



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC

HERMES BUENO PROCÓPIO

**PUNÇÃO EM LAJES PLANAS DE CONCRETO ARMADO
COM ABERTURAS ADJACENTES AO PILAR**

**PUNCHING IN REINFORCED CONCRETE FLAT SLABS
WITH HOLES ADJACENT TO THE COLUMNS**

CAMPINAS

2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC

HERMES BUENO PROCÓPIO

PUNÇÃO EM LAJES PLANAS DE CONCRETO ARMADO COM ABERTURAS ADJACENTES AO PILAR

Dissertação de Mestrado apresentado à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Estruturas e Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Hermes Bueno Procópio e orientada pelo Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein.

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P942p Procópio, Hermes Bueno, 1982-
Punção em lajes planas de concreto armado com aberturas adjacentes ao pilar / Hermes Bueno Procópio. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Leandro Mouta Trautwein.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Concreto armado. 2. Lajes. 3. Modulo de cisalhamento. I. Trautwein, Leandro Mouta, 1977-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Punching in reinforced concrete flat slabs with holes adjacent to the column

Palavras-chave em inglês:

Reinforced concrete

Slabs

Modulus of elasticity

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Leandro Mouta Trautwein [Orientador]

Carla Neves Costa

Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila

Data de defesa: 29-11-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0009-8178-0857>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1512838771153352>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**PUNÇÃO EM LAJES PLANAS DE CONCRETO ARMADO
COM ABERTURAS ADJACENTES AO PILAR**

HERMES BUENO PROCÓPIO

Dissertação de mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein

Presidente e Orientador / FEC / UNICAMP

Prof. Dra. Carla Neves Costa

FEC / UNICAMP

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho

PUC - Campinas

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 29 de novembro de 2022.

RESUMO

As lajes lisas apoiadas diretamente em pilares necessitam de um cuidado maior quanto à punção. Em edifícios com lajes lisas é muito comum a presença de aberturas adjacentes ao pilar, onde esta ligação torna-se ainda mais crítica por reduzir a resistência da laje nas adjacências dos pilares.

Desta forma, entende-se a grande necessidade de realizar estudos sobre punção onde o concreto armado é tradicionalmente o material mais escolhido para utilizar nas estruturas, devido ao baixo custo quando comparado aos outros materiais de construção e facilidade de moldagem.

Grande parte das pesquisas sobre este assunto têm uma ruptura preterida por punção fora da região da armadura de cisalhamento (ruptura externa), não evidenciando a real parcela de contribuição à punção para o aço (armadura transversal) e para o concreto.

No presente trabalho foram realizados ensaios em lajes lisas com 160 mm de espessura e 2400 x 2400 mm de comprimento. Os pilares são quadrados, com as dimensões dos lados de 150 mm. A laje de referência não tem aberturas ou armaduras de cisalhamento. As demais lajes contêm armaduras de cisalhamento, duas com aberturas e duas sem aberturas.

Todas as lajes ensaiadas e com armaduras de cisalhamento, sejam elas com ou sem aberturas, tiveram a ruptura preterida, ou seja, cruzando as armaduras de cisalhamento (ruptura interna). Com o objetivo de verificar o comportamento da laje e evidenciar a real parcela de contribuição do aço e do concreto na resistência a punção de lajes lisas, com ou sem aberturas. Por fim, compararam-se os resultados obtidos experimentalmente com modelos teóricos propostos e pelas recomendações normativas.

Palavras chaves: Concreto Armado. Lajes. Punção. Armadura de Cisalhamento.

ABSTRACT

Flat slabs are supported directly on columns require a bigger careful about punching. A buildings with flat slabs, the presence of holes adjacent to the columns is very common, where this connection becomes even more critical as it reduces the resistance of the slab adjacent to the columns.

At this way, it is understood a great need to carry out studies about punching, where reinforced concrete is traditionally the most chosen material to use in structures, due to its low cost when compared to other construction materials and ease using.

The most of the researches on this subject have a punching rupture outside the shear reinforcement region (external rupture), not showing the real contribution to the punching of steel (transverse reinforcement) and concrete.

The present work, tests were carried out on flat slabs 160 mm of thickness and 2400 x 2400 mm of each side. The columns are square, with side dimensions of 150 mm. The reference slab has no holes or shear reinforcement. The other slabs contain shear reinforcement, being two with holes and two without holes.

All slabs tested and with shear reinforcement, with or without holes, has rupture, crossing the shear reinforcement (internal rupture). The objective of check the behavior of the slab and show the real contribution of steel and concrete in the punching resistance of flat slabs, with or without holes. Finally, the results obtained experimentally were compared with proposed theoretical models and normative recommendations.

Keywords: Reinforced Concrete. Slabs. Punching. Shear Reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Sistema de laje lisa e modo de ruptura.....	20
Figura 1.2: Modos de ruptura por punção em lajes com armadura de cisalhamento.....	20
Figura 2.1: Superfícies críticas de ruptura de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.....	26
Figura 2.2: Superfícies críticas de ruptura C'' de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.....	27
Figura 2.3: Superfícies críticas de ruptura para lajes com aberturas, conforme NBR 6118:2014.....	27
Figura 2.4: Perímetro de controle de laje, conforme ACI 318 (2019).	30
Figura 2.5: Perímetro de controle de laje com abertura, conforme ACI 318 (2019).	30
Figura 2.6: Perímetro de controle distante 0,5d a partir da última camada de armadura de cisalhamento, ACI 318 (2019).	31
Figura 2.7: Perímetro de controle das áreas carregadas, segundo Eurocode 2, 2014.	32
Figura 2.8: Perímetro de controle com presença de aberturas, segundo Eurocode 2, 2014.....	32
Figura 2.9: Perímetro de controle para pilares internos, segundo Eurocode 2, 2014.....	355
Figura 2.10: Redução de perímetro crítico na presença de a) aberturas e b) tubos ou feixes de tubos.	35
Figura 2.11: Representação das curvas obtidas pelo método do <i>fib</i> Model Code (2010).	38
Figura 2.12: Armadura considerada na resistência ao cisalhamento na região interna.....	39
Figura 2.13: Disposições das armaduras de cisalhamento de GOMES (1991).....	40
Figura 2.14: Armadura de cisalhamento utilizada na pesquisa de Silva (2003).....	42
Figura 2.15: Características das lajes da série II ensaiadas por Salakawy et al (2000).....	45
Figura 2.16: Disposição das aberturas de cada modelo ensaiado.....	47
Figura 2.17: Fissuras de cada modelo ensaiado.....	47
Figura 2.18: Possíveis superfícies de ruptura para verificação de método SRMC de uma ligação laje-pilar, segundo NASCIMENTO (2020).	51
Figura 3.1: Pórtico hipotético caracterizando a região estudada da pesquisa, baseado em ANDRADE (2000).....	53
Figura 3.2: Principais características da laje LRC ensaiadas.....	55
Figura 3.3: Principais características da laje L50C ensaiadas.....	56
Figura 3.4: Principais características da laje L50F ensaiadas.....	56
Figura 3.5: Principais características da laje L63C ensaiadas.....	57
Figura 3.6: Principais características da laje L63F ensaiadas.....	57
Figura 3.7: Armaduras de flexão das lajes ensaiadas.....	58
Figura 3.8: Armaduras já posicionadas dentro das formas confeccionadas.....	59
Figura 3.9: Dimensões (mm) e quantidades das chapas para confecção dos “studs”.....	60
Figura 3.10: Confecção dos “studs”.....	61
Figura 3.11: “Studs” prontos para utilização.....	61
Figura 3.12: Posicionamento das armaduras de cisalhamento (mm).....	62
Figura 3.13: Distribuição das armaduras de cisalhamento L50C.....	63
Figura 3.14: Distribuição das armaduras de cisalhamento L50F.....	63
Figura 3.15: Distribuição das armaduras de cisalhamento L63C.....	64
Figura 3.16: Distribuição das armaduras de cisalhamento L63F.....	66

Figura 3.17: Concretagem das lajes.....	66
Figura 3.18: Mapeamento do concreto utilizado em cada laje	66
Figura 3.19: Sistema de ensaio da armadura de cisalhamento – verificação da solda entre a barra e chapas	67
Figura 3.20: Posicionamento dos LVDT's.	68
Figura 3.21: Numeração dos LVDT's para as lajes LRC, L50C e L63C.	69
Figura 3.22: Numeração dos LVDT's para as lajes L50F e L63F.....	69
Figura 3.23: Etapas de instalação dos extensômetros.	71
Figura 3.24: Posicionamento e identificação dos extensômetros nas armaduras de flexão.....	72
Figura 3.25: Posicionamento e identificação dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento.....	73
Figura 3.26: Posicionamento e identificação dos extensômetros no concreto (dimensões em mm).	74
Figura 3.27: Equipamento para aplicação e leitura das cargas.	75
Figura 3.28: Esquema de ensaio. Vista superior.....	76
Figura 3.29: Esquema de ensaio. Corte AA.	77
Figura 3.30: Fotografia de esquema de ensaio. Vista em perspectiva.	77
Figura 4.1: Curvas de resistência a compressão (fck) e a tração (ft) do concreto.....	80
Figura 4.2: Gráfico Tensão x Deformação dos aços de 5,0mm e 6,3mm utilizados nas lajes.....	82
Figura 4.3: Gráfico Tensão x Deformação do aço de 16,0mm utilizado nas lajes.	82
Figura 4.4: Ruptura dos “studs” próximos à solda, submetidos à tração.....	84
Figura 4.5: Medição aproximada do ângulo da superfície de ruptura sem armadura de cisalhamento – Laje LRC.	87
Figura 4.6: Medição aproximada do ângulo da superfície de ruptura sem armadura de cisalhamento – Laje L50C.....	87
Figura 4.7: Esquema da superfície de ruptura la laje LRC.	89
Figura 4.8: Esquema da superfície de ruptura la laje L50C.....	90
Figura 4.9: Esquema da superfície de ruptura la laje L50F.	91
Figura 4.10: Esquema da superfície de ruptura la laje L63C.....	92
Figura 4.11: Esquema da superfície de ruptura la laje L63F.	93
Figura 4.12: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje LRC.....	94
Figura 4.13: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L50C.....	94
Figura 4.14: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L50F.	94
Figura 4.15: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L63C.....	95
Figura 4.16: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L63F.	95
Figura 4.17: Deslocamento vertical da laje LRC.....	96
Figura 4.18: Deslocamento vertical da laje L50C.	97
Figura 4.19: Deslocamento vertical da laje L50F.....	98
Figura 4.20: Deslocamento vertical da laje L63C.	98
Figura 4.21: Deslocamento vertical da laje L63F.....	99
Figura 4.22: Deslocamento vertical da laje LRC.....	100
Figura 4.23: Deslocamento vertical da laje L50C.	101

Figura 4.24: Deslocamento vertical da laje L50F.....	101
Figura 4.25: Deslocamento vertical da laje L63C.....	102
Figura 4.26: Deslocamento vertical da laje L63F.....	102
Figura 4.27: Deformação específica na armadura de flexão - LRC.....	104
Figura 4.28: Deformação específica na armadura de flexão – L50C.....	105
Figura 4.29: Deformação específica na armadura de flexão – L50F.....	106
Figura 4.30: Deformação específica na armadura de flexão – L63C.....	106
Figura 4.31: Deformação específica na armadura de flexão – L63F.....	107
Figura 4.32: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L50C.....	109
Figura 4.33: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L50F.....	109
Figura 4.34: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L63C.....	110
Figura 4.35: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L63F.....	110
Figura 4.36: Deformação específica no concreto – LRC.....	112
Figura 4.37: Deformação específica no concreto – L50C.....	112
Figura 4.38: Deformação específica no concreto – L50F.....	113
Figura 4.39: Deformação específica no concreto – L63C.....	113
Figura 4.40: Deformação específica no concreto – L63F.....	114
Figura 4.41: Fissuras da laje LRC antes e após a ruptura.....	115
Figura 4.43: Fissuras da laje L50C antes e após a ruptura.....	117
Figura 4.44: Fissuras da laje L50F antes e após a ruptura.....	118
Figura 4.45: Fissuras da laje L63C antes e após a ruptura.....	119
Figura 4.46: Fissuras da laje L63F antes e após a ruptura.....	120
Figura 5.1: Gráfico Carga x Deslocamentos verticais medidos no centro de cada laje.....	122
Figura 5.2: Deslocamentos verticais obtidos em relação a laje de referência (LRC) sem armadura de cisalhamento.....	124
Figura 5.3: Deslocamentos verticais das lajes ensaiadas para o nível de carga igual a 300 kN.....	124
Figura 5.4: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar - LRF.....	127
Figura 5.5: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L50C.....	127
Figura 5.6: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L50F.....	128
Figura 5.7: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L63C.....	128
Figura 5.8: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L63F.....	129
Figura 5.9: Deformação específica das principais armaduras cisalhamento – L50C.....	130
Figura 5.10: Deformação específica das principais armaduras cisalhamento – L50F.....	130
Figura 5.11: Deformação específica das principais armaduras cisalhamento – L63C.....	131
Figura 5.12: Deformação específica das principais armaduras cisalhamento – L63F.....	131
Figura 5.13: Deformação radial e circunderencial do concreto - LRC.....	133
Figura 5.14: Deformação radial e circunderencial do concreto – L50C.....	134
Figura 5.15: Deformação radial e circunderencial do concreto – L50F.....	134
Figura 5.16: Deformação radial e circunderencial do concreto – L63C.....	135
Figura 5.17: Deformação radial e circunderencial do concreto – L63F.....	135

Figura 5.18: Efeito da inclinação da superfície de ruptura na resistência à punção	138
Figura 5.19: Comparação entre $F_{sk, teste} / F_{sk, calc}$ das lajes ensaiadas para cada método de cálculo analisado das lajes.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características das lajes ensaiadas por Borges (2003)	43
Tabela 2.2: Características das lajes e carga de ruptura	46
Tabela 2.3: Características das lajes ensaiadas por Marques (2018).....	49
Tabela 3.1: Caracterização das lajes	58
Tabela 3.2: Caracterização dos “Studs” das lajes.....	65
Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do concreto até os 28 dias.	80
Tabela 4.2: Resistência à compressão do concreto no dia do ensaio de cada laje.....	81
Tabela 4.3: Propriedades mecânicas dos aços utilizados.	83
Tabela 4.4: Propriedades mecânicas dos “studs”.	84
Tabela 4.5: Carga, modo de ruptura e principais características das lajes ensaiadas.	85
Tabela 5.1: Rotações máximas das lajes ensaiadas.....	125
Tabela 5.2: Contribuições do concreto e da armadura de cisalhamento na resistência à punção das lajes	139
Tabela 5.3: Contribuições do concreto e da armadura de cisalhamento na resistência à punção das lajes	140
Tabela 5.4: Principais características para dimensionamento das lajes	140
Tabela 5.5: Comparação entre cargas experimental e estimada – ABNT NBR 6118/2014.....	141
Tabela 5.6: Comparação entre cargas experimental e estimada – ACI 318/2019.....	142
Tabela 5.7: Comparação entre cargas experimental e estimada – EC2/2014.....	142
Tabela 5.8: Comparação entre cargas experimental e estimada – <i>fib</i> Model Code (2010)	143
Tabela 5.9: Comparação entre cargas experimental e estimada – SRMC.....	144
Tabela 5.10: Razões entre carga experimental e carga calculada pelos códigos e método SRMC.	144
Tabela 5.11: Média entre as razões da carga experimental e as calculadas pelos códigos e método SRMC.....	145

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área de concreto na qual a força radial é aplicada
A_v	Área da armadura de cisalhamento dentro do perímetro de controle
A_{sw}	Área da armadura de cisalhamento em uma camada ao redor do pilar
b_1	Distância do centro do pilar a face da abertura mais próxima ao pilar
b_2	Distância entre as faces da abertura
b_0	Perímetro de controle
C	Coesão interna do concreto
$c_{máx}$	Maior dimensão da seção transversal do pilar
$c_{mín}$	Menor dimensão da seção transversal do pilar
d	Altura útil da laje
d_g	Diâmetro máximo do agregado
d_x	Altura útil da laje medida na direção x
d_y	Altura útil da laje medida na direção y
E_c	Módulo de deformação longitudinal do concreto
E_s	Módulo de deformação longitudinal do aço
F_{cr}	Força radial do concreto
F_{ct}	Força tangencial do concreto
F_{cth}	Força tangencial do concreto referente à abertura
F_e	Força da armadura de cisalhamento
F_{sr}	Força radial da armadura de flexão
F_{st}	Força tangencial da armadura de flexão
F_{sh}	Força tangencial da armadura de flexão referente à abertura
f_c	Resistência à compressão do concreto medida em corpos de prova cilíndricos
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{bd}	Resistência de aderência do concreto
f_{sp}	Resistência à compressão diametral do concreto
f_{ct}	Resistência à tração do concreto
f_u	Resistência na ruptura do aço da armadura
f_y	Resistência ao escoamento do aço da armadura de flexão
f_{ywd}	Resistência ao escoamento de projeto do aço da armadura de cisalhamento
$f_{ywd,ef}$	Resistência efetiva ao escoamento de projeto do aço da armadura de cisalhamento
h	Altura total da laje
k	Parâmetro de ruptura interna

k_c	Razão entre a tensão normal máxima e f_c
P	Carga de punção
$r_{contrib}$	Comprimento dentro do qual as armaduras de cisalhamento contribuem para a força F_e
s_0	Distância radial entre a face do pilar e o primeiro elemento da armadura de cisalhamento
s_r, s	Distância radial entre elementos da armadura de cisalhamento
u, u_l	Perímetro de controle
u_0	Perímetro do pilar
u_{ext}, u_{out}	Perímetro de controle afastado da última camada de armadura de cisalhamento
V_c	Força nominal resistente oferecida pelo concreto
V_{exp}	Carga de ruptura experimental
V_n	Força nominal resistente
V_s	Força nominal resistente oferecida pela armadura
V_{teo}	Carga de ruptura teórica, obtida pelos códigos normativos e pelo método teórico
V_u	Força nominal atuante
x	Altura da linha neutra da laje
z	Braço de alavanca

LETRAS GREGAS

α	Ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje
α_e	E_s/E_c
α_s	Coeficiente relacionado ao posicionamento do pilar em relação à laje
β	Ângulo da força da armadura de cisalhamento com o plano horizontal
β	Ângulo de inclinação da força F_e com a horizontal
β_c	Relação entre maior e menor dimensão da seção transversal do pilar
β_0	Coeficiente relacionado com a excentricidade da carga do pilar
γ	Ângulo de superfície com o mecanismo de ruptura interna
γ_c	Coeficiente de redução da resistência do concreto
γ_p	Coeficiente utilizado para lajes com aberturas que define o modo de ruptura
γ_{nm}	Distorção da fissura
ε	Deformação normal do concreto
ε_{cl}	$0,85f_c / (4250f_c^{1/2})$
ε_{cr}	Deformação radial do concreto
ε_{ct}	Deformação tangencial do concreto
ε_{cu}	Deformação do concreto na ruptura
ε_{nm}	Deformação normal à fissura
ε_y	Deformação de início do escoamento do aço
ε_{sr}	Deformação radial do aço
ε_{st}	Deformação tangencial do aço
θ	Ângulo referente à posição da abertura na laje
μ	Coeficiente de fricção interna do concreto
ξ	Efeito de tamanho (<i>size effect</i>)
ρ	Taxa geométrica de armadura de flexão
ρ_x	Taxa geométrica de armadura de flexão medida na direção x
ρ_y	Taxa geométrica de armadura de flexão medida na direção y
σ	Tensão normal
σ_x	Tensão normal na direção x
σ_y	Tensão normal na direção y
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão normal máxima
τ	Tensão de cisalhamento
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy

χ	Coeficiente de redução relativo à diferença entre as forças radiais exercidas pela armadura ortogonal e aquelas devidas às armaduras radial e circunferencial
ψ	Rotação da laje

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01	18
1 INTRODUÇÃO	18
1.2 JUSTIFICATIVAS	20
1.3 OBJETIVOS GERAIS	21
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
CAPÍTULO 02	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 GENERALIDADES	24
2.2 RECOMENDAÇÕES DE CÓDIGOS NORMATIVOS	25
2.3 ESTUDOS CIENTÍFICOS	39
2.4 CONTRIBUIÇÃO DOS ESTUDOS CIENTÍFICOS	52
CAPÍTULO 03	53
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	53
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS	54
3.3 DETALHAMENTO DOS MODELOS ENSAIADOS	58
3.4 INSTRUMENTAÇÃO	68
3.5 ESQUEMA DE ENSAIO	76
CAPÍTULO 04	79
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	79
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	79
4.2 MATERIAIS	79
4.3 CARGA E MODOS DE RUPTURA	85
4.4 DESLOCAMENTO VERTICAL	95
4.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DAS ARMADURAS DE FLEXÃO	103
4.6 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE CISALHAMENTO	107
4.7 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO	111
4.8 FISSURAS	114
CAPÍTULO 05	121
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.	121
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	121
5.2 MODELOS ENSAIADOS	121
5.3 CONTRIBUIÇÕES DO AÇO E DO CONCRETO NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DAS LAJES ENSAIADAS	137

5.4	RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO PELOS CÓDIGOS NORMATIVOS, PELO MÉTODO DA SUPERFÍCIE DE RESISTÊNCIA MÍNIMA AO CISALHAMENTO E OS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.....	140
CAPÍTULO 06		146
6	CONCLUSÕES.	146
6.1	CARGAS E MODO DE RUPTURA	146
6.2	DESLOCAMENTO VERTICAL	147
6.3	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA	148
6.4	DEFORMAÇÃO DO CONCRETO	149
6.5	FISSURAS	150
6.6	NORMAS E CÓDIGOS DE PROJETO	150
6.7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
CAPÍTULO 07		153
7	REFERÊNCIAS.	153

CAPÍTULO 01

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O arranjo estrutural utilizando lajes, vigas e pilares em muitas situações, vem sendo substituída pela solução lajes planas ou lajes-cogumelo e pilares em projetos de edificações.

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, item 14.7.8, lajes planas são lajes apoiadas diretamente em pilares sem capitéis, enquanto que lajes-cogumelo são apoiadas nos pilares com capitéis. Esse arranjo, tem tido grande aceitação ao longo dos últimos anos devido as vantagens listadas abaixo:

- Redução considerável na quantidade e recorte das formas no pavimento, uma vez que os recortes se limitam ao encaixe dos pilares na forma do pavimento;
- As armaduras de flexão são mais simples e, em muitos casos, utiliza-se apenas telas soldadas no lugar de vergalhões cortados, dobrados e amarrados;
- Não há obrigatoriedade na utilização de pilares alinhados para a formação de pórticos, dando maior liberdade de criação ao arquiteto;
- Menor altura entre pisos mantendo mesmo pé-direito devido a inexistência de vigas, diminuindo a quantidade de revestimento aplicada nas fachadas das edificações;
- A inexistência de vigas não prejudica o caminhamento horizontal de instalações elétricas e hidráulicas;
- A compatibilização com outros projetos de engenharia é bastante facilitada;

- As facilidades nas formas e armaduras, já citadas, geram uma redução no ciclo de construção e/ou redução na mão de obra de carpinteiros e armadores.

Apesar das vantagens listadas anteriormente, há algumas desvantagens que são listadas a seguir:

- Em edifícios, as ligações da laje com os pilares são mais flexíveis que as ligações das vigas com os pilares, diminuindo a rigidez do edifício, aumentando os deslocamentos horizontais e efeitos de não linearidade geométrica, impactando assim na estabilidade global;

- Devido aos efeitos da não linearidade geométrica, faz-se necessário pilares e lajes com maiores seções, gerando aumento de consumo nos materiais aço e concreto;

- Risco de ruptura por punção.

A ligação da laje com o pilar é o aspecto principal da solução de lajes planas, pois a estabilidade da estrutura depende principalmente desta ligação. As Figuras 1.1 e 1.2 mostram esse tipo de ligação, bem como descreve os possíveis tipos de ruptura. A capacidade resistente da laje é limitada pela resistência à punção. Diversos pesquisadores têm estudado essa ligação no intuito de aumentar essa capacidade utilizando diversos artifícios como armaduras de cisalhamento, seção dos pilares, capitéis e fibras em concreto.

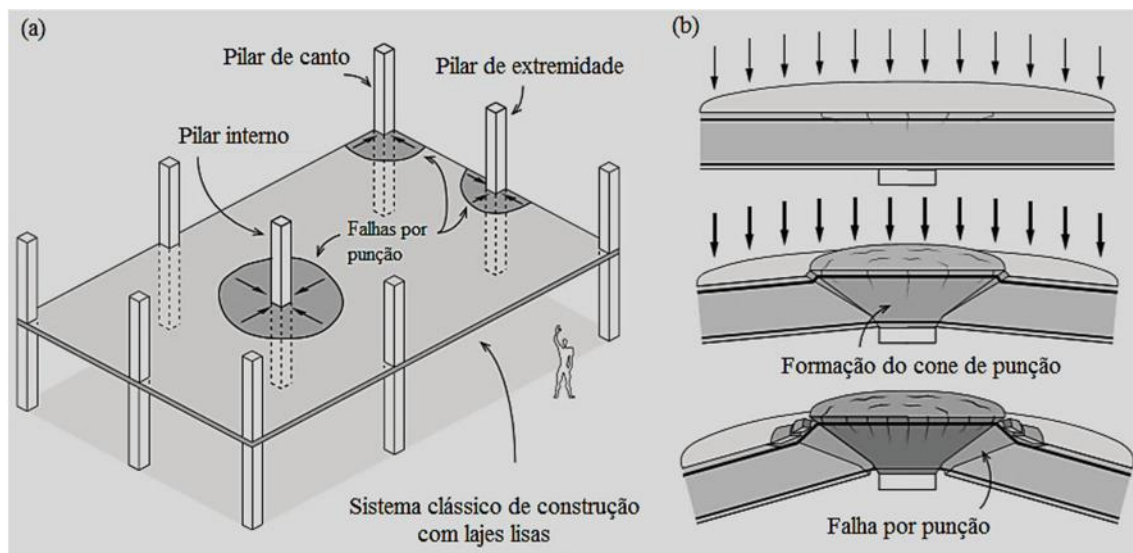


Figura 1.1: Sistema de laje lisa e modo de ruptura.

Fonte: Brantschen, 2016 – adaptado.

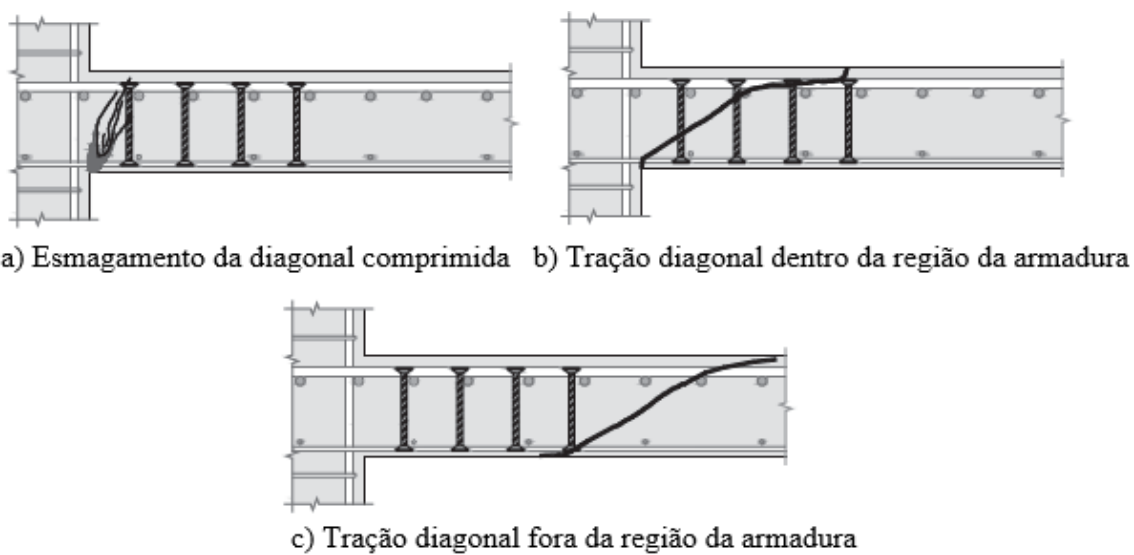


Figura 1.2: Modos de ruptura por punção em lajes com armadura de cisalhamento.

Fonte: *fib* CEB – FIP (2010).

1.2 JUSTIFICATIVAS

A introdução de aberturas adjacentes ao pilar diminui a resistência a punção das lajes, uma vez que a seção resistente e colaborante de concreto à punção é diminuída. Já a introdução de armaduras verticais (de cisalhamento) adjacentes ao

pilar aumenta a resistência a punção das lajes, uma vez que essa armadura colabora à punção. Isso porque, muitos ensaios têm como ruptura preterida uma superfície fora da região da armadura, Figura 1.2 c.

Esse tipo de ruptura atesta apenas que as armaduras de cisalhamento foram suficientes para que a laje não tenha a superfície de ruptura dentro da região das armaduras. Porém, não atesta a capacidade última dessas armaduras na colaboração da resistência a punção das lajes.

Para a obtenção da resistência última à punção e o modo de ruptura idealizado preterido (modo de ruptura interno, ou seja, superfície de ruptura cruzando as armaduras de cisalhamento, Figura 1.2 b) foi utilizado as prescrições normativas brasileiras.

1.3 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho propõe-se a analisar experimentalmente lajes lisas com e sem aberturas e lajes com e sem armadura de cisalhamento para verificar a forma de distribuição de armaduras de cisalhamento aumentar a resistência a punção das lajes.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esta pesquisa tem como objetivo:

- Analisar, através de ensaios experimentais, o comportamento estrutural e a resistência de lajes lisas com e sem a presença de aberturas adjacentes ao pilar e com armaduras de cisalhamento submetidas simétrico na laje;
- Comparar as cargas obtidas nos ensaios experimentais com as estimadas pelas prescrições normativas ABNT NBR 6118:2004, ACI 318/2019, EC2014 e *fib*

Model Code (2010) e pelo Método da Superfície de Resistência Mínima ao Cisalhamento.

- Analisar a resistência perdida à punção de lajes planas com armadura de cisalhamento devido a inserção de aberturas próximas ao pilar;
- Verificar a capacidade real de aumento da resistência à punção com a utilização de armaduras de cisalhamento.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo o primeiro deles esta Introdução, com o restante dos itens constituídos das principais abordagens e relevâncias sobre a pesquisa realizada neste trabalho.

A revisão bibliográfica é apresentada no capítulo dois onde se descreve o desenvolvimento de pesquisas em relação ao aumento ou diminuição da capacidade resistente de uma laje a punção quando da inserção de abertura(s) adjacente(s) ao pilar e/ou armadura de cisalhamento. Mostra-se também o tratamento dos códigos e métodos empíricos quanto à punção em lajes lisas.

No capítulo três é descrito o programa experimental, detalhando-se esquema de ensaios, características dos modelos da pesquisa, instrumentação utilizada e procedimento de ensaio.

Os resultados das propriedades mecânicas dos materiais utilizados na confecção dos modelos e apresentação dos resultados dos ensaios, tais como cargas e modos de ruptura, deslocamento vertical, deformação específica da armadura de flexão e de cisalhamento, e fissuras são apresentados no capítulo quatro.

No capítulo cinco é feita uma análise dos resultados obtidos das lajes testadas e uma comparação entre as cargas experimentais e as estimadas pelas prescrições normativas brasileiras.

As conclusões baseadas nos ensaios das lajes e algumas sugestões para trabalhos futuros são descritos no capítulo seis. Ao final, são apresentados a bibliografia utilizada para a realização da revisão bibliográfica, fundamentação teórica e anexos.

CAPÍTULO 02

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GENERALIDADES

A ABNT NBR 6118:2014 prescreve que lajes lisas são estruturas laminares planas, horizontais, apoiadas diretamente sobre pilares. Este tipo de concepção estrutural vem como alternativa para o sistema convencional e por não utilizar vigas apresenta vantagens como na redução de formas e mão de obra para tal, diminuição de pé direito, facilidade nas instalações elétricas e hidráulicas e de ar condicionado e maior flexibilidade quanto ao projeto arquitetônico.

A ligação do pilar com a laje é complexa pois depende de uma série de variáveis como propriedades dos materiais utilizados, dimensões da laje, dimensões e forma do pilar e dimensões e formas de aberturas adjacentes e/ou próximas ao pilar. Dito isso, ainda são necessários muitos estudos, pois as principais normas e códigos apresentam algumas divergências entre si. Feliciano (2011) diz que a distribuição dos esforços internos nessa região dificulta o desenvolvimento de equações analíticas e a realização de ensaios experimentais é um dos melhores caminhos para entender o fenômeno, pois permite a comparação com as prescrições normativas e a adequação destas normas a um dimensionamento seguro e econômico.

Em um edifício com lajes lisas é muito comum a presença de aberturas adjacentes ao pilar e momentos desbalanceados na ligação laje-pilar, mesmo no caso de pilares internos. Krueger *et al.* (1998) e Park e Choi (2006) relatam que estes momentos fletores ocorrem por motivos como a presença de aberturas,

variações nos vãos e nos carregamentos ou devido à ação de forças horizontais na estrutura, causadas pelo vento ou por terremotos.

Desta forma, entende-se a grande necessidade de realização de pesquisas sobre esse tipo de ligação (laje-pilar) onde as estruturas em concreto são tradicionalmente idealizadas com lajes apoiando em ligas, que por sua vez apoiam em pilares.

Os sistemas de lajes planas são construtivamente mais adequados quando se utiliza o concreto como material estrutural, mas são pouco utilizados no país principalmente pelo pouco conhecimento que o meio técnico/construtivo tem a respeito deste sistema. Em países desenvolvidos e até mesmo próximos ao Brasil, como Chile, esta solução é utilizada com frequência muito maior.

Sobre as aberturas adjacentes ao pilar, tem sido utilizadas em função da passagem das prumadas verticais dos sistemas complementares (água, esgoto, elétrico, lógica, etc). Nestas regiões, a resistência à punção é diminuída com estas aberturas. Observa-se nos códigos internacionais como ACI 318:2008 e Eurocode 2:2004 uma abordagem ainda insuficiente sobre o assunto, apesar da situação de aberturas juntas aos pilares já ter sido bastante explorada experimentalmente.

2.2 RECOMENDAÇÕES DE CÓDIGOS NORMATIVOS

Os códigos fornecem uma previsão da carga de ruptura de lajes lisas sujeitas à punção, através de um modelo empírico de cálculo que relaciona a tensão nominal de cisalhamento, atuante em uma determinada superfície de controle, com a resistência nominal ao cisalhamento. Diferencia-se entre as normas e códigos a superfície de controle a ser considerada e a resistência ao cisalhamento.

Para estimar a resistência à punção das lajes ensaiadas, foram utilizadas prescrições normativas de projetos.

2.2.1. ABNT NBR 6118 (2014)

Para lajes sem armadura de cisalhamento (AC), a ABNT NBR 6118 (2014), recomenda a verificação de esforço de cisalhamento em duas superfícies críticas: na primeira superfície crítica (contorno C), do pilar ou da carga concentrada, deve ser verificada indiretamente a tensão de compressão diagonal do concreto, através da tensão de cisalhamento; na segunda superfície crítica (contorno C') afastada $2d$ do pilar ou carga concentrada, deve ser verificada a capacidade da ligação à punção, associada à resistência à tração diagonal. As superfícies críticas são mostradas na Figura 2.1.

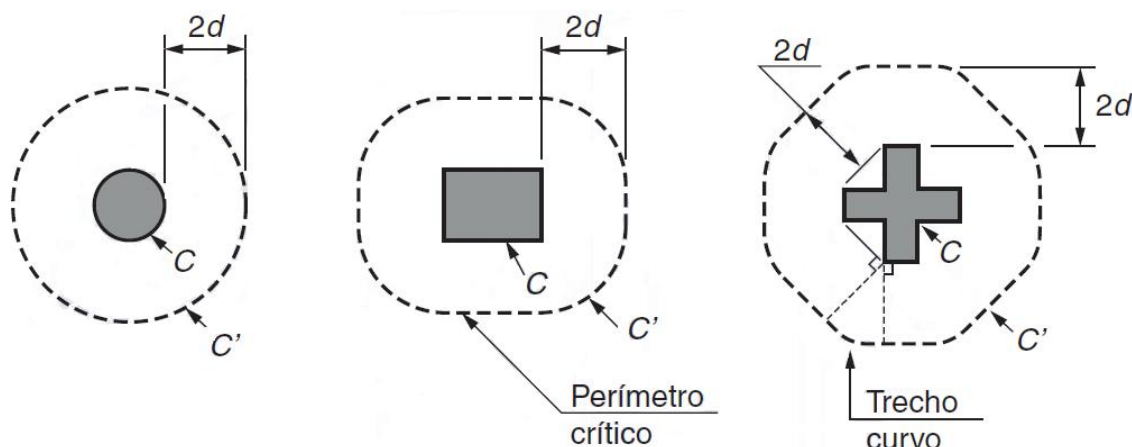


Figura 2.1: Superfícies críticas de ruptura de acordo com a ABNT NBR 6118:2014

Quando há a presença de armadura de cisalhamento, uma terceira superfície crítica (contorno C'') deve ser verificada e acordo com a Figura 2.2.

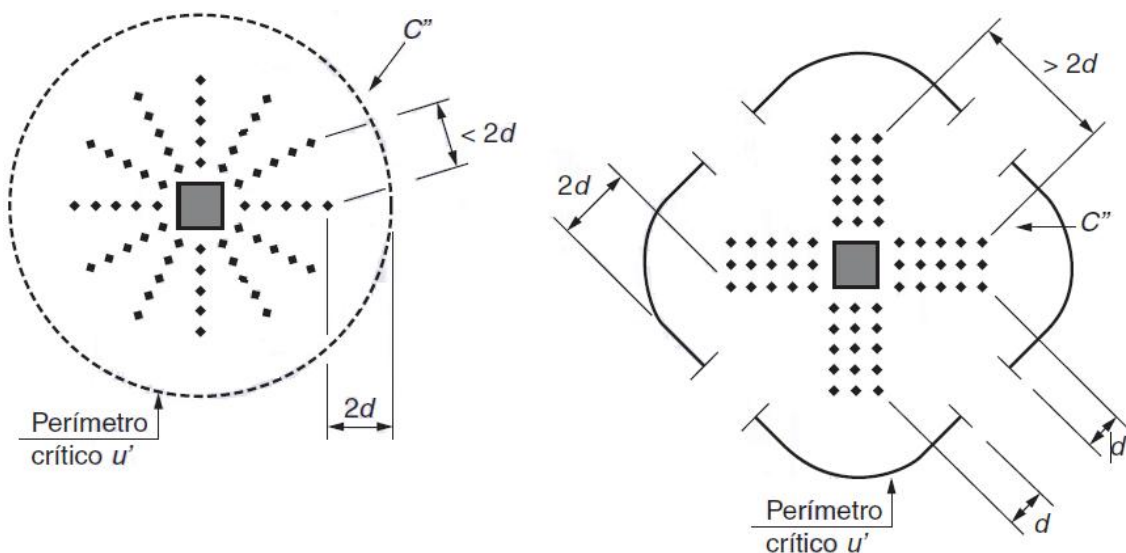


Figura 2.2: Superfícies críticas de ruptura C'' de acordo com a ABNT NBR 6118:2014

No caso de presença de abertura e reentrância, a NBR 6118:2014 altera o perímetro crítico do contorno C' a ser considerado; e no caso de aberturas com distâncias superiores a 8d do pilar (contorno C), estas são desconsideradas, conforme exemplificado na Figura 2.3.

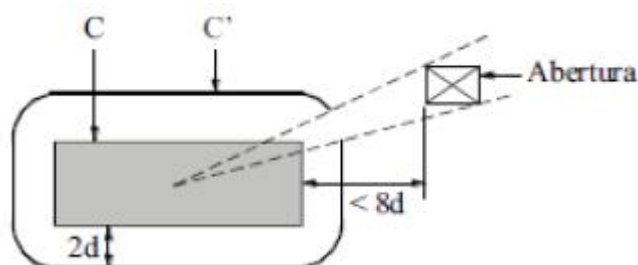


Figura 2.3: Superfícies críticas de ruptura para lajes com aberturas, conforme ABNT NBR 6118:2014

O cálculo da tensão solicitante nas superfícies críticas C e C' para pilar interno, com carregamento simétrico é definida pela Equação 2.1.

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} \quad (2.1)$$

Onde:

d : É a altura útil da laje;

u : É o perímetro de contorno crítico da laje;

F_{sd} : É a força concentrada de cálculo.

A verificação da tensão resistente de compressão diagonal do concreto na superfície crítica C, deve ser verificada para lajes com ou sem armadura de cisalhamento de acordo com a Equação 2.2.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \quad (2.2)$$

Onde:

f_{cd} : É a resistência a compressão de cálculo do concreto, em MPa;

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

f_{ck} : É a resistência a compressão característica do concreto, em MPa;

A tensão resistente na superfície crítica C' em lajes sem armadura de punção deve ser verificada conforme Equação (2.3).

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{20/d}\right) (100\rho f_{ck})^{1/3} + 0,1\sigma_{cp} \quad (2.3)$$

Onde:

ρ : É a taxa de armadura passiva, em %;

f_{ck} : É a resistência a compressão característica do concreto, em MPa;

σ_{cp} : É a tensão normal ao plano da laje (positivo se compressão), em MPa.

A Verificação da tensão resistente na superfície crítica C' em lajes com armadura de punção deve ser calculada de acordo com a Equação 2.4.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{20/d}\right) (100\rho f_{ck})^{1/3} + 0,1\sigma_{cp} + 1,5 \frac{d}{s_r} \frac{A_{sw} f_{ywd} \sin \alpha}{u \cdot d} \quad (2.4)$$

Onde:

s_r : É o espaçamento radial entre as linhas de armadura de punção, em mm;

A_{sw} : É a área de armadura de punção igualmente distribuída em um contorno completo e paralelo a perímetro analisado, em mm²;

α : É o ângulo entre a armadura de punção e o plano da laje, em graus;
 f_{ywd} : É a tensão a tração de cálculo da armadura de punção. O valor é limitado conforme a espessura da laje, MPa.

2.2.2. ACI 318 (2019)

Para o cálculo de lajes submetidas à punção, a norma estabelece que:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.5)$$

Onde:

V_n : É a força resistente total a punção;
 V_c : É a força resistente do concreto a punção;
 V_s : É a força resistente do aço a punção.

Para as lajes sem armadura de cisalhamento, a carga de ruptura à punção da ligação laje-pilar deve ser igual ao menor resultado obtido por meio de aplicação das Equações 2.6, 2.7 e 2.8.

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_o d \quad (2.6)$$

$$V_c = \frac{1}{12} \left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 2 \right) \sqrt{f'_c} b_o d \quad (2.7)$$

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_o d \quad (2.8)$$

Onde:

β_c : Razão entre o maior e o menor lado do pilar;
 f'_c : É a resistência a compressão do concreto, em MPa;
 b_o : É o perímetro crítico, em mm;
 d : É a altura útil da laje ao longo do contorno crítico, em mm;
 α_s : Valor que depende da posição do pilar. 40 para pilares internos, 30 para pilares de borda e 20 para pilares de canto.

O perímetro de controle para verificação da tensão resistente é dado a uma distância de “0,5d” medida da face do pilar. Para uma laje lisa, com pilar interno de seção retangular, o perímetro crítico é o mostrado na Figura 2.4.

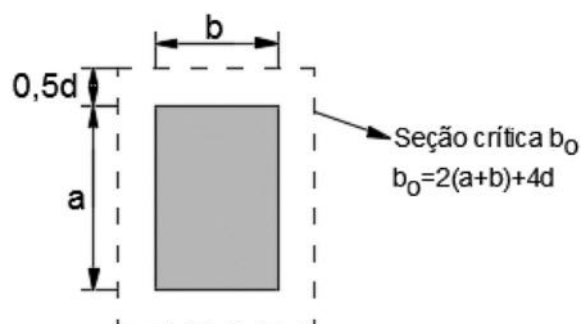


Figura 2.4: Perímetro de controle de laje, conforme ACI 318 (2019).

Quando a laje apresenta aberturas, cuja distância para o centroide do pilar é inferior a 10 vezes a espessura da laje e não apresenta armadura de combate à punção, a parte do perímetro de controle que se encontra delimitada por linhas retas projetadas do centroide do pilar tangente à abertura é considerado ineficiente, conforme mostra a Figura 2.5.

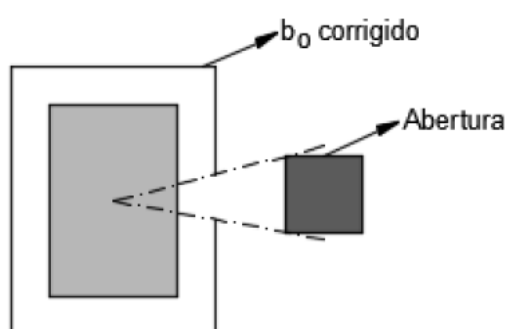


Figura 2.5: Perímetro de controle de laje com abertura, conforme ACI 318 (2019).

Em lajes com armadura de cisalhamento, para determinar a resistência à punção, devem ser consideradas as parcelas de contribuição do concreto e do aço, conforme as Equações 2.9 e 2.10.

$$V_c \leq 0,17\sqrt{f'_c} b_o d \quad (2.9)$$

$$V_c + V_s \leq 0,5\sqrt{f'_c} b_o d \quad (2.10)$$

A contribuição da armadura de cisalhamento é calculada pela Equação 2.11.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.11)$$

Onde:

A_v : É a armadura de cisalhamento, em mm², determinada em um espaçamento “s”;

f_y : É a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, em MPa;

s: É o espaçamento entre as armaduras de cisalhamento, em mm.

O código ACI 318 (2014) sugere que o espaçamento radial dos elementos da armadura de cisalhamento não deve ser maior que 0,5d. A Figura 2.6 apresenta o cálculo do perímetro de controle distante a 0,5d da última camada da armadura de cisalhamento.

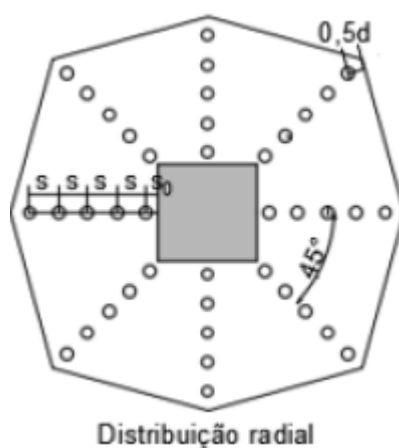


Figura 2.6: Perímetro de controle distante 0,5d a partir da última camada de armadura de cisalhamento, ACI 318 (2019).

2.2.3. EUROCODE 2 (2014)

Para lajes sem armadura de combate à punção, a norma recomenda que a resistência ao cisalhamento proveniente de cargas concentradas ou reações de apoio

deve ser verificada no perímetro de controle distante a $2d$ da face do pilar, de acordo com a Figura 2.7.

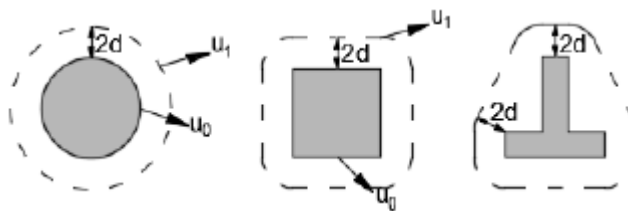


Figura 2.7: Perímetro de controle das áreas carregadas, segundo Eurocode 2, 2014.

Para áreas carregadas situadas perto de aberturas, se a distância mais curta entre o perímetro da área carregada e da borda da abertura não exceder $6d$, parte do perímetro de controle contida entre duas tangentes desenhadas para o contorno da abertura do centro da área carregada é considerada ineficaz, conforme exposto na Figura 2.8.

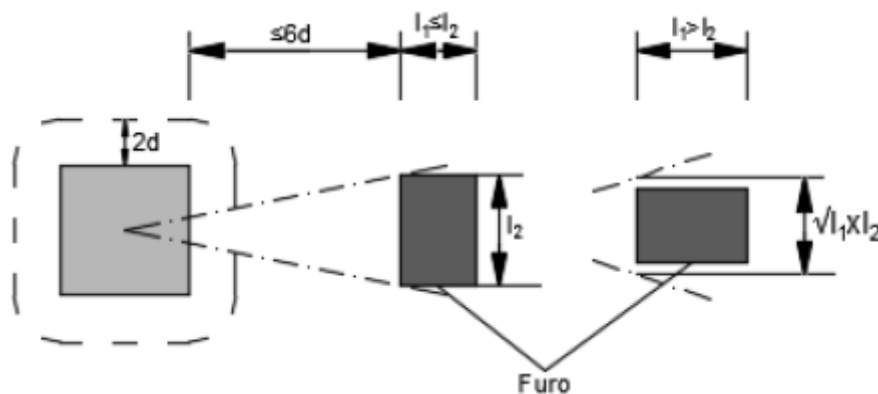


Figura 2.8: Perímetro de controle com presença de aberturas, segundo Eurocode 2, 2014.

A norma estabelece que para o dimensionamento adequado de lajes sujeitas à punção, a tensão máxima de cisalhamento solicitante não deve exceder a tensão máxima resistente de acordo com as Equações 2.12, 2.13 e 2.14.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (2.12)$$

$$V_{Ed} = \beta \frac{F_{sd}}{\mu_1 d} \quad (2.13)$$

$$d = \frac{(d_x + d_y)}{2} \quad (2.14)$$

Onde:

β : Caso não haja momentos desbalanceados, valor é igual a 1;

F_{sd} : É a força ou reação de cálculo, em kN;

μ_1 : Perímetro crítico, em mm;

d_x e d_y : São as alturas úteis da laje nas respectivas direções ortogonais, em mm.

Para lajes sem armadura de cisalhamento, o Eurocode 2 (2014) estabelece que apenas a parcela oriunda do concreto ($V_{Rd,c}$) contribui para a carga última resistente à punção da laje. A Equação 2.15 apresenta a tensão resistente proveniente do concreto.

$$V_{Rd,c} = 0,18 \kappa (100 \rho f_{ck})^{1/3} \geq V_{min} \quad (2.15)$$

Onde:

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ d em mm};$$

$$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \leq 0,02;$$

f_{ck} : É a resistência característica a compressão do concreto, em MPa;

$$V_{min} = 0,035 \kappa^{2/3} f_{ck}^{1/2} .$$

O Eurocode 2 (2014) prescreve que para o cálculo das taxas de armadura nas direções ortogonais (ρ_x e ρ_y), devem-se considerar as barras em uma região de comprimento igual à dimensão do pilar mais 3d para cada um dos lados do mesmo, ou até a borda da laje, caso esta estiver mais próxima.

Nas lajes com armadura de cisalhamento, a resistência à punção deverá ser avaliada em quatro regiões: duas verificações adjacentes à face do pilar, nas regiões

com armadura de cisalhamento e externa a essa armadura, conforme Equação 2.16 e 2.17. O perímetro de controle para verificação da tensão resistente

$$V_{Ed} = V_{Rd,cs} \quad (2.16)$$

$$V_{Rd,cs} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd,ef} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha \quad (2.17)$$

Onde:

s_r : É o espaçamento radial das camadas da armadura de cisalhamento, em mm;

A_{sw} : Área de armadura de cisalhamento em uma camada ao redor do pilar, em mm²;

$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$, em MPa;

u_1 : É o perímetro de controle situado a uma distância $2d$ a partir da face do pilar, em mm;

α : É o ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje, em graus.

Para a região externa à armadura de cisalhamento, obedece às equações 2.18 e 2.19:

$$v_{Ed} \leq v_{Rdc,ext} \quad (2.18)$$

$$V_{Rd,cs,ext} = V_{Rd,c,ext} \mu_{out} d \quad (2.19)$$

Na Equação 2.19, é o perímetro de controle traçado a uma distância kd após a última camada da armadura de cisalhamento, conforme Figura 2.9. O valor de k é adotado igual a 1,5.

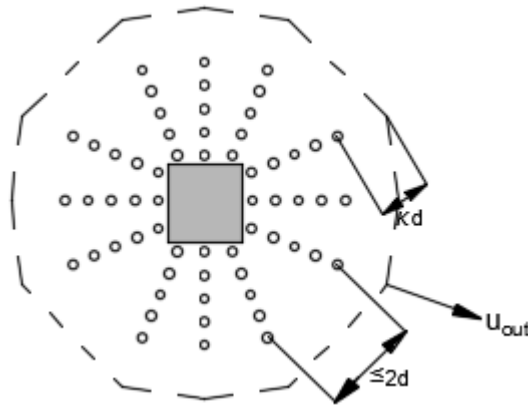


Figura 2.9: Perímetro de controle para pilares internos, segundo Eurocode 2, 2014.

2.2.4. FIB MODEL CODE (2010)

O *fib* Model Code (2010) baseia-se no modelo físico da Teoria da Fissura Crítica (Critical Shear Crack Theory) proposto por Muttoni (2008). Recomenda-se que o perímetro de controle se localize a uma distância $d/2$ a partir da região de suporte da área carregada. O valor da resistência máxima ao puncionamento, sem armadura de cisalhamento, é calculado pela Equação 2.20:

$$V_{Rc} = k_{sys} k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_o d_v \leq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_o d_v \quad (2.20)$$

Onde:

k_{sys} : 2,8 para studs, 2,4 para estribos com ancoragem suficiente e 2,0 para demais casos;

f_{ck} : É a resistência característica à compressão do concreto, em MPa;

γ_c : É o coeficiente de segurança com valor de 1,5;

d_v : É a altura útil da laje nas respectivas direções ortogonais, em mm;

b_o : É o perímetro crítico distante a $0,5d_v$ das faces do pilar, conforme figura 2.10, em mm;

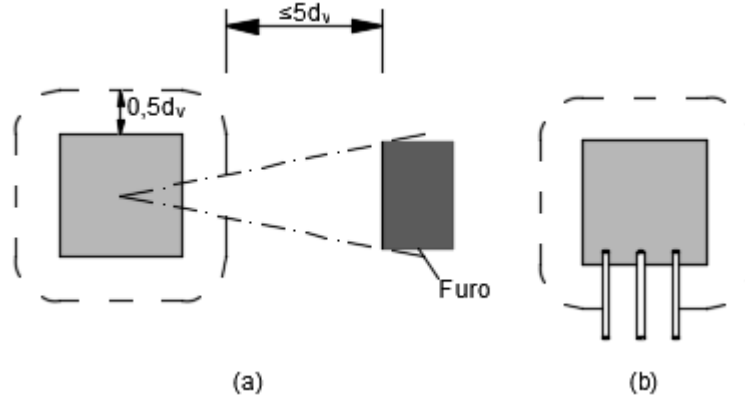


Figura 2.10: Redução do perímetro crítico na presença de a) aberturas e b) tubos ou feixe de tubos.

Fonte: *fib Model Code* (2010).

k_ψ : É um parâmetro relacionado com as rotações das lajes em torno do pilar, calculado através da expressão 2.21:

$$k_\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9 \psi d_v k_{dg}} \leq 0,6 \quad (2.21)$$

Sendo:

k_{dg} : Parâmetro relacionado ao tamanho do agregado, calculado através da expressão 2.22:

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g}, \text{ onde } d_g \text{ é o tamanho máximo do agregado} \quad (2.22)$$

ψ : É a rotação em torno do pilar. O *fib Model Code* (2010) dispõe de 04 níveis de aproximação (LoA). Quanto maior o nível utilizado, melhor é a precisão.

LoA I:

$$\psi = 1,5 \frac{r_s f_{yd}}{d E_s} \quad (2.23)$$

LoA II:

$$\psi = 1,5 \frac{r_s f_{yd}}{d E_s} \left(\frac{m_{sd}}{m_{Rd}} \right)^{2/3} \quad (2.24)$$

LoA III:

$$\psi = 1,2 \frac{r_s f_{yd}}{d E_s} \left(\frac{m_{sd}}{m_{Rd}} \right)^{2/3} \quad (2.25)$$

LoA IV: ψ é calculado através de uma análise de elementos finitos linear.

Onde:

r_s : É a distância a partir do eixo do pilar até o raio onde o momento fletor for zero;

f_{yd} : É o valor de cálculo da tensão de escoamento do aço;

E_s : Módulo de elasticidade do aço;

m_{Rd} : É a resistência à flexão média de projeto por unidade de comprimento numa faixa carregada, conforme a Equação 2.26.

$$m_{Rd} = \rho f_{ys} d^2 \left(1 - \frac{\rho f_{ys}}{2 f_c} \right) \quad (2.26)$$

m_{sd} é o momento médio atuante por unidade de comprimento da armadura de flexão numa faixa.

Dessa forma, utilizando a Equação 2.20 correspondente a V_{Rc} e qualquer das expressões de rotação, segundo o LoA escolhido, é possível traçar as curvas, conforme Figura 2.11. O ponto de interseção determina a carga última resistente pela laje.

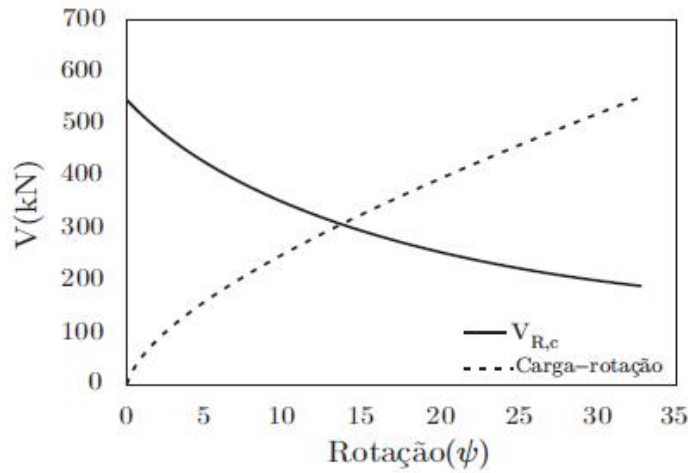


Figura 2.11: Representação das curvas obtidas pelo método do *fib* Model Code (2010).

Fonte: *fib* Model Code (2010).

Em lajes com armadura de cisalhamento, é necessário verificar a tensão resistente interna e externa à armadura de cisalhamento. A força resistente à punção é a soma da força resistente do concreto e a força resistente da armadura. A contribuição do concreto é a mesma para uma laje sem armadura de cisalhamento, conforme definido na Equação 2.20. A resistência ao cisalhamento é dada pelas Equações 2.27 e 2.28:

$$V_{Rd,s} = \sum A_{sw} k_e \sigma_{swd} \quad (2.27)$$

$$\sigma_{swd} = \frac{E_s \psi}{6} \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{ywd} \quad (2.28)$$

Onde:

E_s : Módulo de elasticidade do aço, em MPa;

ϕ_w : Diâmetro da armadura de cisalhamento, em mm;

f_{bd} : Pode ser adotado igual a 3 MPa em muitos casos;

f_{ywd} : Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, em MPa;

k_e : Coeficiente de excentricidade, para carregamento centrado adota-se igual a 0,9;

A_{sw} : Contribuição da armadura presente em $0,65d$, em mm^2 , conforme a Figura 2.12.

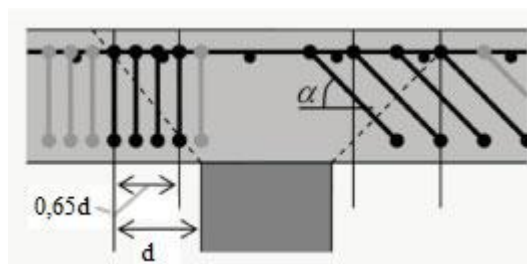


Figura 2.12: Armadura considerada na resistência ao cisalhamento na região interna.

Fonte: *fib Model Code* (2010).

A capacidade resistente de uma laje lisa no perímetro externo à armadura de cisalhamento é considerada conforme Equação 2.29:

$$V_{Rd,out} = k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_2 d \quad (2.29)$$

Onde b_2 é o perímetro externo a armadura de cisalhamento afastado $0,5d$ da última camada de armadura de cisalhamento.

2.3 ESTUDOS CIENTÍFICOS

2.3.1. GOMES (1991)

GOMES investigou o efeito da armadura de cisalhamento, formada por fatias de perfil “I”, testando 12 lajes (cogumelo) quadradas de 3000mm de lado e 200mm de espessura. O carregamento foi centrado nas lajes através de uma placa de seção quadrada de 200mm de lado. O objetivo foi obter uma capacidade resistente à punção igual ou superior a capacidade resistente à flexão.

As principais variáveis de sua pesquisa foram: a) área dos elementos (perfil “I”) nas camadas circunferenciais; b) número de camadas da armadura de cisalhamento e c) forma de distribuição dos elementos.

A armadura de cisalhamento foi disposta na forma de dupla cruz (lajes de 02 a 05) e radial (lajes de 6 a 11) em diversas quantidades de camadas, como pode ser visualizado na Figura 2.13.

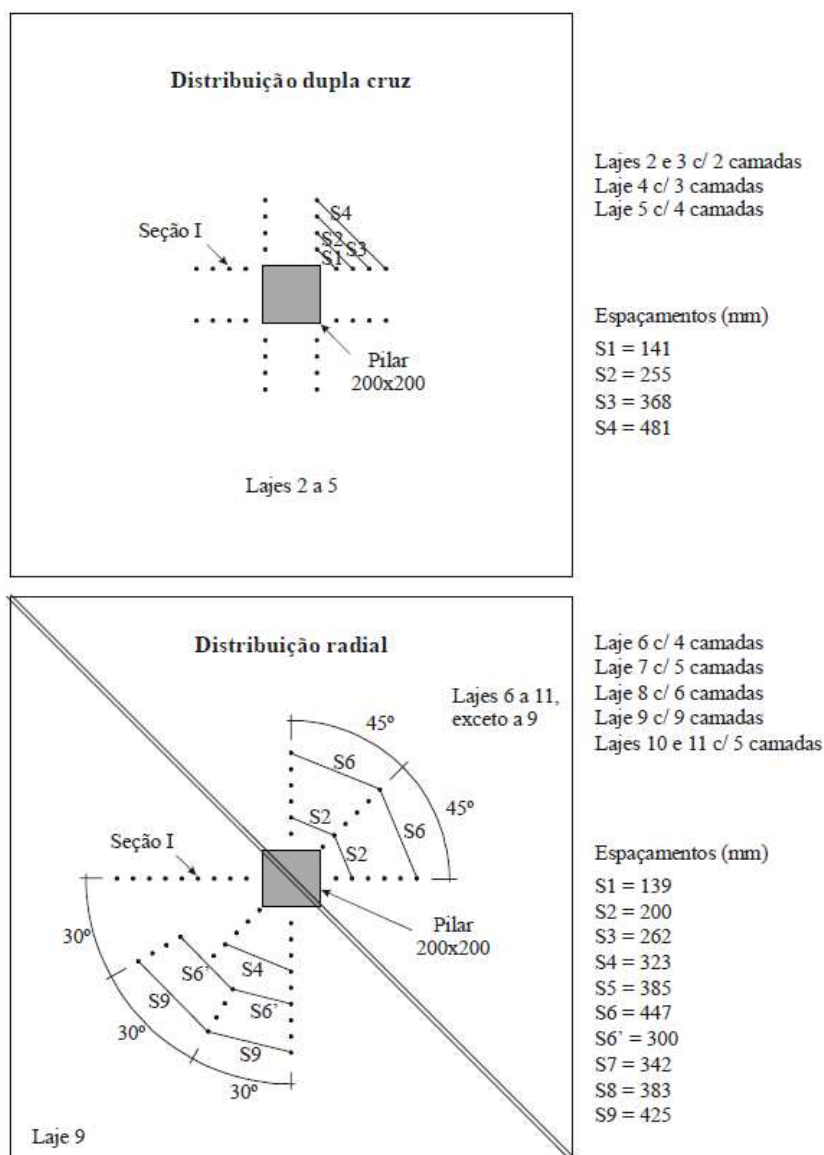


Figura 2.13: Disposições das armaduras de cisalhamento de GOMES (1991)

Com os dados dos ensaios, GOMES concluiu que a distribuição radial da armadura de cisalhamento proporciona melhores resultados que a do tipo dupla cruz. Também relatou que lajes lisas com armadura de cisalhamento podem obter

um aumento na sua resistência à punção por volta de 100% em relação às lajes sem armadura para este fim.

2.3.2 SILVA (2003)

Nesta pesquisa realizou-se uma análise experimental da resistência à punção de lajes lisas de concreto armado submetida simplesmente a um carregamento simétrico. Foram testadas até a ruptura doze lajes quadradas com 130 mm de espessura e 1800 mm de lado, carregadas no centro pelo bordo inferior.

As características mais importantes das lajes ensaiadas são: a) dimensões do pilar com um lado constante “a” igual a 150 mm e o outro lado “b” com valores de 150 mm, 300 mm e 450 mm; b) altura efetiva mantida constante e igual a 90 mm; c) taxa da armadura de flexão de 1,45% (lajes sem aberturas) e 1,57% (lajes com aberturas); d) existência de duas aberturas de 150 mm x 150 mm dispostos adjacentes ao maior lado do pilar; e) presença de armadura de cisalhamento com 3 camadas e distribuídas de forma radial e diâmetro de 8 mm.

Apenas nas lajes L7, L8, L9, L10 e L11 foram utilizadas armaduras de cisalhamento do tipo “stud”. A armadura de cisalhamento foi distribuída radialmente em 3 camadas para todas as lajes e com 8 linhas para L7 e L8, e 6 linhas para L9, L10 e L11. O ângulo formado entre as linhas da armadura de cisalhamento foi de 45°, pelo fato de haver 8 linhas distribuídas equidistantes radialmente.

As lajes que possuíam apenas 6 linhas continuaram praticamente com a mesma distribuição das outras, retirando-se apenas as duas linhas perpendiculares à dimensão de menor lado do pilar. Na laje L9, como a dimensão “b” da coluna era maior que o perímetro da armadura, foram retiradas as duas linhas da armadura que

permaneceriam dentro da área do pilar. Para as lajes L10 e L11, a razão pelas duas linhas da armadura a menos foi a presença das aberturas que impossibilitava a existências destas linhas. A Figura 2.14 apresenta os detalhes da armadura de cisalhamento utilizada por Silva (2003):

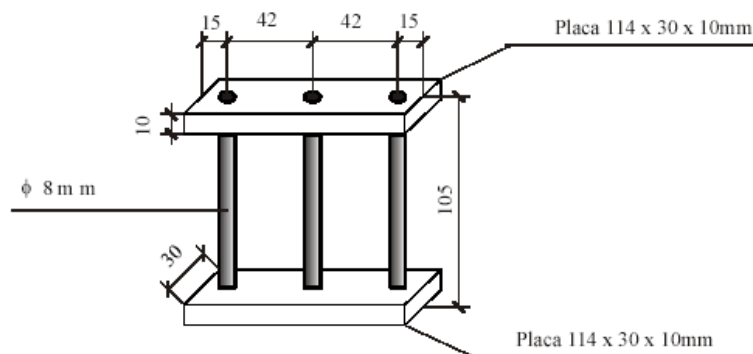


Figura 2.14: Armadura de cisalhamento utilizada na pesquisa de Silva (2003)

Silva (2003) conclui que com o aumento de uma das dimensões do pilar, que consequentemente aumenta o perímetro de controle, ocorre um acréscimo na carga de ruptura de uma laje cogumelo de concreto armado. A existência de aberturas adjacentes à coluna pode diminuir a resistência à punção de lajes cogumelo. Afirmar ainda que o uso de armadura de cisalhamento do tipo “stud” em lajes sem aberturas apresenta resultados bastante satisfatórios como já foi dito por outros pesquisadores. Os resultados também mostraram que o uso desta armadura pode ser uma possibilidade de se aumentar a resistência ao puncionamento em lajes cogumelo com aberturas. Este aumento pode até ser superior quando comparado com laje sem armadura de cisalhamento em sem aberturas.

2.3.3 BORGES (2003)

BORGES (2003) analisou 20 (vinte) lajes de dimensões 3000mm x 3000mm x 200mm com o objetivo de verificar a influência da geometria do pilar, bem como o efeito da presença de aberturas posicionadas adjacentes ao pilar e assim determinar a contribuição da armadura de cisalhamento na resistência à punção. As lajes ensaiadas por Borges (2003) estão discriminadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Características das lajes ensaiadas por Borges (2003)

Lajes	Pilar (mm)		d (mm)	f _c (MPa)	ρ (%)	Nº de furos	Gancho Ancorag.	Armadura cisalhamento	
	c ₁	c ₂						Nº cam.	φ (mm)
L42	200	400	139	43,2	1,53	0	(1)	-	-
L42A	200	400	164	36,2	1,15	0		-	-
L45	200	600	154	42,0	1,28	0		-	-
L46	200	800	164	39,3	1,15	0		-	-
L41	150	250	139	44,7	1,39	0		-	-
L41A	150	250	164	38,9	1,24	0		-	-
L43	150	450	139	39,0	1,39	0		-	-
L43A	150	450	164	38,7	1,24	0		-	-
L44	150	600	164	40,0	1,18	0		-	-
L45FS_CG	200	600	154	40,5	1,14	1	sim	-	-
L45FD_CG	200	600	154	39,0	1,38	1	sim	-	-
L45FD	200	600	154	41,4	1,38	1	não	-	-
L45FFS_CG	200	600	154	41,6	1,00	2	sim	-	-
L45FFD_CG	200	600	164	40,6	1,24	2	sim	-	-
L45FFD	200	600	144	37,0	1,38	2	não	-	-
L45FFD_AC2	200	600	154	43,8	1,38	2	não	4	10,0
L45FFD_AC3	200	600	154	39,6	1,38	2	não	3	8,0
L45FFD_AC4	200	600	154	43,2	1,38	2	não	3	8,0
L45FFD_AC5	200	600	154	40,7	1,38	2	não	2	8,0
L45_AC1	200	600	154	39,0	1,38	0	(1)	4	10,0
L45_AC5	200	600	154	41,1	1,38	0		2	8,0

(1) lajes sem furo – sem gancho de ancoragem;

F – um furo; FF – dois furos; S – sem acréscimo de barra, D – com acréscimo de barra;
CG – com gancho de ancoragem; ACi – armadura de cisalhamento do tipo “i”

Com os ensaios analisados, Borges (2003) conclui que o cálculo do perímetro efetivo de controle de lajes com aberturas próximas ao pilar proposto pelo método recomendado pelo Handbook to BS8110 (1987), é uma possível alternativa para estimar a resistência última de lajes sob punção.

Além disso, a autora propõe a inclusão de um fator nas expressões de cálculo da resistência a punção das normas americana (ACI) e europeia (EC2). Esse fator é a razão entre a maior dimensão do pilar ($c_{m\acute{a}x}$) e a altura útil da laje (d).

Equação atual na norma americana (ACI):

$$V_c \leq \frac{0,5}{\left(c_{m\acute{a}x}/d\right)^{0,1756}} \sqrt{f'_c} b_o d \quad (2.30)$$

Equação proposta para a norma europeia (EC2):

$$V_{Rd,c} = 0,18 \kappa \left(0,95 \left(\frac{c_{m\acute{a}x}}{d} \right)^{0,038} \right) (100 \rho f_{ck})^{1/3} \geq V_{min} \quad (2.31)$$

Onde:

$c_{m\acute{a}x}$: Maior dimensão do pilar.

2.3.4 SALAKAWY *et al* (2000)

O artigo traz os resultados de uma investigação experimental sobre a influência de armadura de cisalhamento no comportamento das lajes lisas de concreto armado com aberturas. Os parâmetros de teste foram a localização das aberturas ao redor do pilar, o tamanho das aberturas e a existência de armadura de cisalhamento.

Os modelos testados foram divididos em duas séries. Cada série consistia de quatro lajes, sendo três lajes com aberturas e uma sem abertura. A série I incluiu as lajes XXX, SE0, SF0 e CF0 sem armadura de cisalhamento e a série II (XXX-R, SEO-R, SF0-R e CF0-R), possuía armadura de cisalhamento do tipo *stud*, conforme a Figura 2.15 e a Tabela

2.2. Ambas as séries foram submetidas a uma excentricidade constante ($e = M / V$) de 0,3 m.

Nas lajes da série II, as armaduras de cisalhamento foram dispostas em seis linhas ao redor do pilar e cada linha possuía 6 *studs* verticais de 75 mm de comprimento, 9,5 mm de diâmetro. Os *studs* tinham uma cabeça circular de 5 mm de espessura, 30 mm de diâmetro na parte superior e foram soldadas a uma tira de aço de 5 mm de espessura, 25 mm de largura na parte inferior. O espaçamento entre os *studs* foi de 60 mm.

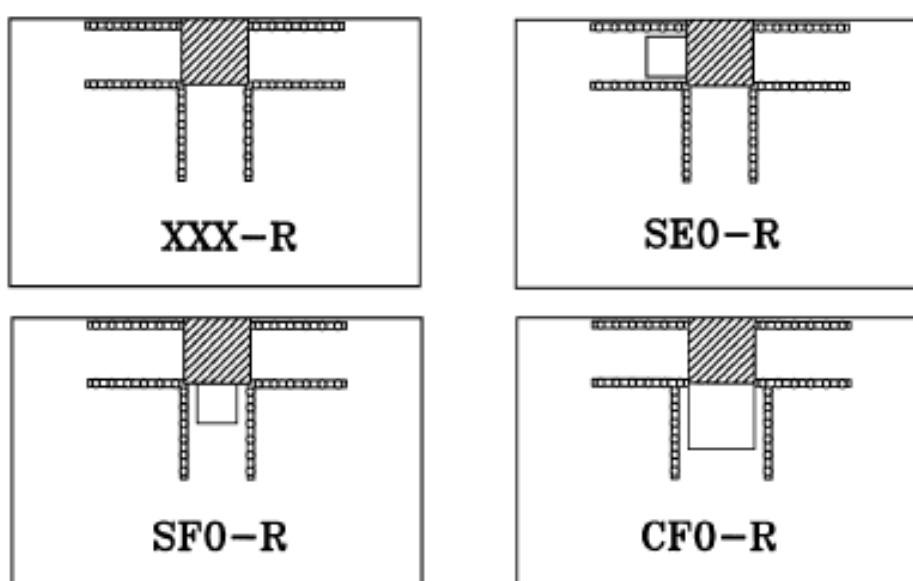


Figura 2.15 - Características das lajes da série II ensaiadas por Salakawy *et al.* (2000).
Fonte: Salakawy *et al.* (2000).

Os autores afirmaram que a construção de aberturas próximas aos pilares reduz a resistência ao cisalhamento e a ductilidade da ligação laje/pilar. A partir dos ensaios eles concluíram que o reforço ao cisalhamento corretamente colocado e ancorado pode reforçar a laje e proporcionar a ductilidade necessária. Em todos os casos, a resistência e a ductilidade dos modelos com reforço por cisalhamento foram maiores do que as dos seus homólogos sem o reforço.

Tabela 2.2 - Características das lajes e carga de ruptura.

Série	Laje	f_c (MPa)	Armadura de Cisalhamento	Dimensão da abertura (mm)	Localização da abertura	V_u (kN)	M_u (kN)
I	XXX	33,0	não	-	-	125	37,5
	SF0	31,5	não	150 x 150	Em frente	110	33,0
	SE0	32,5	não	150 x 150	Na borda	120	36,0
	CF0	30,5	não	250 x 250	Em frente	86	25,8
II	XXX-R	32,0	sim	-	-	154	46,2
	SF0-R	32,0	sim	150 x 150	Em frete	146	43,8
	SE0-R	31,5	sim	150 x 150	Na borda	150	45,0
	CF0-R	32,0	sim	250 x 250	Em frente	105	31,5

Fonte: Salakawy *et al.* (2000).

Observa-se que, nos pilares de borda submetidos à transferência de momentos perpendiculares ao bordo, o comportamento da abertura localizada ao lado do pilar é menos afetado que a localizada na região frontal ao pilar.

Para Salakawy *et al.* (2000), pilares com abertura e largura similares não devem ser construídas em lajes lisas, pois estas ligações não podem ser eficazmente reforçadas por armadura de cisalhamento.

2.3.5 HA *et al* (2015)

O estudo apresenta o experimento de oito lajes com aberturas circulares variando a posição e o número de aberturas e sem armadura de cisalhamento. As reduções na resistência ao cisalhamento devido à existência de aberturas foram, geralmente, proporcionais à perda de seções críticas efetivas. Na Figura 2.16 as diferentes aberturas adotadas são apresentadas.

Segundo Ha *et al.* (2015) a presença da abertura nas lajes no sentido N-S fez com que surgissem fissuras no sentido W-E, exceto para a laje L3, de acordo com a Figura 2.17.

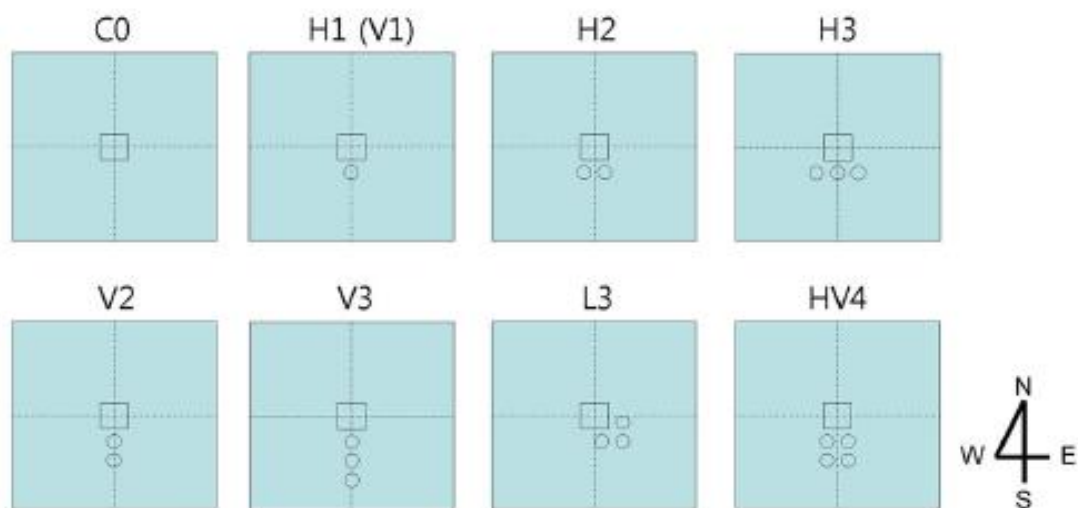


Figura 2.16: Disposição das aberturas de cada modelo ensaiado.
Fonte: Ha *et al* (2015)

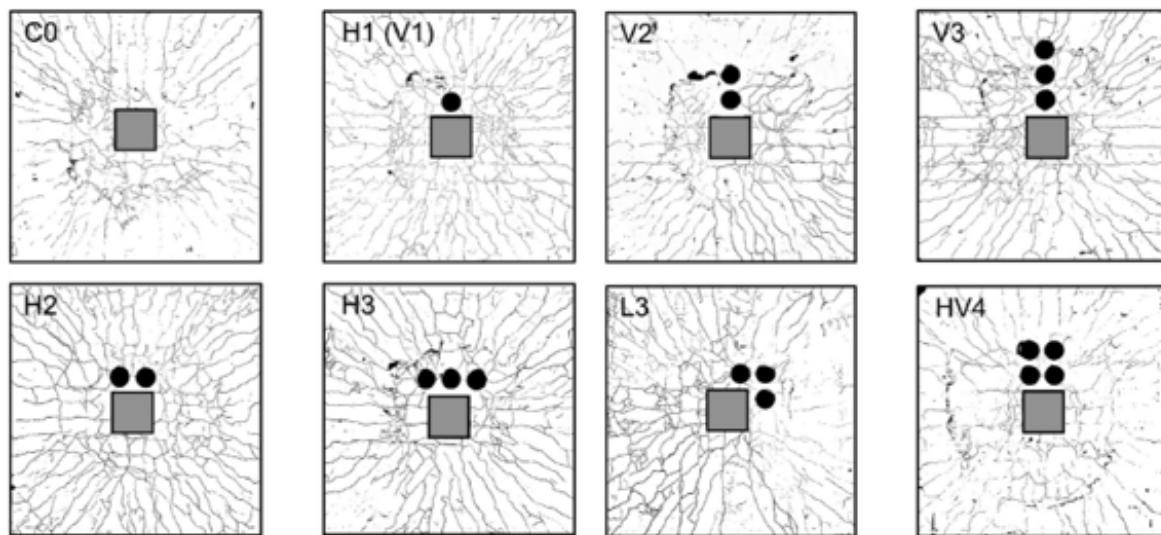


Figura 2.17: Fissuras de cada modelo ensaiado.
Fonte: Ha *et al* (2015)

Os autores afirmam que os resultados dos ensaios mostraram que os comprimentos de perímetro críticos efetivos são geralmente proporcionais às cargas

de ruptura. Isto confirma a validade do pressuposto de que a redução na força de cisalhamento devido à existência de aberturas é proporcional à perda de perímetro de seção crítica.

O autor conclui que na série H dos modelos, tanto os resultados de teste como as previsões de código mostraram uma tendência em que a resistência ao cisalhamento diminui à medida que o número de aberturas aumenta. Em contrapartida, a força de cisalhamento é quase idêntica, independentemente do número de aberturas na série V. A disposição das aberturas em forma de L em volta do canto de um pilar pode resultar numa redução adicional.

2.3.6 MARQUES (2018)

MARQUES (2018) analisou 09 lajes e as principais variáveis das lajes são a existência ou não de aberturas, tamanho da abertura, quantidade de aberturas, utilização de armadura de cisalhamento e taxa de armadura de flexão, que depende do tamanho da abertura. A área que representa o pilar de 150 mm x 150 mm, simulado por uma placa metálica posicionada na parte inferior da laja, manteve-se constante. Foi adotado aberturas de 75, 100 e 150 mm por ser as dimensões usuais das tubulações hidráulicas presentes no mercado. As características das lajes dos grupos 1 e 2 estão representadas na Tabela 2.3.

Com as lajes ensaiadas experimentalmente é utilizado uma simulação numérica para definir os modelos constitutivos do aço e do concreto que permitam visualizar a ruptura por punção e o modo de ruptura de lajes lisas com abertura e com armadura de cisalhamento.

O objetivo final foi desenvolver um modelo teórico para previsão da carga e modo de ruptura à punção.

Tabela 2.3: Características das lajes ensaiadas por Marques (2018)

Grupo	Laje	Dimensões do pilar		Altura efetiva "d" (mm)	ρ (%) ⁽¹⁾	Quantidade de abertura	Dimensão da abertura	AC ⁽²⁾ "stud"
		a (mm)	b (mm)					
1	LR	150	150	90	1,58	-	-	não
	L2-150	150	150	91	1,17	2	150	não
	L4-75	150	150	93	1,29	4	75	não
2	LR-8s	150	150	90	1,58	-	-	sim
	L2-150-8s	150	150	90	1,19	2	150	sim
	L2-150-6s	150	150	90	1,19	2	150	sim
	L2-100-8s	150	150	90	1,19	2	100	sim
	L4-75-8s	150	150	90	1,58	4	75	sim
	L4-75-4s	150	150	90	1,58	4	75	sim

⁽¹⁾ $\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$, taxa de armadura calculada com a largura de acordo com "d"

⁽²⁾ AC: Armadura de Cisalhamento.

Utilizando o modelo teórico proposto, MARQUES (2018) conclui que armaduras de cisalhamento que forem distribuídas de forma não simétricas e não circular pode não conceber bons resultados. O modelo é ideal para pilares quadrados ou circular, para pilar retangular, os resultados podem não ser satisfatórios.

Já utilizando o modelo numérico, a conclusão é que a carga de ruptura obtida experimentalmente, foi próxima aos valores obtidos pelo MEF (Método dos Elementos Finitos). A análise não linear apresentou resultados mais rígidos, principalmente próximo à carga de ruptura. Numericamente, a fissuração das lajes foi similar ao obtido experimentalmente. O modo de ruptura das lajes com armadura de cisalhamento foi externamente à armadura de cisalhamento.

2.3.7 NASCIMENTO (2020)

O autor apresenta um método para a determinação da resistência à punção de ligações laje-pilar com armaduras de cisalhamento inicialmente apresentado por FERREIRA (2010). Esse método é descrito desde sua fundamentação teórica até o desenvolvimento e calibração de parâmetros para que possa ser usado em seu formato simplificado denominado de Método da Superfície de Resistência Mínima ao Cisalhamento (SRMC).

O método SRMC investiga de forma iterativa a superfície de ruptura com a menor previsão de resistência a punção através da equação 2.32 que considera de forma variável as contribuições do concreto e das armaduras de cisalhamento, conforme Figura 2.18.

$$V_{R,s} = \min(N_{u,sup}; N_{u,inf}) = \min \left\{ \begin{array}{l} k_{cr} \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef,sup}^{1,5} \cdot N_{stud,cam} \\ k_{uncr} \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef,inf}^{1,5} \cdot N_{stud,cam} \end{array} \right. \leq A_{sw,cam} \cdot f_{yw} \quad (2.32)$$

Onde:

$V_{R,s}$: Resistência à punção adotada;

$N_{u,sup}$: Força de arrancamento do embutimento superior do conector;

$N_{u,inf}$: Força de arrancamento do embutimento inferior do conector;

k_{cr} : Fator que leva em consideração o grau de fissuração do concreto. Assumido 8,9;

k_{uncr} : Fator que leva em consideração o concreto não fissurado. Assumido 12,7;

f_c : Resistência à compressão do concreto;

$h_{ef,sup}$: Comprimento de embutimento superior do conector de aço;

$h_{ef,inf}$: Comprimento de embutimento inferior do conector de aço;

$N_{stud,cam}$: Quantidade de conectores na camada de armadura interceptada pela superfície de ruptura;

$A_{sw,cam}$: Área de armadura de cisalhamento interceptada pela superfície de ruptura;

f_{yw} : Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento.

Um banco de dados contendo resultados experimentais em lajes com armadura de punção do tipo conectores com cabeça e ruptura dentro da região armada foi utilizado para avaliar alguns dos métodos normativos existentes.

Os métodos normativos apresentaram elevada dispersão, com tendência de resultados contra a segurança em função do crescimento da taxa de armadura de cisalhamento. Isso resultou, principalmente, do fato das normas assumirem contribuições fixas para o concreto e para as armaduras de cisalhamento. Sendo assim, o autor corrige essa tendência através de limitações da capacidade resistente da ligação.

Por fim, o método SRMC apresentou bom desempenho, tanto para estimar a capacidade resistente para ruptura por tração diagonal dentro da região armada quanto para corrigir a tendência de resultados contra a segurança mesmo sem propor equações que limitem a capacidade resistente da ligação.

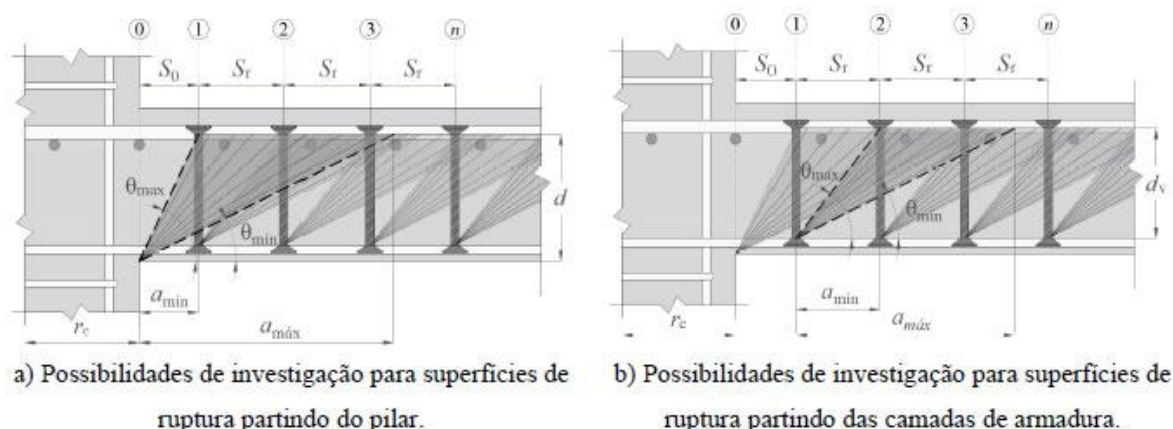


Figura 2.18: Possíveis superfícies de ruptura para verificação de método SRMC de uma ligação laje-pilar, segundo NASCIMENTO (2020)

2.4 CONTRIBUIÇÃO DOS ESTUDOS CIENTÍFICOS

Os estudos apresentados acima foram importantes para governar algumas diretrizes do presente trabalho.

Os trabalhos realizados por GOMES (1991) e SALAKAWY *et al* (2000) indicam limites para o espaçamento radial e circunferencial entre armaduras de cisalhamento. Esses limites têm grande influência na resistência a punção das lajes. Quando não respeitados, as armaduras de cisalhamento têm pouca ou nenhuma influência na resistência a punção das lajes ensaiadas.

Observa-se que esses limites são respeitados em todos os outros trabalhos mencionados. Assim, em todos os trabalhos, verifica-se que o acréscimo ou aumento de armadura de cisalhamento conduz a uma maior resistência a punção, enquanto que a inserção de aberturas conduz a uma menor resistência a punção.

Já nos trabalhos de BORGES (2003) e HA *et al* (2015) fica evidente que as regiões situadas próximas às aberturas, do lado oposto a direção do pilar não altera o resultado de um ensaio a punção, ou seja, acrescentar ou não mais aberturas nessas regiões, não influencia de forma significativa na resistência a punção das lajes.

Por fim, NASCIMENTO (2020) apresenta um método numérico para determinação da resistência a punção. Esse método verifica para cada camada de armadura transversal, a resistência a punção com a contribuição do concreto e do aço. Uma vez verificado a resistência de cada camada disposta na laje, toma-se como resistência final a punção da laje o menor valor obtido. Esse método foi utilizado para verificar as lajes ensaiadas no presente trabalho com o objetivo de obter a ruptura cruzando as armaduras de cisalhamento, ou seja, ruptura interna.

CAPÍTULO 03

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste trabalho estuda-se a situação de punção centrada, comum em pilares de centro de edifícios com lajes lisas com carregamento simétrico e transmitido, à laje, sem excentricidade.

As lajes e o esquema de ensaio adotado procuram simular uma região de momento fletor negativo delimitada pelos pontos de inflexão com um comprimento de aproximadamente dois quintos do vão total entre pilares (600,0 cm). Esse esquema baseia-se em estudos de ANDRADE (2000), conforme Figura 3.1.

Pórtico Hipotético

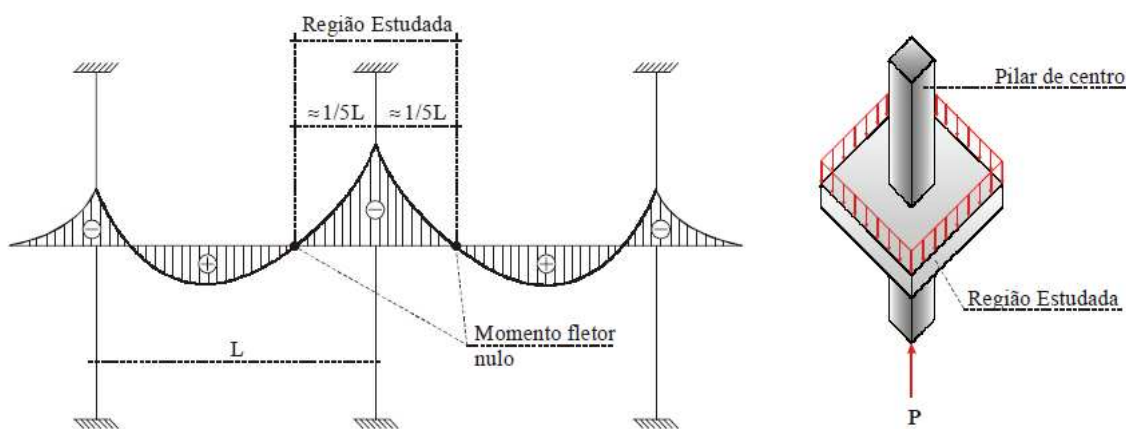


Figura 3.1: Pórtico hipotético caracterizando a região estudada da pesquisa, baseado em ANDRADE (2000)

Todos os ensaios dos modelos da pesquisa, bem como os ensaios de caracterização dos materiais, foram realizados no laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Foram ensaiadas, até a ruptura, cinco lajes lisas de concreto armado quadradas com comprimento de 2400 mm e espessura de 160 mm.

As principais variáveis deste trabalho são: existência ou não de duas aberturas circulares de diâmetro de 100 mm posicionados faceando lados opostos do pilar e; existência de armadura de cisalhamento. Todos os demais parâmetros de ensaio, tais como a altura total e altura útil da laje, a posição do carregamento (centrado), a resistência à compressão do concreto e as dimensões das lajes, foram mantidos constantes.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS

As características mais importantes das lajes ensaiadas são:

- a) pilar quadrado com dimensões iguais a 150 mm;
- b) altura útil de 105 mm;
- c) existência de duas aberturas circulares de diâmetro de 100 mm e posicionadas faceando lados opostos do pilar;
- d) presença de armadura de cisalhamento (AC) com distribuição radial em 5 camadas e $\phi = 5,0\text{mm}$ e $6,3\text{mm}$.

A média da taxa de armadura de flexão em todas as lajes ensaiadas foi de 1,041%. Os altos valores destas taxas foram adotados para que os modelos atingissem a ruptura por punção anterior à flexão, além de trabalhos já realizados e comprovando a eficiência destas taxas para que as lajes não rompessem a flexão.

Os modelos desta pesquisa foram ensaiados em uma única etapa. As lajes nomeadas como LRC, L50F, L50C, L63F e L63C (Figura 3.2 até 3.6), possuem como característica principal a existência ou não de aberturas adjacentes ao pilar e

a existência ou não de armadura de cisalhamento (AC), caracterizadas na Tabela 3.1.

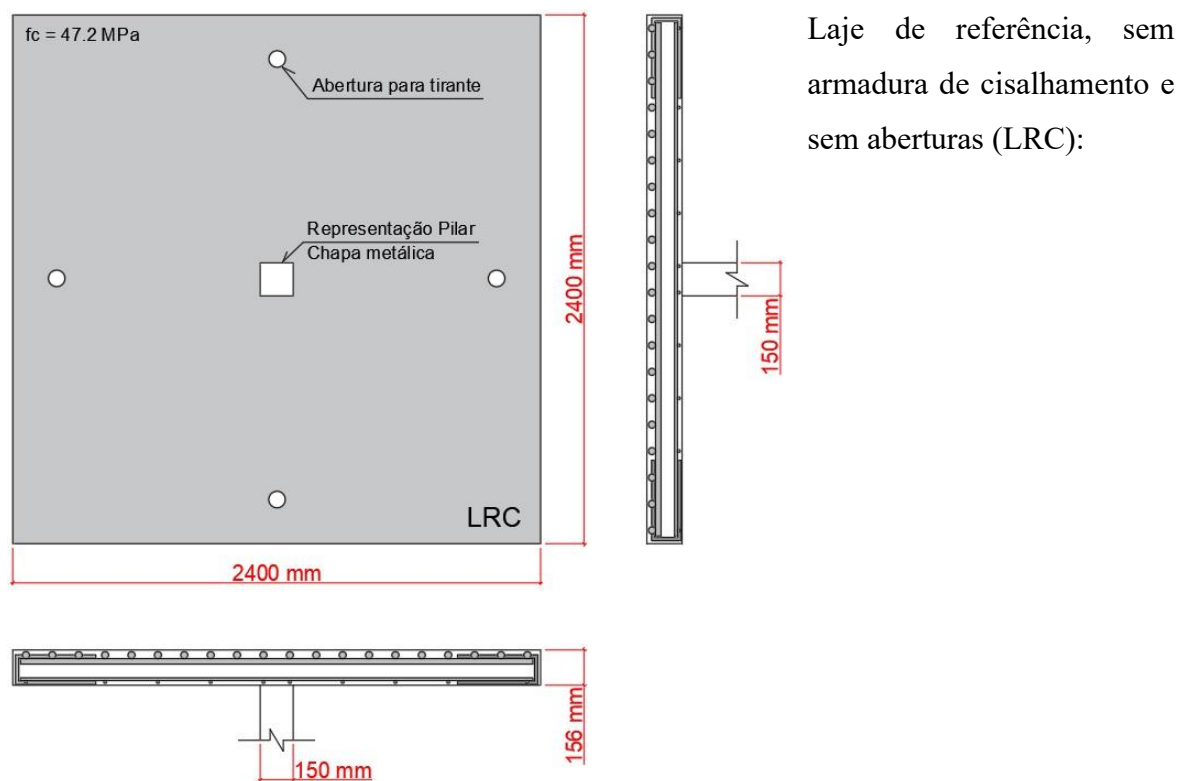
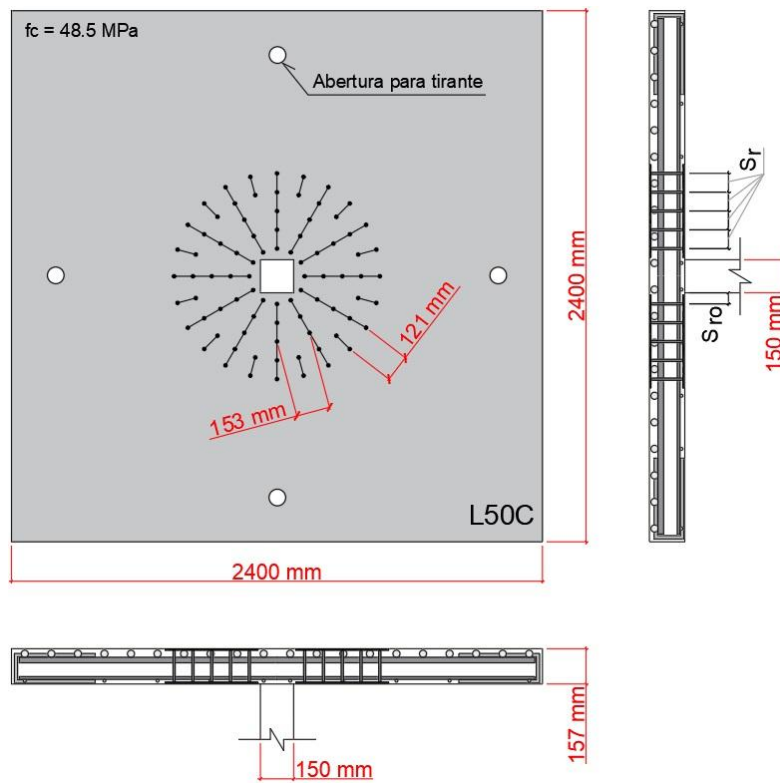


Figura 3.2: Principais características da laje LRC ensaiada



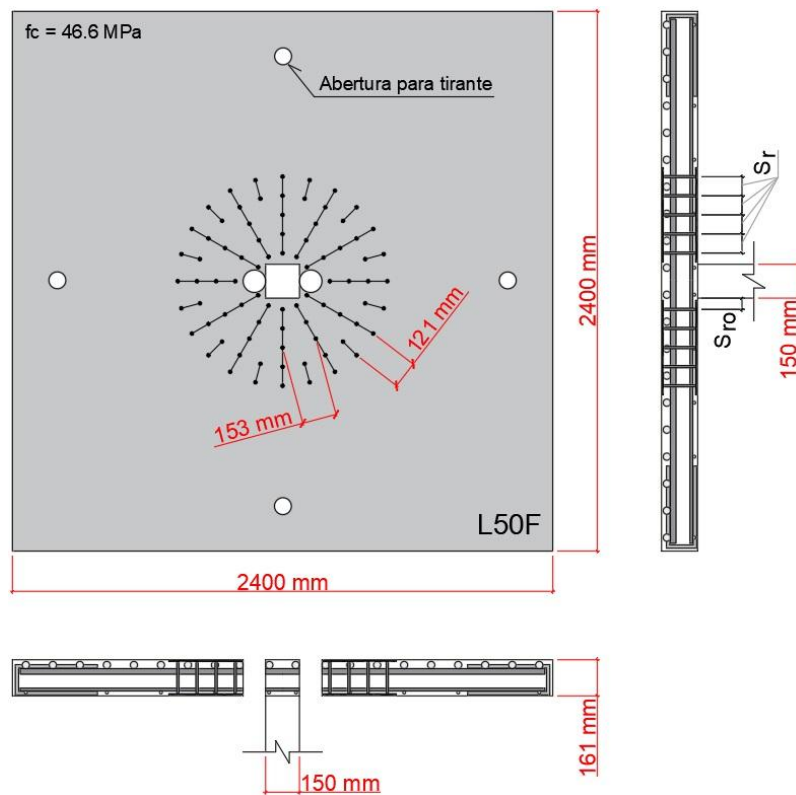
Laje com armadura de cisalhamento e sem aberturas (L50C):

$$\phi_{stud} = 5,0 \text{ mm}$$

$$s_{ro} = 50 \text{ mm}$$

$$s_r = 85 \text{ mm}$$

Figura 3.3: Principais características da laje L50C ensaiada



Laje com armadura de cisalhamento e com aberturas (L50F):

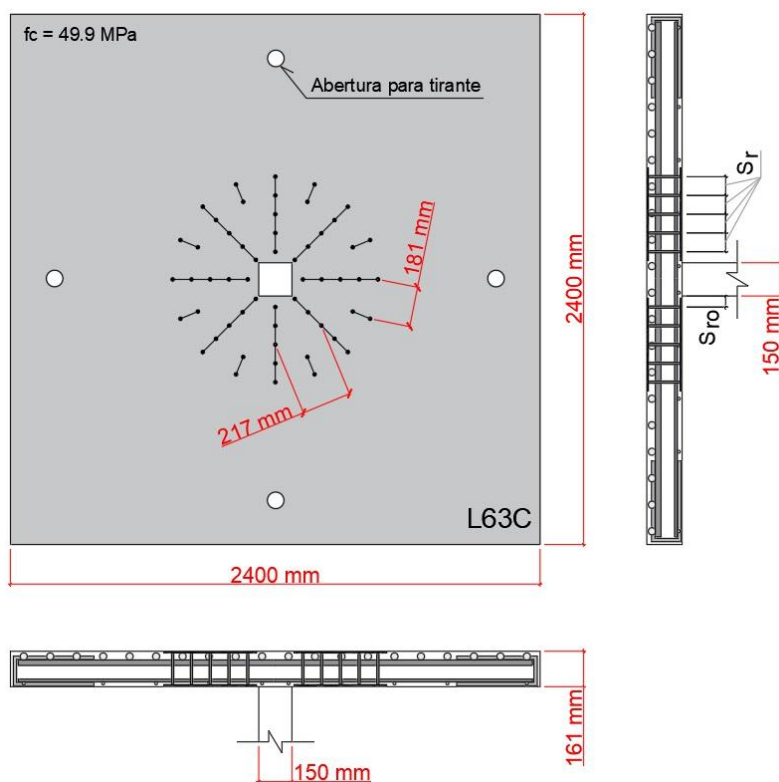
$$\phi_{furo} = 100 \text{ mm}$$

$$\phi_{stud} = 5,0 \text{ mm}$$

$$s_{ro} = 50 \text{ mm}$$

$$s_r = 85 \text{ mm}$$

Figura 3.4: Principais características da laje L50F ensaiada



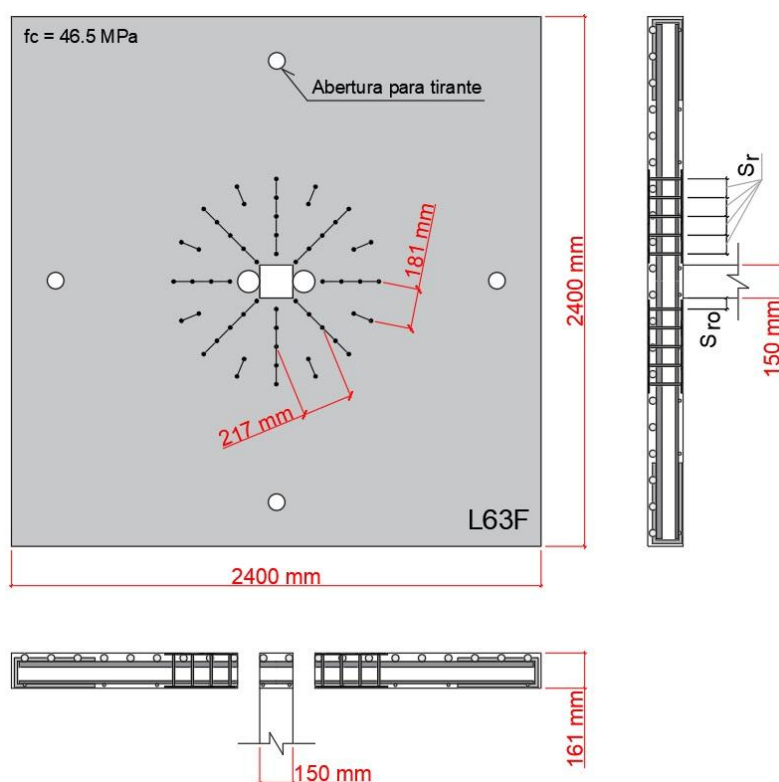
Laje com armadura de cisalhamento e sem aberturas (L63C):

$$\phi_{stud} = 6,3 \text{ mm}$$

$$s_{ro} = 50 \text{ mm}$$

$$s_r = 85 \text{ mm}$$

Figura 3.5: Principais características da laje L63C ensaiada



Laje com armadura de cisalhamento e com aberturas (L63F):

$$\phi_{furo} = 100 \text{ mm}$$

$$\phi_{stud} = 6,3 \text{ mm}$$

$$s_{ro} = 50 \text{ mm}$$

$$s_r = 85 \text{ mm}$$

Figura 3.6: Principais características da laje L63F ensaiada

Tabela 3.1: Caracterização das lajes

Etapa	Lajes	Altura total H (mm)	Altura útil d (mm)	Aberturas	Armadura de cisalhamento		
					Diâmetro armadura	Número linhas	Número camadas
01	LRC	156	103	Não	-	-	-
	L50C	157	106	Não	5,0 mm	12	05
	L50F	161	99	Sim	5,0 mm	12	05
	L63C	161	109	Não	6,3 mm	08	05
	L63F	161	113	Sim	6,3 mm	08	05

3.3 DETALHAMENTO DOS MODELOS ENSAIADOS

3.3.1 ARMADURA DE FLEXÃO

A armadura de flexão utilizadas nas lajes apresenta detalhamentos iguais para todas as lajes (LRC, L50F, L50C, L63F e L63C). Esta armadura foi detalhada da seguinte forma:

- Armadura superior é composta por uma malha ortogonal de 20 barras de 16,0 mm de diâmetro (CA-50) em cada direção com espaçamento de 12 cm entre elas. Nas lajes com aberturas, esse espaçamento das armaduras garante o posicionamento das aberturas, que têm diâmetro de 10 cm, sem a necessidade de alterar espaçamento ou interromper qualquer armadura;

- Armadura inferior composta por uma malha ortogonal de 10 barras de 6,3mm de diâmetro (CA-50) em cada direção com espaçamento de 24 cm entre elas. Nas lajes com aberturas, esse espaçamento das armaduras garante o posicionamento das aberturas, que têm diâmetro de 10 cm, sem a necessidade de alterar espaçamento ou interromper qualquer armadura;

- Para uma melhor garantia da ancoragem da armadura superior, acrescentou-se 20 ganchos de 10,0mm de diâmetro, em forma de “U”, em cada lado da laje.

3.3.2 ARMADURA DE CISALHAMENTO

As lajes L50F, L50C, L63F e L63C foram utilizadas armadura de cisalhamento (Tabela 3.1). Essas armaduras de cisalhamento são do tipo “stud”, onde barras de aço CA-60 ($\phi = 5,0$ mm) e CA-50 ($\phi = 6,3$ mm) foram soldadas em suas extremidades, à chapas de aço de 30mm de largura e 10mm de espessura (Figura 3.10).

Estes “studs” foram confeccionados através de um processo manual de solda com o uso de eletrodo revestido do tipo “OK 48.04” de 3,5mm da marca ESAB. Na Figura 3.9 apresenta-se um desenho com as dimensões necessárias das chapas para a confecção da armadura de cisalhamento do tipo “Studs”, bem como as quantidades para as lajes com armadura de cisalhamento. Na Figura 3.10 pode-se visualizar fotografias de confecção dos “studs”. Por fim, na Figura 3.11, pode-se visualizar fotografias de um “stud” pronto.

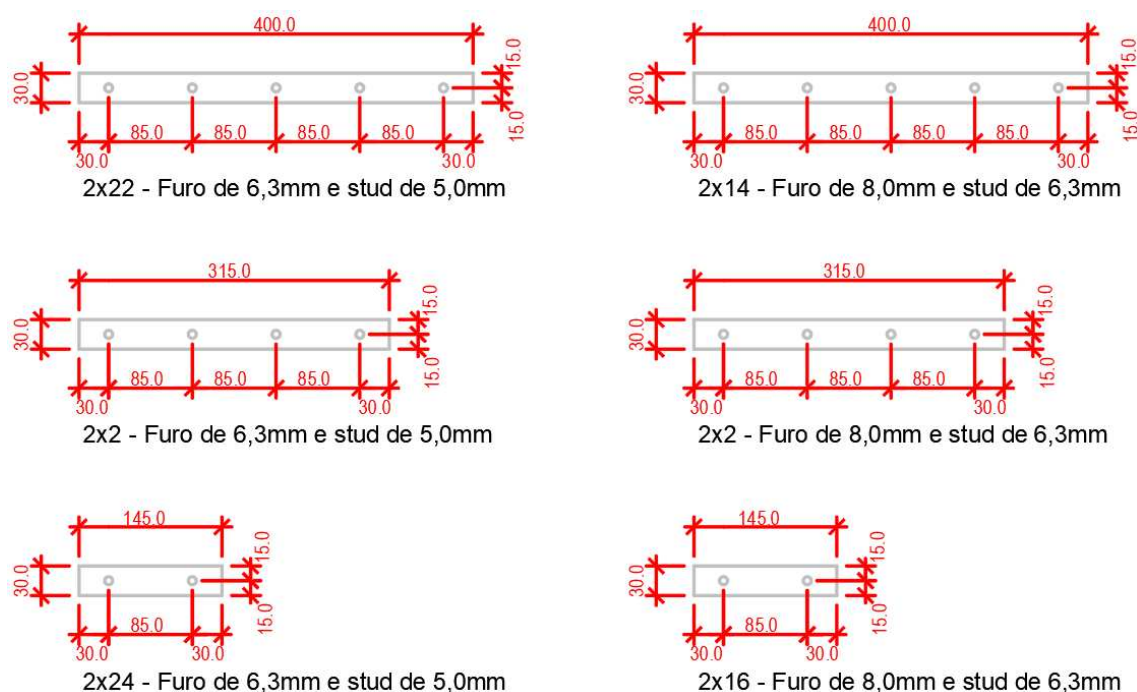


Figura 3.9: Dimensões (mm) e quantidades das chapas para confecção dos “Studs”.



Figura 3.10: Confeção dos “studs”.



Figura 3.11: “Studs” prontos para utilização.

As dimensões da chapa de aço utilizada na confecção dos “studs” foram escolhidas de maneira que garantisse a ancoragem da armadura de cisalhamento no decorrer do ensaio. GOMES (1991) recomenda que a chapa tenha uma área de ancoragem mínima de diâmetro 3 vezes o diâmetro da barra do “stud” e uma espessura com dimensão de 1 vez o diâmetro da barra.

A armadura de cisalhamento foi posicionada de maneira que envolvesse a armadura de flexão. A Figura 3.12 apresenta as dimensões adotadas no posicionamento dos “studs”. A distância do primeiro elemento à face do pilar (S_0) é de 50 mm e a distância entre elementos (S) é de 85 mm, tentando garantir um valor pouco menor que a metade da altura útil real.

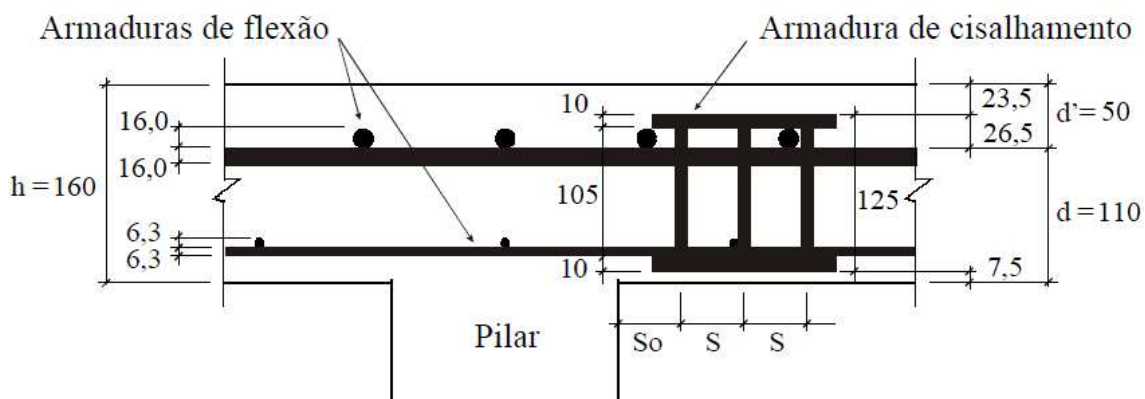


Figura 3.12: Posicionamento das armaduras de cisalhamento (mm).

A distribuição da armadura de cisalhamento foi radial em 5 camadas para todas as lajes e com 12 linhas (para L50C e L50F) e 8 linhas (para L63C e L63F). O ângulo formado entre as linhas da armadura foi de 30° para as lajes com 12 linhas e 45° para as lajes de 08 linhas (Tabela 3.2). Nas Figuras 3.13 a 3.16 é mostrada a distribuição da armadura de cisalhamento, caracterizando as dimensões dos pilares, de algumas distâncias importantes como S_0 e S_1 (distância do primeiro elemento ao centro do pilar e distância entre elementos) e do ângulo “ α ” entre as linhas da armadura de cisalhamento.



Figura 3.13: Distribuição das armaduras de cisalhamento L50C.

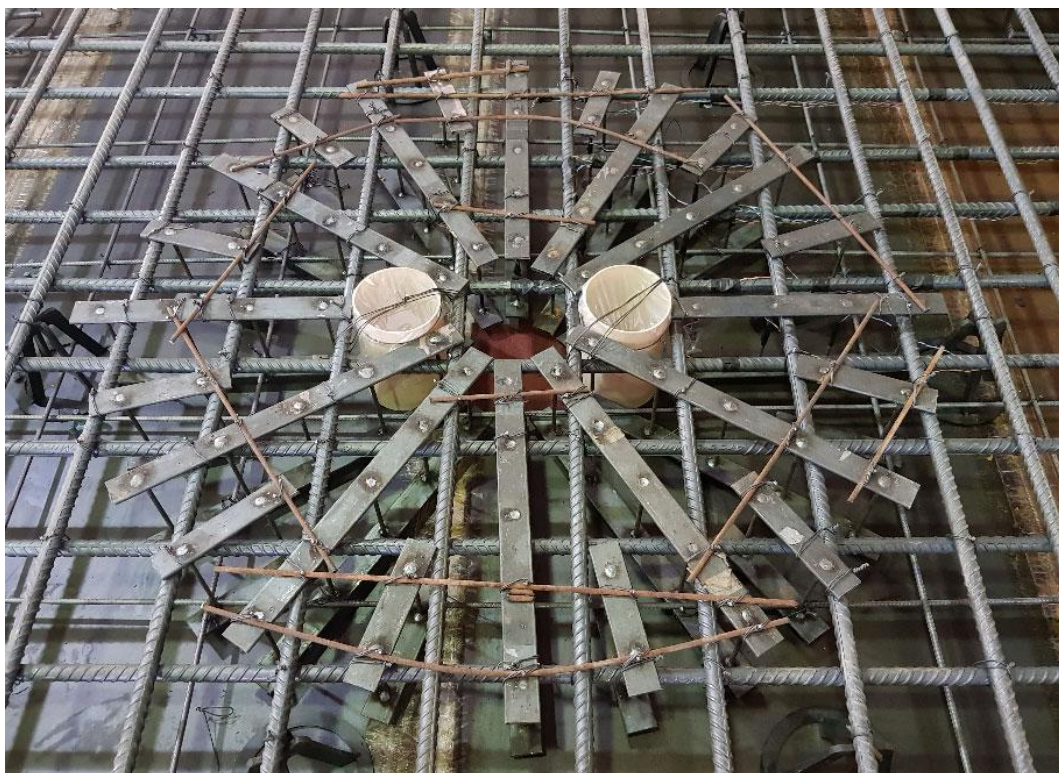


Figura 3.14: Distribuição das armaduras de cisalhamento L50F.

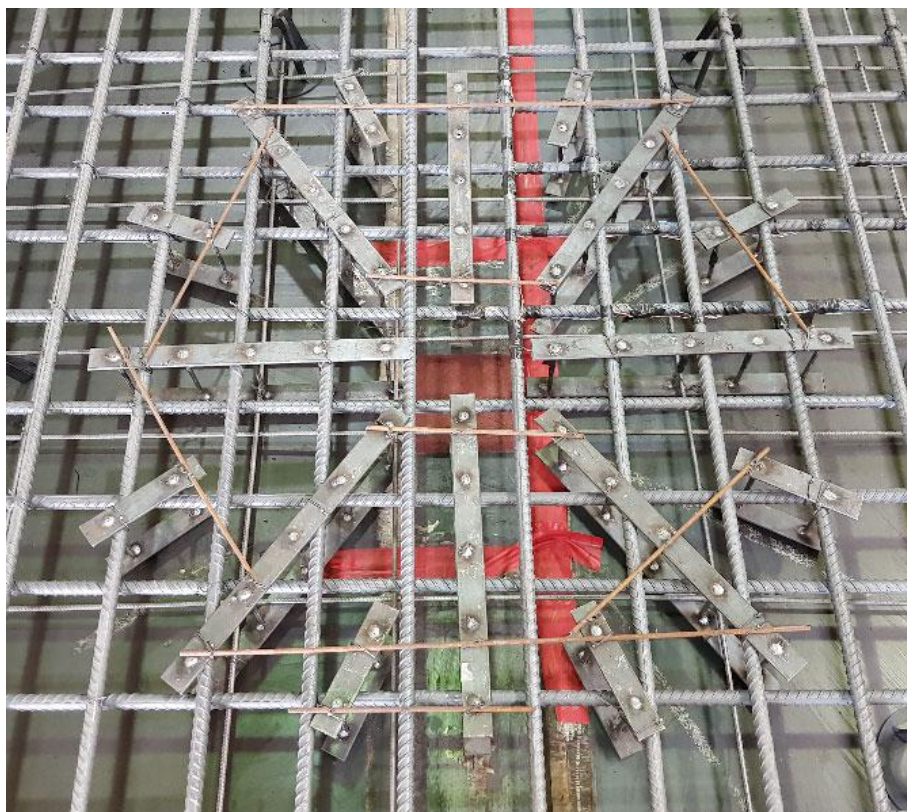


Figura 3.15: Distribuição das armaduras de cisalhamento L63C.



Figura 3.16: Distribuição das armaduras de cisalhamento L63F.

Tabela 3.2: Caracterização dos “Studs” das lajes

Lajes	Aberturas	Armadura de cisalhamento				
		Diâmetro armadura	Número linhas	Número camadas	A_{sw} (cm ²)	
					1ª camada	Demais camadas
LRC	Não	-	-	-	-	-
L50C	Não	5,0 mm	12	05	2,36	2,36
L50F	Sim	5,0 mm	12	05	1,97	2,36
L63C	Não	6,3 mm	08	05	2,49	2,49
L63F	Sim	6,3 mm	08	05	1,87	2,49

3.3.3 CONCRETO

O concreto utilizado para todas as lajes foi dosado para atingir uma resistência à compressão de 40MPa. A dosagem e a mistura do concreto foram feitas pela empresa Realmix - Concreto e Artefatos de Cimento Ltda.

O aditivo superplastificante foi adicionado minutos antes de iniciar a concretagem, visando uma maior trabalhabilidade na mistura.

Foi realizada uma única etapa de concretagem. O concreto entre as lajes apresentou pequenas divergências entre as resistências devido a diferença de idade entre cada ensaio, onde a 1ª laje ensaiada foi aos 37 dias após a concretagem e a última laje ensaiada foi aos 42 dias após a concretagem.

A moldagem das lajes foi feita em fôrmas com as laterais em madeira resinada plastificada e a base em aço posicionado sobre perfis metálicos (Figura 3.17). Pelo fato do concreto ter sido auto adensável, não houve vibração utilizando vibradores de concreto.

Após o início de pega do concreto, as lajes foram cobertas por lonas plásticas. Realizou-se a cura molhando os modelos duas vezes ao dia, e deixando-os cobertos pela lona, durante os sete primeiros dias seguintes da concretagem.

Foram moldados 50 corpos de prova cilíndricos de 100mm x 200mm (Figura 3.18) para a determinação de cada propriedade mecânica do concreto (compressão simples, tração por compressão diametral e o módulo de deformação longitudinal) no dia do ensaio.

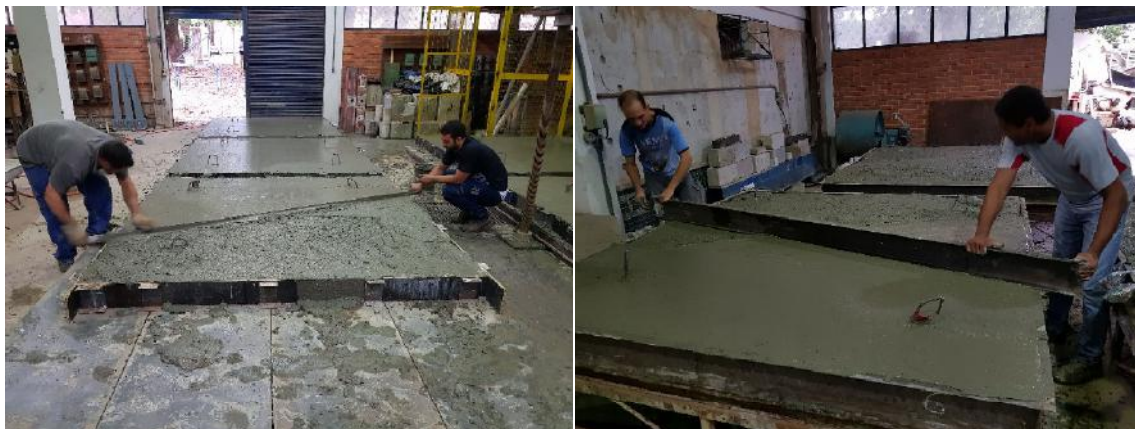


Figura 3.17: Concretagem das lajes.



Figura 3.18: Mapeamento do concreto utilizado em cada laje.

3.3.4 AÇO

O aço utilizado para a confecção da armadura de flexão e de cisalhamento, foi da Companhia Siderúrgica Arcelor Mittal. Como o aço utilizado foi de um lote, então, para a obtenção das propriedades mecânicas do material, ensaiou-se apenas uma amostra com três corpos de prova para cada bitola utilizada nas armaduras dos modelos.

Para avaliar o comportamento da solda utilizada na confecção da armadura de cisalhamento e do próprio conjunto do “stud”, fez-se ensaios à tração utilizando um dispositivo em forma de gancho que segura o elemento apenas pelas chapas superior e inferior. O esquema de ensaio (não normatizado), desenvolvido por GOMES & ANDRADE (1999), pode ser visualizado na Figura 3.19.



Figura 3.19: Sistema de ensaio da armadura de cisalhamento – verificação da solda entre a barra e chapas.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1 DESLOCAMENTO VERTICAL DA LAJE

Para a verificação dos deslocamentos verticais das lajes LRC, L50C e L63C utilizou-se 14 LVDT's (Linear Variable Differential Transformer) sendo 13 deles posicionados em apenas um quadrante da laje formando dois eixos centrais perpendiculares e 01 deles posicionado no segundo quadrante (Figura 3.21). Para as lajes L50F e L63F, o LVDT número 09 foi suprimido devido a presença da abertura (Figura 3.22).

Com o intuito de medir o deslocamento dos tirantes foram instalados 4 LVDT's, 1 sobre cada tirante, dessa maneira é possível encontrar o real deslocamento da laje, (Figuras 3.20, 3.21 e 3.22).



Figura 3.20: Posicionamento dos LVDT's.

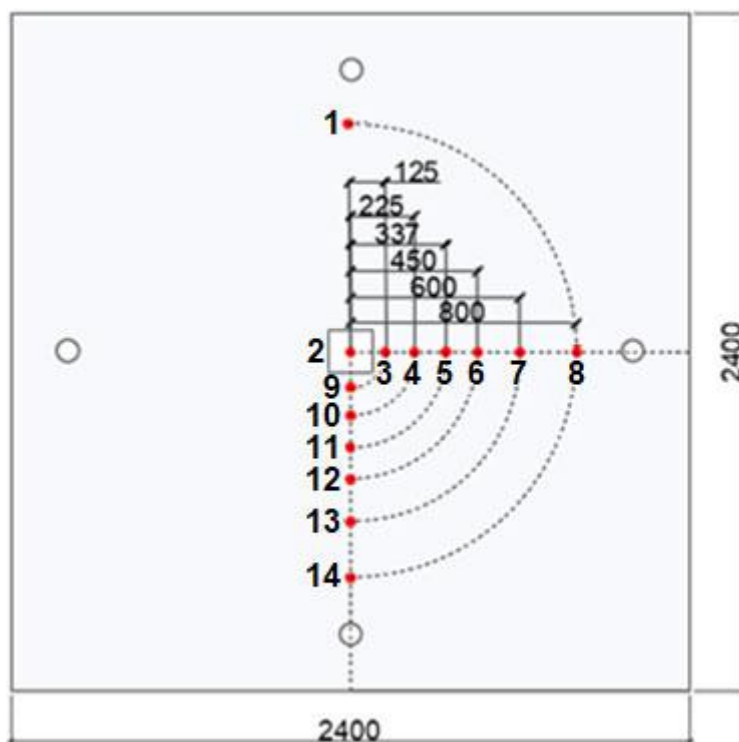


Figura 3.21: Numeração dos LVDT's para as lajes LRC, L50C e L63C.

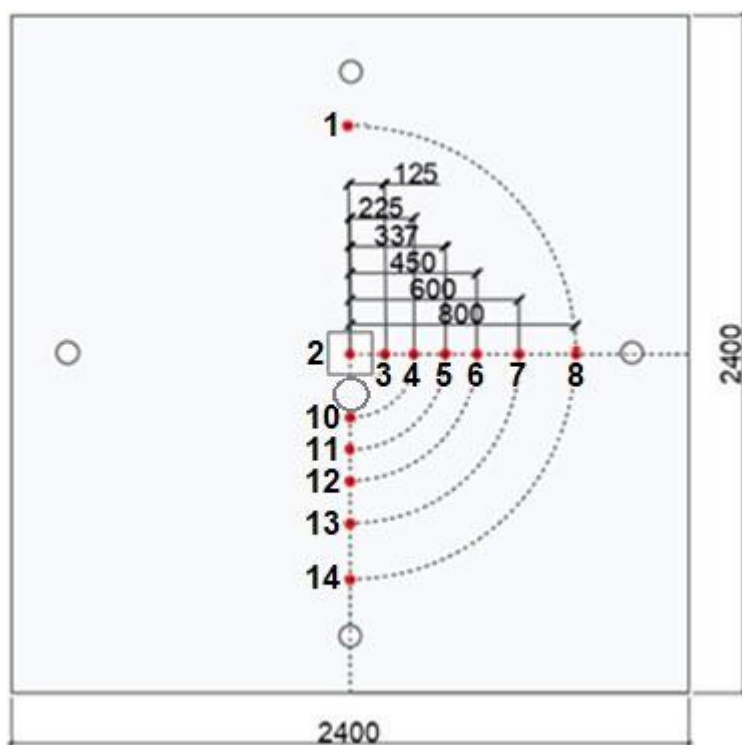


Figura 3.22: Numeração dos LVDT's para as lajes L50F e L63F.

3.4.2 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA

Para medir a deformação das armaduras, utilizou-se extensômetros elétricos de resistência (EER) da marca KYOWA ELETRONICS INSTRUMENTS CO.

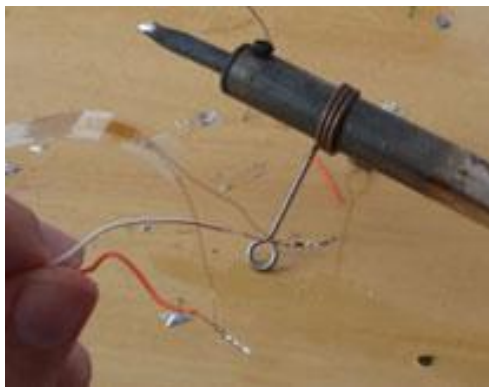
LTD do tipo KFG-5-120-C1-11 e da marca EXCEL ENGENHARIA DE SENSORES LTDA do tipo PA-06-250BA-120-L.

Os EERs foram ligados em dois sistemas de leitura. Um sistema foi uma caixa comutadora e balanceadora com 24 canais acoplada a um medidor analógico (KYOWA).

O outro foi uma caixa de aquisição de dados com 66 canais, interligada a um terminal da NATIONAL INSTRUMENTS modelo SCXI-1001 e sendo controlada por um software computacional (AGILENT BENCHLINK DATA LOGGER 3).

Para a preparação da superfície do aço nos pontos de medida de deformação através dos EER, foram seguidas as seguintes etapas: a) remoção das mossas (policorte e rebolo de desgaste); b) lixar a superfície (lixa nº 80 e 150 nesta ordem) para diminuir a rugosidade e; c) limpeza da superfície (álcool isopropílico, condicionador e neutralizador) para eliminar qualquer tipo de sujeira eventualmente existente. Após a sequência da preparação da superfície, colou-se o EER com adesivo de éster de cianoacrilato (Superbonder) da marca LOCTITE (Figura 3.22).

A ligação do EER à caixa de aquisição de dados foi feita soldando um fio (de cabo telefônico – CCI) ao extensômetro, com o cuidado da isolação. O EER e a ligação foram protegidos com o uso de uma fita elétrica de alta fusão da marca LORENZETTI (Figura 3.22).



a) Solda - fios dos extensômetros



b) Fixação de extensômetro em armadura de flexão



c) Proteção do extensômetro



d) Visão geral dos extensômetros nas armaduras com fita isolante

Figura 3.23: Etapas de instalação dos extensômetros.

a) Armadura de flexão

Para cada ponto monitorado faz-se a medição de deformação nas direções paralela e perpendicular ao pilar colando-se quatro extensômetros, dois em cada direção.

Os extensômetros foram colados em lados opostos, nas superfícies superior e inferior, das barras de aço da armadura negativa.

A instrumentação das armaduras de flexão seguiu o mesmo quadrante da instrumentação dos LVDT's, sendo adotado o mesmo posicionamento em todas as lajes (com ou sem aberturas). Os extensômetros foram colados na face mais tracionada (face superior) das barras de flexão. A posição dos extensômetros das armaduras de flexão é apresentada na Figuras 3.23.

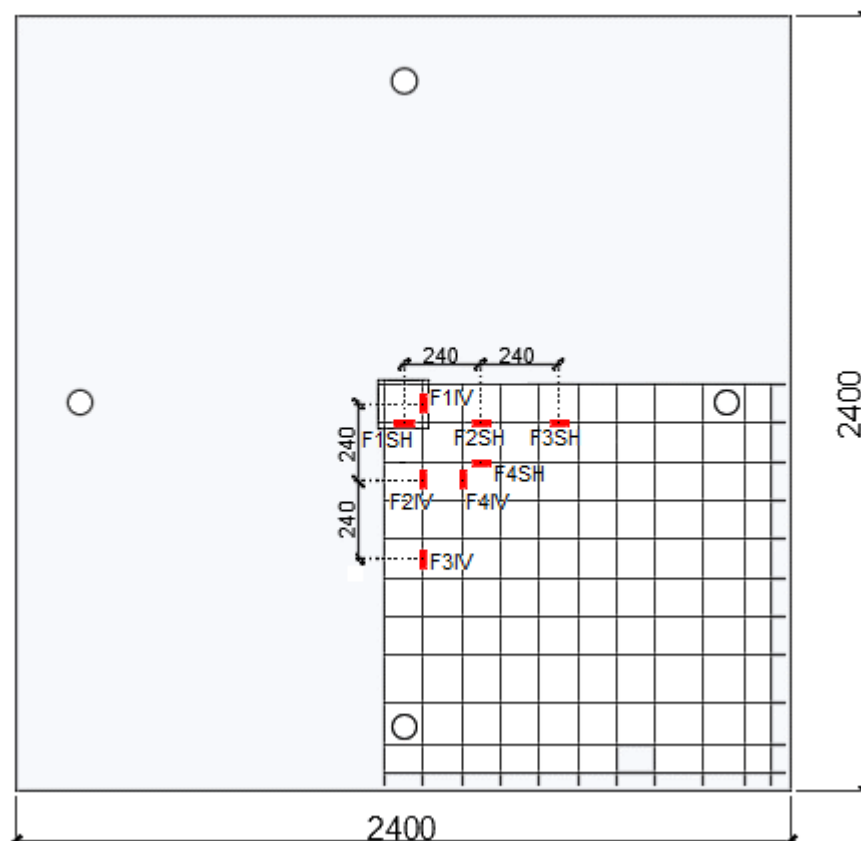


Figura 3.24: Posicionamento e identificação dos extensômetros nas armaduras de flexão.

b) Armadura de cisalhamento (studs)

As deformações foram monitoradas da seguinte forma: a) a laje L50C contém 12 linhas das quais 2 linhas foram monitoradas; b) a laje L50F contém 12 linhas das quais 4 linhas foram monitoradas; c) a laje L63C contém 8 linhas das quais 2 linhas foram monitoradas e; d) a laje L63F contém 8 linhas das quais 3 linhas foram monitoradas. Todas as linhas monitoradas contém 5 camadas de armaduras das quais 4 camadas são monitoradas. Cada elemento correspondia a um ponto de

monitoramento, em que se colou o EER na superfície voltada para o pilar, sendo esta face a mais solicitada. Os pontos monitorados e a numeração dos extensômetros são apresentados na Figura 3.24.

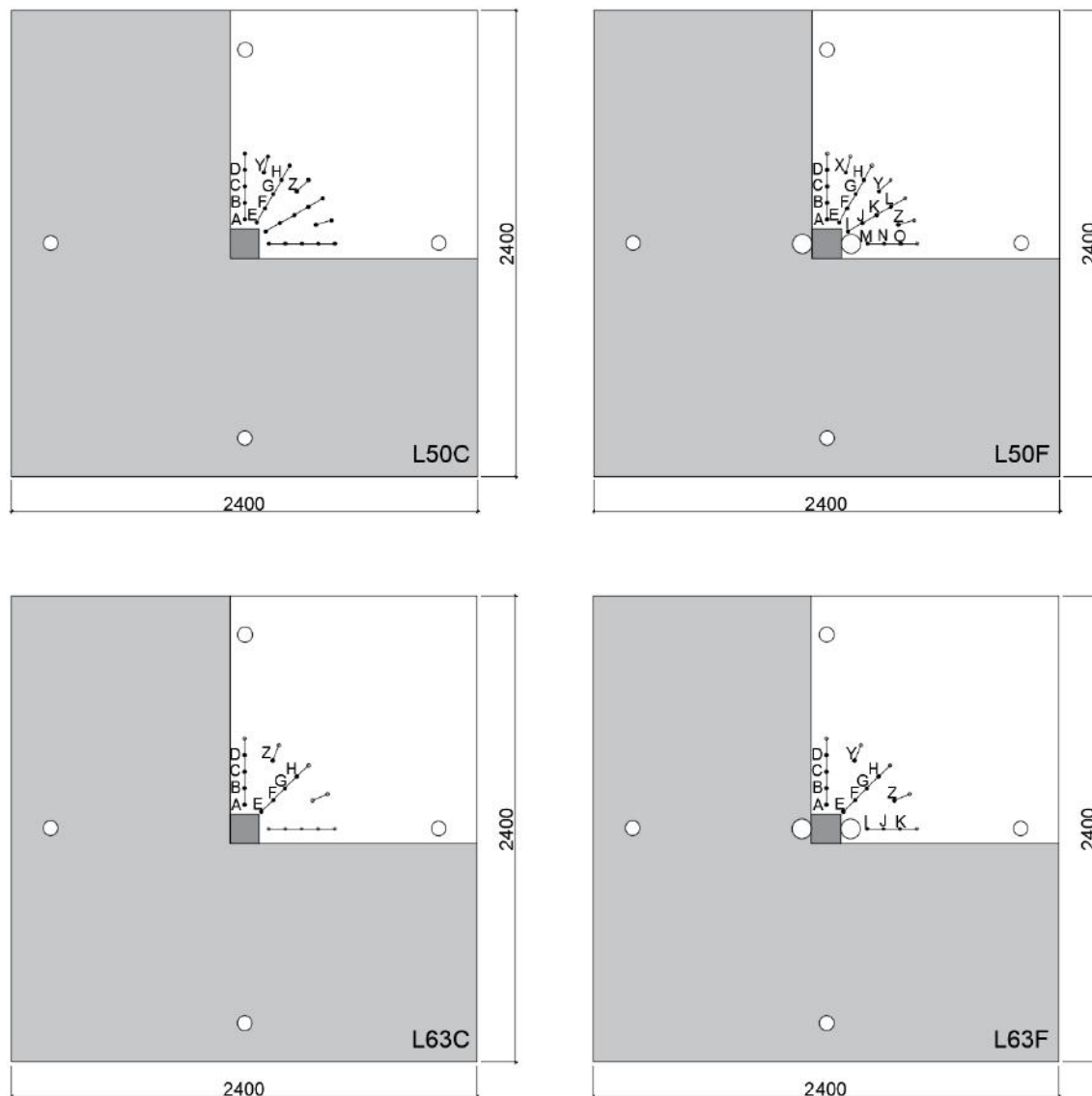


Figura 3.25: Posicionamento e identificação dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento.

c) Concreto

As deformações no concreto foram monitoradas na região comprimida da laje no mesmo quadrante dos demais instrumentos de monitoramento, o arranjo da posição dos extensômetros seguiu o mesmo padrão em todas as lajes. A Figura 3.25

mostra o posicionamento dos extensômetros de concreto na face inferior das lajes.

Estes extensômetros foram colados após posicionamento da laje no local de ensaio.

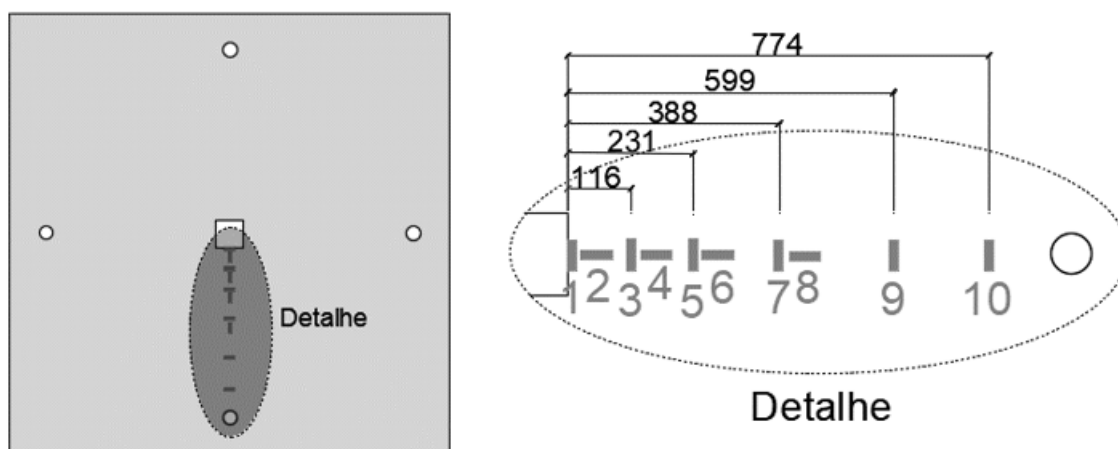


Figura 3.26: Posicionamento e identificação dos extensômetros no concreto (dimensões em mm).

3.4.3 APLICAÇÃO DE CARGA

Para controlar o carregamento das lajes utilizou-se uma célula de carga KRATOS (Figura 3.23), com capacidade de 1500 kN, conectada a um terminal da NATIONAL INSTRUMENTS modelo SCXI-1001 que apresenta em tempo real o carregamento aplicado, conforme Figura 3.26.



Figura 3.27: Equipamentos para aplicação e leitura das cargas.

Para início dos ensaios com a laje totalmente livre nos tirantes aplicou-se um carregamento para a total suspensão e afastamento dos blocos de apoio, partindo dessa forma com uma carga inicial equivalente ao peso próprio da laje com as vigas do aparato experimental, perfazendo um total de aproximadamente 25 kN, a partir desse momento verifica-se o nível da laje e aperta as porcas dos tirantes travando as chapas de apoio nas vigas de distribuição de carga e conseqüentemente a laje. É feita uma leitura inicial de todos os elementos de monitoramento sendo essa leitura a inicial (deslocamento e deformações iguais a zero).

Em todas as lajes o carregamento foi aplicado com passos de carga de 20 kN até 100 kN, a partir de então o passo de carga passa para 50 kN até 80% da carga última de cálculo, voltando para 20 kN até a carga de ruptura, sendo todas as lajes carregadas até a ruptura, dessa maneira na carga última obtida ao final do ensaio está incluído o peso próprio do modelo ensaiado.

3.5 ESQUEMA DE ENSAIO

O carregamento aplicado nas lajes, através de placa de aço, foi realizado de baixo para cima, utilizando-se de um atuador hidráulico com capacidade de 1500 kN alimentado por uma bomba manual (YELLOW POWER). A reação ao carregamento centrado foi feita por um conjunto de 04 vigas metálicas (Figura 3.27) atirantadas em uma laje de reação. Tal reação foi realizada através de quatro pontos equidistantes de 1414 mm.

Este arranjo foi adotado para propiciar uma melhor distribuição dos esforços, com o objetivo de se aproximar da situação estudada. Para que o sistema de vigas metálicas reagisse apenas nos oito pontos adotados, utilizou-se, placas retangulares com dimensões de 120 x 200 mm, localizadas entre as vigas metálicas e as lajes. As Figuras 3.27, 3.28 e 3.29 apresentam o esquema de ensaio e uma fotografia do esquema preparado para o teste.

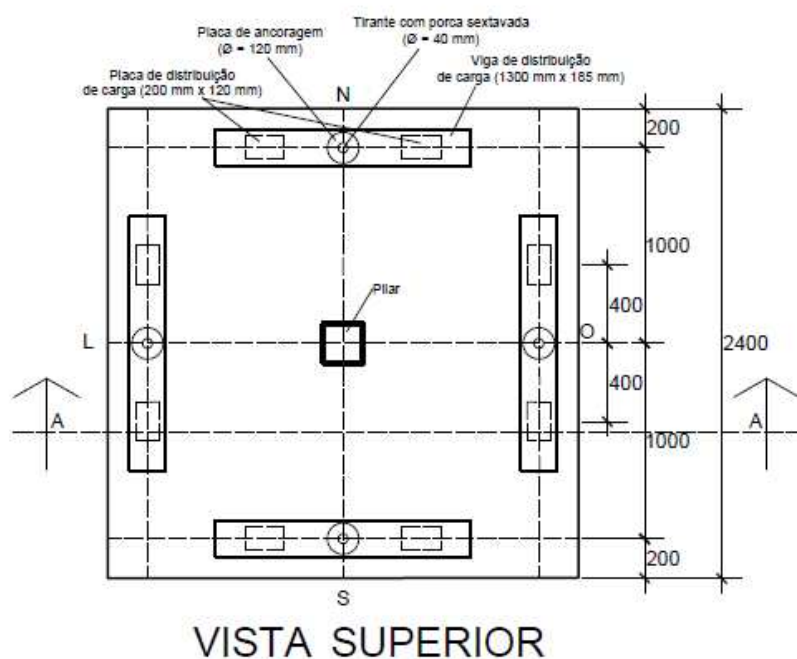


Figura 3.28: Esquema de ensaio. Vista Superior.

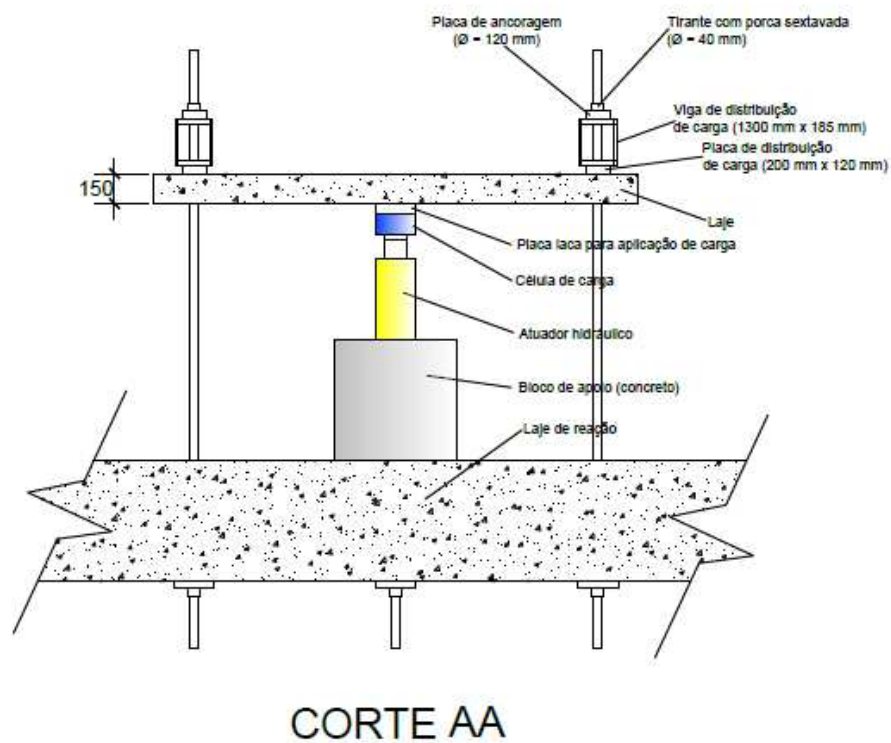


Figura 3.29: Esquema de ensaio. Corte AA.



Figura 3.30: Fotografia de esquema de ensaio. Vista em Perspectiva.

As chapas de aço utilizadas para a transmissão do carregamento das vigas para as lajes, são constituídas de aço SAC1045. Estas chapas foram fixadas com gesso pedra (gesso odontológico - VIGODENT).

As 04 vigas metálicas juntamente com os tirantes, que funcionam como reação à aplicação de carga, também foram executadas com aço SAC1045.

Os blocos de concreto armado, utilizados no esquema de ensaio, tinham apenas a função de manter a laje na altura determinada (700mm), para que se pudesse montar o sistema de aplicação de carga. Eles também foram utilizados para auxiliar o posicionamento da laje no local adequado, de maneira que, ao se montar o sistema de reação, os tirantes encaixassem nos furos da laje de reação.

CAPÍTULO 04

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de caracterização dos materiais (propriedades mecânicas do concreto e do aço) utilizados nos modelos ensaiados e os resultados dos experimentos das lajes tais como: cargas últimas e modos de ruptura observados, deslocamentos verticais das lajes, deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento e o desenvolvimento de fissuras.

4.2 MATERIAIS

4.2.1 CONCRETO

A concretagem dos modelos da pesquisa foi realizada em conjunto com a de outros trabalhos de pesquisa do laboratório de estruturas. Para que as peças estudadas pudessem ser ensaiadas em idades aproximadas, realizaram-se quatro etapas de ensaios (Tabela 4.1).

Os ensaios de resistência foram realizados em idades pré-determinadas com a finalidade de se traçar uma curva da resistência ao longo do tempo para obtenção dos dados nas idades de ensaio, conforme NBR 5739/2007 e NBR 7222/2011. O módulo de elasticidade foi determinado por etapa de concretagem, conforme NBR 8522/2008, apenas em datas próximas a cada sequência de teste das lajes.

O concreto utilizado foi do tipo auto adensável fornecido pela empresa Realmix - Concreto e Artefatos de Cimento Ltda. Além dos ensaios no estado fresco foram realizados os ensaios de caracterização com relação as seguintes propriedades mecânicas: resistência à compressão, tração por compressão diametral

e módulo de elasticidade longitudinal. Os resultados da caracterização até os 28 dias são apresentados na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do concreto até os 28 dias.

Idade (dias)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)
7	37,2	2,8	-
14	44,4	3,8	-
21	46,0	4,0	-
28	47,7	4,4	26,3

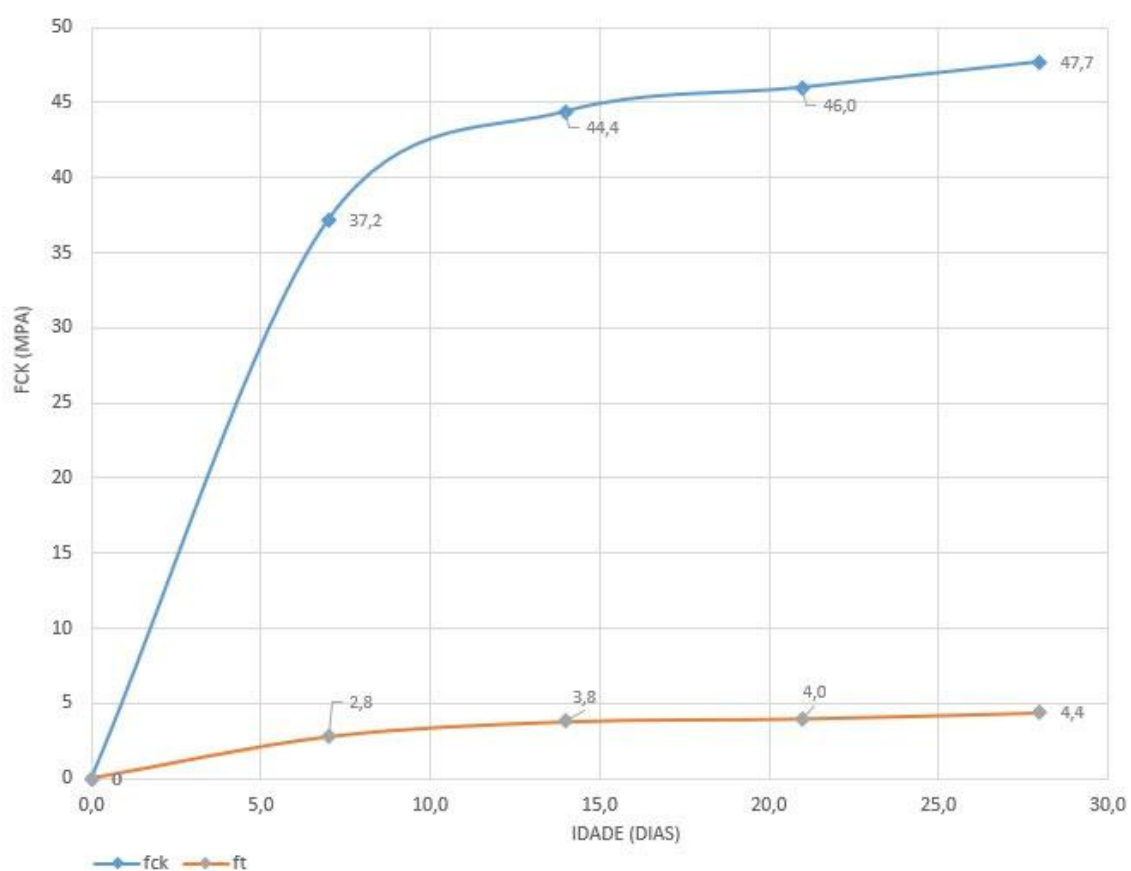


Figura 4.1: Curvas de resistência a compressão (f_{ck}) e a tração (f_t) do concreto.

Além dos ensaios de caracterização nas idades citadas, foram realizados ensaios de resistência à compressão no mesmo dia em que cada laje foi ensaiada, obtendo assim a resistência à compressão específica de cada laje com a mesma idade da ruptura, para tanto utilizou-se 3 corpos de provas devidamente mapeados

e identificados no dia da concretagem, evitando assim maiores variações da resistência à compressão.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova das lajes ensaiadas no dia do ensaio.

Tabela 4.2: Resistência à compressão do concreto no dia do ensaio de cada laje.

Laje	Idade (dias)	Corpo de prova	f_{ck} (MPa)	$f_{ck,médio}$ (MPa)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
LRC	42	CP1	46,9	47,2	1,387	2,934
		CP2	48,8			
		CP3	46,1			
L50C	37	CP1	48,1	48,5	0,666	1,372
		CP2	49,3			
		CP3	48,2			
L50F	38	CP1	46,3	46,6	0,985	2,113
		CP2	47,7			
		CP3	45,8			
L63C	39	CP1	49,9	49,9	0,651	1,305
		CP2	49,2			
		CP3	50,5			
L63F	41	CP1	47,3	46,5	0,709	1,525
		CP2	45,9			
		CP3	46,4			

4.2.2 AÇO

Na Tabela 4.3 é apresentado os diâmetros de barras utilizados, bem como o posicionamento de cada uma delas dentro da laje, um resumo das propriedades mecânicas dos aços, com valores médios dos resultados dos CP.s e o resultado do módulo de elasticidade. Os aços utilizados nas lajes estudadas (5,0mm, 6,3mm e 16,0mm) apresentaram tensão de escoamento de 727MPa, 665MPa e 581MPa e deformação no escoamento de 2,806mm/m, 4,00mm/m e 3,35mm/m, respectivamente.

A leitura de deformação da barra no decorrer do ensaio, foi feita através de um extensômetro mecânico *Clip Gage*. Com a finalidade de evitar possíveis danos, o extensômetro mecânico foi retirado em carregamentos próximos ao de ruptura. Com os dados obtidos neste ensaio foram determinadas as tensões de escoamento e de ruptura, da deformação de escoamento e módulo de elasticidade. As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam o gráfico tensão x deformação obtido nestes ensaios.

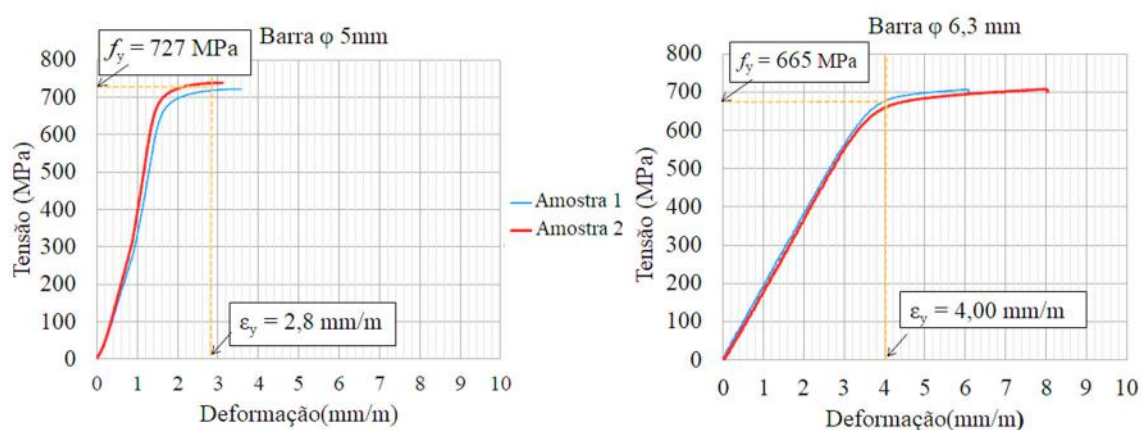


Figura 4.2: Gráfico Tensão x Deformação dos aços de 5,0 mm e 6,3 mm utilizados nas lajes.

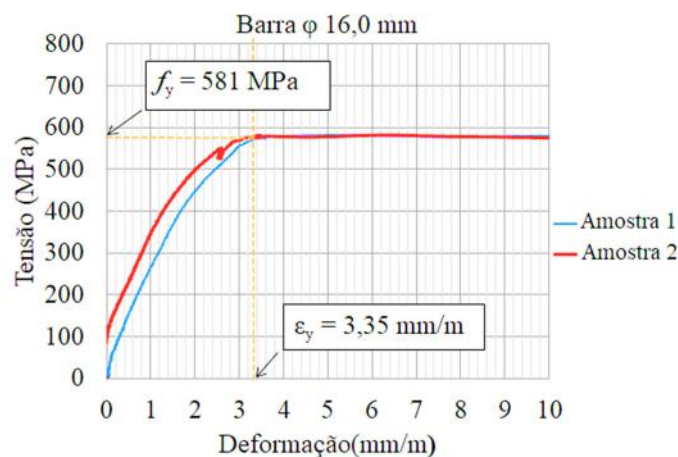


Figura 4.3: Gráfico Tensão x Deformação do aço de 16,0 mm utilizado nas lajes.

O módulo de elasticidade é feito a partir da razão da tensão de escoamento em regime elástico e a respectiva deformação específica, obtidos no ensaio. A tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de aços utilizados e o resultado do módulo de elasticidade calculado.

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas dos aços utilizados.

Diâmetro da barra:	5,0 mm		6,3 mm		16,0 mm	
Posicionamento dentro da laje:	AC ⁽¹⁾		AC ⁽¹⁾ e AF ⁽²⁾ inferior		AF ⁽²⁾ superior	
Corpo de prova:	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02
f _y (MPa):	719,0	735,0	673,0	657,0	578,0	584,0
f _{y,médio} (MPa):	727,0		665,0		581,0	
Desvio padrão:	11,314		11,314		4,243	
C de variação (%):	1,556		1,701		0,730	
ε _y (mm/m):	2,78	2,81	4,02	3,98	3,34	3,36
ε _{y,médio} (mm/m):	2,80		4,00		3,35	
Desvio padrão:	0,021		0,028		0,010	
C de variação (%):	0,759		0,707		0,422	
E _s (GPa):	189,7		187,5		205,7	
(1) Armadura de cisalhamento; (2) Armadura de flexão.						

A verificação do comportamento dos “studs” (elemento de barra com duas chapas soldadas nas extremidades), conforme descrito no item 3.3.2, foi feita com o ensaio de 4 corpos de prova. A tensão de escoamento e de ruptura dos “studs”, apesar de serem superiores à de caracterização do aço foram semelhantes. No entanto, indica que os elementos desta armadura escoaram antes da sua ruptura. Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Propriedades mecânicas dos “studs”.

“Stud” Φ :	5,0 mm		6,3 mm	
Local de ruptura:	Próximo à solda		Próximo à solda	
Corpo de prova:	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02
f_y (MPa):	650,0	630,0	581,0	588,0
$f_{y,\text{médio}}$ (MPa):	640,0		584,5	
Desvio padrão:	14,142		4,95	
C de variação (%):	2,210		0,847	
f_u (MPa):	725,0	708,0	653,0	661,0
$f_{u,\text{médio}}$ (MPa):	716,5		657,0	
Desvio padrão:	12,021		5,657	
C de variação (%):	1,678		0,861	

Na Figura 4.4 é mostrada uma fotografia dos “studs” ensaiados à tração, que romperam próximo à solda e do lado superior, pelo fato da máquina promover deslocamento apenas deste lado.



Figura 4.4: Ruptura dos “studs” próximos à solda, submetidos à tração.

4.3 CARGA E MODOS DE RUPTURA

As lajes foram ensaiadas em intervalos de carregamento até que se atingisse a ruptura, que foi por puncionamento em todos os modelos da pesquisa. A carga adotada no momento da ruptura das lajes foi o valor máximo atingido na leitora da célula de carga. A Tabela 4.5 apresenta as principais características das lajes, sua carga e modo de ruptura.

Tabela 4.5: Carga, modo de ruptura e principais características das lajes ensaiadas.

Laje	d (mm)	h (mm)	ρ (%)	f_{ck} (MPa)	P_u (kN)	$A_{sw} \cdot f_y$ (kN)	Modo de ruptura
LRC	103	156	1,627	47,2	320,0	-	Punção
L50C	106	157	1,581	48,5	518,0	152,1	PI ⁽¹⁾
L50F	99	161	1,692	46,6	402,0	128,4	PI ⁽¹⁾
L63C	109	161	1,537	49,9	551,0	165,5	PI ⁽¹⁾
L63F	113	161	1,483	46,5	396,0	150,1	PI ⁽¹⁾
(1) Punção Interna – Superfície de ruptura cruzando as armaduras de cisalhamento.							

O cálculo da taxa de armadura (ρ) é feito utilizando as equações 4.1.

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \quad (4.1)$$

Onde:

ρ : É a média da taxa de armadura de flexão das duas direções;

ρ_x : É a taxa de armadura de flexão da direção “x”;

ρ_y : É a taxa de armadura de flexão da direção “y”;

As taxas de armaduras de flexão em cada sentido (“x” e “y”) foram calculadas conforme equações 4.2 e 4.3. Todas as lajes foram confeccionadas com as armaduras na direção “x” sobre as armaduras na direção “y”.

$$\rho_x = \frac{\frac{\pi \cdot \phi^2}{4}}{E_{sp} \cdot d_x} \quad (4.2)$$

$$\rho_y = \frac{\frac{\pi \cdot \phi^2}{4}}{E_{sp} \cdot d_y} \quad (4.3)$$

Onde:

ϕ : É o diâmetro da armadura de flexão na direção considerada, em mm;

E_{sp} : É o espaçamento entre as armaduras de flexão na direção considerada, em mm;

d_x e d_y : É a distância entre a face de mais comprimida do concreto até a armadura de flexão na direção considerada, utilizando as equações 4.4 e 4.5;

$$d_x = d + \frac{\phi}{2} \quad (4.4)$$

$$d_y = d - \frac{\phi}{2} \quad (4.5)$$

Todas as lajes apresentaram superfície de ruptura iniciando na parte inferior da laje, adjacentes ao pilar e com diferentes inclinações que variam com ângulos de aproximadamente 25° a 35°. As inclinações foram obtidas aplicando carregamento para abertura das superfícies de ruptura já existente e medindo de forma aproximada com auxílio de uma haste metálica. O procedimento foi realizado em diferente locais conforme mostrado nas Figuras 4.5 e 4.6.

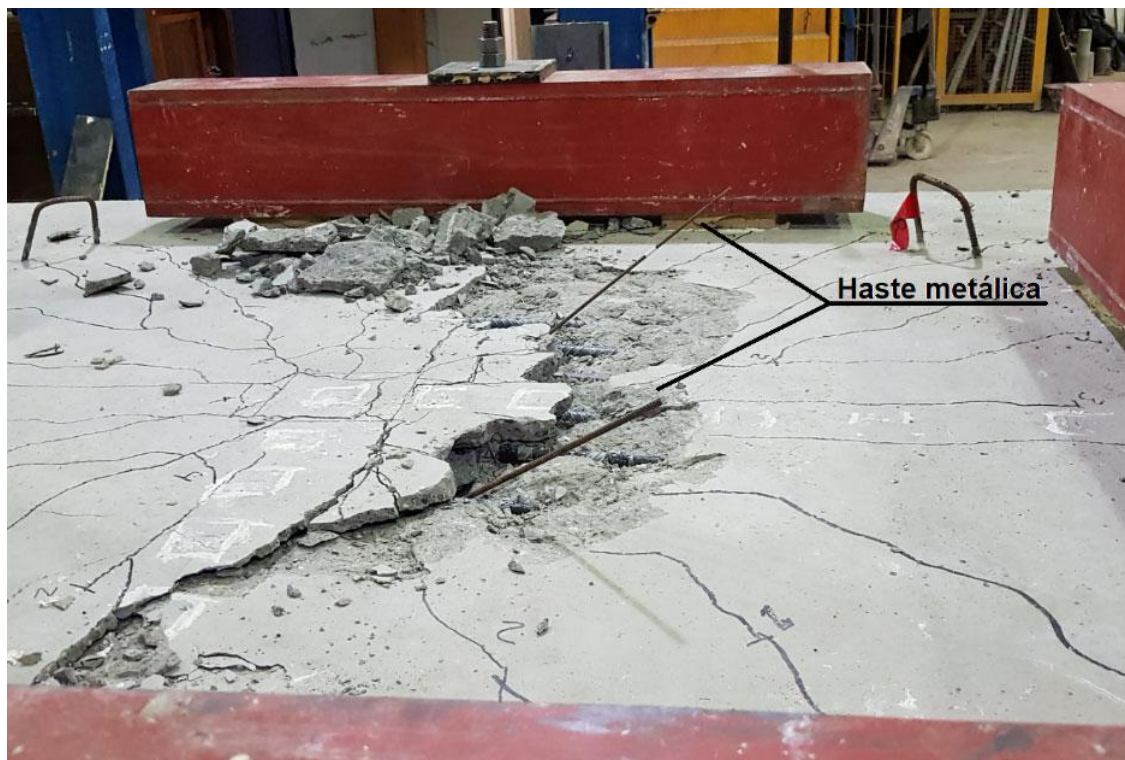
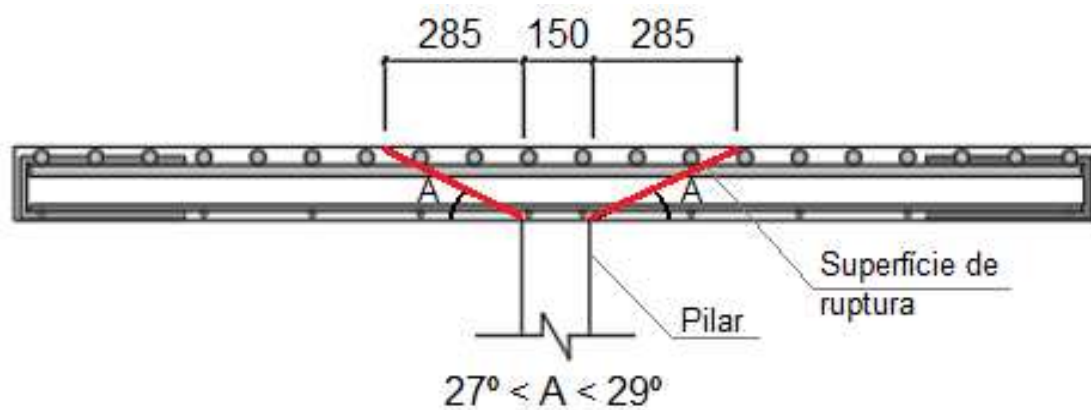


Figura 4.5: Medição aproximada do ângulo da superfície de ruptura sem armadura de cisalhamento – Laje LRC.

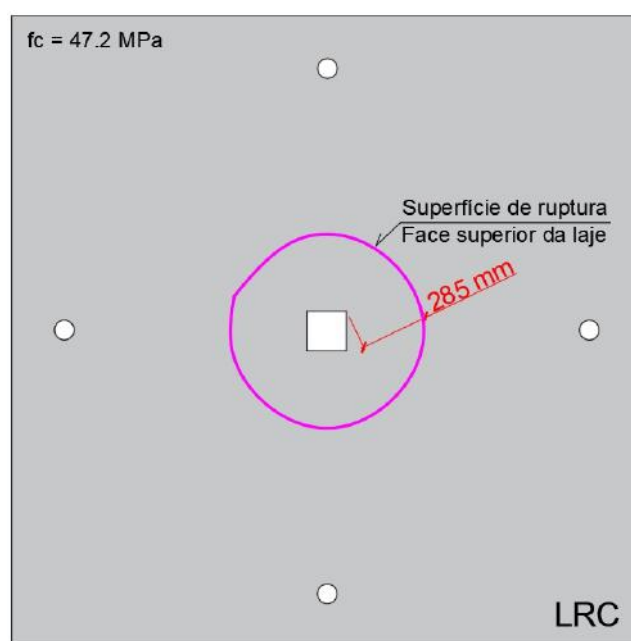


Figura 4.6: Medição aproximada do ângulo da superfície de ruptura de laje com armadura de cisalhamento – Laje L50C.

Na laje sem armadura de cisalhamento LRC, a inclinação da superfície de ruptura apresentou ângulo de aproximadamente 28° semelhante ao descrito por Gomes (1991), que constatou em suas pesquisas que essa inclinação é de aproximadamente 25° . Já as lajes com armadura de cisalhamento, L50C, L50F, L63C e L63F, apresentaram pequena variação da inclinação da superfície de ruptura, variando entre 30° a 33° e apresentaram uma superfície de ruptura iniciando na face inferior à laje, adjacente ao pilar e se desenvolvendo cruzando as armaduras de cisalhamento até chegar na face superior da laje. O desenvolvimento de cada linha de ruptura está esquematizado nas figuras 4.7 a 4.11 e pode ser verificado nas imagens das Figuras 4.12 a 4.16.



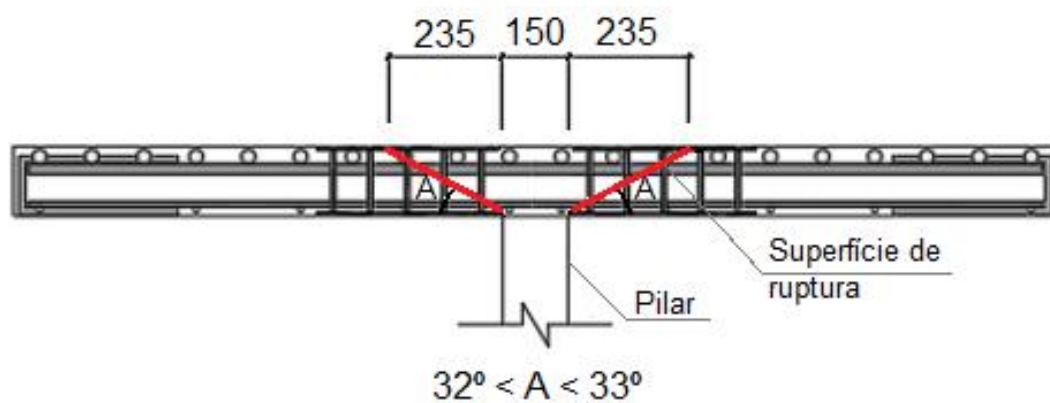
a) Vista em elevação



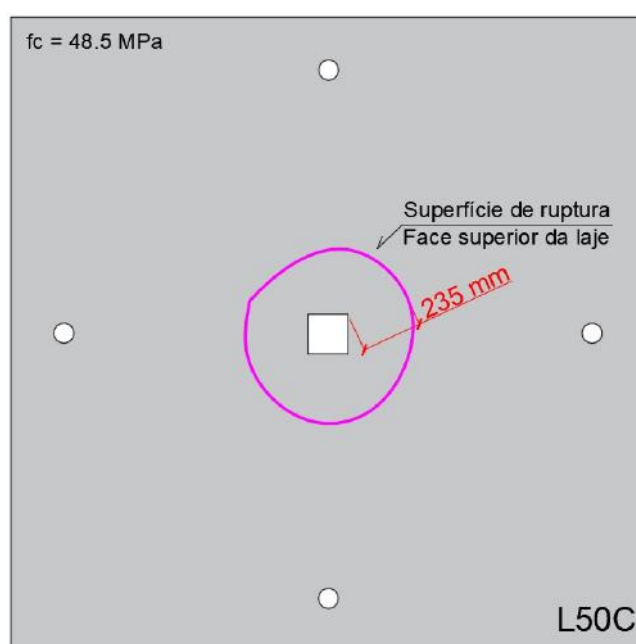
b) Vista superior

$d = 103 \text{ mm}$ $f_c = 47,2 \text{ MPa}$ $P_u = 320,0 \text{ kN}$

Figura 4.7: Esquema da superfície de ruptura da laje LRC



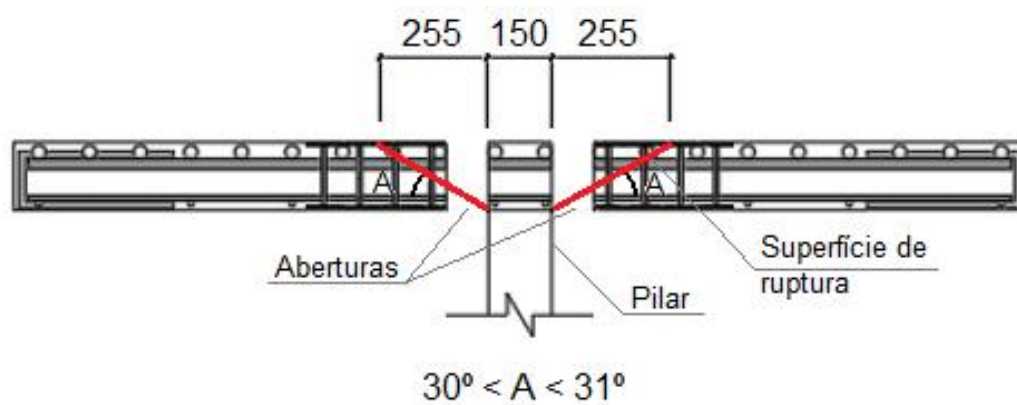
a) Vista em elevação



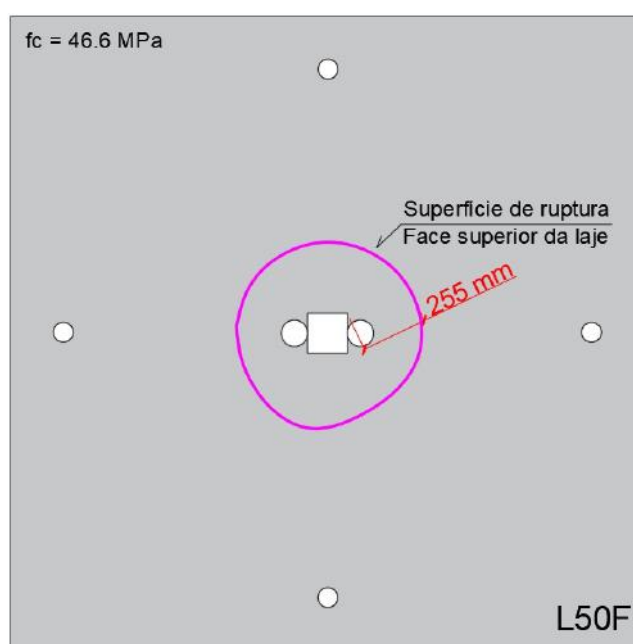
b) Vista superior

$d = 106 \text{ mm}$ $f_c = 48,5 \text{ MPa}$ $P_u = 518,0 \text{ kN}$

Figura 4.8: Esquema da superfície de ruptura da laje L50C



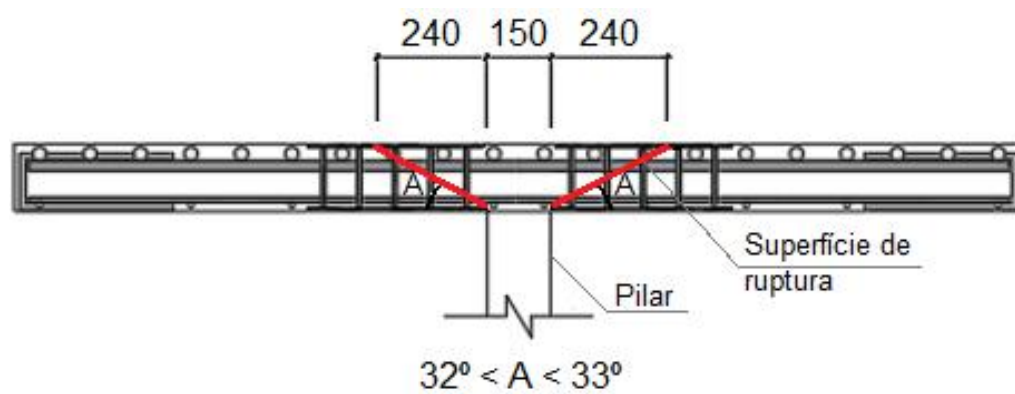
a) Vista em elevação



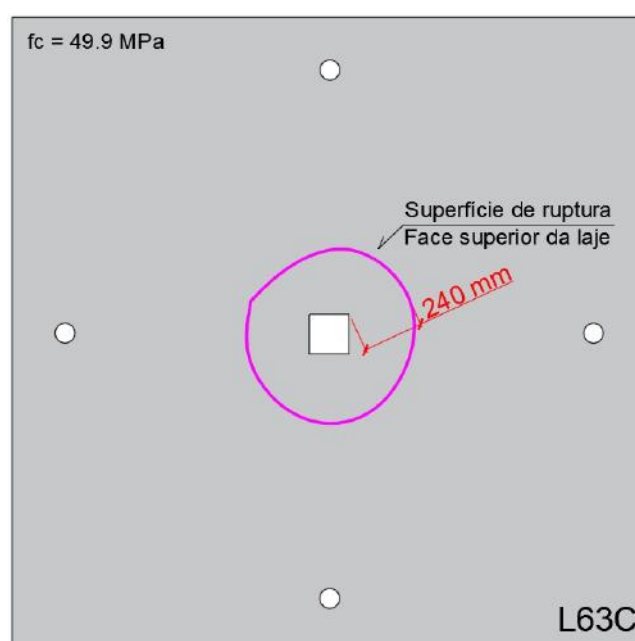
b) Vista superior

$d = 99 \text{ mm}$ $f_c = 46,6 \text{ MPa}$ $P_u = 402,0 \text{ kN}$

Figura 4.9: Esquema da superfície de ruptura da laje L50F



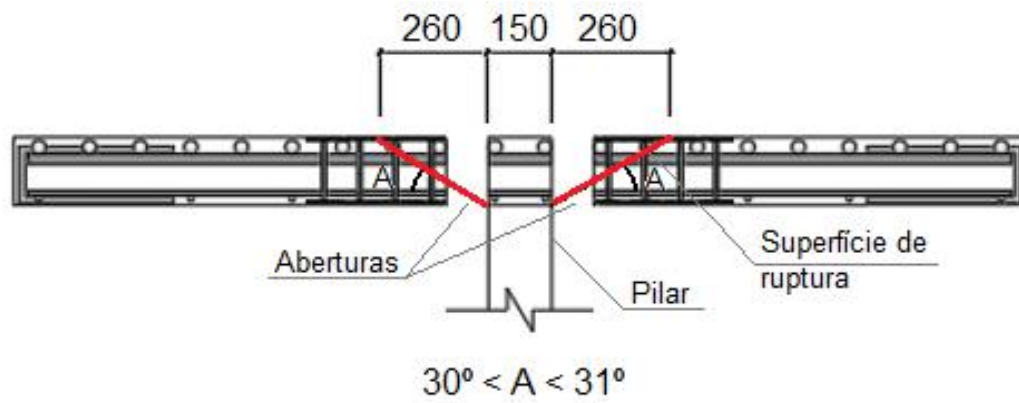
a) Vista em elevação



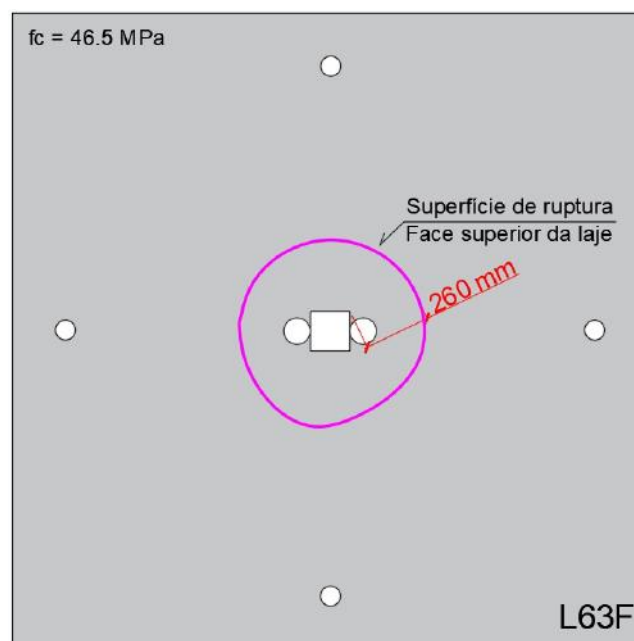
b) Vista superior

$d = 109 \text{ mm}$ $f_c = 49,9 \text{ MPa}$ $P_u = 551,0 \text{ kN}$

Figura 4.10: Esquema da superfície de ruptura da laje L63C



a) Vista em elevação



b) Vista superior

$d = 113 \text{ mm}$ $f_c = 46,5 \text{ MPa}$ $P_u = 396,0 \text{ kN}$

Figura 4.11: Esquema da superfície de ruptura da laje L63F



Figura 4.12: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje LRC



Figura 4.13: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L50C



Figura 4.14: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L50F



Figura 4.15: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L63C



Figura 4.16: Fissuração e aspectos gerais após ruptura da laje L63F

4.4 DESLOCAMENTO VERTICAL

Os deslocamentos verticais foram monitorados por 14 LVDT's em direções perpendiculares entre si e centralizados com relação à laje no quadrante 01 (13 LVDT's) e no quadrante 02 (01 LVDT) como mostrado nas figuras 3.21 e 3.22. Sobre cada tirante foi instalado 01 LVDT com o intuito de verificar o seu deslocamento. Para obter o deslocamento com relação a posição original da laje,

subtraiu-se a parcela do deslocamento médio dos tirantes do deslocamento de cada LVDT.

As Figuras 4.17 a 4.21 apresentam os gráficos Carga x deslocamento para todos os LVDT's de cada laje analisada.

Na laje LRC é possível observar os maiores deslocamentos localizados na região central, com LVDT 2 apresentando o maior deslocamento, os LVDT's 1, 8 e 14, mais afastados do centro, apresentaram deslocamentos bem menores que os demais, com cerca de 25% do deslocamento máximo do LVDT 2 no carregamento último, esse comportamento fica evidenciado pelo distanciamento do grupo de curvas na Figura 4.17.

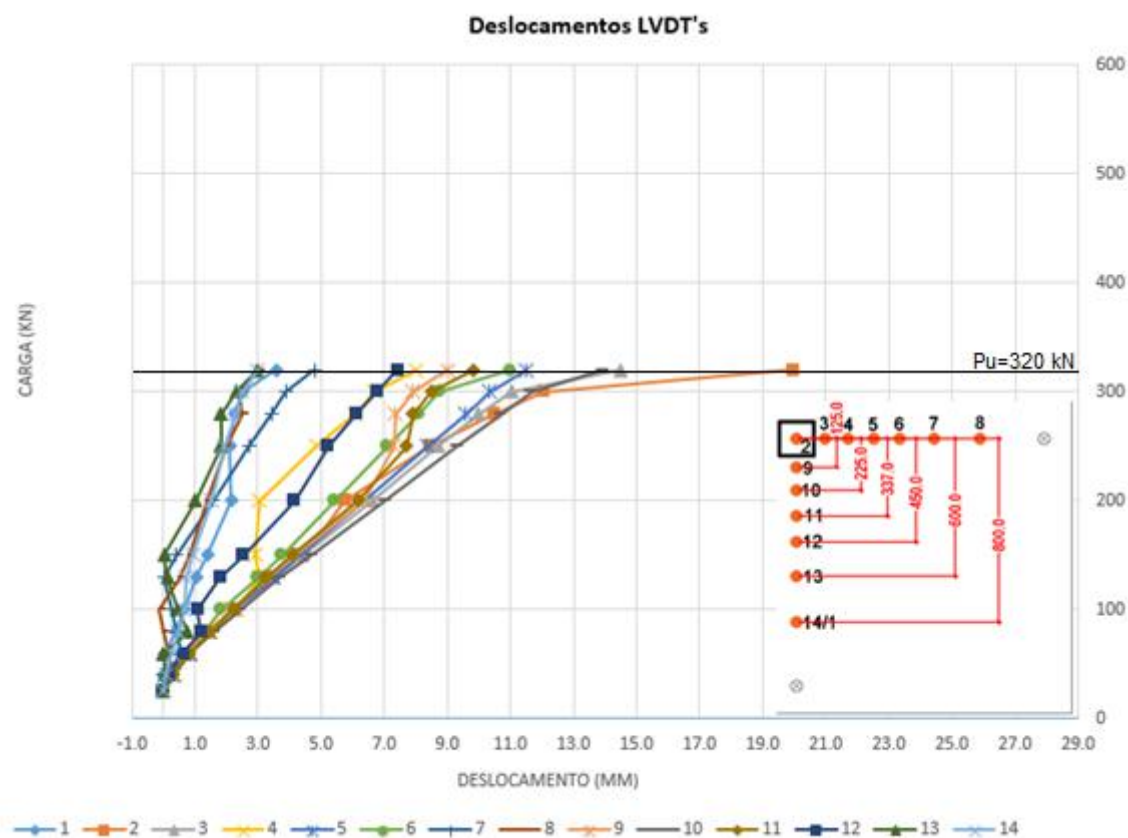


Figura 4.17: Deslocamento vertical da laje LRC

O mesmo comportamento descrito da LRC pode ser observado nas demais lajes, porém o distanciamento entre os grupos de curvas não se mostrou acentuado, mostrando uma maior distribuição da carga aplicada na região central. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram os deslocamentos das lajes L50C e L50F e nas Figuras 4.20 e 4.21 mostram os deslocamentos das lajes L63C e L63F. É possível identificar a simetria do comportamento dos pares de LVDT's equidistantes do centro da laje.

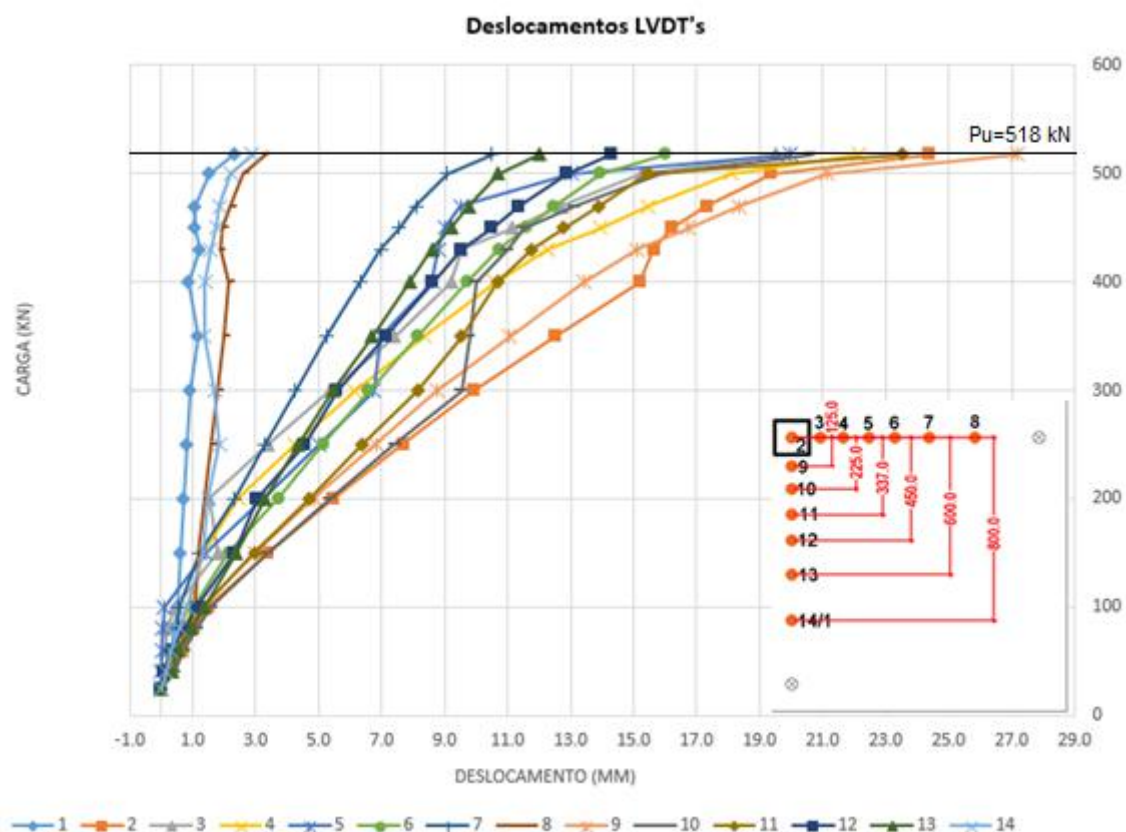


Figura 4.18: Deslocamento vertical da laje L50C

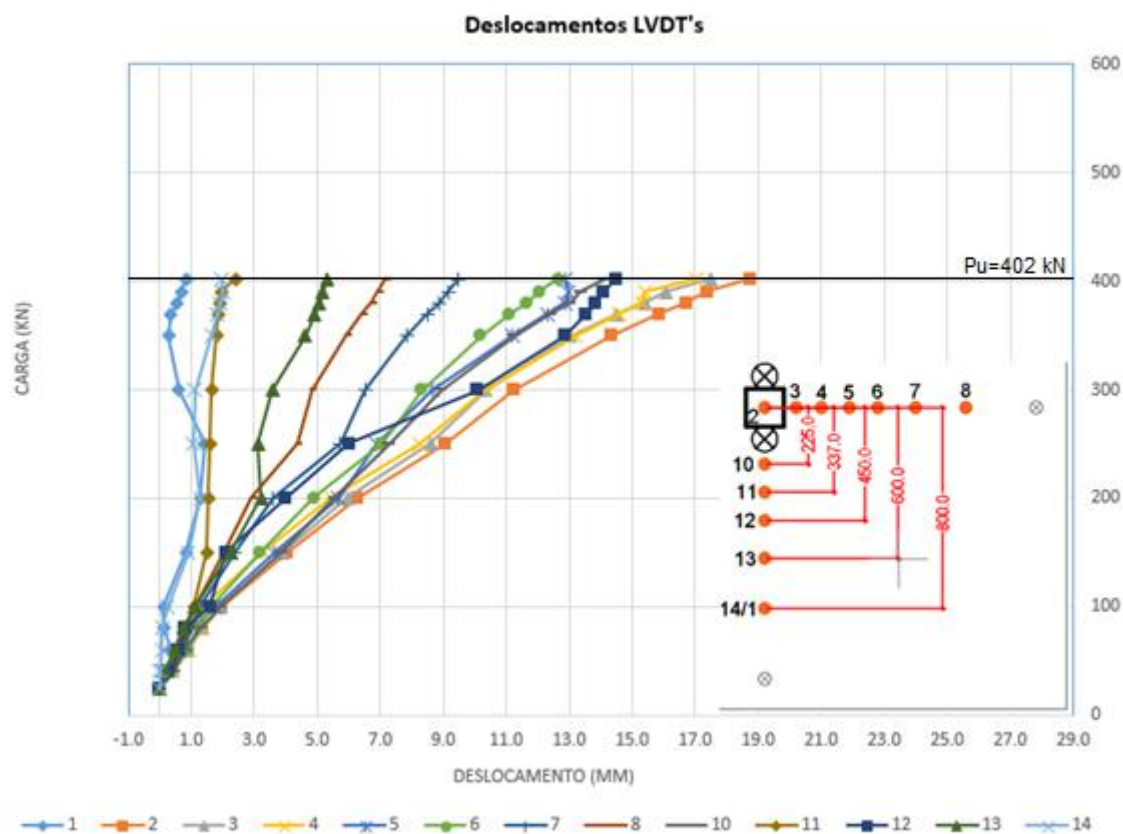


Figura 4.19: Deslocamento vertical da laje L50F

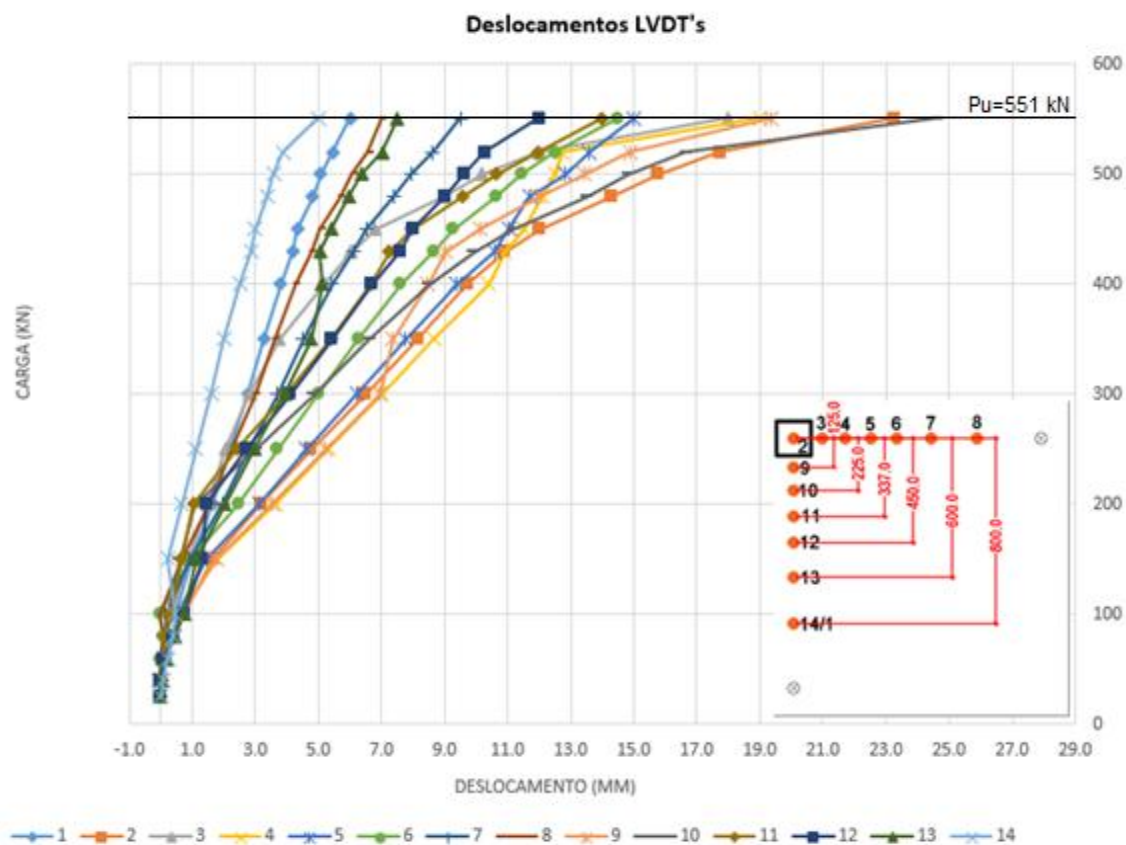


Figura 4.20: Deslocamento vertical da laje L63C

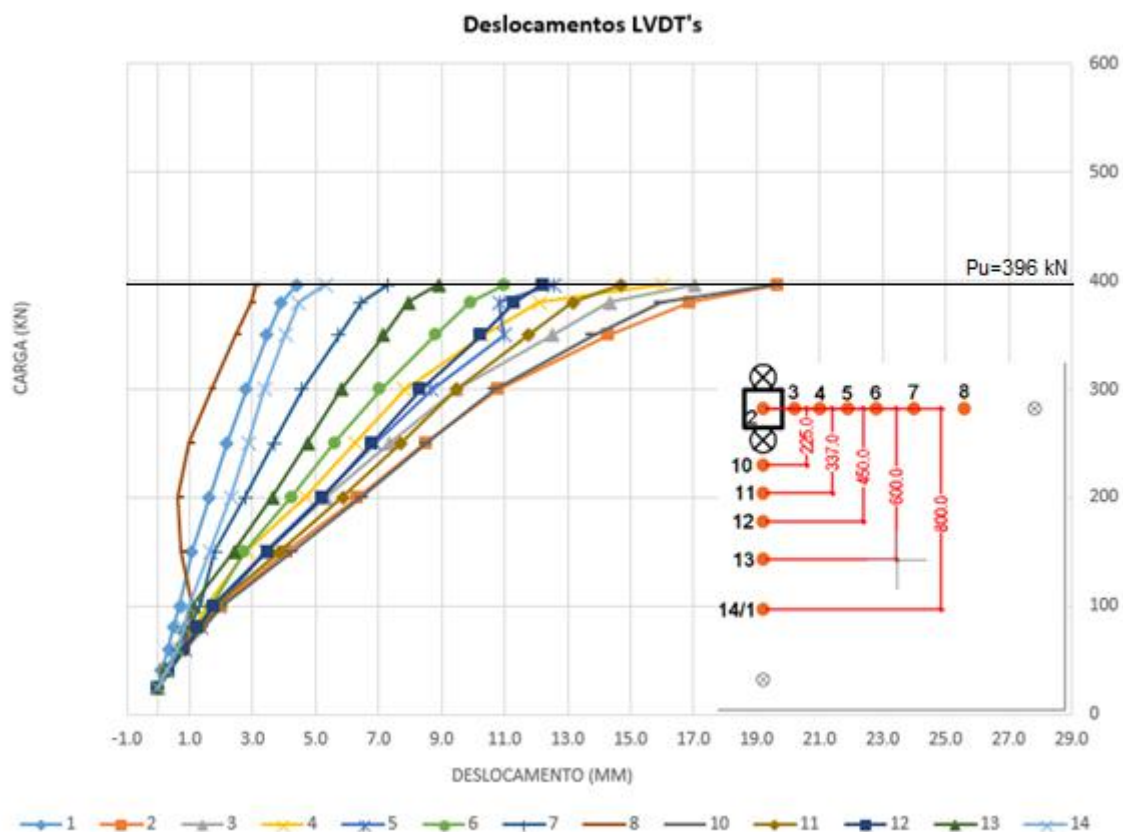


Figura 4.21: Deslocamento vertical da laje L63F

As lajes com aberturas (L50F e L63F) apresentam maiores deslocamentos para uma mesma carga aplicada quando comparada as lajes sem aberturas (L50C e L63C). Isso mostra uma perda de rigidez quando inserimos aberturas nas lajes.

Em todas as lajes, o deslocamento máximo foi obtido na região central (LVDT 2) diminuindo gradativamente conforme se aproximava das bordas, foi possível observar uma certa simetria no deslocamento nos eixos perpendiculares equidistantes.

As Figuras 4.22 a 4.26 mostram no plano, os deslocamentos verticais obtidos em cada LVDT. As ordenadas indicam os deslocamentos verticais de cada ponto medido através dos LVDT's. Já as abcissas indicam as distâncias dos LVDT's em relação ao eixo da laje. O LVDT 02 (posição 0,0) é tomado como o eixo da laje. As

distâncias positivas indicam os LVDT's de 09 a 14 e as distâncias negativas indicam os LVDT's de 03 a 08.

Todas as lajes apresentaram comportamento semelhante com relação a simetria do deslocamento.

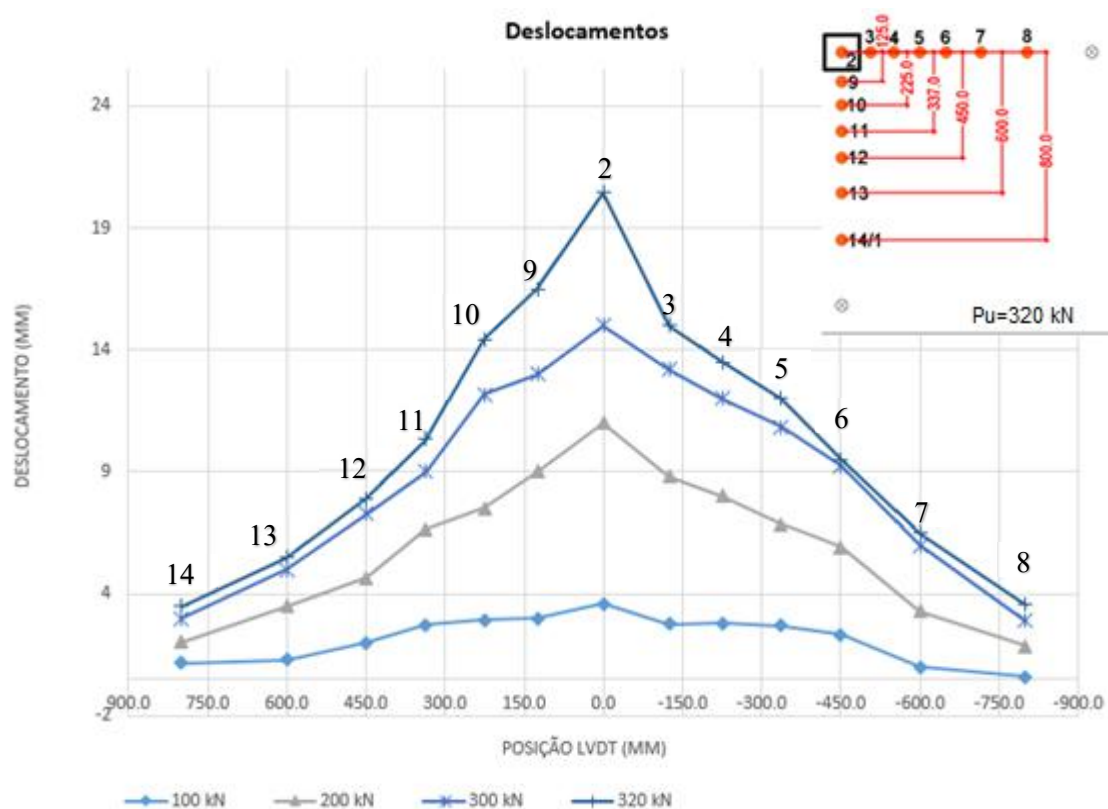


Figura 4.22: Deslocamento vertical da laje LRC

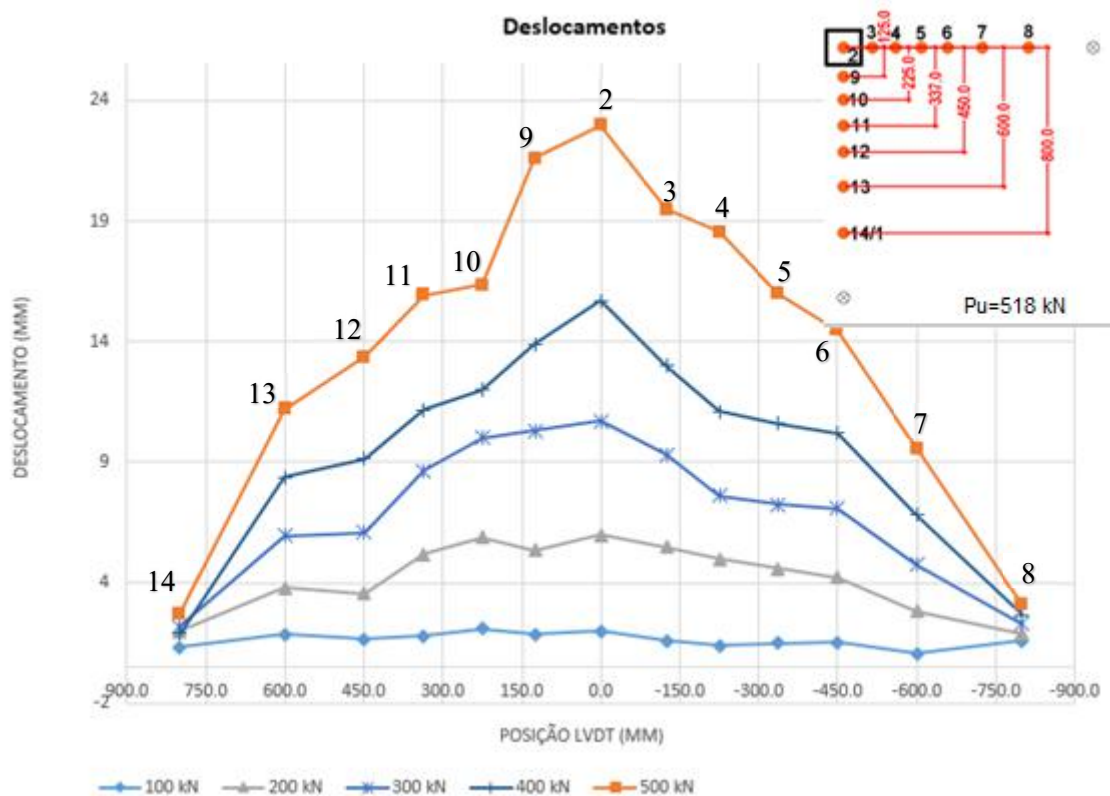


Figura 4.23: Deslocamento vertical da laje L50C

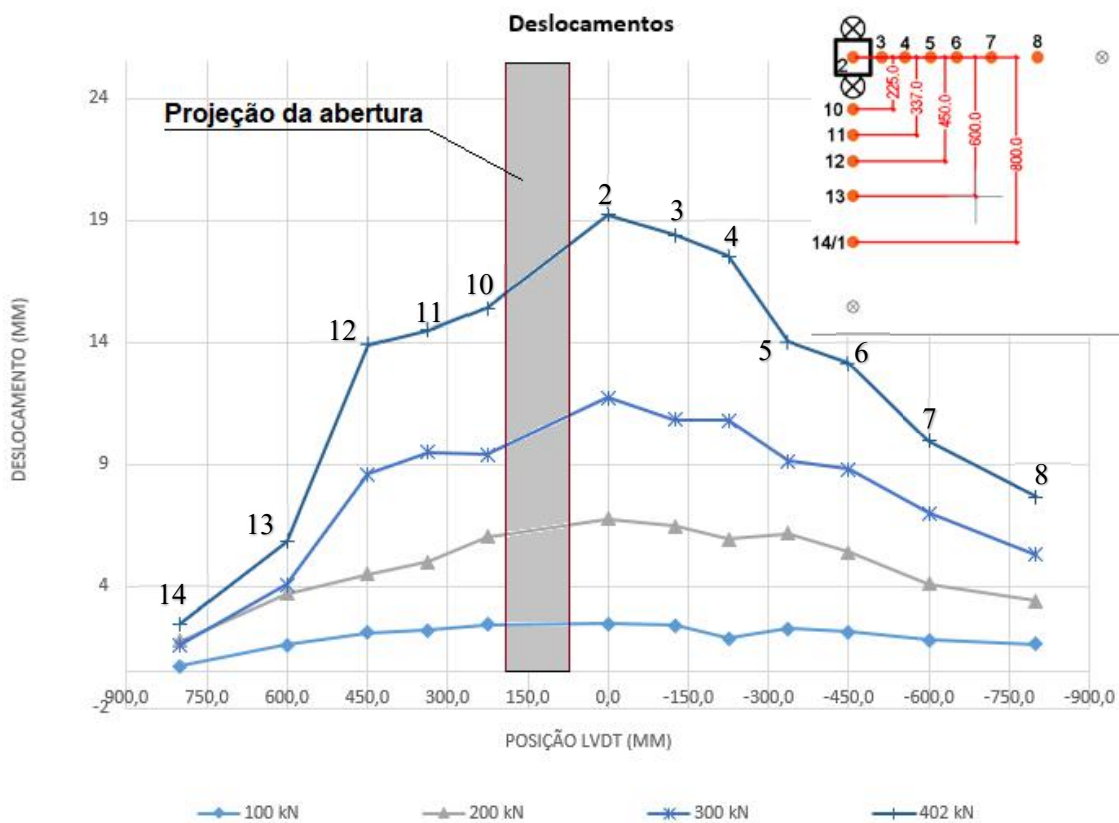


Figura 4.24: Deslocamento vertical da laje L50F

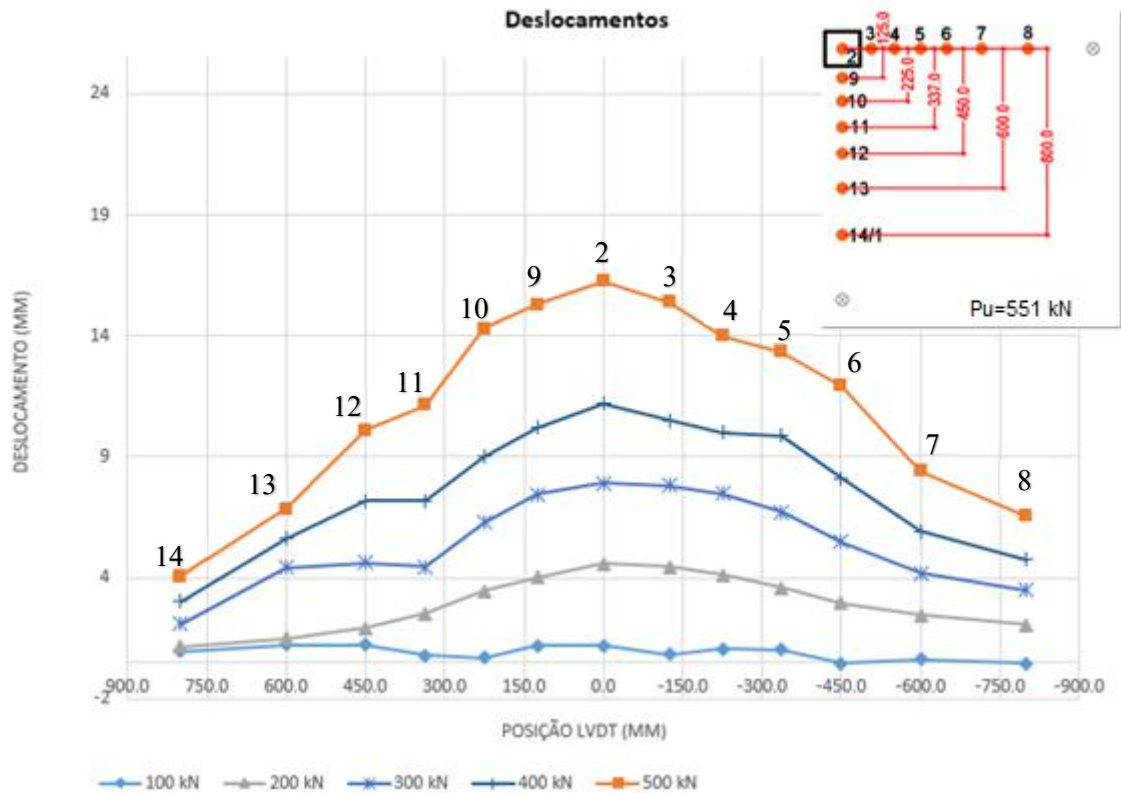


Figura 4.25: Deslocamento vertical da laje L63C

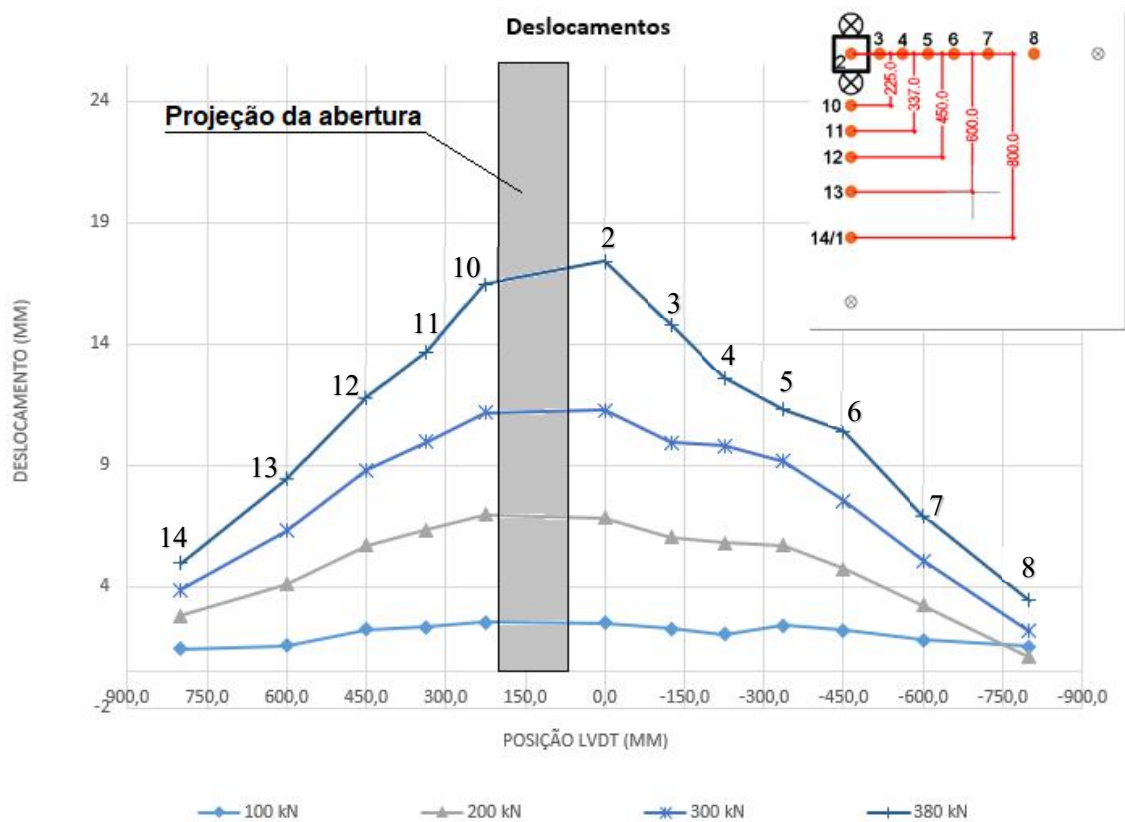


Figura 4.26: Deslocamento vertical da laje L63F

4.5 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DAS ARMADURAS DE FLEXÃO

Em todas as lajes os extensômetros foram posicionados em duas direções perpendiculares entre si em apenas um quadrante, cada extensômetro possuía o seu equivalente na direção oposta.

Todos os extensômetros das barras de flexão tiveram comportamento semelhante ao seu par equivalente com pequenas variações, as deformações maiores foram obtidas na região central diminuindo linearmente conforme se distanciava da região central.

As deformações dos extensômetros da laje LRC, apesar de não atingirem a deformação de escoamento, mostram a tendência para tal comportamento (Figura 4.28), o que é evidenciado pela horizontalidade da curva, também pode-se observar um distanciamento dessas curvas com relação as demais, indicando a alta concentração de carga nessa região do pilar.

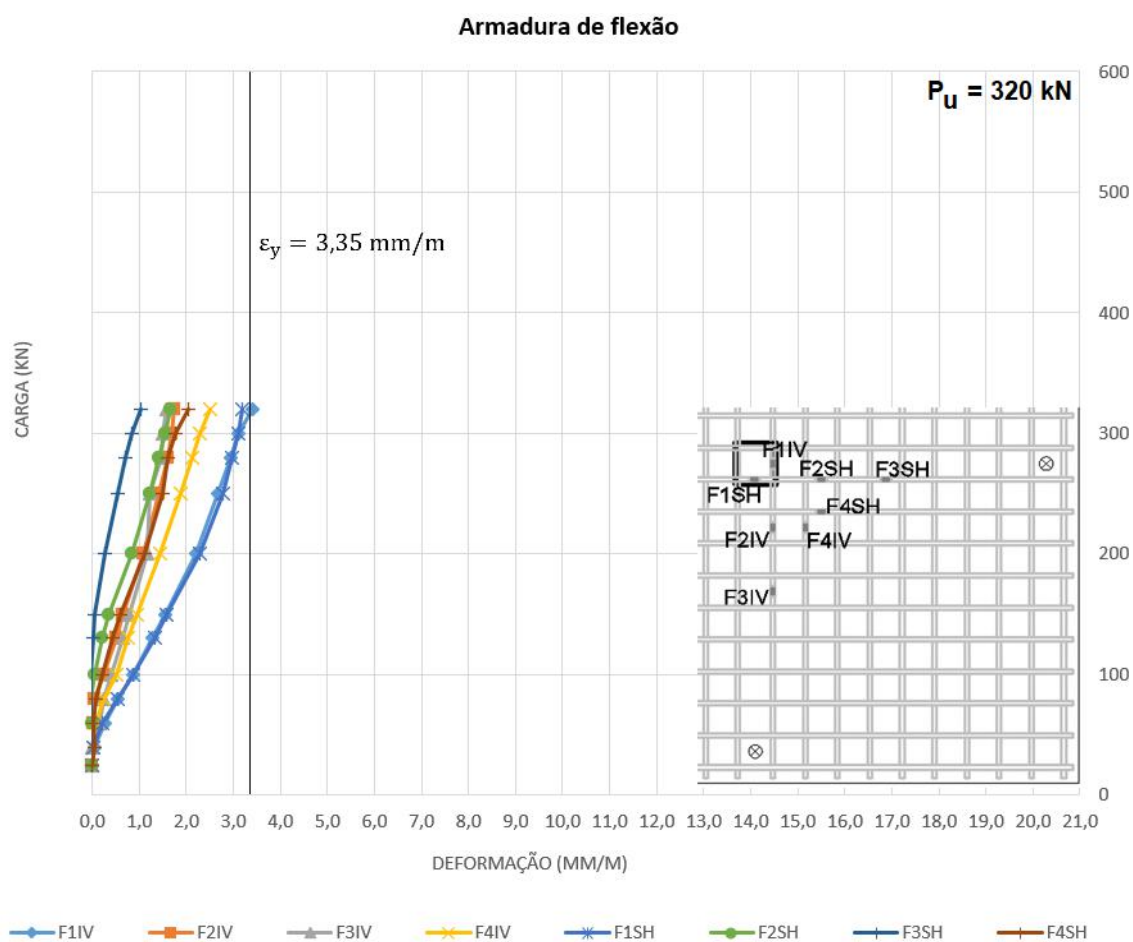


Figura 4.27: Deformação específica na armadura de flexão – LRC

As Figuras 4.29 e 4.31 apresentam as deformações das armaduras de flexão das lajes L50C e L63C, os extensômetros nas armaduras ortogonais mais internas (F1SH e F1IV) atingiram a deformação característica de escoamento com aproximadamente 52% da carga de ruptura para a laje L50C e 71% da carga de ruptura para a laje L63C. Os demais extensômetros mediram deformações muito próximas ao escoamento com cargas próximas à ruptura. Esse fato é explicado pelo início de horizontalidade das curvas no gráfico, que é um indicativo de tendência ao escoamento.

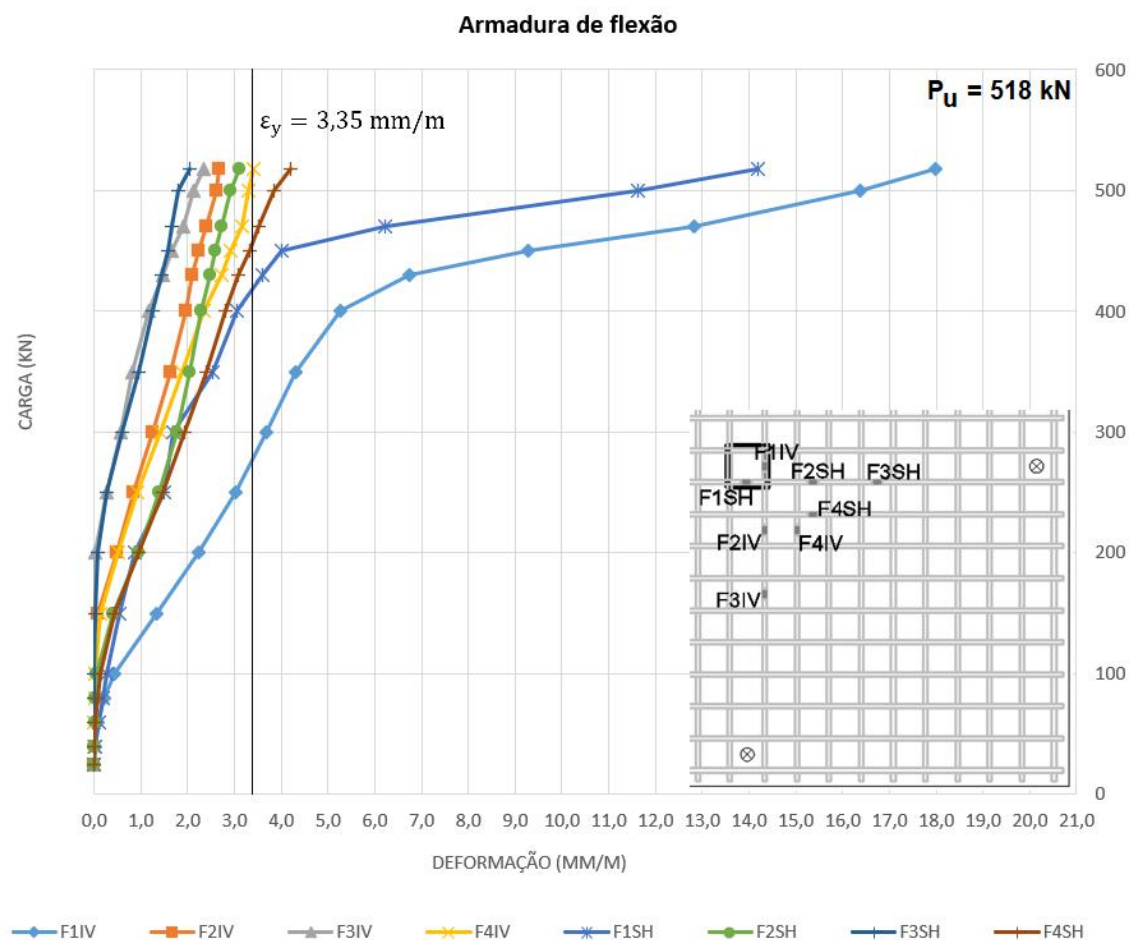


Figura 4.28: Deformação específica na armadura de flexão – L50C

Já as Figura 4.30 e 4.32 apresentam as deformações das armaduras de flexão das lajes L50F e L63F, os extensômetros nas armaduras ortogonais e mais internas (F1SH e F1IV) atingiram a deformação característica de escoamento com aproximadamente 83% da carga de ruptura para a laje L50F e 75% da carga de ruptura para a laje L63F. Os demais extensômetros mediram deformações muito próximas ao escoamento com cargas próximas à ruptura. Esse fato é explicado pelo início de horizontalidade das curvas no gráfico, que é um indicativo de tendência ao escoamento.

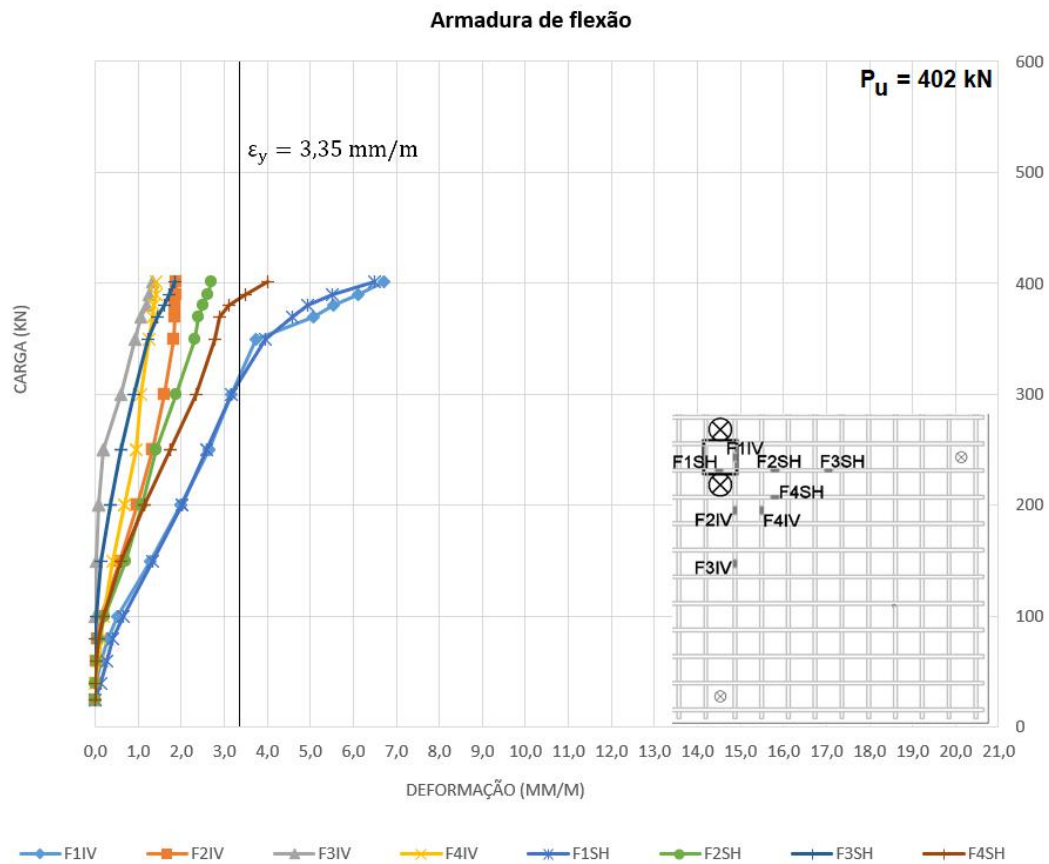


Figura 4.29: Deformação específica na armadura de flexão – L50F

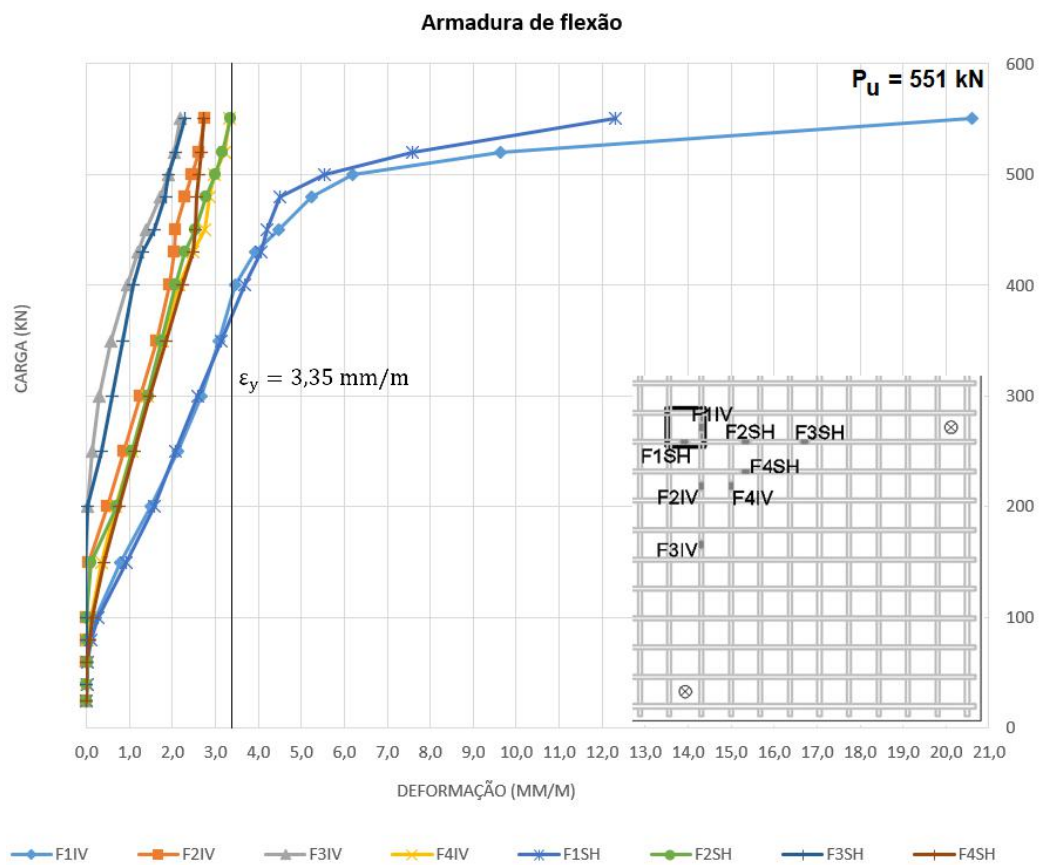


Figura 4.30: Deformação específica na armadura de flexão – L63C

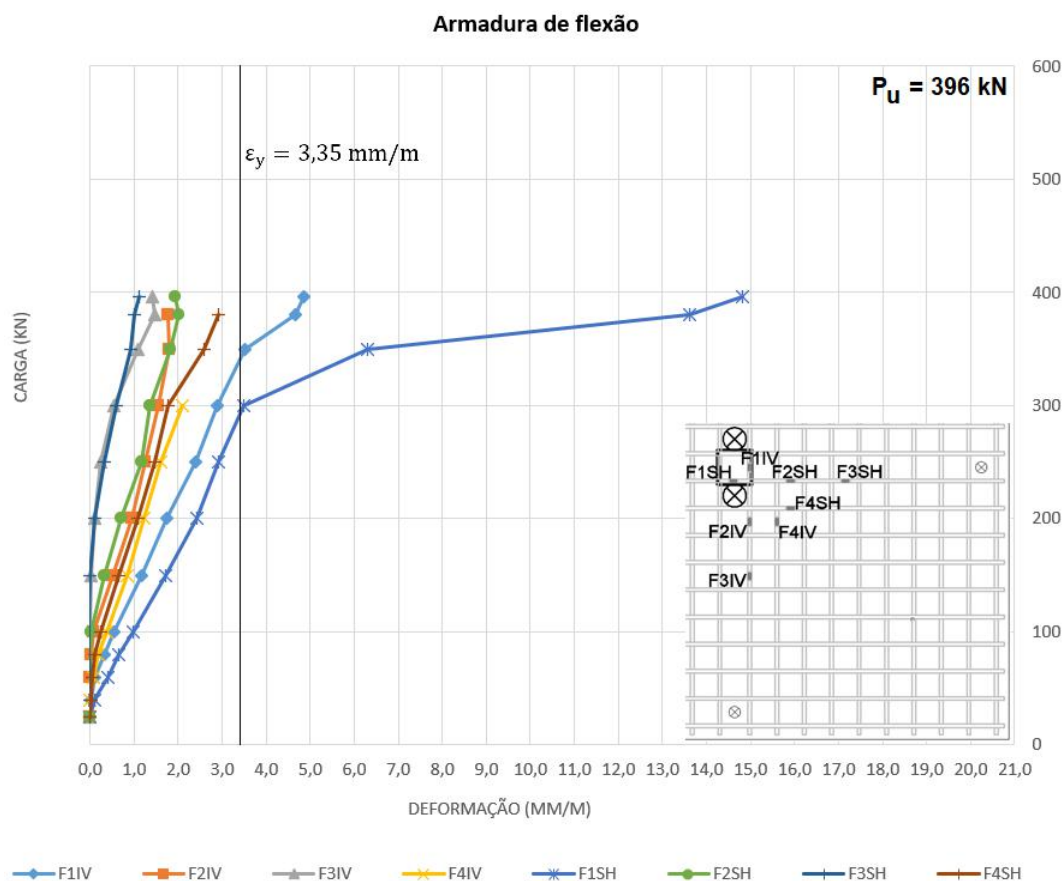


Figura 4.31: Deformação específica na armadura de flexão – L63F

4.6 DEFORMAÇÃO NA ARMADURA DE CISALHAMENTO

Em todas as lajes, foram instrumentadas 4 camadas de armadura de cisalhamento, ficando a camada 5 (última camada) sem instrumentação. Entre as linhas principais de armadura de cisalhamento (com 5 camadas), foram posicionadas armaduras suplementares. Essas armaduras suplementares (adicionais) foram posicionadas apenas nas camadas 4 e 5. O objetivo dessas armaduras suplementares é não permitir que o espaçamento entre as armaduras de cisalhamento na mesma camada não ultrapasse duas vezes a altura útil da laje. A primeira armadura suplementar (localizada na camada 4) foi instrumentada.

Os extensômetros foram posicionados em direções distintas entre si e em apenas um quadrante. Cada extensômetro possuía o seu equivalente na direção oposta.

As Figuras 4.33 a 4.36 apresentam as deformações das armaduras de cisalhamento das lajes L50C, L50F, L63C e L63F. É possível observar que as armaduras de cisalhamento nas camadas 2 e 3 apresentaram as maiores deformações. Estas deformações eram esperadas porque todas as lajes com armadura de cisalhamento romperam por punção interna (superfície de ruptura cruzando as armaduras de cisalhamento) cruzando as camadas 1, 2 e 3.

Outra importante observação é da importância das armaduras suplementares com o objetivo de limitar o espaçamento entre as linhas de cada camada. As armaduras suplementares instrumentadas mostraram deformações muito equivalentes às armaduras da mesma camada.

Em todas as lajes, as camadas 2 e 3 foram as que tiveram maior deformação, seguidas da camada 1 e por fim da camada 4 e suplementares instrumentadas.

As armaduras de cisalhamento situadas atrás das aberturas (lajes L50F e L63F), apresentaram deformações bem inferiores quando comparadas as deformações das mesmas camadas das demais armaduras, indicando baixa influência dessas armaduras atrás das aberturas.

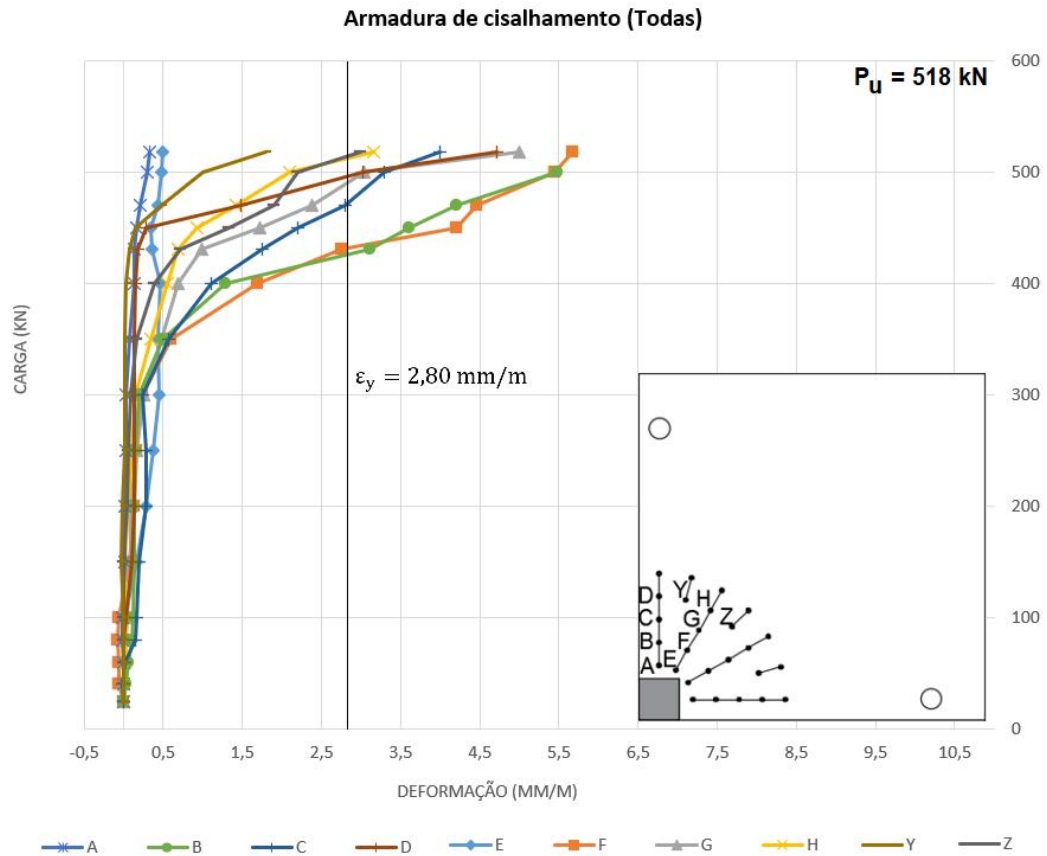


Figura 4.32: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L50C

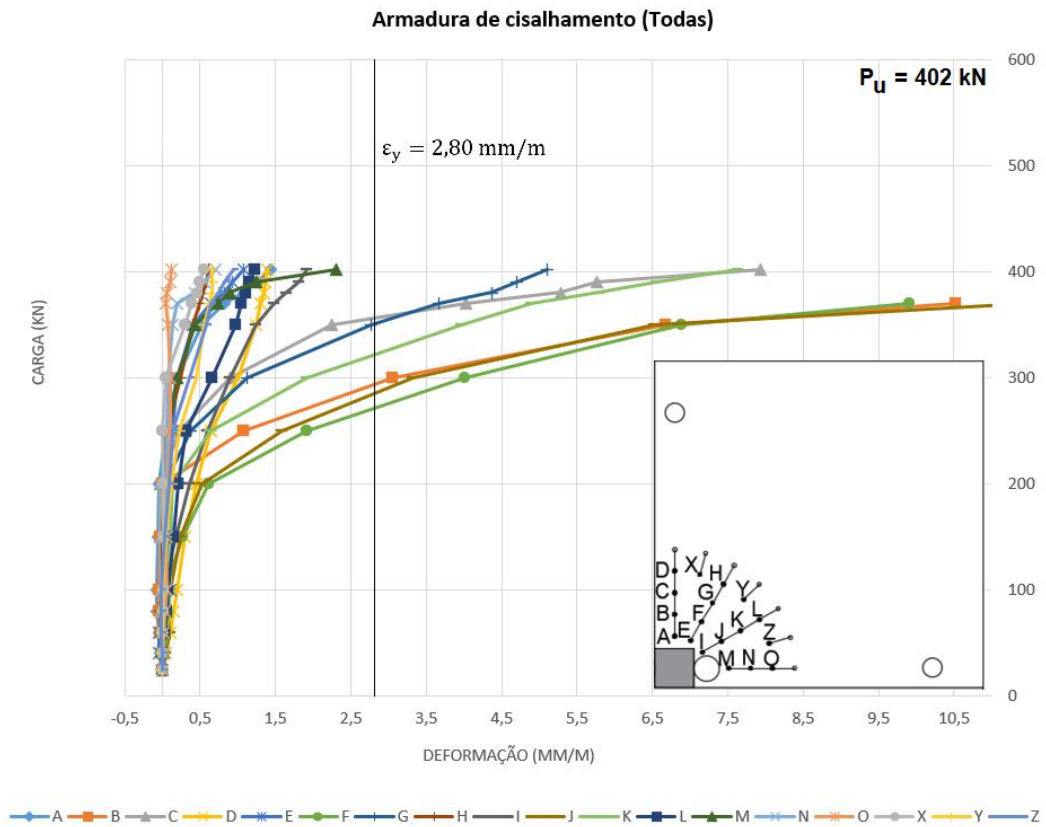


Figura 4.33: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L50F

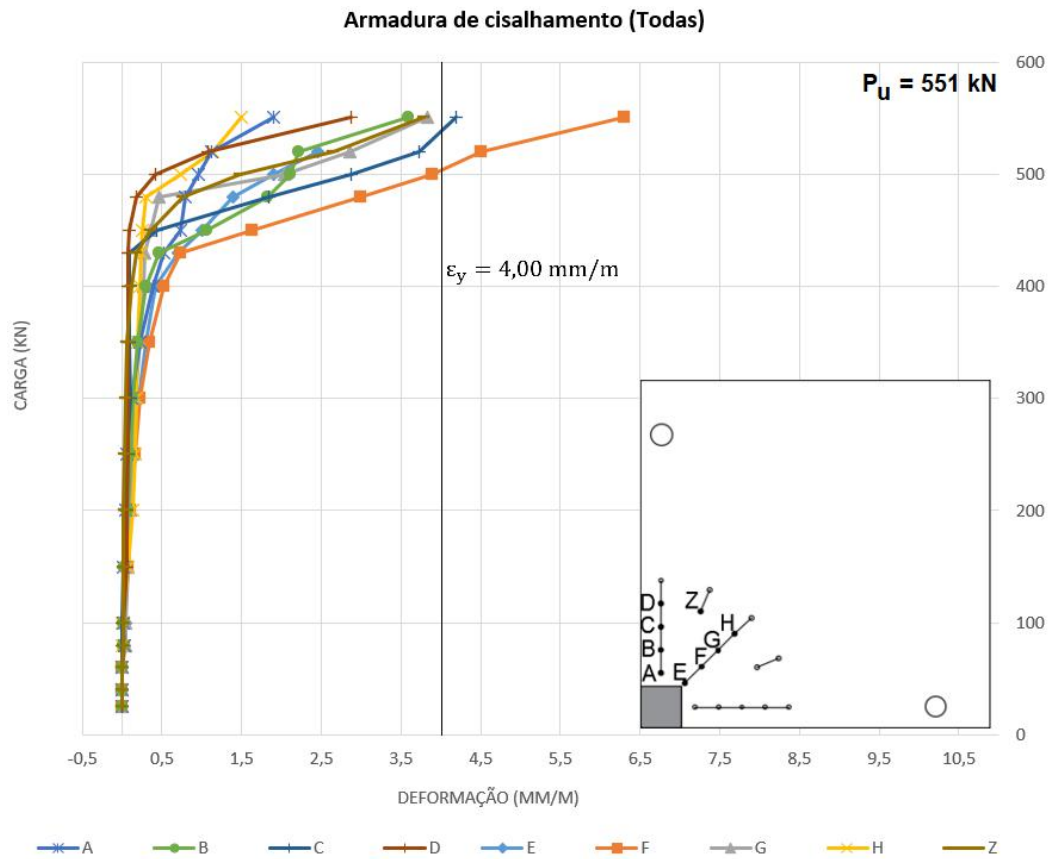


Figura 4.34: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L63C

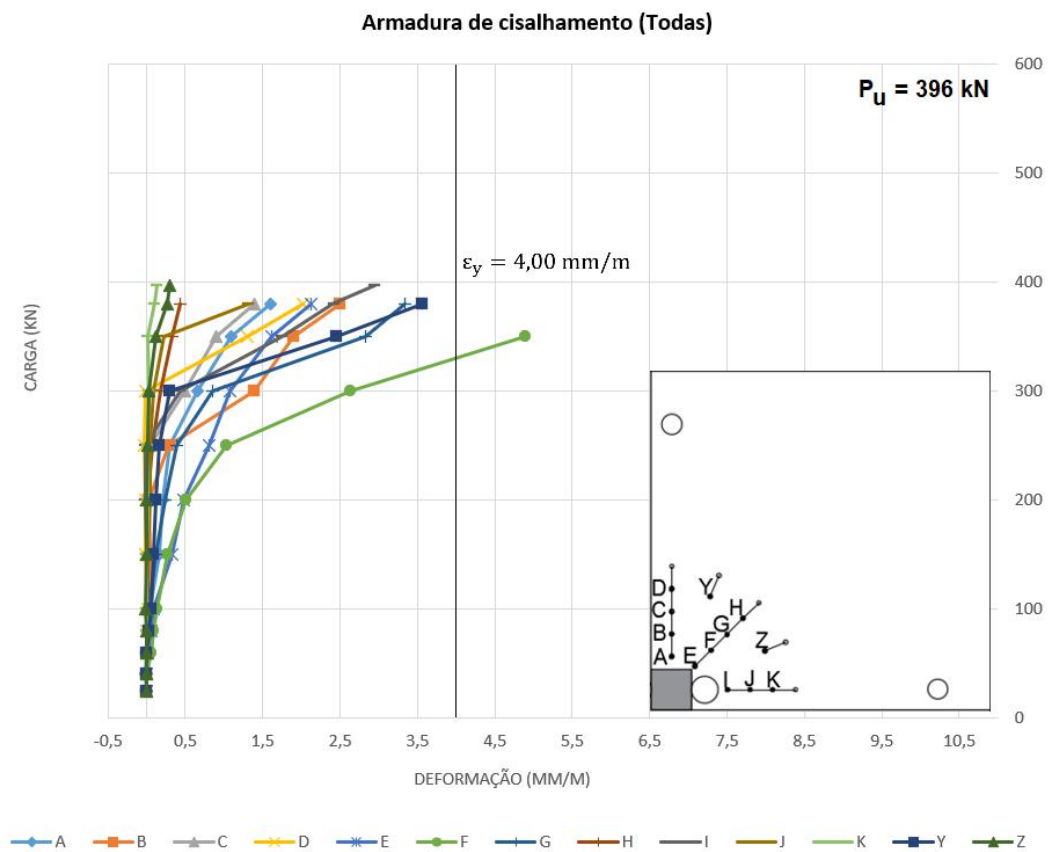


Figura 4.35: Deformação específica na armadura de cisalhamento – L63F

4.7 DEFORMAÇÃO NO CONCRETO

Foram instalados extensômetros nas posições radial e circunferencial em todas as lajes. Na laje sem armadura de cisalhamento (LRC, indicada na Figura 4.37), os extensômetros circunferenciais 1 e 3 apresentaram as maiores deformações.

Nas lajes com armadura de cisalhamento e sem aberturas (L50C e L63C, indicadas nas Figuras 4.38 e 4.40 respectivamente), os extensômetros circunferenciais 1 e 3 também apresentam as maiores deformações, porém já atingindo deformações características de esmagamento do concreto, ultrapassando o valor limite normativo da NBR 6118/2014, que é de 3,5 mm/m.

Já as lajes com armadura de cisalhamento e com aberturas (L50F e L63F, indicadas nas Figuras 4.39 e 4.41 respectivamente), os extensômetros circunferenciais 1 e 5 apresentam as maiores deformações, já atingindo deformações características de esmagamento do concreto mas não ultrapassando o valor limite normativo da NBR 6118/2014, que é de 3,5 mm/m. Ainda nas lajes com aberturas é importante observar que o extensômetro 3, localizado logo atrás da abertura, não teve deformação proporcional aos extensômetros 1 e 5. Este, teve deformações abaixo de seus intermediários (1 e 5) indicando pouca deformação do concreto nesta região.

Os extensômetros posicionados na direção radial apresentam as menores deformações sendo que em alguns casos o comportamento sugere uma pequena descompressão, que pode ser explicada pela abertura de fissuras nessas regiões e consequentemente um alívio das tensões de compressão atuantes.

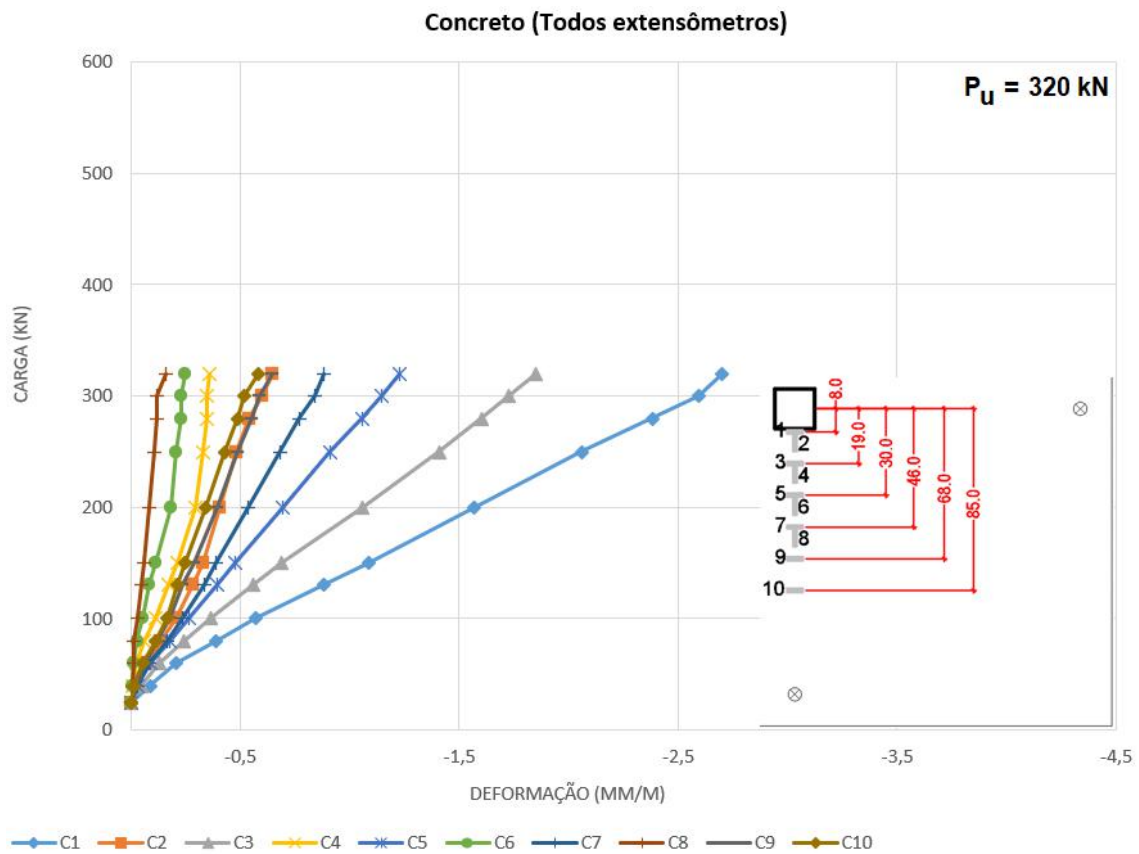


Figura 4.36: Deformação específica no concreto – LRC

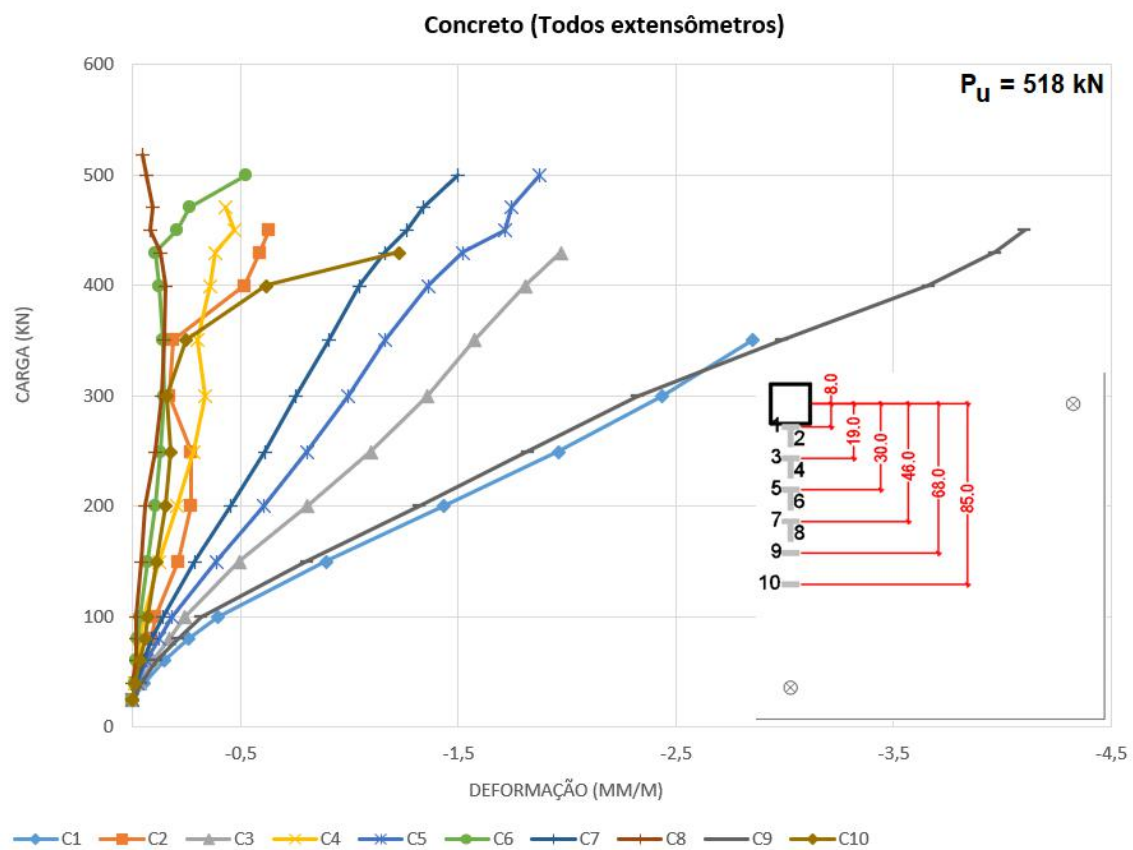


Figura 4.37: Deformação específica no concreto – L50C

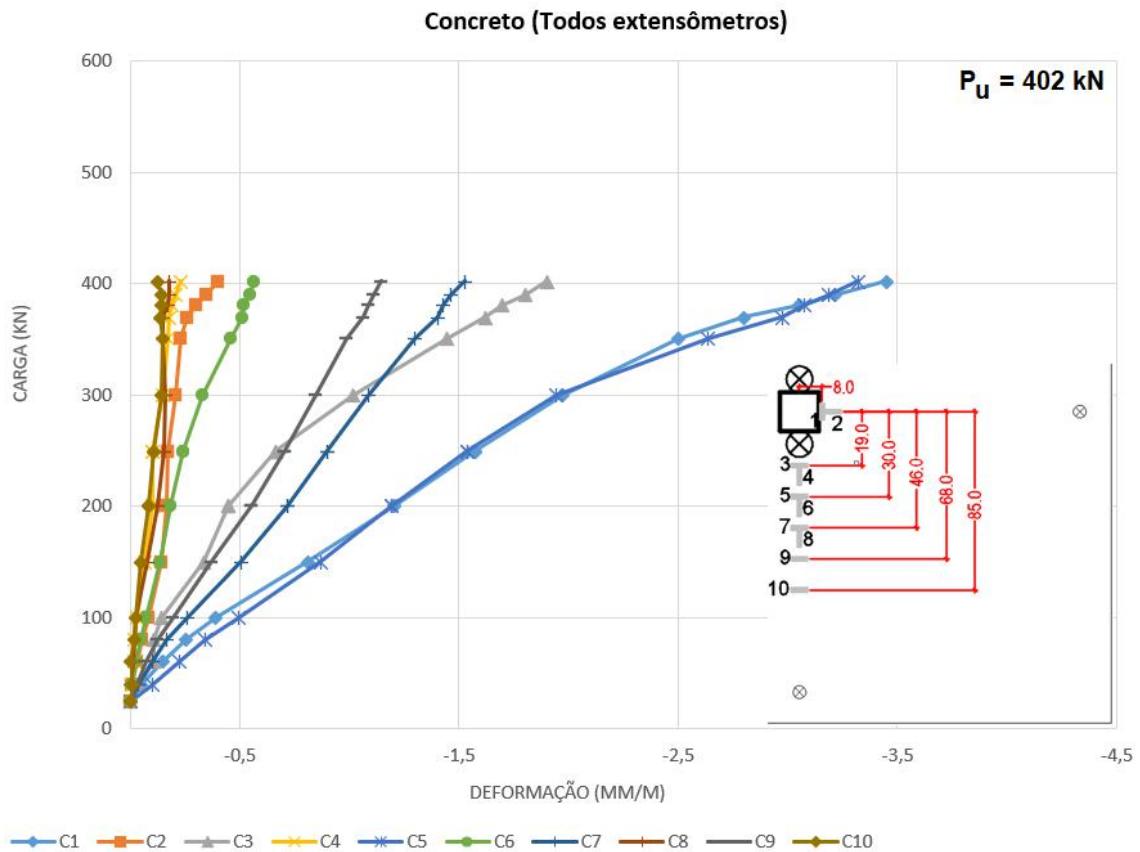


Figura 4.38: Deformação específica no concreto – L50F

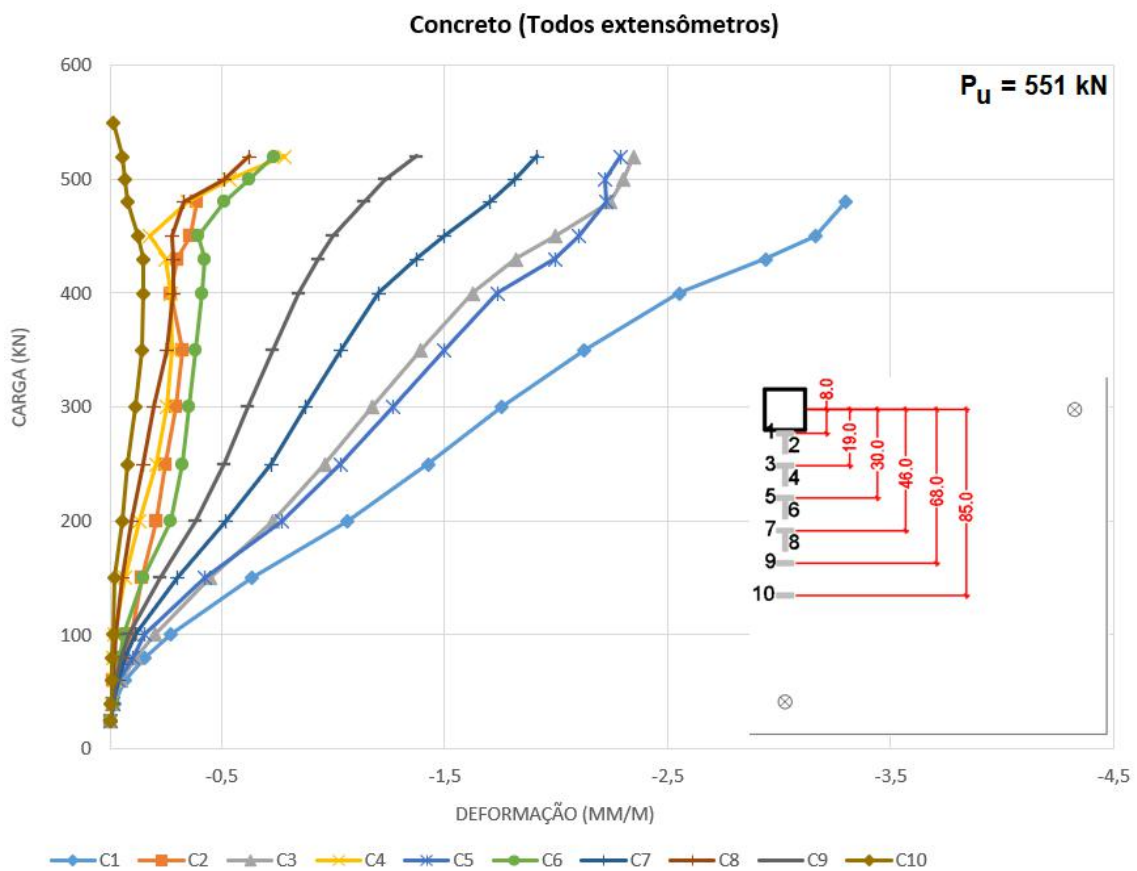


Figura 4.39: Deformação específica no concreto – L63C

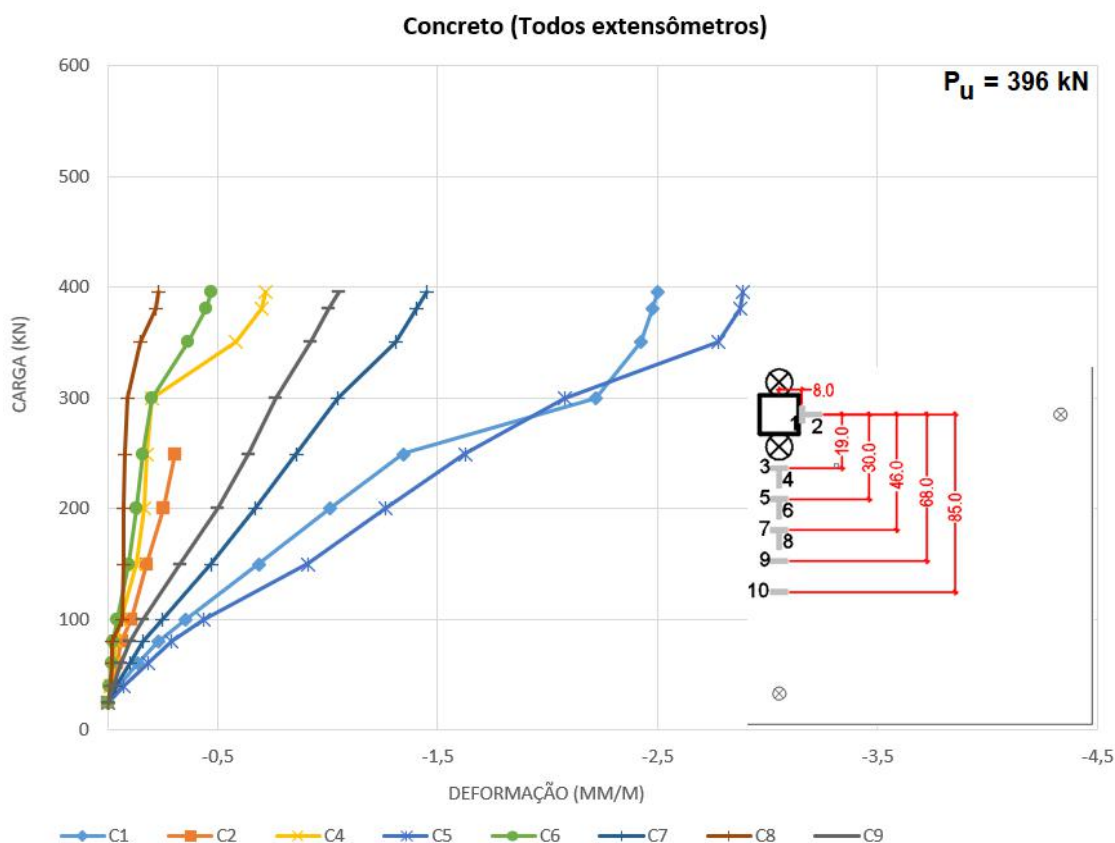


Figura 4.40: Deformação específica no concreto – L63F

4.8 FISSURAS

O monitoramento das fissuras radiais e circunferências na superfície da laje foi realizado avaliando grandes alterações no comportamento gráfico em tempo real, e posteriormente verificando visualmente o seu possível aparecimento, a carga na qual aparecimento da primeira fissura surgiu foi devidamente anotada e a cada intervalo de 2 passos de carga verificava-se novamente o surgimento ou propagação das fissuras, fossem elas radiais e ou circunferenciais.

As fissuras, visivelmente, surgiram na superfície superior da laje e se desenvolveram de forma semelhante em todas as lajes.

As fissuras radiais foram as primeiras a surgirem, em todas as lajes, ao redor do pilar e se propagaram em direção aos bordos da laje com o aumento do carregamento. Estas fissuras apareceram com uma carga de 80 kN para a laje sem

armadura de cisalhamento (LRC) e 100 kN para as lajes com armadura de cisalhamento (L50C, L50F, L63C e L63F). Após algumas etapas de carregamento, surgiram as fissuras circunferenciais, ligando as fissuras radiais existentes e circundando o pilar. Na laje LRC (sem armadura de cisalhamento), as fissuras circunferenciais apareceram com uma carga de 130 kN. Nas lajes com armadura de cisalhamento e com aberturas, estas fissuras surgiram entre as cargas de 100 kN para 150 kN. Nas lajes com armadura de cisalhamento e sem aberturas, estas fissuras surgiram entre as cargas de 150kN para 200kN.

Após a ruptura, as lajes apresentaram um desenvolvimento semelhante quanto às fissuras radiais e com alguma diferença em relação às fissuras circunferenciais. Estas características das fissuras desenvolvidas são mostradas com fotografias das lajes nas Figuras 4.42 a 4.47.

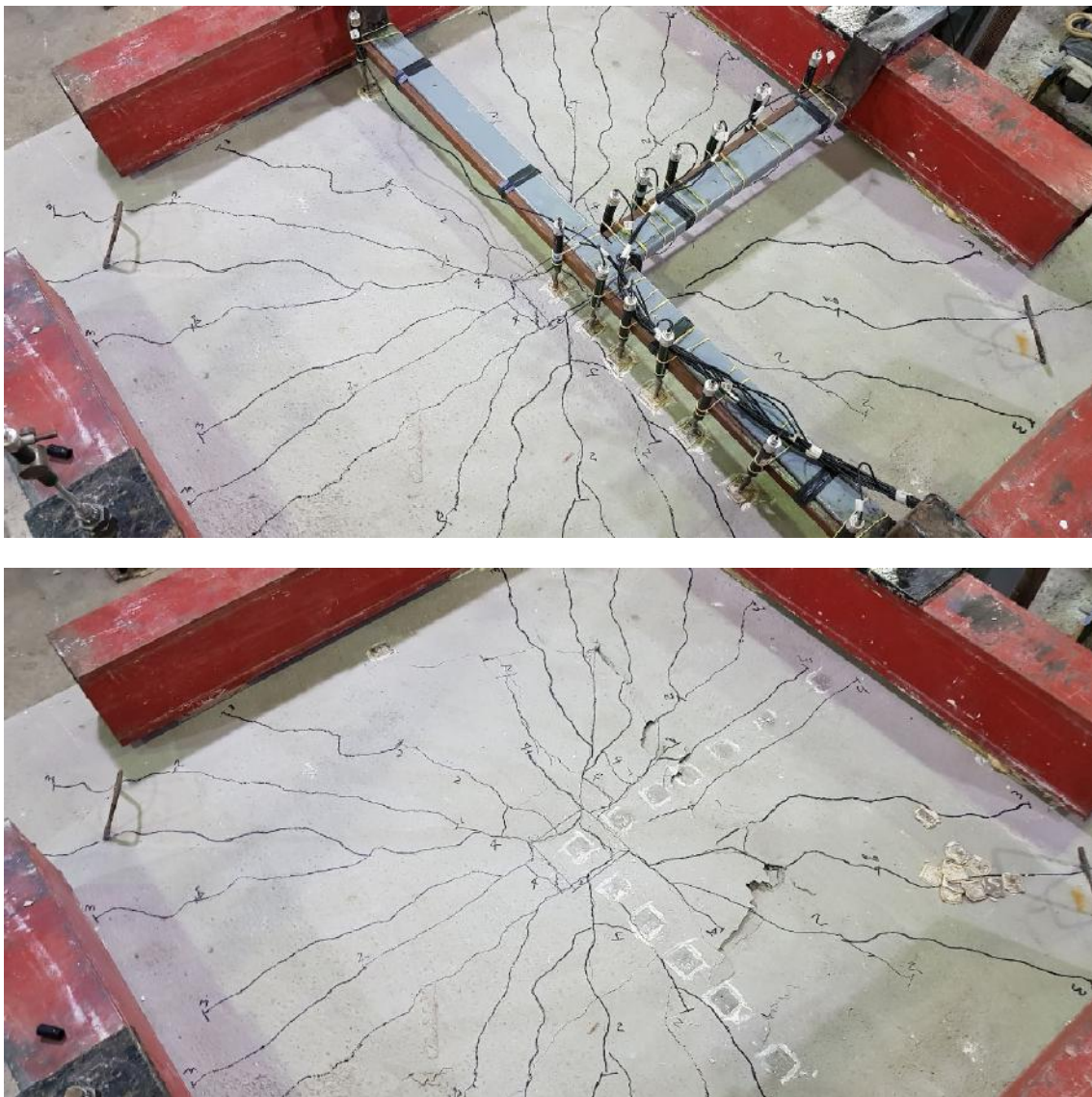


Figura 4.41: Fissuras da laje LRC antes e após a ruptura

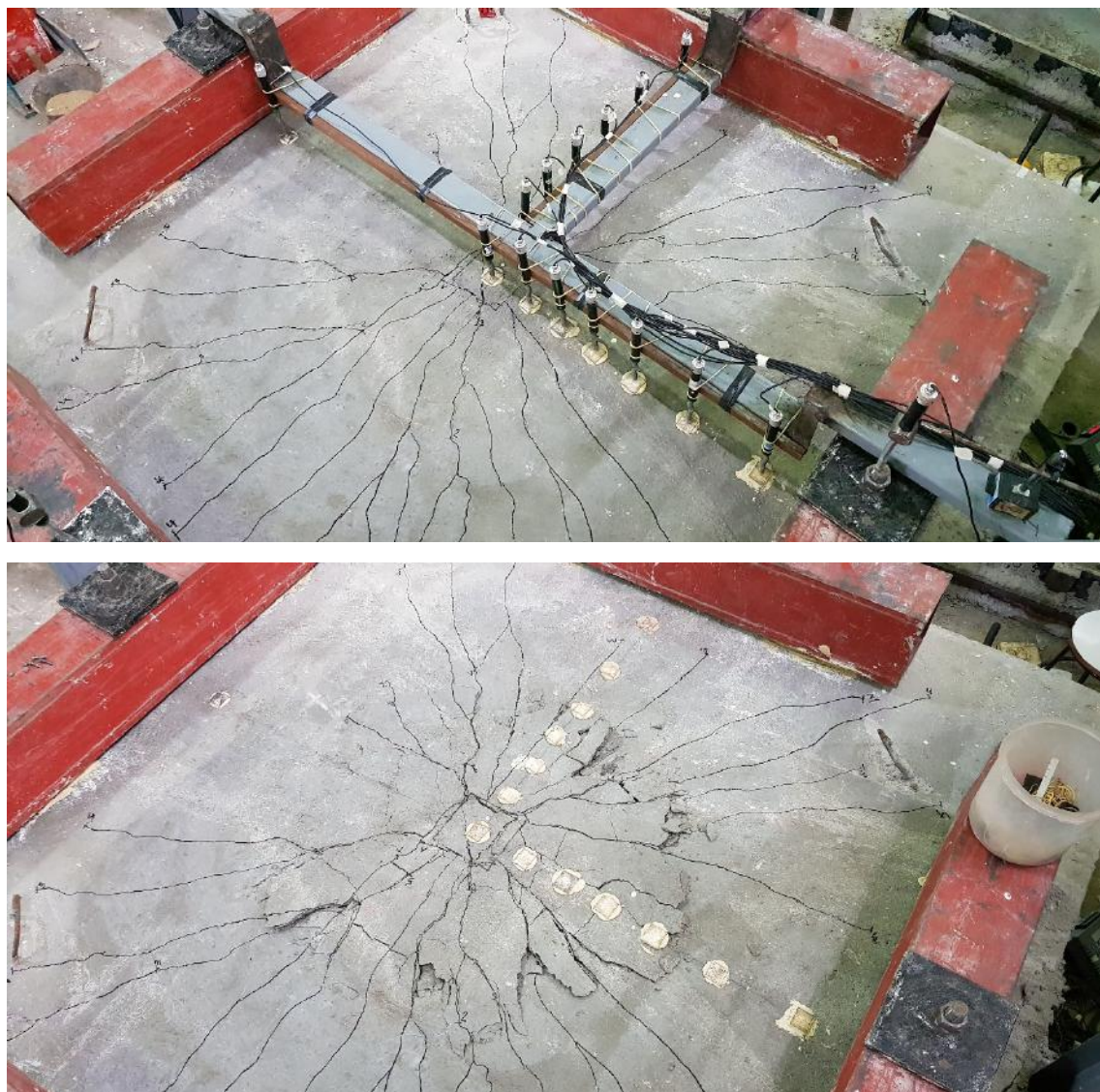


Figura 4.42: Fissuras da laje L50C antes e após a ruptura



Figura 4.43: Fissuras da laje L50F antes e após a ruptura

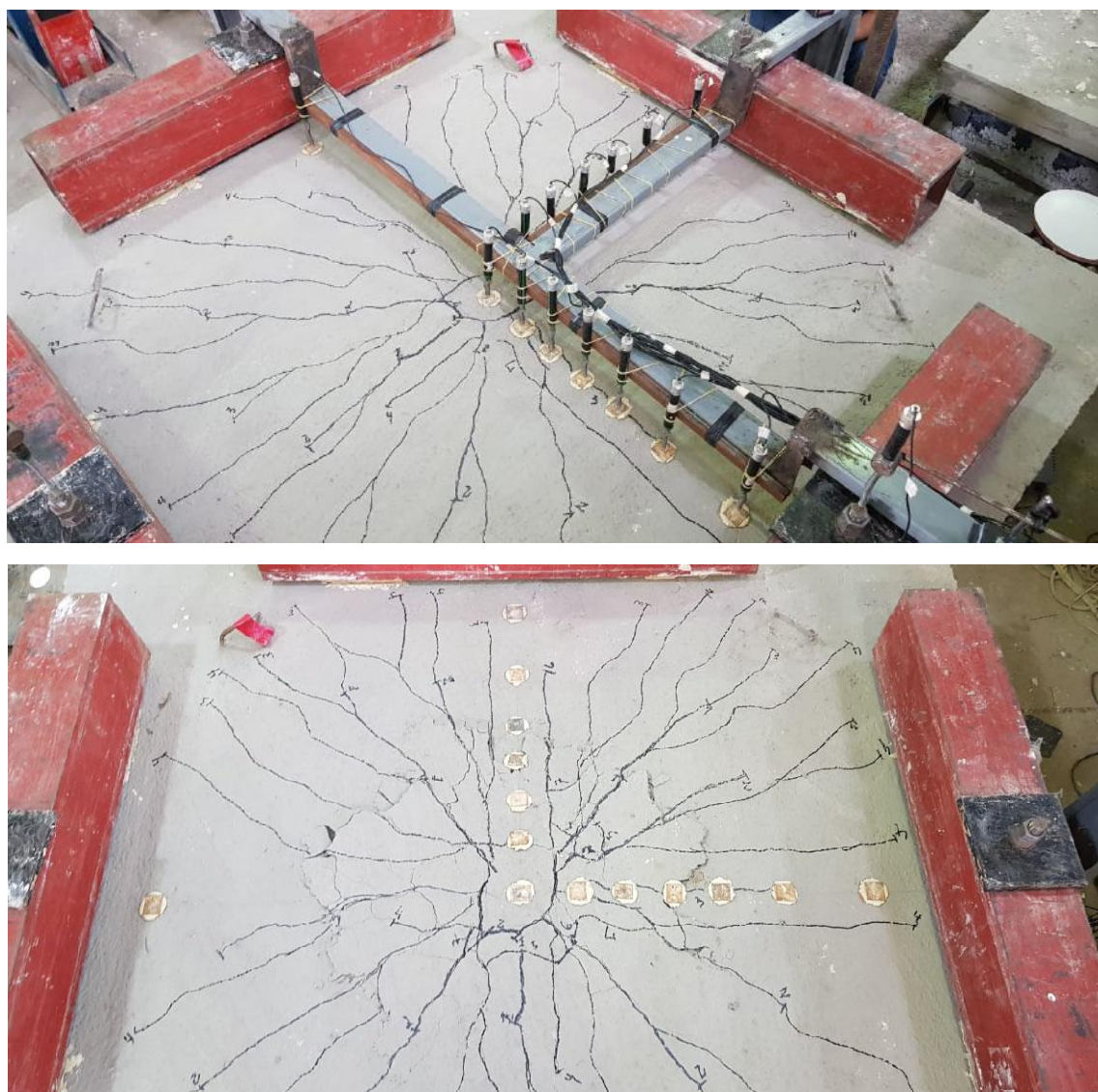


Figura 4.44: Fissuras da laje L63C antes e após a ruptura

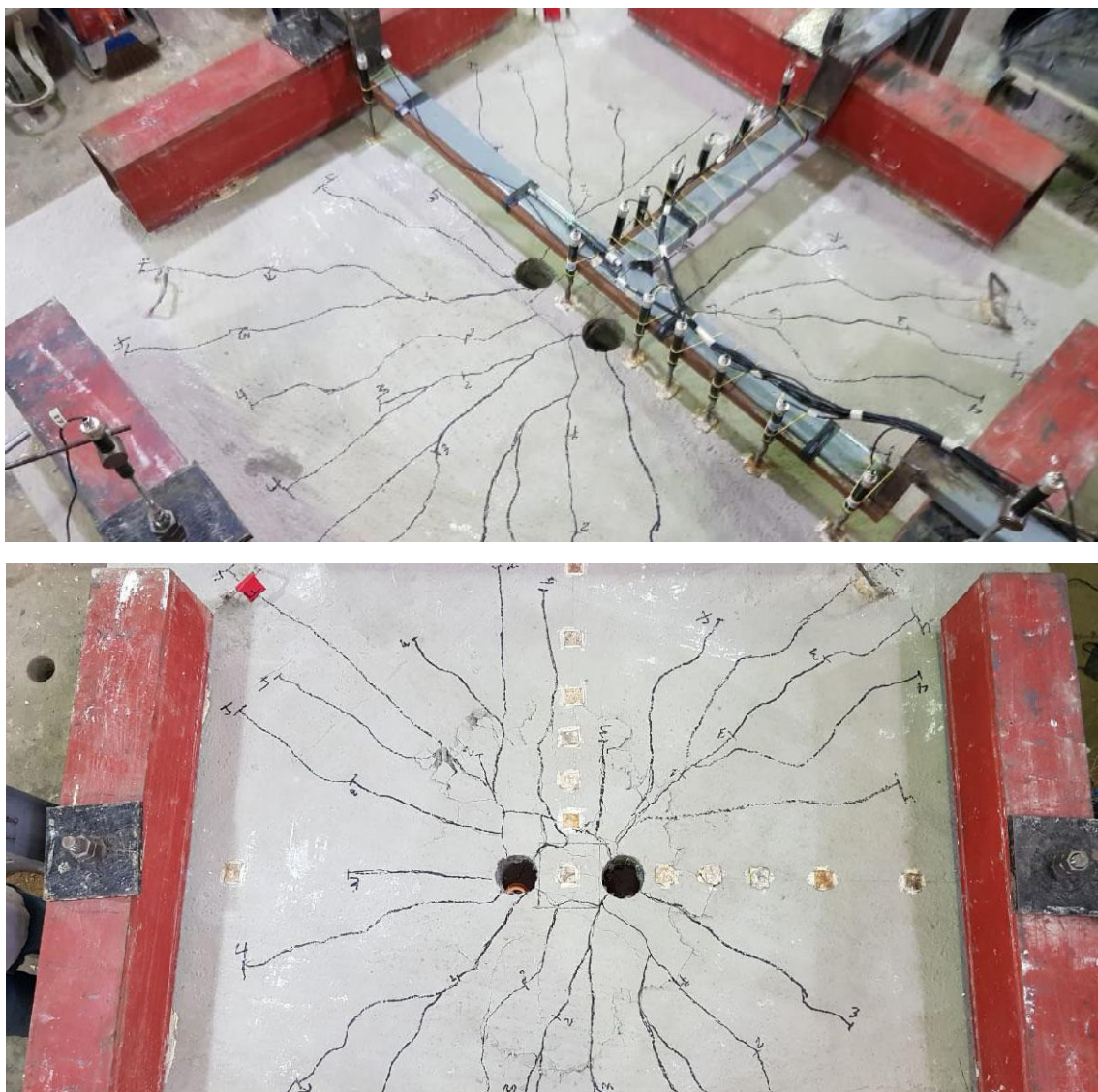


Figura 4.45: Fissuras da laje L63F antes e após a ruptura

CAPÍTULO 05

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A seguir, serão apresentadas as análises dos resultados obtidos das lajes ensaiadas e apresentados no Capítulo 4. Os resultados obtidos são comparados entre si. Os comparativos são feitos em relação aos deslocamentos verticais, deformações das armaduras de flexão e cisalhamento e deformações no concreto.

Já em relação à carga de ruptura, uma comparação entre resultados experimentais obtidos nesta pesquisa é feita com os valores estimados por pelas principais normas vigentes. Uma discussão entre a variação dos perímetros de controle conforme o afastamento da abertura da face do pilar pelas diferentes normas é apresentada também.

5.2 MODELOS ENSAIADOS

5.2.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

A Figura 5.1 apresenta um gráfico carga x deslocamento vertical retirados do centro de cada laje.

Todas as 05 lajes tiveram uma inclinação do gráfico mantida até por volta de 100 kN aplicados. A partir dessa carga, a inclinação ficou menor evidenciando uma perda de rigidez devido ao início de formação de fissuras.

As lajes LRC, L50F e L63F tiveram comportamentos muito similares até a aplicação de aproximadamente 300 kN de carga. A partir dessa carga, as lajes L50F e L63F têm novamente a inclinação do gráfico reduzida. Essa nova redução na inclinação do gráfico é explicada com o início do escoamento das armaduras de

flexão posicionadas no centro de cada laje. A laje LRC apresentou uma inclinação muito mais reduzida em relação às lajes L50F e L63F pois não há presença de armadura de cisalhamento.

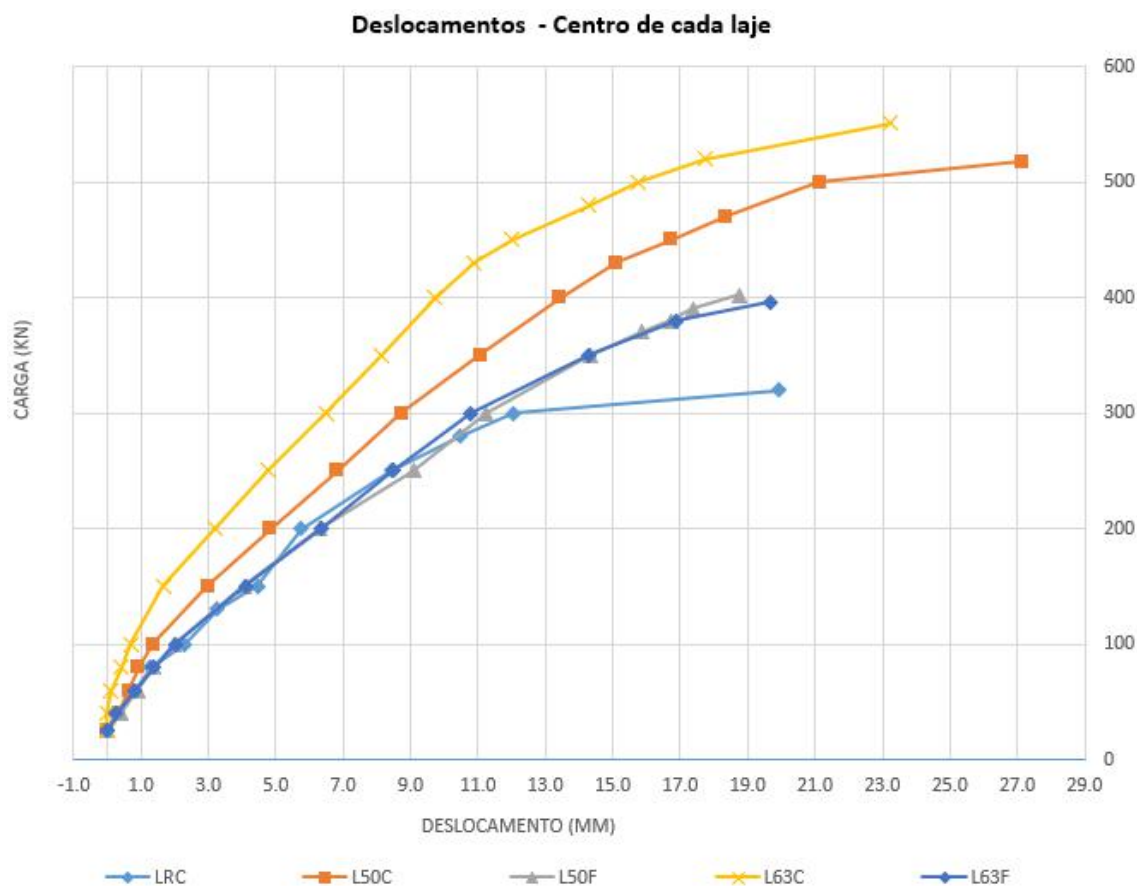


Figura 5.1: Gráfico Cargas x Deslocamentos verticais medidos no centro de cada laje

Já as lajes L50C e L63C tiveram comportamentos muito similares até a aplicação de aproximadamente 400 kN de carga. A partir dessa carga essas lajes têm novamente a inclinação do gráfico reduzida. Essa nova redução na inclinação do gráfico é explicada com o início do escoamento das armaduras de flexão posicionadas no centro de cada laje.

Todas as lajes, com ou sem armadura de cisalhamento e com ou sem aberturas, mantiveram um aumento da tensão x deformação proporcionais até o início de escoamento de suas respectivas armaduras de flexão. A mudança de

inclinação observada no gráfico antes do escoamento das armaduras de flexão, ocorreu pelo início da formação das fissuras.

De maneira geral é possível verificar que todas as lajes com abertura iniciaram seu comportamento não linear com uma carga maior do que a laje de referência.

A presença das aberturas levou os modelos ensaiados a apresentarem maiores deslocamentos. Porém para os estágios finais de carregamento, a laje LF3, com abertura distante $2d$ da face do pilar, apresentou maiores deformações em comparação com as demais lajes, superando inclusive a laje de referência LR.

A Figura 5.2 apresenta o gráfico “Deslocamento vertical x Carga” das lajes ensaiadas. Estes deslocamentos são os máximos obtidos no instante da ruptura (carga máxima).

A Figura 5.3 apresenta o deslocamento vertical de todas as lajes ensaiadas para uma carga de 300 kN. Esta carga foi escolhida devido a mesma ser o último passo de carga feito na laje LRC (laje com menor carga de ruptura) antes de atingir a carga de ruptura (320 kN). Pode-se perceber que as lajes com armadura de cisalhamento apresentam rigidez maior que a laje de referência (sem armadura de cisalhamento) e as com armadura de cisalhamento e sem aberturas (L50C e L63C) apresentam uma rigidez maior quando comparadas às respectivas lajes com armadura de cisalhamento e com aberturas (L50F e L63F).

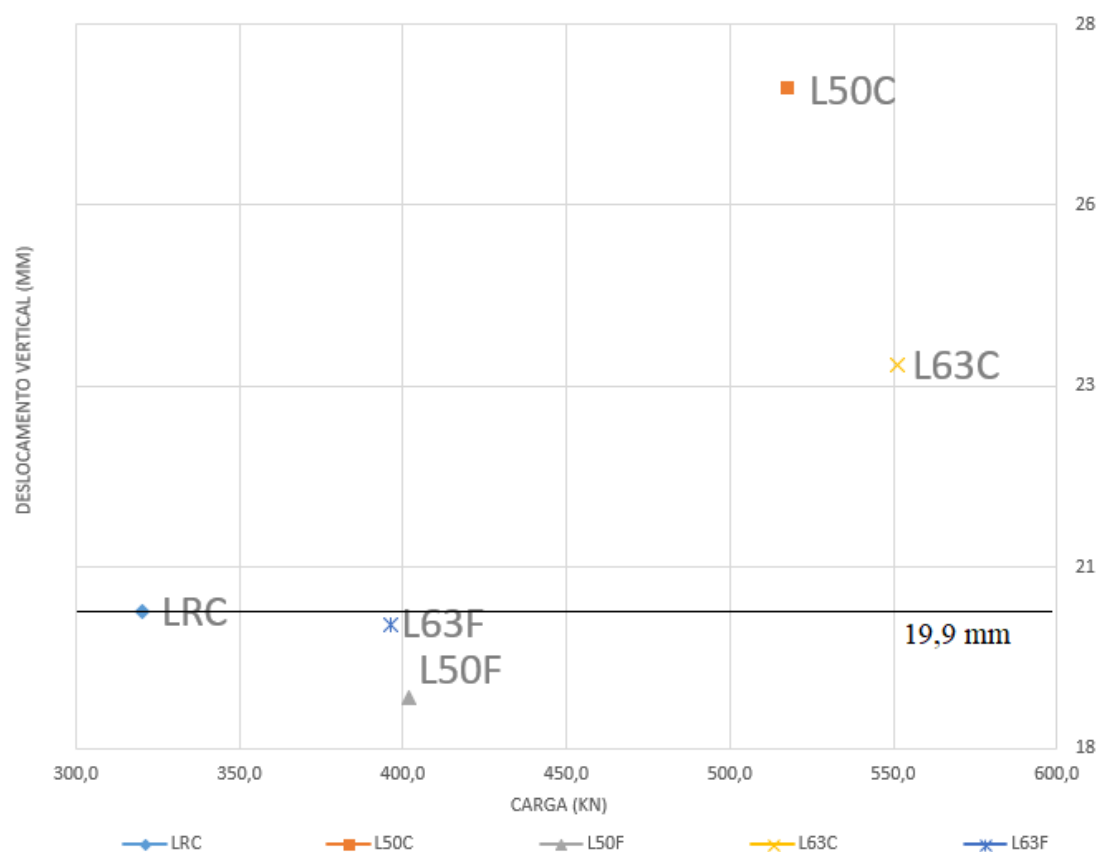


Figura 5.2: Deslocamentos verticais obtidos em relação a laje de referência (LRC) sem armadura de cisalhamento

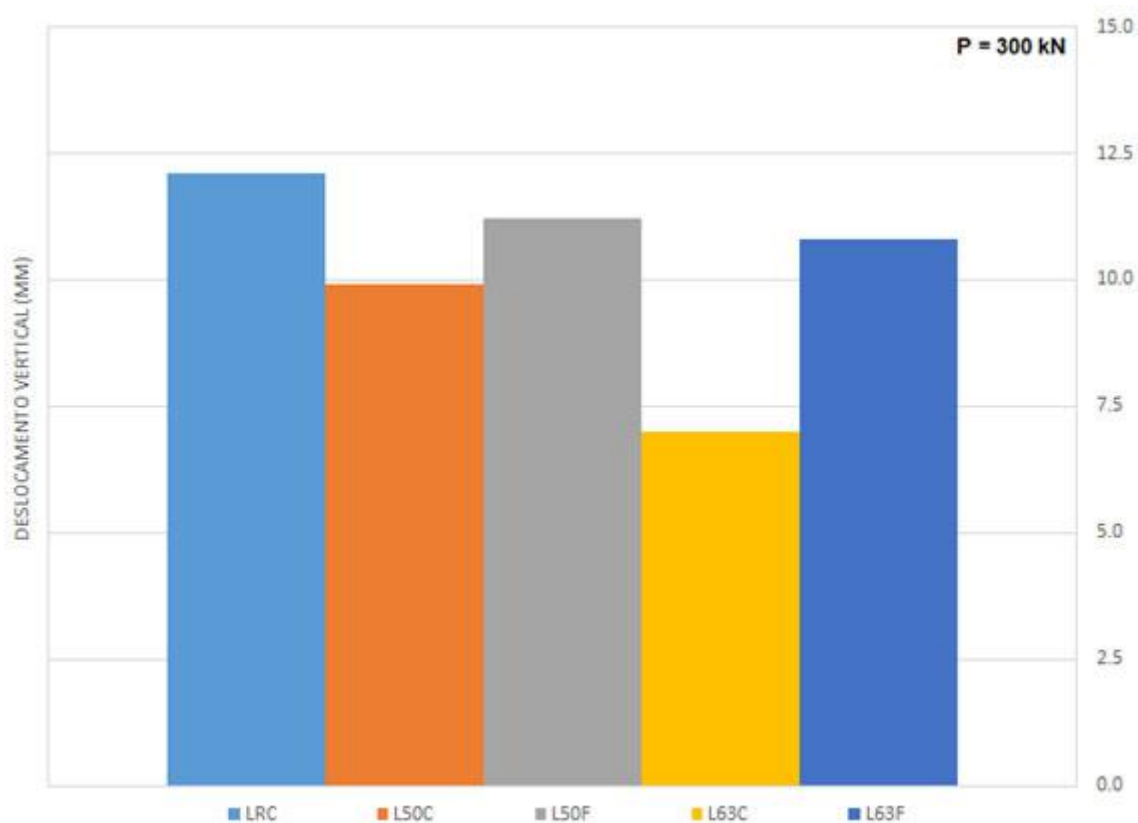


Figura 5.3: Deslocamentos verticais das lajes ensaiadas para o nível de carga igual a 300 kN

A Tabela 5.1 apresenta as rotações máximas determinadas, utilizando os deslocamentos verticais máximos registrados no centro de cada laje em relação aos tirantes distantes 1000 mm do centro da laje. A Tabela 5.1 mostra que a abertura nas lajes L50F e L63F diminuiu a rotação máxima em relação as suas respectivas lajes sem aberturas, L50C e L63C.

No caso da laje L50F, a rotação é diminuída em 30,9% quando comparada com a laje L50C. Já a laje L63F, a rotação é diminuída em 15,2% quando comparada com a laje L63C.

As lajes com aberturas (L50F e L63F), mostraram diferença muito pequena com relação à laje de referência (LRC), com variações em torno de 5%.

O sinal negativo na diferença entre rotações das lajes e rotação da laje de referência (LRC), indica uma rotação maior que a rotação da laje LRC.

Tabela 5.1: Rotações máximas das lajes ensaiadas

Laje	$F_{sk, teste}^{(1)}$ (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Rotação (x 10^{-4})	Δ (%)
LRC	320,0	19,9	199,4	-
L50C	518,0	27,1	271,4	-36,1
L50F	402,0	18,7	187,3	6,1
L63C	551,0	23,2	232,4	-16,5
L63F	396,0	19,7	196,9	1,3
(1) Carga de ruptura da laje;				
(2) Δ – Corresponde a diferença entre a rotação máxima da respectiva laje em relação a rotação máxima da laje de referência.				

5.2.2 DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO

As Figuras 5.4 a 5.8 apresentam apenas as deformações obtidas pelos extensômetros posicionados nas barras sobre o pilar de todas as lajes ensaiadas.

As barras com sufixo “IV” (Inferiores e Vertical) indicam que estas barras estão abaixo das barras perpendiculares da mesma face. Já as barras com sufixo

“SH” (Superiores e Horizontal) indicam que as barras estão acima das barras perpendiculares das mesmas faces.

Os resultados mostrados nas Figuras 5.4 a 5.8 indicam que a presença de aberturas adjacentes ao pilar (L50F e L63F) não levaram a um acréscimo na deformação nas barras que passavam sobre o pilar em comparação com as lajes sem abertura (L50C e L63C).

As barras da laje de referência LRC apresentaram deformações bem inferiores quando comparadas com as demais lajes. Isso pode ser explicado pela ausência de armadura de cisalhamento na laje de referência (LRC).

Os extensômetros das barras das lajes com aberturas adjacentes ao pilar e armadura de cisalhamento (L50F e L63F), mostraram, para uma mesma carga de aplicação, deformações superiores quando comparados com os extensômetros das barras das lajes sem aberturas adjacentes ao pilar e armadura de cisalhamento (L50C e L63C). Desta forma é possível observar que as lajes L50F e L63F chegam à deformação de escoamento com carregamento de aproximadamente 300 kN, enquanto que as lajes L50C e L63C chegam à deformação de escoamento com carregamento de aproximadamente 400 kN.

Todas as lajes apresentaram deformações similares em suas respectivas barras de flexão em ambas as direções e deformações cada vez menores a medida que as barras ficam mais distantes do pilar.

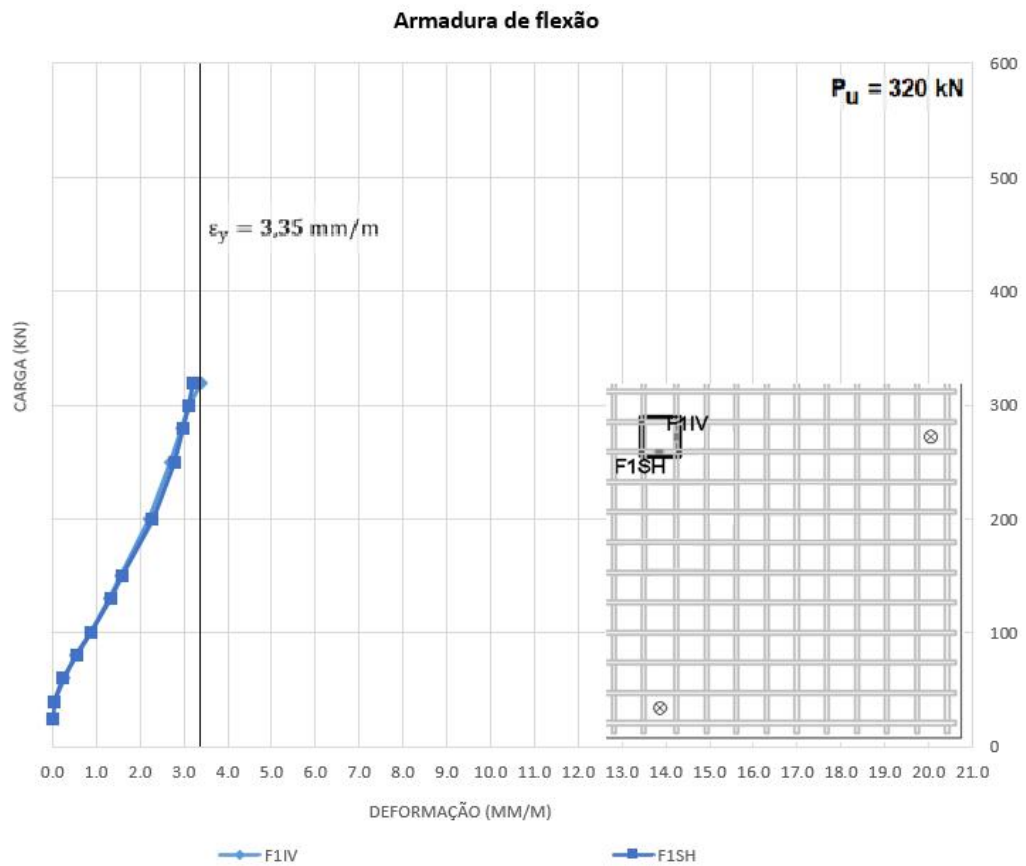


Figura 5.4: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – LRF

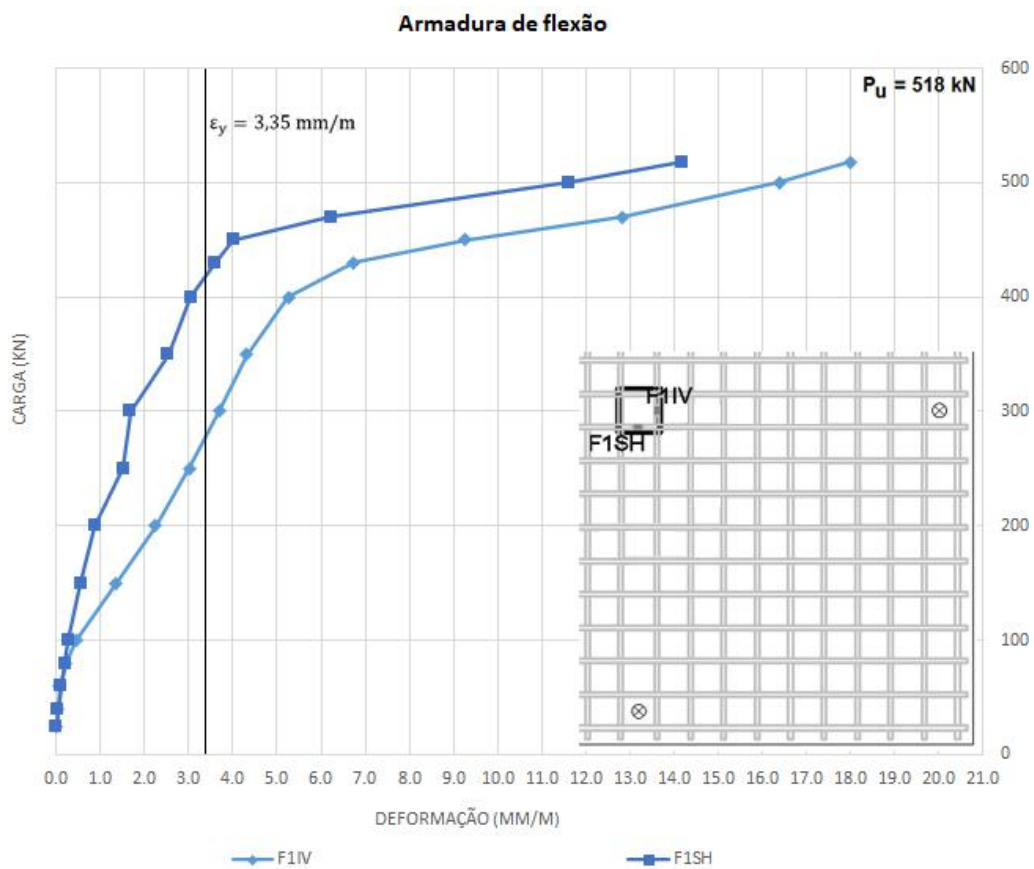


Figura 5.5: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L50C

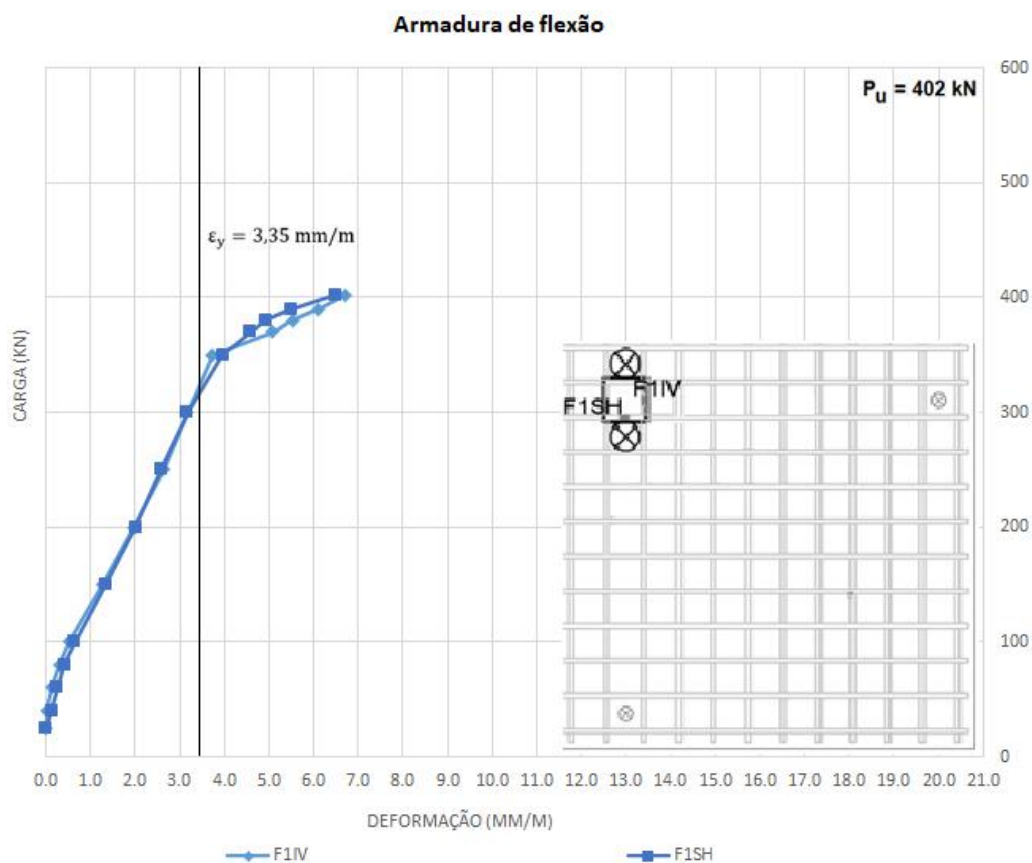


Figura 5.6: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L50F

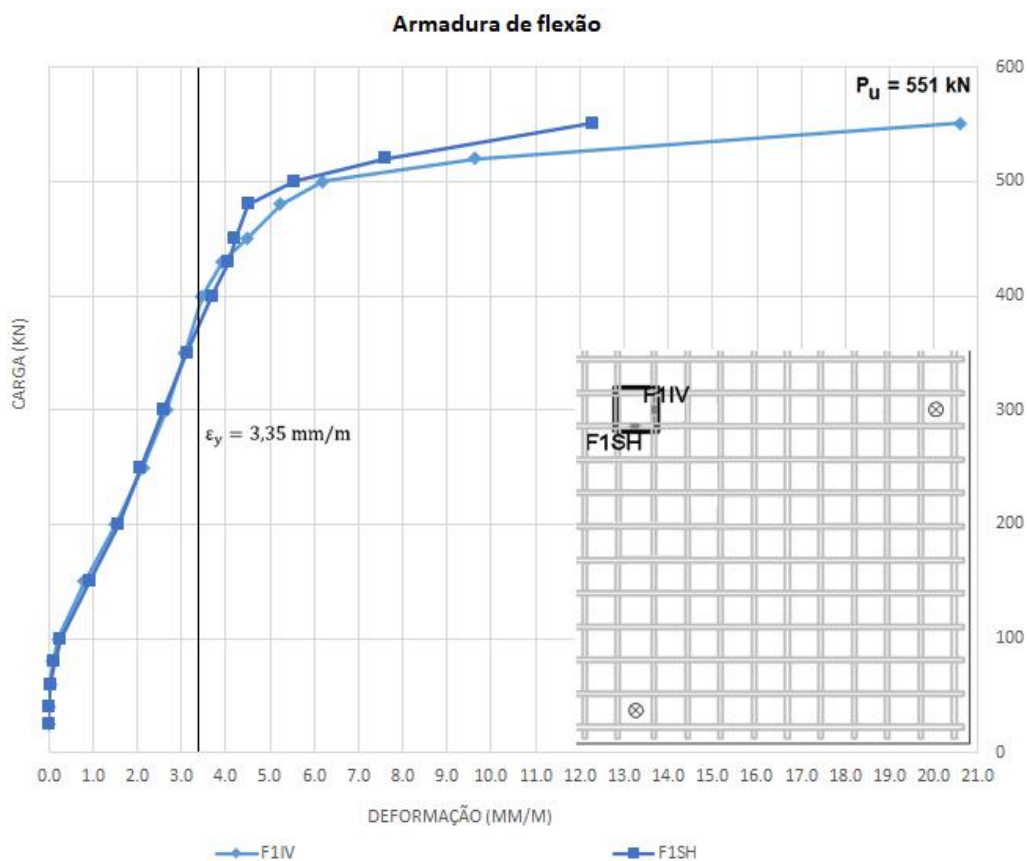


Figura 5.7: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L63C

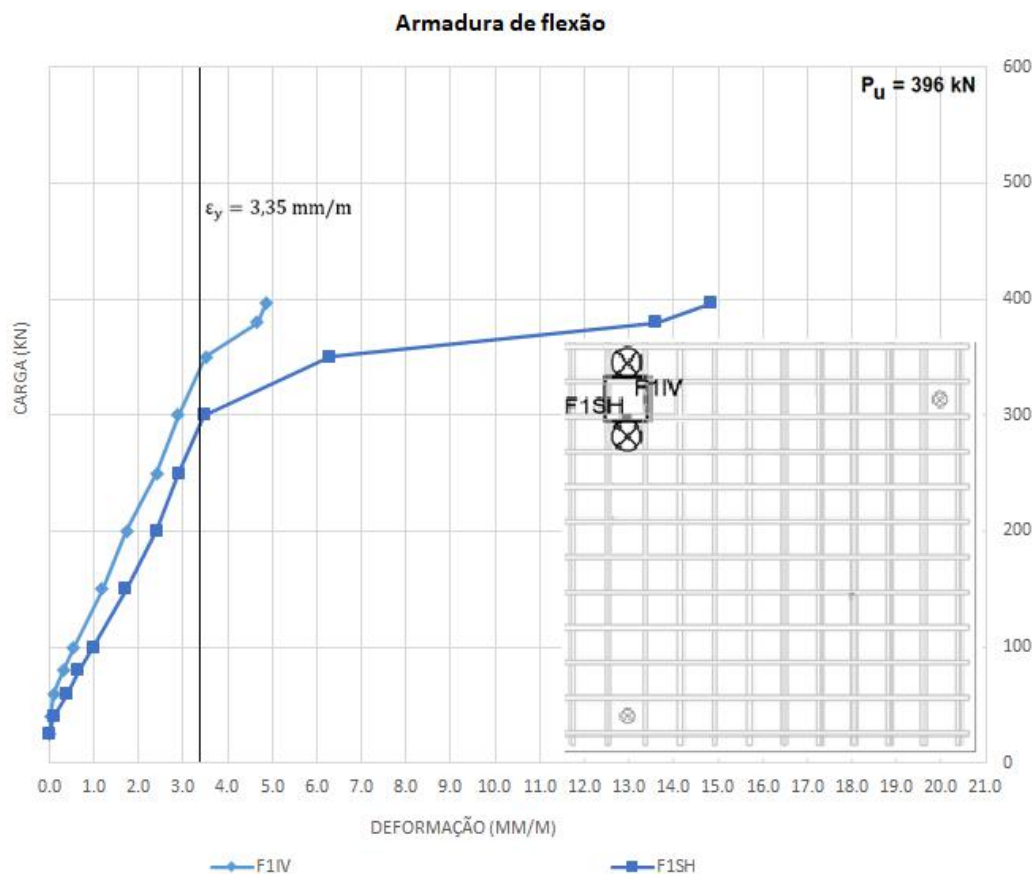


Figura 5.8: Deformação específica nas armaduras de flexão sobre o pilar – L63F

5.2.3 DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

As Figuras 5.9 a 5.12 apresentam apenas as deformações das armaduras de cisalhamento da segunda e terceira camadas das lajes L50C, L50F, L63C e L63F pois essas camadas apresentaram as maiores deformações. Estas deformações eram esperadas porque todas as lajes com armadura de cisalhamento romperam por punção interna (superfície de ruptura cruzando as armaduras de cisalhamento) cruzando as camadas 1, 2 e 3.

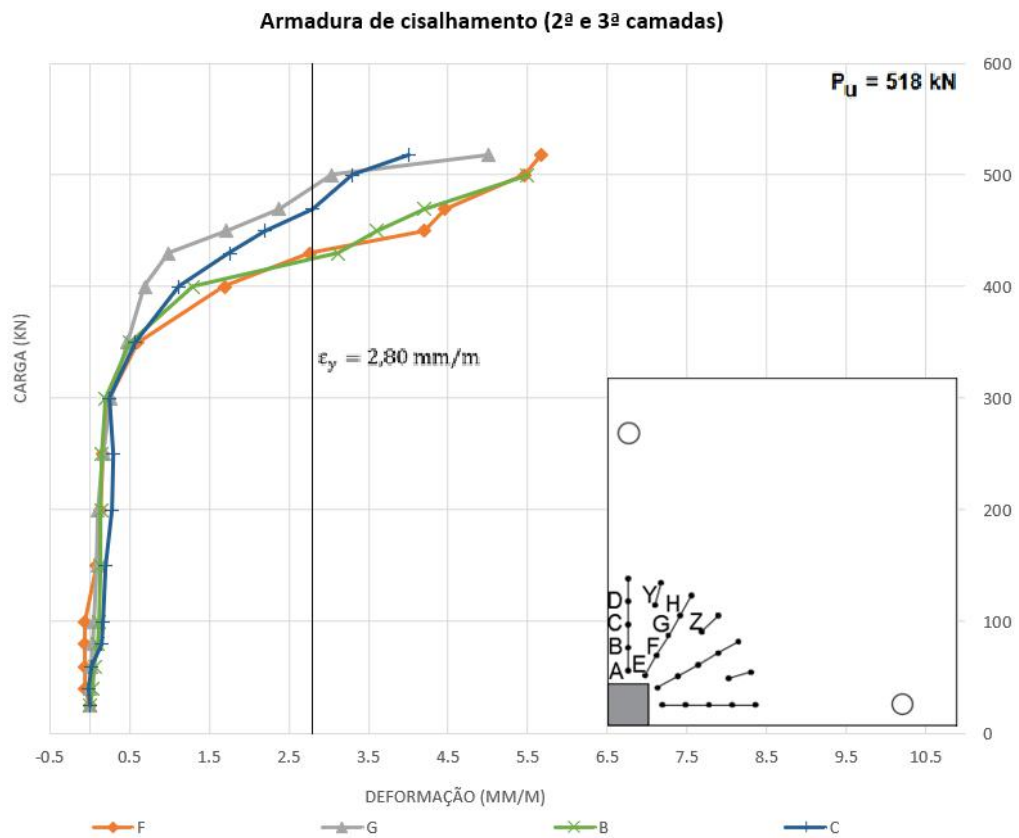


Figura 5.9: Deformação específica das principais armaduras de cisalhamento – L50C

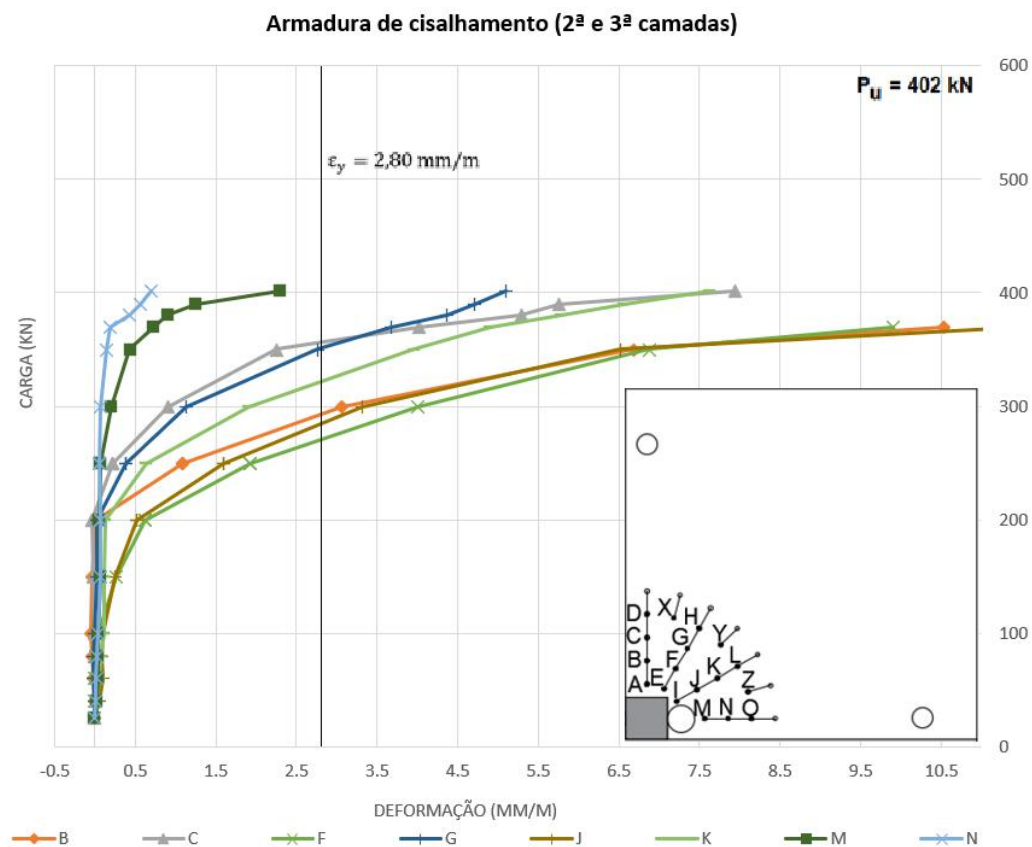


Figura 5.10: Deformação específica das principais armaduras de cisalhamento – L50F

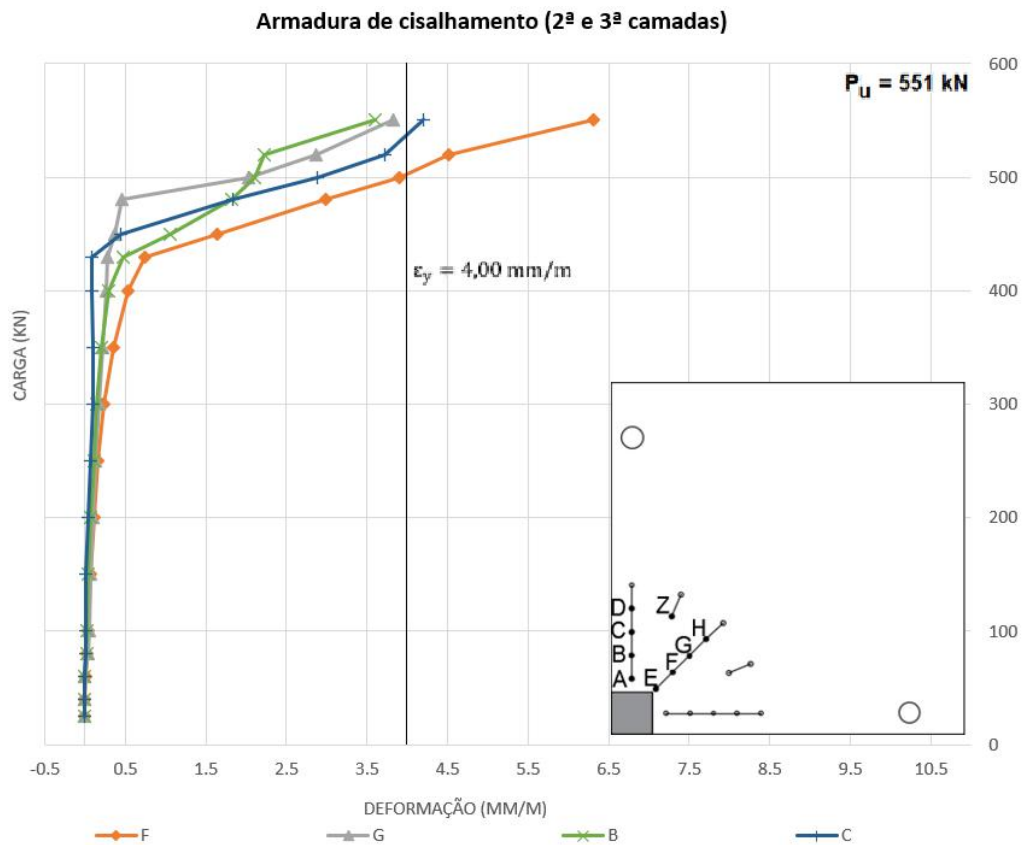


Figura 5.11: Deformação específica das principais armaduras de cisalhamento – L63C

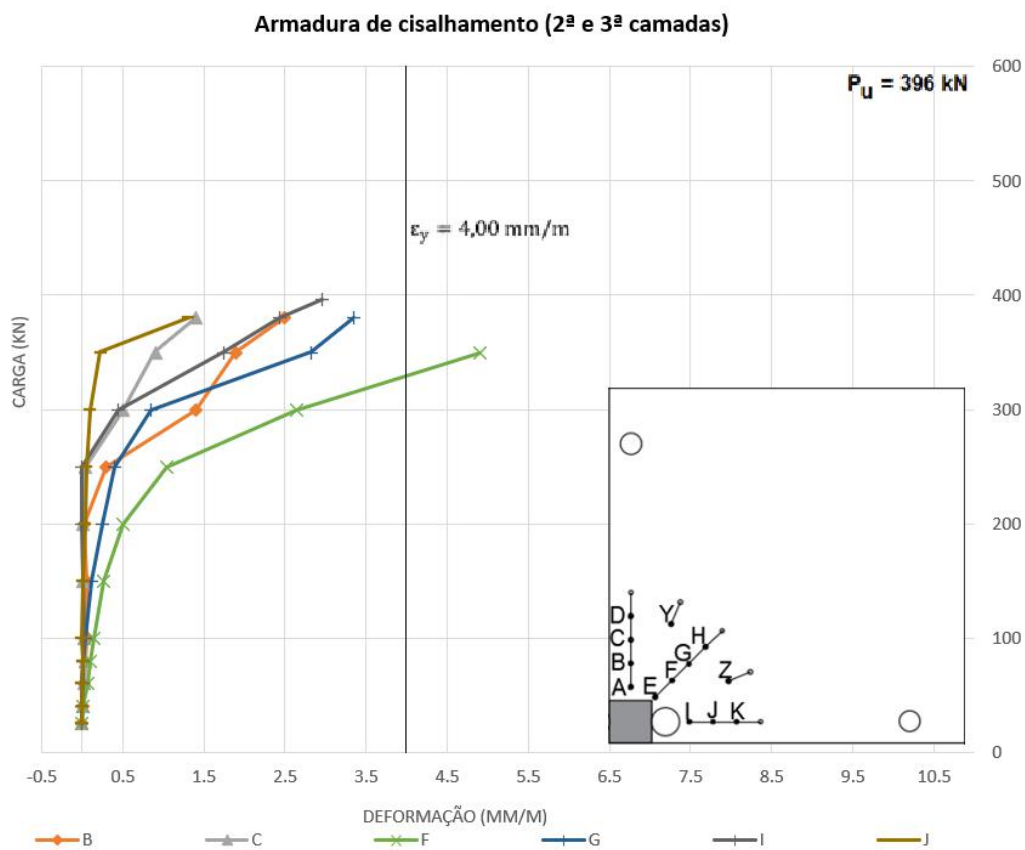


Figura 5.12: Deformação específica das principais armaduras de cisalhamento – L63F

Os resultados mostraram que as armaduras de cisalhamento situadas atrás das aberturas (lajes L50F e L63F), apresentaram deformações bem inferiores quando comparadas as deformações das mesmas camadas das demais armaduras, indicando baixa influência dessas armaduras atrás das aberturas.

Observou-se nas lajes L63C e L63F que as linhas de armaduras de cisalhamento projetadas do centro do pilar até a quina do mesmo (extensômetros “F” e “G”) tiveram deformações superiores as linhas de armaduras de cisalhamento projetadas do centro do pilar até o ponto médio da face do mesmo (extensômetros “B” e “C”). Essa diferença indica uma concentração de tensão próxima às quinas de pilares e que a forma do pilar também tem influência direta nas diferenças de deformações entre armaduras de cisalhamento situadas na mesma camada.

As armaduras da 2ª camada de cisalhamento da laje L50C e L63C (Figuras 5.9 e 5.11), apesar de não terem escoado, tiveram comportamento muito similares ao de escoamento a partir do aumento de aproximadamente 400 kN de carga, uma vez que é observado grande redução na inclinação do gráfico. Essa redução na inclinação do gráfico é explicada com o início do escoamento das armaduras de flexão posicionadas no centro de cada laje exigindo muito mais da armadura de cisalhamento a cada passo de carga dado.

As armaduras de 3ª camada de cisalhamento da laje L50F e L63F (Figuras 5.10 e 5.12), apesar de não terem escoado, tiveram comportamento muito similar ao de escoamento a partir do aumento de aproximadamente 300 kN de carga, uma vez que é observado grande redução na inclinação do gráfico. Essa redução na inclinação do gráfico é explicada com o início do escoamento das armaduras de flexão posicionadas no centro de cada laje exigindo muito mais da armadura de cisalhamento a cada passo de carga dado.

Também é observado nas lajes com abertura próximas ao pilar (L50F e L63F) que as armaduras de cisalhamento situadas nas laterais das aberturas e não atrás das mesmas, têm deformações superiores as armaduras das demais linhas e de mesma camada.

5.2.4 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

As Figuras 5.13 a 5.17 apresentam as deformações radiais e circunferências das três primeiras camadas de extensômetros posicionados na face inferiores de cada laje ensaiada.

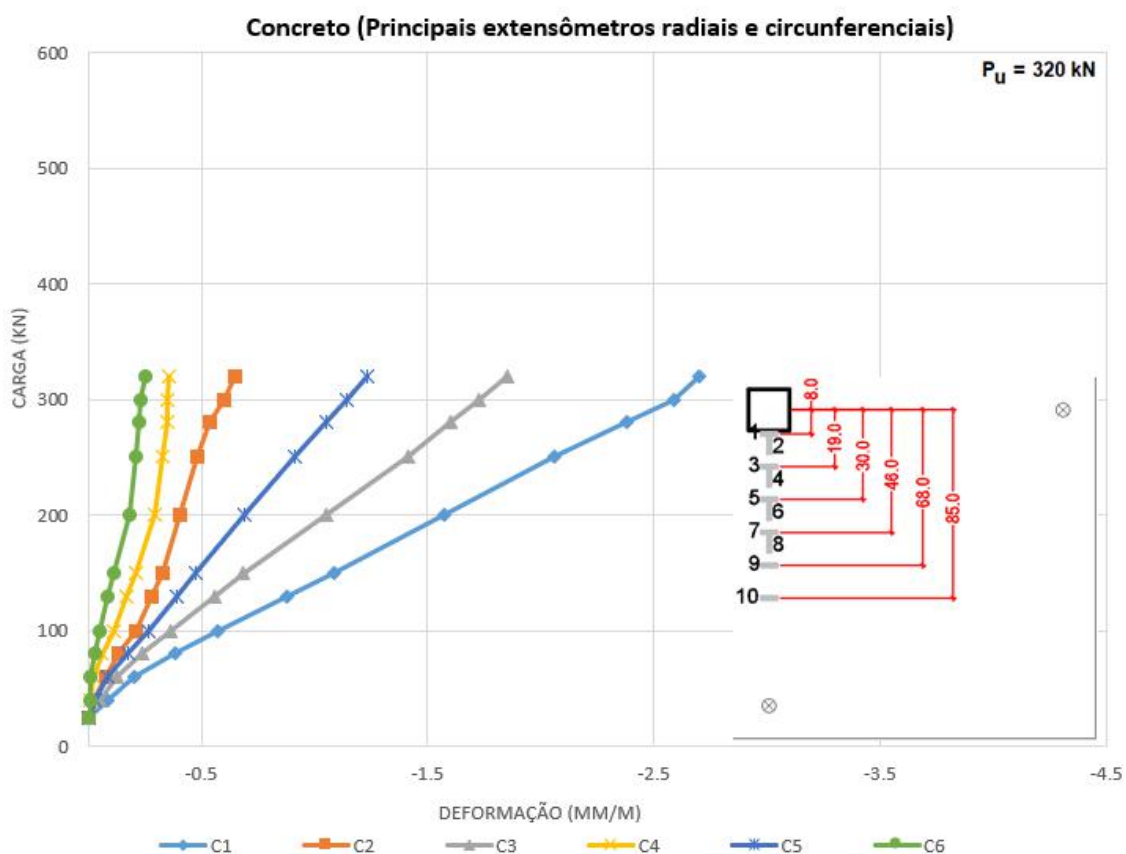


Figura 5.13: Deformação radial e circunferencial do concreto – LRC

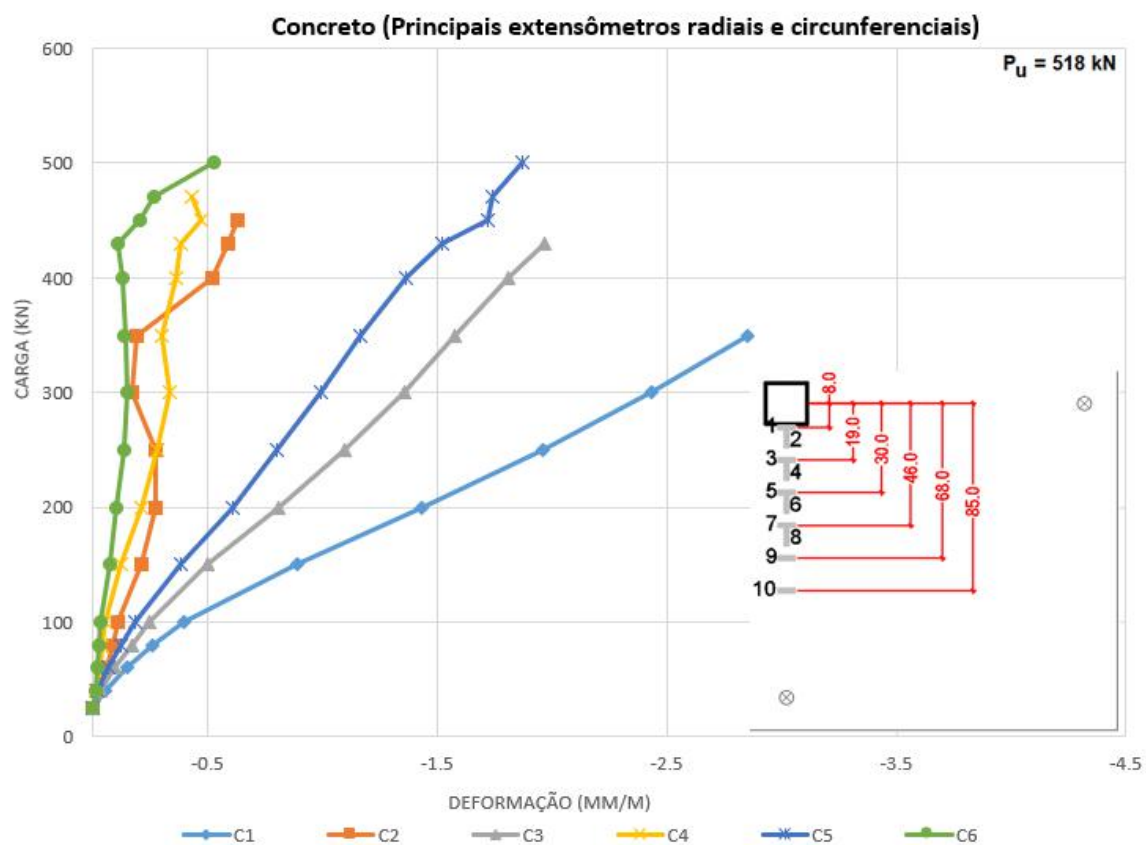


Figura 5.14: Deformação radial e circunferencial do concreto – L50C

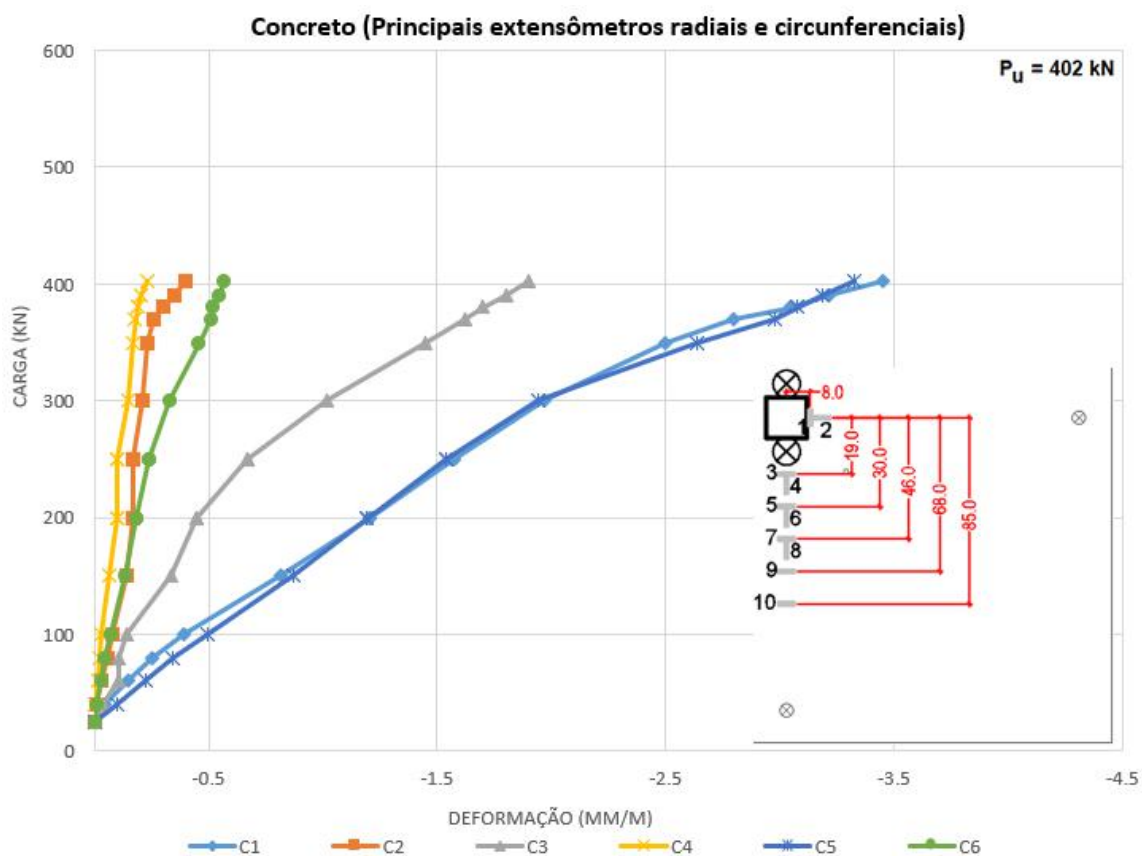


Figura 5.15: Deformação radial e circunferencial do concreto – L50F

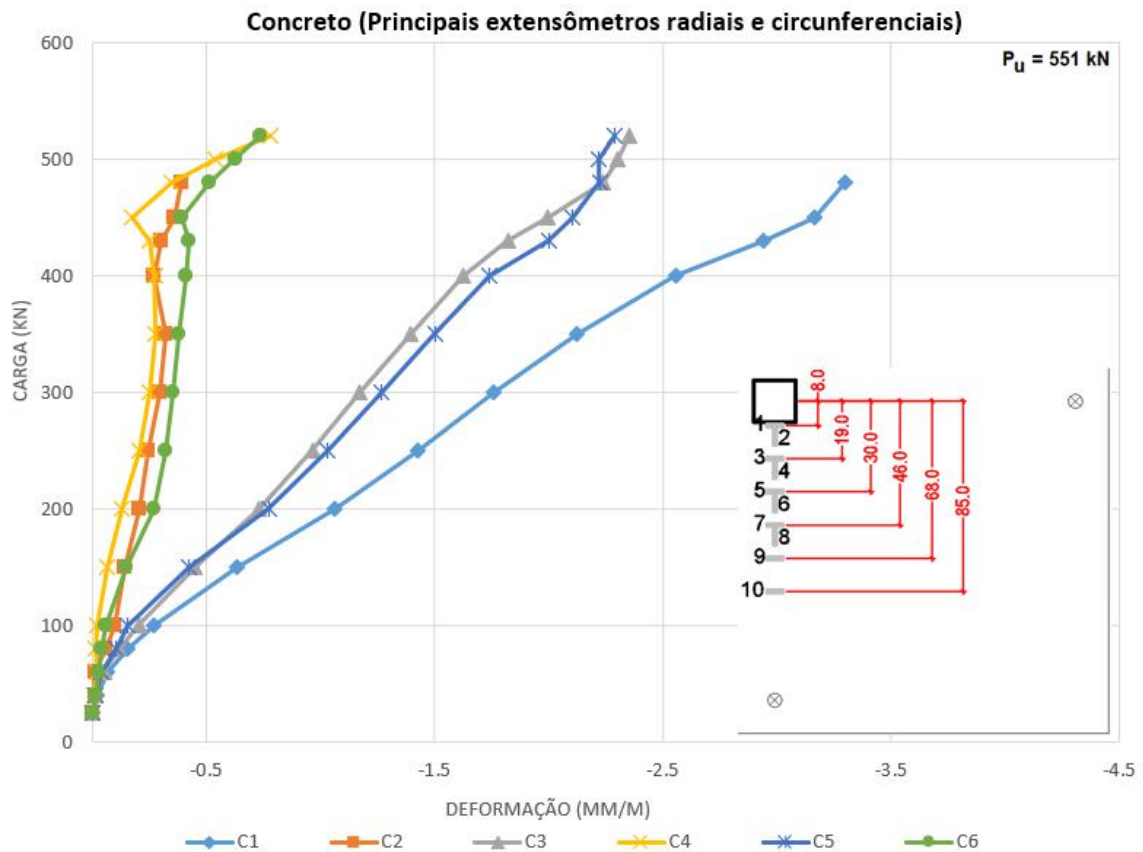


Figura 5.16: Deformação radial e circunferencial do concreto – L63C

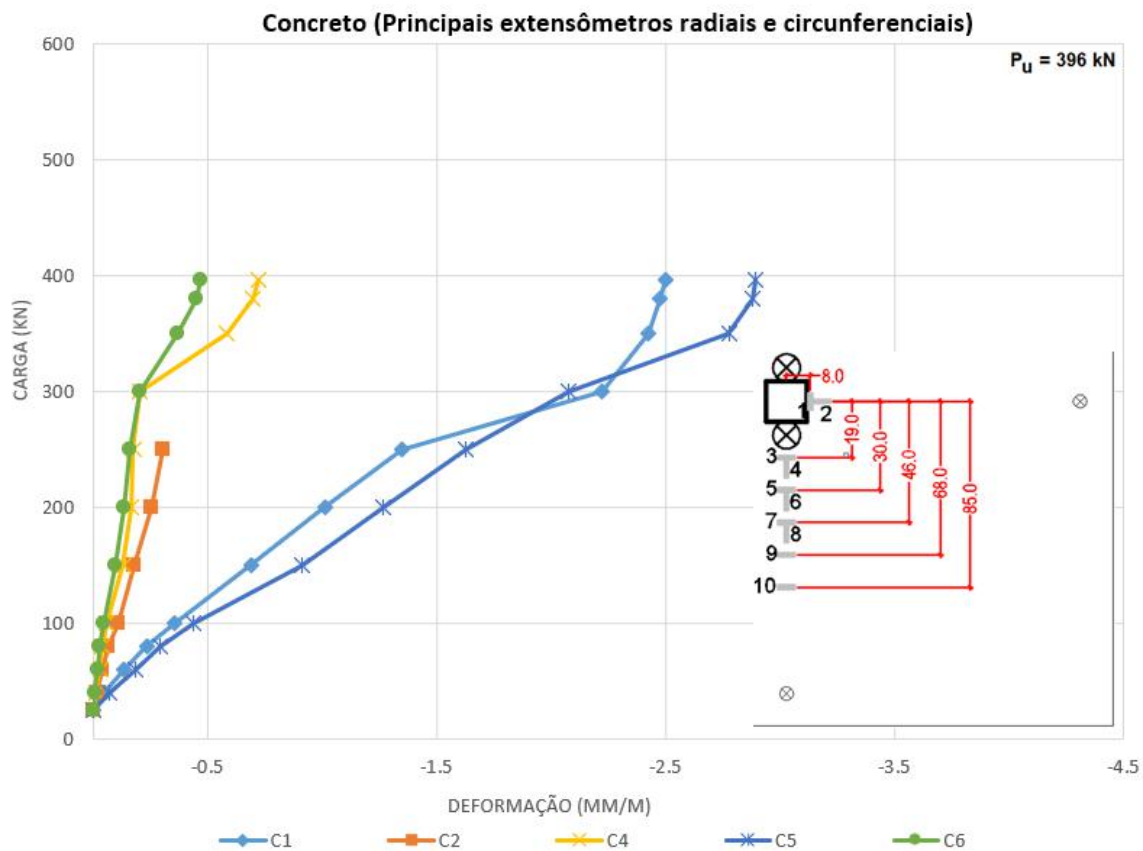


Figura 5.17: Deformação radial e circunferencial do concreto – L63F

Nas lajes com armadura de cisalhamento e sem aberturas (L50C e L63C, indicadas nas Figuras 5.14 e 5.16 respectivamente), os extensômetros circunferenciais 1 e 3 também apresentam, respectivamente, as maiores deformações. Apesar do extensômetros terem sido perdidos durante o ensaio, sugere-se que as deformações características de esmagamento do concreto, ultrapassaram o valor limite normativo da ABNT NBR 6118/2014, que é de 3,5 mm/m.

Já as lajes com armadura de cisalhamento e com aberturas (L50F e L63F, indicadas nas Figuras 5.15 e 5.17 respectivamente), os extensômetros circunferenciais 1 e 5 apresentam as maiores deformações, já atingindo deformações características de esmagamento do concreto mas não ultrapassando o valor limite normativo da ABNT NBR 6118/2014, que é de 3,5 mm/m. Ainda nas lajes com aberturas é importante observar que o extensômetro 3, localizado logo atrás da abertura, não teve deformação proporcional aos extensômetros 1 e 5. Este, teve deformações abaixo de seus intermediários (1 e 5) indicando pouca deformação do concreto nesta região.

Os extensômetros posicionados na direção radial apresentam as menores deformações sendo que em alguns casos o comportamento sugere uma pequena descompressão, que pode ser explicada pela abertura de fissuras nessas regiões e consequentemente um alívio das tensões de compressão atuantes. Além disso, apesar dessa pequena descompressão não interferir no resultado dos ensaios das lajes, indica que as o aparato experimental está no limite para as lajes ensaiadas. No caso de lajes com previsões de maiores cargas de ruptura e consequente maiores deformações, é importante dimensões de lajes maiores para não haver distorções nos resultados dos últimos passos de carga.

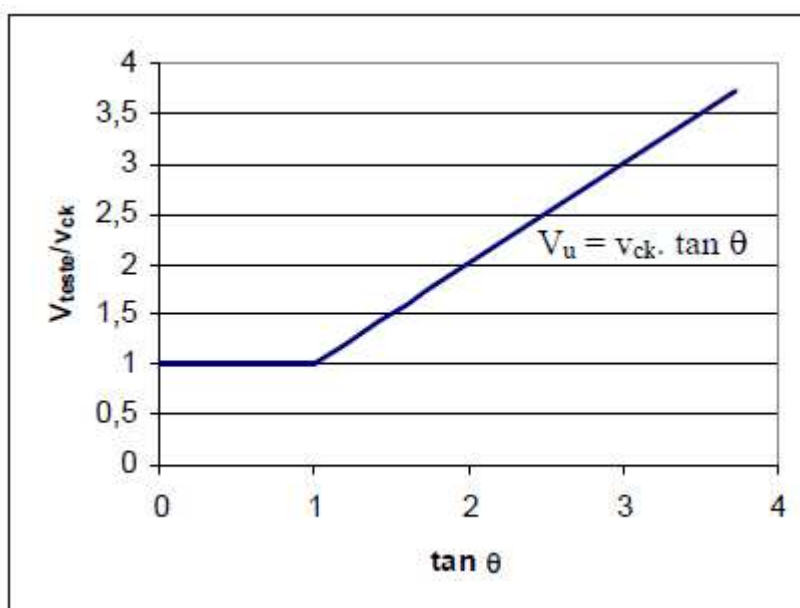
5.3 CONTRIBUIÇÕES DO AÇO E DO CONCRETO NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DAS LAJES ENSAIADAS

A resistência à punção de lajes lisas com armadura de cisalhamento, é dada pela soma de duas parcelas: Resistência do concreto e a resistência da armadura transversal. A consideração de cada uma dessas parcelas é dada de maneira distinta entre as normas técnicas vigentes e por pesquisadores.

REGAN (1985) conclui que lajes lisas sem armaduras de cisalhamento e carregamento simétrico, têm uma superfície de ruptura que forma um ângulo de 25° com o plano horizontal, com o início da superfície de ruptura na face do pilar.

Já em uma outra situação, onde a laje lisa é armada com o primeiro elemento da armadura de cisalhamento sendo posicionado a uma distância que force a mudança de inclinação da superfície de ruptura, o acréscimo de carga é modesto até a inclinação de 45° . Após esse limite, o acréscimo de carga é bastante considerável.

REGAN (1985) ainda sugere que a contribuição do aço é a soma das forças atuantes nas armaduras de cisalhamento, cortada a 45° pela superfície de ruptura. Já a contribuição do concreto em uma laje com armadura de cisalhamento, representa 75% da resistência à punção, conforme indicado no gráfico da Figura 5.18.



Onde:

V_{teste} : Força resistente medida no ensaio;

V_{ck} : Força resistente para uma superfície de ruptura com inclinação de 25°;

$\tan \theta$: Nova inclinação da superfície de ruptura;

V_u : Força resistente majorada devido à mudança de inclinação da superfície de ruptura.

Figura 5.18: Efeito da inclinação da superfície de ruptura na resistência à punção

No presente trabalho, as cinco lajes ensaiadas romperam por punção. As lajes com armadura de cisalhamento tiveram suas respectivas superfícies de ruptura cruzando essas armaduras. A análise das contribuições da armadura de cisalhamento e do concreto nas lajes estudadas é apresentada na Tabela 5.2. O valor utilizado para a parcela de contribuição de concreto é calculado segundo os parâmetros normativos do EC2/2014, uma vez que a expressão $(V_u - V_{ck})/(A_{sw} \cdot f_y)$ é a que mais se aproxima dos resultados experimentais de diversos pesquisadores.

Utilizando 75% ou 100% da contribuição do concreto $(V_u - V_{ck})/(0,75 \cdot A_{sw} \cdot f_y)$ ou $(V_u - V_{ck})/(A_{sw} \cdot f_y)$, as quatro lajes com armadura de cisalhamento

atendem as condições de ruptura das lajes ensaiadas. Sendo assim, considerando 100% da contribuição do concreto, a parcela resistente das armaduras de cisalhamento, ficam mais próximas do que foi evidenciado nos ensaios.

Ainda é possível observar nos ensaios, que a superfície de ruptura cruzou as duas primeiras camadas da armadura de cisalhamento com a carga de ruptura. Já para a carga estimada considerando as parcelas do concreto e da armadura de cisalhamento, indica que a superfície de ruptura teria cruzado 1,87 camadas para a laje L50C, 1,75 camadas para a laje L50F, 1,92 camadas para a laje L63C e 1,99 camadas para a laje L63F.

A última coluna da Tabela 5.3 apresenta um comparativo entre as cargas estimadas de ruptura, considerando a total contribuição do concreto e da armadura de cisalhamento, com a carga de ruptura experimental. Os resultados encontrados mostraram que as lajes L63C e L63F apresentaram resultados mais conservadores. A explicação provável se dá porque a superfície de ruptura tenha cortado a segunda camada mais ao topo da mesma, enquanto que no cálculo levamos em conta a contribuição de toda a barra do “stud”.

Tabela 5.2: Contribuições do concreto e da armadura de cisalhamento na resistência à punção das lajes

Laje	d (mm)	s_{ro}/s_r (mm)	V_{ck} (kN)	V_u (kN)	$A_{sw} \cdot f_y$ (kN)	$\frac{V_u - 0,75 \cdot V_{ck}}{A_{sw} \cdot f_y}$	$\frac{V_u - V_{ck}}{A_{sw} \cdot f_y}$	$\frac{n \cdot A_{sw} \cdot f_y + V_{ck}}{V_u}$
LRC	103	-	260,0	320,0	-	-	-	-
L50C	106	50 / 85	274,8	518,0	152,1	2,051	1,599	1,118
L50F	99	50 / 85	178,6	402,0	128,4	2,088	1,740	1,083
L63C	109	50 / 85	288,4	551,0	165,5	2,022	1,587	1,460
L63F	113	50 / 85	222,9	396,0	150,1	1,524	1,153	1,321
V_{ck} : Parcela resistente do concreto à punção, segundo EC2/2014; V_u : Carga experimental de ruptura; n : Número de camadas = 2.								

Na Tabela 5.3 é mostrada uma comparação entre a carga de ruptura experimental e a carga de ruptura teórica, igual a 75% da parcela da contribuição

do concreto, acrescida à parcela da contribuição da armadura de cisalhamento. Para efeito de cálculo, foi considerada uma tensão de escoamento efetiva de 345,0 MPa. Todas as lajes com armadura de cisalhamento tiveram suas cargas estimadas menores que as obtidas experimentalmente.

Tabela 5.3: Contribuições do concreto e da armadura de cisalhamento na resistência à punção das lajes

Laje	d (mm)	s_{ro}/s_r (mm)	V_{ck} (kN)	$0,75 \cdot V_{ck}$ (kN)	$\frac{1,5 \cdot d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_y$ (kN)	$V_{teór}$ (kN)	V_u (kN)	$\frac{V_{teór}}{V_u}$
LRC	103	-	260,0	195,0	-	195,0	320,0	0,609
L50C	106	50 / 85	274,8	206,1	152,1	358,2	518,0	0,691
L50F	99	50 / 85	178,6	133,9	128,4	262,3	402,0	0,652
L63C	109	50 / 85	288,4	216,3	165,5	381,8	551,0	0,692
L63F	113	50 / 85	222,9	167,2	150,1	317,3	396,0	0,801
$V_{teór}$: Soma das parcelas resistentes do concreto e da armadura de cisalhamento à punção, segundo EC2/2014;								
V_u : Carga experimental de ruptura.								

5.4 RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO PELOS CÓDIGOS NORMATIVOS, PELO MÉTODO DA SUPERFÍCIE DE RESISTÊNCIA MÍNIMA AO CISALHAMENTO E OS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

Na Tabela 5.4 são mostradas as características principais das lajes nas comparações de cargas experimentais com as estimadas pelos códigos ABNT NBR 6118/2014, ACI 318/2019 e EC2/2014 e pelo método da superfície de resistência mínima ao cisalhamento (SRMC).

Tabela 5.4: Principais características para dimensionamento das lajes

Laje	d (mm)	h (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)
LRC	103	156	1,074	47,2
L50C	106	157	1,067	48,5
L50F	99	161	1,041	46,6
L63C	109	161	1,041	49,9
L63F	113	161	1,041	46,5

5.4.1 ABNT NBR 6118/2014

O comparativo dos resultados experimentais com o previsto pelo cálculo de acordo com a ABNT NBR 6118/2014 são apresentados na Tabela 5.5. Com relação ao resultado ($F_{sk, teste}/F_{sk, calc}$) é possível observar que todas as lajes apresentaram uma carga de ruptura maior do que a prevista no código. Além disso, todos os modos de ruptura foram compatíveis com os modos de ruptura previstos pelo código.

Por fim, a laje LRC (sem armadura de cisalhamento) foi a que apresentou maior carga de ruptura quando comparada a carga prevista pela norma.

Tabela 5.5: Comparação entre cargas experimental e estimada – ABNT NBR 6118/2014

Laje	$F_{sk1}^{(1)}$ (kN)	$F_{sk2}^{(2)}$ (kN)	$F_{sk3}^{(3)}$ (kN)	$F_{sk3}^{(4)}$ (kN)	$F_{sk, calc}$ (kN)	$F_{sk, teste}$ (kN)	$F_{sk, teste}$ $/F_{sk, calc}$
LRC	638,0	224,0	-	-	224,0	320,0	1,42
L50C	671,0	-	445,0	534,0	445,0	518,0	1,16
L50F	608,0	-	343,0	361,0	343,0	402,0	1,17
L63C	705,0	-	429,0	550,0	429,0	551,0	1,28
L63F	692,0	-	361,0	413,0	361,0	396,0	1,09
(1) Carga limite para laje com ou sem armadura de cisalhamento referente ao esmagamento do concreto; (2) Carga limite para laje sem armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando adjacente ao pilar; (3) Carga limite para laje com armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando adjacente ao pilar e cruzando as armaduras de cisalhamento; (4) Carga limite para laje com armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando após as armaduras de cisalhamento e externa as mesmas.							

5.4.2 ACI 318/2019

O comparativo dos resultados experimentais com o previsto pelo cálculo de acordo com o ACI 318/2019 são apresentados na Tabela 5.6. Com relação ao resultado ($F_{sk, teste}/F_{sk, calc}$) é possível observar que as lajes L50C e L63C não apresentaram uma carga de ruptura maior do que a prevista no código. Porém, todos os modos de ruptura foram compatíveis com os modos de ruptura previstos pelo código. Por fim, a laje LRC (sem armadura de cisalhamento) foi a que apresentou maior carga de ruptura quando comparada a carga prevista pela norma.

5.4.4 *fib* Model Code (2010)

O comparativo dos resultados experimentais com o previsto pelo cálculo de acordo com a *fib* Model Code (2010) são apresentados na Tabela 5.8. Com relação ao resultado ($F_{sk, teste}/F_{sk, calc}$) é possível observar que todas as lajes apresentaram uma carga de ruptura maior do que a prevista no código. Os modos de ruptura foram compatíveis com os modos de ruptura previstos pelo código.

Por fim, a laje L63C foi a que apresentou maior carga de ruptura quando comparada a carga prevista pela norma.

Tabela 5.8: Comparação entre cargas experimental e estimada – *fib* Model Code (2010)

Laje	$F_{sk1}^{(1)}$ (kN)	$F_{sk2}^{(2)}$ (kN)	$F_{sk3}^{(3)}$ (kN)	$F_{sk3}^{(4)}$ (kN)	$F_{sk, calc}$ (kN)	$F_{sk, teste}$ (kN)	$F_{sk, teste}/F_{sk, calc}$
LRC	806,0	288,0	-	-	288,0	320,0	1,11
L50C	777,0	-	498,0	630,0	332,0	518,0	1,04
L50F	599,0	-	395,0	491,0	295,0	402,0	1,02
L63C	912,0	-	427,0	730,0	285,0	551,0	1,28
L63F	829,0	-	311,0	593,0	207,0	396,0	1,27
(1) Carga limite para laje com ou sem armadura de cisalhamento referente ao esmagamento do concreto; (2) Carga limite para laje sem armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando adjacente ao pilar; (3) Carga limite para laje com armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando adjacente ao pilar e cruzando as armaduras de cisalhamento; (4) Carga limite para laje com armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando após as armaduras de cisalhamento e externa as mesmas.							

5.4.5 MÉTODO DA SUPERFÍCIE DE RESISTÊNCIA MÍNIMA AO CISALHAMENTO (SRMC)

O comparativo dos resultados experimentais com o previsto pelo cálculo de acordo com SRMC são apresentados na Tabela 5.9. Com relação ao resultado ($F_{sk, teste}/F_{sk, calc}$) é possível observar que todas as lajes apresentaram uma carga de ruptura maior do que a prevista no código.

O cálculo das lajes pelo método SRMC tem variação do ângulo de inclinação da linha de ruptura. Os menores valores da resistência ao cisalhamento por este

método foram encontrados entre os ângulos de 30 a 35°, o que confirma os ângulos encontrados nos ensaios experimentais e nas literaturas.

Por fim, a laje LRC (sem armadura de cisalhamento) foi a que apresentou maior carga de ruptura quando comparada a carga prevista pela norma.

Tabela 5.9: Comparação entre cargas experimental e estimada – SRMC

Laje	$F_{sk1}^{(1)}$ (kN)	$F_{sk2}^{(2)}$ (kN)	$F_{sk3}^{(3)}$ (kN)	$F_{sk3}^{(4)}$ (kN)	$F_{sk,calc}$ (kN)	$F_{sk,teste}$ (kN)	$F_{sk,teste} / F_{sk,calc}$
LRC	638,0	218,0	-	-	218,0	320,0	1,46
L50C	671,0	-	442,5	700,7	442,5	518,0	1,17
L50F	608,0	-	359,6	557,4	359,6	402,0	1,12
L63C	705,0	-	398,2	641,1	398,2	551,0	1,38
L63F	692,0	-	288,8	582,5	288,8	396,0	1,37
(1) Carga limite para laje com ou sem armadura de cisalhamento referente ao esmagamento do concreto; (2) Carga limite para laje sem armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando adjacente ao pilar; (3) Carga limite para laje com armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando adjacente ao pilar e cruzando as armaduras de cisalhamento; (4) Carga limite para laje com armadura de cisalhamento e superfície de ruptura iniciando após as armaduras de cisalhamento e externa as mesmas.							

5.4.6 RESUMO DOS MÉTODOS

A Tabela 5.10 apresenta um resumo entre as cargas experimentais e a razão obtidas pelos códigos e pelo método SRMC, apresentados anteriormente e a Tabela 5.11 apresenta a média entre as razões obtidas pelos mesmos códigos e pelo método SRMC.

Tabela 5.10: Razões entre carga experimental e as calculadas pelos códigos e método SRMC

Lajes	Experi- mental	ABNT NBR 6118/2014	ACI 318/2019	EC2/2014	<i>fib</i> Model Code (2010)	Método SRMC
	$F_{sk,teste}$ (kN)	$F_{sk,teste} / F_{sk,calc}$	$F_{sk,teste} / F_{sk,calc}$	$F_{sk,teste} / F_{sk,calc}$	$F_{sk,teste} / F_{sk,calc}$	$F_{sk,teste} / F_{sk,calc}$
LRC	320,0	1,42	1,32	1,23	1,11	1,46
L50C	518,0	1,16	0,92	1,10	1,04	1,17
L50F	402,0	1,17	1,01	1,12	1,02	1,12
L63C	551,0	1,28	0,96	1,20	1,28	1,38
L63F	396,0	1,09	1,11	1,23	1,27	1,37

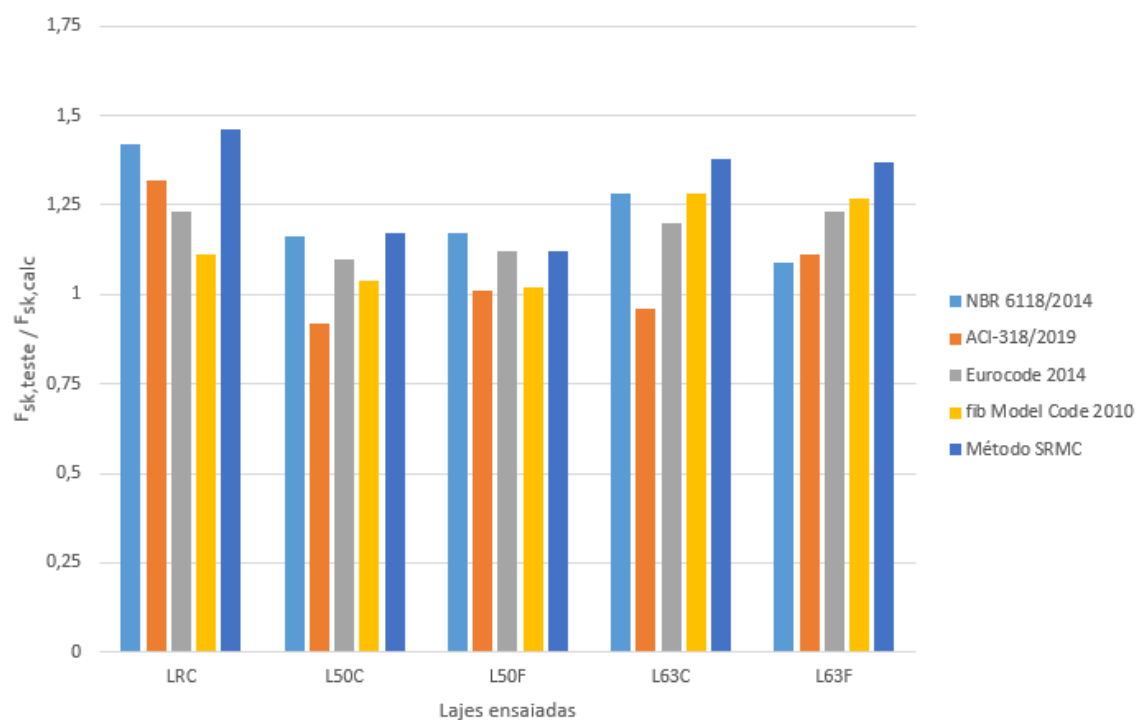


Figura 5.19: Comparação entre $F_{sk, teste} / F_{sk, calc}$ das lajes ensaiadas para cada método de cálculo analisado das lajes

Tabela 5.11: Média entre as razões da carga experimental e as calculadas pelos códigos e método SRMC

Lajes	Média
LRC	1,31
L50C	1,08
L50F	1,09
L63C	1,22
L63F	1,21

CAPÍTULO 06

6 CONCLUSÕES.

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões baseadas nas análises dos resultados obtidos neste trabalho com o ensaio de 05 lajes planas de concreto armado. As variáveis principais desta pesquisa foram: a) lajes com e sem armaduras de cisalhamento; b) lajes com e sem aberturas faceando o pilar – duas aberturas de 100 mm de diâmetro; e c) taxa de armadura de cisalhamento – lajes compostas por cinco camadas de armadura, compostas por oito ou doze linhas de “studs”, distribuídos radialmente ao redor do pilar.

6.1 CARGAS E MODO DE RUPTURA

Todas as lajes testadas apresentaram ruptura, tendo sido a pesquisa direcionada para este modo de ruptura. As lajes com armadura de cisalhamento apresentaram ruptura à punção do tipo interna, com a superfície de ruptura iniciando-se na face do pilar e cruzando as três primeiras camadas de armadura de cisalhamento. Já a laje sem armadura de cisalhamento, a superfície de ruptura iniciou-se na face do pilar.

A existência de armaduras de cisalhamento, contribui para a resistência à punção de lajes lisas. A inserção de armadura de cisalhamento mostrou que a carga última à punção aumentou em 72% quando comparada a laje sem armadura de cisalhamento com a laje com armadura de cisalhamento e sem aberturas que apresentou maior carga de ruptura.

Já a laje com armadura de cisalhamento e com aberturas mostrou que a carga última à punção aumentou em 25% quando comparada a laje sem armadura de cisalhamento.

A existência das aberturas próximas ao pilar, afetou a resistência à punção de lajes lisas. Resultados mostram que a carga última à punção diminuiu em até 28% quando se reduz a porção resistente do concreto na região crítica, com duas aberturas de diâmetro de 100 mm posicionadas em faces opostas do pilar.

Já o uso de armadura de cisalhamento em lajes sem aberturas apresenta resultados bastante satisfatórios. Os resultados desta pesquisa também mostram que o uso desta armadura pode ser uma possibilidade de se aumentar a resistência ao puncionamento em lajes lisas com aberturas a fim de compensar a perda da resistência devido a inserção de aberturas. Este aumento é até superior quando comparado com laje sem armadura de cisalhamento e sem aberturas.

As lajes ensaiadas com armadura de cisalhamento e de 12 linhas por camada (Lajes L50C e L50F), tiveram menor relação entre carga de ruptura x carga calculada quando comparadas com as lajes ensaiadas com armadura de cisalhamento e de 8 linhas por camada (Lajes L63C e L63F). Isso mostra que quanto maior a distribuição das armaduras por camadas (superfície mais homogênea), menor é a discrepância entre os resultados numéricos e os experimentais.

6.2 DESLOCAMENTO VERTICAL

Em todas as lajes ensaiadas, até o aparecimento da primeira fissura (radial) não houve acréscimo significativo nos deslocamentos verticais com o aumento do carregamento (Carga x Deslocamento lineares). Após o aparecimento das primeiras fissuras, o gráfico de cada laje apresentou uma inclinação, deslocando uma porção maior para um mesmo acréscimo de carga, indicando perda de rigidez devido o aparecimento de fissuras.

Esses deslocamentos se mostraram lineares até aproximadamente 75 a 80% da carga de ruptura de cada laje. Após esse estágio de carregamento, o gráfico indica um deslocamento não linear.

Os deslocamentos verticais em lajes com aberturas posicionadas adjacentes e em faces opostas ao pilar (L50F e L63F), em comparação com lajes sem furos (L50C e L63C, respectivamente), são sempre maiores indicando perda de rigidez devido a inserção das aberturas.

6.3 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA

Os pontos da armadura de flexão do bordo superior, localizados internamente à área de carregamento (pilar), apresentaram as maiores deformações. Este resultado é evidenciado pelo fato de ser a região de maior curvatura da laje.

A armadura mais solicitada da laje sem armadura de cisalhamento (LRC) apresentou início de escoamento (3,46mm/m) na carga de ruptura da laje, porém uma deformação muito distante da deformação que as armaduras de flexão podem apresentar por norma (10,00 mm/m segundo NBR 6118/2014), indicando que a laje rompeu a punção muito antes de uma ruptura a flexão.

Já as armaduras mais solicitadas das lajes com armadura de cisalhamento (L50C, L50F, L63C e L63F) apresentaram escoamento definido (6,90 mm/m para a laje L50F e 20,6 mm/m para a laje L63C), indicando que as lajes romperam a punção, porém bastante solicitadas a flexão. Algumas armaduras tiveram sua deformação específica superior à deformação limite preconizada por norma.

As lajes com armadura de cisalhamento tiveram as armaduras mais solicitadas nas camadas 02 e 03. Essas camadas foram as mais solicitadas pois a ruptura das

lajes foram todas internas, onde a superfície de ruptura é esperada nas camadas 01, 02 e 03.

As armaduras de cisalhamento situadas atrás das aberturas (lajes L50F e L63F), apresentaram deformações bem inferiores quando comparadas as deformações das mesmas camadas das demais armaduras, indicando baixa influência dessas armaduras atrás das aberturas.

Já as linhas das armaduras de cisalhamento situadas nas quinas do pilar, apresentaram deformações superiores quando comparadas as deformações das linhas das demais armaduras, indicando que a forma do pilar influencia nessas armaduras.

6.4 DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

Nas lajes com armadura de cisalhamento e sem aberturas (L50C e L63C) apresentam as maiores deformações (-4,05 mm/m e -3,31 mm/m respectivamente), porém já atingindo deformações características de esmagamento do concreto, sendo que a laje L50C teve deformações do concreto superiores ao valor limite normativo da NBR 6118/2014, que é de 3,5 mm/m.

Outra característica importante nas deformações do concreto, é que os mesmos apresentaram uma curvatura ascendente nos últimos passos de carga. Isso é explicado porque estas lajes apresentaram grandes deformações nos mesmos últimos passos de carga fazendo que os tirantes utilizados para restrição a translação vertical, tivessem uma pequena restrição a rotação. Desta forma o concreto teve uma pequena descompressão nestes últimos passos de carga. Esta pequena restrição a rotação e descompressão do concreto não afetou de forma significativa os ensaios, porém indica que o modelo de ensaio proposto está próximo ao limite aceitável. Em

caso de novos ensaios experimentais com previsão de maiores cargas de ruptura do que as atingidas, o modelo experimental deve ser revisto.

6.5 FISSURAS

O processo de formação das fissuras radiais seguiu características semelhantes tanto para as lajes com e sem aberturas quanto para as lajes com e sem armaduras de cisalhamento.

A primeira fissura radial surgiu em cerca de 40% da carga de ruptura para a laje LRC e cerca de 31% da carga de ruptura para as lajes com armadura de cisalhamento (com ou sem aberturas).

6.6 NORMAS E CÓDIGOS DE PROJETO

Os métodos de cálculo que levam em consideração a existência de furos nas proximidades do pilar utilizados foram a NBR 6118/2014, ACI 318/2019 e EC2/2014.

A ABNT NBR 6118/2014 apresenta estimativas de carga de ruptura mais conservadoras quando comparado aos resultados experimentais obtidos. O valor mais conservador é quando não há armadura de cisalhamento.

O ACI 318/2019 apresenta estimativas de carga de ruptura de algumas lajes menos conservadoras quando comparado aos resultados experimentais. As lajes L50C, L63C e L63F apresentaram valores de carga de ruptura superiores aos obtidos experimentalmente. Além disso, as lajes com armadura de cisalhamento são as que apresentaram maiores cargas de ruptura estimadas quando comparado aos outros códigos.

O EC/2014 apresenta estimativas de carga de ruptura mais conservadoras quando comparado aos resultados experimentais obtidos, porém menos conservadores que os obtidos pela NBR 6118/2014.

O *fib* Model Code (2010) apresenta estimativas de carga de ruptura mais conservadoras quando comparado aos resultados experimentais obtidos. As lajes com mais linhas de armadura por camada (L50C e L50F) apresentaram valores muito próximos aos valores experimentais e a favor da segurança, diferente das lajes com menos linhas de armadura por camada (L63C e L63F). Estas apresentaram valores bastante conservadores quando comparados aos valores experimentais. Lajes com maior distribuição de armaduras de cisalhamento por camada tentem a aproximar a carga de ruptura à carga de resultados numéricos.

O método SRMC apresenta estimativas de carga de ruptura mais conservadoras quando comparado aos resultados experimentais obtidos. As lajes calculadas por este método, foram as que tiveram, em média, valores mais conservadores dentre os cinco métodos utilizados para cálculo.

Dos cinco códigos utilizados para comparar os resultados obtidos experimentalmente, o *fib* Model Code (2010) foi o que ficou mais próximo e com cargas de ruptura a favor da segurança.

6.7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, algumas sugestões para trabalhos:

- Análise do efeito na resistência à punção devido ao posicionamento de aberturas em relação ao pilar;
- Verificação da distância de(s) abertura(s) ao pilar onde provavelmente ela(s) não mais influenciará(ão) na carga de ruptura;

- Verificação da influência de diferentes geometrias de abertura na resistência à punção de lajes lisas;

- Análise da influência do uso de fibras de aço em lajes lisas de concreto armado com furos na resistência à punção;

- Análise e estudo de uma melhor distribuição da armadura de cisalhamento para combater a perda de resistência à punção em lajes lisas de concreto armado com aberturas próximas ao pilar.

CAPÍTULO 07

7 REFERÊNCIAS.

American Concrete Institute. ACI 318-14. **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318R-11)**. Farmington Hills, Michigan, 2014.

ANDRADE, M.A.S. **Punção em Lajes Cogumelo – Estudo do Posicionamento da Armadura de Cisalhamento em Relação à Armadura de Flexão**. Goiânia, Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Civil / UFG. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BORGES L.L.J, MELO G.S. and GOMES R.B., **Punching shear of reinforced concrete flat plates with openings**. ACI Structural Journal, V110, No.4, July-Aug. 2013, pp1-10.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB - FIP. CEB – FIP Model Code Design Code 1990: Final Draft. Bulletin d'Information, CEB, Lousanne, July 1991.

EUROCODE 2, **Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**, CEN, EN 1992D1D1, Brussels, Belgium, 2004, 225 pp.

FERREIRA, M. P. **Punção em Lajes Lisas de Concreto com Armaduras de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados**. 2010. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

GOMES, R. B. (1991). **Punching Resistance of Reinforced Concrete Flat Slabs with Shear Reinforcement**. Polytechnic of Central London, M.Phil / PhD Thesis / October, 1991, 185 p.

GOMES R. B.; SILVA, J. A.. **Punching shear resistance of reinforced concrete flat slabs with openings and rectangular columns**. Bali, Indonesia. Proceedings of the ninth east asia-pacific conference on structural engineering and construction, 2003. v. 1. p. 1-6.

HA,T.; LEE, M.; PARK, J.; KIM, D. **Effects of openings on the punching shear strength of RC flat-plate slabs without shear reinforcement**. The Structural Design of Tall and Special Buildings. 895-911 p. 2015.

KINNUNEN, S.; NYLANDER, H. **Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement**. Meddelande NR 38. Institutionen för Byggnadsstatik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 1960.

KOPPITZ, R.; KENEL, A., KELLER, T. **Punching shear of RC flat slabs – Review of analytical models for new and strengthening of existing slabs**. Engineering Structures 52, 123–130. 2013.

KRÜGER, G., BURDET, O., FAVRE, R., **Punching Strength of R.C. Flat Slabs with Moment Transfer**. **International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs – Proceedings**, TRITADBKN Bulletin 57, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 2000.

- MARQUES, M. G. **Punção em lajes lisas de concreto armado com aberturas adjacentes ao pilar e armadura de cisalhamento**. 2018. 259f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.
- MELO, G. S. S. A., ***Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure***. PhD Thesis, Polytechnic of Central London, London, England, 1990, 214p.
- MUTTONI, A. **Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Without Transverse Reinforcement**. ACI Structural Journal, July/August 2008.
- OUKAILI, N. K.; SALMAN, T. S. **Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Flat Plates with Openings**. *Journal of Structural Engineering*. Volume 20, Número 1, 2014.
- PARK, H., CHOI, K., **Improved Strength Model for Interior Flat Plate–Column Connections Subject to Unbalanced Moment**. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 5, May 2006, pp. 694D704.
- PALHARES, R. A. **Análise Experimental da Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Variação da Ancoragem da Armadura de Cisalhamento**. [Brasília, Distrito Federal] 2018. xxii, 156 p., ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2018.
- REGAN, P.E. **Punching Tests of Concrete Slabs with Riss Star Shear Reinforcement for Riss AG**. School of Architecture & Engineering, University of Westminster, London, 1993.
- REGAN, P.E.; SAMADIAN, F. **Shear reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs**. *The Structural Engineering*, 2001. v. 79. p.24-31.
- RUIZ, M.F.; MUTTONI, A. **Applications of critical shear crack theory to punching of reinforced concrete slabs with transverse reinforcement**. ACI Structural Journal, v. 106, no 4, pg. 485-494, July/August. 2009.
- SALAKAWAY E. F. E.; POLAK, M. A.; SOLIMAN, M. H. **Reinforced concrete slab-column edge connections with shear studs**. International Workshop on Punching Shear Capacity on RC Slabs – Stockholm. 2000.
- SILVA, J.A. (2003). **Punção em Lajes Cogumelo – Pilares Retangulares, Furos e Armadura de Cisalhamento**. Goiânia, Dissertação de Mestrado–Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.
- SOUZA, R. M. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Furos Adjacentes ou Distante de um Pilar Interno**. Brasília. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2004, 171 p.
- TRAUTWEIN, L. M. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Análise Experimental e Numérica**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006, 350p.