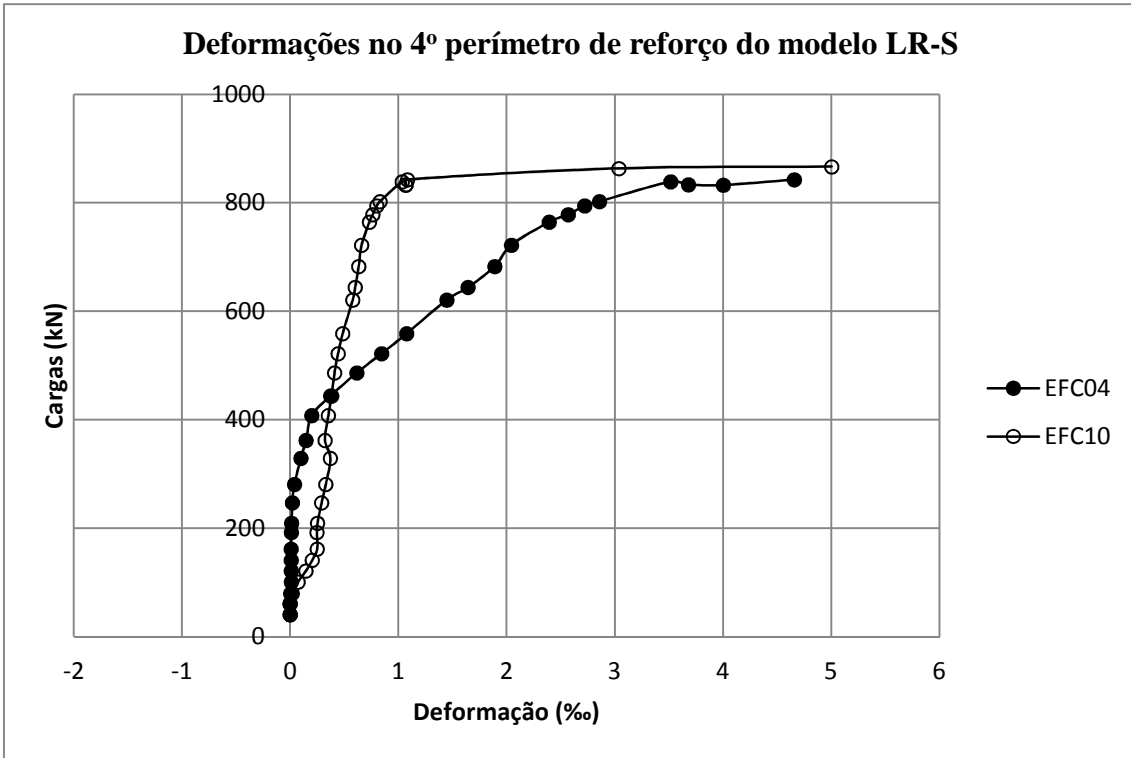


Figura 4.8.12 - Deformações na armadura de cisalhamento do 4º perímetro de reforço LR-S

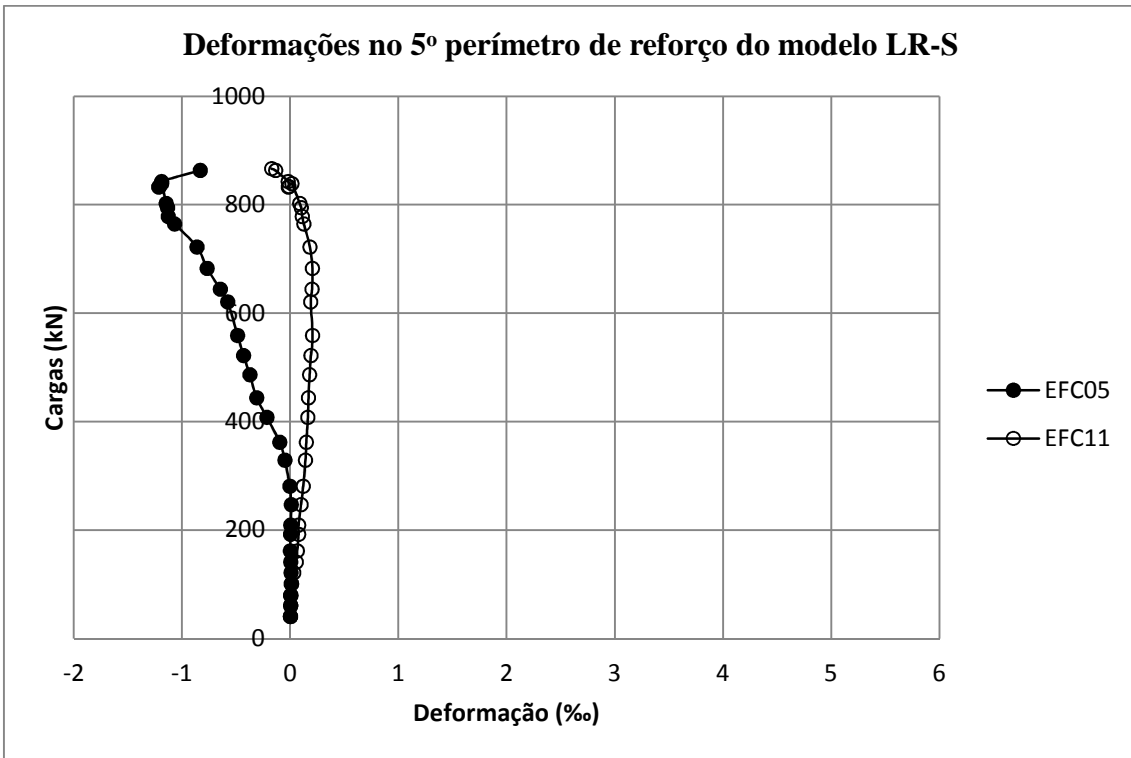


Figura 4.8.13 - Deformações na armadura de cisalhamento do 5º perímetro de reforço LR-S

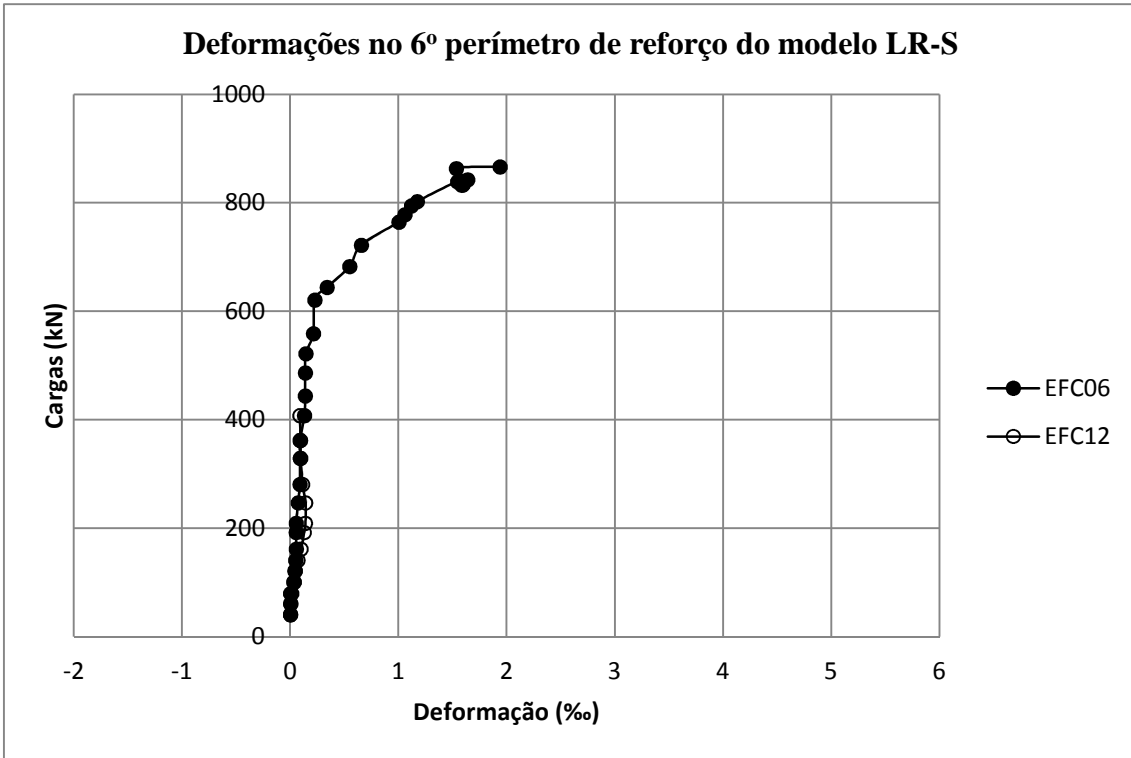


Figura 4.8.14 - Deformações na armadura de cisalhamento do 6º perímetro de reforço LR-S

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo traz uma análise de todos os resultados obtidos nesta pesquisa, estando subdividido da seguinte forma: O item 5.1 - Análise dos Resultados experimentais apresentará todas as considerações a respeito das análises dos resultados experimentais mostrados no capítulo anterior. O item 5.2 - Avaliação da adaptação de prescrições normativas disponíveis para serem utilizadas no cálculo de lajes reforçadas à punção com a utilização de PRFC apresentará uma análise das estimativas obtidas a partir das adaptações das recomendações normativas estudadas nesta pesquisa.

5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1.1. Deslocamentos verticais nos modelos

Todos os modelos ensaiados foram confeccionados com as mesmas dimensões geométricas, mesma taxa de armadura de flexão, sendo esta de aproximadamente de 1,45% e os modelos que foram reforçados ao cisalhamento, possuíam 6 (seis) perímetros de reforço e a mesma área de reforço por perímetro, 784 mm².

Os deslocamentos máximos foram os medidos até os instantes mais próximos da ruptura em cada modelo ensaiado. No caso da laje L0-01, a carga de ruptura foi 570,6 kN e o deslocamento máximo foi medido em uma carga de 500,6 kN. O modelo LC-S1 teve uma carga de ruptura de 803,0 kN, enquanto que o deslocamento máximo foi medido, para um carregamento de 794,7 kN, neste modelo foi de 21,5 mm. Para o modelo LC-S2, a carga de ruptura verificada foi 891,5 kN e o deslocamento vertical máximo foi observado, para um carregamento de 812,7 kN, foi de 15,6 mm. Por fim, a carga de ruptura do modelo LR-S foi de 867,7 kN e o deslocamento vertical máximo verificado, para um carregamento de 866,50 kN, foi de 16mm.

Pode-se observar, a partir do gráfico da Figura 4.5.18, que para todos os modelos ensaiados, o comportamento dos deslocamentos foi semelhante até uma carga de aproximadamente 500 kN, ou seja, próximo da ruptura do modelo de controle, L0-01. Este fato nos leva a observar que o material utilizado no reforço ao cisalhamento passou a trabalhar efetivamente a partir do surgimento das 1^{as} fissuras de cisalhamento.

Nota-se, também, que entre os modelos reforçados, por apresentarem características semelhantes, os deslocamentos verticais máximos são bem próximos. O modelo LC-S1 apresentou os maiores valores de deslocamentos verticais, resultando em aproximadamente três vezes o apresentado pelo modelo de controle. Os modelos LC-S2 e LR-S apresentaram valores de deslocamentos verticais em cerca de duas vezes superiores aos do modelo de referência, sem reforço. Quanto ao comparativo entre os modelos reforçados, não foi verificada uma diferença significativa entre os valores obtidos para os deslocamentos verticais, atestando assim que as quantidades dos materiais utilizadas no reforço ao cisalhamento não influenciou nos resultados de deslocamentos verticais.

5.1.2. Deformações no concreto

Como se pode ver através dos gráficos das Figuras 4.5.3 a 4.5.6, o aparecimento das 1^{as} fissuras, radial e tangencial, ocorreu a uma carga de aproximadamente 15% da carga de ruptura em cada modelo ensaiado. Nota-se também que, mesmo após o aparecimento das primeiras fissuras visíveis, o comportamento dos gráficos permaneceu aproximadamente linear em todos os modelos, e as medidas das deformações em ambas as direções se apresentam semelhantes. No entanto, a medida que o carregamento era incrementado, esse comportamento similar entre deformações radiais e tangenciais já não se verificava.

Nota-se também que tanto as deformações radiais quanto tangenciais sofreram um alívio quando a carga atingiu uma faixa de 70% a 80% da carga última em cada modelo estudado, com exceção para os extensômetros tangenciais EC04 nos modelos LC-S2 e LR-S. Tal alívio nessas deformações já foi também comentado por outros pesquisadores. MUTTONI (2008) relata que esse fenômeno pode ser explicado pelo surgimento de uma configuração de uma biela do tipo cotovelo, em função de uma redistribuição de tensões na região próxima ao pilar provocada pelo surgimento da fissura crítica de cisalhamento, conforme ilustra a Figura 5.1.1

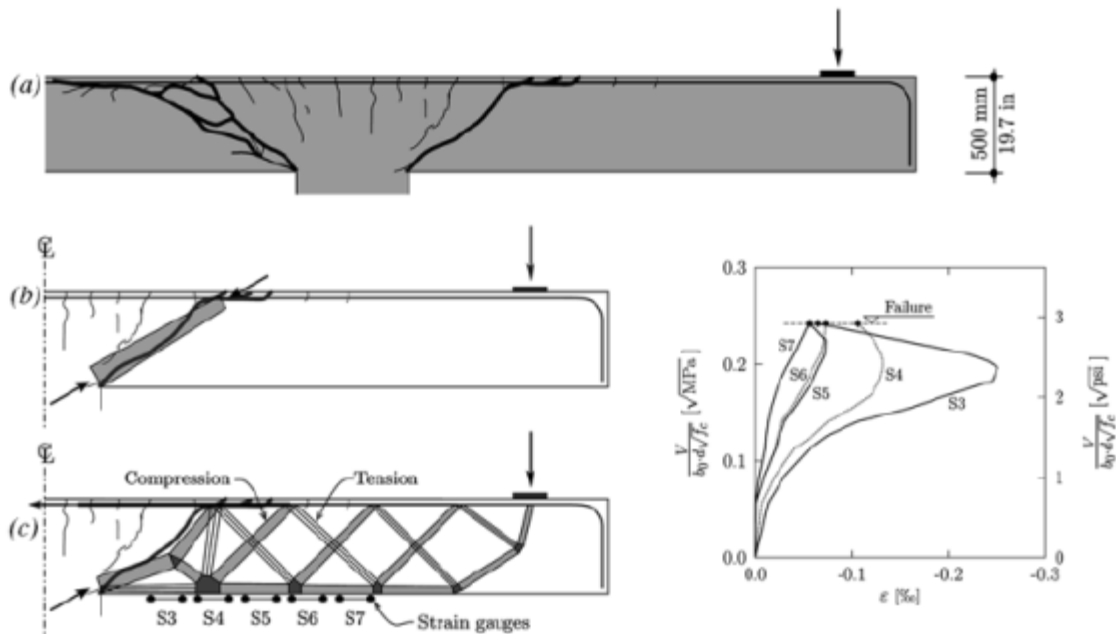


Figura 5.1.1 - Modelo de bielas e tirantes para ruptura por punção: a) Padrão de fissuras de uma laje depois da ruptura; b) Biela teórica e fissura crítica; c) Modelo teórico biela-tirante para ruptura por punção (MUTTONI, 2008)

Conforme as Figuras 4.5.7 a 4.5.10, as maiores deformações em todos os modelos foram medidas pelos extensômetros tangenciais, fato que já se esperava. No modelo de controle, L0-01, o valor médio registrado pelos EC03 e EC04, para um carregamento de 560 kN, foi de 0,86‰. Ainda se tratando do modelo de controle, os extensômetros radiais, EC01 e EC02, registraram um valor médio de 0,67‰ de deformação, para um carregamento de 521 kN, observando-se a partir deste momento um alívio na medida dessas deformações, conforme Figura 4.6.7.

Dentre os modelos reforçados com armadura distribuída em cruz, o LC-S1 e o LC-S2, as deformações radiais médias tiveram apresentaram comportamentos semelhantes, conforme se observa nas Figuras 4.5.8 e 4.5.9. Um fato que se pode destacar é que as maiores deformações nos dois modelos foram registradas pelo extensômetro tangencial EC04. A laje LC-S1 apresentou deformações máximas tangenciais nos extensômetros EC03 e EC04 de 0,79‰ e 0,89‰ respectivamente, enquanto que as deformações radiais medidas pelo extensômetros EC01 e EC02 foram 0,78‰ em ambos. A laje LC-S2 apresentou valor de deformação média máxima tangencial de 1,1‰, enquanto que o valor de deformação radial médio máximo medido foi de 0,7‰. Para o modelo LR-S, os maiores valores de deformações foram registrados, de forma bem definida, conforme

o gráfico da Figura 4.6.6, pelos extensômetros tangenciais. Para um carregamento de 722 kN, a média das deformações tangenciais registradas pelos EC03 e EC04 foi de 1,4‰. Ainda no modelo LR-S, as deformações radiais registradas pelos EC01 e EC02 apresentaram média de 0,5‰ para um carregamento de 560 kN.

Observa-se que, para todos os modelos, a um carregamento de 500 kN, as deformações médias registradas foram, de certa forma, semelhantes. Aliado a isso, nota-se que para o mesmo estágio de carregamento, a armadura de cisalhamento quase não foi solicitada, indicando que o PRFC só passou a atuar efetivamente após o surgimento das 1^{as} fissuras de cisalhamento, conforme observado anteriormente.

5.1.3. Deformações nas armaduras de flexão

Conforme se pode ver nas Figuras 4.6.1 a 4.6.4, em todos os modelos, as deformações registradas pelos extensômetros localizados na face do pilar tiveram maiores intensidades, fato este já esperado por se tratar da região mais solicitada. Quanto mais afastado do pilar a posição instrumentada, menores foram os registros de intensidades de deformação. Através destes gráficos, pode-se ter uma idéia do quão próximo de uma ruptura por flexão por escoamento da armadura cada modelo chegou, uma vez que nos dá uma idéia dos esforços de flexão na seção transversal da laje naquele ponto.

A Figura 4.7.9 mostra o comportamento da barra de flexão em cada ponto instrumentado momentos antes da ruptura. A partir desta figura, podemos perceber que em todos os modelos, na seção transversal da laje na posição do par de extensômetros EF04, distante 520 mm da face do pilar, a armadura de flexão não atingiu a deformação de escoamento do aço, sendo que a maior deformação para esta posição nos modelos ensaiados foi registrada na laje LR-S, com intensidade de 0,99‰. Para a posição distante 250 mm da face do pilar, referente ao par de extensômetros EF02, também não foram registradas deformações superiores a deformação de escoamento do aço, ficando o modelo LC-S1 com o maior registro de deformação nesta posição, com deformação de 2,13‰. No caso dos registros de deformações na armadura de flexão na seção passando pela face do pilar, registrados pelas medidas dos pares de extensômetros EF03 e EF01, pode-se notar que em todos os modelos foram registradas as maiores intensidades de deformação, comprovando o que já se esperava por se tratar da região mais solicitada e de maiores tensões. O modelo de controle, L0-01, não apresentou deformação superior à deformação de escoamento do aço, registrando deformação máxima no momento

próximo a ruptura de 2,08‰. Quanto aos modelos reforçados, referente a posição do par de extensômetros EF03, o modelo LC-S2 apresentou deformação máxima inferior à deformação de escoamento do aço, com intensidade de 1,49‰ para uma carga de 560 kN, pois a partir deste momento as deformações registradas pelo par de extensômetro EF03 só diminui a cada passo de carga. Os modelos LC-S1 e LR-S apresentaram, na posição do EF03, deformações na armadura de flexão superiores à deformação de escoamento do aço, com intensidades de 4,16‰ e 3,78‰ respectivamente. A partir desses dados de deformações, não se pode afirmar que a forma de distribuição da armadura de cisalhamento influenciou nas solicitações nas armaduras de flexão, pois os modelos LC-S1 e LC-S2 apresentaram distribuição de armadura de cisalhamento em cruz e no primeiro modelo as tensões registradas na armadura de flexão, para uma seção faceando o pilar, foram bem superiores às do segundo modelo, registrando uma deformação no modelo LC-S1 de 2,8 vezes a deformação do modelo LC-S2, ressaltando ainda que no modelo LC-S1 a armadura de flexão escoou e no modelo LC-S2 a mesma armadura não atingiu deformação de escoamento do aço.

Fazendo-se uma análise em todos os modelos, para um carregamento de 500 kN, as deformações no aço registradas pelo par de extensômetros EF03 ficaram bem próximas. Os modelos L0-01, LC-S1, LC-S2 e LR-S tiveram deformações aproximadas de 1,7‰, 2,0‰, 1,5‰ e 2,0‰. Este comparativo ressalta ainda mais a observação já feita de que os PRFC só começaram a trabalhar efetivamente após o surgimento das 1^{as} fissuras de cisalhamento.

A Tabela 5.1 mostra a situação das deformações nas armaduras de flexão momentos antes da ruptura. Nota-se que para todos os modelos, os extensômetros EF02 e EF04 não apresentaram deformações nas armaduras de flexão superiores a deformação de escoamento do aço. No caso do par de extensômetro EF03 foi registrado deformação na armadura de flexão superior a deformação no escoamento do aço nos modelos LC-S1 e LR-S.

Tabela 5.1 - Comportamento da armadura de flexão momentos antes da ruptura

COMPORTAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO MOMENTOS ANTES DA RUPTURA				
MODELO	PARÂMETRO DE ANÁLISE	EXTENSÔMETRO		
		EF03	EF02	EF04
L0-01	Distância até a face do pilar	Faceando o pilar	250 mm	520 mm
	Deformação da barra na ruptura	$<\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$
LC-S1	Distância até a face do pilar	Faceando o pilar	250 mm	520 mm
	Deformação da barra na ruptura	$\geq\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$
LC-S2	Distância até a face do pilar	Faceando o pilar	250 mm	520 mm
	Deformação da barra na ruptura	$<\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$
LR-S	Distância até a face do pilar	Faceando o pilar	250 mm	520 mm
	Deformação da barra na ruptura	$\geq\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$	$<\epsilon_{ys}$

5.1.4. Deformações nas armaduras de cisalhamento

A partir dos gráficos mostrados nas Figuras 4.7.1 a 4.7.4, podemos observar que, para todos os modelos reforçados, as deformações medidas na armadura de cisalhamento para um carregamento de 50% da carga última eram muito pequenas, indicando que o material para esse estágio de carregamento quase não foi solicitado.

No caso do modelo LC-S, como se pode ver na Figura 4.8.5, os maiores valores de deformação foram registrados no 2º e 4º perímetro de reforço, sendo que esses valores foram pouco superiores a 1‰. Conforme Figura 4.8.6, as maiores deformações registradas no modelo LC-S2 ocorreram no 1º e 2º perímetro de reforço. Para este modelo, as deformações nas armaduras de cisalhamento foram maiores que as registradas no modelo LC-S1.

No caso do modelo LR-S, onde a armadura de cisalhamento foi distribuída de forma radial, foram registradas as maiores deformações. Como se pode observar na Figura

4.8.7 e na Figura 4.8.8, essas deformações superaram o valor de 3‰ no 1º, 2º e 4º perímetros de reforço.

5.1.5. Mapa de fissuração

O desenvolvimento das fissuras durante a realização dos ensaios foi acompanhado a cada passo de carga. Como já se esperava, as primeiras fissuras em todos os modelos surgiram faceando a pilar, a começar pelos cantos. Essas fissuras surgiram logo no início do ensaio, partindo dos cantos dos pilares e se desenvolveram até em direção aos seus eixos. As primeiras fissuras radiais e tangenciais surgiram simultaneamente para um mesmo estágio de carregamento em cada modelo reforçado, tendo aparecido em 14% da carga última no modelo de controle, em 17% da carga última no modelo LC-S1, 14% da carga última no modelo LC-S2 e em 14% da carga última no caso do modelo LR-S.

Notou-se durante o ensaio que as fissuras apresentaram um caminho preferencial, que buscava interligar os furos destinados a aplicação do reforço. Tanto nas fissuras radiais quanto tangenciais, os furos em cada modelo determinaram o caminho e desenvolvimento das primeiras fissuras.

A medida que o ensaio prosseguia, as fissuras radiais se desenvolviam em direção às bordas das lajes, de modo que se verificou que as primeiras fissuras de borda surgiram com 28% da carga última para o modelo L0-01, com 25% da carga última no caso do modelo LC-S1, 40% da carga última para o modelo LC-S2 e 32% da carga última no caso do modelo LR-S. Deste modo, percebe-se que os modelos LC-S2 e LR-S, que continham maior densidade de PRFC utilizado na ancoragem, apresentou maior dificuldade de propagação das fissuras radiais, sendo necessário um maior estágio de carregamento para que essas fissuras chegassem até as bordas das lajes. Este fato pode ter ocorrido pelo confinamento gerado pelo material utilizado na ancoragem do reforço ao cisalhamento que foi distribuído na região próxima do pilar.

5.1.6. Cargas últimas

Todos os modelos foram ensaiados até a ruptura. As lajes que foram reforçadas ao cisalhamento apresentaram uma carga de ruptura consideravelmente superior ao modelo de controle L0-01, o que nos leva a concluir que a aplicação do reforço provocou um aumento na resistência ao cisalhamento das lajes.

A Tabela 4.2 mostrou a carga última de cada modelo ensaiado.

Dentre os modelos ensaiados, o que apresentou maior carga de ruptura foi o LC-S2, cujas armaduras de cisalhamento foram distribuídas em forma de cruz e com ancoragem longitudinal e diagonal. A laje LC-S2 apresentou uma carga de ruptura de 1,56 vezes a da carga de ruptura do modelo de controle L0-01. A laje LC-S1, que também teve armadura de cisalhamento distribuída em forma de cruz, porém com ancoragem apenas longitudinal, apresentou uma carga de ruptura de 1,41 vezes a carga de ruptura do modelo L0-01. O modelo LR-S, que teve uma armadura de cisalhamento distribuída de forma radial, apresentou uma carga de ruptura de 1,52 vezes a carga de ruptura do modelo L0-01

Alem do aumento relativo à capacidade de carga dos modelos, pôde-se observar um aumento significativo, por parte dos modelos reforçados, na ductilidade. A ductilidade é definida como sendo a capacidade do material, seção, elemento estrutural ou sistema estrutural, de experimentar deformações inelásticas sem perder sua capacidade resistente, atingindo a ruptura após um considerável acúmulo de energia inelástica de deformação. Em outras palavras, a ductilidade é a capacidade apresentada pelo elemento estrutural de sofrer grandes deformações antes que ocorra a ruptura. Em geral, é uma característica não definida numericamente.

5.2. AVALIAÇÃO DA ADAPTAÇÃO DE PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DISPONÍVEIS PARA SEREM UTILIZADAS NO CÁLCULO DE LAJES REFORÇADAS À PUNÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE PRFC

Conforme relatado anteriormente, não há registro de prescrições normativas disponíveis para análise de punção em lajes lisas de concreto armado utilizando PRFC como armadura de cisalhamento. Neste caso, foi feita uma adaptação das recomendações dos códigos Americano (ACI 318:2008) e Europeu (EUROCODE 2:2004) e da norma brasileira (ABNR NBR 6118:007), aliadas a limitações impostas pelo ACI 440 2R.

De acordo com as Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4, pode-se observar que os valores esperados para a carga última dos modelos, segundo recomendações normativas estudadas nesta pesquisa, foram bem Próximos dos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 5.2 - Capacidade de carga e modo de ruptura segundo ACI-318:2008

Modelo	Experimental		ACI 318:2008								
	V _{test} (kN)	Modo ruptura	V _{R,C} PRFC (kN)	V _{OUT} (kN)	V _{MAX} (kN)	V _{ACI} (kN)	Modo ruptura	V _{test} /V _{ACI}	V _{flex} (kN)	V _{test} /V _{flex}	Carga de pós puncionamento (kN)
L0-1	571	-	-	-	-	520	-	1,10	1282	0,45	-
LC-S1	803	dentro	813	758	892	758	fora	1,06	1317	0,61	340
LC-S2	892	dentro	825	767	906	767	fora	1,16	1334	0,67	542
LR-S	868	dentro	829	1011	912	829	dentro	1,05	1341	0,65	793
Média								1,09			
Desvio Padrão								0,05			
Coeficiente de Variação								0,048			

Tabela 5.3 - Capacidade de carga e modo de ruptura segundo EUROCODE 2:2004

Modelo	Experimental		EUROCODE 2:2004								
	V _{test} (kN)	Modo ruptura	V _{R,C} PRFC (kN)	V _{OUT} (kN)	V _{MAX} (kN)	V _{EC2} (kN)	Modo ruptura	V _{test} /V _{EC2}	V _{flex} (kN)	V _{test} /V _{flex}	Carga de pós puncionamento (kN)
L0-1	571	-	-	-	-	583	-	0,98	1282	0,45	-
LC-S1	803	dentro	1026	724	2052	724	fora	1,11	1317	0,61	340
LC-S2	892	dentro	1040	730	2076	730	fora	1,22	1334	0,67	542
LR-S	868	dentro	1046	763	2087	763	fora	1,14	1341	0,65	793
Média								1,11			
Desvio Padrão								0,10			
Coeficiente de Variação								0,090			

Tabela 5.4 - Capacidade de carga e modo de ruptura segundo ABNT NBR 6118:2007

Modelo	Experimental		ABNT NBR 6118:2007								
	V _{test} (kN)	Modo ruptura	V _{R,C} PRFC (kN)	V _{OUT} (kN)	V _{MAX} (kN)	V _{NBR} (kN)	Modo ruptura	V _{test} /V _{NBR}	V _{flex} (kN)	V _{test} /V _{flex}	Carga de pós puncionamento (kN)
L0-1	571	-	-	-	-	641	-	0,89	1281,93	0,45	-
LC-S1	803	dentro	1076	903	2216	903	fora	0,89	1316,60	0,61	340
LC-S2	892	dentro	1089	907	2243	907	fora	0,98	1334,15	0,67	542
LR-S	868	dentro	1094	942	2253	942	fora	0,92	1341,26	0,65	793
Média								0,92			
Desvio Padrão								0,04			
Coeficiente de Variação								0,048			

A Figura 5.2.1 mostra um gráfico contendo o resumo dos resultados obtidos experimentalmente para a capacidade de cargas dos modelos, bem como das estimativas de carga última em cada norma analisada.

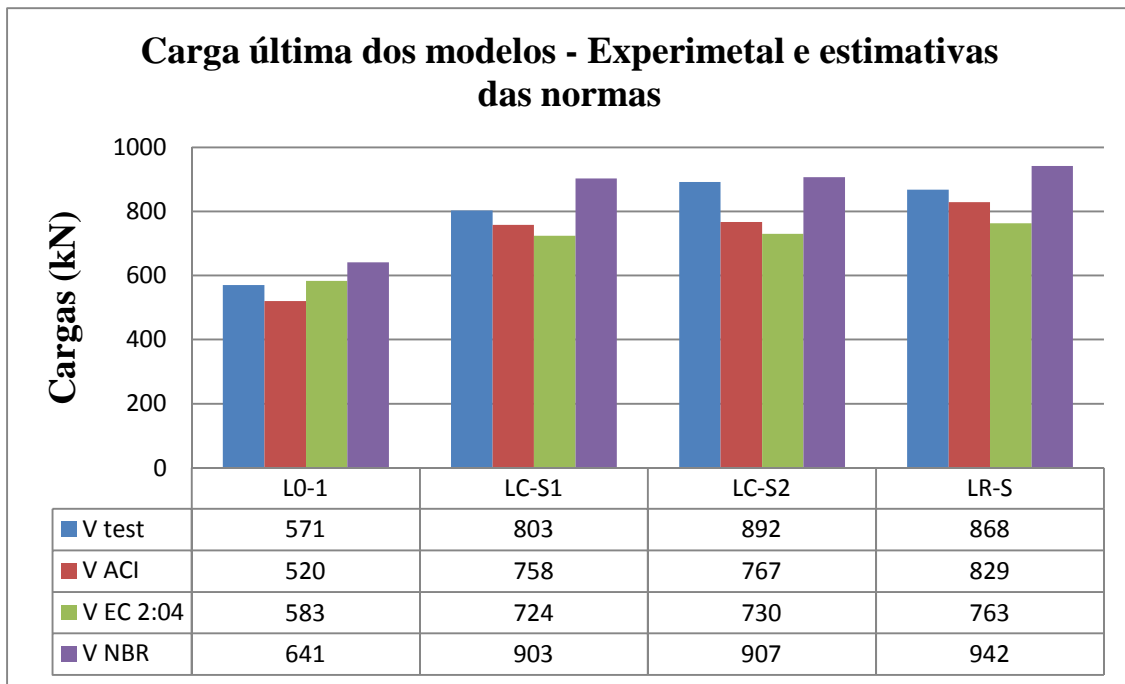


Figura 5.2.1- Carga última dos modelos - experimental e estimativa das prescrições normativas analisadas

A Figura 5.2.2 traz uma relação entre a carga última experimental e a carga última estimada pelas prescrições normativas, em cada um dos modelos.

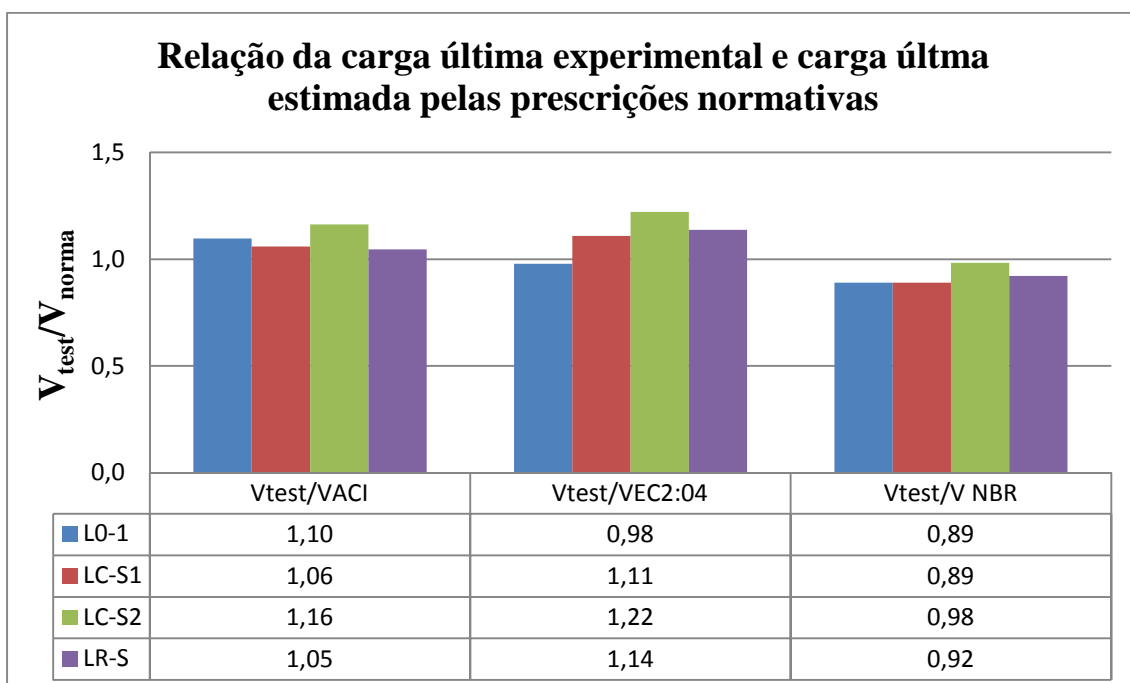


Figura 5.2.2 - Relação da carga última experimental e carga última estimada pelas prescrições normativas

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

6.1.1. Eficácia do reforço

Conclui-se que o método de reforço ao cisalhamento de lajes lisas de concreto armado utilizando PRFC funcionou para os modelos analisados. Os modelos reforçados apresentaram um aumento na resistência ao cisalhamento de 41% para o modelo LC-S1, 56% para o modelo LC-S2 e de 52% para o modelo LR-S, quando comparados ao modelo de controle. A partir das deformações nas armaduras de flexão e dos deslocamentos verticais, tanto para o modelo de controle quanto para as lajes reforçadas, pode-se afirmar que a técnica empregada nesta pesquisa também aumentou consideravelmente a ductilidade dos modelos reforçados.

Outro ponto importante que foi observado e merece destaque, foi a capacidade de carga registrada pelos modelos reforçados após a ruptura. O modelo LR-S após a ruptura, apresentou uma carga residual de 58% da carga de ruptura do modelo L0-01, enquanto que os modelos LC-S1 e LC-S2 apresentaram carga de pos-puncionamento de 95% e 139% da carga última do modelo L0-01, respectivamente. Esta evidência é de grande importância, uma vez que essa capacidade de carga de pos-puncionamento pode evitar um possível colapso progressivo.

6.1.2. Comparativo entre os modelos reforçados

A partir dos dados experimentais, concluiu-se que, tanto a forma de distribuição quanto a direção da ancoragem do reforço, não influenciou significativamente para o aumento da capacidade de carga, bem como da ductilidade, para um mesmo valor de área de reforço por perímetro e um mesmo número de perímetros reforçados, conforme se observa na Tabela 4.2.

6.1.3. Avaliação da aplicabilidade das instruções normativas para o método de reforço proposto.

Conforme relatado anteriormente, em se tratando de reforço ao cisalhamento de lajes lisas de concreto armado utilizando PRFC no combate ao puncionamento, não existe

instrução normativa específica disponível na literatura. No entanto, a presente pesquisa propõe uma adaptação, tanto nas recomendações constantes na norma brasileira – ABNT NBR 8118:2007-, quanto nas principais prescrições normativas internacionais – *ACI 318:2008* e *EUROCODE 2:2004*- para o estudo de punção em lajes lisas de concreto armado.

Em relação ao aumento na capacidade resistente ao puncionamento, o gráfico da Figura 5.2.2 mostra que os três códigos analisados apresentaram valores bem próximos dos resultados experimentais, o que significa que as adaptações das formulações analíticas, para o estudo de punção, feitas nesta pesquisa obtiveram resultados positivos.

6.1.4. Sistema de ensaio

A realização dos ensaios ocorreu com sucesso, visto que o objetivo final foi alcançado. Julga-se importante ressaltar que algumas dificuldades foram encontradas durante o processo de aplicação do reforço, bem como a realização dos ensaios. A qualidade do acabamento dado na superfície dos modelos de lajes influenciou no rendimento da aplicação do reforço, uma vez que se fez necessário todo um tratamento no substrato para se proceder à colagem do PRFC. Outra dificuldade que mereceu destaque foi o acompanhamento do mapa de fissuração durante a realização dos ensaios dos modelos reforçados, uma vez que a ancoragem do reforço foi feita na superfície das lajes, dificultando a visualização do surgimento das fissuras.

Após a laje já devidamente furada, a produção de dois homens/dia proporcionou a execução do reforço de uma conexão laje-pilar, o que implica em um bom rendimento.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Avaliar a influência da taxa de reforço ao cisalhamento por perímetro.

Avaliar a variação dos espaçamentos entre os perímetros de reforço, bem como a variação no número de perímetros reforçados.

Analisar a aplicabilidade da técnica sugerida nesta pesquisa a uma situação real de uma estrutura em uso, a partir do reforço de modelos após sofrerem precarregamento.

Analisar a eficácia da técnica aplicada nesta pesquisa através de modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos.

7. BIBLIOGRAFIA

1. ACI committee 318, *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) and Commentary* – American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
2. ACI Committee 440. (2002). “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.*” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – *Projeto de estruturas de concreto- procedimentos*. Rio de Janeiro – 2008.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67:1998 – *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro – 1998.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2003 – *Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. Rio de Janeiro – 2003.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2007 – *Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro – 2007.
7. ALBUQUERQUE, E. J. P. (2010). *Punção em lajes lisas com armaduras de cisalhamento e pilares de centro retangulares*. Dissertação de mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM – 004 A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 205p.

8. BEBER, A. J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003. 289p

9 BINICI, B., *Punching shear strengthening of reinforced concrete slabs using fiber reinforced polymers*. PhD thesis, University of Texas at Austin, USA, 2003, 284p.

10. BINICI, B., BAYRAK. O., *Upgrading of slab–column connections using fiber reinforced polymers*. Engineering structures 27 (2005), 97-107p, october of 2004

11. BORGES, L. L. J. (2004). *Comportamento ao Puncionamento de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares e Furos de Grandes Dimensões*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 002A/2004, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 367 p.

12. CASTRO, Eliane Kraus (2005). *Reforço em Vigas “T” de Concreto Armado com Vários Tipos de Compósitos em Entalhe no Cobrimento de Concreto (CEC)*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD 008A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 402p.

13. C. E. Bakis, L. C. Bank, V. L. Brown, E. Consenza, J. F. Davalos, J. J. Lesko, A. Machida, S. H. Rizkalla and T. C. Triantafillou, *Fiber-reinforced Composites For construction-State-Of-The-Art-Review*, American Society of Civil Engineers, 150th anniversary paper, JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION, MAY 2002, 73-87P.

14. Comitê Euro-International Du Béton. CEB FIP *Model Code 1990*. London, Thomas Telford, 1993.

15. GUANDALINI, S.; BURDED, L.O.; MUTTONI, A., *Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios*, *ACI Structural Journal*, V. 106, No. 1, January-February 2009.

16. H. Erdogan, B. Binici, G. Ozcebe, *Punching shear strengthening of flat-slabs with CFRP dowels*, *Kocaeli University; Middle East Technical University, Magazine of Concrete Research*, 2010, 62, No. 7, July, 465–478

17. *EUROCODE 2:2004 – Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.

18. FERREIRA, M. P. (2010). *Punção em lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento e momentos desbalanceados*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, publicação E. TD – 007 A/10 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 275p.

19. GARDNER, N. J., JUNGSUCK HUH, LAN CHUNG, *Lessons from the Shoompong department store collapse*, *Cement and Concrete Composites* 24, 2002, 523-529p.

20. GOMES, H. Pontes (2010). *Puncionamento em lajes lisas protendidas com pilar de extremidades e momentos desbalanceados nas duas direções*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 001 A /2010, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 309p.

21. HONORATO, M. O. (2008). *Punção em lajes lisas com pilar de borda protendidas com cordoalhas não-aderentes*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM - 009/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 195p.

22. MELO, G. S. S. A., *Behavior of reinforced concrete flat slab after local failure*. PhD thesis, Polytechnic of central London, London, England, 1990, 214p.
23. OLIVEIRA, D. R. C., *Análise experimental de lajes lco gumelo de concreto armado com armadura de cisalhamento ao puncionamento*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998.
24. OLIVEIRA, D. R. C., *Análise experimental de lajes cogumelo de concreto armado com pilares retangulares*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 001A/2003, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2003, 214p.
25. SILVA FILHO, J. N. (2005). *Análise Experimental de Vigas “T” em Concreto Armado Reforçadas à Flexão com FRP Submetidas a Carregamentos Pseudo-estáticos e Cíclicos*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-005 A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 308 p.
26. SOUZA, R. M., *Punção em lajes cogumelo de concreto armado com furos adjacentes ou distantes de um pilar interno*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.
27. SOUZA, R. M., *Punção em lajes lisas de concreto armado com furos adjacentes ao pilar e transferência de momentos*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Publicação E.TD – 003A/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 442p.

28. TRAUTWEIN, L. M., *Punção em lajes cogumelo de concreto armado com armadura de cisalhamento do tipo “Stud” interno e estribo inclinado*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2001.

29. VILLAVERDE B., V. (2008). *Punção em lajes cogumelo de concreto protendido com cabos não-aderentes na ligação laje-pilar de borda*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD - 001/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 378p.

30. WOOD, J. G. M., *Pipers Row Car Park, Wolverhampton: Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997*. Report presented to Structural Studies & Design Ltd, England, 1997, 209p.

31. (http://dussarrat-engenharia.blogspot.com/2009_07_01_archive.html) acessado em 20/06/2011.

32. (http://bimandbeam.typepad.com/bim_beam/2008/08/interview-with.html), acessado em 20/06/2011.

33. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=1773376803&_sort=r&_st=13&view=c&_acct=C000037918&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687355&md5=d3e71472eb20b9bc2d8872ff18af9db9&searchtype=a, acessado em 20/06/2011

34. http://www.periodicos.capes.gov.br/ez54.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_pmetabusca&mn=88&smn=88&type=m&metalib=aHR0cDovL2J1c2NhZG9yLnBlcmhvZGljb3MuY2FwZXMuZ292LmJyL1Y%2FaW5zdGl0dXRIPUNBUEVTJnBvcnRhbD1OT1ZPJm5ld19sbmc9UE9SJmZ1bmM9cXVpY2stMS1jaGVjazEmbW9kZT1za

W1wbGU%3D&buscaRapidaArea=000075066&buscaRapidaTermo=punching+shear,
acessado em 20/06/2011.

35. <http://www.basf-cc.com.br/PT/produtos/grautes/MBrace/Documents/MBRACE.pdf>,
acessado em 20/06/2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Estimativas de cargas e modos de rupturas das normas e valores experimentais.

Nesta seção, são mostradas as estimativas de carga obtidas a partir das recomendações normativas estudadas, assim como os resultados obtidos experimentalmente. O carregamento foi aplicado de forma simétrica e distribuído em 08 (oito) pontos na superfície dos modelos, conforme figura a baixo.

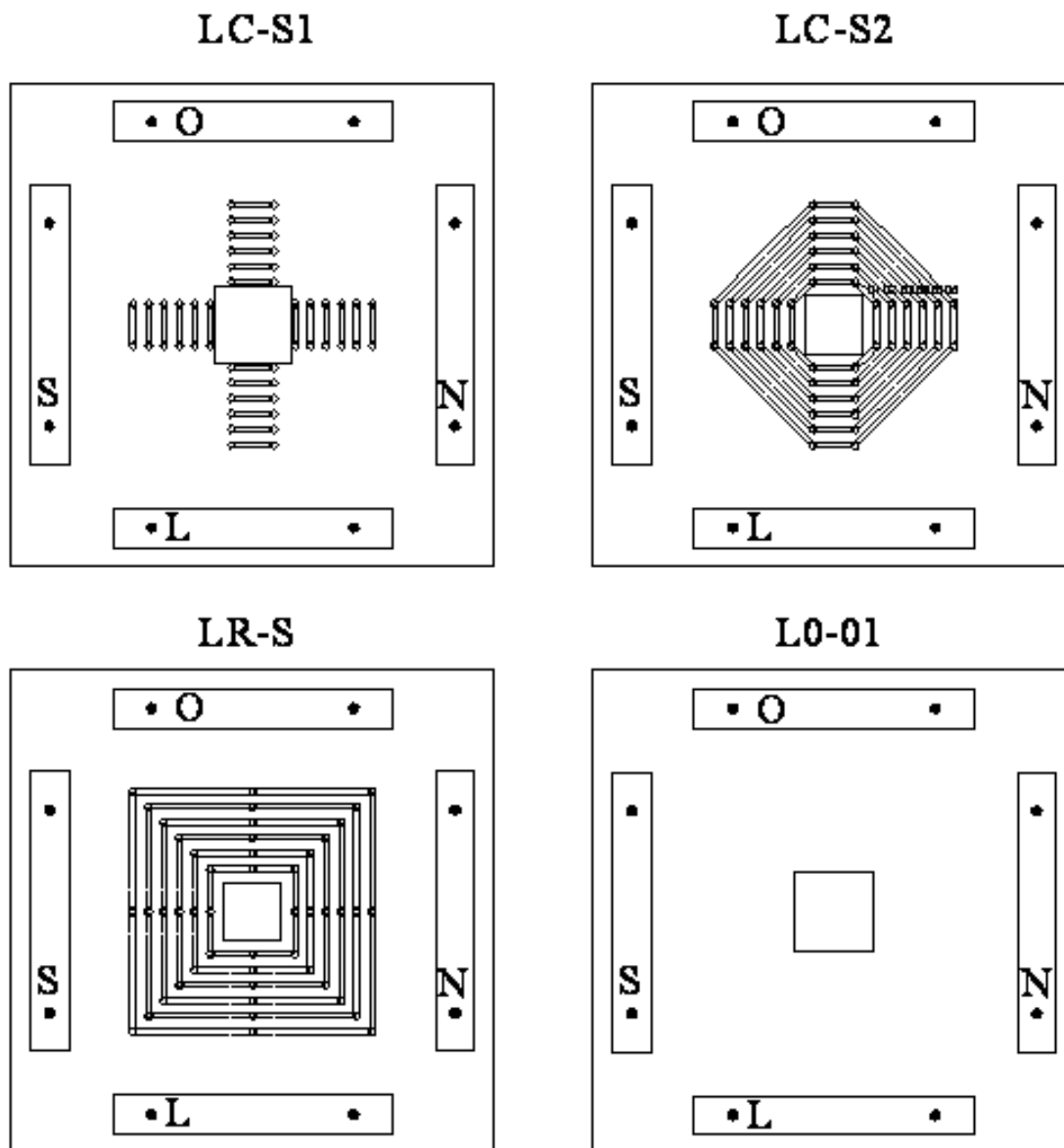


Figura A.1 - Esquema dos modelos ensaiados

APÊNDICE A.1 – Estimativas para o ACI 38:2008

Modelo	Experimental		ACI 318:2008								
	V _{test} (kN)	Modo ruptura	V _{R,C} PRFC (kN)	V _{OUT} (kN)	V _{MAX} (kN)	V _{ACI} (kN)	Modo ruptura	V _{test} /V _{ACI}	V _{flex} (kN)	V _{test} /V _{flex}	Carga de pós puncionamento (kN)
L0-1	571	-	-	-	-	520	-	1,10	1282	0,45	-
LC-S1	803	dentro	813	758	892	758	fora	1,06	1317	0,61	340
LC-S2	892	dentro	825	767	906	767	fora	1,16	1334	0,67	542
LR-S	868	dentro	829	1011	912	829	dentro	1,05	1341	0,65	793
Média								1,09			
Desvio Padrão								0,05			
Coeficiente de Variação								0,048			

APÊNDICE A.2 – Estimativas para o EUROCODE 2:2004

Modelo	Experimental		EUROCODE 2:2004								
	V _{test} (kN)	Modo ruptura	V _{R,C} PRFC (kN)	V _{OUT} (kN)	V _{MAX} (kN)	V _{EC2} (kN)	Modo ruptura	V _{test} /V _{EC2}	V _{flex} (kN)	V _{test} /V _{flex}	Carga de pós puncionamento (kN)
L0-1	571	-	-	-	-	583	-	0,98	1282	0,45	-
LC-S1	803	dentro	1026	724	2052	724	fora	1,11	1317	0,61	340
LC-S2	892	dentro	1040	730	2076	730	fora	1,22	1334	0,67	542
LR-S	868	dentro	1046	763	2087	763	fora	1,14	1341	0,65	793
Média								1,11			
Desvio Padrão								0,10			
Coeficiente de Variação								0,090			

APÊNDICE A.3 – Estimativas para o ABNT NBR 6118:2007

Modelo	Experimental		ABNT NBR 6118:2007								
	V _{test} (kN)	Modo ruptura	V _{R,C} PRFC (kN)	V _{OUT} (kN)	V _{MAX} (kN)	V _{NBR} (kN)	Modo ruptura	V _{test} /V _{NBR}	V _{flex} (kN)	V _{test} /V _{flex}	Carga de pós puncionamento (kN)
L0-1	571	-	-	-	-	641	-	0,89	1281,93	0,45	-
LC-S1	803	dentro	1076	903	2216	903	fora	0,89	1316,60	0,61	340
LC-S2	892	dentro	1089	907	2243	907	fora	0,98	1334,15	0,67	542
LR-S	868	dentro	1094	942	2253	942	fora	0,92	1341,26	0,65	793
Média								0,92			
Desvio Padrão								0,04			
Coeficiente de Variação								0,048			

APÊNDICE B: Deslocamentos verticais nas lajes.

Nesta seção são mostrados os deslocamentos verticais medidos em cada modelo ao longo do ensaio. Os pontos de medição de deslocamentos foram os mostrados na figura a baixo:

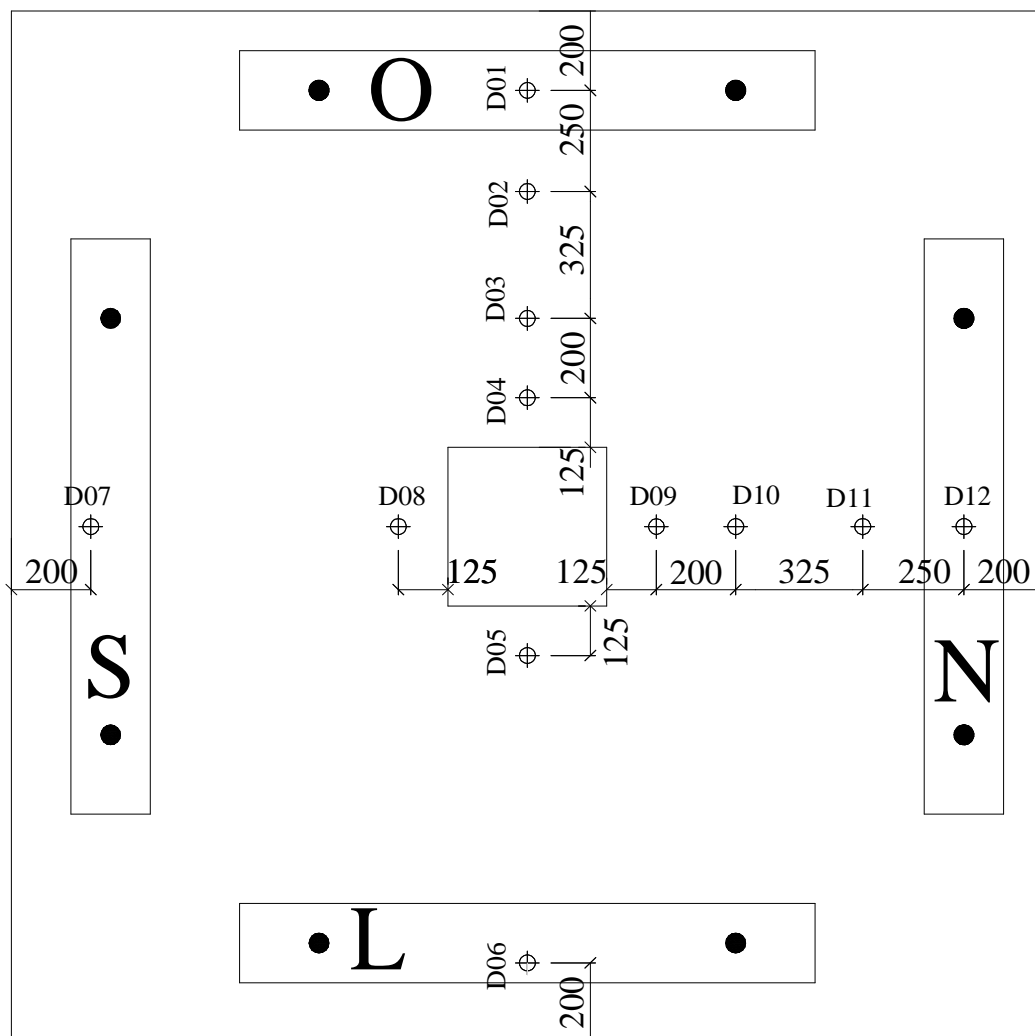


Figura B.1 - Posição dos Defletômetros

APÊNDICE B.1 – Deslocamentos verticais no modelo L0-01

L0-01- LVDTs d (%)																
Direção	LESTE-OESTE								NORTE-SUL							
Posição na laje	200	975	1100	1400	1525	1725	1970	2300	200	530	780	980	1100	1400	1525	2300
Carga (kN)	D06	D05	PILAR		D04	D03	D02	D01	D12	D11	D10	D09	PILAR		D08	D07
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
10,20	-0,05	-0,02	0,00	0,00	-0,06	-0,08	-0,13	-0,19	-0,10	-0,08	-0,05	-0,04	0,00	0,00	-0,04	-0,12
20,20	-0,27	-0,07	-	-	-0,08	-0,11	-0,14	-0,21	-0,12	-0,10	-0,07	-0,06	-	-	-0,11	-0,32
40,20	-0,44	-0,11	-	-	-0,17	-0,24	-0,32	-0,48	-0,29	-0,22	-0,16	-0,12	-	-	-0,18	-0,51
64,40	-0,86	-0,20	-	-	-0,23	-0,33	-0,43	-0,66	-0,55	-0,41	-0,29	-0,20	-	-	-0,25	-0,68
80,90	-0,84	-0,20	-	-	-0,33	-0,49	-0,66	-1,01	-0,74	-0,53	-0,37	-0,25	-	-	-0,31	-0,85
99,60	-1,11	-0,26	-	-	-0,41	-0,60	-0,79	-1,23	-0,98	-0,70	-0,48	-0,31	-	-	-0,38	-1,05
120,30	-1,51	-0,33	-	-	-0,49	-0,72	-0,94	-1,45	-1,29	-0,90	-0,61	-0,39	-	-	-0,47	-1,32
140,00	-1,93	-0,40	-	-	-0,57	-0,83	-1,09	-1,68	-1,67	-1,15	-0,76	-0,48	-	-	-0,53	-1,51
160,30	-2,36	-0,47	-	-	-0,65	-0,97	-1,28	-1,98	-2,04	-1,40	-0,91	-0,56	-	-	-0,61	-1,78
180,50	-2,85	-0,55	-	-	-0,74	-1,12	-1,49	-2,31	-2,41	-1,64	-1,06	-0,64	-	-	-0,69	-2,08
211,20	-3,47	-0,66	-	-	-0,82	-1,24	-1,67	-2,61	-2,79	-1,89	-1,22	-0,72	-	-	-0,78	-2,46
222,40	-3,97	-0,73	-	-	-0,91	-1,42	-1,94	-3,04	-3,51	-2,35	-1,49	-0,85	-	-	-0,82	-2,58
240,20	-4,45	-0,81	-	-	-0,99	-1,55	-2,15	-3,38	-3,70	-2,48	-1,57	-0,90	-	-	-0,91	-2,96
260,20	-4,89	-0,88	-	-	-1,08	-1,72	-2,42	-3,80	-4,04	-2,70	-1,71	-0,98	-	-	-1,00	-3,32
280,60	-5,44	-0,97	-	-	-1,15	-1,86	-2,64	-4,15	-4,42	-2,95	-1,86	-1,06	-	-	-1,07	-3,67
300,50	-6,01	-1,06	-	-	-1,23	-2,01	-2,87	-4,53	-4,93	-3,28	-2,06	-1,16	-	-	-1,12	-3,90
320,90	-6,56	-1,15	-	-	-1,30	-2,17	-3,13	-4,94	-5,25	-3,49	-2,18	-1,23	-	-	-1,21	-4,33
339,90	-6,93	-1,20	-	-	-1,39	-2,33	-3,38	-5,35	-5,68	-3,77	-2,35	-1,31	-	-	-1,26	-4,51
360,40	-7,48	-1,28	-	-	-1,48	-2,52	-3,71	-5,87	-6,13	-4,07	-2,53	-1,40	-	-	-1,33	-4,90
379,90	-7,91	-1,35	-	-	-1,57	-2,69	-3,98	-6,30	-6,58	-4,36	-2,71	-1,48	-	-	-1,38	-5,14
400,80	-8,41	-1,43	-	-	-1,66	-2,87	-4,28	-6,76	-7,03	-4,66	-2,89	-1,58	-	-	-1,44	-5,46
424,40	-9,11	-1,54	-	-	-1,79	-3,14	-4,72	-7,45	-7,46	-4,95	-3,08	-1,68	-	-	-1,59	-6,21
441,00	-9,48	-1,59	-	-	-1,82	-3,22	-4,85	-7,66	-7,84	-5,20	-3,23	-1,76	-	-	-1,60	-6,23
461,30	-10,04	-1,68	-	-	-1,95	-3,48	-5,28	-8,33	-8,44	-5,61	-3,50	-1,90	-	-	-1,67	-6,58
480,50	-10,48	-1,75	-	-	-2,04	-3,64	-5,53	-8,72	-8,90	-5,93	-3,70	-2,01	-	-	-1,73	-6,78
500,50	-10,88	-1,82	-	-	-2,14	-3,83	-5,83	-9,18	-9,30	-6,20	-3,87	-2,10	-	-	-1,80	-7,08

APÊNDICE B.2 – Deslocamentos verticais no modelo LC-S1

LC-S1- LVDTs d (%)																
Direção	LESTE-OESTE								NORTE-SUL							
Posição na laje	200	975	1100	1400	1525	1725	1970	2300	200	530	780	980	1100	1400	1525	2300
Carga (kN)	D06	D05	PILAR		D04	D03	D02	D01	D12	D11	D10	D09	PILAR		D08	D07
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
23,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,34	-0,27	-0,18	-0,13	0,00	0,00	-0,07	-0,13
41,20	-0,19	-0,10	-	-	-0,13	-0,03	-0,29	-0,43	-1,18	-0,89	-0,52	-0,39	-	-	-0,26	-0,69
83,00	-0,83	-0,33	-	-	-0,43	-0,35	-1,01	-1,45	-1,92	-1,41	-0,83	-0,59	-	-	-0,44	-1,30
132,30	-1,71	-0,55	-	-	-0,69	-0,67	-1,78	-2,60	-2,79	-2,02	-1,17	-0,81	-	-	-0,62	-2,02
161,70	-2,74	-0,76	-	-	-0,92	-0,98	-2,48	-3,63	-3,73	-2,68	-1,55	-1,03	-	-	-0,77	-2,69
203,90	-3,58	-0,92	-	-	-1,16	-1,40	-3,29	-4,89	-4,58	-3,26	-1,89	-1,21	-	-	-0,89	-3,33
240,80	-4,28	-1,06	-	-	-1,39	-1,81	-4,08	-6,10	-5,45	-3,82	-2,21	-1,37	-	-	-1,03	-4,13
282,40	-5,18	-1,21	-	-	-1,58	-2,20	-4,77	-7,18	-6,44	-4,46	-2,55	-1,55	-	-	-1,13	-4,69
324,40	-6,29	-1,38	-	-	-1,74	-2,56	-5,39	-8,13	-7,11	-4,96	-2,81	-1,68	-	-	-1,23	-5,36
361,80	-7,02	-1,49	-	-	-1,90	-2,90	-5,96	-9,04	-8,10	-5,64	-3,18	-1,88	-	-	-1,34	-6,03
401,50	-7,70	-1,61	-	-	-2,14	-3,46	-6,92	-10,54	-8,88	-6,18	-3,49	-2,04	-	-	-1,47	-6,91
447,50	-8,46	-1,73	-	-	-2,35	-3,96	-7,78	-11,89	-9,65	-6,71	-3,80	-2,18	-	-	-1,60	-7,75
484,40	-9,21	-1,86	-	-	-2,55	-4,41	-8,53	-13,04	-10,50	-7,33	-4,18	-2,36	-	-	-1,67	-8,24
522,60	-10,10	-2,01	-	-	-2,70	-4,75	-9,10	-13,88	-11,14	-7,76	-4,44	-2,47	-	-	-1,72	-8,49
541,10	-10,37	-2,07	-	-	-2,86	-5,11	-9,69	-14,80	-11,62	-8,08	-4,64	-2,57	-	-	-1,78	-8,89
561,30	-10,82	-2,15	-	-	-2,98	-5,34	-10,11	-15,41	-12,06	-8,39	-4,83	-2,66	-	-	-1,85	-9,25
580,90	-11,13	-2,20	-	-	-3,12	-5,64	-10,61	-16,17	-12,43	-8,63	-4,98	-2,73	-	-	-1,94	-9,83
605,90	-11,75	-2,31	-	-	-3,18	-5,79	-10,86	-16,54	-12,94	-8,99	-5,20	-2,83	-	-	-2,02	-10,18
620,70	-12,08	-2,36	-	-	-3,33	-6,10	-11,37	-17,32	-13,43	-9,40	-5,48	-2,96	-	-	-2,15	-10,76
644,90	-12,61	-2,47	-	-	-3,50	-6,45	-11,96	-18,19	-14,07	-9,84	-5,76	-3,10	-	-	-2,26	-11,23
662,40	-13,32	-2,62	-	-	-3,64	-6,46	-12,45	-18,91	-14,75	-10,33	-6,07	-3,25	-	-	-2,38	-11,75
682,80	-13,86	-2,73	-	-	-3,81	-6,84	-13,06	-19,80	-15,48	-10,88	-6,43	-3,44	-	-	-2,73	-13,17
717,60	-15,17	-3,02	-	-	-4,04	-7,30	-13,74	-20,74	-16,29	-11,50	-6,86	-3,71	-	-	-2,83	-13,21
720,50	-15,10	-3,05	-	-	-4,39	-8,01	-14,84	-22,30	-17,68	-12,58	-7,62	-4,18	-	-	-3,12	-13,84
741,40	-15,31	-3,18	-	-	-4,99	-9,25	-16,73	-24,95	-18,19	-12,97	-7,88	-4,33	-	-	-3,17	-13,84
742,90	-15,29	-3,20	-	-	-5,13	-9,56	-17,16	-25,52	-19,02	-13,58	-8,29	-4,58	-	-	-3,29	-14,03
746,00	-15,28	-3,26	-	-	-5,38	-10,02	-17,81	-26,37	-19,73	-14,14	-8,68	-4,83	-	-	-3,50	-14,30
759,00	-15,28	-3,34	-	-	-5,65	-10,46	-18,43	-27,20	-19,86	-14,28	-8,81	-4,93	-	-	-3,62	-14,44
759,70	-15,26	-3,39	-	-	-5,81	-10,75	-18,87	-27,81	-20,03	-14,46	-8,98	-5,08	-	-	-3,84	-14,85
750,20	-15,83	-3,60	-	-	-5,97	-10,99	-19,19	-28,25	-20,04	-14,51	-9,04	-5,16	-	-	-4,20	-16,21
769,90	-16,50	-3,87	-	-	-6,08	-11,08	-19,28	-28,29	-20,10	-14,59	-9,15	-5,26	-	-	-4,38	-16,59
778,60	-17,01	-4,07	-	-	-6,15	-11,14	-19,32	-28,28	-20,13	-14,63	-9,20	-5,30	-	-	-4,42	-16,63
764,40	-17,04	-4,11	-	-	-6,18	-11,18	-19,35	-28,31	-21,34	-15,50	-9,76	-5,61	-	-	-4,47	-16,53
764,60	-16,97	-4,16	-	-	-6,50	-11,83	-20,35	-29,76	-21,76	-15,88	-10,06	-5,83	-	-	-4,85	-17,47
778,80	-16,92	-4,27	-	-	-6,89	-12,55	-21,44	-31,29	-21,79	-15,94	-10,13	-5,90	-	-	-5,06	-18,06
780,50	-16,91	-4,33	-	-	-7,04	-12,81	-21,83	-31,84	-22,05	-16,24	-10,42	-6,12	-	-	-5,51	-18,77
789,00	-16,83	-4,45	-	-	-7,52	-13,71	-23,19	-33,75	-22,22	-16,46	-10,66	-6,44	-	-	-5,86	-19,08
794,70	-16,81	-4,55	-	-	-7,73	-14,28	-23,89	-34,69	-22,36	-16,67	-10,92	-6,73	-	-	-6,70	-20,38
793,70	-16,84	-4,74	-	-	-8,01	-14,85	-24,63	-35,62	-23,26	-17,68	-11,89	-7,60	-	-	-8,86	-22,91
789,80	-17,11	-5,06	-	-	-8,71	-16,45	-26,63	-38,08	-24,43	-19,03	-13,24	-7,69	-	-	-11,68	-26,23
783,60	-17,23	-5,25	-	-	-9,21	-18,93	-29,85	-41,96	-25,64	-20,68	-15,18	-7,82	-	-	-15,03	-30,27
785,50	-17,39	-5,35	-	-	-9,71	-22,48	-33,68	-45,88	-26,46	-21,63	-16,17	-8,04	-	-	-17,21	-33,05
781,80	-17,71	-5,36	-	-	-9,98	-23,66	-35,28	-47,20	-26,85	-22,37	-17,07	-8,11	-	-	-19,78	-36,84

PÊNDICE B.3 – Deslocamentos verticais no modelo LC-S2

LC-S2- LVDTs d (%)																
Direção	LESTE-OESTE								NORTE-SUL							
Posição na laje	200	975	1100	1400	1525	1725	1970	2300	200	530	780	980	1100	1400	1525	2300
Carga (kN)	D06	D05	PILAR		D04	D03	D02	D01	D12	D11	D10	D09	PILAR		D08	D07
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
46,70	0,87	0,09	0,00	0,00	-0,52	-1,12	-1,53	-2,41	-0,40	-0,36	-0,23	-0,14	0,00	0,00	-0,29	-0,67
77,30	0,63	0,00	-	-	-0,71	-1,48	-2,08	-3,25	-0,87	-0,73	-0,43	-0,26	-	-	-0,42	-1,03
121,90	-1,46	-0,40	-	-	-0,81	-1,61	-2,34	-3,47	-1,22	-1,02	-0,60	-0,33	-	-	-0,71	-1,99
160,60	-1,30	-0,42	-	-	-1,18	-2,36	-3,67	-5,59	-1,78	-1,41	-0,82	-0,44	-	-	-0,93	-2,86
207,90	-3,12	-0,73	-	-	-1,31	-2,53	-4,12	-6,18	-2,55	-1,97	-1,11	-0,57	-	-	-1,14	-3,73
239,40	-4,18	-0,93	-	-	-1,35	-2,63	-4,40	-6,37	-2,90	-2,23	-1,23	-0,62	-	-	-1,33	-4,53
283,70	-5,44	-1,14	-	-	-1,50	-2,97	-4,99	-7,33	-3,63	-2,74	-1,51	-0,74	-	-	-1,52	-5,39
320,50	-6,43	-1,32	-	-	-1,63	-3,27	-5,48	-8,17	-4,29	-3,17	-1,73	-0,83	-	-	-1,72	-6,24
360,70	-7,55	-1,55	-	-	-1,79	-3,64	-6,07	-9,17	-4,92	-3,56	-1,94	-0,92	-	-	-1,96	-7,26
400,20	-8,61	-1,76	-	-	-1,96	-4,03	-6,68	-10,16	-5,52	-3,95	-2,15	-1,00	-	-	-2,21	-8,27
439,90	-9,37	-1,90	-	-	-2,10	-4,28	-7,11	-10,88	-5,85	-4,18	-2,28	-1,06	-	-	-2,37	-8,92
481,80	-11,18	-2,37	-	-	-2,36	-4,71	-7,89	-12,01	-6,34	-4,54	-2,49	-1,12	-	-	-2,93	-10,95
521,30	-12,30	-2,67	-	-	-2,63	-5,12	-8,67	-13,14	-6,31	-4,53	-2,48	-1,12	-	-	-3,46	-12,88
561,20	-13,39	-2,93	-	-	-2,83	-5,52	-9,42	-14,24	-6,63	-4,82	-2,65	-1,16	-	-	-3,82	-14,37
606,60	-15,15	-3,36	-	-	-3,08	-5,91	-10,21	-15,32	-6,48	-4,76	-2,69	-1,22	-	-	-4,44	-16,76
625,50	-15,93	-3,56	-	-	-3,11	-5,92	-10,21	-15,34	-6,55	-4,83	-2,75	-1,23	-	-	-4,57	-17,62
643,20	-16,35	-3,65	-	-	-3,21	-6,13	-10,59	-15,93	-6,86	-5,07	-2,89	-1,30	-	-	-4,67	-18,12
654,40	-16,86	-3,75	-	-	-3,21	-6,13	-10,59	-15,94	-7,10	-5,23	-2,99	-1,34	-	-	-4,72	-18,40
663,30	-17,73	-3,93	-	-	-3,29	-6,29	-10,89	-16,43	-7,38	-5,44	-3,13	-1,41	-	-	-4,82	-18,83
679,90	-17,82	-3,96	-	-	-3,38	-6,47	-11,21	-16,92	-7,56	-5,57	-3,20	-1,45	-	-	-4,89	-19,29
699,80	-18,86	-4,15	-	-	-3,40	-6,48	-11,21	-16,91	-7,80	-5,75	-3,31	-1,50	-	-	-4,99	-19,86
722,80	-19,78	-4,30	-	-	-3,46	-6,65	-11,53	-17,44	-7,98	-5,89	-3,41	-1,55	-	-	-5,04	-20,04
738,30	-21,12	-4,53	-	-	-3,61	-6,98	-12,11	-18,37	-8,34	-6,17	-3,58	-1,64	-	-	-5,15	-20,54
766,50	-22,03	-4,72	-	-	-3,74	-7,24	-12,53	-18,98	-8,91	-6,57	-3,83	-1,76	-	-	-5,29	-21,39
794,50	-22,87	-4,90	-	-	-3,87	-7,48	-12,90	-19,48	-9,58	-7,06	-4,12	-1,91	-	-	-5,44	-22,16
803,90	-24,52	-5,23	-	-	-3,98	-7,68	-13,17	-19,83	-10,35	-7,59	-4,49	-2,11	-	-	-5,58	-22,75
812,70	-25,46	-5,47	-	-	-4,08	-7,82	-13,33	-19,95	-11,32	-8,29	-4,93	-2,35	-	-	-5,68	-23,19

APÊNDICE B.4 – Deslocamentos verticais no modelo LR-S

LC-S2- LVDTs d (%)																
Direção	LESTE-OESTE								NORTE-SUL							
Posição na laje	200	975	1100	1400	1525	1725	1970	2300	200	530	780	980	1100	1400	1525	2300
Carga (kN)	D06	D05	PILAR		D04	D03	D02	D01	D12	D11	D10	D09	PILAR		D08	D07
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
40,90	-0,16	-0,05	-	-	-0,05	-0,08	-0,14	-0,18	-0,06	-0,06	-0,03	-0,03	-	-	-0,07	-0,27
61,00	-0,31	-0,09	-	-	-0,10	-0,16	-0,28	-0,36	-0,20	-0,18	-0,10	-0,07	-	-	-0,11	-0,46
79,80	-0,75	-0,20	-	-	-0,13	-0,23	-0,38	-0,49	-0,42	-0,34	-0,21	-0,14	-	-	-0,17	-0,71
101,00	-1,08	-0,29	-	-	-0,25	-0,43	-0,76	-0,99	-0,73	-0,58	-0,35	-0,22	-	-	-0,24	-1,03
121,50	-1,74	-0,44	-	-	-0,32	-0,58	-1,03	-1,34	-1,10	-0,84	-0,52	-0,32	-	-	-0,32	-1,41
141,20	-2,28	-0,56	-	-	-0,42	-0,76	-1,37	-1,80	-1,54	-1,15	-0,72	-0,43	-	-	-0,39	-1,76
161,80	-2,94	-0,70	-	-	-0,48	-0,89	-1,63	-2,14	-1,96	-1,44	-0,89	-0,52	-	-	-0,45	-2,12
192,40	-3,08	-0,73	-	-	-0,61	-1,15	-2,14	-2,80	-2,30	-1,66	-1,02	-0,58	-	-	-0,54	-2,55
209,40	-3,30	-0,76	-	-	-0,73	-1,38	-2,61	-3,40	-2,72	-1,94	-1,18	-0,65	-	-	-0,59	-2,80
247,10	-4,35	-0,93	-	-	-0,89	-1,74	-3,33	-4,36	-3,29	-2,30	-1,38	-0,74	-	-	-0,81	-4,03
281,00	-5,03	-1,03	-	-	-1,02	-2,05	-3,99	-5,24	-4,32	-2,97	-1,79	-0,93	-	-	-0,83	-4,19
329,10	-5,87	-1,15	-	-	-1,26	-2,60	-5,14	-6,75	-5,60	-3,79	-2,28	-1,15	-	-	-0,92	-4,79
362,10	-7,00	-1,33	-	-	-1,31	-2,71	-5,38	-7,08	-6,13	-4,11	-2,47	-1,25	-	-	-1,03	-5,48
408,00	-7,71	-1,44	-	-	-1,47	-3,07	-6,13	-8,05	-6,51	-4,35	-2,62	-1,31	-	-	-1,22	-6,60
444,10	-8,50	-1,56	-	-	-1,65	-3,50	-7,05	-9,28	-7,74	-5,15	-3,12	-1,53	-	-	-1,27	-6,88
486,60	-9,42	-1,71	-	-	-1,78	-3,82	-7,69	-10,13	-8,49	-5,65	-3,43	-1,67	-	-	-1,38	-7,60
522,00	-10,39	-1,87	-	-	-1,93	-4,13	-8,36	-11,02	-9,52	-6,29	-3,84	-1,85	-	-	-1,46	-8,08
559,00	-11,41	-2,04	-	-	-2,11	-4,55	-9,17	-12,11	-10,44	-6,91	-4,25	-2,03	-	-	-1,63	-8,94
620,90	-11,78	-2,10	-	-	-2,58	-5,63	-11,22	-14,80	-11,63	-7,73	-4,78	-2,26	-	-	-1,92	-10,26
644,30	-13,02	-2,32	-	-	-2,65	-5,80	-11,55	-15,19	-12,65	-8,43	-5,24	-2,47	-	-	-1,98	-10,61
682,70	-14,46	-2,59	-	-	-2,75	-6,04	-11,99	-15,75	-13,69	-9,17	-5,75	-2,72	-	-	-2,09	-11,11
722,00	-15,29	-2,76	-	-	-3,03	-6,63	-13,06	-17,11	-14,98	-10,08	-6,37	-3,03	-	-	-2,23	-11,68
764,60	-17,07	-3,20	-	-	-3,64	-7,83	-15,01	-19,52	-17,39	-11,86	-7,65	-3,69	-	-	-2,57	-12,73
778,30	-17,19	-3,27	-	-	-3,88	-8,28	-15,80	-20,53	-18,22	-12,45	-8,06	-3,91	-	-	-2,63	-12,85
794,60	-17,46	-3,34	-	-	-4,06	-8,55	-16,23	-21,03	-18,82	-12,88	-8,36	-4,07	-	-	-2,71	-13,14
802,40	-17,98	-3,47	-	-	-4,19	-8,71	-16,47	-21,32	-19,30	-13,25	-8,63	-4,23	-	-	-2,76	-13,27
838,90	-19,61	-3,97	-	-	-4,93	-9,80	-18,28	-23,52	-21,57	-14,90	-9,82	-4,98	-	-	-3,15	-14,03
833,50	-20,34	-4,18	-	-	-5,00	-9,86	-18,31	-23,53	-21,76	-15,09	-9,99	-5,15	-	-	-3,28	-14,15
832,70	-20,55	-4,28	-	-	-5,06	-9,92	-18,35	-23,57	-21,91	-15,24	-10,17	-5,41	-	-	-3,35	-14,40
842,70	-21,40	-4,66	-	-	-5,28	-10,20	-18,64	-23,85	-22,92	-16,03	-10,81	-5,93	-	-	-3,66	-15,47
863,30	-26,47	-9,58	-	-	-7,23	-11,59	-18,97	-23,46	-26,68	-20,24	-15,38	-10,71	-	-	-5,88	-16,92
866,50	-32,59	-16,03	-	-	-9,49	-14,48	-19,71	-23,05	-31,49	-25,51	-20,97	-16,48	-	-	-9,70	-18,80
672,60	-34,81	-17,87	-	-	-9,82	-15,28	-20,05	-23,08	-32,22	-26,50	-22,15	-17,78	-	-	-11,42	-19,61

APÊNDICE C: Deformações nas armaduras de flexão.

Nesta seção são mostradas as deformações medidas das armaduras de flexão ao longo dos ensaios, para cada modelo.

Para cada ponto instrumentado, foi colocado um par de extensômetro, de modo que na tabela está inscrito o valor médio desses extensômetros para cada posição, no caso dos 02 (dois) extensômetros terem funcionado. No caso em que apenas um dos extensômetros tenha funcionado, este estará indicado na planilha, sendo o extensômetro A ou B. A instrumentação foi feita de acordo com as figuras a abaixo.

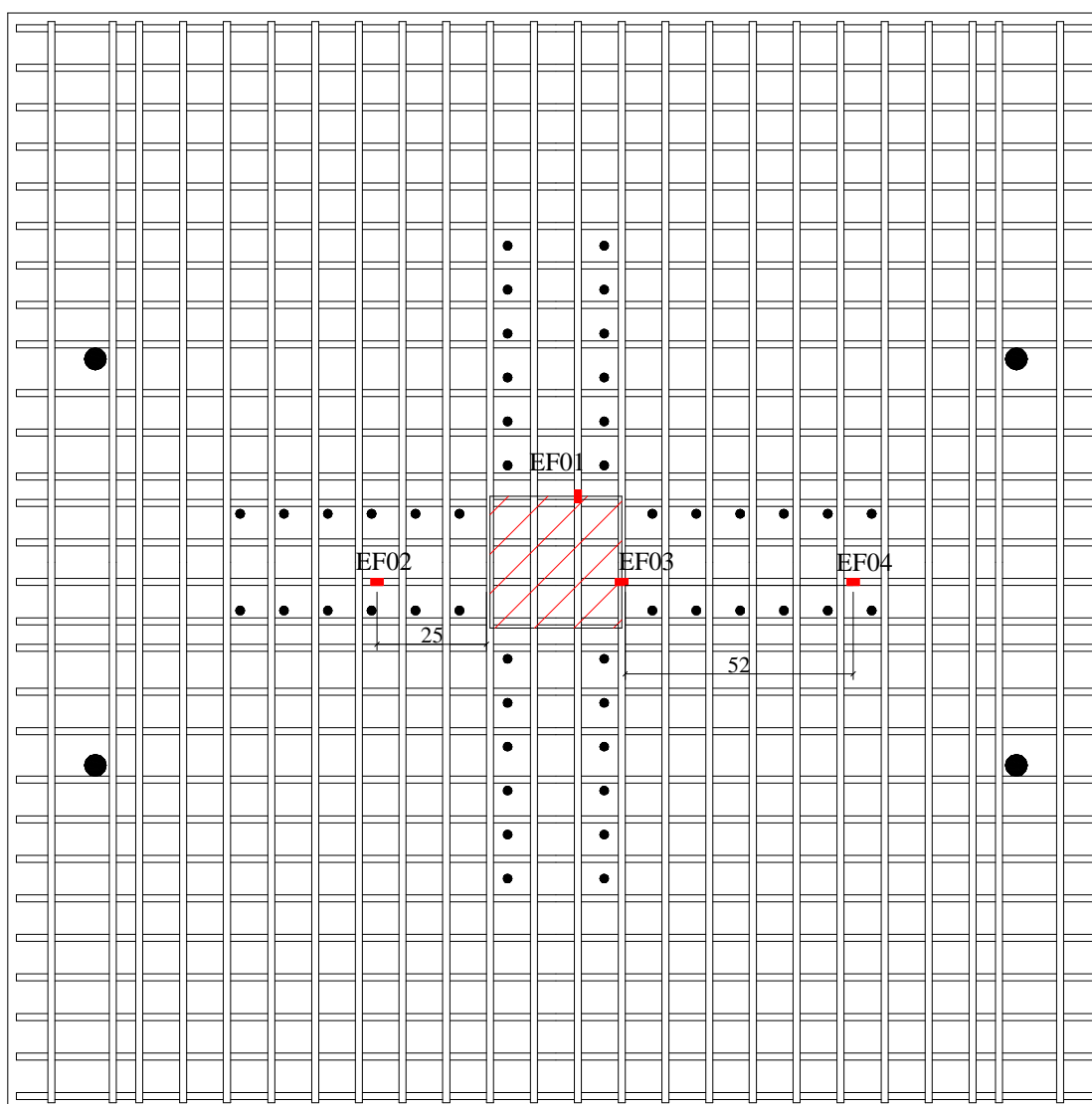


Figura C.1 - - Posição dos extensômetros (Armadura Superior)

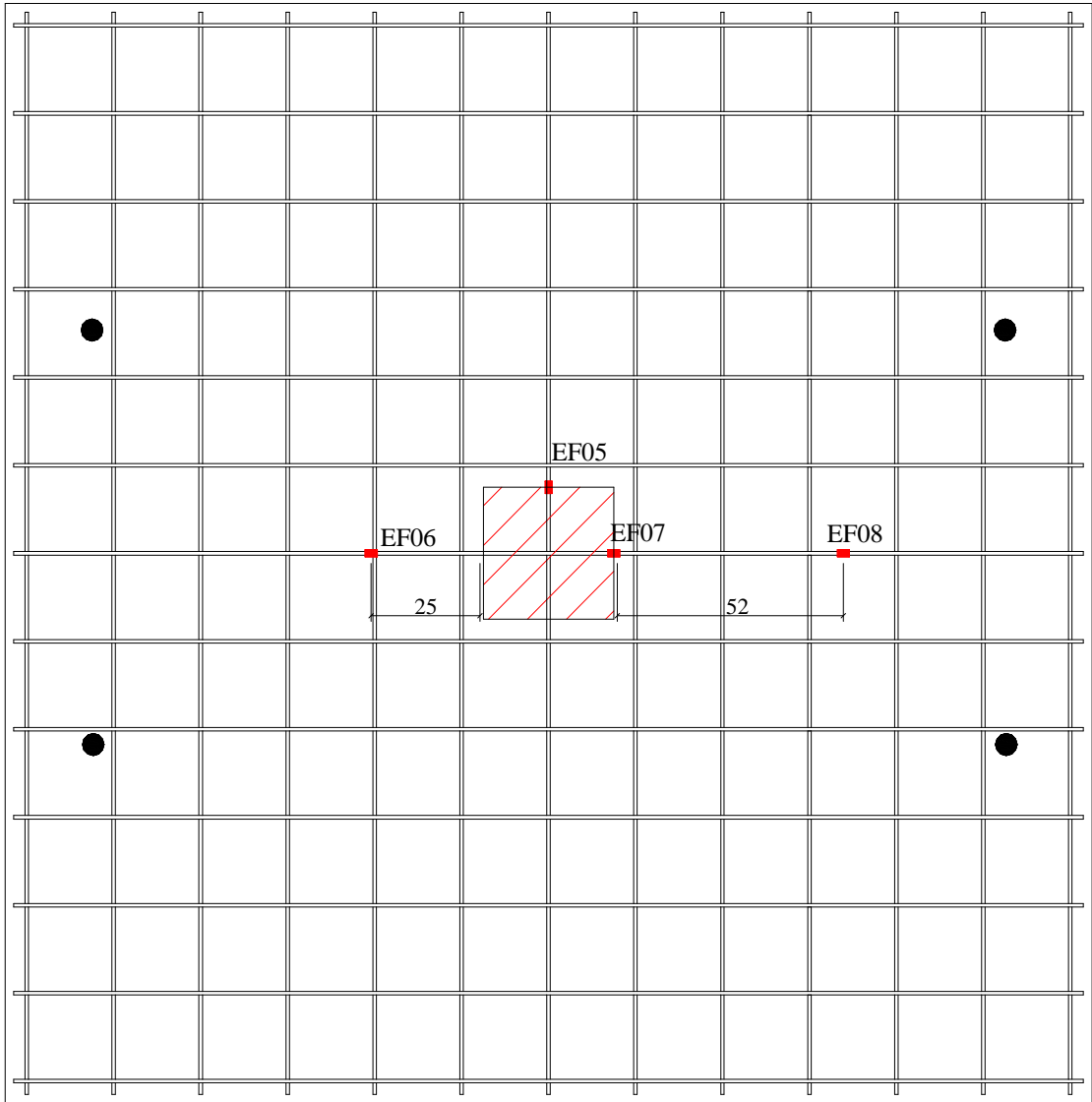


Figura C.2 - Posição dos extensômetros (Armadura Inferior)

APÊNDICE C.1 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo L0-01

L0-01 - Deformação na armadura de flexão (‰)						
Posição na laje (mm)	Armadura superior			Armadura inferior		
	1400	1650	1920	1400	1650	1920
Carga (kN)	EF01 (MÉDIA)	EF02 (MÉDIA)	EF04 (A)	EF05 (MÉDIA)	EF06 (MÉDIA)	EF08 (MÉDIA)
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,2	0,05	-0,03	-0,01	-0,03	-0,01	0,00
20,2	0,07	-0,04	-0,01	-0,07	-0,02	0,00
40,2	0,14	-0,08	-0,02	-0,11	-0,03	0,00
64,4	0,20	-0,12	-0,03	-0,18	-0,04	0,00
80,9	0,28	-0,16	-0,04	-0,24	-0,05	0,00
99,6	0,34	-0,19	-0,05	-0,29	-0,05	-0,01
120,3	0,40	-0,22	-0,06	-0,34	-0,06	-0,01
140,0	0,47	-0,25	-0,07	-0,39	-0,08	-0,01
160,3	0,54	-0,28	-0,09	-0,44	-0,09	-0,01
180,5	0,61	-0,32	-0,10	-0,52	-0,12	-0,02
211,2	0,69	-0,36	-0,11	-0,63	-0,13	-0,02
222,4	0,78	-0,40	-0,12	-0,76	-0,15	-0,03
240,2	0,86	-0,43	-0,13	-0,80	-0,17	-0,03
260,2	0,96	-0,47	-0,14	-0,89	-0,21	-0,03
280,6	1,04	-0,51	-0,15	-1,01	-0,21	-0,03
300,5	1,12	-0,54	-0,16	-1,10	-0,24	-0,04
320,9	1,21	-0,58	-0,18	-1,19	-0,25	-0,04
339,9	1,29	-0,61	-0,18	-1,29	-0,27	-0,05
360,4	1,38	-0,65	-0,19	-1,53	-0,29	-0,05
379,9	1,46	-0,68	-0,20	-1,55	-0,30	-0,06
400,8	1,57	-0,71	-0,21	-1,59	-0,29	-0,06
424,4	1,67	-0,75	-0,22	-1,69	-0,29	-0,06
441,0	1,73	-0,77	-0,22	-1,64	-0,19	-0,07
461,3	1,83	-0,82	-0,22	-1,71	-0,17	-0,07
480,5	1,90	-0,86	-0,23	-1,69	-0,16	-0,08
500,5	1,96	-0,89	-0,23	-1,66	-0,13	-0,08
521,0	2,03	-0,93	-0,24	-	-	-
540,3	2,04	-0,90	-0,24	-	-	-
560,2	2,08	-0,86	-0,25	-	-	-

APÊNDICE C.2 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo LC-S1

LC-S1 - Deformação na armadura de flexão (%)						
Posição na laje (mm)	Armadura superior				Armadura inferior	
	1400 (mm)	1400 (mm)	1650 (mm)	1920 (mm)	1400 (mm)	1650 (mm)
Carga (kN)	EF01 (MÉDIA)	EF03 (MÉDIA)	EF02 (MÉDIA)	EF04 (MÉDIA)	EF05 (MÉDIA)	EF06 (MÉDIA)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23,20	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	0,00
41,20	64,54	0,04	0,01	0,01	-0,09	-0,01
83,00	261,24	0,19	0,03	0,02	-0,13	-0,01
132,30	460,13	0,37	0,07	0,02	-0,16	-0,03
161,70	630,09	0,58	0,14	0,04	-0,19	-0,04
203,90	771,67	0,81	0,24	0,06	-0,24	-0,06
240,80	877,78	0,97	0,34	0,08	-0,27	-0,07
282,40	896,15	1,14	0,47	0,11	-0,31	-0,08
324,40	894,20	1,33	0,59	0,14	-0,34	-0,09
361,80	925,67	1,45	0,71	0,17	-0,39	-0,10
401,50	1099,41	1,59	0,84	0,22	-0,42	-0,12
447,50	1200,34	1,72	1,01	0,27	-0,41	-0,13
484,40	1279,12	1,86	1,17	0,30	-0,41	-0,14
522,60	1323,33	1,98	1,27	0,32	-0,42	-0,14
541,10	1383,16	2,05	1,32	0,33	-0,42	-0,15
561,30	1428,52	2,10	1,40	0,35	-0,43	-0,15
580,90	1488,46	2,16	1,47	0,36	-0,43	-0,17
605,90	1523,94	2,22	1,56	0,38	-0,44	-0,17
620,70	1592,61	2,30	1,62	0,39	-0,46	-0,18
644,90	1711,35	2,37	1,70	0,42	-0,49	-0,19
662,40	1804,25	2,44	1,77	0,45	-0,52	-0,20
682,80	1925,40	2,56	1,84	0,48	-0,61	-0,21
717,60	2071,23	2,70	1,98	0,51	-0,97	-0,19
720,50	-	2,84	1,98	0,51	-1,34	-0,13
741,40	-	2,99	2,05	0,54	-1,46	-0,12
742,90	-	3,07	2,05	0,56	-1,62	-0,11
746,00	-	3,23	2,07	0,59	-1,71	-0,11
759,00	-	3,95	2,04	0,61	-1,79	-0,01
759,70	-	4,02	2,02	0,61	-	-
750,20	-	3,45	2,02	0,63	-	-
769,90	-	3,14	2,12	0,65	-	-
778,60	-	3,28	2,13	0,66	-	-
764,40	-	4,16	2,13	0,67	-	-

APÊNDICE C.3 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo LC-S2

LC-S2 - Deformação na armadura de flexão (‰)							
Posição na laje (mm)	Armadura superior				Armadura inferior		
	1400 (mm)	1400 (mm)	1650 (mm)	1920 (mm)	1400 (mm)	1400 (mm)	1650 (mm)
Carga (kN)	EF01 (B)	EF03 (A)	EF02 (MÉDIA)	EF04 (MÉDIA)	EF05 (A)	EF07 (B)	EF06 (MÉDIA)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14,90	0,06	0,02	0,01	0,00	-0,06	-0,01	-0,01
46,70	0,29	0,09	0,01	0,00	-0,13	-0,03	-0,02
77,30	0,44	0,21	0,03	0,01	-0,17	-0,06	-0,02
121,90	0,51	0,32	0,07	0,02	-0,18	-0,08	-0,03
160,60	0,79	0,49	0,14	0,03	-0,27	-0,08	-0,05
207,90	0,88	0,65	0,23	0,05	-0,28	-0,10	-0,06
239,40	0,92	0,72	0,31	0,07	-0,30	-0,11	-0,07
283,70	1,07	0,86	0,41	0,10	-0,35	-0,12	-0,07
320,50	1,20	0,97	0,51	0,13	-0,39	-0,13	-0,08
360,70	1,30	1,08	0,62	0,16	-0,43	-0,15	-0,09
400,20	0,35	1,15	0,71	0,18	-0,48	-0,15	-0,10
439,90	0,30	1,21	0,77	0,20	-0,52	-0,14	-0,10
481,80	0,21	1,36	0,90	0,25	-0,57	-0,14	-0,11
521,30	-	1,43	0,99	0,29	-0,63	-0,13	-0,13
561,20	-	1,49	1,10	0,33	-0,67	-0,13	-0,14
606,60	-	1,44	1,22	0,39	-0,71	-0,13	-0,15
625,50	-	1,23	1,29	0,41	-0,71	-0,15	-0,16
643,20	-	0,87	1,33	0,43	-0,72	-0,16	-0,16
654,40	-	0,60	1,37	0,44	-0,72	-0,17	-0,16
663,30	-	0,33	1,41	0,46	-0,75	-0,18	-0,16
679,90	-	0,20	1,46	0,47	-0,75	-0,19	-0,17
699,80	-	0,14	1,52	0,48	-0,75	-0,19	-0,17
722,80	-	0,11	1,54	0,50	-0,78	-0,18	-0,16
738,30	-	-	1,59	0,53	-0,82	-0,16	-0,15
766,50	-	-	1,69	0,56	-0,85	-0,19	-0,15
794,50	-	-	1,78	0,58	-0,89	-0,25	-0,16
803,90	-	-	1,83	0,60	-0,95	-0,32	-0,14
812,70	-	-	1,86	0,60	-0,97	-0,43	-0,15
799,60	-	-	1,86	-	-1,05	-0,71	-0,13
879,50	-	-	2,12	-	-1,40	-0,93	-0,07
884,30	-	-	2,17	-	-1,54	-0,85	-
810,80	-	-	2,04	-	-2,57	-	-

APÊNDICE C.4 – Deformações nas armaduras de flexão registradas no modelo LR-S

LR-S - Deformação na armadura de flexão (‰)							
Posição na laje (mm)	Armadura superior			Armadura inferior			
	1400	1650	1920	1400	1400	1650	1920
Carga (kN)	EF03 (MÉDIA)	EF02 (MÉDIA)	EF04 (MÉDIA)	EF05 (MÉDIA)	EF07 (A)	EF06 (MÉDIA)	EF08 (MÉDIA)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40,90	0,03	0,01	0,00	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01
61,00	0,07	0,01	0,00	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01
79,80	0,15	0,02	0,01	-0,11	-0,06	-0,03	0,00
101,00	0,25	0,03	0,02	-0,18	-0,08	-0,04	0,00
121,50	0,38	0,06	0,03	-0,24	-0,11	-0,05	0,00
141,20	0,52	0,09	0,04	-0,29	-0,14	-0,05	0,00
161,80	0,64	0,13	0,05	-0,34	-0,18	-0,06	0,01
192,40	0,73	0,17	0,06	-0,39	-0,20	-0,08	0,00
209,40	0,83	0,21	0,07	-0,44	-0,23	-0,09	0,01
247,10	0,98	0,33	0,10	-0,52	-0,30	-0,12	0,00
281,00	1,18	0,39	0,14	-0,63	-0,37	-0,13	0,01
329,10	1,41	0,48	0,19	-0,76	-0,46	-0,15	0,01
362,10	1,52	0,56	0,21	-0,80	-0,49	-0,17	0,01
408,00	1,63	0,67	0,24	-0,89	-0,53	-0,21	0,02
444,10	1,82	0,72	0,29	-1,01	-0,64	-0,21	0,02
486,60	1,94	0,80	0,33	-1,10	-0,68	-0,24	0,02
522,00	2,07	0,87	0,38	-1,19	-0,72	-0,25	0,02
559,00	2,20	0,98	0,43	-1,29	-0,77	-0,27	0,03
620,90	2,36	1,12	0,50	-1,53	-0,84	-0,29	0,03
644,30	2,53	1,18	0,55	-1,55	-0,89	-0,30	0,03
682,70	2,68	1,24	0,62	-1,59	-1,01	-0,29	0,04
722,00	2,87	1,33	0,71	-1,69	-1,26	-0,29	0,05
764,60	3,39	1,44	0,86	-1,64	-2,34	-0,19	0,08
778,30	3,50	1,46	0,93	-1,71	-2,43	-0,17	0,08
794,60	3,62	1,50	0,97	-1,69	-2,43	-0,16	0,10
802,40	3,78	1,51	0,99	-1,66	-2,41	-0,13	0,11
838,90	-	1,57	1,09	-1,03	-2,42	-	0,13
833,50	-	1,59	1,11	-0,66	-2,40	-	0,15
832,70	-	1,60	1,12	-0,45	-2,38	-	0,13
842,70	-	1,72	1,18	-	-2,43	-	0,12
863,30	-	1,86	1,60	-	-	-	-

APÊNDICE D: Deformações na superfície do concreto.

Nesta seção são mostradas as deformações medidas na superfície do concreto ao longo do ensaio para todos os modelos. As deformações na superfície do concreto foram medidas na região próxima do pilar, passando pelo eixo norte-sul e leste-oeste, no caso dos modelos L0-01, LC-S1 e LC-S2. Para o modelo LR-S, os pares de extensômetros radiais e tangenciais, foram deslocados para os cantos do pilar, devido ao fato da posição inicial coincidir com um dos furos por onde foi colocado o reforço.

A instrumentação do concreto está mostrada nas figuras a baixo.

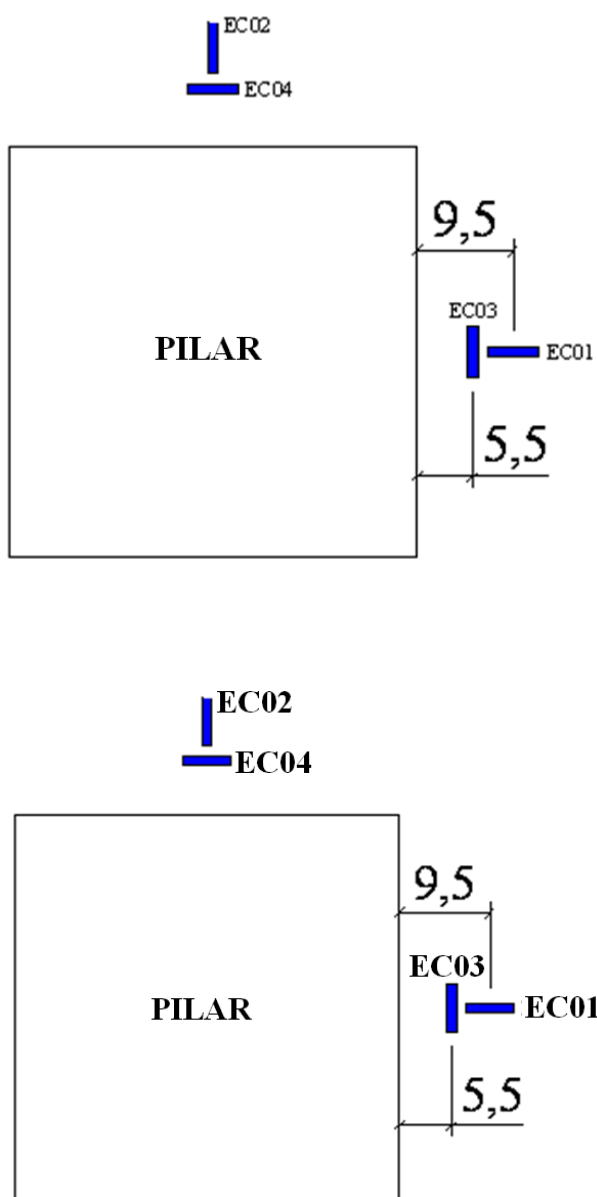


Figura D.1 - Posição dos extensômetros do concreto

APÊNDICE D.1 – Deformações na superfície do concreto para o modelo L0-01

L0-01				
Deformação no concreto (‰)				
Carga (kN)	EC1	EC2	EC3	EC4
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,20	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
20,20	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01
40,20	-0,03	-0,04	-0,02	-0,03
64,40	-0,05	-0,07	-0,03	-0,04
80,90	-0,06	-0,09	-0,03	-0,05
99,60	-0,08	-0,11	-0,04	-0,07
120,30	-0,11	-0,14	-0,05	-0,10
140,00	-0,14	-0,17	-0,07	-0,12
160,30	-0,17	-0,20	-0,08	-0,15
180,50	-0,21	-0,24	-0,10	-0,17
211,20	-0,25	-0,27	-0,12	-0,19
222,40	-0,32	-0,31	-0,14	-0,22
240,20	-0,34	-0,35	-0,16	-0,24
260,20	-0,39	-0,39	-0,18	-0,27
280,60	-0,43	-0,43	-0,20	-0,29
300,50	-0,47	-0,47	-0,22	-0,32
320,90	-0,50	-0,52	-0,25	-0,35
339,90	-0,52	-0,56	-0,27	-0,38
360,40	-0,53	-0,61	-0,29	-0,41
379,90	-0,54	-0,66	-0,31	-0,44
400,80	-0,54	-0,71	-0,33	-0,47
424,40	-0,53	-0,78	-0,36	-0,53
441,00	-0,54	-0,81	-0,38	-0,55
461,30	-0,48	-0,88	-0,44	-0,60
480,50	-0,46	-0,93	-0,48	-0,64
500,50	-0,44	-0,97	-0,52	-0,68

APÊNDICE D.2 – Deformações na superfície do concreto para o modelo LC-S1

LC-S1				
Deformação no concreto (‰)				
Carga (kN)	EC1	EC2	EC3	EC4
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23,20	0,00	0,00	0,00	0,00
41,20	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03
83,00	-0,09	-0,06	-0,09	-0,09
132,30	-0,13	-0,11	-0,16	-0,14
161,70	-0,21	-0,17	-0,21	-0,20
203,90	-0,28	-0,23	-0,25	-0,25
240,80	-0,35	-0,30	-0,29	-0,30
282,40	-0,42	-0,36	-0,32	-0,35
324,40	-0,50	-0,43	-0,36	-0,40
361,80	-0,55	-0,50	-0,39	-0,44
401,50	-0,60	-0,62	-0,44	-0,50
447,50	-0,62	-0,72	-0,48	-0,56
484,40	-0,62	-0,76	-0,51	-0,62
522,60	-0,65	-0,77	-0,54	-0,67
541,10	-0,68	-0,78	-0,58	-0,72
561,30	-0,72	-0,76	-0,60	-0,74
580,90	-0,75	-0,75	-0,62	-0,76
605,90	-0,76	-0,75	-0,64	-0,78
620,70	-0,78	-0,74	-0,65	-0,80
644,90	-0,77	-0,72	-0,66	-0,82
662,40	-0,74	-0,70	-0,68	-0,85
682,80	-0,72	-0,67	-0,73	-0,89
717,60	-0,63	-0,58	-0,71	-0,83
720,50	-0,52	-0,51	-0,74	-0,70
741,40	-0,42	-0,49	-0,79	-0,37
742,90	-0,39	-0,49	-0,79	-0,26
746,00	-0,31	-0,43	-0,54	-0,12
759,00	-0,15	-0,27	-0,41	-0,03

APÊNDICE D.3 – Deformações na superfície do concreto para o modelo LC-S2

LC-S2				
Deformação no concreto (‰)				
Carga (kN)	EC1	EC2	EC3	EC4
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14,90	-0,01	-0,03	-0,02	-0,05
46,70	-0,02	-0,08	-0,08	-0,10
77,30	-0,05	-0,12	-0,12	-0,14
121,90	-0,06	-0,14	-0,18	-0,17
160,60	-0,11	-0,23	-0,22	-0,25
207,90	-0,16	-0,25	-0,28	-0,29
239,40	-0,19	-0,27	-0,31	-0,33
283,70	-0,24	-0,32	-0,36	-0,38
320,50	-0,28	-0,37	-0,41	-0,43
360,70	-0,31	-0,41	-0,46	-0,49
400,20	-0,33	-0,47	-0,52	-0,55
439,90	-0,33	-0,52	-0,55	-0,58
481,80	-0,40	-0,60	-0,64	-0,67
521,30	-0,49	-0,67	-0,71	-0,75
561,20	-0,53	-0,76	-0,76	-0,84
606,60	-0,53	-0,85	-0,79	-0,94
625,50	-0,52	-0,84	-0,79	-0,97
643,20	-0,52	-0,85	-0,80	-1,02
654,40	-0,51	-0,84	-0,81	-1,04
663,30	-0,48	-0,86	-0,84	-1,07
679,90	-0,49	-0,85	-0,84	-1,11
699,80	-0,47	-0,85	-0,85	-1,13
722,80	-0,45	-0,89	-0,88	-1,14
738,30	-0,42	-0,92	-0,91	-1,18
766,50	-0,40	-0,92	-0,91	-1,26
794,50	-0,38	-0,89	-0,87	-1,34
803,90	-0,32	-0,85	-0,85	-1,38
812,70	-0,26	-0,76	-0,80	-1,39

APÊNDICE D.4 – Deformações na superfície do concreto para o modelo LR-S

LR-S				
Deformação no concreto (‰)				
Carga (kN)	EC1	EC2	EC3	EC4
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22,70	0,00	0,00	0,00	0,00
40,90	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02
61,00	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05
79,80	-0,04	-0,05	-0,07	-0,07
101,00	-0,04	-0,08	-0,11	-0,11
121,50	-0,05	-0,11	-0,14	-0,15
141,20	-0,07	-0,14	-0,18	-0,18
161,80	-0,09	-0,17	-0,22	-0,21
192,40	-0,10	-0,20	-0,26	-0,27
209,40	-0,11	-0,23	-0,30	-0,30
247,10	-0,14	-0,28	-0,37	-0,41
281,00	-0,19	-0,34	-0,46	-0,43
329,10	-0,23	-0,41	-0,59	-0,51
362,10	-0,26	-0,43	-0,62	-0,56
408,00	-0,28	-0,44	-0,71	-0,66
444,10	-0,30	-0,48	-0,85	-0,72
486,60	-0,34	-0,51	-0,95	-0,78
522,00	-0,38	-0,54	-1,05	-0,84
559,00	-0,40	-0,57	-1,15	-0,95
620,90	-0,30	-0,53	-1,40	-1,16
644,30	-0,24	-0,53	-1,49	-1,19
682,70	-0,23	-0,54	-1,50	-1,21
722,00	-0,21	-0,51	-1,56	-1,25
764,60	-0,18	-0,34	-1,32	-1,29
778,30	-0,16	-0,32	-1,28	-1,32
794,60	-0,16	-0,27	-1,22	-1,32
802,40	-0,15	-0,24	-1,15	-1,29

APÊNDICE E: Deformações na armadura de cisalhamento - PRFC.

Nesta seção, são mostradas em tabelas as deformações nas armaduras de cisalhamento medidas ao longo dos ensaios para todos os modelos reforçados. Foi instrumentado com um extensômetro cada um dos perímetros de reforço para os modelos LC-S1 e LC-S2. No caso do modelo LR-S, que teve distribuição da armadura de cisalhamento de forma radial, foi instalado dois extensômetros por perímetro de reforço. A extensometria da armadura de cisalhamento está detalhada a baixo.

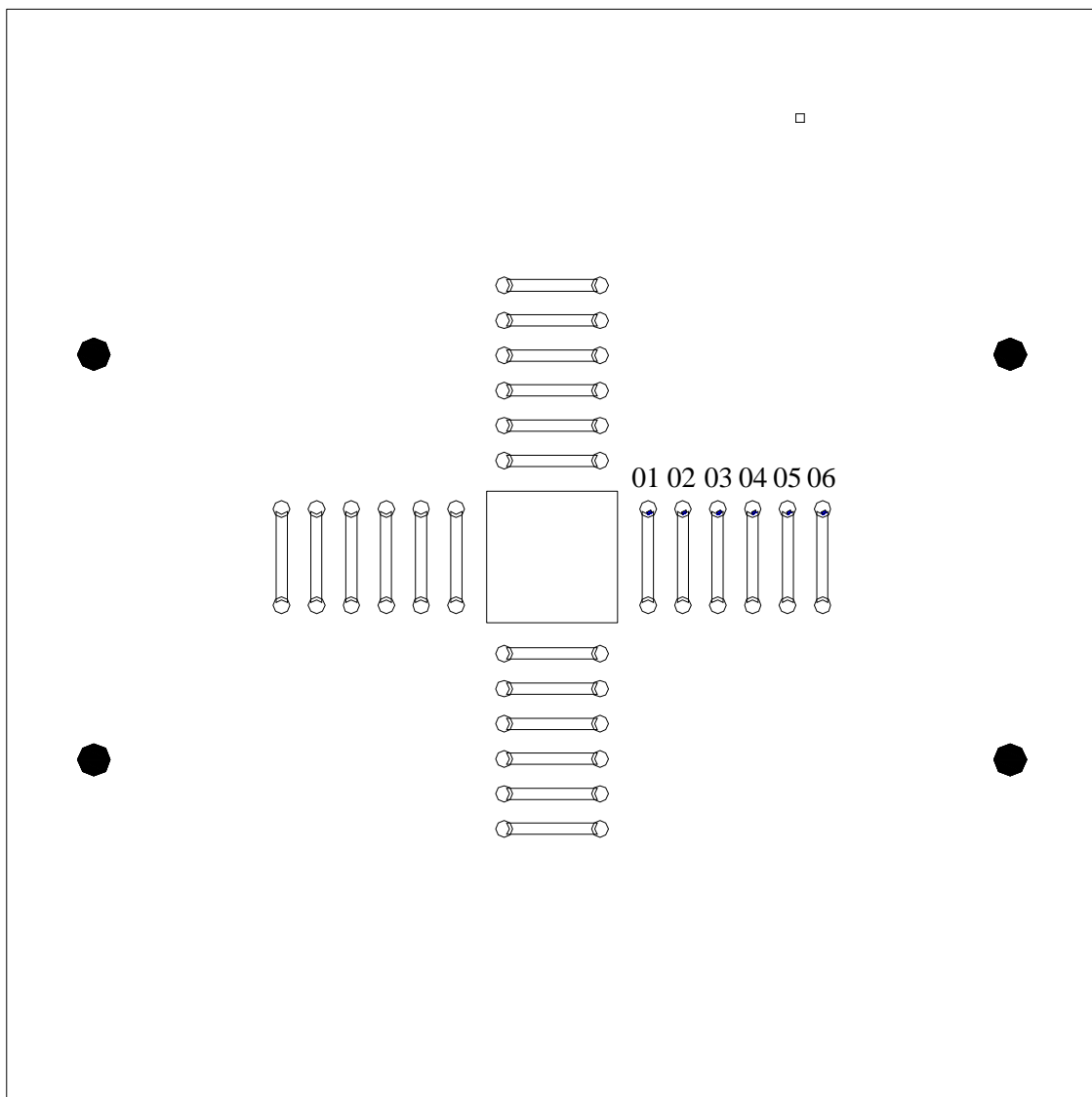


Figura E.1 - Posição dos extensômetros do CFRP (Modelo LC-S1)

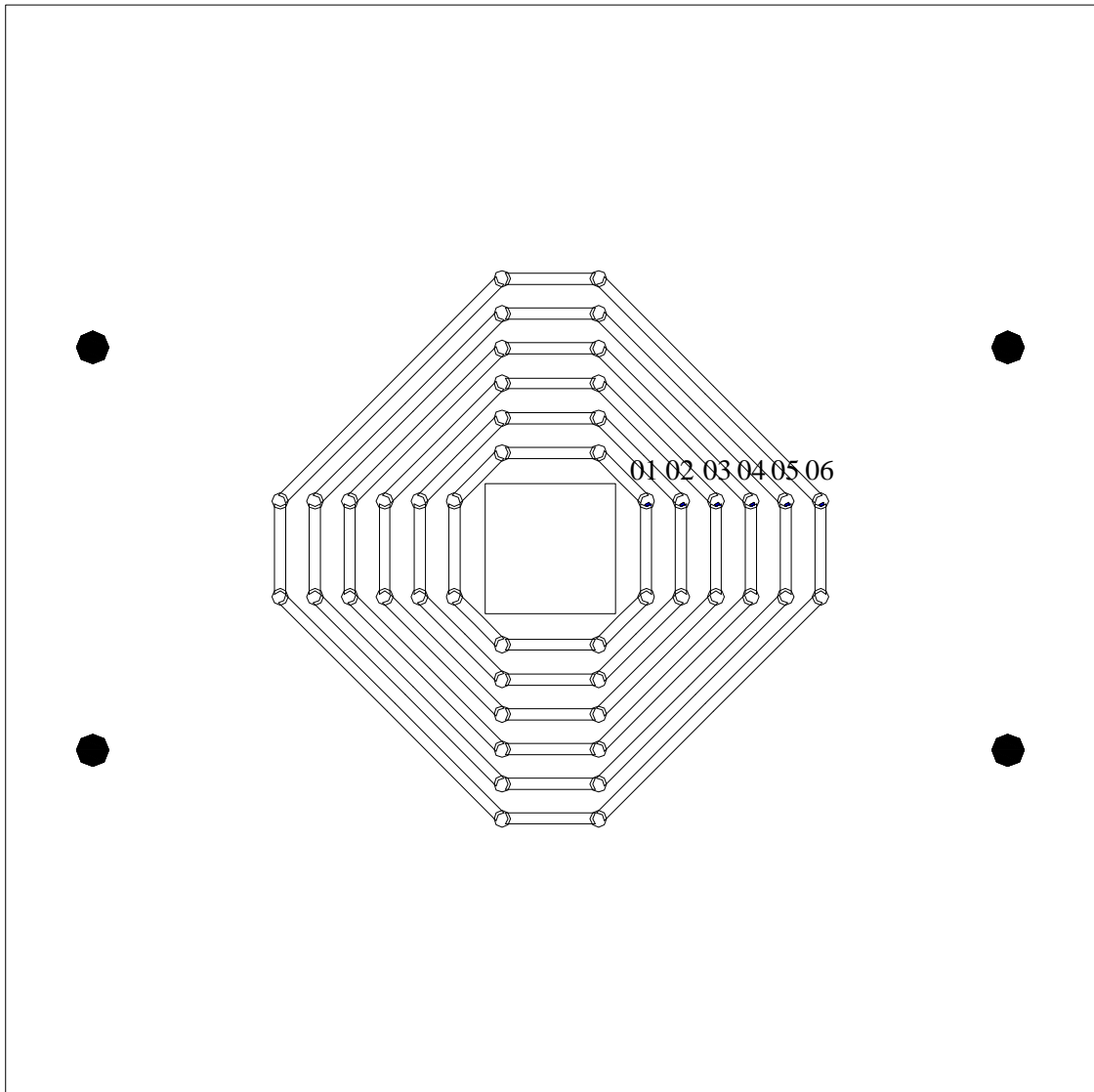


Figura E.2 - - Posição dos extensômetros do CFRP (Modelo LC-S2)

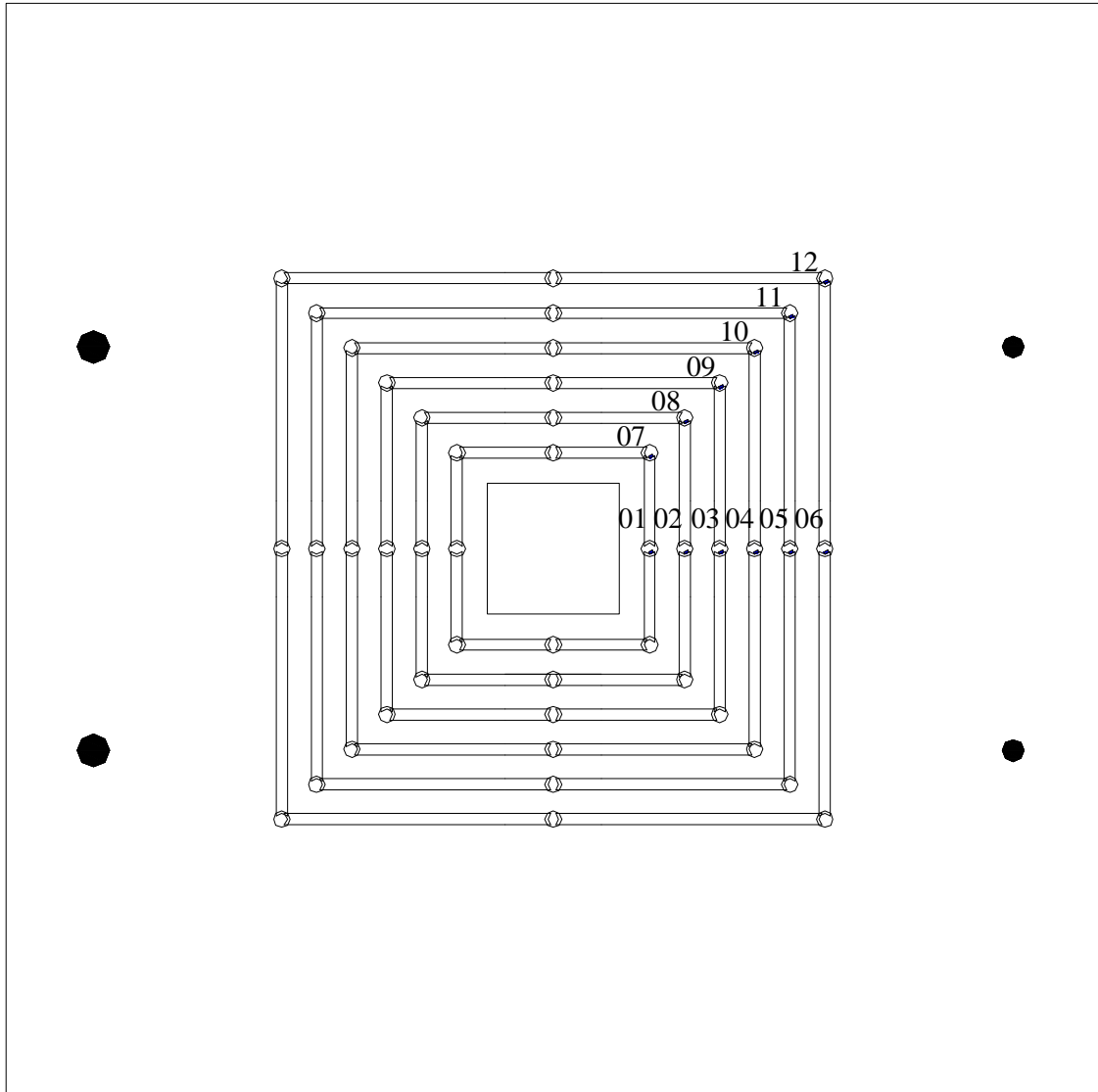


Figura E.3 - Posição dos extensômetros do CFRP (Modelo LR-S)

APÊNDICE E.1 – Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S1

LC-S1 - Deformação na armadura de cisalhamento - PRFC (%)						
Posição do perímetro	1°	2°	3°	4°	5°	6°
Posição na laje	70 (mm)	150 (mm)	230 (mm)	310 (mm)	390 (mm)	470 (mm)
Carga (kN)	EFC01	EFC02	EFC03	EFC04	EFC05	EFC06
23,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
41,20	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
83,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,06
132,30	0,04	0,01	0,01	0,02	0,04	0,12
161,70	0,05	0,02	0,04	0,03	0,03	0,31
203,90	0,01	0,02	0,06	0,03	0,02	0,34
240,80	0,00	0,04	0,07	0,04	0,01	0,32
282,40	-0,01	0,10	0,08	0,06	-0,01	0,32
324,40	-0,01	0,29	0,10	0,09	-0,03	0,33
361,80	-0,02	0,39	0,11	0,11	-0,05	0,33
401,50	-0,01	0,57	0,13	0,14	-0,07	0,35
447,50	0,08	0,72	0,16	0,17	-0,11	0,36
484,40	0,12	0,90	0,21	0,22	-0,15	0,38
522,60	0,19	0,99	0,28	0,25	-0,20	0,40
541,10	0,22	1,06	0,34	0,27	-0,22	0,41
561,30	0,26	1,06	0,39	0,29	-0,24	0,42
580,90	0,30	1,08	0,43	0,32	-0,26	0,43
605,90	0,33	1,08	0,47	0,34	-0,28	0,44
620,70	0,36	1,09	0,50	0,37	-0,30	0,45
644,90	0,39	1,10	0,56	0,41	-0,34	0,46
662,40	0,41	1,10	0,59	0,45	-0,37	0,47
682,80	0,45	1,01	0,64	0,48	-0,40	0,47
717,60	0,51	0,91	0,67	0,54	-0,43	0,45
720,50	0,57	0,78	0,75	0,60	-0,46	0,45
741,40	0,66	0,31	0,64	0,71	-0,52	0,46
742,90	0,67	0,07	0,60	0,75	-0,54	0,46
746,00	0,68	-0,06	0,65	0,83	-0,58	0,45
759,00	0,70	0,18	0,70	0,90	-0,62	0,44
759,70	0,72	0,29	0,71	0,93	-0,64	0,44
750,20	0,74	0,25	0,71	0,97	-0,68	0,43
769,90	0,75	0,28	0,72	1,00	-0,69	0,42
778,60	0,74	0,31	0,67	1,02	-0,71	0,41
764,40	0,74	0,19	0,56	1,02	-0,72	0,40
764,60	0,74	0,44	0,59	1,10	-0,76	0,41
778,80	0,80	0,56	0,54	1,16	-0,80	0,40
780,50	0,83	0,64	0,54	1,18	-0,82	0,40
789,00	0,94	0,73	0,54	1,30	-0,89	0,40
794,70	0,94	0,62	0,48	1,41	-0,94	0,39

APÊNDICE E.2 – Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LC-S2

LC-S2 - Deformação na armadura de cisalhamento -PRFC (%)						
Posição do perímetro	1°	2°	3°	4°	5°	6°
Posição na laje	70 (mm)	150 (mm)	230 (mm)	310 (mm)	390 (mm)	470 (mm)
Carga (kN)	EFC01	EFC02	EFC03	EFC04	EFC05	EFC06
14,90	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
46,70	-0,08	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03
77,30	-0,13	0,11	0,03	0,03	0,01	0,05
121,90	-0,16	0,13	0,00	0,02	0,01	0,07
160,60	-0,37	0,17	0,03	0,04	0,02	0,11
207,90	-0,37	0,20	0,03	-0,08	0,02	0,14
239,40	-0,34	0,21	0,02	-0,16	0,02	0,16
283,70	-0,32	0,23	0,05	-0,34	0,03	0,20
320,50	-0,31	0,23	0,07	-0,41	0,04	0,24
360,70	-0,23	0,25	0,11	-0,42	0,05	0,30
400,20	-0,17	0,25	0,25	-0,53	0,07	0,35
439,90	-0,14	0,27	0,34	-0,58	0,10	0,39
481,80	0,01	0,28	0,86	-0,73	0,16	0,47
521,30	0,12	0,32	1,41	-0,79	0,22	0,51
561,20	0,27	0,33	1,89	-0,84	0,28	0,57
606,60	0,48	0,33	-11,95	-0,93	0,36	0,63
625,50	0,56	0,32	-11,95	-0,97	0,38	0,65
643,20	0,68	0,33	-11,95	-1,00	0,41	0,68
654,40	0,73	0,33	-11,95	-1,01	0,42	0,69
663,30	0,85	0,34	-11,95	-1,07	0,45	0,71
679,90	0,93	0,34	-11,95	-1,08	0,47	0,73
699,80	0,95	0,35	-11,95	-1,12	0,48	0,74
722,80	0,99	0,38	-11,95	-1,17	0,50	0,77
738,30	1,10	0,42	-11,95	-1,15	0,55	0,81
766,50	1,26	0,43	-11,95	-1,16	0,58	0,83
794,50	1,47	0,49	-11,95	-1,23	0,63	0,84
803,90	1,63	0,53	-11,95	-1,34	0,69	0,85
812,70	1,75	0,54	-11,95	-1,41	0,71	0,85
799,60	1,89	0,65	-11,95	-1,54	0,76	0,84
879,50	2,46	1,25	-11,95	-1,53	0,91	0,89
884,30	3,22	2,71	-11,95	-1,60	0,94	0,90

APÊNDICE E.3 – Deformações na armadura de cisalhamento do modelo LR-S.

LR-S - Deformação na armadura de cisalhamento - PRFC (%)												
Posição do perímetro	1°	2°	3°	4°	5°	6°	1°	2°	3°	4°	5°	6°
Posição na laje (mm)	70 (mm)	150 (mm)	230 (mm)	310 (mm)	390 (mm)	470 (mm)	70 (mm)	150 (mm)	230 (mm)	310 (mm)	390 (mm)	470 (mm)
Carga (kN)	EFC01	EFC02	EFC03	EFC04	EFC05	EFC06	EFC07	EFC08	EFC09	EFC10	EFC11	EFC12
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
40,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
61,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
79,80	0,03	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00
101,00	0,08	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	-0,05	0,03	0,05	0,07	0,01	0,03
121,50	0,15	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	-0,20	0,02	0,09	0,14	0,03	0,04
141,20	0,24	0,03	0,02	0,01	0,00	0,05	-0,13	0,06	0,19	0,20	0,06	0,07
161,80	0,32	0,05	0,03	0,01	0,00	0,06	-0,03	0,24	0,24	0,25	0,06	0,10
192,40	0,40	0,06	0,05	0,01	0,00	0,05	0,06	0,47	0,28	0,25	0,08	0,13
209,40	0,47	0,08	0,07	0,01	0,00	0,06	0,17	0,67	0,29	0,25	0,08	0,14
247,10	0,57	0,11	0,15	0,02	0,01	0,07	0,28	0,91	0,33	0,29	0,10	0,14
281,00	0,71	0,20	0,21	0,04	0,00	0,09	0,40	1,12	0,39	0,33	0,12	0,11
329,10	0,88	0,29	0,32	0,10	-0,05	0,09	0,56	1,44	0,47	0,37	0,14	0,10
362,10	0,91	0,32	0,41	0,15	-0,10	0,09	0,60	1,61	0,50	0,32	0,15	0,09
408,00	0,98	0,35	0,45	0,20	-0,22	0,13	0,76	1,74	0,55	0,35	0,16	0,09
444,10	1,02	0,45	0,62	0,37	-0,31	0,14	1,13	2,01	0,55	0,38	0,17	-0,04
486,60	1,09	0,62	0,81	0,62	-0,37	0,14	1,48	2,10	0,57	0,41	0,18	-8,33
522,00	1,16	0,87	1,22	0,84	-0,43	0,14	1,82	1,92	0,61	0,44	0,19	-0,42
559,00	1,25	1,15	1,62	1,08	-0,49	0,21	2,22	1,84	0,67	0,48	0,21	-8,33
620,90	1,54	1,64	2,16	1,45	-0,58	0,23	2,88	3,27	0,72	0,58	0,19	-8,33
644,30	1,56	1,77	2,56	1,64	-0,65	0,34	3,02	3,48	0,72	0,60	0,20	-8,33
682,70	1,63	2,15	-	1,89	-0,77	0,55	3,15	3,53	0,74	0,63	0,20	-8,33
722,00	1,81	2,69	-11,37	2,04	-0,86	0,66	3,45	4,02	0,80	0,66	0,18	-0,09
764,60	2,32	3,76	-11,37	2,39	-1,07	1,00	4,21	3,90	1,17	0,73	0,13	-0,12
778,30	2,46	3,94	-11,37	2,57	-1,13	1,06	4,57	4,08	1,37	0,76	0,11	-0,13
794,60	2,57	4,18	-11,37	2,72	-1,13	1,12	4,85	4,20	1,52	0,80	0,10	-0,15
802,40	2,63	4,33	-11,37	2,86	-1,15	1,17	4,89	4,18	1,60	0,83	0,09	-0,12
838,90	3,02	-	-11,37	3,52	-1,19	1,55	5,33	4,73	2,15	1,03	0,02	-0,16
833,50	3,02	-	-11,37	3,68	-1,21	1,60	5,13	4,47	2,16	1,07	-0,01	-0,18
832,70	2,95	-	-11,37	4,00	-1,22	1,59	5,18	4,06	2,21	1,07	-0,02	-0,18
842,70	3,01	-	-11,37	4,66	-1,19	1,64	5,24	3,50	2,57	1,08	-0,02	-0,17
863,30	2,60	-	-11,37	-	-0,83	1,54	5,01	-	-	3,04	-0,14	-0,16
866,50	2,53	-	-11,37	-	0,01	1,94	3,57	-	-	5,00	-0,17	-0,16
672,60	2,55	-	-11,37	-	0,58	2,07	3,07	-	-	5,30	-0,19	-0,15
605,70	2,36	-	-11,37	-	1,01	2,20	2,69	-	-	4,97	-0,11	-0,17
572,60	2,21	-	-11,37	-	-	-	2,42	-	-	-	-0,08	-0,29
470,30	2,19	-	-11,37	-	-	-	2,32	-	-	-	-0,05	-0,33
429,90	2,20	-	-11,37	-	-	-	2,26	-	-	-	-0,02	-0,36
287,80	2,17	-	-11,37	-	-	-	2,00	-	-	-	-	-0,49

APÊNDICE F.2 – Ensaio das barras de 16.0 mm

LABEST
ENC

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 29** Extensômetro: **Trd 6** Data: **03/05/2012** Hora: **09:20:54** Trabalho nº **0054**
 Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Tração aço retra ext 3mm Labest com parada intermediária**
 Ident. Amostra: >>>>>>>> Cliente: **Galileu - Wagner** Material: **aço CA-50 16,0 mm** Lote: **Lote 1**

Corpo de Prova	Comp final (mm)	Seção (mm ²)	Força no escoamento (kgf)	Força Máxima (N)	Módulo (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)
CP 1	96,50	203,58	12720,78	153190,63	208524,19	612,76	752,47	20,63
CP 2	94,00	203,58	12339,80	152488,72	213960,47	594,41	749,02	17,50
CP 3	94,30	203,58	11868,09	145784,91	203261,50	571,69	716,10	17,88
Número CPs	3	3	3	3	3	3	3	3
Média	94,93	203,6	12310	150500	208600	593,0	739,2	18,67
Mediana	94,30	203,6	12340	152500	208500	594,4	749,0	17,88
Desv. Padrão	1,365	0,0000	427,1	4088	5350	20,58	20,08	1,706
Coef. Var. (%)	1,438	0,0000	3,470	2,717	2,565	3,470	2,717	9,141
Mínimo	94,00	203,6	11870	145800	203300	571,7	716,1	17,50
Máximo	96,50	203,6	12720	153200	214000	612,8	752,5	20,63

