UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

DAVID ROSA RODRIGUES

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE TIPOS DE ARMADURA DE CISALHAMENTO PARA COMBATE À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE CONCRETO ARMADO: “STUD RAILS” E “DOUBLE HEADED STUDS”

Goiânia
2009

Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás–UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **[x] Dissertação** **[ ] Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):	David Rosa Rodrigues				
CPF:		E-mail:	engcivil.david@hotmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? [x]Sim [] Não					
Vínculo Empregatício do autor					
Agência de fomento:	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior			Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:		CNPJ:	
Título:	Comparação experimental entre tipos de armadura de cisalhamento para combate à punção em lajes cogumelo de concreto armado: “stud rails” e “Double headed studs”				
Palavras-chave:	Concreto armado, Lajes de concreto, Lajes cogumelo, Lajes planas, Punção (Engenharia civil) e Armadura de cisalhamento				
Título em outra língua:	Experimental comparison between the types of shear reinforcement to combat the punching shear of a reinforced concrete flat slabs: "stud rails" and "double headed studs"				
Palavras-chave em outra língua:	Reinforcement concrete, reinforced concrete flat slabs, punching shear and shear reinforcement				
Área de concentração:	Estruturas e Materiais de Construção.				
Data defesa: (dd/mm/aa)	29/09/2009				
Programa de Pós-Graduação:	Curso de Mestrado em Engenharia Civil.				
Orientador(a):	Ronaldo Barros Gomes				
CPF:		E-mail:	rbggomes@gmail.com		
Co-orientador(a):	Guilherme Sales S. de A. Melo				
CPF:		E-mail:	melog@unb.com.br		

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?[1] [x] total [ ] parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

[ ] Capítulos. Especifique: _____

[ ] Outras restrições: _____Gostaria que não fosse divulgado os anexos.

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

_____ Data: 26 / 01 / 2010

David Rosa Rodrigues

[1] Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

DAVID ROSA RODRIGUES

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE TIPOS DE ARMADURA DE CISALHAMENTO PARA COMBATE À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE CONCRETO ARMADO: “STUD RAILS” E “DOUBLE HEADED STUDS”

Dissertação apresentada ao Curso de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

David Rosa Rodrigues

Orientador: Prof. Ronaldo B. Gomes, Ph.D.

Co-orientador: Prof. Guilherme Sales S. de A. Melo, Ph.D.

Goiânia
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

(GPT/BC/UFG)

Rodrigues, David Rosa.

696c Comparação experimental entre tipos de armadura de cisalhamento para combate à punção em lajes cogumelo de concreto armado [manuscrito]: “Stud rails” e “Double headed studs” / David Rosa Rodrigues. - 2009.

xv, 139 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Barros Gomes; Co-orientador: Prof. Dr. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.

Apêndices.

1. Concreto armado 2. Lajes de concreto 3. Lajes cogumelo – Punção 4. Lajes planas 5. Punção (Engenharia civil) 6. Armadura de cisalhamento I. Título.

CDU: 624.073.135

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE TIPOS DE ARMADURA DE CISALHAMENTO PARA COMBATE À PUNÇÃO EM LAJES COGUMELO DE CONCRETO ARMADO: “STUD RAILS” E “DOUBLE HEADED STUDS”

DAVID ROSA RODRIGUES

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 29 de setembro de 2009, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Ronaldo Barros Gomes, Ph.D. (UFG)
(ORIENTADOR)

Prof. Guilherme Sales S. de A. Melo, Ph.D. (UnB)
(CO-ORIENTADOR)

Prof. Gilson Natal Guimarães, Ph.D. (UFG)
(EXAMINADOR INTERNO)

Prof. Raphael Miranda de Souza, DSc (CEFET – MG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DEDICATÓRIA

A Deus.

Aos meus tão queridos pais José Adolfo e Hilda.

Ao grande amor da minha vida, Líria.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao professor Ronaldo, por me orientar na execução deste trabalho experimental. Por me animar incessantemente na certeza de que embora com todas as minhas limitações pessoais poderia concluir este trabalho.

Ao professor Guilherme, pela co-orientação, incentivos e sugestões para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos grandes amigos Ariovaldo, Fábio e Poliana que me ajudaram em todos os ensaios. Foram amigos, irmãos e pais em alguns momentos.

Aos amigos Avelar, Keyla, Carlos Eduardo, Esdras, Leonardo, Juliano e Lara por estarem sempre dispostos a cooperarem com suas presenças. E a Ana Paula que me pacientemente orientou-me nos cálculos das lajes.

Aos professores e colaboradores do curso de mestrado.

Aos meus pais por me incentivar nos momentos difíceis.

As empresas Realmix e Carlos Campos pela colaboração com materiais e o controle tecnológico do concreto.

À CAPES e ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa.

Ao meu grande amor Líria que me animou pacientemente em todos os momentos e sempre soube me trazer um sorriso.

“Não sei como o mundo me vê. Mas vejo-me como um menino que brinca à beira do mar, encontrando aqui uma concha mais bonita, ali uma pedra mais arredondada,
enquanto o vasto oceano da verdade permanece
inexplorado à minha frente.”

Atribuído a Isaac Newton (1643-1729)

SUMÁRIO

RESUMO..... 09

ABSTRACT..... 10

LISTA DE FIGURAS..... 11

LISTA DE TABELAS..... 16

LISTA DE SÍMBOLOS..... 18

1 INTRODUÇÃO..... 20
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA..... 20
1.2 OBJETIVOS..... 20
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE..... 21

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 22
2.1 DEFINIÇÕES..... 22
2.2 BREVE HISTÓRICO..... 22
2.3 PESQUISAS REALIZADAS..... 25
2.3.1 GOMES (1991)..... 25
2.3.2 CORDOVIL E FUSCO (1995)..... 27
2.3.3 ANDRADE (1999)..... 28
2.3.4 TRAUTWEIN (2001)..... 30
2.3.5 VAZ (2007)..... 30
2.3.6 SOUZA (2008)..... 32
2.4 RESUMO DAS PESQUISAS REALIZADAS..... 34
2.5 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES..... 35
2.5.1 NBR 6118:2003..... 35
2.5.2 CEB-FIP MC 90/1991..... 38
2.5.3 EUROCODE 2/2004..... 41
2.5.4 ACI 318/2005..... 43

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL..... 46
3.1 Características geométricas das lajes..... 46
3.2 Descrição dos ensaios..... 51
3.3 Materiais e armaduras..... 53

3.3.1 Concreto..... 53
3.3.2 Armadura de Flexão..... 54
3.3.3 Armadura de Cisalhamento..... 55
3.4 Instrumentação..... 59
3.4.1 Deslocamentos verticais..... 59
3.4.2 Deformação específica..... 60
3.5 Descrição das principais etapas de preparação dos ensaios..... 64

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... 65
4.1 Materiais..... 65
4.1.1 Concreto..... 65
4.1.2 Aço..... 68
4.2 Armadura de cisalhamento..... 70
4.3 Carga e modo de ruptura..... 71
4.4 Deslocamentos verticais..... 76
4.5 Deformações..... 82
4.5.1 Armadura de flexão..... 82
4.5.2 Armadura de cisalhamento..... 85
4.5.3 Concreto..... 94
4.5.4 Fissuras..... 97
4.6 Comparação das cargas experimentais e métodos de cálculo..... 99
4.6.1 Comparação das cargas experimentais com a laje L1 de SOUZA (2008).... 99
4.6.2 Perímetros de controle das lajes ensaiadas..... 100
4.6.3 ACI 318/2005..... 101
4.6.4 CEB-FIP MC 1990..... 102
4.6.5 EUROCODE 2/2004..... 103
4.6.6 NBR 6118:2003..... 104
4.6.7 Resumo da comparação das cargas de ruptura das lajes..... 105
4.6.8 Análises para sugestões de trabalhos futuros..... 108

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 111
5.1 CONCLUSÕES..... 111
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 113

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 115

APENDICE A - DESLOCAMENTOS VERTICAIS..... 117

APENDICE B - RESULTADOS DOS EXTENSÔMETROS DAS ARMADURAS DE FLEXÃO E CISALHAMENTO..... 121

APENDICE C - RESULTADOS DOS EXTENSÔMETROS DO CONCRETO..... 128

APENDICE D - LEITURAS DAS CÉLULAS DE CARGAS..... 131

APENDICE E - CÁLCULOS DAS CARGAS DE RUPTURA ESTIMADAS..... 133

REGISTRO FOTOGRÁFICO..... 137

RESUMO

Esta pesquisa apresenta os resultados de uma comparação experimental entre os tipos de armadura de cisalhamento “stud rails” e “double headed studs” para combate à punção em lajes cogumelo de concreto armado. Apresenta, também, uma comparação dos resultados experimentais com os previstos segundo o ACI 318/2005, CEB-FIP MC/1990, EUROCODE 2/2004 e a NBR 6118:2003. A motivação foi investigar a eficiência destas armaduras de cisalhamento a procura de diferenças entre elas.

Foram ensaiadas seis lajes maciças de concreto armado à punção centrada, com dimensões 2400 mm x 2400 mm x 150 mm. Foi concretado junto à laje um pilar de seção 500 mm x 200 mm com altura total 850 mm. As principais variáveis foram o tipo de armadura de cisalhamento: “stud rails” x “double headed studs”, o diâmetro dos “studs” e a área de armadura de cisalhamento por camada. As lajes foram ensaiadas até a ruptura.

Foram monitoradas as flechas, deformações da armadura de flexão e cisalhamento. Todas as lajes romperam por punção com superfície de ruptura interna. Os resultados experimentais após serem comparados com os esperados segundo cada norma de cálculo apresentaram valores conservadores.

As lajes do Grupo 1 com “stud rails” apresentaram cargas de ruptura maiores que as do Grupo 2 com “double headed studs”. Os códigos/normas ACI 318/2005, CEB-FIP MC/1990, EUROCODE 2/2004 e a NBR 6118:2003 previram com segurança as cargas de ruptura de todas as lajes.

A base da armadura de cisalhamento tipo “stud rails” avançando dentro do pilar pode ter reduzido a carga de ruptura da Laje L3.

A armadura de cisalhamento tipo “stud rails” apresenta maior facilidade de montagem e execução que a tipo “double headed studs”.

ABSTRACT

This research presents the results of an experimental comparison between the types of shear reinforcement "stud rails" and "double headed studs" to combat the punching shear of a reinforced concrete flat slabs. It also presents a comparison of experimental results with those provided under the ACI 318/2005, CEB-FIP MC/1990, EUROCODE 2/2004 and NBR 6118:2003. The motivation was to investigate the efficiency of these shear reinforcement for the differences between them.

It was tested six slabs of concrete to concentric load, with dimensions of 2400 mm x 2400 mm x 150 mm. It was concreted a column of section 500 mm x 200 mm to 850 mm total height next to the slab. The main variables were the type of shear reinforcement "stud rails" x "double headed studs, the "studs" diameter and the shear reinforcement area per layer. The slabs were tested until the failure.

It was monitored the deflection, reinforcement deformation of bending and shear. All slabs failed by punching with internal surface rupture. The experimental results after being compared with the expected standard in each individual calculation showed conservative values.

Slabs of Group 1 with "stud rails" presented failed loads greater than those in Group 2 with "double headed studs. Codes/standards 318/2005 ACI, CEB-FIP MC/1990, EUROCODE 2 / 2004 and NBR 6118:2003 safely predict the failed loads of all slabs.

The base of the shear reinforcement type "stud rails" moving inside the column may have reduced the failed load of the slab L3.

Shear reinforcement type “stud rails” it is easer of assembly and play than the type “double headed studs”.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Superfícies básicas de ruptura segundo REGAN (1985)..... 24

Figura 2.2 – Efeito da inclinação da superfície de ruptura na resistência à punção segundo REGAN (1985)..... 24

Figura 2.3 – Armadura de Cisalhamento utilizada por GOMES (1991)..... 25

Figura 2.4 – Disposição das armaduras de cisalhamento de GOMES (1991)..... 26

Figura 2.5 – Armadura de Cisalhamento utilizada por CORDOVIL E FUSCO (1995)..... 28

Figura 2.6 – Posicionamento da armadura de cisalhamento de ANDRADE (1999)..... 28

Figura 2.7 – Seção transversal da L3 indicando a superfície de ruptura (ANDRADE, 1999)..... 29

Figura 2.8 – Esquema de ensaio utilizado por VAZ (2007)..... 31

Figura 2.9 – Perímetro crítico em pilares internos segundo a NBR 6118:2003..... 35

Figura 2.10 – Perímetro crítico afastado 2d do último elemento da armadura de cisalhamento segundo a recomendação da NBR6118:2003..... 37

Figura 2.11 – Perímetro de controle segundo o CEB-Fib MC 90/1991..... 38

Figura 2.12 – Perímetro de controle segundo o CEB-Fib MC 1990 para a região externa à armadura de cisalhamento..... 40

Figura 2.13 – Perímetro de controle (u2) conforme o EUROCODE 2 / 2004..... 43

Figura 2.14 – Perímetro crítico a ser considerado segundo recomendações do ACI318/2005..... 43

Figura 2.15 – Perímetro crítico a ser considerado segundo recomendações do ACI318/2005..... 45

Figura 3.1 – Características geométricas das lajes ensaiadas..... 47

Figura 3.2 – Armaduras de cisalhamento “studs on rails” e “double headed studs”…….. 47

Figura 3.3 – Detalhamento das Lajes L1 e L2..... 49

Figura 3.4 – Detalhamento das Lajes L3 a L6..... 50

Figura 3.5 – Laje preparada para o ensaio..... 51

Figura 3.6 – Sistema de ensaios..... 52
Figura 3.7 – Equipamentos utilizados para aplicação da protensão no pilar central..... 53
Figura 3.8 – Armadura de flexão..... 55
Figura 3.9 – Detalhamento do “stud rails” com três camadas..... 56
Figura 3.10 – Detalhamento do “stud rails” com cinco camadas..... 57
Figura 3.11 – “Stud rails” da laje L3..... 57
Figura 3.12 – Armadura de cisalhamento da L3 com linhas instrumentadas..... 57
Figura 3.13 – “Double headed studs”..... 58
Figura 3.14 – “Double headed studs” das lajes L2 e L6……. 58
Figura 3.15 – Vigas para fixação dos relógios comparadores..... 59
Figura 3.16 – Pontos monitorados pelos relógios comparadores..... 60
Figura 3.17 – Sistemas de aquisições de dados dos (EER)..... 61
Figura 3.18 – Posicionamento e numeração dos extensômetros..... 62
Figura 3.19 – Posicionamento dos EER na nas lajes..... 63
Figura 3.20 – Posicionamento dos EER no concreto (face inferior das lajes)..... 63
Figura 4.1 – Gráfico da Resistência à Compressão do Concreto..... 67
Figura 4.2 – Ensaio de caracterização do aço..... 68
Figura 4.3 – Diagramas tensão-deformação das amostras de aço do Grupo 1..... 69
Figura 4.4 – Diagramas tensão-deformação das amostras de aço do Grupo 2..... 69
Figura 4.5 – Detalhes do dispositivo utilizado no ensaio dos “studs”..... 70
Figura 4.6 – Ensaio à tração dos “studs”..... 71
Figura 4.7 – Superfícies de ruptura das lajes L1, L2 e L3..... 73
Figura 4.8 – Superfícies de ruptura das lajes L4, L5 e L6..... 74
Figura 4.9 – Vista superior das lajes após a ruptura..... 75
Figura 4.10 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L1..... 77
Figura 4.11 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L1..... 77
Figura 4.12 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L2..... 77
Figura 4.13 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L2..... 78

Figura 4.14 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L3..... 78
Figura 4.15 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L3..... 78
Figura 4.16 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L4..... 79
Figura 4.17 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L4..... 79
Figura 4.18 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L5..... 79
Figura 4.19 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L5..... 80
Figura 4.20 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L6..... 80
Figura 4.21 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L6..... 80
Figura 4.22 – Deslocamentos verticais medidos do relógio D1 e D6 de todas as lajes..... 81
Figura 4.23 – Deslocamentos verticais medidos do relógio D7 e D12 de todas as lajes..... 81
Figura 4.24 – Carga-deformação da armadura de flexão da L1..... 82
Figura 4.25 – Carga-deformação da armadura de flexão da L2..... 83
Figura 4.26 – Carga-deformação da armadura de flexão da L3..... 83
Figura 4.27 – Carga-deformação da armadura de flexão da L4..... 84
Figura 4.28 – Carga-deformação da armadura de flexão da L5..... 84
Figura 4.29 – Carga-deformação da armadura de flexão da L6..... 85
Figura 4.30 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L1–Linhas 1 e 2..... 86
Figura 4.31 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L1–Linhas 3 e 4..... 86
Figura 4.32 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L2–Linhas 1 e 2..... 87
Figura 4.33 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L2–Linhas 3 e 4..... 87
Figura 4.34 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L3–Linhas 1 e 2..... 88
Figura 4.35 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L3–Linhas 3 e 4..... 88
Figura 4.36 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L3–Linha 5..... 89
Figura 4.37 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L4–Linhas 1 e 2..... 89
Figura 4.38 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L4–Linhas 3 e 4..... 90
Figura 4.39 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L4 – Linha 5..... 90
Figura 4.40 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L5–Linhas 1 e 2..... 91

Figura 4.41 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L5–Linhas 3 e 4..... 91

Figura 4.42 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L5 – Linha 5..... 92

Figura 4.43 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L6–Linhas 1 e 2..... 92

Figura 4.44 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L6–Linhas 3 e 4..... 93

Figura 4.45 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L6 – Linha 5..... 93

Figura 4.46 – Carga-deformação no concreto da L1..... 94

Figura 4.47 – Carga-deformação no concreto da L2..... 95

Figura 4.48 – Carga-deformação no concreto da L3..... 95

Figura 4.49 – Carga-deformação no concreto da L4..... 96

Figura 4.50 – Carga-deformação no concreto da L5..... 96

Figura 4.51 – Carga-deformação no concreto da L6..... 97

Figura 4.52 – Estágio pós–ruptura das lajes L1 a L6..... 98

Figura 4.53 – Comparações das cargas de ruptura experimentais..... 106

Figura 4.54 – Relação de (Vteste) / (Vc, Li-Normas) 107

Figura 4.55 – Perímetro de controle u1 proposto para o CEB-FIP MC 1990, EUROCODE 2/2004 e NBR 6118:2003..... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados das lajes ensaiadas por GOMES (1991)..... 27

Tabela 2.2 – Resultados das lajes ensaiadas por ANDRADE (1999)..... 29

Tabela 2.3 – Resultados das lajes ensaiadas por VAZ (2007)..... 31

Tabela 2.4 – Carga e modo de ruptura das lajes de SOUZA (2008)..... 33

Tabela 2.5 – Principais características das A.C. pesquisadas..... 34

Tabela 3.1 – Características das armaduras de cisalhamento das lajes ensaiadas..... 48

Tabela 3.2 – Dimensões “a” e “b” da Figura 3.3 e Figura 3.4..... 48

Tabela 3.3 – Dosagem do concreto auto-adensável – 30 MPa..... 54

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização do concreto – 1ª concretagem..... 66

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização do concreto – 2ª concretagem..... 66

Tabela 4.3 – Idades e resistências das lajes no dia do ensaio..... 67

Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas do aço do Grupo 1 e 2..... 68

Tabela 4.5 – Resistência à tração dos “studs”..... 70

Tabela 4.6 – Carga de ruptura das lajes..... 72

Tabela 4.7 – Comparação da laje R1 de SOUZA (2008) com os resultados desta pesquisa..... 99

Tabela 4.8 – Perímetros de controle das lajes ensaiadas..... 100

Tabela 4.9 – Cargas e modos de ruptura estimados pelo ACI – 318/2005..... 101

Tabela 4.10 – Cargas e modos de ruptura estimados pelo CEB-FIP MC 1990..... 102

Tabela 4.11 – Cargas e modos de ruptura estimados pelo EUROCODE 2/2004..... 103

Tabela 4.12 – Cargas e modos de ruptura estimados pela NBR 6118:2003..... 104

Tabela 4.13 – Comparações das cargas de ruptura experimentais..... 105

Tabela 4.14 – Comparação da carga de ruptura experimental em relação à carga de ruptura de uma laje sem armadura de cisalhamento, Vc, Li-normas..... 106

Tabela 4.15 – Cálculo de Vcalc com coeficientes de segurança iguais a 1,0..... 108

Tabela 4.16 – Cálculo de VRd(2)=Vcalc proposto para o ACI 318/2005, CEB-FIP MC 1990, EUROCODE 2/2004 e NBR 6118:2003..... 110

Tabela 5.1 – Principais características dos tipos de armadura de cisalhamento “stud rails” e “double headed studs”..... 113

Tabela 5.2 – Detalhamento das propostas sugeridas..... 114

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{sw}	Área da armadura de cisalhamento
A.C.	Armadura de cisalhamento
b	Largura da chapa de aço utilizada na confecção dos "*studs*"
d	Altura efetiva da laje
E_c	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto
E_s	Módulo de elasticidade do aço
EER	Extensômetro de resistência elétrica
e_u	Excentricidade de carga última
F_{sd}	Força ou reação concentrada de cálculo
F_{cr}	Força radial do concreto do modelo teórico de Gomes (1991)
F_{ct}	Força tangencial do concreto do modelo teórico de Gomes (1991)
F_{st}	Força tangencial da armadura de flexão do modelo teórico de Gomes (1991)
F_e	Força da armadura de cisalhamento do modelo teórico de Gomes (1991)
f_c	Resistência a compressão do concreto
f_t	Resistência a tração por compressão diametral
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_u	Tensão de ruptura do aço
f_{en}	Tensão atuante no n-ésimo elemento do modelo teórico de Gomes (1991)
f_{ywd}	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento
h	Altura total da laje
k	Coeficiente em função da altura útil
M_u	Momento
n	Número de elementos da armadura de cisalhamento
V_{teste}	Carga de ruptura das lajes
P_{teste}	Carga de ruptura das lajes
P_u	Carga de ruptura das lajes
S_0	Distância entre o primeiro elemento cisalhante e a face do pilar
S_r	Distância entre elementos da armadura de cisalhamento
V_{Rd}	Força cortante resistente
$V_{Rd,c}$	Força cortante resistente da armadura do concreto
$V_{Rd,s}$	Força cortante resistente da armadura de cisalhamento
V_{calc}	Força cortante resistente estimada pelas normas
V_{Ed}	Valor da carga concentrada de cálculo
V_u	Força nominal atuante com a contribuição do concreto e da armadura
V_c	Força cortante resistida pelo concreto
V_s	Força cortante resistida pela armadura de cisalhamento
u_0	Perímetro de controle junto ao pilar
u_1	Perímetro de controle a d/2, 1,5d ou 2,0d da face do pilar
u_2	Perímetro de controle a d/2, 1,5d ou 2,0d da última camada de AC

α_1	Ângulo entre a armadura de cisalhamento e o plano da laje
α_2	Ângulo entre a as linhas de armadura de cisalhamento
α_3	Ângulo entre a as linhas de armadura de cisalhamento
α_v	Coeficiente em função da resistência do concreto
β	Coeficiente que leva em conta os efeitos da excentricidade da carga
ε_y	Deformação correspondente ao escoamento do aço
ε_u	Deformação última do concreto
Ø	Diâmetro das barras de aço
Ψ	Rotação das lajes
τ_{sd}	Tensão solicitante cisalhante de cálculo
τ_{rd2}	Tensão de cisalhamento na primeira superfície crítica
θ	Ângulo entre a fissura de cisalhamento e o plano horizontal
ρ	Taxa de armadura de flexão
ξ	Coeficiente dado em função da altura da laje

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Devido às necessidades arquitetônicas ou de projetos complementares, e ainda, recomendações estruturais para obtenção de vãos maiores é possível optar como solução estrutural a utilização da laje cogumelo.

A laje cogumelo faz parte de um sistema estrutural alternativo ao convencional que é constituído de lajes, vigas e pilares. É um modelo em que a laje apóia-se diretamente sobre o pilar transmitindo todos os esforços sem a necessidade de algum outro elemento estrutural intermediário. Sem a presença de vigas permite-se uma maior flexibilidade na concepção da arquitetura, possibilitando uma redução aos limites de contorno dos ambientes. E quanto à sua execução pode-se considerar uma redução na quantidade de formas.

Contudo em uma laje cogumelo pode ocorrer na região de ligação da laje com o pilar uma ruptura por punção, tornando-se o principal ponto de interesse deste sistema. A utilização de “drop panels” e capitéis na laje podem melhorar a resistência à punção, no entanto apresentam a desvantagem de não apresentarem tetos lisos. Outra solução é a utilização de armadura de cisalhamento, pois além de possibilitarem tetos lisos podem proporcionar certa ductilidade nas ligações laje-pilar.

Entre os diversos tipos de armadura de cisalhamento como: estribos, barras dobradas, “shearheads” (perfis metálicos) e segmentos de perfis metálicos, estão os do tipo conectores tipo pino, conhecidos como “studs”. Os “studs” quanto a sua forma construtiva podem ser classificados em “stud rails” quando os pinos estão fixados em uma chapa de ancoragem inferior contínua. E “double headed studs” quando os pinos estão fixados a chapas de ancoragem na extremidade inferior de forma individual

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é investigar o comportamento de lajes cogumelo de concreto armado submetidas à punção com a utilização de armadura de

cisalhamento do tipo “stud rails” e “double headed studs”. Desta investigação pode-se inferir a respeito de uma possível comparação da eficiência de cada armadura de cisalhamento.

Serão comparados, ainda, os resultados experimentais com os esperados entre os diversos métodos e códigos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

São apresentados nesta dissertação o total de cinco capítulos, incluindo introdução, conclusões e anexos.

O Capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica constando de pesquisas anteriores e atuais. São relacionados diversos tipos de armadura de cisalhamento utilizada pelos autores enfocando, com sua utilização, o aumento da carga de ruptura das lajes.

O Capítulo três apresenta o programa experimental utilizado nesta pesquisa. Foi utilizado um modelo anteriormente calibrado que possibilitasse a comparação dos tipos de armadura de cisalhamento propostos. Os ensaios foram realizados no laboratório de estruturas da Universidade Federal de Goiás.

O Capítulo quatro apresenta os resultados obtidos nos ensaios, como: deformações, deslocamentos, cargas e modos de ruptura das lajes. Também são mostradas as características dos materiais utilizados.

O Capítulo cinco apresenta a análise dos resultados obtidos através de comparações com resultados teóricos e de pesquisas anteriores. São apresentadas, também, as principais conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

Os Anexos apresentam os valores de dados coletados como: deformações, deslocamentos, relatório fotográfico e estágio de aplicação do carregamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÕES

A ruptura por punção acontece no instante em que é aplicada suma força concentrada sobre uma respectiva área de um elemento estrutural plano (laje) promovendo esforços de cisalhamento e uma possível ruptura na ligação laje-pilar.

A NBR – 6118:2003 define punção como: “ O esforço de punção é definido como o Estado Limite Último determinado por cisalhamento no entorno de forças concentradas. Ele é diferente do Estado Limite Último determinado por cisalhamento em seções planas solicitadas à força cortante”.

O sistema estrutural composto por lajes cogumelo é definido somente por lajes apoiando-se diretamente aos pilares sem a necessidade da disposição de vigas para transmissão dos esforços das lajes.

A região próxima ao pilar por estar submetida a altas solicitações de flexão e cisalhamento pode ser considerada como o ponto frágil do sistema. Como forma de melhorar a resistência da ligação laje-pilar pode ser feito o aumento da espessura da laje entorno ao pilar. Outra forma é a inserção de armadura de cisalhamento, aonde a força cisalhante atuante alem de ser resistida pelo concreto daquela região terá uma contribuição da armadura de cisalhamento.

2.2 BREVE HISTÓRICO

Atribui-se o surgimento das lajes cogumelo a TURNER apud TAKEYA (1981) em 1905 nos Estados Unidos. Avançando os estudos, em 1913 TALBOT apud TAKEYA (1981) apresentou um dos primeiros estudos relacionados à punção. A princípio foi uma pesquisa destinada ao estudo de sapatas, obtendo um resultado de ruptura por punção em vinte destas peças.

TALBOT (1913) observou que a punção ocorre segundo uma superfície tronco-cônica inclinada a 45° em relação ao plano horizontal e que a resistência à punção era maior nas sapatas com maior armadura de flexão. Para verificação da punção, Talbot propôs um método empírico onde a verificação era feita tomando-se como base uma tensão nominal dada pela razão da carga aplicada pela área formada pela altura útil e o perímetro de contorno crítico, este contorno deveria ser tomado paralelo ao pilar e distante “d” de sua face.

ELSTNER e HOGNESTAD (1956) apud GOMES (1991) apresentaram uma primeira proposta para no cálculo da resistência à punção inserindo a contribuição da armadura de cisalhamento.

Somente em 1960 foi apreciada a primeira teoria racional reconhecida modelando o fenômeno da punção proposta por KINNUNEN e NYLANDER (1960). Foram realizados ensaios experimentais em 43 lajes circulares de concreto armado sem armadura de cisalhamento com 15 cm de espessura e aproximadamente 170 cm de diâmetro. A coluna central de teste para simulação de pilares possuía diâmetros de 5, 15 e 30 cm. Foram utilizados três tipos de disposições para armadura de flexão: radial, em malha e mista.

Para ajudar nas hipóteses feitas na criação do modelo racional de cálculo, além das 43 lajes ensaiadas, foram ensaiadas mais 18 lajes onde a superfície de ruptura foi simulada artificialmente através de um cone de papelão situado 4 cm do fundo da laje e disposto com a geratriz inclinada a 45% com o plano horizontal. O modelo racional apresentou resultados semelhantes aos dos ensaios para as lajes com armadura de flexão circular. Nas lajes armadas nas duas direções à flexão com as armaduras dispostas ortogonalmente a carga prevista foi cerca de 20 % menor que as observadas nos ensaios. Com base neste modelo KINNUNEN (1963) demonstrou como a carga e as deformações de punção em lajes com armadura de flexão ortogonais sem armadura de cisalhamento são influenciadas pelo efeito de membrana e o efeito de pino.

SHEHATA (1985) apresentou um modelo racional de cálculo para lajes cogumelo de concreto armado sem armadura de cisalhamento.

REGAN (1985) apud ANDRADE (1999) sugere três possíveis superfícies de ruptura em uma laje cogumelo com armadura de cisalhamento, tais como na Figura 2.1.

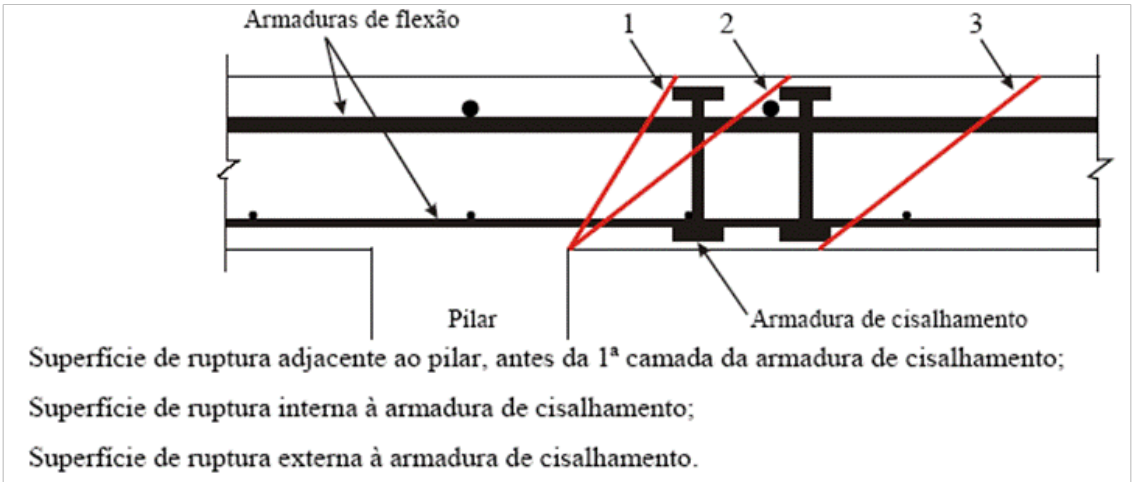


Figura 2.1 – Superfícies básicas de ruptura segundo REGAN (1985)

O autor também propõe que uma laje cogumelo sem armadura de cisalhamento possui uma superfície de ruptura com raiz na face do pilar e uma inclinação cerca de 25º com o plano horizontal. Ao se adicionar a esta laje uma camada de armadura de cisalhamento que force a mudança na inclinação da superfície de ruptura, ocorre um acréscimo na contribuição de resistência do concreto na carga de ruptura. Este acréscimo é moderado até que a inclinação se aproxime de 45º e, a partir desta inclinação, o aumento vai sendo bastante significativo, como mostrado na Figura 2.2.

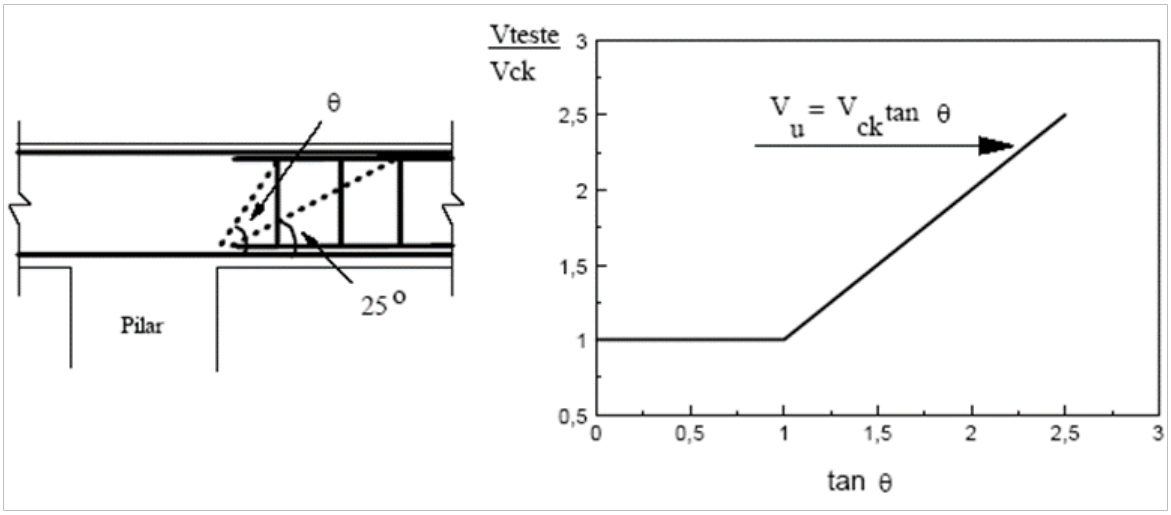


Figura 2.2 – Efeito da inclinação da superfície de ruptura na resistência à punção segundo REGAN (1985).

2.3 PESQUISAS REALIZADAS

2.3.1 GOMES (1991)

GOMES (1991) ensaiou lajes cogumelo de concreto armado com distribuições em dupla cruz e radial para armadura de cisalhamento. Os testes foram realizados com uma forma de “studs” feitos com vigas metálicas de seção I cortadas, como na Figura 2.3. Neste estudo os “studs” foram ensaiados em diversas posições e quantidades, sendo dobrada a carga de ruptura à punção se comparada a uma laje sem armadura de cisalhamento.

A dimensão das lajes ensaiadas foi de 3000 mm x 3000 mm com 200 mm de espessura com a aplicação de carga centrada e a Figura 2.4 mostra a distribuição das armaduras de cisalhamento utilizadas nas lajes. As cargas de ruptura das lajes ensaiadas pelo autor estão apresentadas na Tabela 2.1.

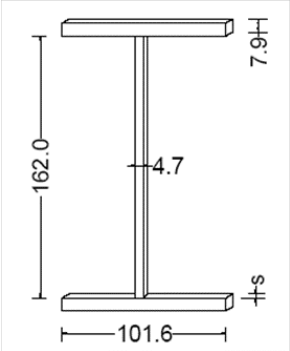


Figura 2.3 – Armadura de Cisalhamento utilizada por GOMES (1991)

O autor idealiza um modelo teórico para lajes com armadura de cisalhamento no qual podem ser observadas as seguintes forças atuantes: F_{cr} - força radial do concreto; F_{ct} - força tangencial do concreto; F_{st} - força tangencial da armadura de cisalhamento; F_{sr} - força radial da armadura de flexão; F_e - força de cisalhamento. E conclui quanto ao tipo de distribuição de armadura de cisalhamento a distribuição radial apresentou melhor desempenho que a distribuição em dupla cruz. Sendo possível aumentar em até 100% a resistência à punção de lajes cogumelo com a utilização de armadura de cisalhamento.

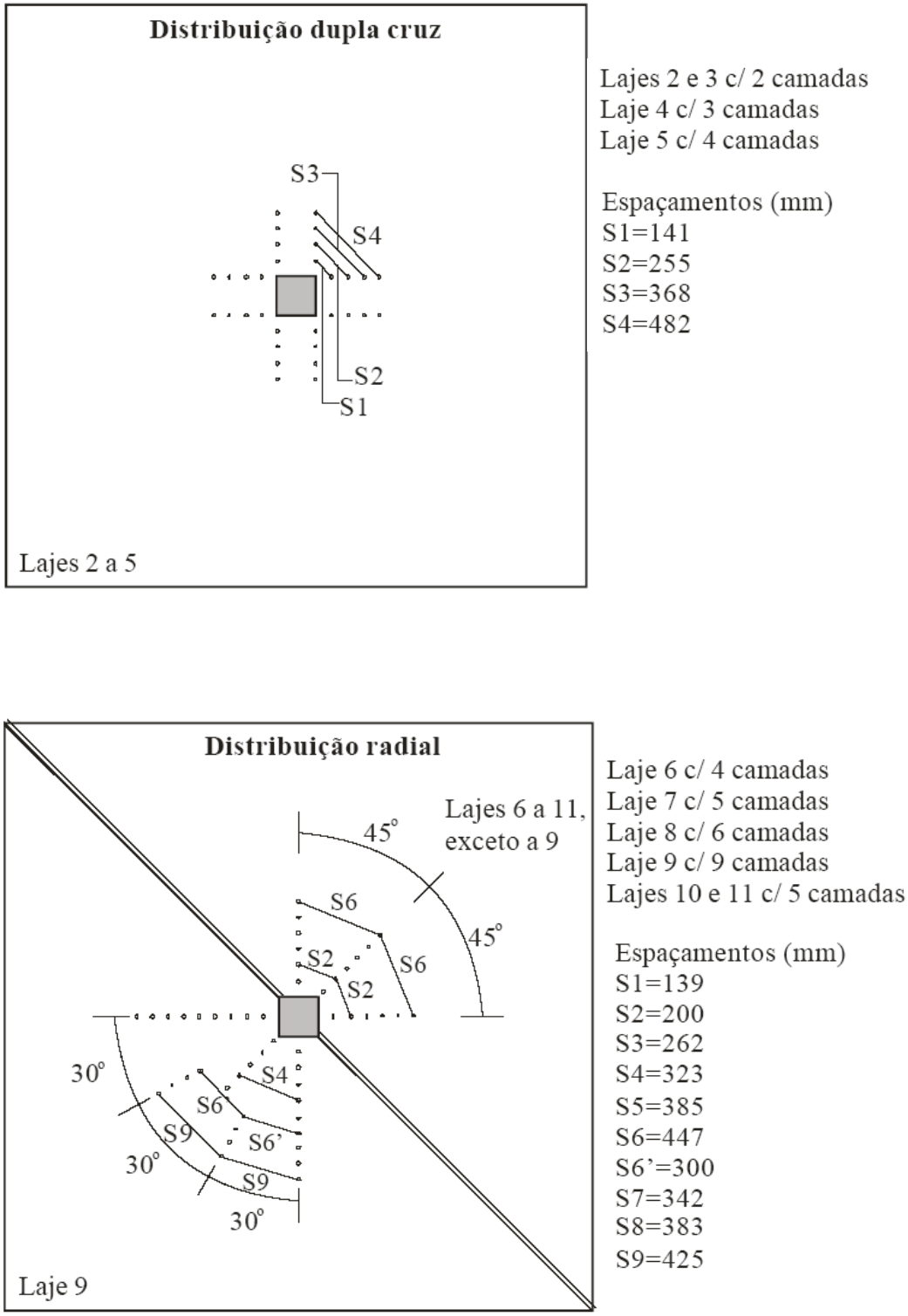


Figura 2.4 – Disposição das armaduras de cisalhamento de GOMES (1991)

Tabela 2.1 – Resultados das lajes ensaiadas por GOMES (1991)

Lajes	d (mm)	f_c (MPa)	Ø (mm)	Âng. Entre linhas	Nº de camadas	Distribuição	P_{teste} (MPa)	Modo de ruptura
L1	159	50,3	-	-	-	-	560	Punção
L1A	159	51,4	-	-	-	-	587	Punção
L2	153	43,1	6,0	90º	2	Cruz	693	Interna
L3	158	49,0	6,9	90º	2	Cruz	773	Interna/externa
L4	159	40,1	8,0	90º	3	Cruz	853	Externa
L5	159	43,4	10,0	90º	4	Cruz	853	Externa
L6	159	46,7	10,0	45º	4	Radial	1040	Externa
L7	159	42,3	12,0	45º	5	Radial	1120	Externa
L8	159	42,6	12,0	45º	6	Radial	1200	Externa
L9	159	50,0	12,2/10,0	45º/22,5º	9/5/4	Radial	1227	Externa
L10	154	44,2	6,0	45º	5	Radial	800	Interna
L11	154	43,2	6,9	45º	5	Radial	907	Interna

– ρ=1,20%; h=200 mm; f_y=430 MPa;

– Número de linhas: 8; S_0=80 mm; S_r=80 mm;

– Punção: ruptura por punção;

– Interna: ruptura por punção com superfície cruzando a armadura de cisalhamento;

– Externa: ruptura por punção com superfície externa a região de armadura de cisalhamento;

2.3.2 CORDOVIL E FUSCO (1995)

CORDOVIL E FUSCO (1995) estudaram o comportamento de lajes cogumelo com armadura de cisalhamento, constituídas por elementos tipo pino com chapas de ancoragem soldadas na extremidade, como mostra a Figura 2.5. Foram ensaiadas quatro lajes com armadura de cisalhamento, quadradas com 1540 mm de lado e espessura igual a 120 mm e uma área carregada de 150 x 250 mm.

Duas destas lajes foram submetidas a uma carga centrada e as outras foram submetidas a uma carga com excentricidade de 400 mm. Comparando-se as lajes com armadura de cisalhamento com as lajes sem armadura de cisalhamento, ocorreu um aumento

da resistência á punção em torno de 17% para as lajes submetidas a carregamento simétrico e para o caso das lajes com carregamento excêntrico o ganho foi de 54%.

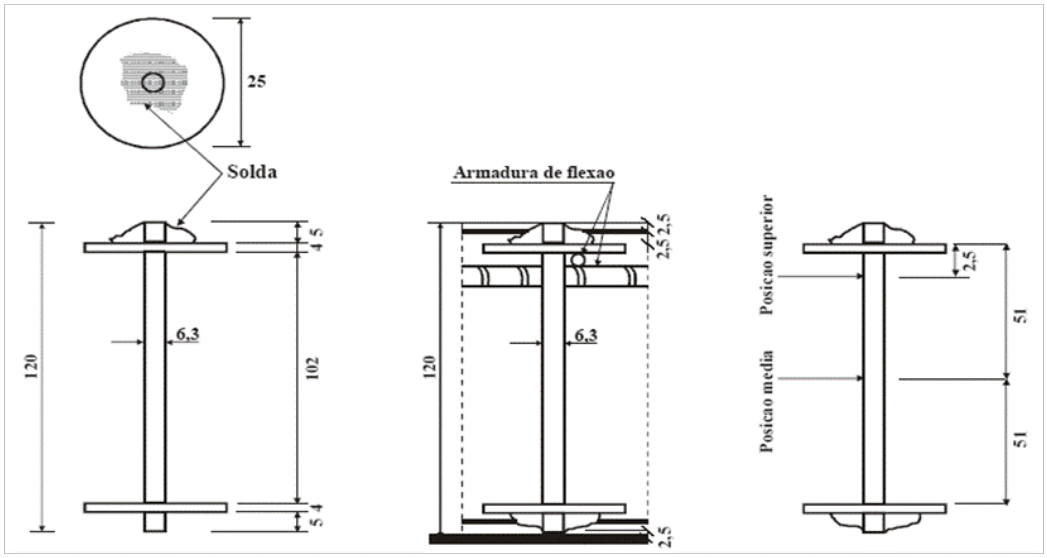


Figura 2.5 – Armadura de Cisalhamento utilizada por CORDOVIL E FUSCO (1995)

2.3.3 ANDRADE (1999)

ANDRADE (1999) com o objetivo de facilitar a execução da armação de lajes cogumelo analisou o comportamento da armadura de cisalhamento em posições variadas, com relação à ancoragem, envolvendo ou não a armadura de flexão como apresentado na Figura 2.6.

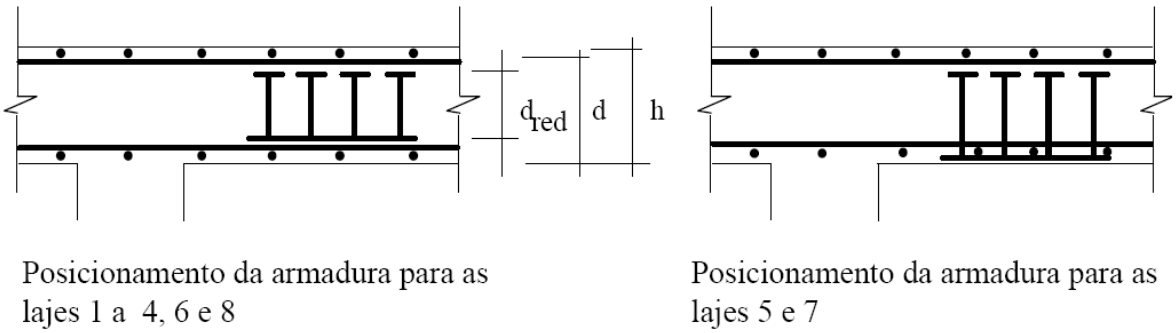


Figura 2.6 – Posicionamento da armadura de cisalhamento de ANDRADE (1999)

Tabela 2.2 – Resultados das lajes ensaiadas por ANDRADE (1999)

Lajes	d (mm)	f_c (MPa)	Ø (mm)	Âng. Entre linhas	Nº de camadas	Nº de linhas	S_0	S_r	P_u (kN)	Modo de ruptura
L1	164	37,8	10,0	45º	6	8	80	80	830	Interna
L2	164	34,2	10,0	45º	12	8	40	40	790	Interna
L3	154	42,4	10,0	45º / 22,5º	18 / 9	8 / 8	40	40	966	Externa
L4	164	36,1	10,0	45º / 22,5º	20 / 10	8 / 8	40	40	956	Interna
L5	154	29,6	10,0	45º	8	8	60	60	785	Interna
L6	164	37,4	10,0	45º / 11,25º	14 / 7	8 / 16	40	40	950	Interna
L7	164	34,0	12,5	45º	8 / 4	8 / 8	40	60	1090	Externa
L8	154	37,5	12,5	45º / 22,5º	8 / 4	8 / 8	40	60	1020	Interna

– Altura das lajes: h = 200 mm; taxa de armadura de flexão ρ=1,20%; tensão de escoamento da armadura de cisalhamento: Ø=10,0=602 MPa e Ø=12,5=678 MPa;

– Distribuição da armadura de cisalhamento - radial

Os dados dos ensaios apresentados na Tabela 2.2 mostram que o ganho de resistência em relação a uma laje sem armadura de cisalhamento foi de até 90%. O autor relata que com o uso da armadura de cisalhamento posicionada internamente à armadura de flexão positiva e negativa, pode se formar uma superfície de ruptura horizontal entre a armadura de cisalhamento e a de flexão (Figura 2.7).

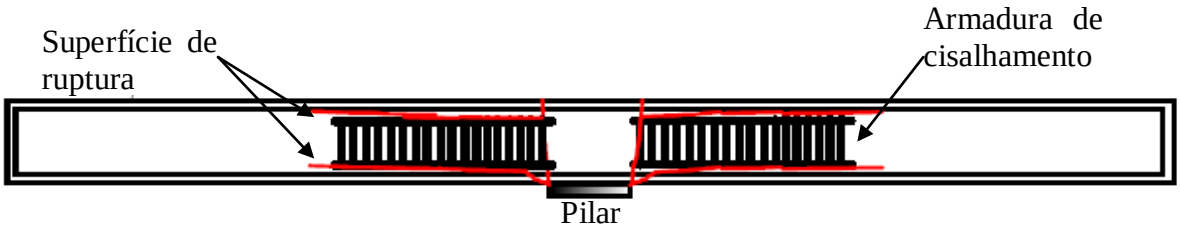


Figura 2.7 – Seção transversal da L3 indicando a superfície de ruptura (ANDRADE, 1999)

ANDRADE, com a finalidade de aprimorar e viabilizar o uso da armadura de cisalhamento internamente à armadura de flexão fez algumas sugestões tais como: consideração da altura útil como sendo a altura da armadura de cisalhamento e verificação da ruptura com a superfície cruzando a primeira camada de armadura de cisalhamento.

2.3.4 TRAUTWEIN (2001)

TRAUTWEIN (2001), em sua pesquisa, comparou a eficiência da armadura de cisalhamento do tipo “stud” interno à armadura de flexão, sendo formada por barras de aço soldadas em suas extremidades a chapas, e a outra armadura constituída de estribos inclinados com ângulo de 60º a partir da superfície inferior da laje. As principais variáveis propostas foram o tipo e a quantidade de armadura de cisalhamento.

Foram ensaiadas nove lajes quadradas de concreto armado, de lado 3000 mm e espessura 200 mm, com carregamento centrado em uma área de 200x200 mm. As lajes foram dividas em dois grupos. O primeiro, com três lajes, continha armadura de cisalhamento do tipo “stud” interno, e o segundo grupo com seis lajes, estribos. Os resultados obtidos para o grupo 1 apresentaram cargas de ruptura variando de 933 kN a 1050 kN, obtendo um ganho de 75%. Para o grupo 2, o acréscimo de resistência à punção chegou à 94%.

2.3.5 VAZ (2007)

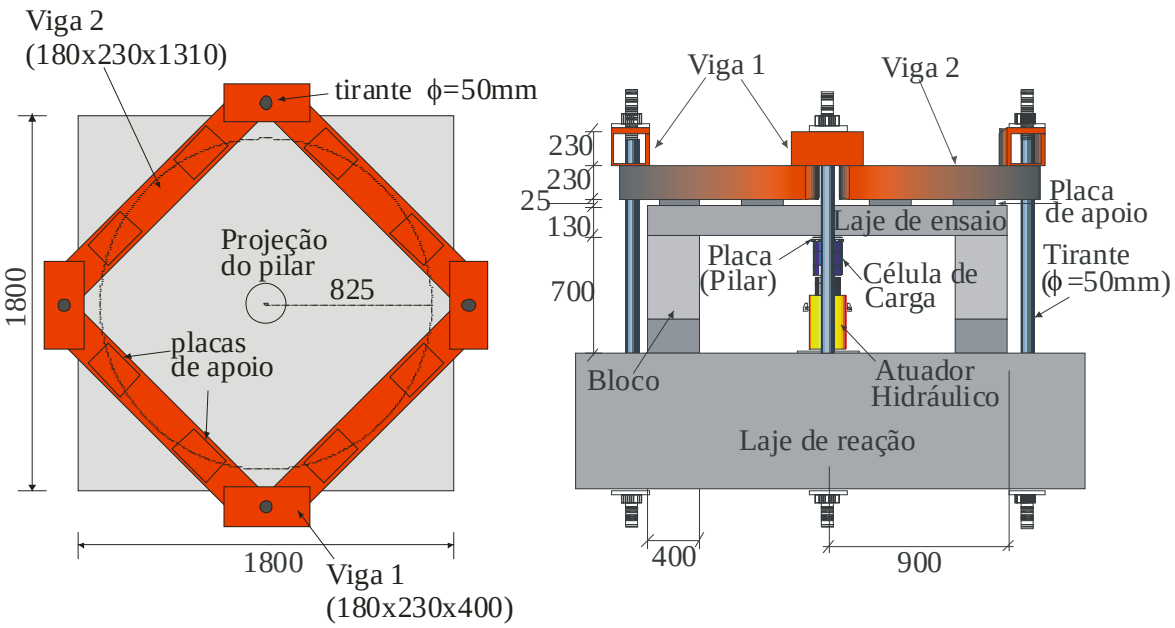
VAZ (2007) baseou-se no estudo para determinação de armadura mínima de cisalhamento. Utilizou-se de um parâmetro “k”, denominado índice de armadura transversal situada dentro do tronco de cone de ruptura que é delimitado pela fissura de cisalhamento. A autora ensaiou 12 lajes quadradas de 1800 mm de lado e 90 mm de espessura, submetidas a carregamento simétrico, como visto na Figura 2.8, e resistência à compressão do concreto entre 38 MPa e 39 MPa.

A autora observa que diversos fatores como a taxa de armadura de flexão, altura efetiva, resistência do concreto, perímetro da área carregada, existência de furos, excentricidade entre outras podem influenciar a carga de ruptura e a rotação de lajes cogumelo. Após analise de acréscimos de carga e rotação das lajes com armadura de cisalhamento em relação à laje de referência, VAZ (2007) faz uma proposta inicial de índice de armadura mínima de cisalhamento.

Da Tabela 2.3, definiu-se um valor de k igual a 0,60 como índice próximo do mínimo para lajes com altura efetiva igual a 90 mm, apresentando acréscimos de carga e rotação iguais a 10% e 29% (d=90 mm), respectivamente.

Tabela 2.3 – Resultados das lajes ensaiadas por VAZ (2007)

Lajes		Ψ / Ψ_{L1}	Pu_{Li} / Pu_{L1}	$A_s f_y$ no cone	k	Superficie de ruptura
Grupo 1	L2	1,5	1,12	98	0,69	Externa
	L3	1,6	1,14	98	1,03	Externa
	L4	1,6	1,25	98	1,03	Externa
Grupo2	L6	1,1	1,05	39	0,41	Interna
	L7	1,3	1,06	49	0,51	Interna
	L8	1,1	1,08	49	0,51	Interna
	L9	1,3	1,10	59	0,62	Interna
K - índice de armadura de punção situada dentro do mario raio do tronco de cone,delimitado pela fissura de cisalhamento; Ψ / Ψ_{L1} - aumento de rotação; Pu_{Li} / Pu_{L1} - aumento da carga de ruptura;						



(dimensões em mm)

Figura 2.8 – Esquema de ensaio utilizado por VAZ (2007)

2.3.6 SOUZA (2008)

SOUZA (2008) estudou 19 lajes quadradas com 2400 mm de lado e espessura de 150 mm, ligadas monoliticamente a um pilar com altura 850mm, com 300 mm para cima e 400 mm para baixo e seção transversal de 200x500 mm.

O carregamento foi plicado nas bordas das lajes, de cima pra baixo. Teve como objetivo investigar o comportamento em situações com furo adjacente ao pilar e transferência de momento fletor da laje ao pilar e fazer propostas às normas para o cálculo, a partir de dados experimentais.

As lajes foram ensaiadas até a ruptura. Teve como variáveis principais a quantidade, dimensão e posicionamento do(s) furo(s) adjacente(s) ao pilar; a taxa e a distribuição da armadura de flexão; armadura de cisalhamento; e o carregamento com diferentes transferências de momento fletor da laje para o pilar.

Os ensaios foram divididos em duas etapas sendo a primeira caracterizada por lajes que não transmitiam momento fletor da laje para o pilar, e a segunda etapa por lajes que tiveram transferência de momento da laje para o pilar. A Tabela 2.4 apresenta os resultados das lajes ensaiadas pelo autor.

Após comparação dos resultados experimentais com as normas CEB-FP/MC1990, EC2/2004, ACI-318/2005 e a NBR 6118/2006, o autor propôs modificações com a finalidade de ajustar os resultados das cargas de rupturas estimadas pelos mesmos. Tornando os resultados teóricos mais próximos dos experimentais e inclusive a favor da segurança.

Tabela 2.4 – Carga e modo de ruptura das lajes de SOUZA (2008)

Laje	f_c (MPa)	d (±2 mm)	ρ (%)	Furo (mm)	Arm. de cis.	P_u (kN)	M_u (kN.m)	e_u [(1)] (mm)	Modo de Ruptura
L1	37,8	121	0,93	-	-	475	-	-	Adjacente
L2	32,3	123	0,87	1 400x400	-	240	-	-	Adjacente
L3	39,5	125	1,17	1 400x400	-	250	-	-	Adjacente
L4	39,1	124	0,52	1 400x400	-	237	-	-	Adjacente
L5	36,7	122	1,22	1 400x400	2 barras dobradas	416	-	-	Adj. em W/S; afast. em N
L6	36,7	121	1,14	1 400x400	2 barras dobradas	425	-	-	Adj. em W/S; afast. em N
L7	37,2	123	1,48	1 200x200	-	455	-	-	Adj. em W/S; afast. em N
L9	34,2	123	1,48	1 200x200	-	375	-	-	Adj. em W/S; afast. em N
L16	44,0	125	1,01	1 300x200	-	474	-	-	Adjacente
L19	39,0	126	1,05	1 300x200	-	411	-	-	Adjacente
L8	34,2	123	1,48	1 200x200	-	192	86,3	0,449	Adjacente
L10	34,2	123	1,48	1 200x200	-	189	83,0	0,439	Adjacente
L11	36,7	125	1,44	1 200x200	-	299	139,1	0,465	Adjacente
L12	37,8	123	1,48	1 200x200	-	319	74,4	0,233	Adjacente
L13	36,4	124	1,46	2 200x200	-	277	61,9	0,224	Adjacente
L14	42,4	121	0,93	-	-	274	125,9	0,459	Adjacente
L15	43,2	123	0,91	-	-	364	66,5	0,183	Adjacente
L17	35,8	125	1,01	1 300x200	-	279	59,3	0,213	Adjacente
L18	37,3	126	1,05	2 300x200	-	322	53,1	0,165	Adj. em N,W e E; afast. em S

[(1)] excentricidade de carga última: $e_u = M_u/P_u$

2.4 RESUMO DAS PESQUISAS REALIZADAS

A Tabela 2.5 apresenta um resumo dos tipos de armaduras de cisalhamento utilizadas nas pesquisas realizadas.

Tabela 2.5 – Principais características das A.C. pesquisadas

Autor	Laje	f_c (MPa)	d (mm)	ρ (%)	Tipo de A.C	Distribuição da A.C.	$Ø_{A.C.}$ (mm)	Nº de linhas	Âng. Entre linhas	Nº de cam.	V_{teste} (kN)	Modo de ruptura previsto
(1)	L1	50,3	159	1,20	-	-	-	-	-	-	**560**	Punção
(1)	L5	43,4	159	1,20	Perfil I	Cruz	10,0	4	90º	4	**853**	Externa
(1)	L8	42,6	159	1,20	Perfil I	Radial	12,0	8	45º	6	**1200**	Externa
(2)	L1	35,0	164	1,20	“studs”	Radial	10,0	8	45º	6	**830**	Interna
(2)	L4	35,0	164	1,20	“studs”	Radial	10	8/8	45º/22,5º	20/10	**956**	Interna
(2)	L8	37,8	154	1,20	“studs”	Radial	12,5	8/8	45º/22,5º	8/4	**1020**	Interna
(3)	L1	40,2	159	1,20	“studs”	Radial	12,5	8/8	45º/22,5º	11/7	**1050**	Interna
(3)	L4	46,2	164	1,20	“studs”	Radial	16,0	8/8	45º/22,5º	11/7	**1038**	Interna
(3)	L2	48,4	139	1,20	Estribos inclinados	Cruz	6,3	8	90º	3	**650**	Interna
(3)	L7	49,3	159	1,20	Estribos inclinados	Radial	8,0	16	45º	9	**1160**	Externa
(4)	L1	39,0	83	1,38	-	-	-	-	-	-	**203**	Punção
(4)	L4	39,0	89	1,38	“studs”	Radial	5,0	8	45º	4	**357**	Externa
(4)	L9	39,4	91	1,38	“studs”	Radial	5,0	6	60º	3	**315**	Interna
(5)	L1	37,8	121	0,93	-	-	-	-	-	-	**475**	Punção
(5)*	L5	36,7	122	0,93	Barras dobradas	-	12,5	1	-	2	**416**	Punção
(5)*	L6	36,7	121	0,93	Barras dobradas	-	12,5	1	-	2	**425**	Punção

(1) GOMES (1991);
(2) ANDRADE (1999);
(3) TRAUTWEIN (2001);
(4) VAZ (2007);
(5) SOUZA (2008); * Laje com um furo 400 x 400 mm adjacente ao pilar;

2.5 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES

2.5.1 NBR 6118:2003

A norma brasileira NBR 6118:2003 prevê a verificação da tensão resistente à punção de uma laje cogumelo de concreto armado em três superfícies críticas:

a) Superfície dada pelo perímetro C do pilar ou da carga concentrada, verificando a tensão de compressão do concreto;
b) Superfície dada pelo perímetro C' que está afastada 2d do pilar ou da área carregada;
c) Superfície crítica, dada pelo perímetro C'', traçado a 2d da última camada da armadura de cisalhamento (Figura 2.10).

Os perímetros críticos segundo a NBR 6118/2003 são delimitados de acordo com a Figura 2.9.

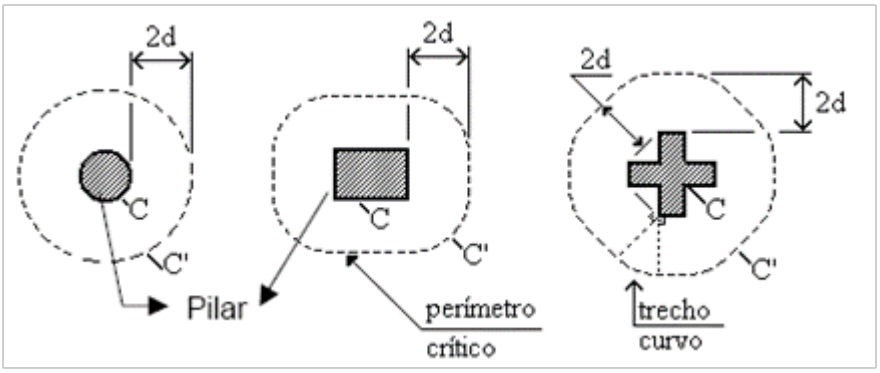


Figura 2.9– Perímetro crítico em pilares internos segundo a NBR 6118:2003

A tensão de cisalhamento solicitante de cálculo (τ_{sd}), para o caso de carregamento simétrico pode ser expressa por:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{ud} \qquad \text{Eq. 1}$$

F_{sd}: força ou reação concentrada de cálculo;
u: perímetro de contorno crítico;
d: altura útil da laje.

2.5.1.1 Verificação da tensão resistente de compressão da diagonal do concreto (τ_{rd2}) na superfície crítica C

A primeira verificação diz respeito à tensão de compressão diagonal do concreto, calculada através da tensão de cisalhamento na primeira superfície crítica, representada pelo perímetro do pilar ou da carga concentrada.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd2} = 0{,}27\alpha_v f_{cd} \qquad \text{Eq. 2}$$

f_{cd} : resistência de cálculo do concreto à compressão (MPa);

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

2.5.1.2 Verificação da tensão resistente (τ_{rd2}) na superfície crítica C' sem armadura de punção

A tensão de cisalhamento resistente na superfície crítica C', afastada 2d do pilar ou da carga concentrada, deve ser calculada como é mostrado a seguir.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd1} = 0{,}13\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)(100\rho f_{ck})^{1/3} \qquad \text{Eq. 3}$$

$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$, taxa de armadura nas duas direções ortogonais, calculadas com a largura igual à dimensão do pilar, ou área carregada, mais 3d para cada um dos lados (ou até a borda da laje, se esta estiver mais próxima);

d: altura útil da laje ao longo do contorno crítico C' em cm.

2.5.1.3 Verificação da tensão resistente (τ_{rd3}) na superfície crítica C' com armadura de punção

Para os casos de lajes com armadura de cisalhamento, a tensão resistente deve ser calculada de acordo com a Eq. 4.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd3} = 0{,}10\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)(100\rho f_{ck})^{1/3} + \left(1{,}5\frac{d}{S_r}A_{sw}f_{ywd}\text{sen}\alpha\frac{1}{ud}\right) \qquad \text{Eq. 4}$$

S_r: é o espaçamento radial entre a armadura de cisalhamento, não deve ser maior que 0,75d;

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

f_{ywd}: resistência de cálculo da armadura de cisalhamento, deve ser menor que 300 MPa para conectores tipo "*studs*" e 250 MPa para estribos (CA-50 ou CA-60); Para lajes com altura superior a 35 cm a resistência de cálculo dos estribos pode ser considerada no máximo igual a 435 MPa.

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

u: perímetro de controle C', distante 2d da face do pilar.

2.5.1.4 Verificação da tensão resistente (τ_{rd}) na região externa ao perímetro crítico C"

Para o cálculo da tensão resistente externa à região com armadura de cisalhamento, deve-se utilizar o perímetro crítico distante "2d" do último elemento da armadura de cisalhamento (Figura 2.10).

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd1} = \frac{0{,}18}{\gamma}\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)(100\rho f_{ck})^{1/3} \qquad \text{Eq. 5}$$

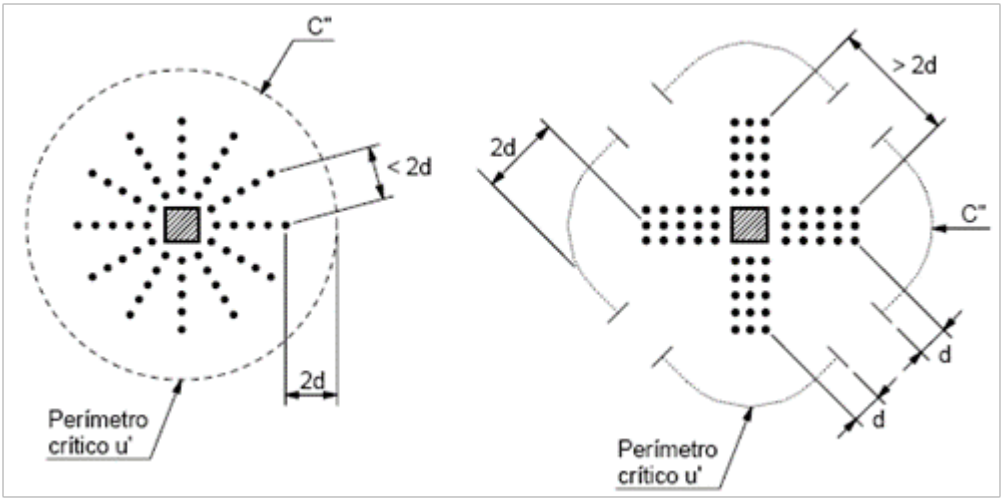


Figura 2.10– Perímetro crítico afastado 2d do último elemento da armadura de cisalhamento segundo a recomendação da NBR6118:2003

2.5.2 CEB-FIP MC 90/1991

A verificação da tensão de cisalhamento é feita ao longo de um perímetro de controle traçado a uma distância "2d" da face da área carregada, como mostrado na Figura 2.11.

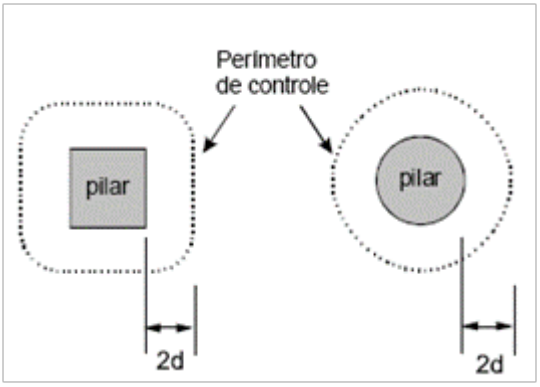


Figura 2.11– Perímetro de controle segundo o CEB-Fib MC 90/1991

A tensão de cisalhamento atuante é determinada por:

$$\tau_{sd} = \frac{P_{sd}}{u_1 d} \qquad \text{Eq. 6}$$

τ_{sd} : tensão de cisalhamento;

P_{sd}: carga concentrada de cálculo aplicada no perímetro de controle;

u_1 : perímetro de controle a uma distância 2d do perímetro carregado (cm);

d : altura útil (cm).

Para as lajes sem armadura de cisalhamento a tensão atuante (τ_{sd}) deve ser menor ou igual à tensão resistente (τ_{Rd}), conforme Eq. 7 .

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd} \qquad \text{Eq. 7}$$

$$\tau_{Rd} = 0{,}12\xi(100\rho f_{ck})^{1/3} \qquad \text{Eq. 8}$$

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

$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$, taxa de armadura nas duas direções ortogonais, calculadas com a largura igual à dimensão do pilar mais "3d" para cada um dos lados (ou até a borda da laje, se esta estiver mais próxima);

f_{ck} : resistência característica do concreto (limitada em 50 MPa).

A resistência ao puncionamento para a situação de carregamento simétrico deve ser verificada em três regiões.

2.5.2.1 Região adjacente à face do pilar

A carga P_{sd} a ser considerada nos cálculos da tensão atuante de cisalhamento é limitada de acordo com a Eq. 9.

$$P_{sd} = u_0 d\left(0{,}5 f_{cd2}\right) \qquad \text{Eq. 9}$$

Onde:

u_o : comprimento do perímetro da área carregada ou do pilar.

f_{cd2}: resistência à compressão de projeto para um concreto fissurado;

$$f_{cd2} = 0{,}6\left[1 - \left(\frac{f_{ck}}{250}\right)\right] f_{cd}$$

2.5.2.2 Região com armadura de cisalhamento

Para realizar a verificação da resistência ao puncionamento na região com armadura de cisalhamento, deve-se considerar uma parcela do concreto e uma parcela da armadura transversal.

$$P_{sd} \leq 0{,}09\xi\left(100\rho f_{ck}\right)^{1/3} u_1 d + 1{,}5\left(\frac{d}{s_r}\right) A_{sw} f_{ywd} \operatorname{sen}\alpha \qquad \text{Eq. 10}$$

u_1 : perímetro de controle situado a uma distância "2d" a partir da face do pilar;

s_r : espaçamento radial entre as camadas da armadura de cisalhamento (< 0,75d - mm);

A_{sw} : área da armadura de cisalhamento em uma camada ao redor da coluna (mm²);

f_{ywd} : tensão de escoamento de cálculo da armadura de cisalhamento (f_{ywd} < 300 MPa);

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

A contribuição da armadura de cisalhamento deve superar o valor determinado, conforme a equação Eq. 11.

$$1{,}5\left(\frac{d}{s_r}\right)A_{sw}f_{ywd}\text{sen}\alpha \geq P_{sd} \leq 0{,}03\xi(100\rho f_{ck})^{1/3}u_1 d \qquad \text{Eq. 11}$$

2.5.2.3 Região externa a armadura de cisalhamento

A Figura 2.12 apresenta os perímetros de controle para verificação da tensão de cisalhamento resistente para a região externa à armadura de cisalhamento. A Eq. 12apresenta a equação para o cálculo da carga concentrada.

$$P_{sd} \leq 0{,}12\xi(100\rho f_{ck})^{1/3}u_2 d \qquad \text{Eq. 12}$$

u_2 : perímetro de controle traçado a uma distância “2d” após a última camada da armadura de cisalhamento. Caso o espaçamento circunferencial da armadura de cisalhamento exceder “2d”, u_2 é limitado conforme indica a Figura 2.12;

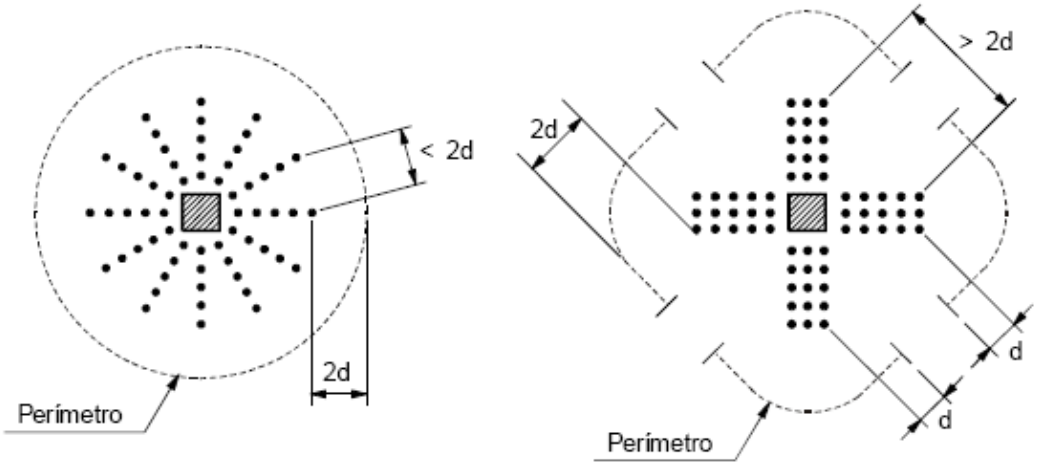


Figura 2.12– Perímetro de controle segundo o CEB-Fib MC 1990 para a região externa à armadura de cisalhamento

2.5.3 EUROCODE 2/2004

De acordo com o Eurocode 2/2004 a tensão de cisalhamento atuante é dada por:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_1 d} \qquad \text{Eq. 13}$$

V_{Ed} : valor da carga concentrada de cálculo;
β : coeficiente que leva em conta os efeitos da excentricidade da carga. No caso de não haver excentricidade pode-se tomar β = 1,00;
u_1 : perímetro de controle a 2d da face do pilar;
d : altura útil.

Em uma laje cogumelo sem armadura de cisalhamento são feitas duas verificações: a primeira na face do pilar, através da Eq. 14, e na seção de controle a 2*d* do pilar, através da Eq. 15.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,máx} \qquad \text{Eq. 14}$$

$$V_{Rd,máx} = 0{,}30\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{ck}$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,máx} \qquad \text{Eq. 15}$$

$$V_{Rd,máx} = 0{,}18k(100\rho f_{ck})^{1/3}$$

u_0 é o perímetro do pilar ou da área carregada, em mm;

V_{Ed} é a tensão máxima de cisalhamento atuante na face do pilar, em MPa;

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

$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$ é a taxa de armadura de flexão;

f_{ck} : resistência característica do concreto (MPa).

Nas lajes com armadura de cisalhamento a resistência ao puncionamento para a situação de carregamento simétrico deve ser verificada em três regiões:

2.5.3.1 Região adjacente a face do pilar

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_1 d}$$ Eq. 21

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,máx}$$

$$V_{Rd,máx} = 0{,}3\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd}$$ Eq. 22

2.5.3.2 Região com armadura de cisalhamento

$$v_{Ed} \leq V_{Rd,\text{int}}$$ Eq. 23

$$v_{Rd,\text{int}} = 0{,}75 v_{Rd,c} + 1{,}5\left(\frac{d}{s_r}\right) A_{Sw} f_{ywd,ef}\left(\frac{1}{u_1 d}\right) \text{sen}\,\alpha$$

u_1 : perímetro de controle situado a uma distância “2d” a partir da face da coluna;

s_r : espaçamento radial das camadas da armadura de cisalhamento (mm);

A_{sw} : área da armadura de cisalhamento em uma camada ao redor da coluna (mm²);

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

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

2.5.3.3 Região externa a armadura de cisalhamento

$$v_{Ed} \leq V_{Rd,ext}$$ Eq. 24

$$v_{Rd,ext} = v_{Ed,c} u_2 d$$

u_2 : perímetro de controle traçado a uma distância “1,5d” após a última camada da armadura de cisalhamento (Figura 2.13).

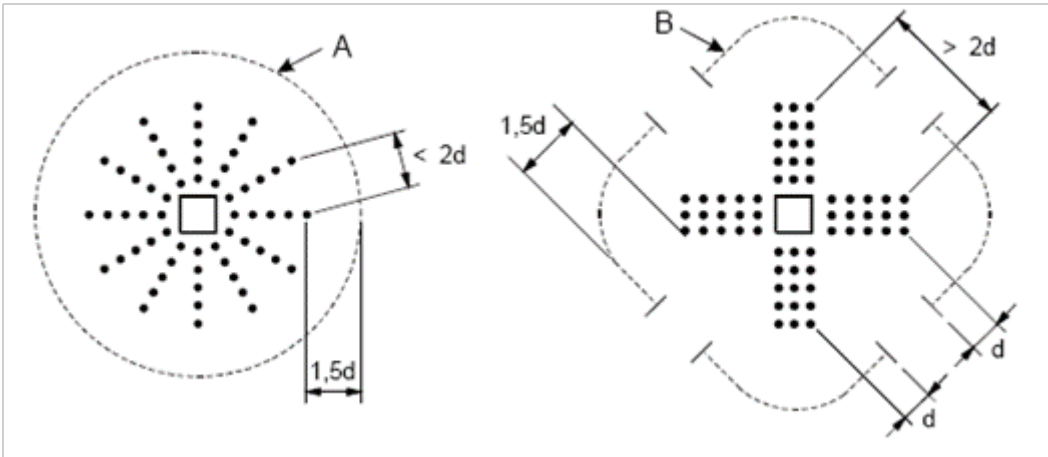


Figura 2.13– Perímetro de controle (u_2) conforme o EUROCODE 2 / 2004

2.5.4 ACI 318/2005

A norma americana considera que a seção crítica, ou de controle, de lajes sujeitas à punção, está localizada a uma distância de 0,5*d* medida a partir da face do pilar ou da área carregada (Figura 2.14).

A verificação da punção em lajes cogumelo, segundo o ACI318/2005 é realizado através da comparação entre a força nominal atuante "V_u" e a força nominal resistente "V_n".

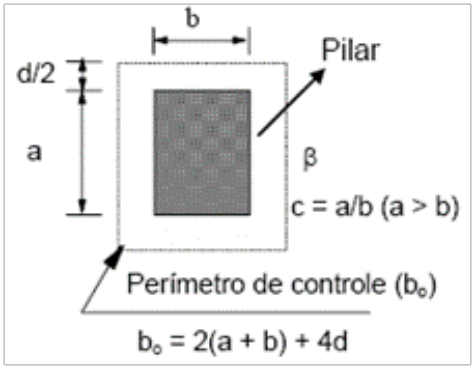


Figura 2.14– Perímetro crítico a ser considerado segundo recomendações do ACI318/2005

$$\phi V_n \geq V_u \qquad \text{Eq. 25}$$

$V_u = V_c + V_s$;

V_c : força cortante resistida pelo concreto;

V_s : força cortante resistida pela armadura de cisalhamento;

ϕ = 0,85 (fator de redução do código).

A força resistente do concreto V_c é o menor valor obtido através da Eq. 26, Eq. 27 e Eq. 28:

$$V_c = \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right)\frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\,b_0 d \qquad \text{Eq. 26}$$

$$V_c = \left(\frac{a_s d}{b_0} + 2\right)\frac{1}{12}\sqrt{f_c'}\,b_0 d \qquad \text{Eq. 27}$$

$$V_c = \frac{1}{3}\sqrt{f_c'}\,b_0 d \qquad \text{Eq. 28}$$

β_c : razão entre o comprimento do maior lado sobre o menor lado do pilar;

α_s : constante que assume os seguintes valores: 40 para pilares internos, 30 para pilares de borda e 20 para pilares de canto;

f_c' : resistência à compressão do concreto (MPa);

b_0 : perímetro de controle a “0,5d” da face do pilar (mm);

d : altura útil da laje (mm).

Nas lajes com armadura de cisalhamento a força resistente, neste caso, conta com a contribuição da armadura de cisalhamento e a do concreto.

$$V_c \leq \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\,b_0 d \qquad \text{Eq. 29}$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \qquad \text{Eq. 30}$$

A_v : área da armadura de cisalhamento dentro da distância “s” (mm^2);

s : espaçamento radial da armadura de cisalhamento (mm);

f_y : tensão específica de escoamento do aço (< 420MPa).

A soma das contribuições do concreto e da armadura de cisalhamento (V_n) é limitada, conforme equação 31:

$$V_n \leq \frac{1}{2}\sqrt{f_c'}\,b_0 d \qquad \text{Eq. 31}$$

O espaçamento radial dos elementos da armadura de cisalhamento não deve ser maior que 0,5d. A Figura 2.15 mostra o cálculo para o perímetro distante 0,5d da última camada da armadura de cisalhamento, (b_o).

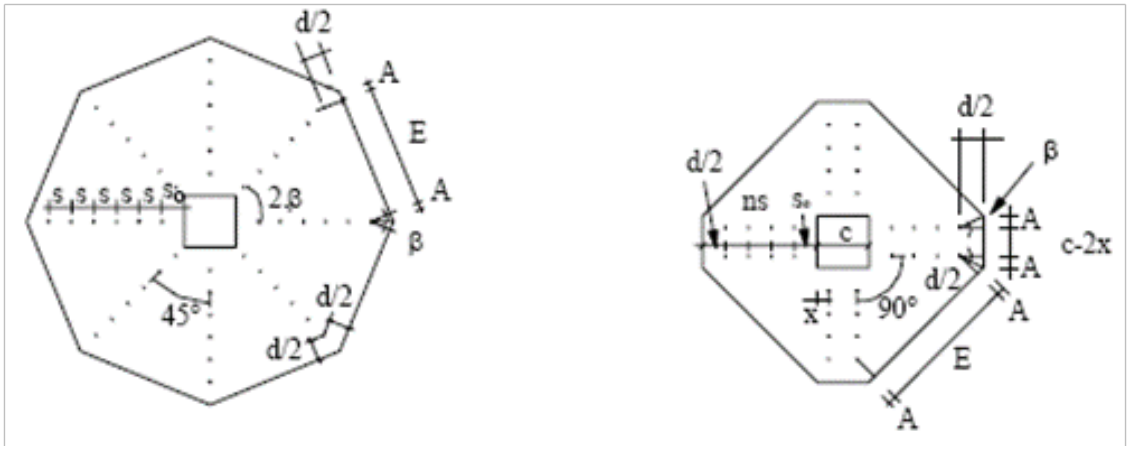


Figura 2.15– Perímetro crítico a ser considerado segundo recomendações do ACI318/2005

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com a finalidade de analisar o comportamento das armaduras de cisalhamento tipo “stud rails” e “double headed studs” em lajes cogumelo de concreto armado submetidas à punção centrada foram ensaiadas 6 lajes. Os ensaios ocorreram no laboratório de estruturas da Universidade Federal de Goiás.

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS LAJES

As lajes são quadradas de lados iguais a 2400 mm, com espessura de 150 mm, com um pilar central de seção transversal retangular 200 x 500 mm. Acima da laje o pilar mede 300 mm e abaixo 400 mm de altura, totalizando de 850 mm de comprimento total.

A concretagem de cada peça (laje+pilar) aconteceu de uma única vez. A Figura 3.1 apresenta as características geométricas das lajes.

O sistema de ensaio adotado nesta pesquisa propõe representar um modelo de laje plana na região delimitada pelos pontos de inflexão gerados pelo momento negativo em torno de um pilar interno, estabelecendo uma situação de punção centrada.

Os testes foram realizados em seis lajes divididas em dois grupos. O grupo A com armadura de cisalhamento do tipo “stud rails”, formado pelas lajes L1, L3 e L5, e o grupo B com armadura de cisalhamento do tipo “double headed studs”, formado pelas lajes L2, L4 e L6.

As principais variáveis desta pesquisa são:

- o tipo de armadura de cisalhamento utilizada: “studs rails” x “double headed studs” (Figura 3.2);
- o diâmetro dos studs (armadura de cisalhamento);
- a área de armadura de cisalhamento por camada.

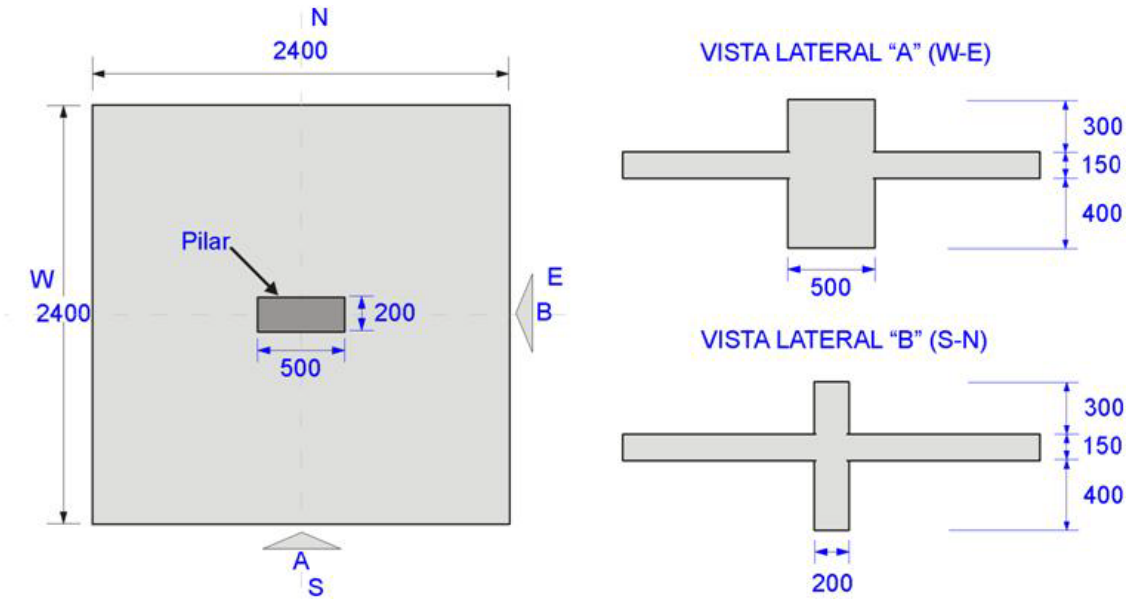


Figura 3.1 – Características geométricas das lajes ensaiadas

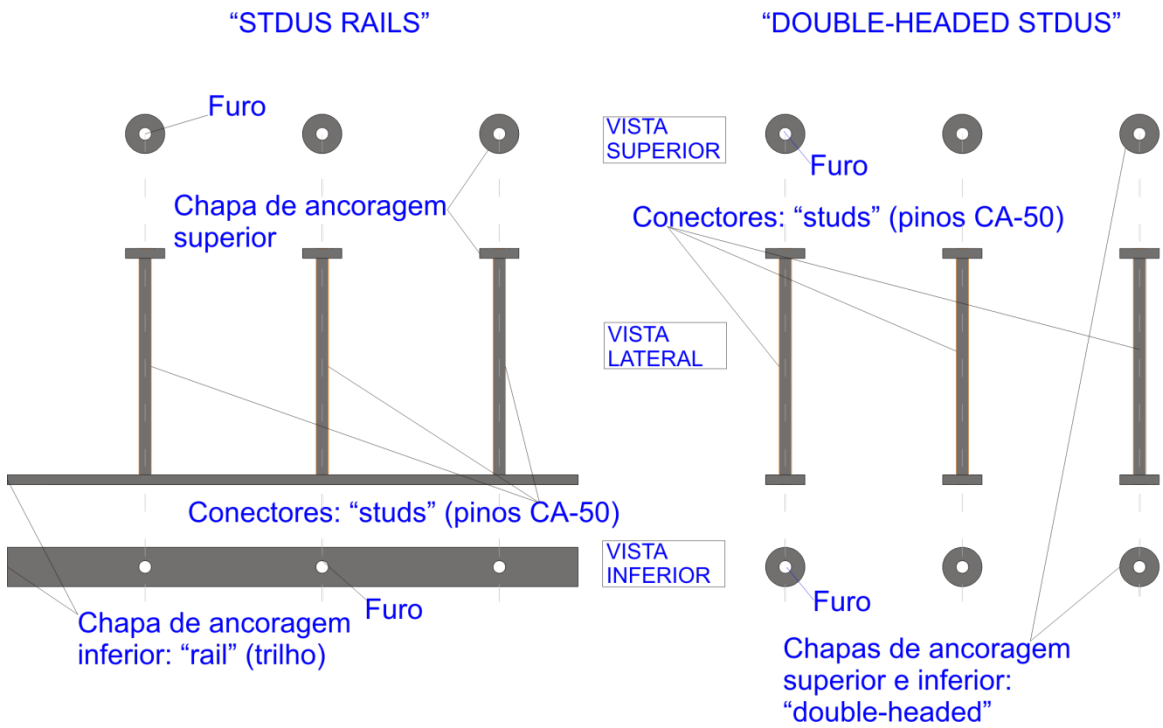


Figura 3.2 – Armaduras de cisalhamento "studs on rails" e "double headed studs"

Os “studs” foram confeccionados em uma serralheria por profissional habilitado, sendo utilizados barras de CA-50 e chapas de aço SAE 1020. Na laje L1 foi colocado “studs rails”, distribuídos em dez linhas com três camadas e diâmetro Ø6.3 mm. A laje L3 apresenta o mesmo tipo de “studs”, com quatorze linhas de cinco camadas e mesmo diâmetro. A laje L5 é similar a L3, com “studs” de diâmetro Ø 8,0 mm. A armadura de cisalhamento das lajes L2, L4 e L6 é do tipo “double headed studs”. Sendo similar ao diâmetro, quantidade e distribuição das lajes L1, L3 e L5, respectivamente. As Figuras 3.3, 3.4 e a Tabela 3.1 mostram detalhes das armaduras de cisalhamento utilizadas em cada laje quanto à distribuição, quantidade, espaçamento e o diâmetro dos “studs”.

Tabela 3.1 – Características das armaduras de cisalhamento das lajes ensaiadas

Laje	**f_c (MPa)**	**d (mm)**	**ρ (%)**	**Ø (mm)**	**Nº de linhas**	**Nº de camadas**	**Âng. Entre linhas**	**Detalhe “A” (Figura 3.3 e Figura 3.4)**
GRUPO 1 – “Studs rails” (S_0 = 50 mm e S_r = 90 mm)								
L1	35,0	118	1,23	6.3	10	3	45º	**Chapa inferior avança 20 mm dentro do pilar**
L3	35,0	118	1,23	6.3	14	5	30º	**Chapa inferior avança 20 mm dentro do pilar**
L5	35,0	118	1,23	8.0	14	5	30º	-
GRUPO 2 – “Double headed studs” (S_0 = 50 mm e S_r = 90 mm)								
L2	35,0	118	1,23	6.3	10	3	45º	-
L4	35,0	118	1,23	6.3	14	5	30º	-
L6	35,0	118	1,23	8.0	14	5	30º	-

Tabela 3.2 – Dimensões “a” e “b” da Figura 3.3 e Figura 3.4

Laje	**Ø chapa de ancoragem superior (mm)**	**Ø chapa de ancoragem inferior (mm)**	**Dimensões da chapa de ancoragem inferior (mm)**
L1	20	-	5 x 20 x 290
L3	20	-	5 x 20 x 470
L5	25	-	5 x 20 x 450
L2	20	20	-
L4	20	20	-
L6	25	25	-

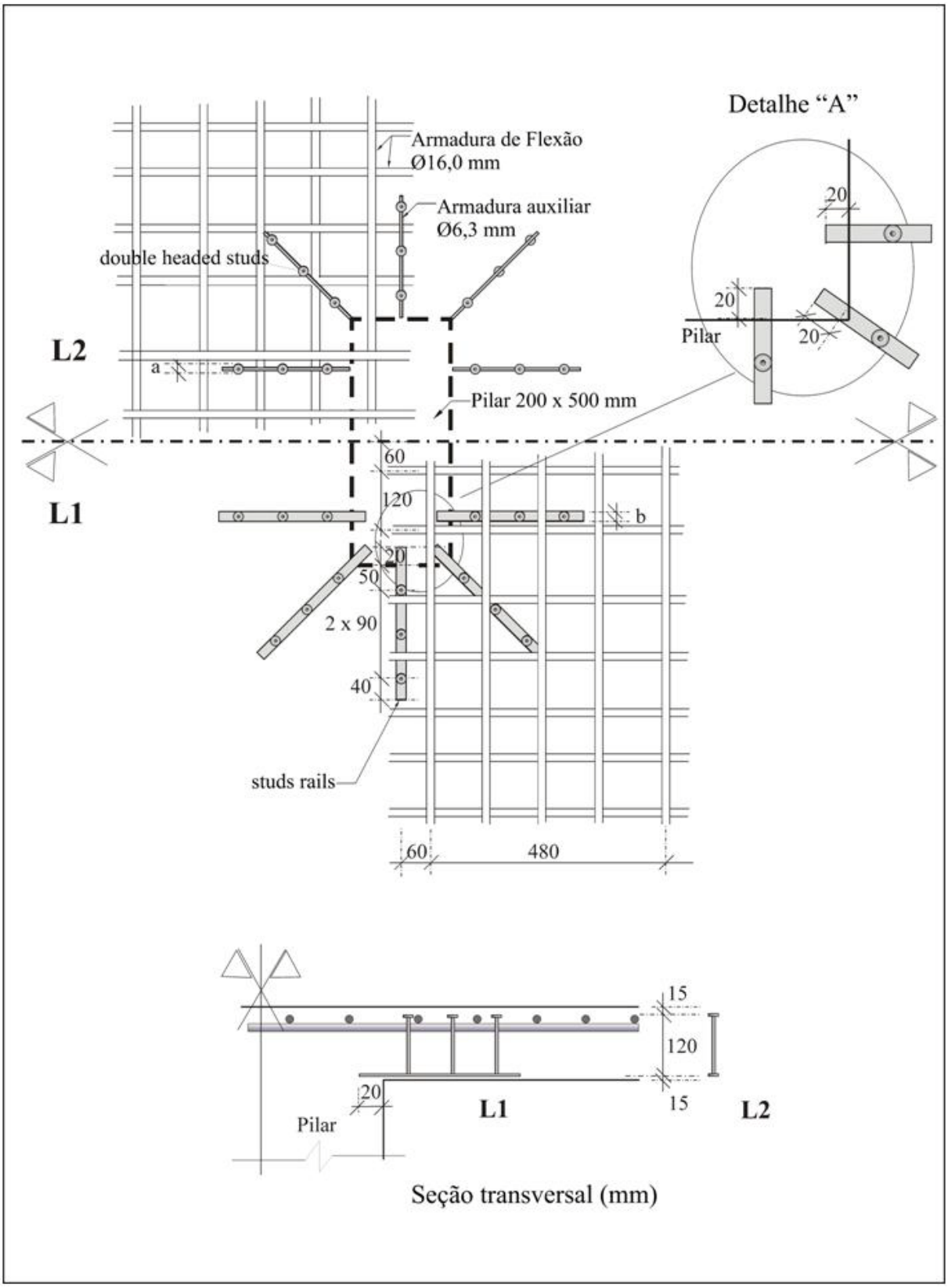


Figura 3.3 – Detalhamento das Lajes L1 e L2

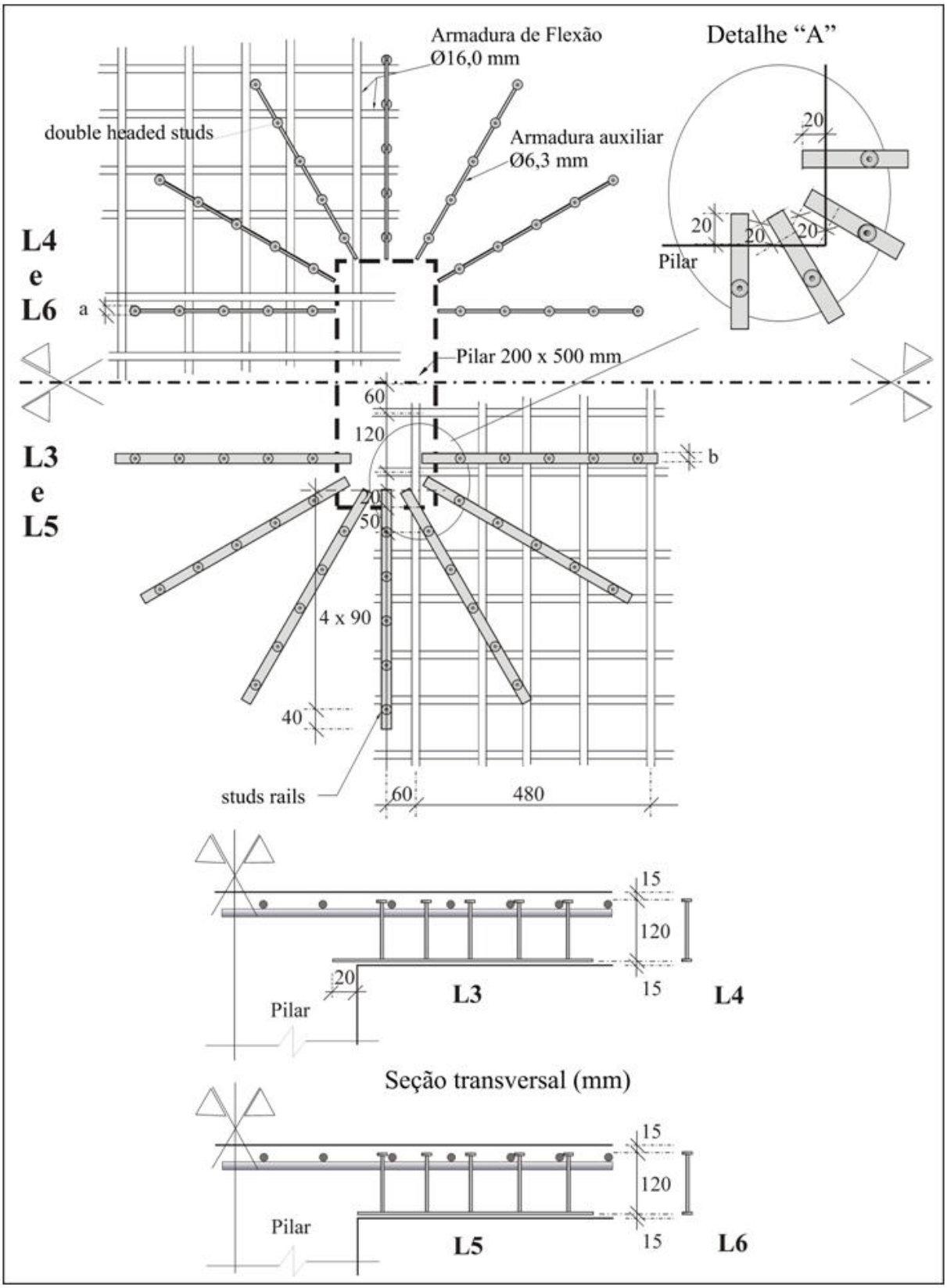


Figura 3.4 – Detalhamento das Lajes L3 a L6

3.2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

O carregamento foi aplicado na laje com a utilização de quatro atuadores hidráulicos, vazados para passagem de tirantes, sendo que estavam dispostos sobre quatro vigas metálicas a uma distância de 1000 mm do centro da laje. As vigas metálicas apoiaram-se sobre duas chapas, existindo uma camada niveladora de gesso pedra no contato das chapas com a laje e as vigas. A reação do carregamento foi feita com quatro tirantes ancorados na laje de reação passando pela laje de teste e as vigas metálicas através de furos previamente feitos, como pode ser visto na Figura 3.5 e Figura 3.6.

O pilar da laje estava apoiado sobre um bloco de concreto armado com dimensões 600 mm x 600 mm x 600 mm. Este bloco permite uma maior altura abaixo da laje facilitando o acesso durante o ensaio. Foram utilizados calços de madeira e blocos prismáticos de concreto dispostos sob as bordas da laje para nivelá-la, antes da aplicação de gesso pedra entre o bloco de concreto e o pilar.

Em cada tirante colocou-se uma célula de carga para leitura dos carregamentos e da carga de protensão aplicada no pilar. Para protender o pilar, foi aplicado uma carga inicial de 700 kN. A Figura 3.7 mostra uma caixa metálica que auxilia na aplicação da protensão e também uma caixa de madeira na extremidade superior do tirante, preenchida com material apropriado para redução de impactos, como aparato de segurança neste sistema.

Tirante
Célula de carga
Atuador hidráulico vazado
Viga de distribuição
Laje de ensaio
Bloco

Figura 3.5 – Laje preparada para o ensaio

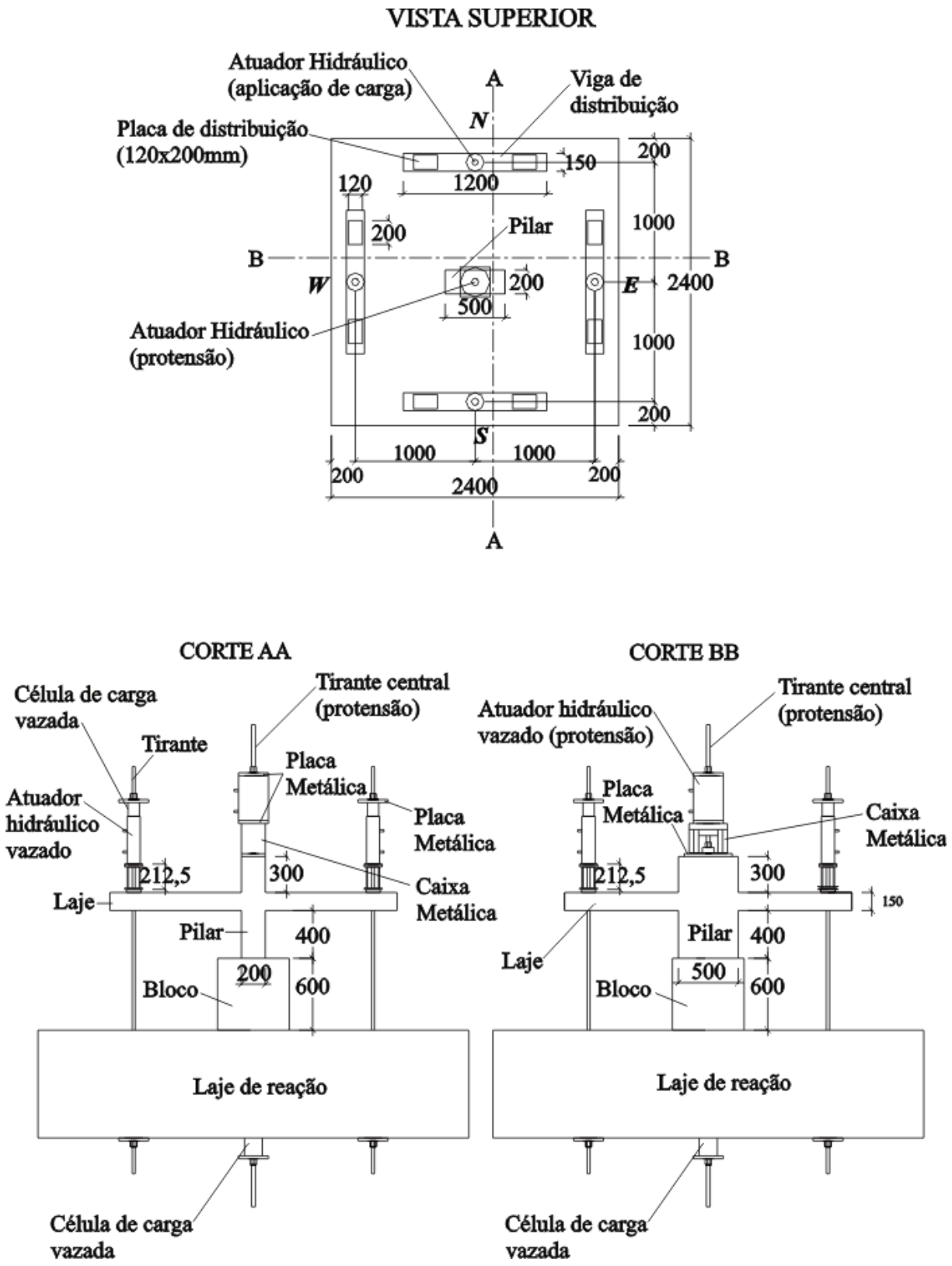


Figura 3.6 – Sistema de ensaios (mm)

Próximo ao início da aplicação do carregamento para permitir o equilíbrio do carregamento em cada tirante lateral, estes foram ajustados com a aferição da carga e do prumo de cada um. Através de válvula manifold de 4 saídas houve a distribuição da pressão de óleo hidráulico com pequenas variações em cada atuador hidráulico. Com o propósito de verificar o perfeito funcionamento de todos os equipamentos fez-se pré-carregamento de até 100 kN, com intervalos de carga de 25 kN. Após o pré-carregamento, iniciou-se a aplicação do carregamento na laje com intervalos de carga de 50 kN. A cada intervalo de carga foram realizadas as leituras dos extensômetros e dos relógios comparadores.

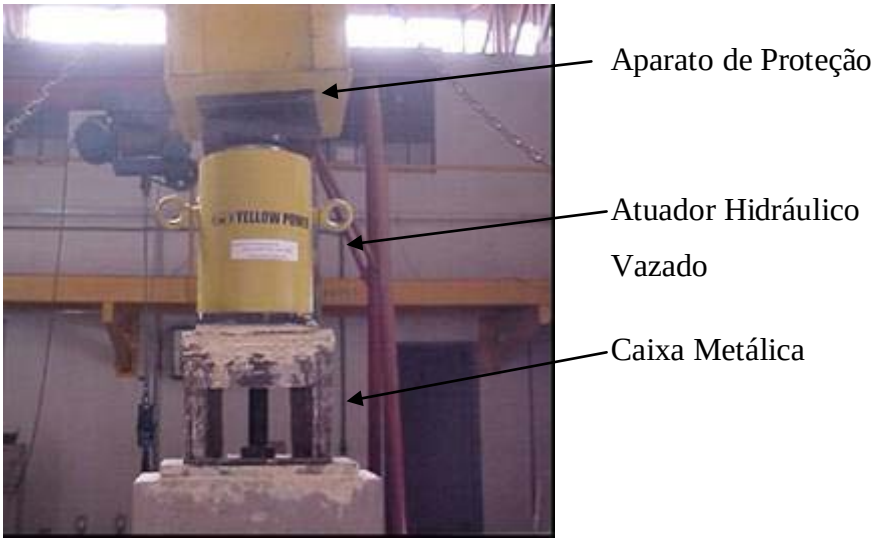


Figura 3.7– Equipamentos utilizados para aplicação da protensão no pilar central

3.3 MATERIAIS E ARMADURAS

3.3.1 Concreto

O concreto utilizado na concretagem das lajes da primeira e segunda etapa foi usinado e auto-adensável, fornecido pela empresa Realmix. A sua dosagem foi feita para atingir resistência característica a compressão, aos 28 dias, de 30 MPa. Fazem parte da primeira concretagem as lajes do Grupo 1: L1-L3-L5; e da segunda concretagem as lajes do Grupo 2: L2-L4-L6.

A mistura do concreto foi composta de cimento Portland, areias natural e artificial, agregado graúdo, aditivos e água, a Tabela 3.3 apresenta sua composição por metro

cúbico. Para executar a cura úmida foram colocadas lonas plásticas sobre as lajes concretadas de forma a minimizar a perda de água inserida por aspersão sobre as lajes durante um período de 7 dias após a concretagem.

Tabela 3.3 – Dosagem do concreto auto-adensável – 30 MPa

Materiais	**Substrato**
	Quantidade (m^3)
Cimento	360 kg
Sílica	31 kg
Areia Natural Fina	730 kg
Brita 0	930 kg
Água	230 kg
Aditivo Superplastificante	3,96 kg (1,1% da massa de cimento)
Aditivo Retardador de Pega	2,88 kg (0,8% da massa de cimento)
“Flow test”	700 mm

3.3.2 Armadura de Flexão

A armadura negativa foi composta por uma malha ortogonal de 20 barras de aço CA-50, diâmetro 16,0 mm e espaçadas a cada 120 mm, como na Figura 3.8. Para garantir a ancoragem da armadura negativa foram acrescentadas às extremidades de cada barra uma armadura dobrada em formato de “U” de aço CA-50 e diâmetro 12,5mm.

A face inferior da laje foi dotada de armadura composta por uma malha ortogonal de barras de aço CA-50, diâmetro 6,3 mm, espaçadas a cada 240 mm.

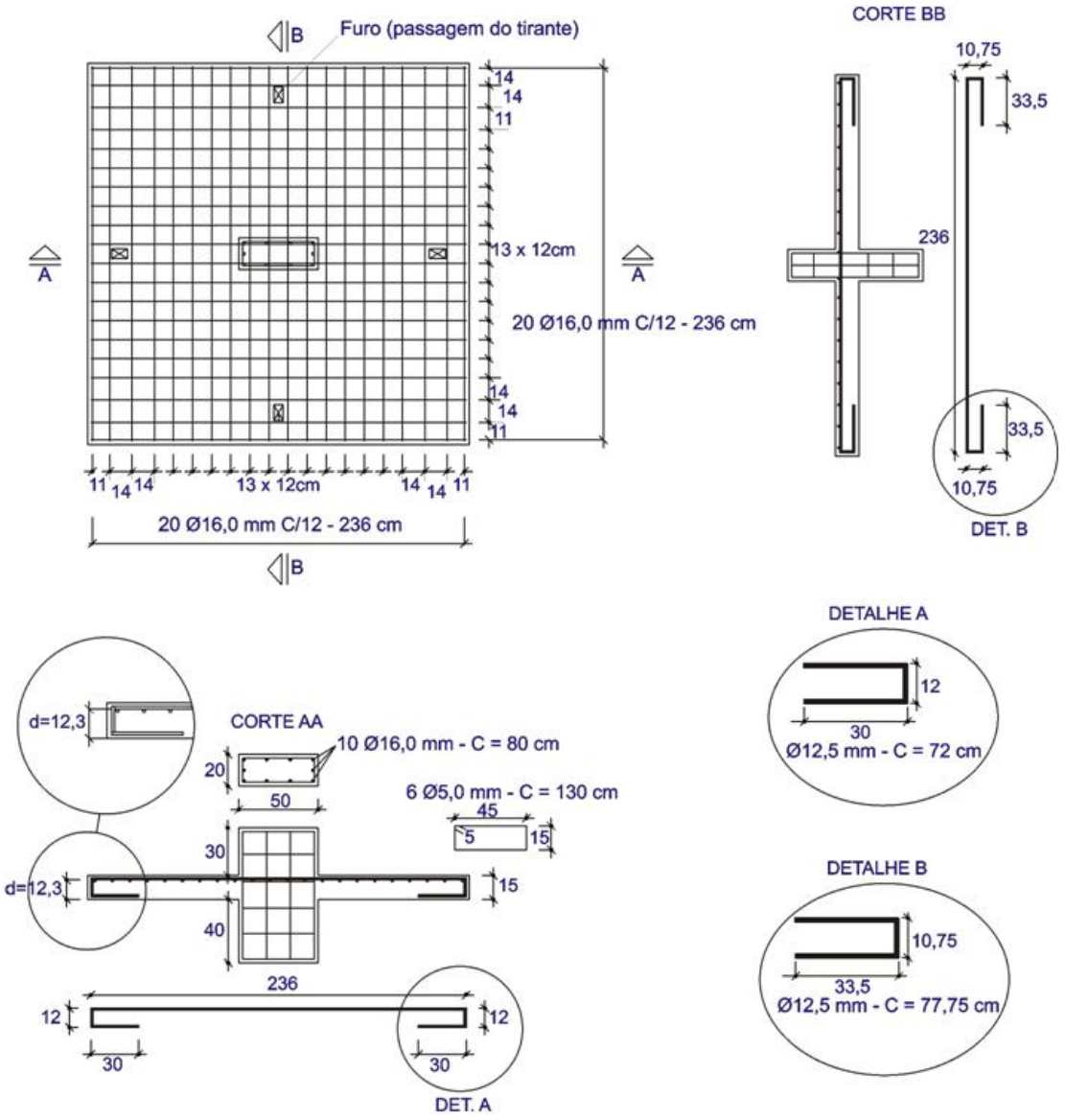


Figura 3.8 – Armadura de flexão (cm)

3.3.3 Armadura de Cisalhamento

A distribuição da armadura foi feita de forma radial e posicionada de forma a envolver a armadura de flexão. A confecção foi manual, por profissional de serralheria. O aço utilizado para os conectores é o CA-50. Chapas de aço para ancoragem foram soldadas nas extremidades dos conectores utilizando-se eletrodos “OK 48.04” de 3,5 mm da marca ESAB. A fixação de cada armadura de cisalhamento na armadura de flexão foi feita por arame recozido Nº 18, sendo amarrada nas extremidades superior e inferior, garantindo a sua ortogonalidade com o plano horizontal.

3.3.3.1 "Stud rails"

Este tipo de armadura foi executado nas lajes do Grupo 1: L1, L3 e L5; sendo utilizados para confecção dos conectores barras de CA-50 de Ø 6,3 mm e Ø 8,0 mm, as chapas de ancoragem soldadas nas extremidades dos conectores foram de SAE-1020 com espessura de 5,0 mm.

A armadura utilizada na laje L1, por linha, é composta de três conectores de Ø 6,3 espaçados a cada 90 mm, sendo o primeiro posicionado 50 mm a partir da face do pilar, soldados na extremidade inferior a uma chapa de 290 mm x 20 mm, e na extremidade superior a chapas circulares e individuais de Ø 20 mm x 5 mm. Destaca-se, também, quanto à armadura das lajes L1 e L3, o fato da chapa de ancoragem da extremidade inferior dos conectores estar posicionada 20 mm dentro do pilar.

As demais armaduras utilizadas nas lajes do Grupo 1, por linha, apresentam cinco conectores de Ø 6,3 para L3 e de Ø 8,0 para L5, espaçados a cada 90 mm, sendo o primeiro posicionado 50 mm a partir da face do pilar, soldados na extremidade inferior a uma chapa de 290 mm x 20 mm para L3 e de 270 mm x 25 mm para L5, e na extremidade superior às chapas circulares e individuais de Ø 20 mm e Ø 25 mm x 5 mm, para L3 e L5, respectivamente. As Figuras Figura 3.9 a Figura 3.12 apresentam detalhes da armadura "stud rails" utilizada nas lajes do Grupo 1.

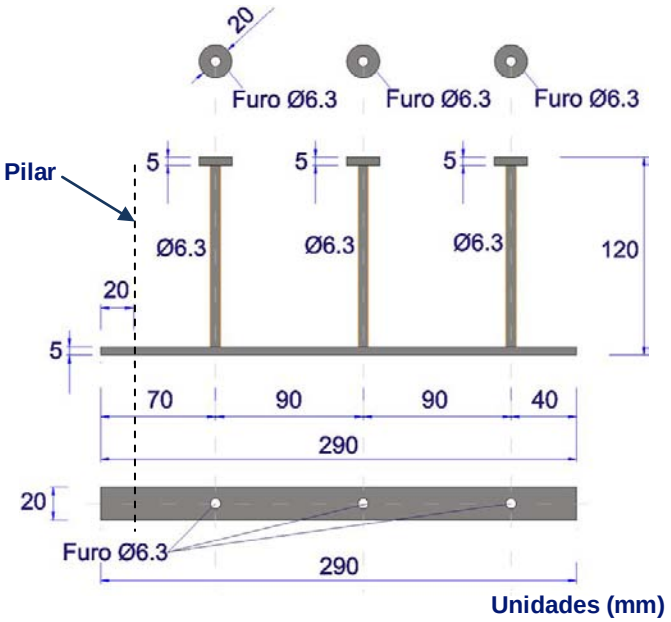


Figura 3.9 – Detalhamento do "stud rails" com três camadas

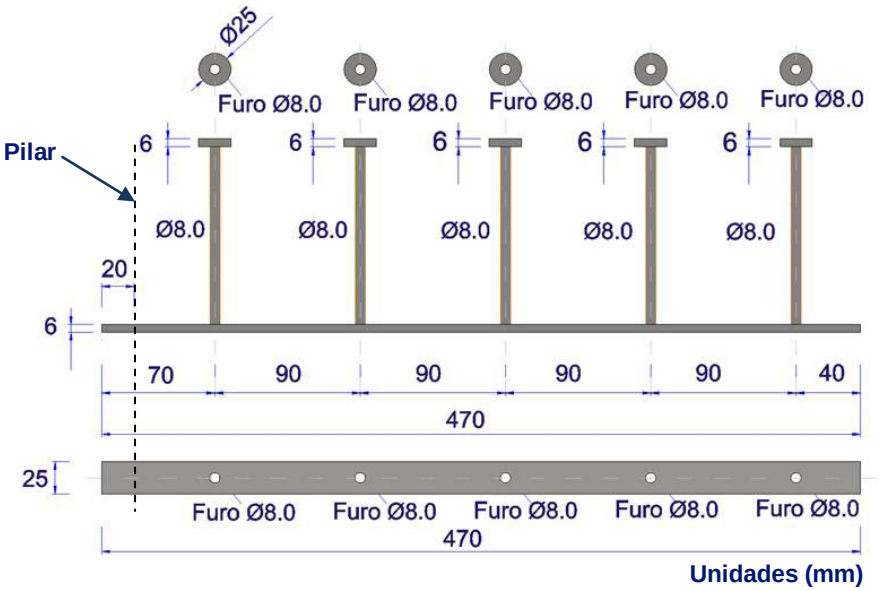


Figura 3.10 – Detalhamento do "stud rails" com cinco camadas

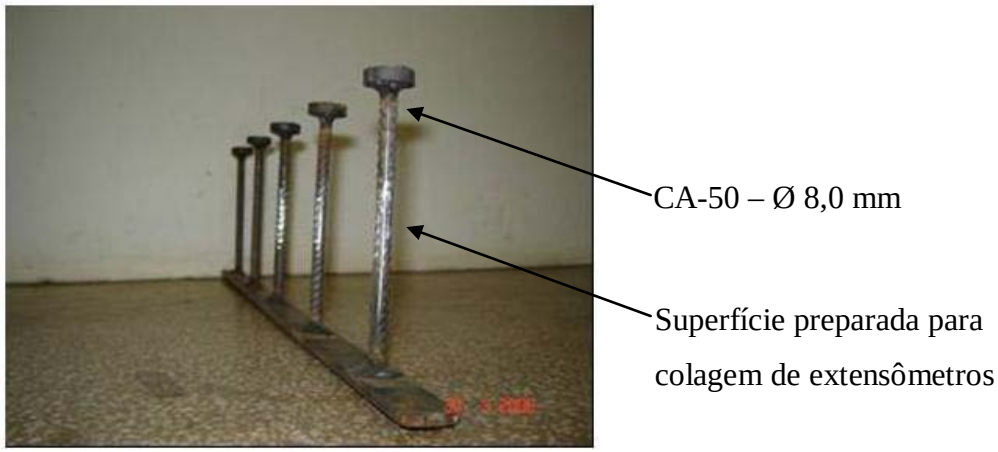


Figura 3.11 – "Stud rails" da laje L3

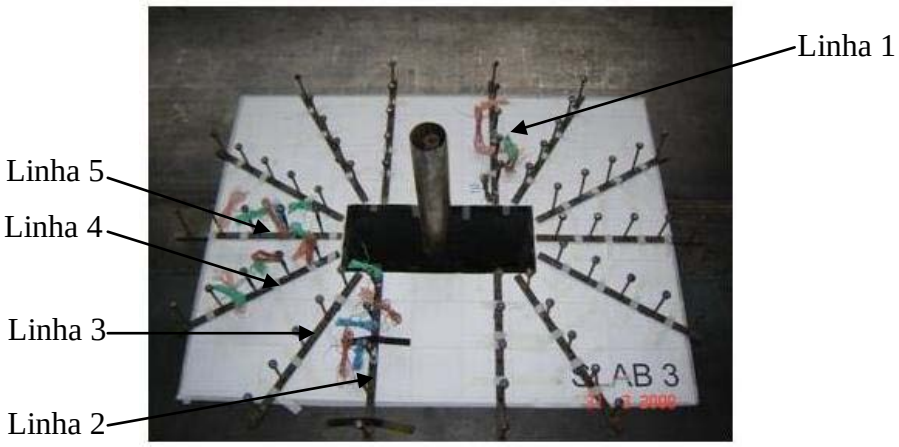


Figura 3.12 – Armadura de cisalhamento da L3 com linhas instrumentadas

3.3.3.2 "Double headed studs"

Nas lajes do Grupo 2: L2, L4 e L6, foi executada armadura de cisalhamento do tipo "double headed studs", apresentando as mesmas características quanto à quantidade e o diâmetro dos conectores do Grupo 1, como na Figura 3.13. A diferença consiste na substituição da chapa única de ancoragem da extremidade inferior, anteriormente utilizada, por chapas individuais iguais aos da extremidade superior.

Para montagem desta armadura, em linhas, foi necessário a colocação de uma barra de CA-50 de Ø4.2, soldada às cabeças dos conectores, como apresentado na Figura 3.14. E, para certificação do real posicionamento da extremidade inferior da armadura, esta foi montada em cima de um gabarito posicionado sobre o fundo da forma da laje, sendo após conferência, amarrada com arame recozido Nº 18.

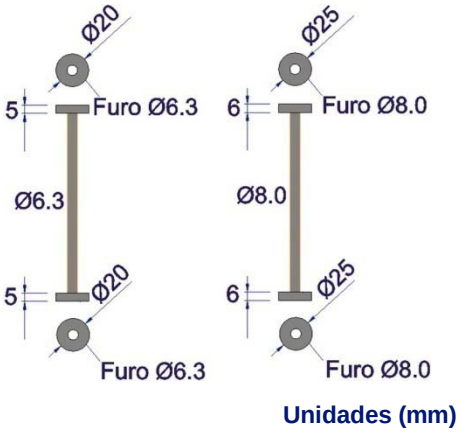


Figura 3.13 – "Double headed studs"

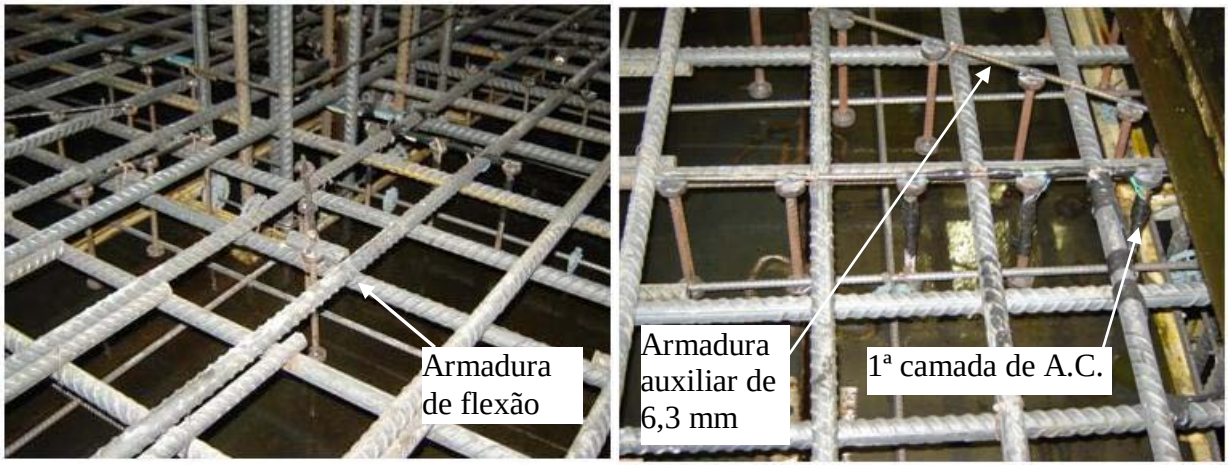


Figura 3.14 – "Double headed studs" das lajes L2 e L6

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1 Deslocamentos verticais

Para medir os deslocamentos verticais das lajes testadas foram utilizados relógios comparadores digitais da marca Mitutoyo, com cursor de 14 mm e precisão de 0,01 mm.

Os relógios comparadores, também chamados de defletômetros, foram fixados em hastes de perfis metálicos através de parafusos que possibilitaram o correto posicionamento nos pontos de interesse. Todo o conjunto de hastes e os relógios comparadores foram suportados por vigas metálicas dispostas sobre a laje, havendo em cada extremidade destas vigas um tripé de sustentação, como mostrado na Figura 3.15. Foram utilizados doze relógios comparadores instalados sobre a superfície superior da laje e distribuídos sobre dois eixos ortogonais a partir do centro do pilar. Na direção N-S as distâncias foram 130 mm, 650 mm e 850 mm, na direção E-W as distâncias foram 280 mm, 650 mm e 850 mm. A Figura 3.16 mostra os pontos nos quais foram posicionados os relógios comparadores.

Figura 3.15 – Vigas para fixação dos relógios comparadores

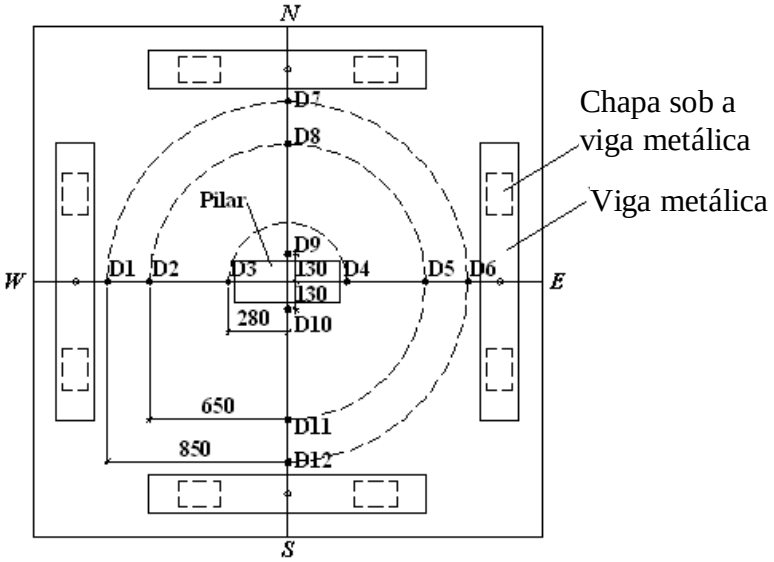


Figura 3.16 – Pontos monitorados pelos relógios comparadores

3.4.2 Deformação específica

Para medir a deformação específica das armaduras e do concreto foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER), da marca EXCEL Engenharia de Sensores Ltda, tipo PA-06-250BA-120L (aço) e PA-06-201BA-120L (concreto). Para ligação dos extensômetros ao sistema de aquisição de dados foram utilizados fios de par trançados RJ45.

Os extensômetros foram ligados a dois sistemas de aquisições de dados: o primeiro formado de duas caixas comutadoras ligadas em um terminal de leitura da Kyowa e o segundo, uma caixa de aquisição de dados com 15 canais, modelo SCXI-1001 ligada a um terminal da National Instruments e controlada por um software Labview 6.0. Os sistemas de aquisições de dados são mostrados na Figura 3.17.

O processo de colagem dos extensômetros na armadura obedeceu às seguintes etapas: 1 – limpeza da superfície; 2 – regularização da superfície; 3 – fixação dos extensômetros; e, 4 – proteção mecânica. A etapa 1 – regularização da superfície consiste em: esmerilar e lixar as barras de forma que a sua seção transversal seja preservada, eliminando, apenas, as moças. São utilizados os seguintes instrumentos e ferramentas: policorte, rebolo de desgaste (para esmerilhar) e lixas de mão (n° 80 e 120, nesta ordem).

Passa-se para a limpeza das barras, antes da colagem dos extensômetros, utilizando-se álcool isopropílico, condicionador e neutralizador (também, da empresa Excel sensores). Os extênsometros foram colados utilizando-se o adesivo de éster de cianoacrilato (Super Bonder), e em seguida, fazendo uma proteção mecânica com fita elétrica de alta fusão em torno da barra.

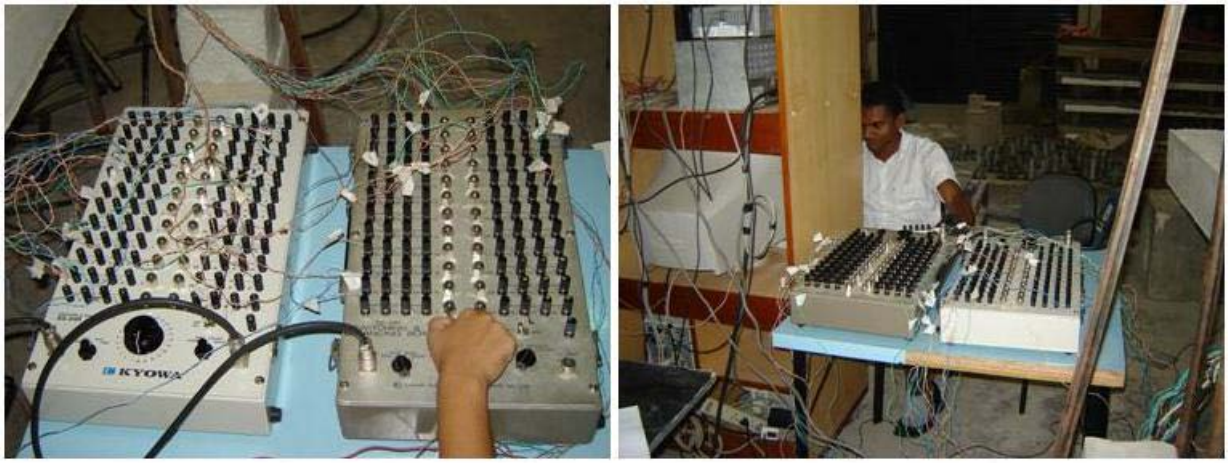


Figura 3.17– Sistemas de aquisições de dados dos (EER)

No concreto o processo foi: 1 – regularização da superfície; 2 – limpeza da superfície; 3 – nova regularização da superfície; e, 4 – fixação dos extensômetros. Foi utilizada cola epoxi (ARALDITE – 10 minutos) para regularização da superfície. Após aplicação da cola foram utilizadas lixas de mão 80 e 120, nesta ordem. Os extensômetros são colados após a regularização e limpeza da superfície, seguindo os critérios utilizados na armadura.

3.4.2.1 Instrumentação da armadura de flexão

Na armadura de flexão as deformações foram monitoradas em nove pontos distribuídos em três barras: uma na direção N-S e duas na direção E-W. Para cada ponto monitorado da armadura foram colados dois extensômetros em lados opostos (superfície superior e inferior da barra).

A configuração da instrumentação da armadura de flexão utilizada nesta pesquisa foi a mesma adotada por SOUZA (2008). A Figura 3.18 mostra a numeração de cada EER e também suas disposições.

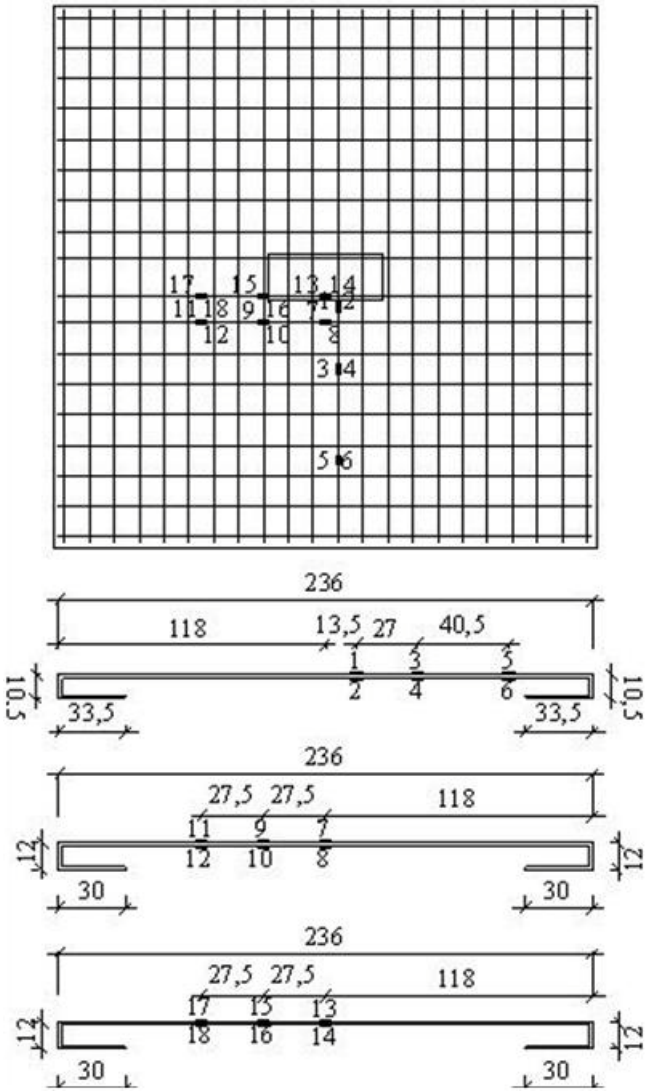


Figura 3.18 – Posicionamento e numeração dos extensômetros (cm)

3.4.2.2 Instrumentação da armadura de cisalhamento

Na armadura de cisalhamento foram instrumentados os três primeiros elementos, a partir da face do pilar, em quatro linhas (ou direções) para as lajes L1 e L2, e em cinco linhas para as lajes L3, L4, L5 e L6. Em cada ponto monitorado da armadura foram colados dois extensômetros a meia altura em lados opostos (tendo como referência a face do pilar) como apresentado na Figura 3.19.

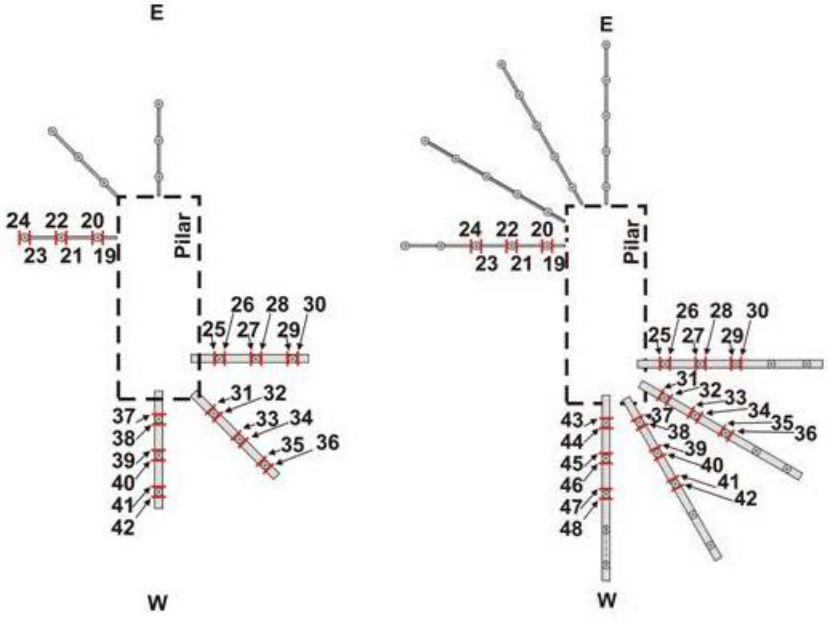


Figura 3.19 – Posicionamento dos EER na nas lajes

3.4.2.3 Instrumentação do concreto

No concreto, a instrumentação foi feita na face inferior da laje. Sendo colados extensômetros nas direções Radial e Tangencial. A Figura 3.20 mostra o posicionamento esquemático dos extensômetros.

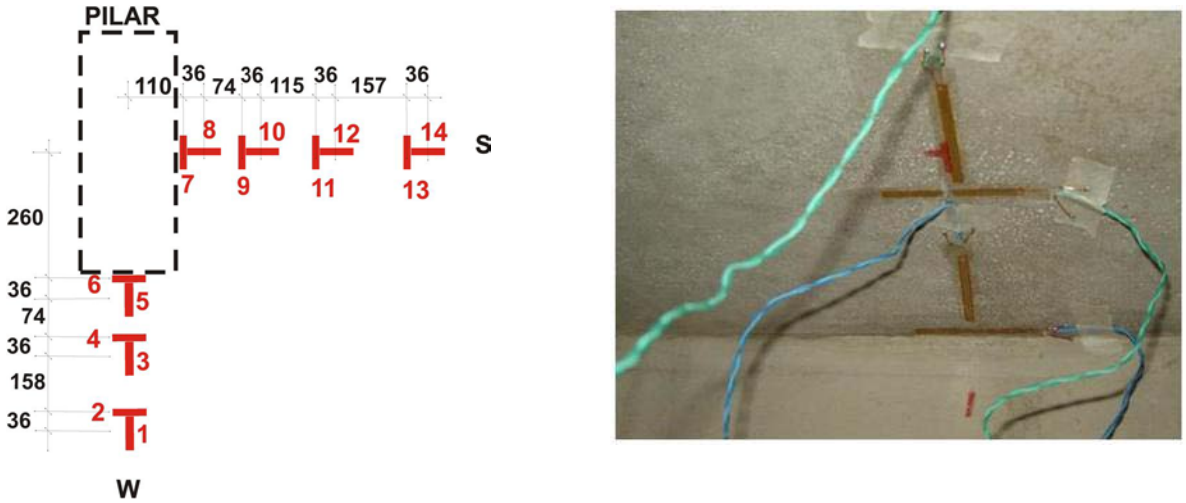


Figura 3.20 – Posicionamento dos EER no concreto (face inferior das lajes)

3.5 DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS ETAPAS DE PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

Para todas as lajes ensaiadas foram realizados os mesmos processos e etapas, diminuindo possíveis adições de variáveis não controladas nesta pesquisa. A seguir estão relacionados os passos seguidos.

1º - Posicionamento da laje no local de ensaio, ficando esta apoiada sobre o bloco de concreto e presa pelos tirantes. Em seguida, o nivelamento da laje com a utilização de blocos prismáticos de concreto e cunhas de madeira sob as laterais. Aplicação de gesso pedra entre o bloco e a base do pilar fixando o nível adequado.

3º - Fixação do sistema de protensão do pilar, com gesso pedra e posicionamento do cilindro hidráulico de 150 t, porca e arruela. Protender o pilar com carga de 700 kN.

5º - Marcações na laje para posicionamento das chapas de aplicação de carga (sob as vigas metálicas), vigas de distribuição (vigas metálicas) e as chapas sobre as vigas metálicas, niveladas, para apoio dos atuadores hidráulicos. Colocação dos cilindros hidráulicos de 50 t, células de carga, porcas e arruelas das bordas;

9º - Fixação das plaquetas dos relógios comparadores;

10º - Instalação da bomba (atuador de acionamento manual) com conexões hidráulicas e mangueiras a cada cilindro hidráulico;

11º - Colocação das vigas de apoio dos relógios comparadores;

12º - Instalação das leitoras de carga e dos sistemas de aquisição de dados dos extensômetros (EER);

13º - Colocação dos relógios comparadores e ligação dos equipamentos;

14º - Ajuste dos tirantes quanto ao prumo em duas direções;

15º - Execução do pré-carregamento com a finalidade de verificar o correto funcionamento de todos os aparelhos;

16º - Execução do ensaio constando a cada passe de carga a leitura das células de carga, relógios comparadores e extensômetros (EER). E a marcação da evolução de fissuras na laje;

17º - Retirada dos equipamentos elétricos, das vigas de distribuição, cilindros hidráulicos laterais, células de carga, da protensão do pilar e os demais equipamentos do sistema; limpeza da laje para registro fotográfico e retirada da laje do local de ensaio;

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais componentes as lajes (propriedades mecânicas do concreto e do aço), os resultados experimentais referentes à carga e modo de ruptura, deslocamentos verticais, deformações específicas e o estágio final de fissurações das lajes.

Apresentam-se, também, as comparações dos resultados obtidos experimentalmente com trabalhados realizados anteriormente e os resultados estimados pelas Normas e outros Métodos de Cálculo, em relação à capacidade de resistência das lajes ao puncionamento.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Concreto

Foram moldados corpos de prova (CP) para determinação das seguintes propriedades mecânicas do concreto: resistência a compressão (f_c), resistência à tração por compressão diametral (f_t) e módulo de elasticidade (E_c) nas idades 7, 14, 21, 28 e 60 dias, as quais estão apresentadas na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 (os resultados são as médias de dois corpos de prova - CP). A Figura 4.1 apresenta a evolução da resistência do concreto de acordo com as idades de ensaio. Foram utilizadas as seguintes normas: NBR 7222/94, NBR 5739/94 e NBR 6118/2003.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização do concreto – 1ª concretagem

Resultados da 1ª Concretagem - CAA															
Datas	**7 dias**			**14 dias**			**21 dias**			**28 dias**			**60 dias**		
	10/05/2008			**17/05/2008**			**24/05/2008**			**31/05/2008**			**19/07/2008**		
	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**
f_c (MPa)	17,6	23,6	**23,8**	23,4	27,7	**26,8**	29,1	31,2	**29,4**	32,4	31,5	**30,5**	31,4	31,5	**32,5**
E_c (MPa)	21,4	21,4	**21,4**	22,9	23,7	**23,3**	25,0	23,2	**24,1**	23,6	26,4	**25,0**	25,3	26,1	**25,7**
f_t (MPa)	2,4	3,0	**2,7**	3,0	3,2	**3,1**	3,5	3,0	**3,3**	3,5	3,3	**3,4**	3,6	3,5	**3,6**

Tabela 4.2– Resultados dos ensaios de caracterização do concreto – 2ª concretagem

Resultados da 2ª Concretagem - CAA															
Datas	**7 dias**			**14 dias**			**21 dias**			**28 dias**			**60 dias**		
	10/05/2008			**17/05/2008**			**24/05/2008**			**31/05/2008**			**19/07/2008**		
	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**	CP1	CP2	**M**
f_c (MPa)	24,7	23,3	**24,0**	28,5	27,9	**27,6**	31,0	29,8	**29,5**	31,4	31,6	**30,8**	32,8	32,3	**32,7**
E_c (MPa)	17,7	18,6	**18,2**	22,2	20,2	**21,2**	24,0	23,8	**23,9**	24,1	25,5	**24,8**	-	-	-
f_t (MPa)	2,9	2,8	**2,8**	3,3	2,9	**3,1**	3,5	3,4	**3,5**	3,5	3,5	**3,5**	-	-	-

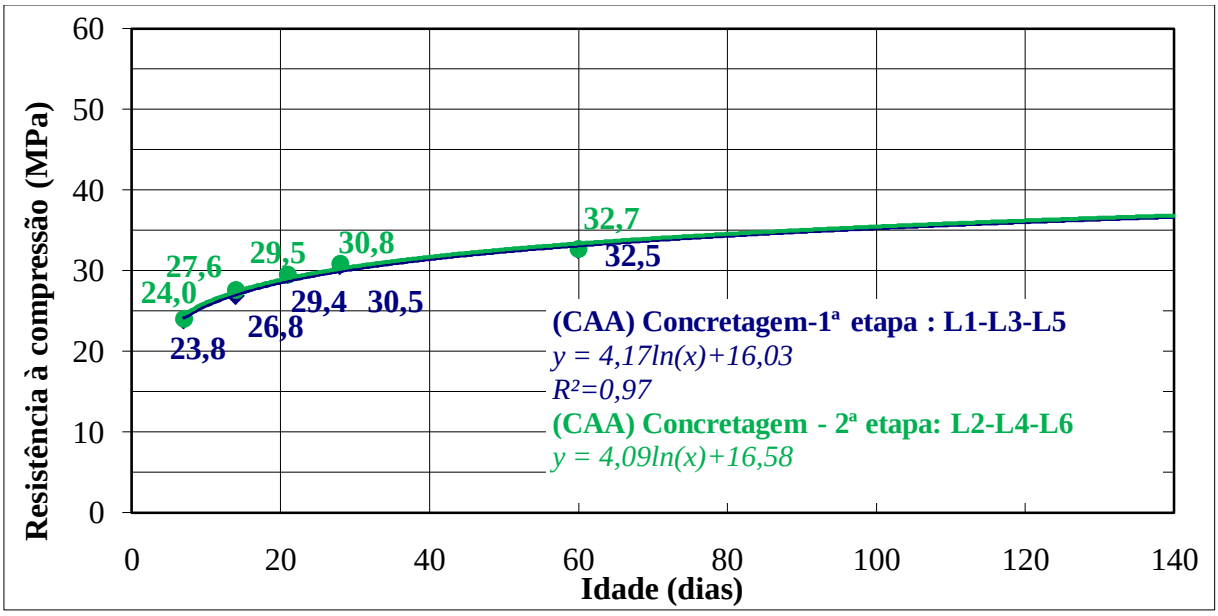


Figura 4.1 – Gráfico da Resistência à Compressão do Concreto

Na Tabela 4.3 está apresentada a evolução das características mecânicas das lajes no dia do ensaio. As resistências à compressão foram calculadas através da relação sugerida pelo CEB-FIP (1990).

Tabela 4.3 – Idades e resistências das lajes no dia do ensaio

Laje	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Idades (dias)	116	49	109	62	96	68
f_c (MPa) (1)	34,6	32,7	34,5	33,4	34,2	33,7
E_c (MPa)	27,5	27,7	27,3	28,9	27,1	29,4
f_t (MPa)	3,9	3,8	3,9	3,9	3,8	3,9

$$(1) \quad f_{cm}(t) = \exp\left\{ s\left[1 - \left(\frac{28}{(t/t_1)} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{cm}$$

Sendo:

$f_{cm}(t)$ – Resistência à compressão média a t dias;

f_{cm} – Resistência à compressão média a 28 dias de idade;

t_1 – 1 dia;

s – coeficiente que depende do tipo de cimento, tal como s=020 para cimento de alta resistência inicial; s=0,25, para cimento comum; s=0,38, para cimentos de endurecimento lento (com adições).

4.1.2 Aço

No ensaio de caracterização do aço, realizado no Laboratório de Resistência dos Materiais da Universidade Católica de Goiás em uma prensa Emic de acordo com a Figura 4.2, foram obtidas as seguintes propriedades mecânicas: tensão de escoamento (f_y) e de ruptura (f_u), deformação (ε) e o módulo de elasticidade (E_s). De cada lote foram retiradas duas amostras com diâmetros 6,3, 8,0, 12,5 e 16,0 mm. A Tabela 4.4 apresenta os resultados de todas as barras ensaiadas. A Figura 4.3 mostra os diagramas tensão-deformação das amostras de aço do Grupo 1 e a Figura 4.4, do Grupo 2. Todas as barras ensaiadas apresentaram uma relação elástica (**f_u / f_y**) satisfatória de acordo com a NBR 7480:2007, obtendo coeficientes maiores que 1,05.

Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas do aço do Grupo 1 e 2

Diâmetro (mm)	Grupo 1				Grupo 2			
	f_y (MPa)	ε_y (mm/m)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	f_y (MPa)	ε_y (mm/m)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
6,3	680,8	4,16	799,8	163,7	681,8	3,77	800,8	180,9
8,0	611,5	3,69	706,3	165,7	592,9	3,46	698,1	171,4
12,5	600,5	2,41	756,4	224,2	609,7	2,33	756,1	221,0
16,0	572,5	3,05	709,0	187,7	582,4	3,08	714,2	189,1

Figura 4.2 – Ensaio de caracterização do aço

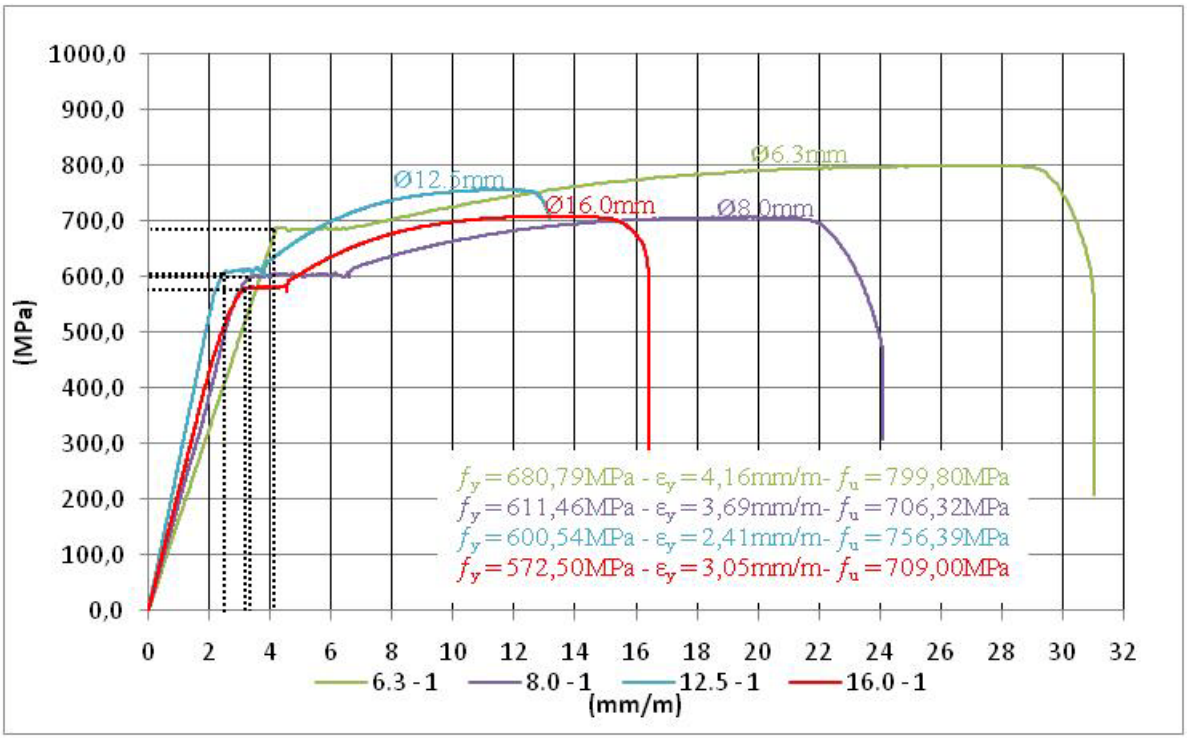


Figura 4.3 – Diagramas tensão-deformação das amostras de aço do Grupo 1

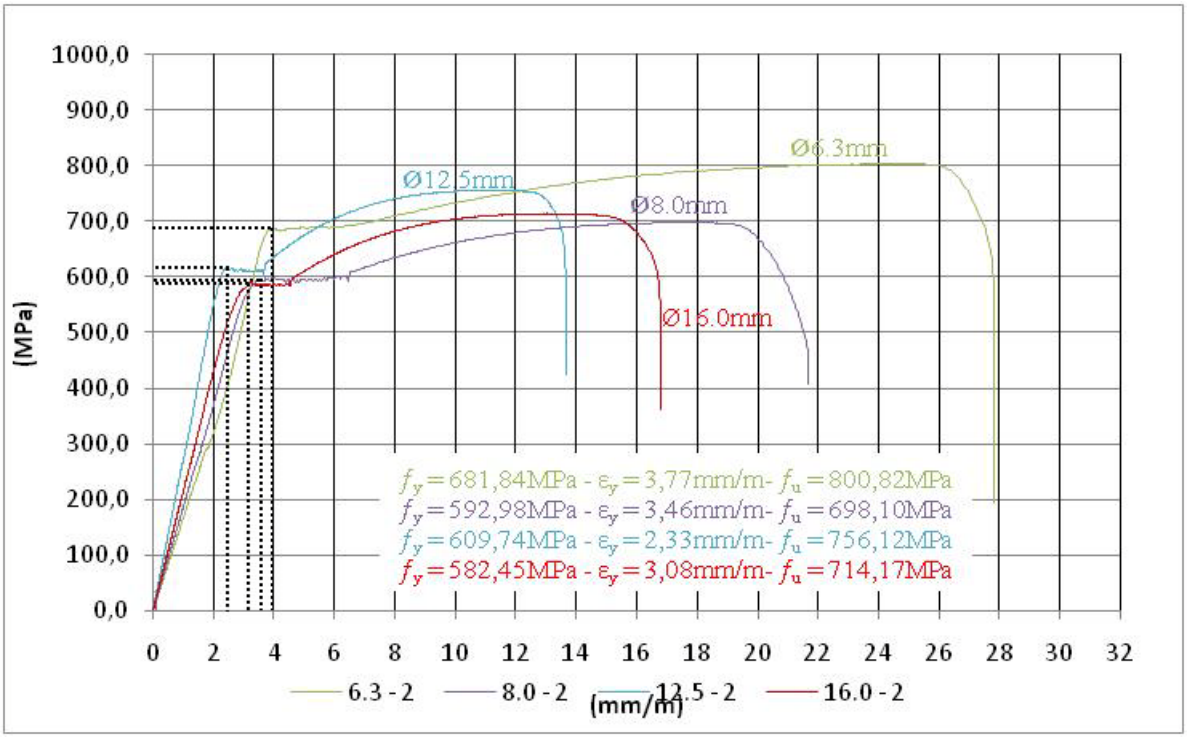


Figura 4.4 – Diagramas tensão-deformação das amostras de aço do Grupo 2

4.2 ARMADURA DE CISALHAMENTO

Para verificação da resistência da solda dos “studs” foram ensaiadas à tração amostras do tipo “studs rails” nos diâmetros 6,3 mm e 8,0 mm com o auxilio de um dispositivo desenvolvido por GOMES e ANDRADE (1999). Este dispositivo (não normalizado) é similar a um gancho colocado nas extremidades dos “studs” que traciona os elementos da armadura de cisalhamento pelas chapas superior e inferior (Figura 4.5 e Figura 4.6).

As amostras ensaiadas romperam na solda de ligação dos pinos com as chapas de ancoragem superior, a Tabela 4.5 apresenta os valores dos ensaios. A ruptura da solda neste ensaio pode estar relacionada com o posicionamento deficiente gerado pelo contato do conjunto (solda - chapa de ancoragem) x (superfície do gancho).

Tabela 4.5 – Resistência à tração dos “studs”

Diâmetro (mm)	Amostra	f_u (MPa)	$f_{u,\ amostra}$ / f_y (MPa)
6.3	1	579,0	0,85
6.3	2	504,0	0,74
8.0	3	535,0	0,87
8.0	4	488,0	0,80

Figura 4.5 – Detalhes do dispositivo utilizado no ensaio dos “studs”

Figura 4.6 – Ensaio à tração dos “studs”

4.3 CARGA E MODO DE RUPTURA

Todas as lajes foram carregadas até atingirem a ruptura, rompendo todas por punção. As cargas últimas variaram de 510 kN (laje L2) até 708 kN (laje L5), como apresentado na Tabela 4.6.

A altura útil (d) final foi obtida medindo-se pedaços de concreto que fizeram o cobrimento das armaduras e subtraindo da altura total da laje (h=150,0 mm). A carga de ruptura adotada foi a soma do máximo valor registrado nas células de carga. Após o ensaio de cada laje foram retirados, com cuidado, os pedaços de concreto desprendidos em torno do pilar. Com este procedimento foi possível medir as superfícies de ruptura.

Tabela 4.6 – Carga de ruptura das lajes

Laje	f_c (MPa)	d (±2 mm)	ρ (%)	Armadura de Cisalhamento						P_u (MPa)
				Ø (mm)	f_y (MPa)	Nº de linhas	Nº de camadas	Âng. Entre linhas	A_s f_y / camada	
GRUPO 1 – "Stud rails" (S_0 = 50,0 mm e S_r = 90,0 mm)										
L1	35,9	112	1,23	6,3	680	10	3	45º	212	591,7
L3	35,6	112	1,23	6,3	680	14	5	30º	297	636,1
L5	35,1	110	1,23	8,0	611	14	5	30º	430	707,6
GRUPO 2 – "double headed studs" (S_0 = 50,0 mm e S_r = 90,0 mm)										
L2	32,5	112	1,23	6,3	680	10	3	45º	212	510,8
L4	33,5	109	1,23	6,3	680	14	5	30º	297	595,5
L6	33,8	108	1,23	8,0	611	14	5	30º	430	583,0
– Todas as lajes tiveram ruptura interna à armadura de cisalhamento;										

As lajes do Grupo 1, com armadura de cisalhamento "stud rails", tiveram superfície de ruptura cruzando a região armada à punção passando pela primeira ou a segunda camada de armadura. Romperam com as cargas L1=591,7 kN, L3=636,1 kN e L5=707,6 kN. As lajes L1 e L3 tiveram altura útil igual a 112,0 mm e a L5, igual a 110 mm e com resistência à compressão do concreto em torno de 35,0 MPa.

Para as lajes do Grupo 2, com armadura de cisalhamento "double headed studs", a superfície de ruptura cruzou a armadura de cisalhamento passando pela primeira ou segunda camada e as lajes romperam com cargas L2=510,8 kN, L4=595,5 kN e L6=583,0 kN que, quando comparadas às cargas de ruptura das lajes do Grupo 1, apresentam valores menores. A resistência à compressão do concreto ficou em torno de 33,0 MPa. A laje L2 teve uma altura útil de 112,0 mm, maior que as lajes L4=109,0 mm e L6=108,0 mm, a menor de todas.

O esquema da superfície de ruptura das lajes é apresentado na Figura 4.7 e Figura 4.8, e na Figura 4.9 é mostrada a vista superior das lajes após a ruptura.

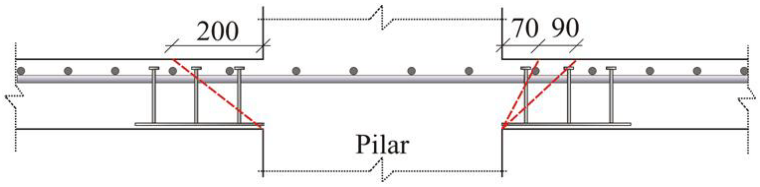
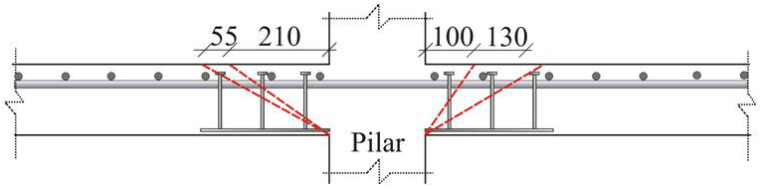
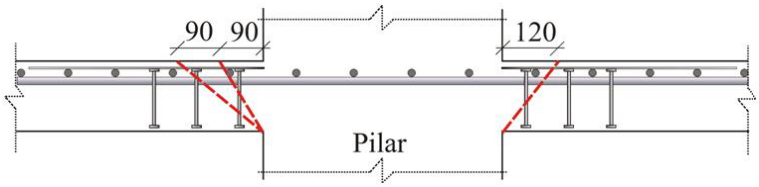
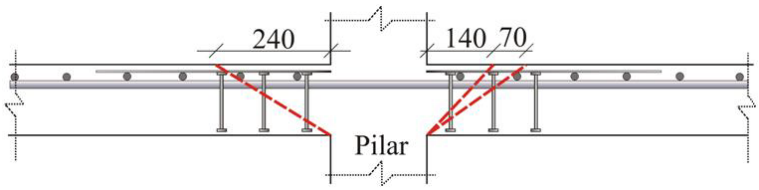
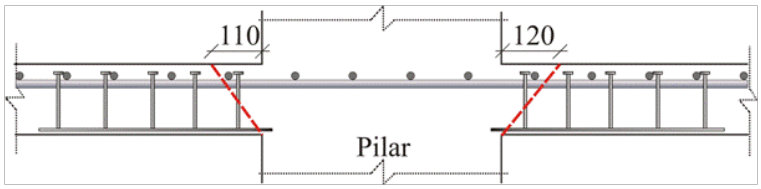
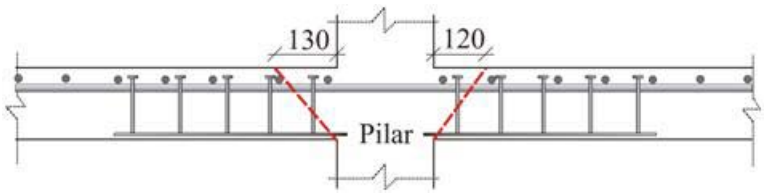
	Seção (mm)	f_c (MPa)	P_u (MPa)	d (±2 mm)
L1	Direção W-E  Direção N-S  	35,9	591,7	112
L2	Direção W-E  Direção N-S  	32,5	510,8	112
L3	Direção W-E  Direção N-S  	35,6	636,1	112

Figura 4.7 – Superfícies de ruptura das lajes L1, L2 e L3

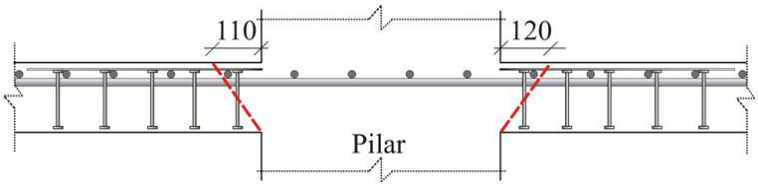
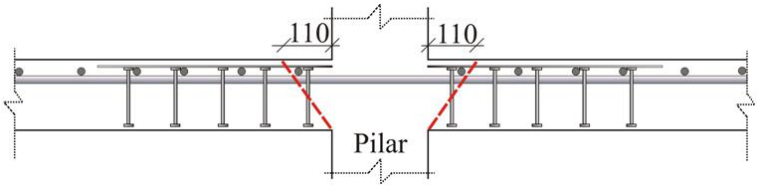
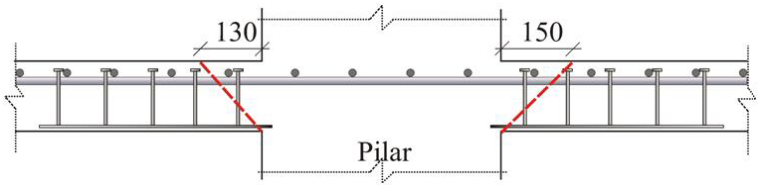
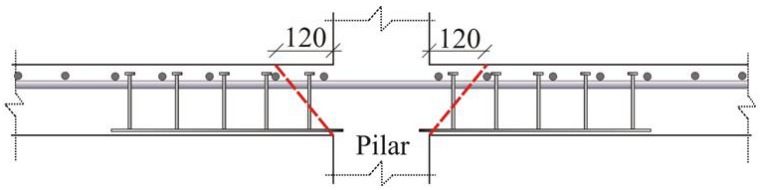
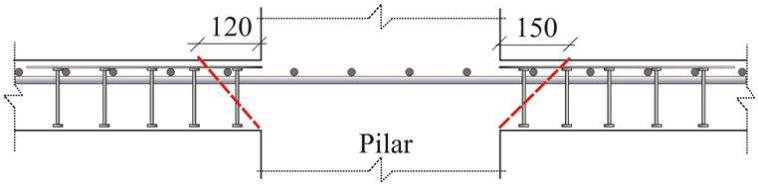
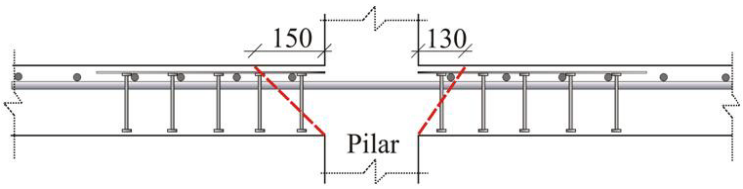
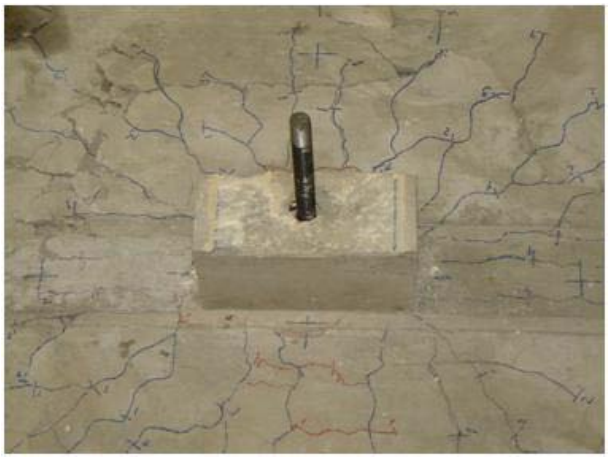
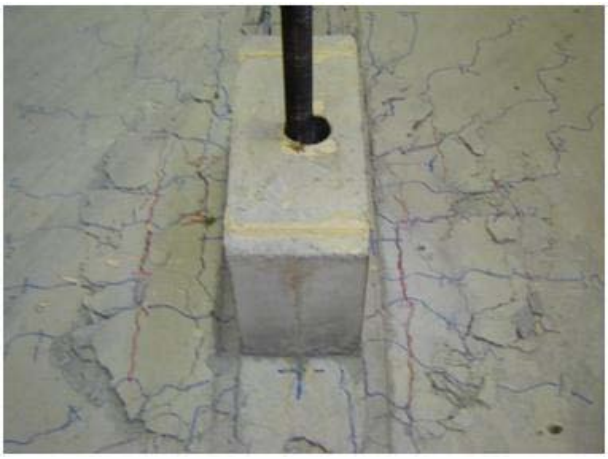
	Seção (mm)	f_c (MPa)	P_u (MPa)	d (±2 mm)
L4	Direção W-E  Direção N-S 	35,9	595,5	109
L5	Direção W-E  Direção N-S 	35,1	707,6	110
L6	Direção W-E  Direção N-S 	33,8	583,0	108

Figura 4.8 – Superfícies de ruptura das lajes L4, L5 e L6

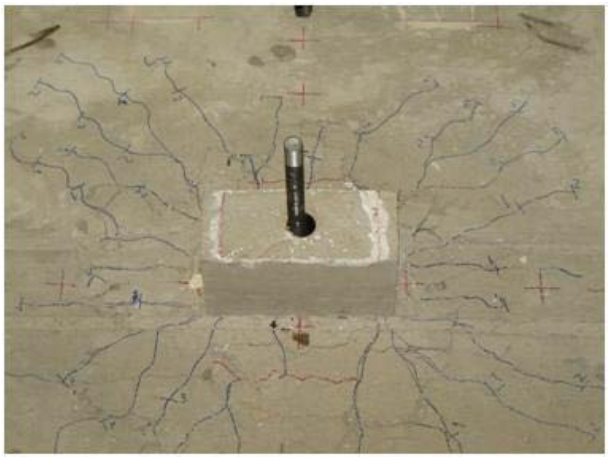
L1



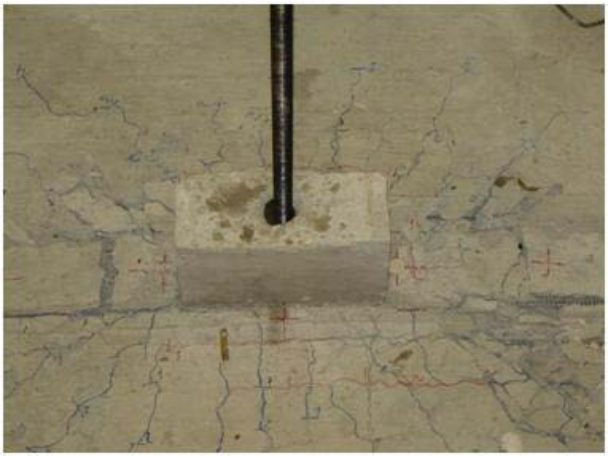
L2



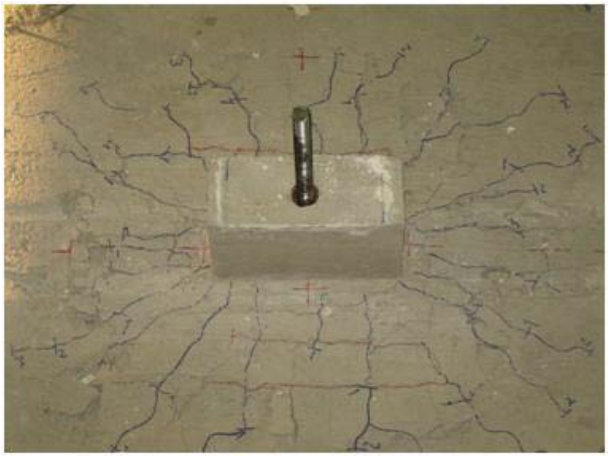
L3



L4



L5



L6

Figura 4.9 – Vista superior das lajes após a ruptura

4.4 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os deslocamentos das lajes foram obtidos com a utilização de relógios comparadores posicionados na face superior das lajes ensaiadas. Para cada intervalo de carregamento foram feitas as leituras até próximo a carga de ruptura da laje. Os relógios comparadores foram distribuídos sobre a laje em dois eixos ortogonais, sendo os relógios de D1 a D6 na direção W-E e de D7 a D12 na direção N-S.

Todos os gráficos das flechas nas lajes apresentaram simetria, sendo aproximadamente lineares, como nas Figura 4.10 eFigura 4.21. Os relógios D1, D6, D7 e D12 registraram as maiores deflexões em todos os estágios de carregamento. As flechas na direção N-S foram maiores que na direção W-E cerca de 16% a 18% em todas as lajes com exceção da laje L5, um percentual de 6%. A Laje L4 apresentou a maior flecha com aproximadamente 27,02 mm com mostra a Figura 4.17. Aproximadamente próximo ao carregamento de 100 kN constatou-se o momento de fissuração do concreto.

Os gráficos, da Figura 4.22 e Figura 4.23, mostram o desenvolvimento das flechas registradas pelos relógios D1, D6, D7 e D12 de todas as lajes. Comparando as lajes L1 e L2, L3 e L4, L5 e L6 os gráficos apresentam comportamentos semelhantes, respectivamente, quanto ao aumento da flecha no instante do mesmo incremento de carga.

Com o aumento de linhas e camadas de armadura de cisalhamento, a laje L3 apresentou flecha menor que a laje L2 e a L4 maior que a L2. Fato que não se repetiu ao manter a mesma configuração de armadura de cisalhamento e alterar somente o diâmetro dos “studs” de 6.3 mm para 8.0 mm, o que pode ser observado nas Lajes L5 e L6 que tiveram flechas pouco menores que as lajes L3 e L4, respectivamente.

Embora as lajes do Grupo 2 tenham apresentado cargas de ruptura menores que as do Grupo 1, em torno de 14% a 16% para L2 e L6, e 6% para a L4 as flechas últimas destas aproximam-se das flechas das lajes do Grupo 1.

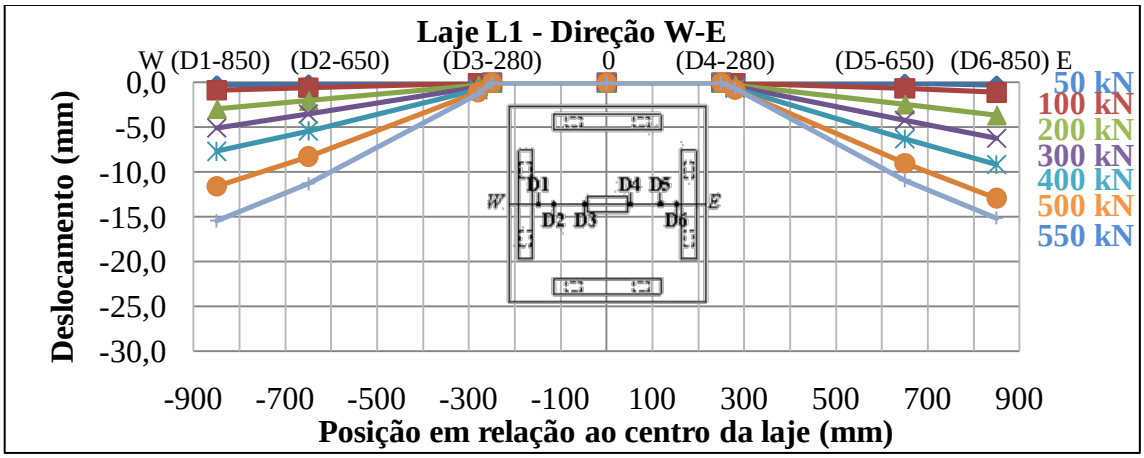


Figura 4.10 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L1

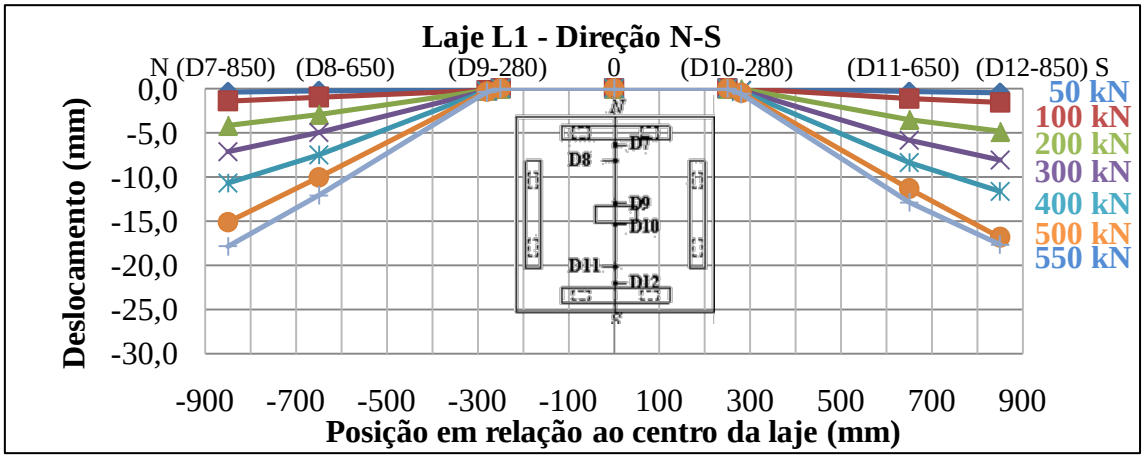


Figura 4.11 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L1

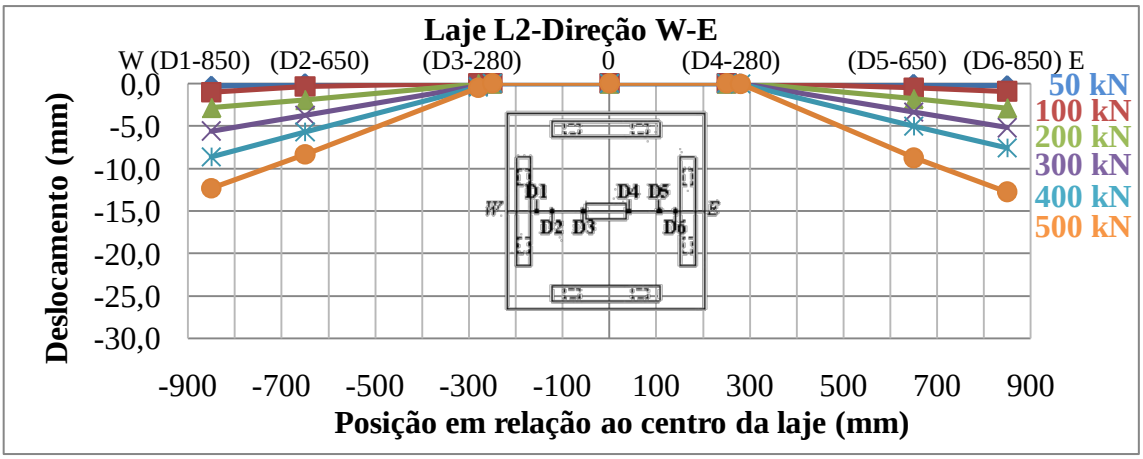


Figura 4.12 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L2

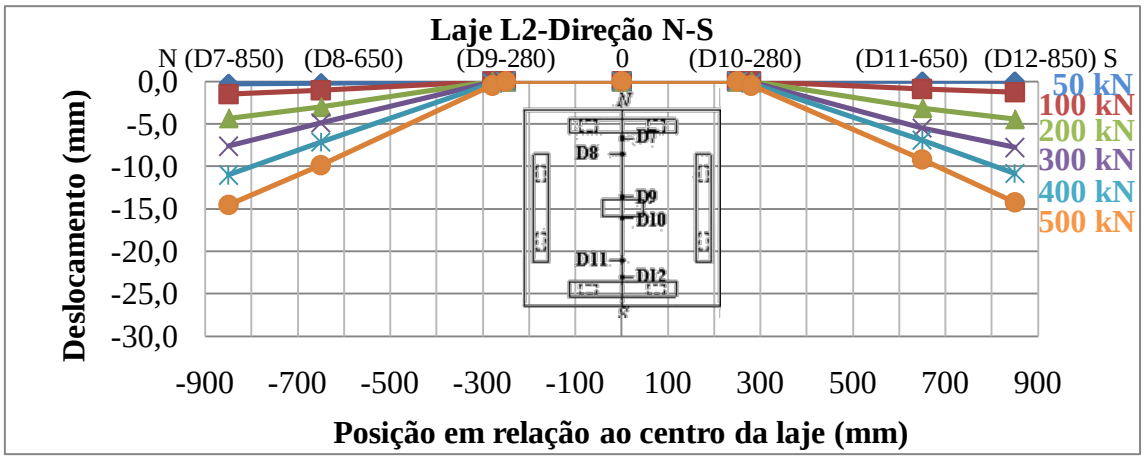


Figura 4.13 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L2

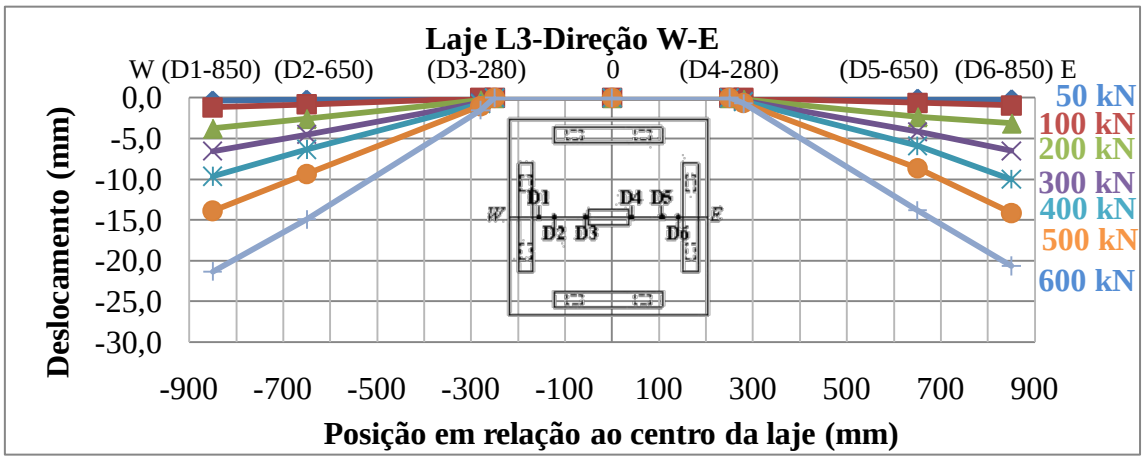


Figura 4.14 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L3

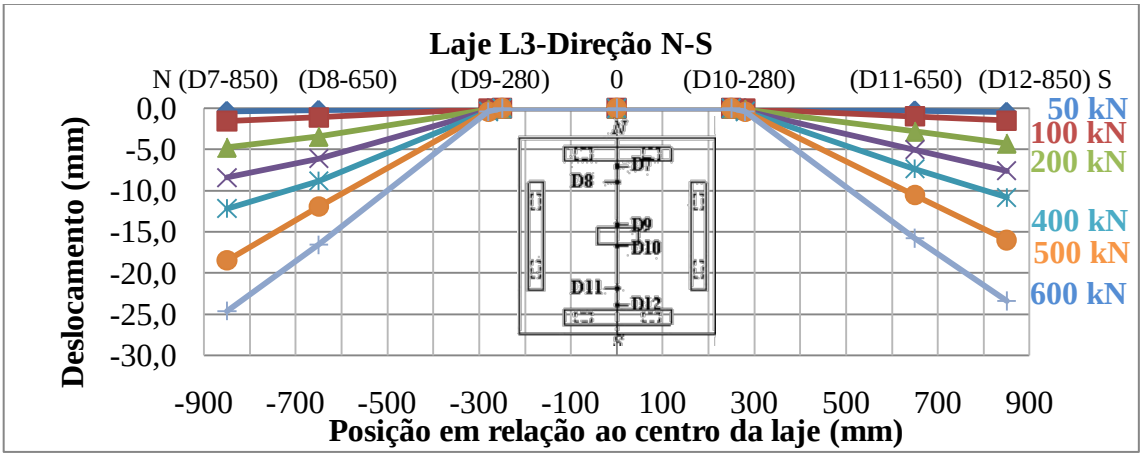


Figura 4.15 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L3

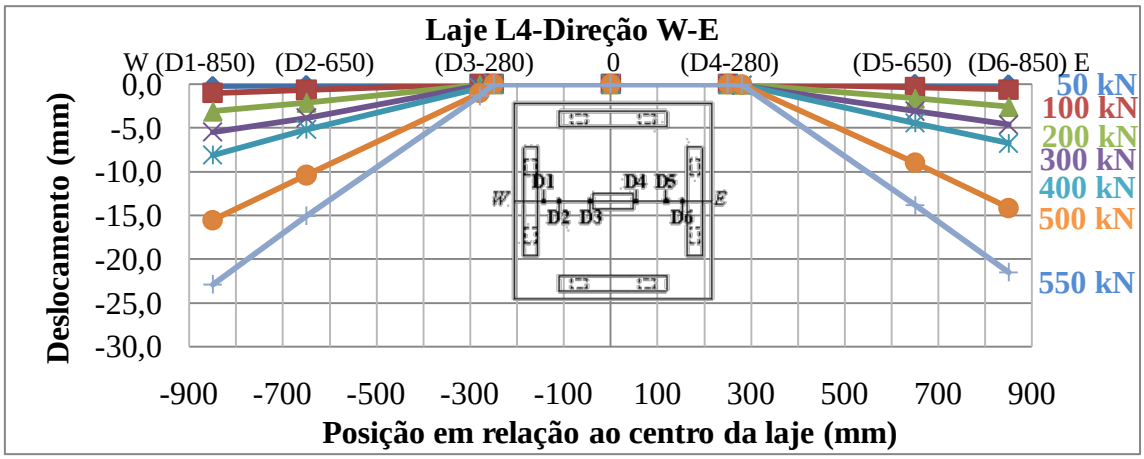


Figura 4.16 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L4

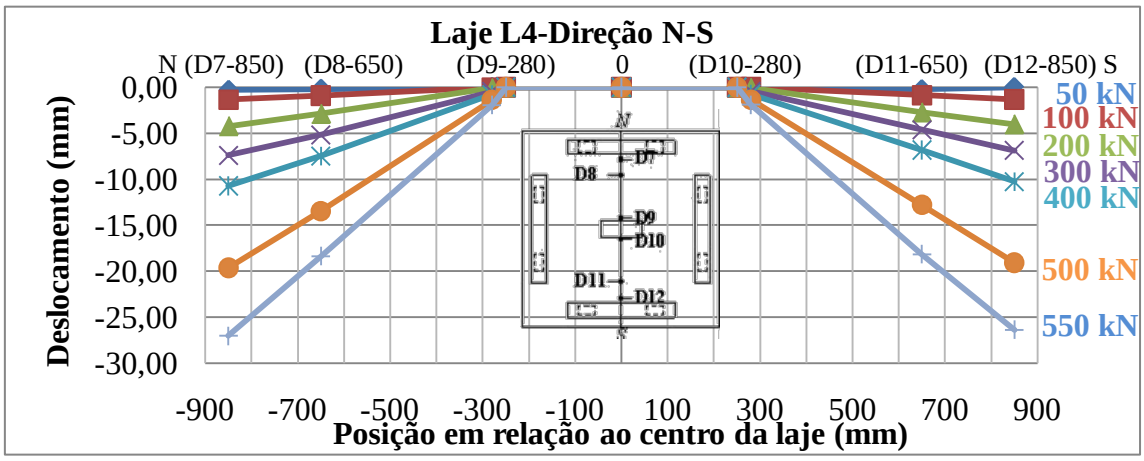


Figura 4.17 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L4

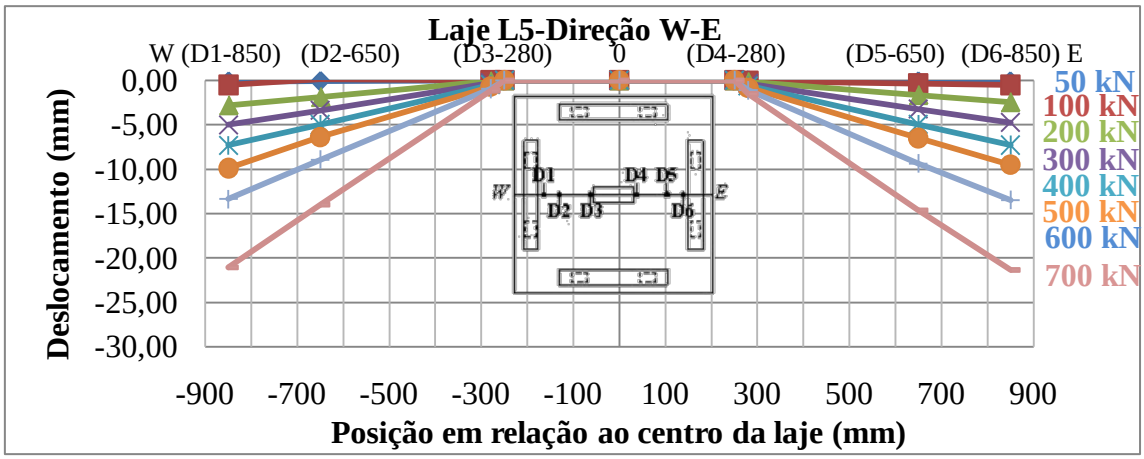


Figura 4.18 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L5

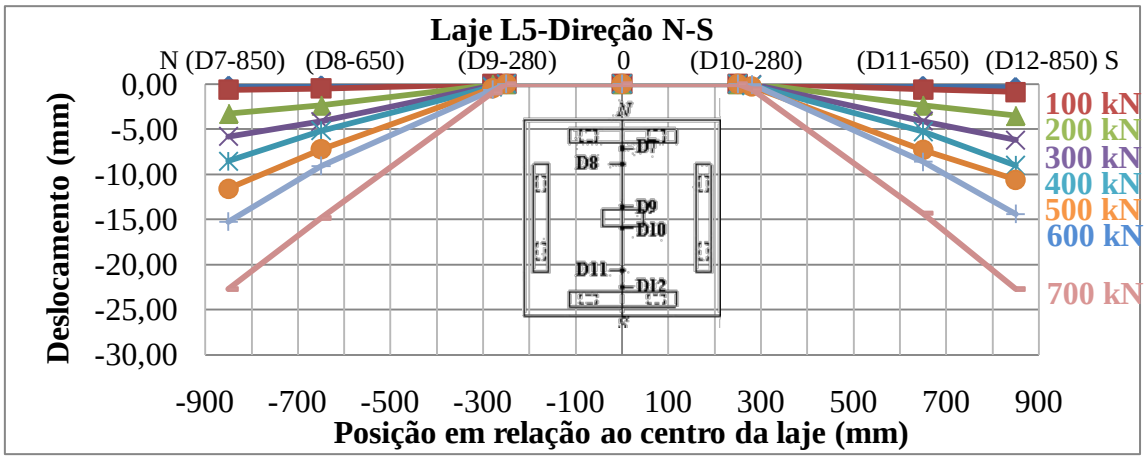


Figura 4.19 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L5

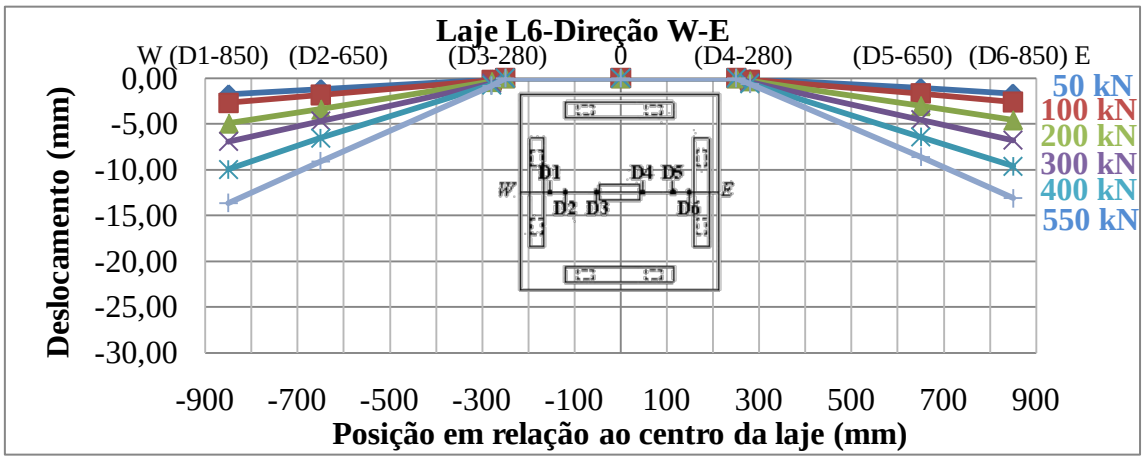


Figura 4.20 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L6

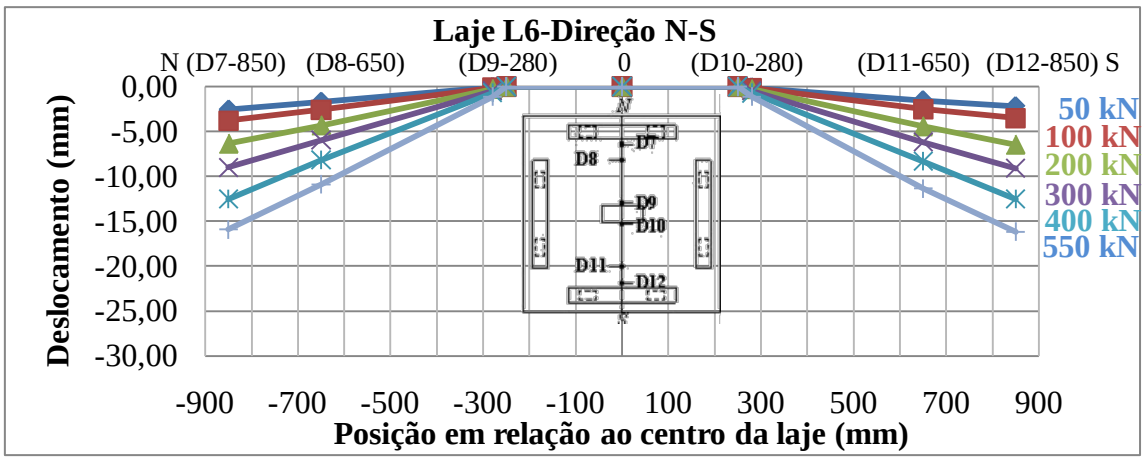


Figura 4.21 – Deslocamentos verticais medidos na Laje L6

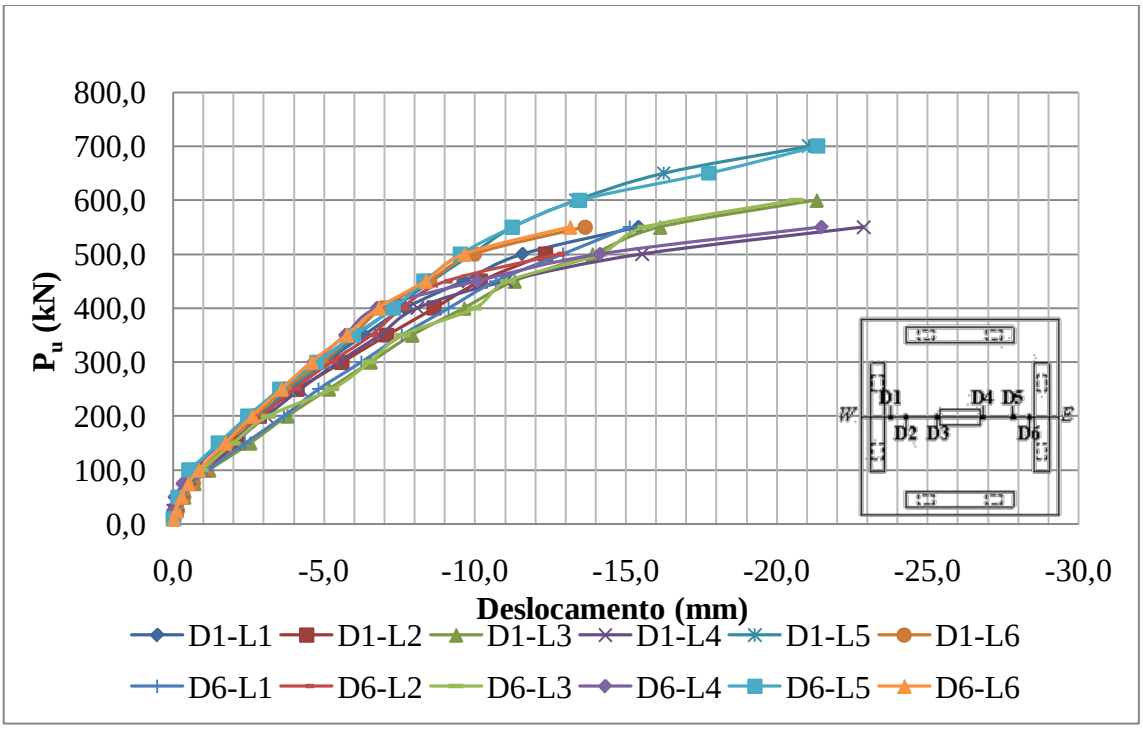


Figura 4.22 – Deslocamentos verticais medidos do relógio D1 e D6 de todas as lajes

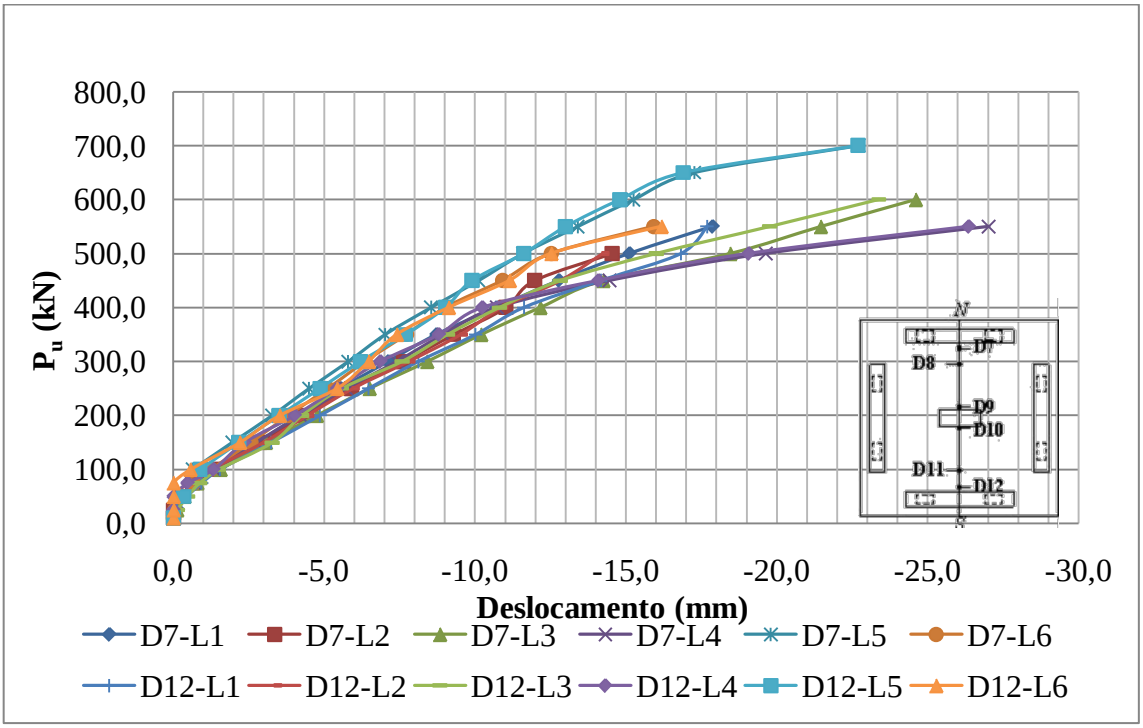


Figura 4.23 – Deslocamentos verticais medidos do relógio D7 e D12 de todas as lajes

4.5 DEFORMAÇÕES

4.5.1 Armadura de flexão

As Figura 4.24 e Figura 4.25 mostram que a armadura de flexão das Lajes L1 e L2 não atingiram o escoamento. Nas lajes L3 e L4, Figura 4.26 e Figura 4.27, o escoamento foi atingido com o carregamento em torno de 550 kN, e nas Lajes L5 e L6 com um carregamento de 500 kN a 650 kN, conforme mostrado nas Figura 4.28 e Figura 4.29.

As deformações medidas apresentaram crescimento a cada incremento de carga sendo maiores nos extensômetros próximos ao ponto de aplicação do carregamento.

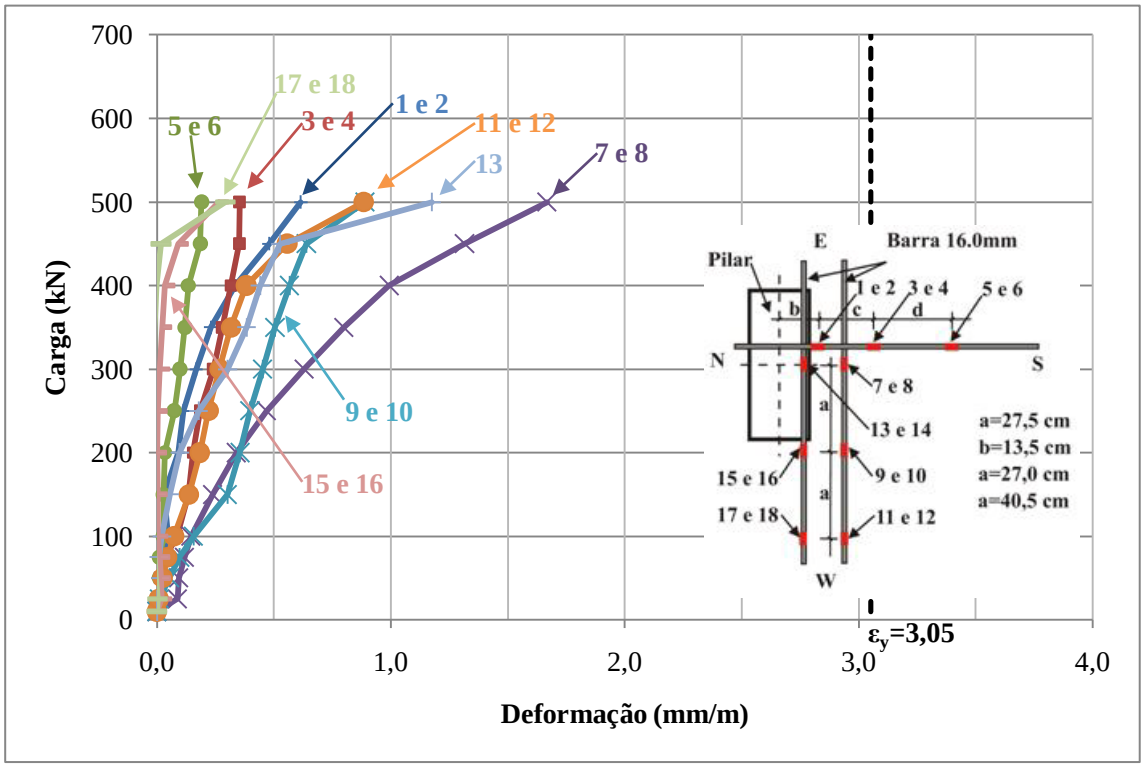


Figura 4.24 – Carga-deformação da armadura de flexão da L1

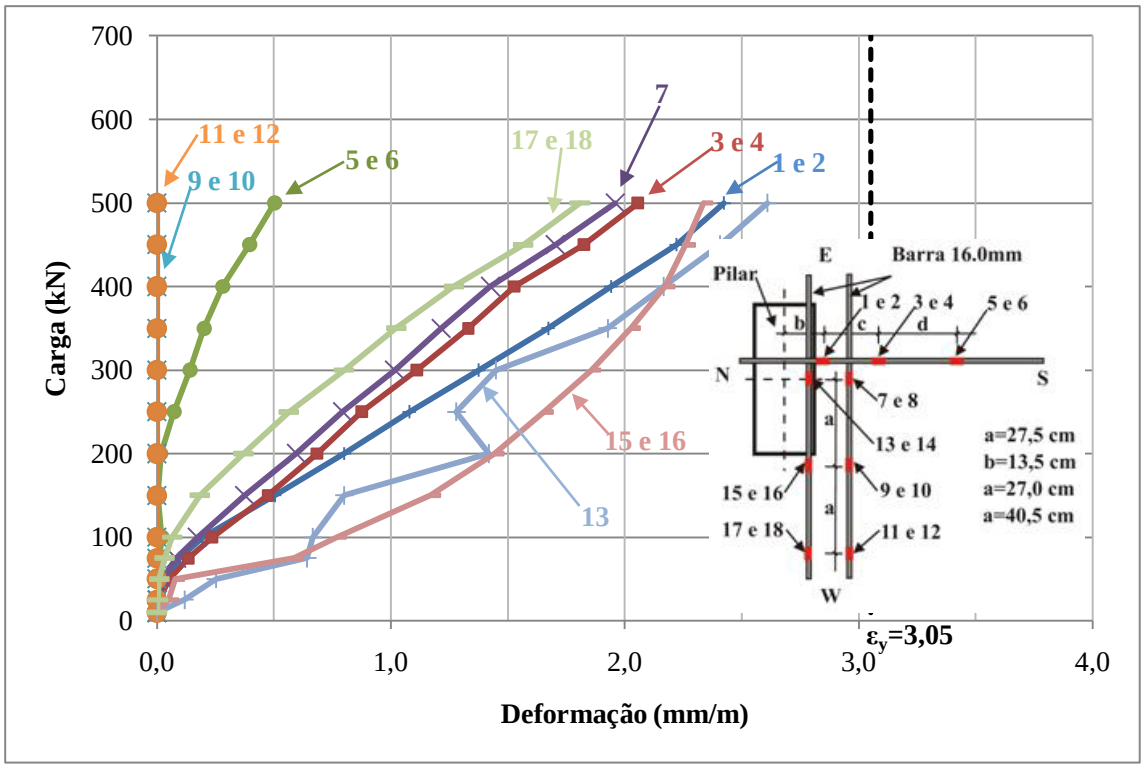


Figura 4.25 – Carga-deformação da armadura de flexão da L2

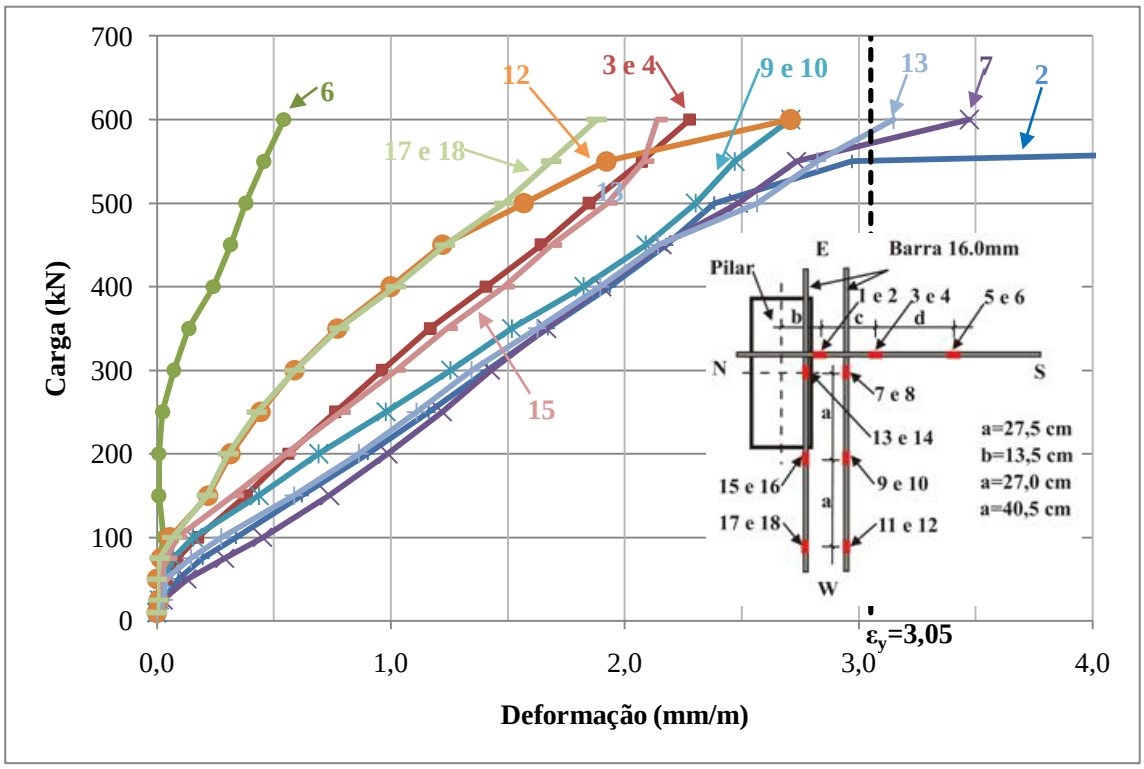


Figura 4.26 – Carga-deformação da armadura de flexão da L3

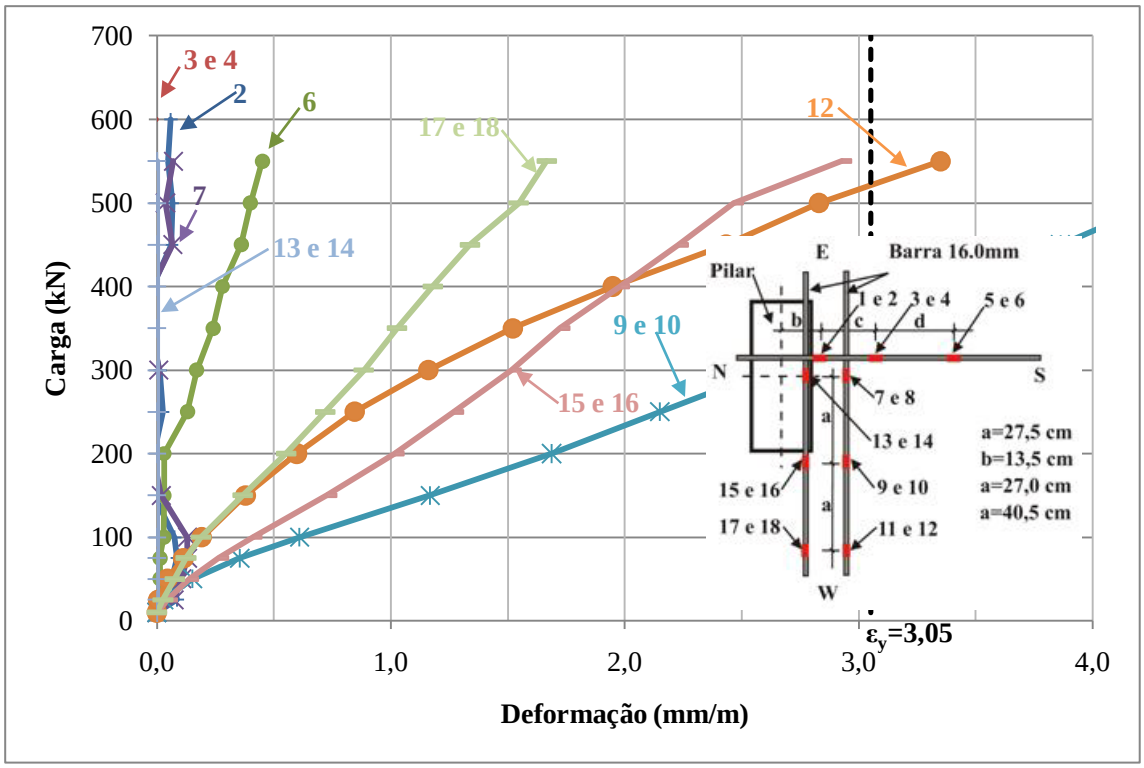


Figura 4.27 – Carga-deformação da armadura de flexão da L4

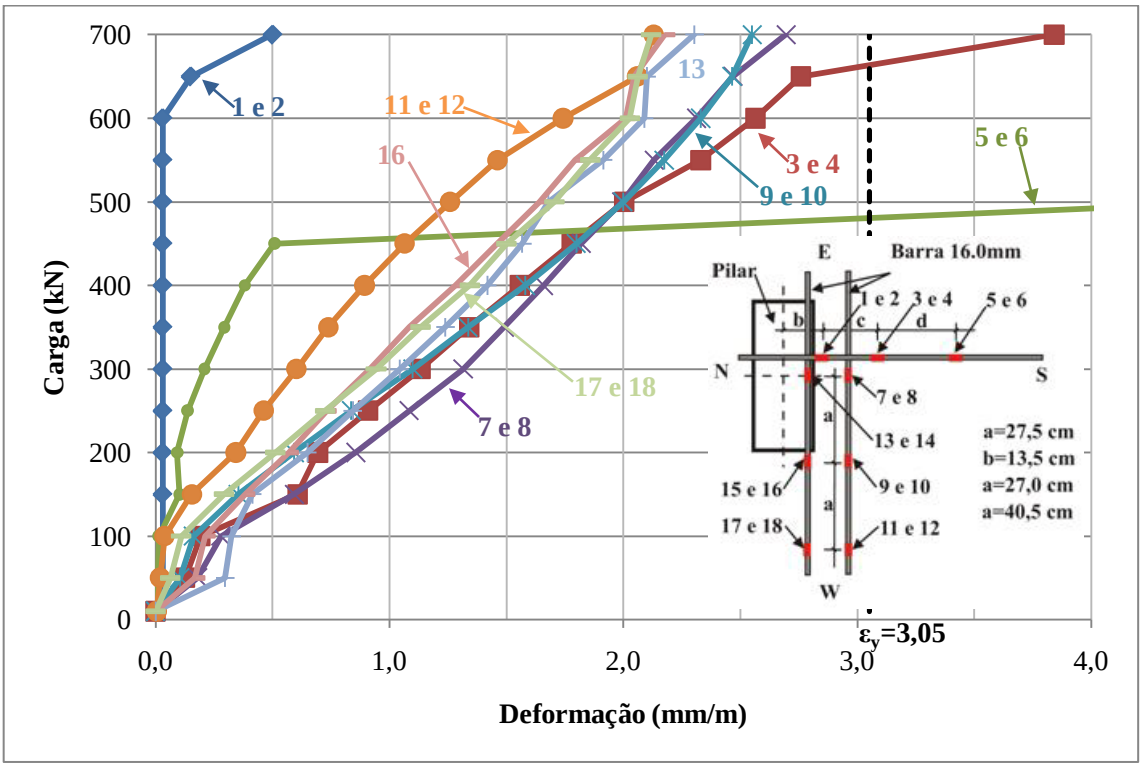


Figura 4.28 – Carga-deformação da armadura de flexão da L5

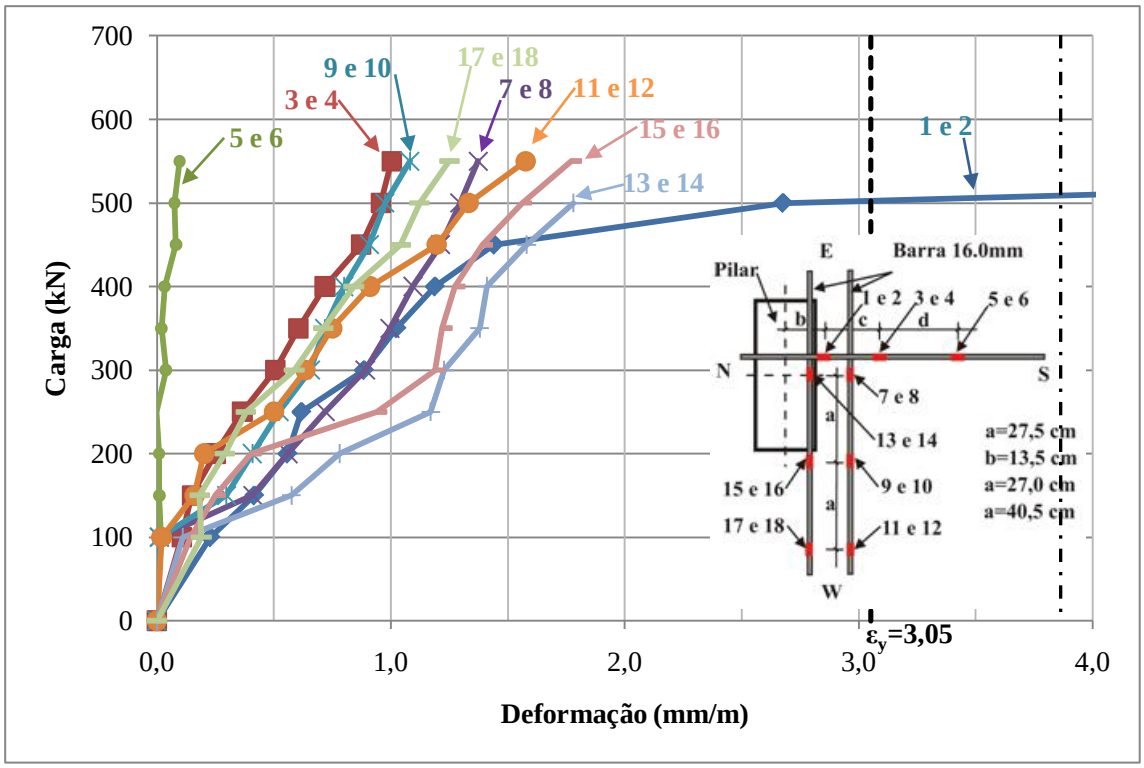


Figura 4.29 – Carga-deformação da armadura de flexão da L6

4.5.2 Armadura de cisalhamento

Nas lajes dos Grupos 1 e 2 as armaduras instrumentadas não atingiram a deformação correspondente ao escoamento, como mostrado nas Figura 4.30 a Figura 4.45. As deformações medidas nas lajes L1 (ε_y=3,20 – linha 3), L3 (ε_y=3,46 – linha 5) e L4 (ε_y=3,50 – linha 1) apresentaram deformações próximas ao escoamento com 77%, 83% e 84% respectivamente, sendo as máximas registradas. Contudo, os gráficos apresentam trechos horizontais distintos indicando possível escoamento como na Figura 4.37, caracterizando que a superfície de ruptura cruzou a armadura de cisalhamento.

Todas as lajes tiveram a 1ª camada da armadura de cisalhamento como a mais solicitada. As deformações registradas nas linhas 1 e 2, simétricas na direção N-S, mostraram-se equivalentes com valores aproximados. A evolução destas deformações se mostraram similares em ambas as lajes com “stud rails” do Grupo 1 ou “double headed studs” do Grupo 2.

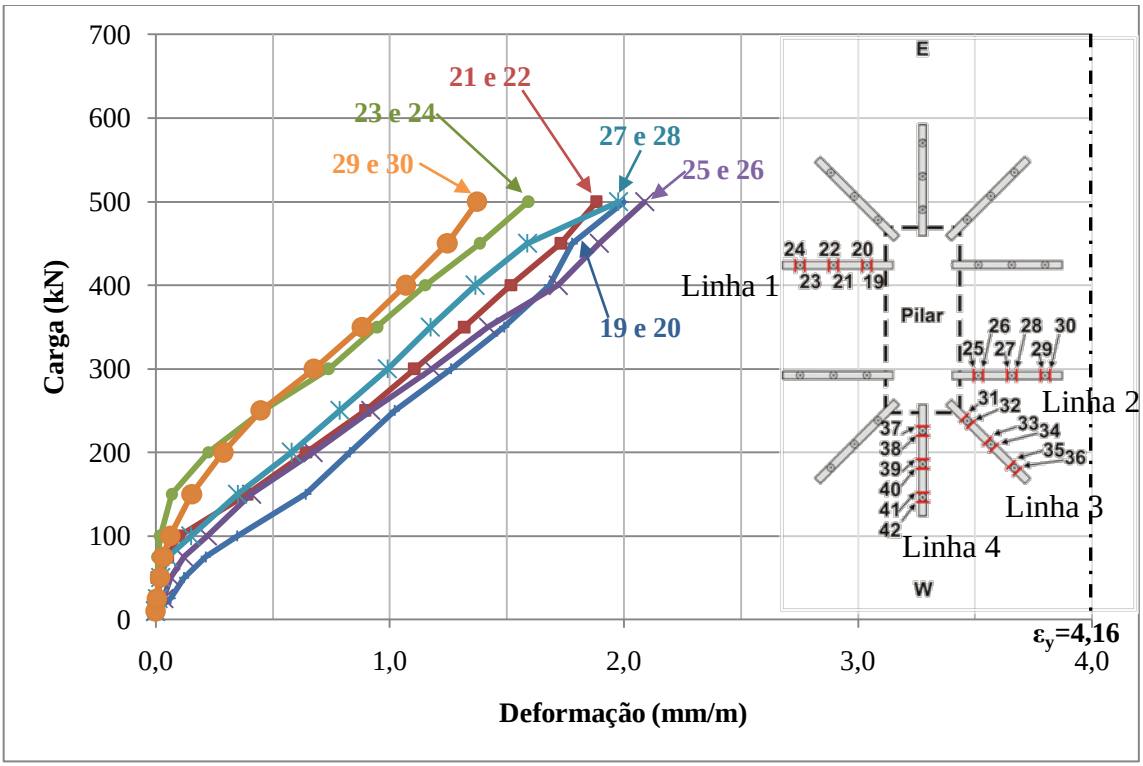


Figura 4.30 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L1–Linhas 1 e 2

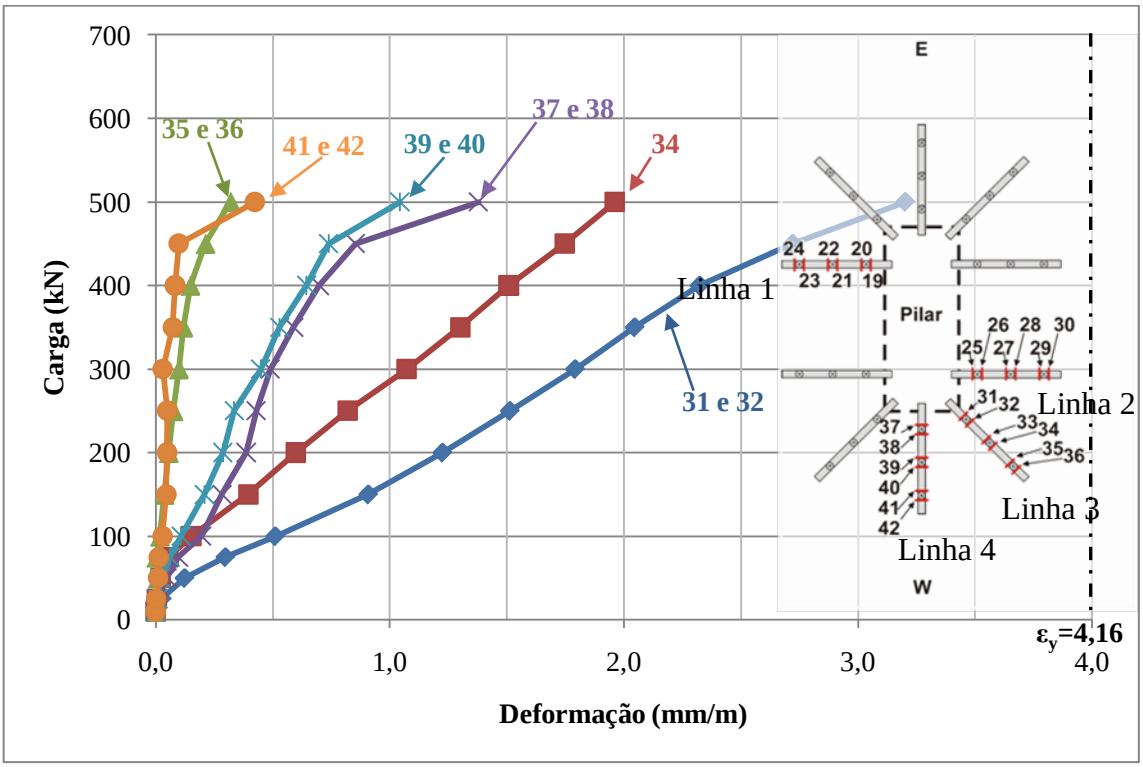


Figura 4.31 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L1–Linhas 3 e 4

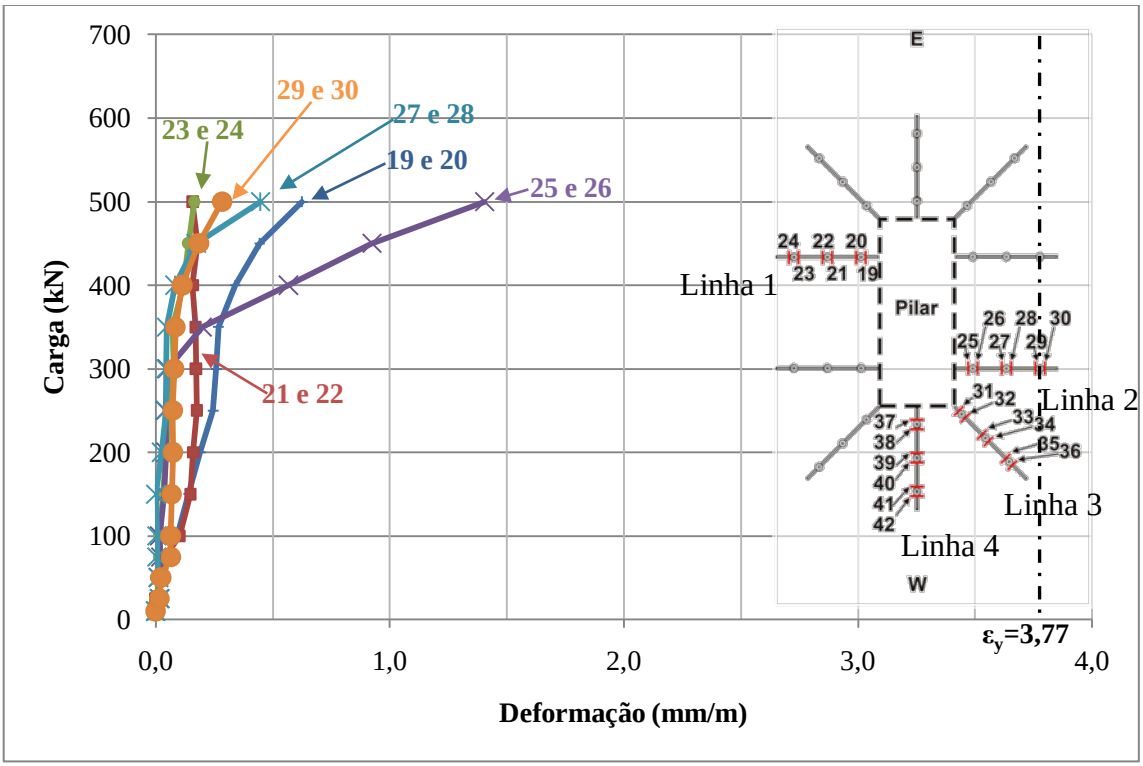


Figura 4.32 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L2–Linhas 1 e 2

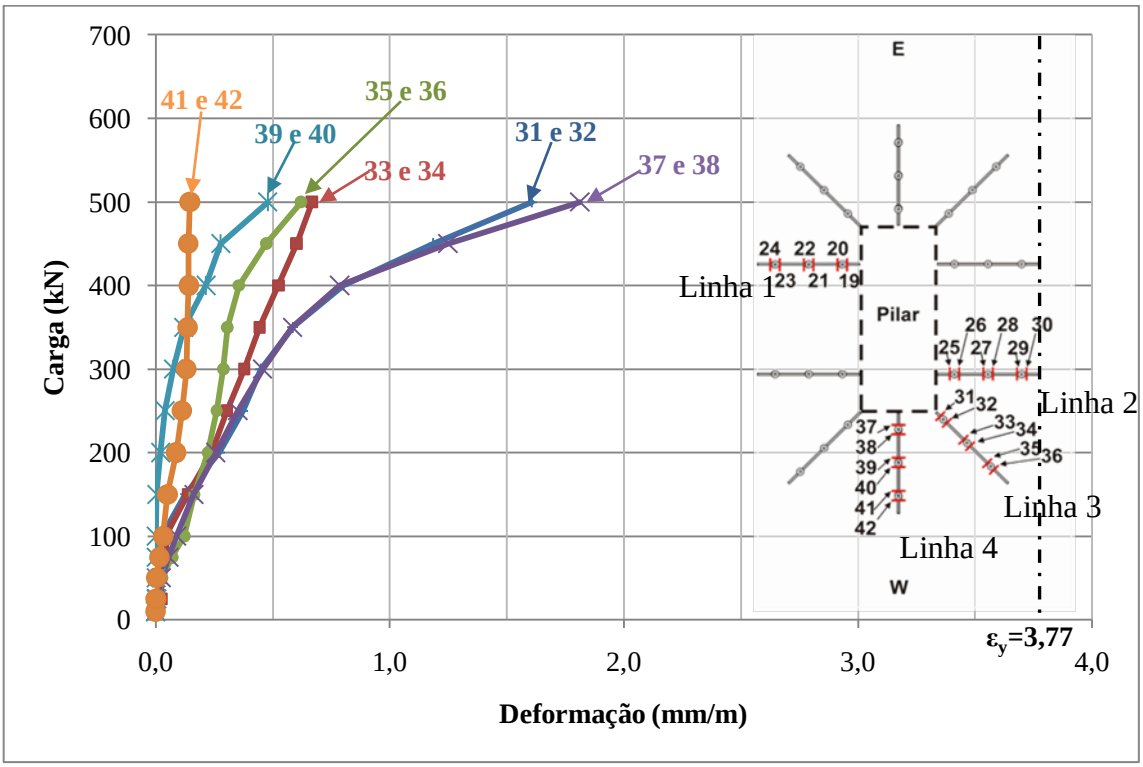


Figura 4.33 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L2–Linhas 3 e 4

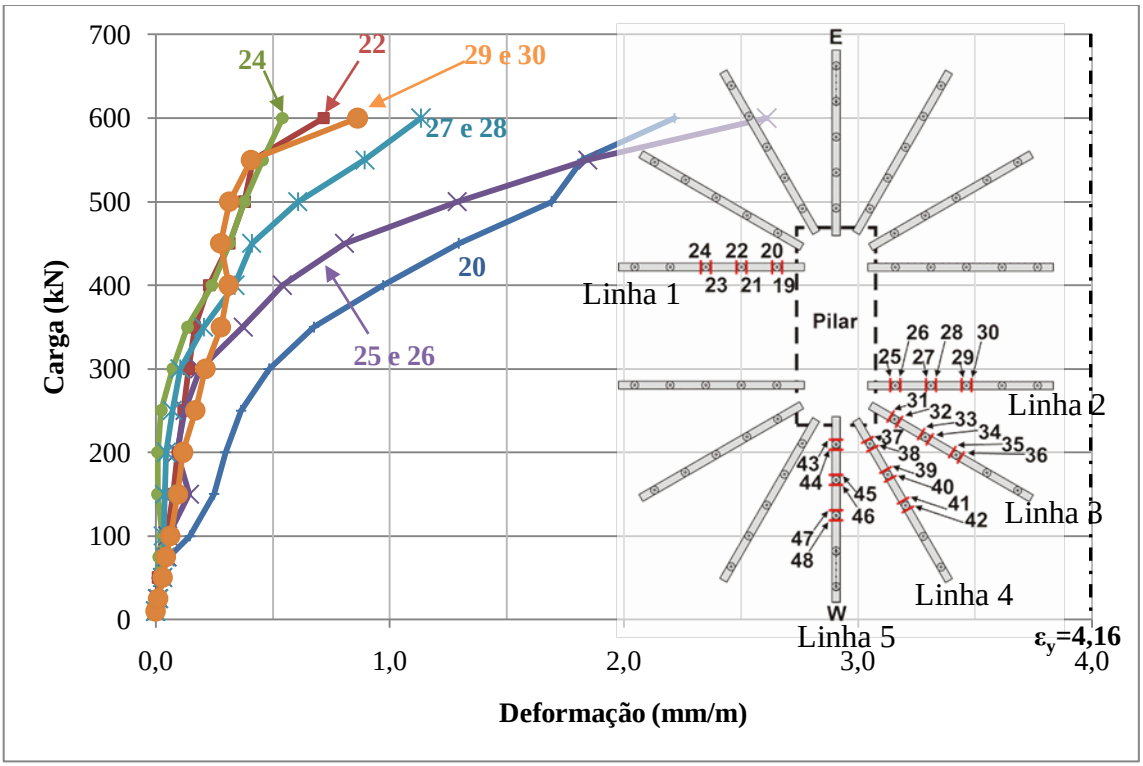


Figura 4.34 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L3–Linhas 1 e 2

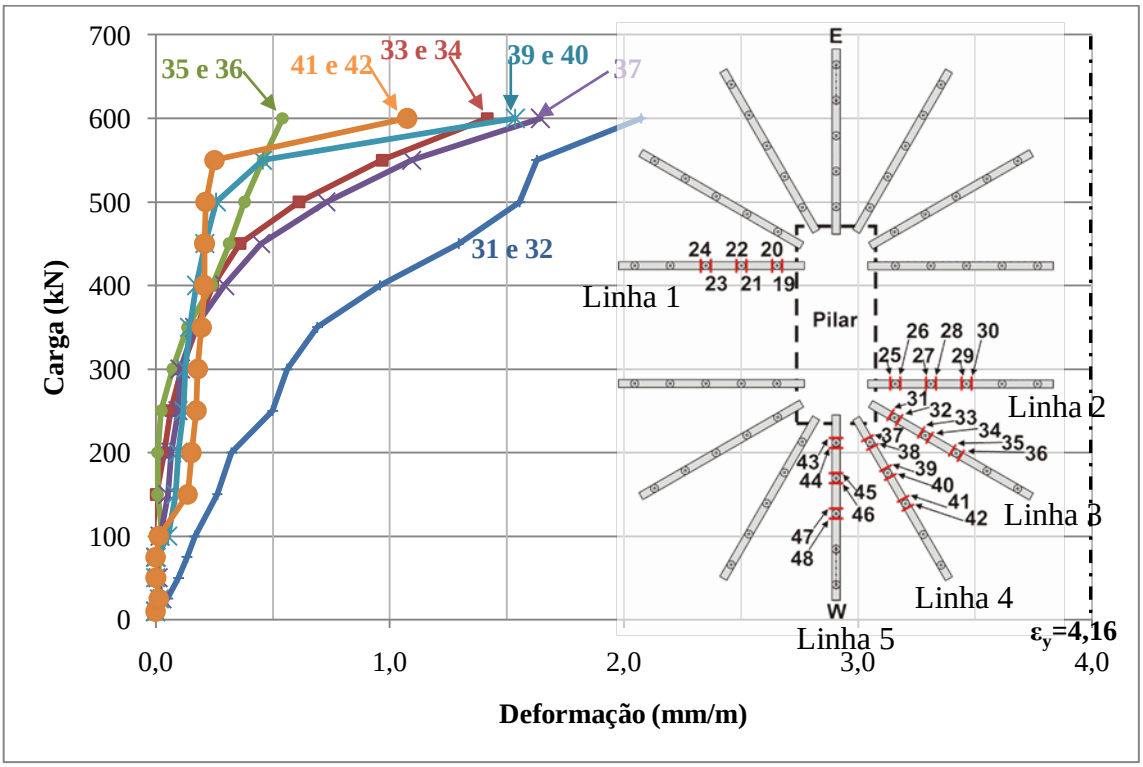


Figura 4.35 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L3–Linhas 3 e 4

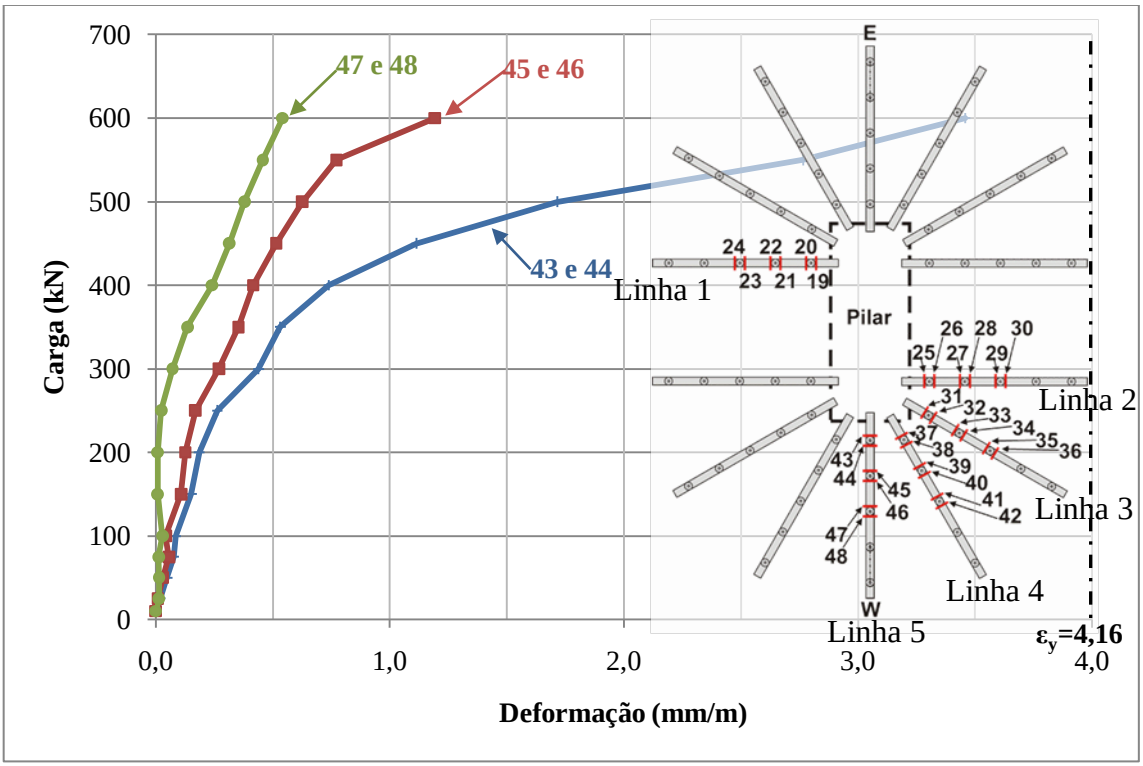


Figura 4.36 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L3–Linha 5

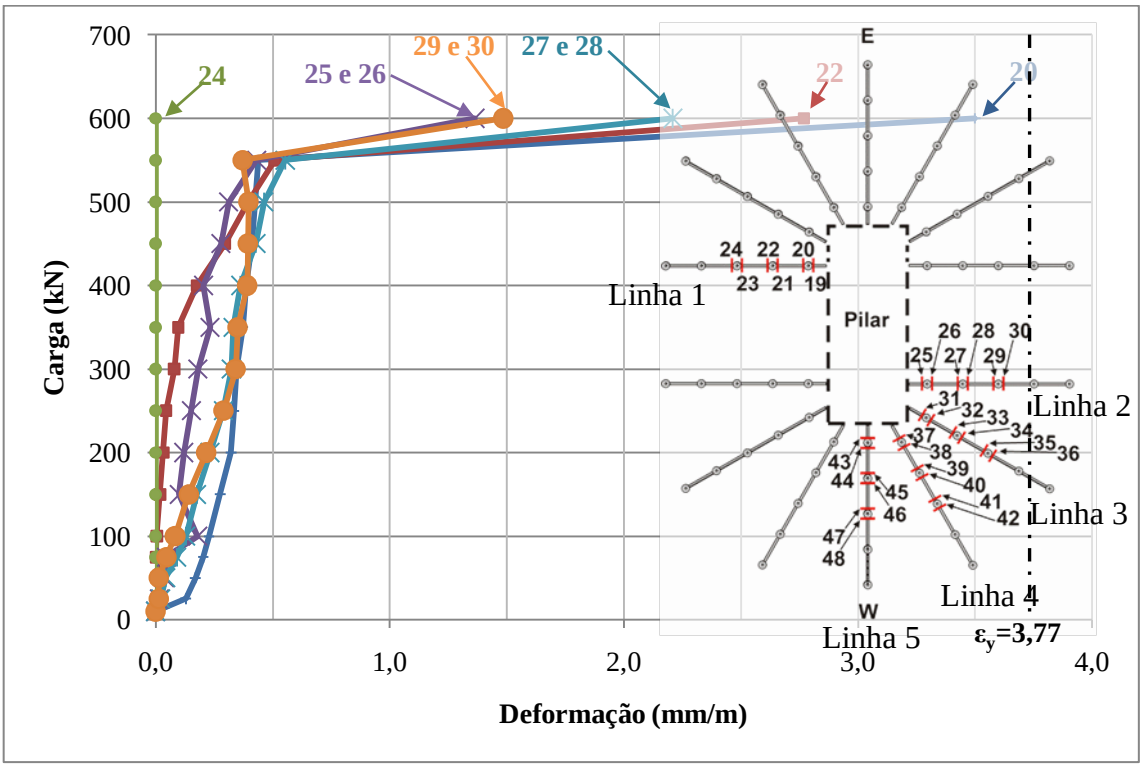


Figura 4.37 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L4–Linhas 1 e 2

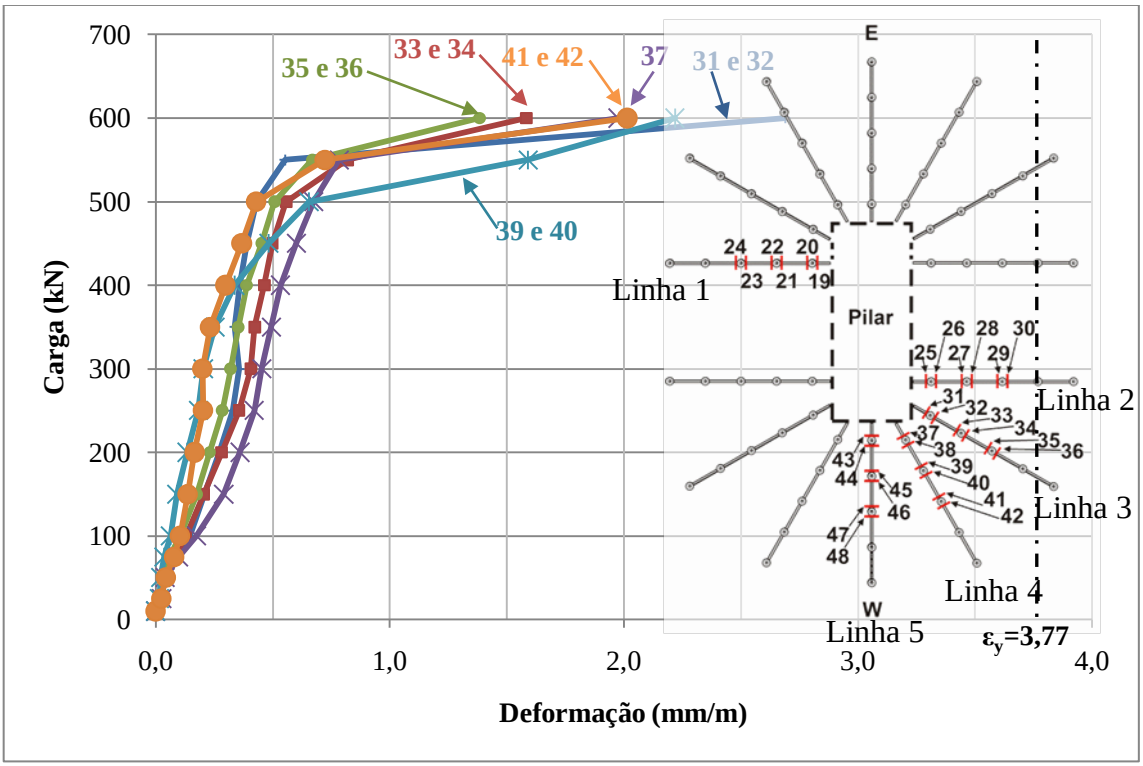


Figura 4.38 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L4–Linhas 3 e 4

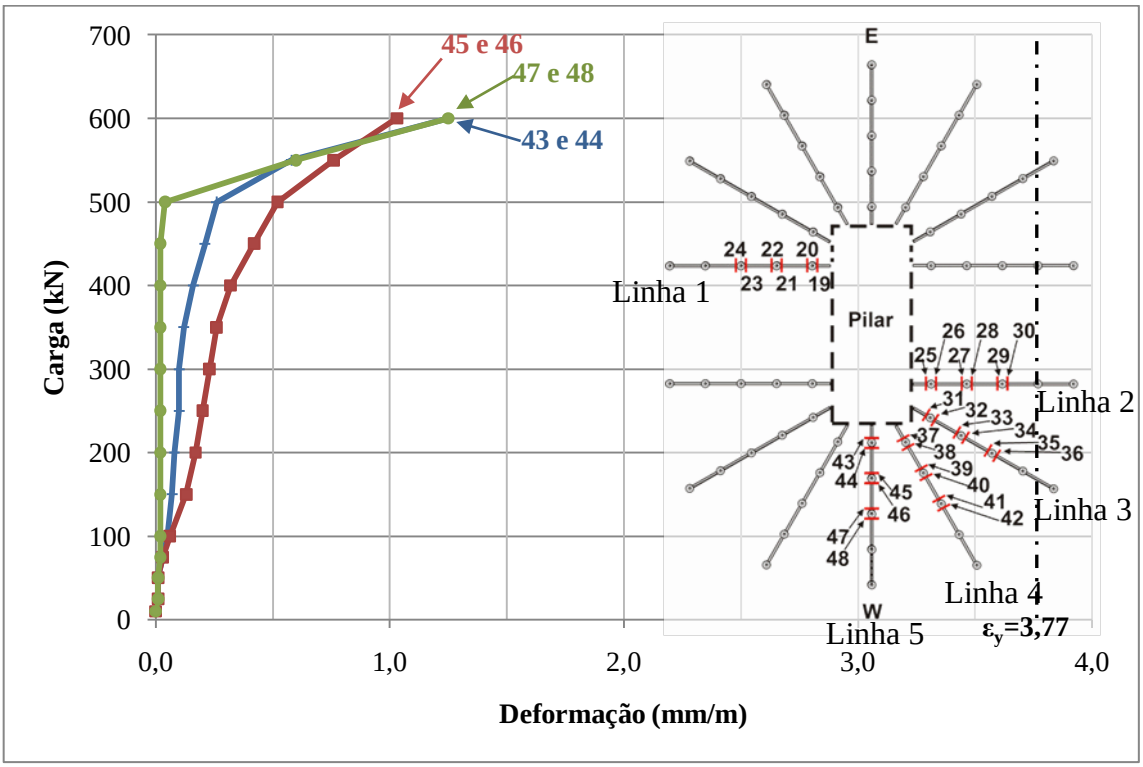


Figura 4.39 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L4 – Linha 5

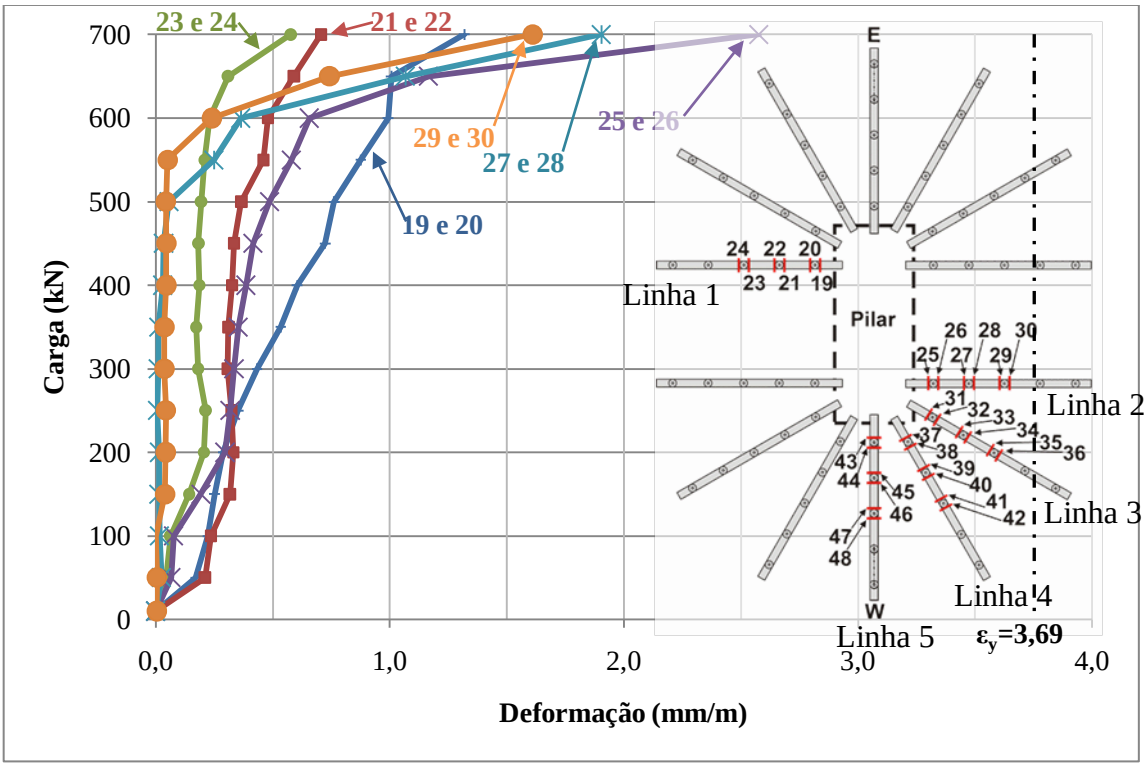


Figura 4.40 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L5–Linhas 1 e 2

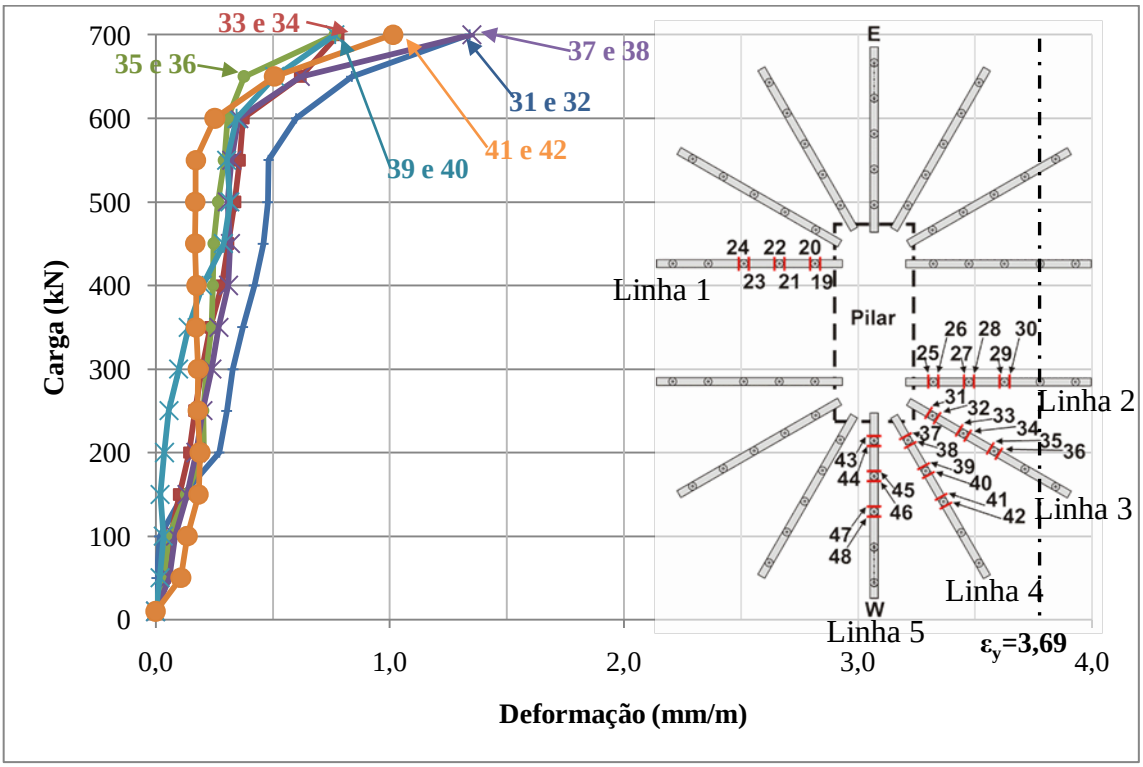


Figura 4.41 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L5–Linhas 3 e 4

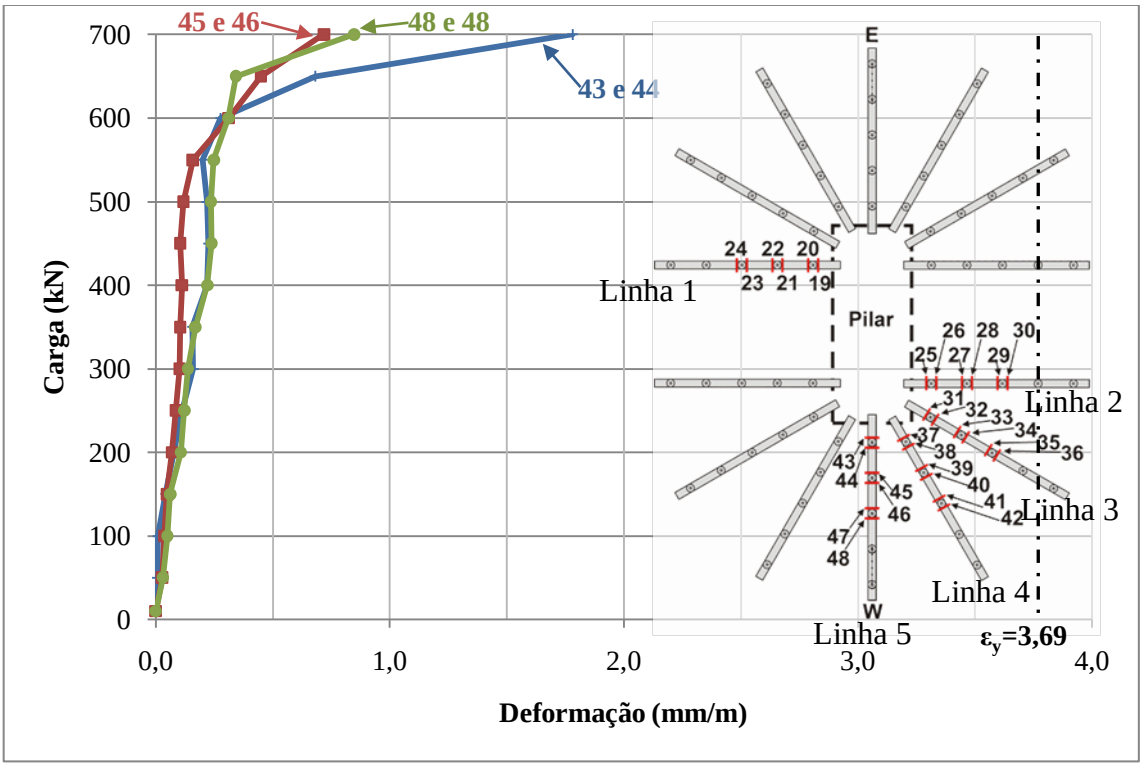


Figura 4.42 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L5 – Linha 5

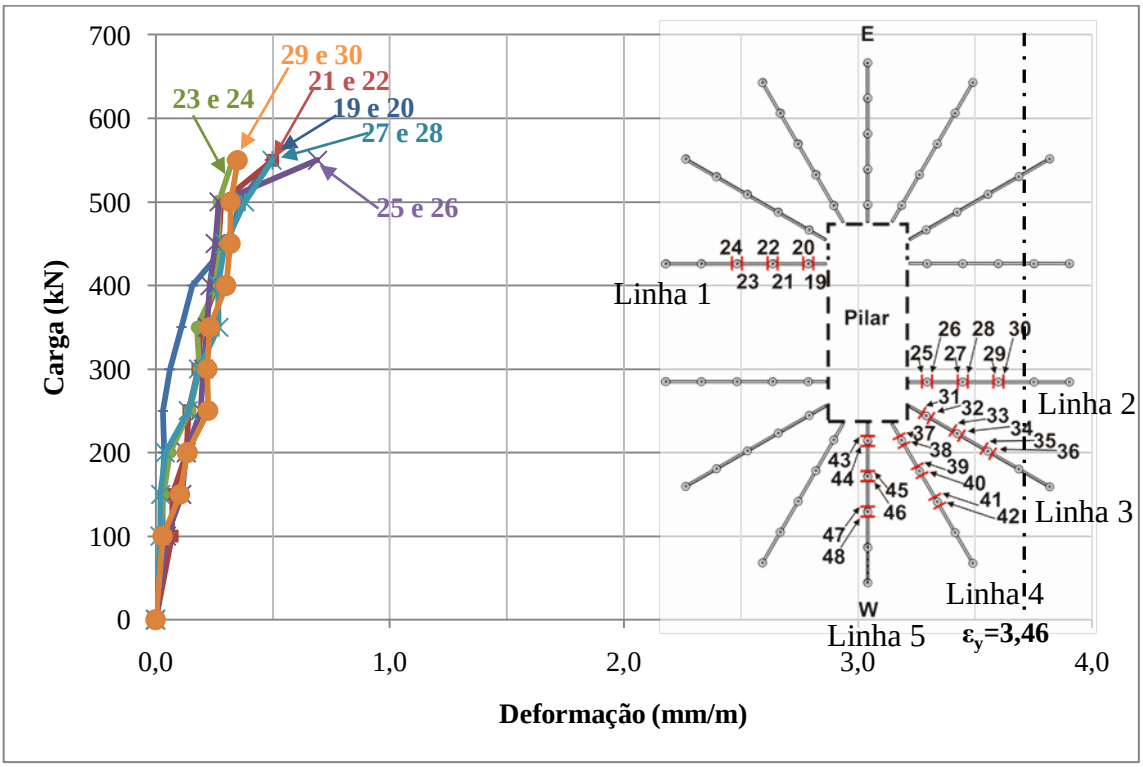


Figura 4.43 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L6–Linhas 1 e 2

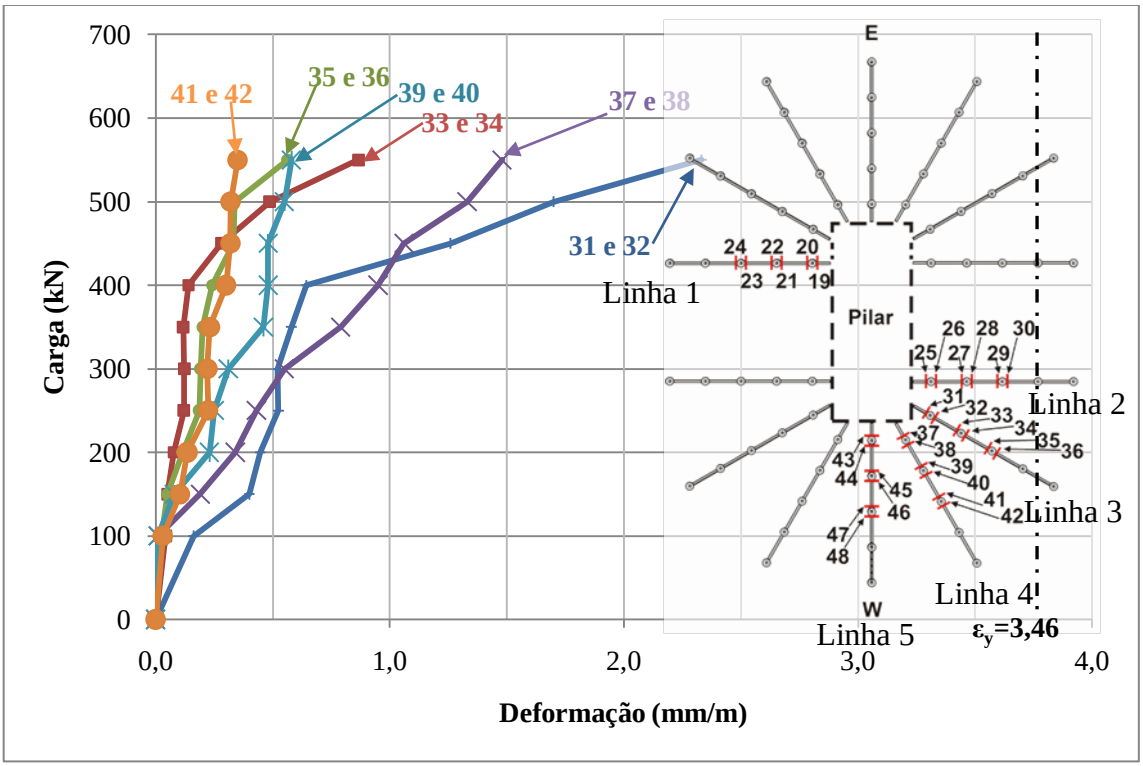


Figura 4.44 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L6–Linhas 3 e 4

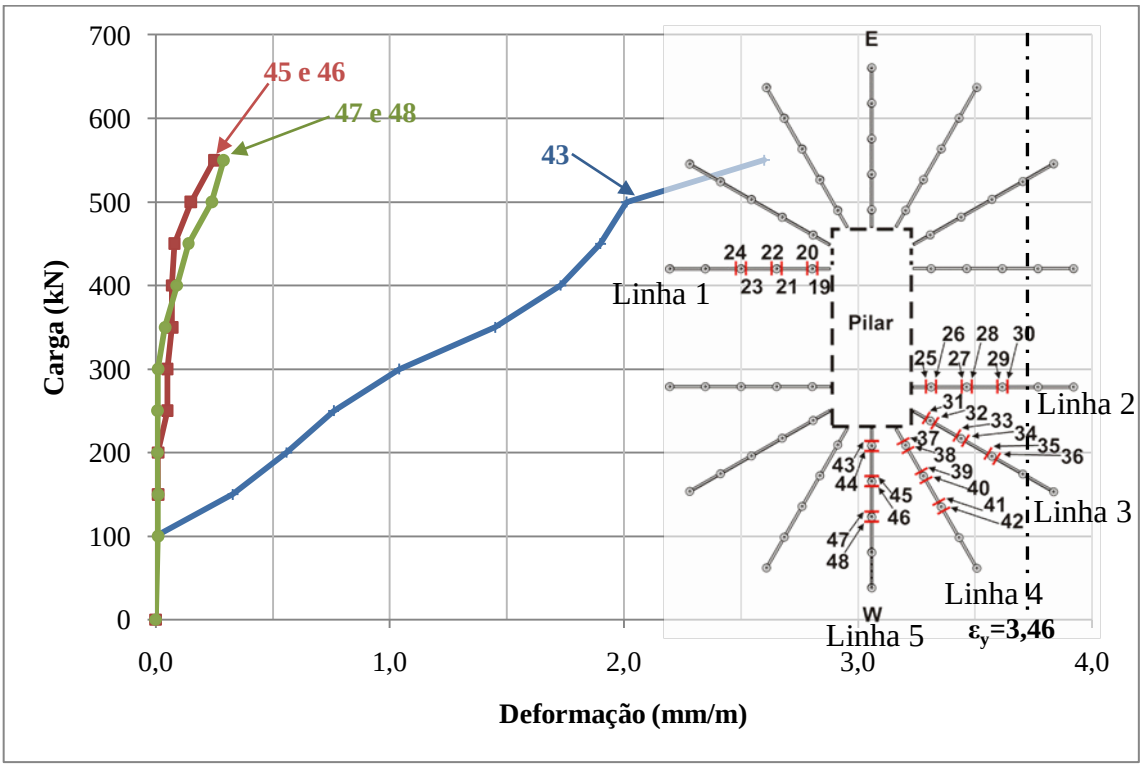


Figura 4.45 – Carga-deformação da armadura de cisalhamento da L6 – Linha 5

4.5.3 Concreto

No concreto foram monitoradas as deformações radiais e tangenciais na superfície inferior das lajes. As maiores deformações foram registradas próximo ao ponto de aplicação do carregamento e diminuindo em pontos mais afastados do pilar. Os gráficos carga-deformação do concreto das lajes L1 a L6 são mostrados na Figura 4.46 a Figura 4.51.

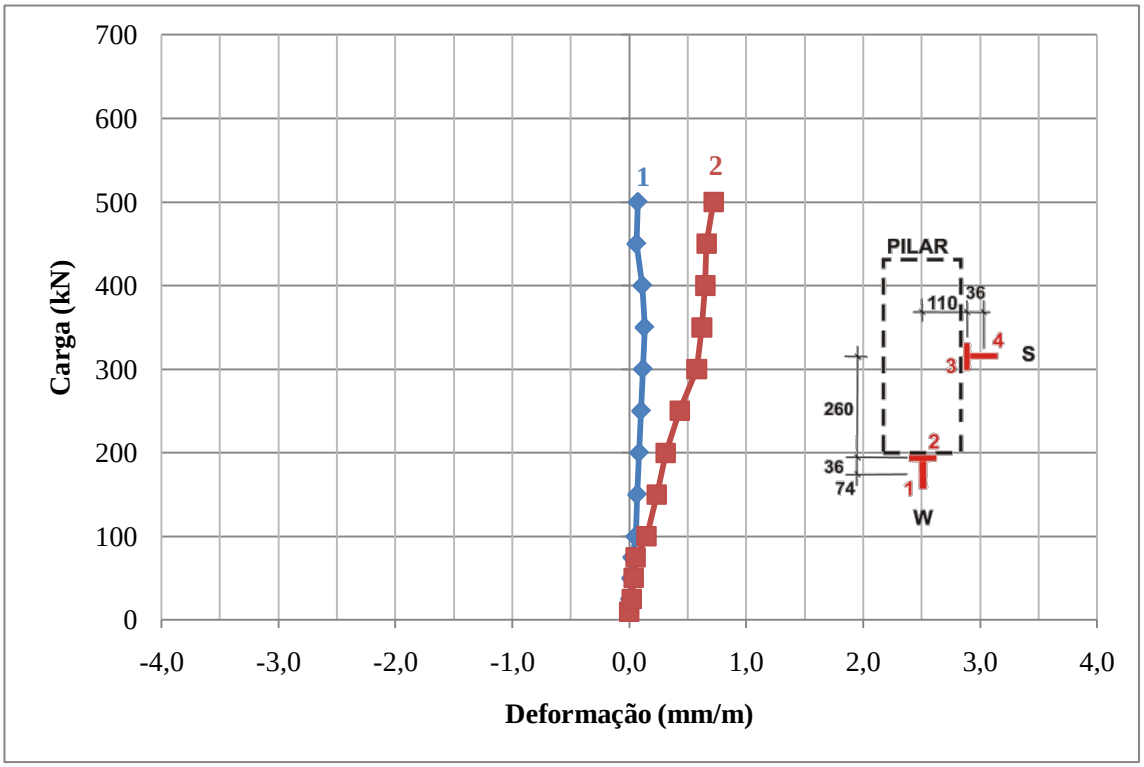


Figura 4.46 – Carga-deformação no concreto da L1

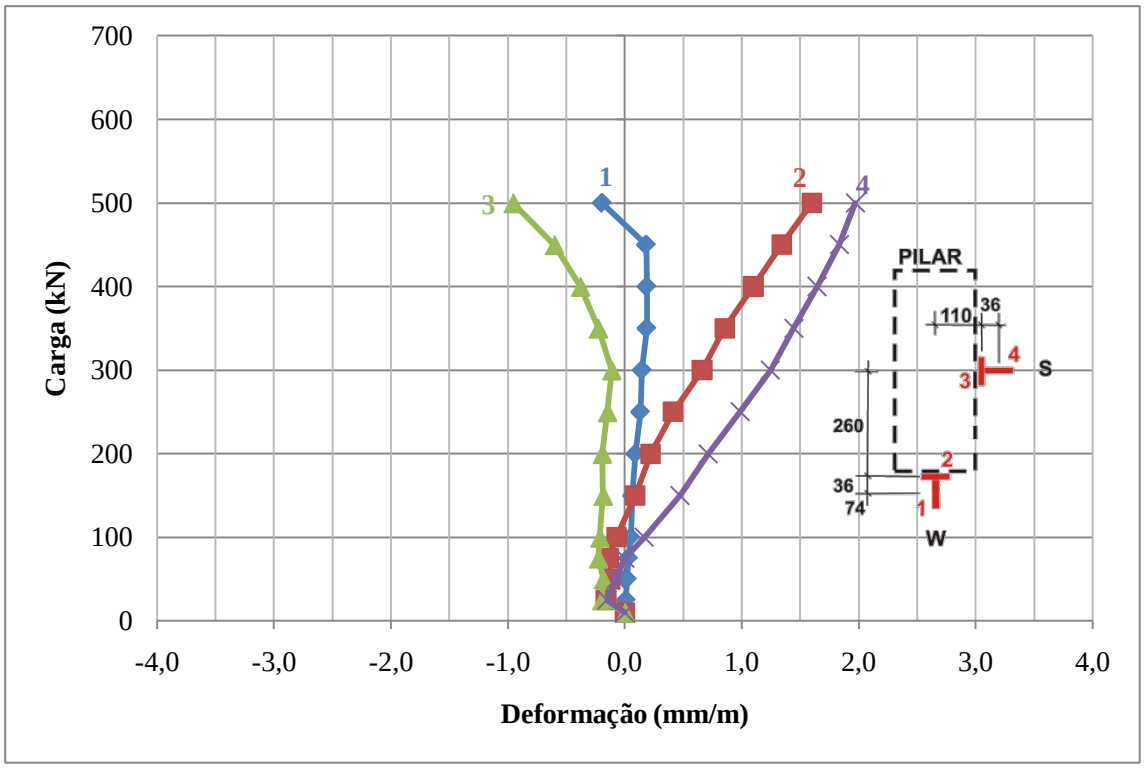


Figura 4.47 – Carga-deformação no concreto da L2

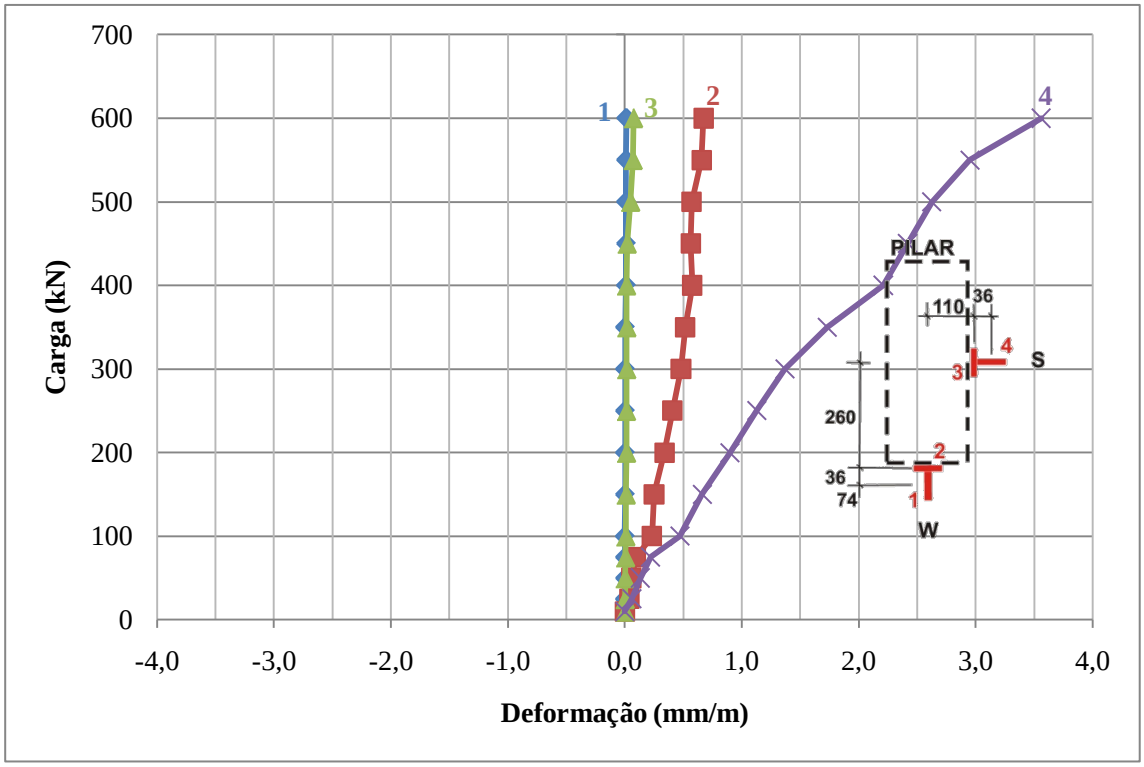


Figura 4.48 – Carga-deformação no concreto da L3

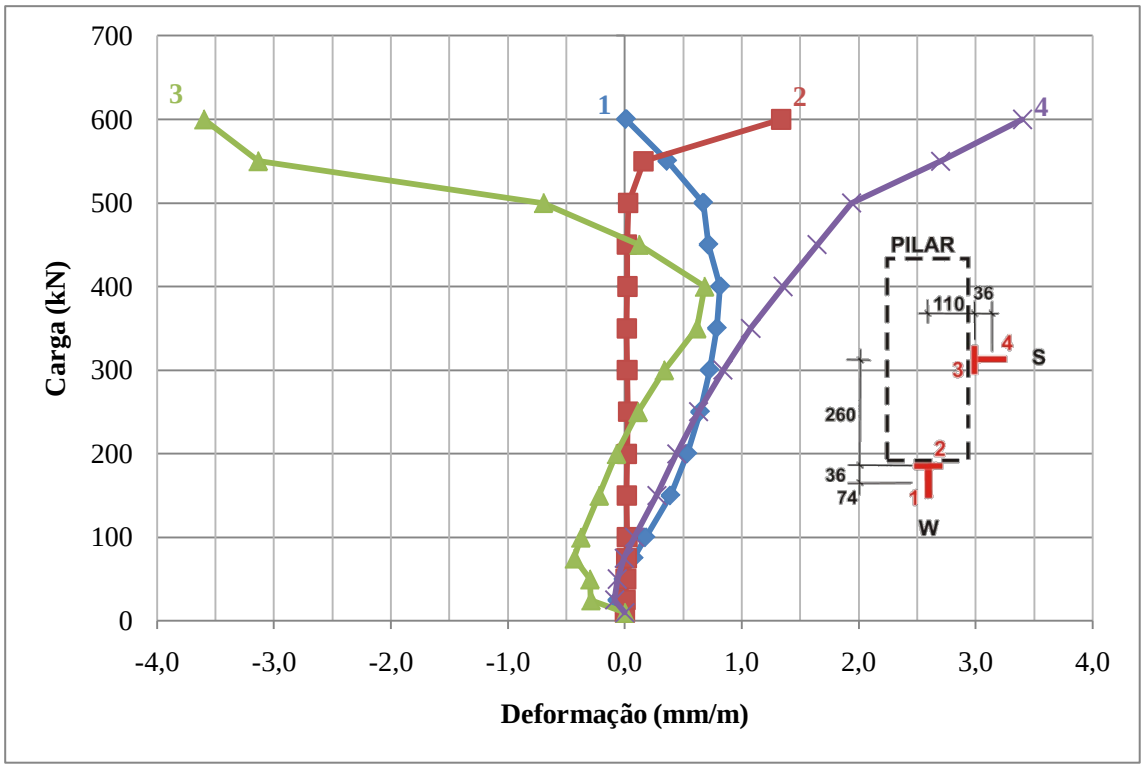


Figura 4.49 – Carga-deformação no concreto da L4

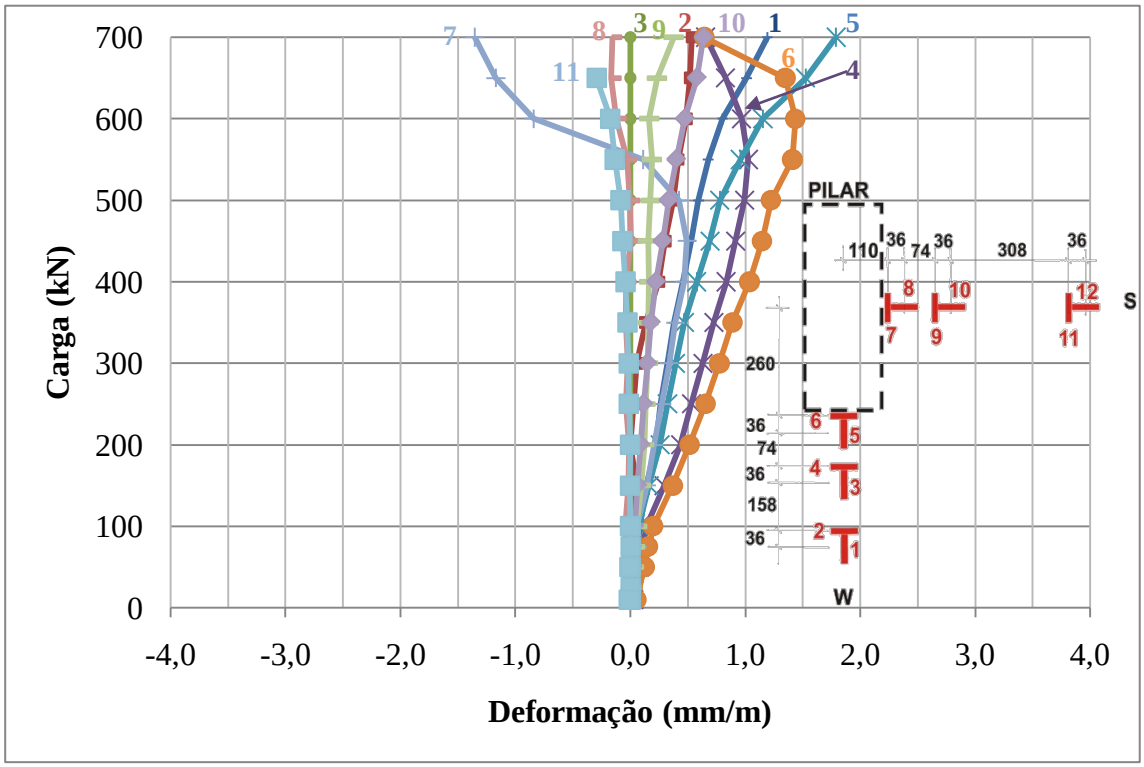


Figura 4.50 – Carga-deformação no concreto da L5

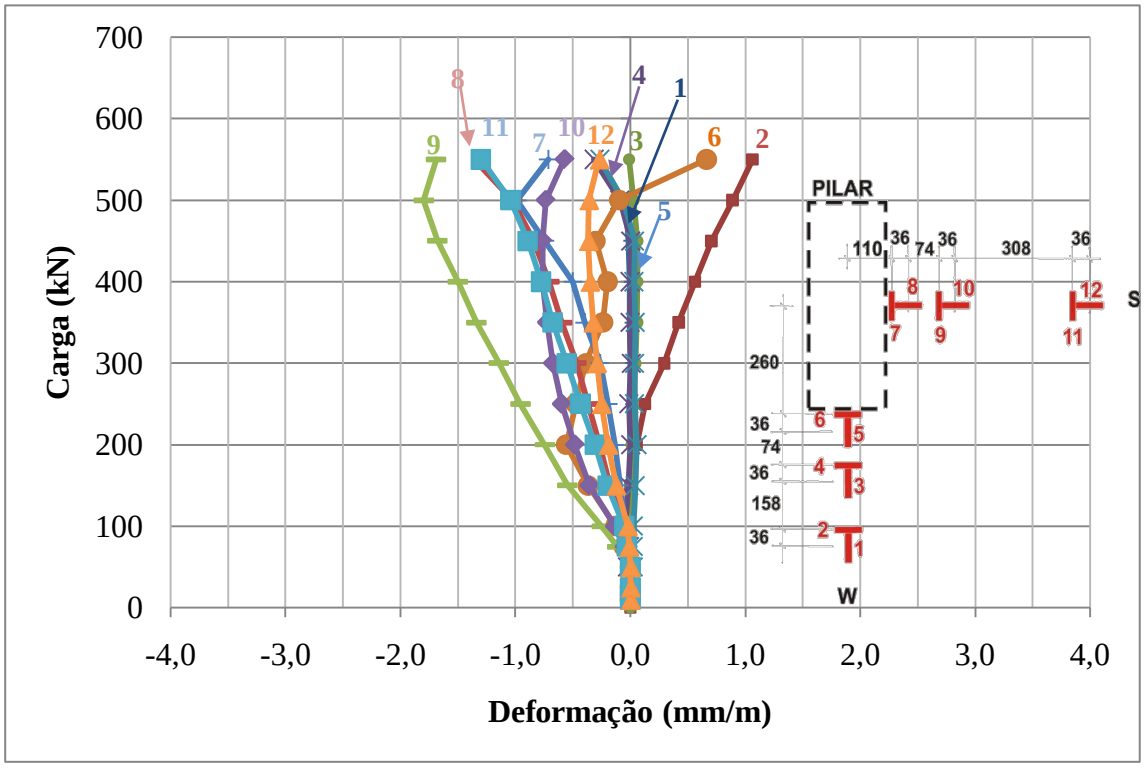


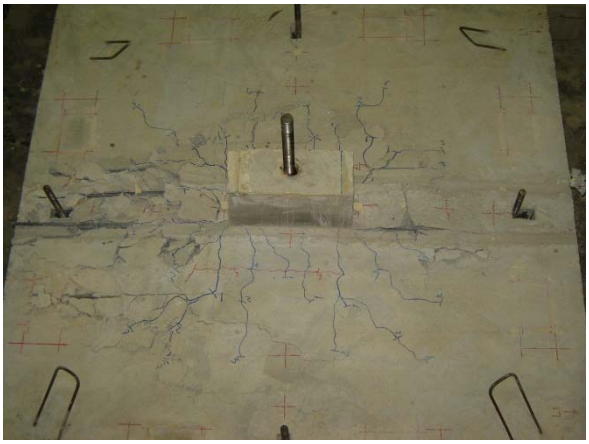
Figura 4.51 – Carga-deformação no concreto da L6

4.5.4 Fissuras

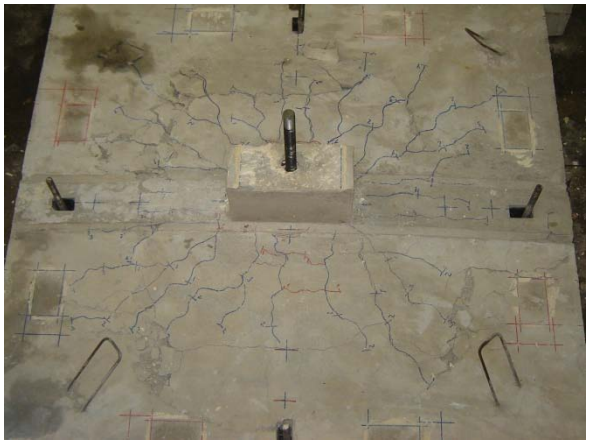
A Figura 4.52 mostra que as fissuras que se desenvolveram na face superior de forma semelhante em todas as lajes.

As primeiras fissuras registradas foram as radiais, que evoluíram a partir do pilar com um carregamento em torno de 100 kN, para todas as lajes.

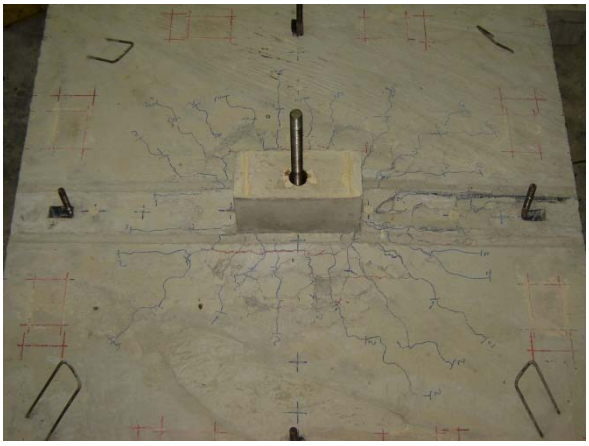
Também, para todas as lajes as fissuras tangenciais foram registradas a partir do carregamento 300 kN.



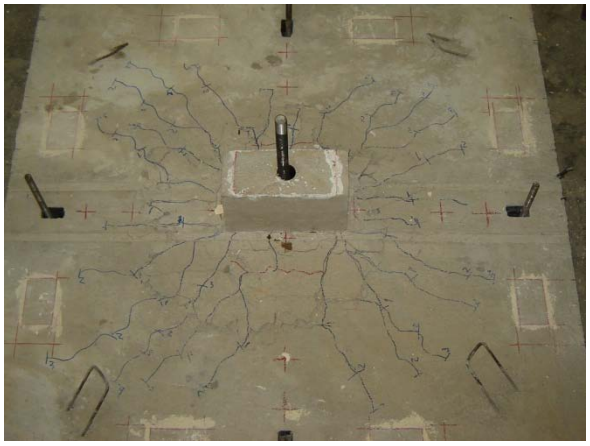
L1



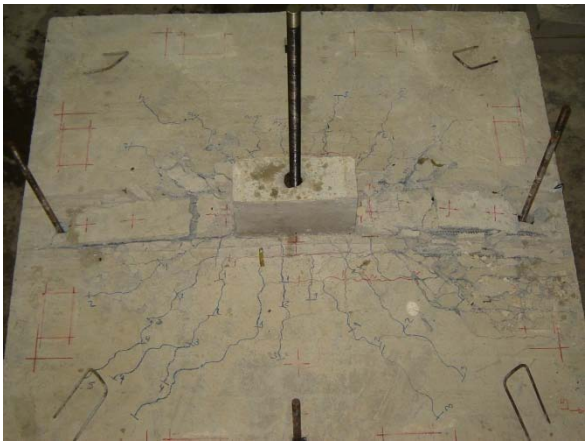
L2



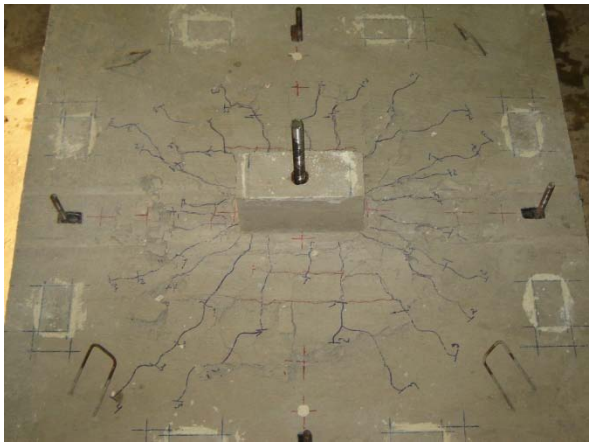
L3



L4



L5



L6

Figura 4.52 – Estágio pós–ruptura das lajes L1 a L6

4.6 COMPARAÇÃO DAS CARGAS EXPERIMENTAIS E MÉTODOS DE CÁLCULO

4.6.1 Comparação das cargas experimentais com a laje L1 de SOUZA (2008)

A Tabela 4.7 apresenta os resultados da comparação das lajes desta pesquisa com a laje L1, sem armadura de cisalhamento, de SOUZA (2008), neste trabalho denominada de "R1". Esta laje possui características semelhantes as das lajes ensaiadas, como: dimensões, propriedades do concreto e taxa de armadura. A ruptura na laje R1 foi por punção com carga de 475 kN e resistência à compressão do concreto de 37,8 MPa.

Tabela 4.7 – Comparação da laje R1 de SOUZA (2008) com os resultados desta pesquisa

Laje	f_c (MPa)	d (±2 mm)	ρ (%)	Ø (mm)	Nº de linhas	Nº de cam.	$A_s f_y$ / cam.	V_{teste} (kN)	$V_{teste, Li}$ / $V_{teste, R1}$
R1	37,8	121	0,93	-	-	-	-	475	1,00
GRUPO 1 – "Stud rails"									
L1	35,9	112	1,23	6,3	10	3	212	592	1,25
L3	35,6	112	1,23	6,3	14	5	297	636	1,34
L5	35,1	110	1,23	8,0	14	5	430	708	1,49
GRUPO 2 – "double headed studs"									
L2	32,5	112	1,23	6,3	10	3	212	511	1,08
L4	33,5	109	1,23	6,3	14	5	297	596	1,25
L6	33,8	108	1,23	8,0	14	5	430	583	1,23

$V_{teste,Li}$ – Carga de ruptura da laje;

$V_{teste,R1}$ – Carga de ruptura da laje R1 sem armadura de cisalhamento de SOUZA (2008);

$\frac{V_{teste,Li}}{V_{teste,R1}}$ – Comparação da laje Li em relação à laje R1 de SOUZA (2008);

O Grupo 1 apresentou um acréscimo de carga de 25% a 49% e o Grupo 2 de 8% a 25%. Estes resultados mostram ainda a potencialidade deste tipo de armadura cujo aumento da densidade de armadura de cisalhamento por camada (A_{sw} / S_r) proporcionou acréscimo de resistência à punção nas lajes ensaiadas, quando comparadas com a laje R1.

4.6.2 Perímetros de controle das lajes ensaiadas

São mostrados na Tabela 4.8 os valores dos perímetros de controle u_0, u_1 e u_2 calculados pelas normas (ACI 318/2005, CEB/1990, EUROCODE 2/2004 e NBR 6118:2003 e as respectivas expressões.

Tabela 4.8 – Perímetros de controle das lajes ensaiadas

Laje	d (mm)	f_c (MPa)	f_{yw} (MPa)	A_s /cam. (mm²)	$u_{0,i}$ (1) (mm)	$u_{1,ACI}$ 318/2005 (mm)	$u_{1,i}$ (2) (mm)	$u_{2,ACI}$ 318/2005 (mm)	$u_{2,CEB-FIP}$ MC 90 (mm)	$u_{2,}$ EC2/2004 (mm)	$u_{2,NBR}$ 6118:2003 (mm)
GRUPO 1 – "stud rails"											
L1	112	35,9	680	311,70	1400	1848	2807	2636	4095	3744	4095
L3	112	35,6	680	436,38	1400	1848	2807	3755	4991	4640	4991
L5	110	35,1	611	703,78	1400	1840	2782	3688	4902	4557	4902
GRUPO 2 – "double headed studs"											
L2	112	32,5	680	311,70	1400	1848	2807	2636	4095	3744	4095
L4	109	33,5	680	436,38	1400	1836	2770	3654	4858	4515	4858
L6	108	33,8	611	703,78	1400	1832	2757	3621	4813	4474	4813

s_0 = 50 mm; s_r = 90 mm; a = 500 mm; b = 200 mm (para todas as lajes);

Para L1 e L2: 10 linhas; Para L3, L4, L5 e L6: 14 linhas;

$$u_{0,CEB-FIPMC90=EUROCODE2/2004=NBR6118/2003}^{(1)} = 2(a+b)$$

$$u_{1,ACI318/2005} = 2(a+b) + 4d$$

$$u_{1,CEB-FIPMC90=EUROCODE2/2004=NBR6118/2003}^{(2)} = 2(a+b) + 4\pi d$$

$$u_{2,ACI318/2005} = \left(4\cos(\alpha)d/2\right) + \left(\cos(\alpha_1)(n^o\,linhas - 4)d\right) + n^o\,linhas(d); \alpha = 74^o; \alpha_1 = 60{,}25^o$$

$$u_{2,CEB-FIPMC90=NBR6118/2003} = \left[\left(\left(\frac{4\pi d}{n^o\,linhas}\right) + 2d\right) n^o\,linhas\right] + 4d$$

$$u_{2,EUROCODE2/2004} = \left[\left(\left(\frac{3\pi d}{n^o\,linhas}\right) + 2d\right) n^o\,linhas\right] + 4d$$

4.6.3 ACI 318/2005

Segundo o ACI 318/2005 o perímetro de controle é considerado a d/2 da face do pilar e o perímetro externo a d/2 da última camada de armadura de cisalhamento. A Tabela 4.9 apresenta a comparação das cargas de ruptura experimentais em relação às previstas, de 1,43 (L3) a 1,63 (L5) para as lajes do Grupo 1 e de 1,31 (L2) a 1,42 (L4) para as lajes do Grupo 2. Os modos de ruptura previstos, com a superfície de ruptura cruzando a armadura de cisalhamento, foram coincidente com os experimentais para todas as lajes.

Tabela 4.9 – Cargas e modos de ruptura estimados pelo ACI – 318/2005

Laje	$V_{Rd}^{(1)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(2)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(3)}$ (kN)	$V_{Rd,c}^{(4)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_{teste} (kN)	V_{teste} / V_{calc}	Modo de Ruptura	
								Previsto	Real
GRUPO 1 – "Stud rails"									
L1	527	**400**	501	316	**400**	592	1,48	Interno	Interno
L3	525	**446**	711	315	**446**	636	1,43	Interno	Interno
L5	510	**433**	681	306	**433**	708	1,63	Interno	Interno
GRUPO 2 – "double headed studs"									
L2	501	**391**	477	301	**391**	511	1,31	Interno	Interno
L4	492	**418**	653	295	**418**	596	1,42	Interno	Interno
L6	489	**416**	644	293	**416**	583	1,40	Interno	Interno

V_{calc} = menor valor entre ($V_{Rd}^{(1)}$, $V_{Rd}^{(2)}$, $V_{Rd}^{(3)}$) e $V_{calc} \geq V_{Rd,c}^{(4)}$

(1) carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar; $V_{(1)} = \frac{1}{2}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d$

(2) carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento; $V_{(2)} = \frac{1}{6}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d + \frac{A_s f_y d}{s} \leq 0{,}5\sqrt{f_c^{'}}b_0 d$

(3) carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento; $V_{(3)} = \frac{1}{3}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d$

(4) carga para laje sem armadura de cisalhamento; menor valor entre:

$$V_{(4)} = 0{,}17\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right)\sqrt{f_c^{'}}b_0 d\,;\quad V_{(4)} = 0{,}083\left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2\right)\sqrt{f_c^{'}}b_0 d\,;\quad V_{(4)} = 0{,}33\sqrt{f_c^{'}}b_0 d$$

Com: α_s=40 (pilar interno); β=2,5

4.6.4 CEB-FIP MC 1990

O CEB-FIP MC 1990 admite que os perímetros de controle estejam a 2d, da face do pilar e da última camada de armadura de cisalhamento para o externo. Deve ser verificada a resistência em três regiões: região adjacente ao pilar, região com armadura de cisalhamento e região externa a armadura de cisalhamento. A Tabela 4.10 apresenta os valores das cargas e modos de ruptura previstos por este código comparando-os com os valores experimentais. As cargas de ruptura experimentais em relação às previstas foram 1,15 (L3) a 1,33 (L5) para o Grupo 1 e de 1,14 (L6) a 1,16 (L2) para o Grupo 2. De acordo com o CEB-FIP MC 1990 foram previstos modos de ruptura externos a região com armadura de cisalhamento diferente dos resultados experimentais com a superfície de ruptura interno a região de armadura de cisalhamento, para todas as lajes.

Tabela 4.10 – Cargas e modos de ruptura estimados pelo CEB-FIP MC 1990

Laje	$V_{Rd}^{(1)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(2)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(3)}$ (kN)	$V_{Rd,c}^{(4)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_{teste} (kN)	V_{teste} / V_{calc}	Modo de Ruptura	
								Previsto	Real
GRUPO 1 – "stud rails"									
L1	1446	629	**455**	312	**455**	592	1,30	Externo	Interno
L3	1436	787	**552**	311	**552**	636	1,15	Externo	Interno
L5	1394	1015	**533**	303	**533**	708	1,33	Externo	Interno
GRUPO 2 – "double headed studs"									
L2	1330	622	**440**	301	**440**	511	1,16	Externo	Interno
L4	1328	760	**517**	295	**517**	596	1,15	Externo	Interno
L6	1326	993	**510**	292	**510**	583	1,14	Externo	Interno

V_{calc} = menor valor entre ($V_{Rd}^{(1)}$, $V_{Rd}^{(2)}$, $V_{Rd}^{(3)}$) e $V_{calc} \geq V_{Rd,c}^{(4)}$

(1) carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar; $V_1 = 0{,}3 f_{cd}\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) u_0 d$

(2) carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento; $V_2 = 0{,}75 V_{Rd}^{(4)} + 1{,}5\left(\frac{d}{s_r}\right) A_{sw} f_{yd} \text{sen}\alpha$

(3) carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento; $V_3 = 0{,}12\xi(100\rho f_{ck})^{1/3} u_2 d$

(4) carga para laje sem armadura de cisalhamento; $V_4 = 0{,}12\xi(100\rho f_{ck})^{1/3} u_1 d$

$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$, "d" em (mm); α=90º; $f_{cd2} = 0{,}6\left[1 - \left(\frac{f_{ck}}{250}\right)\right] f_{cd}$

4.6.5 EUROCODE 2/2004

Para o cálculo da carga de ruptura de lajes com armadura de cisalhamento, segundo o EUROCODE 2/2004, deve ser considerado, também, a contribuição do concreto e do aço. O perímetro de controle dever ser admitido a 1,5d da última camada de armadura de cisalhamento. A Tabela 4.11 mostra os valores das cargas e modos de ruptura previstos segundo este código. As cargas de ruptura experimentais em relação as previstas para as lajes do Grupo 1 foram de 1,45 (L3) a 1,68 (L5) e para o Grupo 2, de 1,45 (L6) a 1,48 (L2). De acordo com o EUROCODE 2/2004 foram previstos modos de ruptura externos a região com armadura de cisalhamento diferente dos resultados experimentais com a superfície de ruptura interno a região de armadura de cisalhamento, para todas as lajes.

Tabela 4.11 – Cargas e modos de ruptura estimados pelo EUROCODE 2/2004

Laje	$V_{Rd}^{(1)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(2)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(3)}$ (kN)	$V_{Rd,c}^{(4)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_{teste} (kN)	V_{teste} / V_{calc}	Modo de Ruptura	
								Previsto	Real
GRUPO 1 – "Stud rails"									
L1	1446	596	**356**	267	**356**	592	1,66	Externo	Interno
L3	1436	753	**440**	266	**440**	636	1,45	Externo	Interno
L5	1394	982	**422**	258	**422**	708	1,68	Externo	Interno
GRUPO 2 – "double headed studs"									
L2	1330	589	**344**	258	**344**	511	1,48	Externo	Interno
L4	1328	727	**408**	250	**408**	596	1,46	Externo	Interno
L6	1326	960	**402**	248	**402**	583	1,45	Externo	Interno

V_{calc} = menor valor entre ($V_{Rd}^{(1)}$, $V_{Rd}^{(2)}$, $V_{Rd}^{(3)}$) e $V_{calc} \geq V_{Rd,c}^{(4)}$

(1) carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar; $V_1 = 0{,}3\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_c u_0 d$

(2) carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento; $V_2 = 0{,}75 V_4 + 1{,}5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd} \text{sen}\alpha$

(3) carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento; $V_3 = 0{,}18\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\left(100\rho_1 f_{ck}\right)^{1/3} u_2 d$

(4) carga para laje sem armadura de cisalhamento;

$$V_4 = 0{,}12\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\left(100\rho_1 f_{ck}\right)^{1/3} u_1 d$$

4.6.6 NBR 6118:2003

As comparações das cargas de ruptura experimentais em relação às previstas segundo a NBR 6118:2003 são mostradas na Tabela 4.12, sendo de 1,07 (L3) a 1,24 (L5) para as lajes do Grupo 1 e de 1,07 (L6) a 1,08 (L2 e L4) para as lajes do Grupo 2. De acordo com a NBR 6118:2003 foram previstos modos de ruptura externos a região com armadura de cisalhamento diferente dos resultados experimentais com a superfície de ruptura interno a região de armadura de cisalhamento, para todas as lajes.

Tabela 4.12 – Cargas e modos de ruptura estimados pela NBR 6118:2003

Laje	$V_{Rd}^{(1)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(2)}$ (kN)	$V_{Rd}^{(3)}$ (kN)	$V_{Rd,c}^{(4)}$ (kN)	V_{calc} (kN)	V_{teste} (kN)	V_{teste} / V_{calc}	Modo de Ruptura	
								Previsto	Real
GRUPO 1 – "Stud rails"									
L1	1302	646	**487**	334	**487**	592	1,21	Externo	Interno
L3	1293	804	**592**	333	**592**	636	1,07	Externo	Interno
L5	1255	1031	**571**	324	**571**	708	1,24	Externo	Interno
GRUPO 2 – "double headed studs"									
L2	1197	638	**471**	323	**471**	511	1,08	Externo	Interno
L4	1195	776	**554**	316	**554**	596	1,08	Externo	Interno
L6	1193	1009	**547**	313	**547**	583	1,07	Externo	Interno

V_{calc} = menor valor entre ($V_{Rd}^{(1)}$, $V_{Rd}^{(2)}$, $V_{Rd}^{(3)}$) e $V_{calc} \geq V_{Rd,c}^{(4)}$

(1) carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar; $V_1 = 0{,}27\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} u_0 d$

(2) carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento; $V_2 = 0{,}75 V_{Rd}^{(4)} + 1{,}5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd} \text{sen}\alpha$

(3) carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento; $V_3 = 0{,}13\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\left(100\rho_1 f_{ck}\right)^{1/3} u_2 d$

(4) carga para laje sem armadura de cisalhamento;

$V_4 = 0{,}13\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)\left(100\rho_1 f_{ck}\right)^{1/3} u_1 d$

4.6.7 Resumo da comparação das cargas de ruptura das lajes

O resumo das comparações entre as cargas de ruptura experimentais (V_{teste}) em relação às previstas pelos diversos métodos/normas (V_{calc}) são apresentadas na Tabela 4.13 e na Figura 4.53, sendo a relação ($V_{teste,Li}$ /$V_{c,Li}$) / ($V_{calc,Li}$ /$V_{c,Li}$).

As cargas de ruptura experimentais das lajes com armadura de cisalhamento tipo "stud rails" em relação às previstas foram de 1,43 (L3) a 1,63 (L5) segundo o ACI 318/2005, de 1,15 (L3) a 1,33 (L5) segundo o CEB-FIP MC 1990, de 1,45 (L3) a 1,68 (L5) segundo o EUROCODE 2/2004 e de 1,07 (L3) a 1,24 (L5) segundo a NBR 6118:2003.

Para as lajes com armadura de cisalhamento tipo "double headed studs", as cargas de ruptura experimentais em relação as previstas são de 1,31 (L2) a 1,42 (L4) segundo o ACI 318/2005, de 1,14 (L6) a 1,16 (L2) segundo o CEB-FIP MC 1990, de 1,45 (L6) a 1,48 (L2) segundo EUROCODE 2/2004 e de 1,07 (L6) a 1,08 (L2 e L4) segundo a NBR 6118:2003.

Tabela 4.13 – Comparações das cargas de ruptura experimentais

Laje	**V_{teste} (kN)**	**$V_{teste, Li}$ / $V_{calc, Li}$ - ACI 318/2005**	**$V_{teste, Li}$ / $V_{calc, Li}$ - CEB/1990**	**$V_{teste, Li}$ / $V_{calc, Li}$ - EC 2/2004**	**$V_{teste, Li}$ / $V_{calc, Li}$ - NBR 6118**
L1	592	1,48	1,30	1,66	1,21
L3	636	1,43	1,15	1,45	1,07
L5	708	1,63	1,33	1,68	1,24
L2	511	1,31	1,16	1,48	1,08
L4	596	1,42	1,15	1,46	1,08
L6	583	1,40	1,14	1,45	1,07
Média		1,45	1,21	1,53	1,13
$\frac{V_{teste,Li}}{V_{calc,Li-Normas}}$ – Comparação da carga de ruptura experimental da laje em relação à carga de ruptura esperada de acordo com cada código;					

A Tabela 4.14 e Figura 4.54 apresentam as comparações entre as cargas de ruptura experimentais (V_{teste}) em relação às cargas previstas de uma laje sem armadura de cisalhamento ($V_{c,\,i}$) calculada pelos diversos métodos/normas e considerando as variações de "d", f_c e ρ.

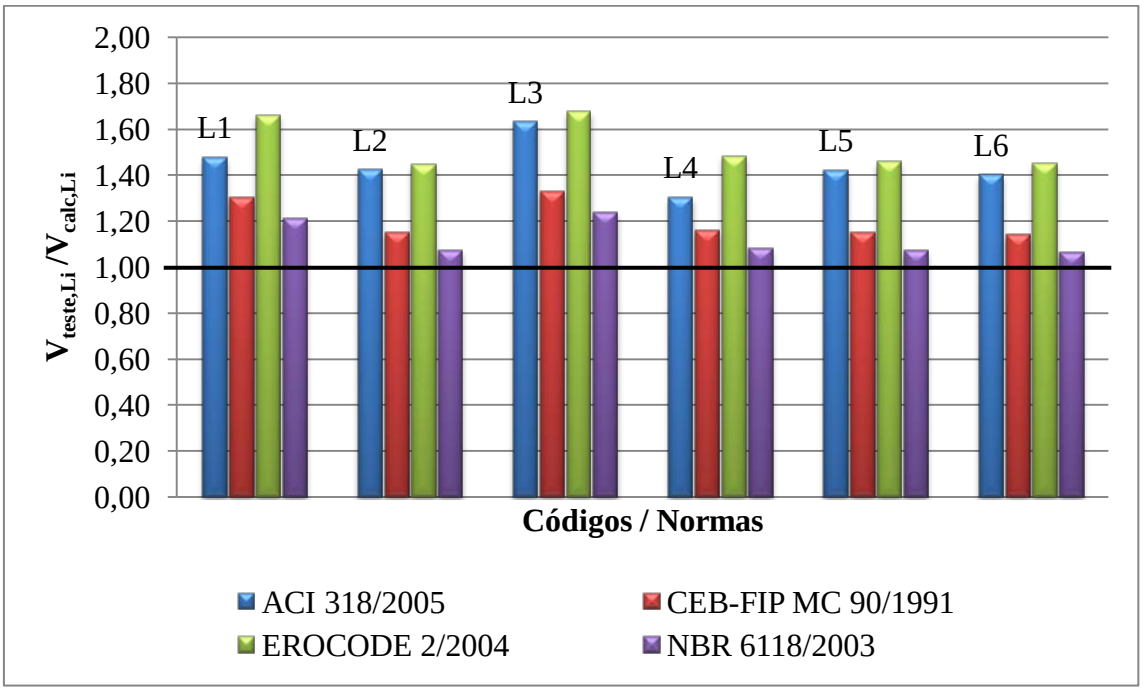


Figura 4.53 – Comparações das cargas de ruptura experimentais

Tabela 4.14 – Comparação da carga de ruptura experimental em relação à carga de ruptura de uma laje sem armadura de cisalhamento, $V_{c,\,Li\text{-}normas}$

Lajes	V_{teste} (kN)	ACI 318/2005		CEB-FIP MC 1990		EUROCODE 2/2004		NBR 6118:2003	
		$V_{Rd,c}^{(1)}$ (kN)	$V_{teste,\,Li}$ / $V_{c,\,Li}$	$V_{Rd,c}^{(2)}$ (kN)	$V_{teste,\,Li}$ / $V_{c,\,Li}$	$V_{Rd,c}^{(3)}$ (kN)	$V_{teste,\,Li}$ / $V_{c,\,Li}$	$V_{Rd,c}^{(4)}$ (kN)	$V_{teste,\,Li}$ / $V_{c,\,Li}$
L1	592	372	1,59	467	1,27	400	1,48	467	1,27
L3	636	370	1,72	466	1,36	399	1,59	466	1,36
L5	708	360	1,97	454	1,56	387	1,83	454	1,56
L2	511	354	1,44	452	1,13	387	1,32	452	1,13
L4	596	347	1,71	442	1,35	375	1,59	442	1,35
L6	583	345	1,69	438	1,33	371	1,57	438	1,33

$V_{teste,Li}$ / $V_{c,Li-Normas}$ – Comparação da carga de ruptura experimental da laje em relação à carga de ruptura esperada de uma laje sem armadura de cisalhamento de acordo com cada código; Coeficientes de segurança usados = 1,0;

$$V^{(1)} = 0{,}17\left(1+\frac{2}{\beta_c}\right)\sqrt{f_c^{'}}\,b_0 d;\; V^{(2)} = V^{(3)} = 0{,}12\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)\left(100\rho_1 f_{ck}\right)^{1/3} u_1 d$$

$$V^{(4)} = 0{,}13\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)\left(100\rho_1 f_{ck}\right)^{1/3} u_1 d$$

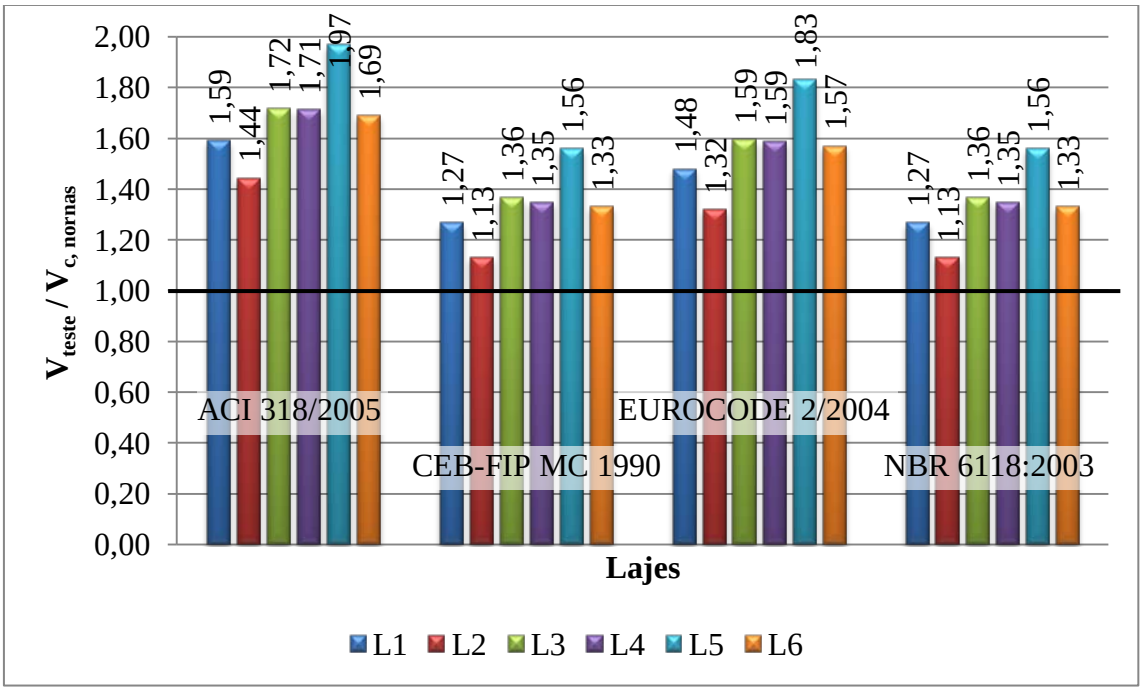


Figura 4.54 – Relação de (V_{teste}) / ($V_{c,\ Li\text{-}Normas}$)

Ao comparar a eficiência da armadura de cisalhamento a Tabela 4.14 mostra que para todas as lajes que tiveram armadura "stud rails" (Grupo 1) as cargas de ruptura foram maiores que nas lajes que tiveram armadura "double headed studs" (Grupo 2), citando o ACI 318/2005 tem-se L1/L2=1,10, L3/L4=1,01 e L5/L6=1,17.

No gráfico da Figura 4.54 para relação (V_{teste}) / ($V_{c,\ Li\text{-}Normas}$) as Lajes L1 e L5 apresentaram coeficientes maiores que os das Lajes L2 e L6, respectivamente em todas as normas. A Laje L3 apresentou coeficiente com valor próximo ao da L4 em todos os métodos.

De forma similar da Laje L3, a L1 teve o avanço de 20 mm da chapa inferior da armadura de cisalhamento dentro do pilar. Esta situação quando adicionado mais linhas de armadura de cisalhamento como na L3 e mantendo constates as demais características pode ter reduzido a carga de ruptura da L3.

4.6.8 Análises para sugestões de trabalhos futuros

A Tabela 4.15 apresenta as cargas e os modos de ruptura previstos de acordo com cada norma/código, com coeficientes de segurança iguais a 1,0. As cargas de ruptura experimentais em relação às esperadas segundo o ACI 318/2005 foram de 1,11 (L3) a 1,26 (L1) para as lajes do Grupo 1 e de 1,01 (L6) a 1,11 (L2) para as do Grupo 2.

Para o CEB-FIP MC 1990 e NBR 6118:2003 as cargas de ruptura experimentais em relação às esperadas foram de 0,77 (L3) a 0,88 (L5) para as lajes do Grupo 1 e de 0,76 (L6) a 0,77 (L2 e L4) para as do Grupo 2. Para o EUROCODE 2/2004 as cargas de ruptura experimentais em relação às esperadas foram de 0,96 (L3) a 1,12 (L5) para as lajes do Grupo 1 e de 0,97 (L4 e L6) a 0,99 (L2).

Tabela 4.15 – Cálculo de V_{calc} com coeficientes de segurança iguais a 1,0

Lajes	V_{teste} (kN)	ACI 318/2005		CEB-FIP MC 1990		EUROCODE 2/2004		NBR 6118:2003	
		$V_{Rd}^{(2)}=V_{calc}$ (kN)	V_{teste} / V_{calc}	$V_{Rd}^{(3)}=V_{calc}$ (kN)	V_{teste} / V_{calc}	$V_{Rd}^{(3)}=V_{calc}$ (kN)	V_{teste} / V_{calc}	$V_{Rd}^{(3)}=V_{calc}$ (kN)	V_{teste} / V_{calc}
GRUPO 1 – "Stud rails"									
L1	592	470	1,26	682	0,87	534	1,11	682	0,87
L3	636	575	1,11	829	0,77	659	0,96	829	0,77
L5	708	600	1,18	800	0,88	633	1,12	800	0,88
GRUPO 2 – "double headed studs"									
L2	511	460	1,11	660	0,77	516	0,99	660	0,77
L4	596	552	1,08	775	0,77	612	0,97	775	0,77
L6	583	575	1,01	765	0,76	603	0,97	765	0,76

– Coeficientes de segurança usados = 1,0;
$VR_d^{(2)}$ – carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento
$VR_d^{(2)}$ – carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento;

A Tabela 4.16 apresenta as cargas e os modos de ruptura esperados de acordo com cada norma/código com coeficientes de segurança iguais a 1,0 e com modificações nas expressões de u_1 e $VR_d^{(2)}$.

Propondo diminuir as diferenças entre as cargas de rupturas previstas e as experimentais de acordo com cada norma/código são feitas modificações nas expressões de cálculo o que necessita de maior número de pesquisas e investigações.

Para o ACI 318/2005 sugere-se a expressão $V_{Rd}^{(2)} = \frac{1}{5}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d + \frac{A_s f_y d}{s}$ que usa o coeficiente (1/5) ao contrário da norma que é (1/6).

Quanto ao CEB-FIP MC 1990 e a NBR 6118:2003 é proposto uma limitação no perímetro de controle $u_1 = 2(a+b) + 4\pi d$ em que "a" e "b" ficam condicionados ao valor de "d" ($\leq$ d), conforme Figura 4.55.

Na expressão para cálculo da carga de ruptura com a superfície de ruptura interna passando pela armadura de cisalhamento seria substituído o coeficiente 1,5 que multiplica a parcela referente à contribuição da armadura de cisalhamento por 0,75, ficando da seguinte forma: $V_{Rd}^{(2)} = 0{,}75V_{Rd}^{(4)} + 0{,}75\frac{d}{s_r}A_{sw} f_{ywd} sen\alpha$.

No EUROCODE 2/2004 é proposto uma limitação no perímetro de controle $u_1 = 2(a+b) + 4\pi d$ em que "a" e "b"$\leq$ d. Na expressão para cálculo da carga de ruptura com a superfície de ruptura interna passando pela armadura de cisalhamento seria substituído o coeficiente 1,5 que multiplica a parcela referente à contribuição da armadura de cisalhamento por 1,0, ficando da seguinte forma: $V_{Rd}^{(2)} = 0{,}75V_{Rd}^{(4)} + \frac{d}{s_r}A_{sw} f_{ywd} sen\alpha$.

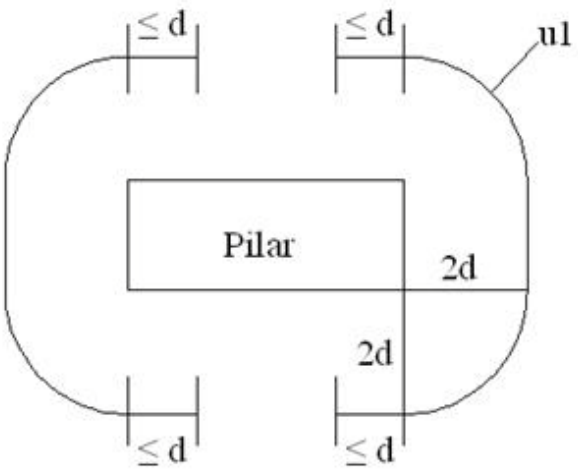


Figura 4.55 – Perímetro de controle u1 proposto para o CEB-FIP MC 1990, EUROCODE 2/2004 e NBR 6118:2003

Tabela 4.16 – Cálculo de $V_{Rd}^{(2)}=V_{calc}$ proposto para o ACI 318/2005, CEB-FIP MC 1990, EUROCODE 2/2004 e NBR 6118:2003

Lajes	**V_{teste} (kN)**	**ACI 318/2005**		**CEB-FIP MC 1990**		**EUROCODE 2/2004**		**NBR 6118:2003**	
		$V_{Rd}^{(2)}=V_{calc}$ (kN)	**V_{teste} / V_{calc}**	**$V_{Rd}^{(2)}=V_{calc}$ (kN)**	**V_{teste} / V_{calc}**	**$V_{Rd}^{(2)}=V_{calc}$ (kN)**	**V_{teste} / V_{calc}**	**$V_{Rd}^{(2)}=V_{calc}$ (kN)**	**V_{teste} / V_{calc}**
GRUPO 1 – "Stud rails"									
L1	592	512	1,16	479	1,23	505	1,17	479	1,23
L3	636	616	1,03	558	1,14	610	1,04	558	1,14
L5	708	600	1,18	667	1,06	633	1,12	667	1,06
GRUPO 2 – "double headed studs"									
L2	511	500	1,02	470	1,09	497	1,03	470	1,09
L4	596	579	1,03	533	1,12	584	1,02	533	1,12
L6	583	575	1,01	648	0,90	603	0,97	648	0,90

– Modo de ruptura previsto segundo cada Norma: **ruptura interna** a região de armadura de cisalhamento para todas as lajes; Coeficientes de segurança usados = 1,0;

– $u_{1,ACI318/2005} = 2(a+b)+4d$

– $u_{1,CEB-FIPMC90=EUROCODE2/2004=NBR6118/2003} = 2(a+b)+4\pi d$, "a" e "b" $\leq$ d;

– Carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento segundo ACI 318/2005: $V_{Rd}^{(2)} = \frac{1}{5}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d + \frac{A_s f_y d}{s}$

– Carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento segundo CEB-FIP MC 1990 e NBR 6118:2003: $V_{Rd}^{(2)} = 0{,}75V_{Rd}^{(4)} + 0{,}75\left(\frac{d}{s_r}\right)A_{sw} f_{yd} sen\alpha$

– Carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento segundo EUROCODE 2/2004: $V_{Rd}^{(2)} = 0{,}75V_4 + \left(\frac{d}{s_r}\right)A_{sw} f_{ywd} sen\alpha$

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As conclusões descritas neste capítulo baseiam-se nos resultados experimentais a respeito da eficiência dos tipos de armaduras de cisalhamento “stud rails” e “double headed studs”.

Foram ensaiadas seis lajes de concreto simulando lajes cogumelo, tendo como variáveis principais o tipo de armadura de cisalhamento, a influencia do avanço da chapa da armadura inferior de cisalhamento dentro do pilar, o número de linhas e camadas dos “studs”.

5.1 CONCLUSÕES

As lajes tiveram deslocamentos (flechas) proporcionais a cada incremento de carga apresentado configurações aproximadamente lineares e tendo as maiores flechas registradas nas extremidades. Para a carga de 500 kN as flechas das lajes L1 a L4 mantiveram-se semelhantes levemente maiores que as flechas das lajes L5 e L6.

As lajes com “studs rails” apresentaram flechas maiores que as com “double headed studs”, com exceção da Laje L4 que teve flecha maior que a L3.

Em todas as lajes a superfície de ruptura cruzou a armadura de cisalhamento nas 1ª e/ou 2ª camadas. Para as lajes L1 e L2 a superfície de ruptura apresentou um ângulo acima de 30º e para as lajes L3 a L4, em torno de 45º.

O fato da base da armadura de cisalhamento tipo “stud rails” avançar dentro do pilar pode ter reduzido a carga de ruptura da Laje L3. Esta base dentro do pilar pode ter apresentado menor influencia na laje L1 devido ter menor quantidade de linhas de armadura de cisalhamento que a L3.

As deformações na armadura de flexão das lajes L1 e L2 não atingiram o limite de escoamento da armadura para cargas até de 500 kN. Acima deste limite de carga, nos pontos monitorados foram medidas deformações próximas ao escoamento (ε_y=3,05).

Os pontos monitorados nas armaduras de cisalhamento registraram deformações para as três camadas mais internas decrescendo ao se afastar do pilar. Os extensômetros da 1ª

camada das lajes L3 e L4 atingiram deformação de escoamento. Para as demais lajes, o comportamento das deformações registradas indicam um possível estágio de escoamento.

As fissuras radiais foram as primeiras a surgirem com carga próximo a 100 kN e logo após a partir de 300 kN surgiram as fissuras tangenciais para todas as lajes.

Ao comparar as lajes dos Grupos 1 e 2 com uma laje sem armadura de cisalhamento L1 (SOUZA, 2008), com dimensões e demais características semelhantes, todas apresentaram aumento da carga de ruptura com a utilização de armadura de cisalhamento.

Dos métodos utilizados (ACI 318/2005, CEB-FIP MC/1990, EUROCODE 2/2004 e NBR 6118:2003) para comparação das cargas previstas com as experimentais (V_{teste} / V_{cal}) todos apresentaram valores a favor da segurança.

Os modos de ruptura previstos pelo ACI 318/2005 foram coincidentes com os experimentais. O CEB-FIP MC/1990, EUROCODE 2/2004 e a NBR 6118:2003 previram superfície de ruptura externa a região de armadura de cisalhamento diferente dos modos de ruptura experimentais das lajes.

Quanto a montagem das armaduras de cisalhamento na forma para concretagem o tipo “double headed studs” oferece maior facilidade que o tipo “stud rails” proporcionando maior rapidez na sua execução.

A Tabela 5.1 apresenta as principais características dos tipos de armadura de cisalhamento investigadas neste trabalho.

Tabela 5.1 – Principais características dos tipos de armadura de cisalhamento "stud rails" e "double headed studs"

Características	Tipo de armadura de cisalhamento	
	"Stud rails"	**"Double headed Studs"**
Confecção	Maior rapidez devido ter uma chapa de ancoragem inferior única que já distancia os pinos.	Reduz a rapidez devido após execução unitária de cada pino ainda é necessário soldagem de armadura auxiliar na parte superior.
Armazenagem / transporte	Necessita de maiores espaços e apresenta rigidez para empilhamento e transporte.	Necessita de menores espaços antes da soldagem de armadura auxiliar. Após deve ser mantido uma maior atenção para empilhamento e transporte.
Posicionamento no pilar	O posicionamento é feito em torno do pilar antes da amarração da armadura de flexão positiva e negativa.	O posicionamento é feito em torno do pilar após a amarração da armadura de flexão positiva e negativa, é somente encaixar a armadura.
Concretagem	Apresenta maior estabilidade dentro da forma até a concretagem.	Apresenta menor precisão de posicionamento dentro da armadura de flexão e média vulnerabilidade da chapa de ancoragem inferior durante o lançamento do concreto.
NBR 6118:2003	Na presente pesquisa apresentou resistência a punção de 27% a 56%.	Na presente pesquisa apresentou resistência a punção de 13% a 36%.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar o efeito da chapa inferior (base) da armadura de cisalhamento avançando dentro de pilares com seções menores e de geometrias circulares ou quadradas.

Analisar em lajes com superfícies de rupturas externas a armadura de cisalhamento a influencia da chapa inferior (base) da armadura de cisalhamento avançando dentro do pilar, conforme detalhamento na Tabela 5.2.

Comparar a utilização das armaduras de cisalhamento tipos “stud rails” e “double headed studs” com outros tipos como estribos e barras dobradas (bent bar). Estas propostas alem de serem executadas em lajes com as mesmas dimensões a da presente pesquisa, poderão ser executadas em lajes com dimensões menores como 1800 x 1800 mm. Adicionando outras variáveis como o efeito de furos próximo ao pilar e a protensão da laje.

Quanto ao modelo experimental deve ser ajustado o procedimento para nivelação da laje a ser ensaiada, substituindo o processo de empilhamento de blocos prismáticos de concreto sob os quatro cantos da laje por outro que ofereça maior estabilidade.

Aumentar a rigidez dos suportes de fixação dos relógios comparadores fazendo com que absorvam pequenos movimentos sem repassá-los aos instrumentos de leituras.

Na confecção das formas de aço para concretagem das lajes deve ser aumentado o apoio (escoramento) próximo ao pilar garantindo que as espessuras das lajes sejam constantes principalmente nesta região.

Tabela 5.2 – Detalhamento das propostas sugeridas

Laje	f_c **(MPa)**	**d (mm)**	ρ **(%)**	$Ø_{A.C.}$ **(mm)**	**Nº de linhas**	**Nº de cam.**	V_{calc}	**Modo de ruptura previsto**
L1	35,0	112	1,23	8,0	14	3	**445**	Externo
L2	35,0	112	1,23	10,0	14	5	**445**	Externo
L3	35,0	112	1,23	8,0	14	3	**568**	Externo
L4	35,0	112	1,23	10,0	14	5	**568**	Externo
– Pilar com seção 500 x 200 mm; – S_0=50 mm e S_r=90 mm;								

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary - ACI 318/2005. Michigan, American Concrete Institute, 2005.

ANDRADE, M.A.S. de. Punção em lajes cogumelo – Estudo do Posicionamento da Armadura de Cisalhamento em Relação à Armadura de Flexão. 1999, 156 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - Projeto de Obras de Concreto Armado – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-8522/84 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-6152/92 – Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-7222/94 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –NBR 7480/96 - Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-5739/94 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

CEB-FIP MC90 (1991). “CEB-FIP Model Code 1990: Final Draft ”. Bulletin D'Information 204, Committe Euro-International du Beton, Lousanne, July 1991.

EUROCODE 2 (2004). “Design of concrete structures – Part1: General Rules and Rules for Buildings”. European Prestandard EN 1992-1-1:2004. Comité Europeén de Normalisation, Brussels, 2004, 253 p.

CORDOVIL, F.A.B.; FUSCO, P.B. Armadura de Cisalhamento para Punção em Placas de Concreto. XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estrutural. Tucumán – Argentina, setembro 1995, p. 165-176.

GOMES, R.B. Punching Resistence of Reinforced Concrete Flat Slabs with Shear Reinforcement. 1991, 185 p. PhD Thesis – The Polytechnic of Central London, 1991.

KINNUNEN, S.; NYLANDER, H. Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement. Civil Engineering 6, Transactions of The Royal Institute of Technology. nº 158, Stockholm, 1960, 112 p.

REGAN P.E. & BRAESTRUP, M.W. Punching Shear in Reinforced Concrete: A State of Art Report. Bulletin D'information 168, Comite Euro International Du Beton, Jan. 1985, 232 p.

SILVA, JALES ALMEIDA (2003). Punção em Lajes Cogumelo: Pilares Retangulares, Furos e Armadura de Cisalhamento. Dissertação de Mestrado, Publicação/2003, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 210 p.

TAKEYA, T. (1981). Estudo Experimental da Ruína de Ligações Laje-pilar em Bordas de Lajes Cogumelo. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

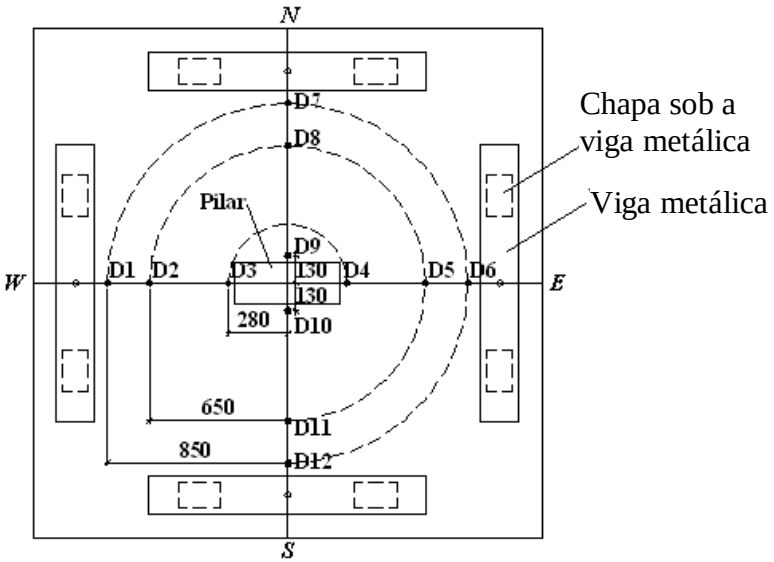
TRAUTWEIN, L.M. Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento Tipo "Studs" Interno e Estribo Inclinado. 2001, 167 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2001.

SHEHATA I.A.M.S. Theory of punching in concrete slabs. London, 1985. 257p. PhD Thesis, The Polytechnic of Central London.

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

VAZ, A. P. R. Resistência à Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: uma Contribuição para Definição de Armadura Mínima de Cisalhamento. 2007, Dissertação em andamento (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2007.

APENDICE A - DESLOCAMENTOS VERTICAIS



Deslocamentos verticais da laje L1												
Carga	Direção W–E						Direção N–S					
(kN)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,10	-0,06	-0,02	-0,01	-0,01	-0,14	-0,15	-0,10	-0,01	-0,09	-0,13	-0,13
50	-0,30	-0,19	-0,04	-0,02	-0,12	-0,32	-0,38	-0,26	-0,17	0,09	-0,36	-0,46
75	-0,57	-0,38	-0,07	-0,04	-0,31	-0,58	-0,71	-0,49	-0,17	0,08	-0,71	-0,94
100	-0,90	-0,61	-0,10	-0,09	-0,68	-1,12	-1,39	-0,95	-0,19	0,06	-1,14	-1,54
150	-1,89	-1,28	-0,19	-0,19	-1,56	-2,38	-2,77	-2,05	-0,19	0,05	-2,34	-3,24
200	-2,94	-2,03	-0,30	-0,28	-2,44	-3,66	-4,18	-2,93	-0,21	-0,06	-3,50	-4,86
250	-3,96	-2,74	-0,40	-0,37	-3,26	-4,82	-5,55	-3,85	-0,23	-0,12	-4,65	-6,47
300	-5,06	-3,53	-0,50	-0,46	-4,24	-6,23	-7,12	-4,96	-0,24	-0,17	-5,83	-8,12
350	-6,32	-4,42	-0,62	-0,53	-5,19	-7,58	-8,72	-6,10	-0,24	-0,24	-7,23	-10,02
400	-7,69	-5,41	-0,77	-0,64	-6,28	-9,13	-10,71	-7,51	-0,26	-0,30	-8,40	-11,62
450	-9,62	-6,82	-0,92	-0,73	-7,40	-10,69	-12,78	-9,01	-0,30	-0,38	-10,29	-14,17
500	-11,58	-8,27	-1,07	-0,79	-9,04	-12,91	-15,12	-10,04	-0,34	-0,47	-11,32	-16,83
550	-15,42	-11,28	-1,29	-0,68	-10,93	-15,12	-17,87	-12,10	-0,38	-0,61	-12,90	-17,69
591,7	Ruptura.											

Deslocamentos verticais da laje L2												
Carga	Direção W–E						Direção N–S					
(kN)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	-0,29	0,00	0,00	0,00	-0,07	-0,23	-0,26	-0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
75	-0,54	-0,07	0,00	0,00	-0,22	-0,47	-0,64	-0,47	0,00	0,00	-0,35	-0,50
100	-1,04	-0,37	0,00	0,13	-0,50	-0,92	-1,47	-1,05	0,00	0,00	-0,89	-1,24
150	-2,11	-1,08	0,00	0,10	-1,20	-1,98	-2,87	-1,57	0,00	0,00	-2,11	-2,98
200	-2,85	-1,92	-0,05	0,07	-1,81	-2,89	-4,32	-3,00	0,00	0,00	-3,12	-4,43
250	-4,11	-2,74	-0,17	0,07	-2,56	-3,99	-5,90	-3,10	0,00	0,00	-4,19	-5,94
300	-5,59	-3,76	-0,28	0,03	-3,39	-5,21	-7,63	-4,91	-0,08	-0,08	-5,50	-7,78
350	-7,08	-4,63	-0,32	0,01	-4,30	-6,55	-9,29	-5,47	-0,15	-0,15	-6,71	-9,51
400	-8,64	-5,73	-0,43	-0,03	-5,02	-7,56	-11,02	-7,15	-0,22	-0,22	-6,93	-10,86
450	-10,17	-6,78	-0,47	-0,05	-6,04	-9,01	-11,97	-8,33	-0,30	-0,30	-8,26	-12,81
500	-12,33	-8,36	-0,53	-0,07	-8,75	-12,75	-14,54	-9,83	-0,47	-0,47	-9,15	-14,21
510,8	Ruptura.											

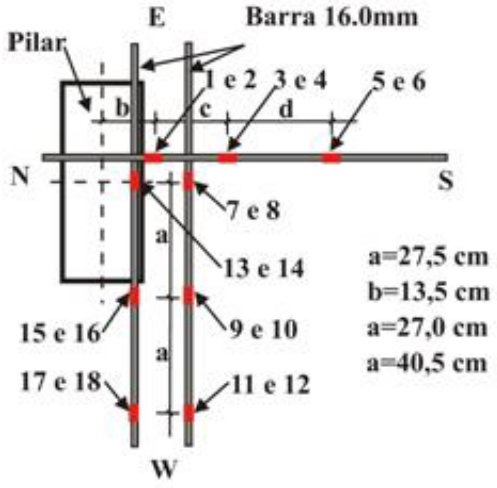
Deslocamentos verticais da laje L3												
Carga	Direção W–E						Direção N–S					
(kN)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,10	-0,08	0,00	0,00	-0,02	-0,04	-0,12	-0,08	0,00	0,00	0,00	-0,13
50	-0,35	-0,24	0,00	0,00	-0,11	-0,19	-0,36	-0,25	-0,01	-0,01	-0,31	-0,47
75	-0,69	-0,47	0,00	-0,01	-0,27	-0,41	-0,79	-0,56	-0,01	-0,01	-0,63	-0,88
100	-1,18	-0,82	-0,04	-0,05	-0,63	-0,92	-1,56	-1,12	-0,04	-0,04	-0,99	-1,50
150	-2,54	-1,76	-0,16	-0,13	-1,26	-1,98	-3,06	-2,21	-0,11	-0,11	-2,16	-3,28
200	-3,77	-2,58	-0,27	-0,21	-2,35	-3,14	-4,75	-3,43	-0,16	-0,16	-2,82	-4,26
250	-5,15	-3,54	-0,41	-0,29	-3,22	-5,26	-6,50	-4,72	-0,23	-0,23	-3,70	-5,58
300	-6,53	-4,49	-0,56	-0,39	-4,17	-6,51	-8,41	-6,13	-0,32	-0,32	-5,03	-7,58
350	-7,91	-5,12	-0,59	-0,38	-4,91	-7,60	-10,20	-7,37	-0,34	-0,34	-6,10	-9,09
400	-9,63	-6,33	-0,72	-0,47	-5,87	-9,99	-12,16	-8,84	-0,39	-0,39	-7,35	-10,81
450	-11,30	-7,52	-0,82	-0,56	-7,83	-11,09	-14,25	-9,42	-0,39	-0,39	-8,47	-12,83
500	-13,88	-9,34	-1,00	-0,64	-8,64	-14,14	-18,46	-11,93	-0,40	-0,40	-10,53	-16,00
550	-16,12	-11,00	-1,19	-0,67	-10,49	-15,62	-21,46	-14,16	-0,39	-0,39	-12,95	-19,77
600	-21,31	-14,92	-1,52	-0,70	-13,82	-20,64	-24,61	-16,58	-0,40	-0,40	-15,77	-23,38
636,1	Ruptura.											

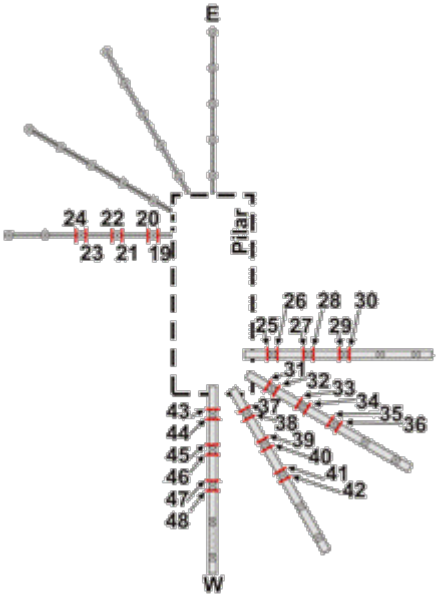
Deslocamentos verticais da laje L4												
Carga	Direção W–E						Direção N–S					
(kN)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,05	0,00	0,03	0,00	0,00	0,09	0,07	0,00	0,00	-0,17	0,00
50	-0,23	-0,13	0,00	0,03	0,00	-0,05	-0,31	-0,19	0,00	0,00	-0,24	-0,01
75	-0,56	-0,37	0,00	0,03	-0,16	-0,31	-0,69	-0,46	-0,01	-0,01	-0,49	-0,47
100	-1,00	-0,67	0,00	0,03	-0,36	-0,63	-1,35	-0,91	-0,03	0,00	-0,86	-1,33
150	-2,01	-1,35	-0,07	-0,01	-0,98	-1,56	-2,75	-1,88	-0,03	0,00	-1,78	-2,36
200	-3,09	-2,10	-0,09	-0,04	-1,64	-2,56	-4,22	-2,89	-0,09	-0,06	-2,73	-4,02
250	-4,22	-2,91	-0,14	-0,08	-2,32	-3,55	-5,74	-3,95	-0,31	-0,28	-3,65	-5,43
300	-5,48	-3,86	-0,16	-0,13	-3,08	-4,65	-7,41	-5,16	-0,47	-0,44	-4,63	-6,86
350	-6,85	-4,88	-0,19	-0,16	-3,81	-5,70	-8,95	-6,26	-0,70	-0,67	-5,82	-8,80
400	-8,09	-5,17	-0,43	-0,10	-4,46	-6,75	-10,72	-7,47	-0,78	-0,75	-6,82	-10,24
450	-11,03	-6,44	-0,70	-0,05	-5,71	-10,08	-14,45	-10,15	-1,02	-0,99	-9,20	-14,09
500	-15,54	-10,39	-1,00	-0,04	-8,99	-14,14	-19,63	-13,47	-1,38	-1,35	-12,79	-19,07
550	-22,88	-15,05	-1,34	-0,07	-13,84	-21,48	-27,02	-18,35	-1,92	-1,89	-18,14	-26,36
595,5	Ruptura.											

Deslocamentos verticais da laje L5												
Carga	Direção W–E						Direção N–S					
(kN)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	-0,16	-0,12	0,00	-0,02	-0,15	-0,15	-0,21	-0,18	0,00	0,08	-0,23	-0,35
100	-0,52	0,11	0,00	-0,06	-0,36	-0,52	-0,64	-0,49	0,00	0,08	-0,61	-0,89
150	-1,58	-1,05	0,00	-0,11	-1,01	-1,50	-1,95	-1,40	0,00	0,08	-1,46	-2,17
200	-2,81	-1,88	-0,11	-0,18	-1,66	-2,46	-3,28	-2,37	-0,05	0,08	-2,37	-3,51
250	-3,82	-2,57	-0,19	-0,27	-2,40	-3,53	-4,50	-3,22	-0,11	0,08	-3,28	-4,86
300	-5,00	-3,39	-0,30	-0,37	-3,23	-4,75	-5,80	-4,16	-0,18	-0,03	-4,10	-6,20
350	-6,07	-4,12	-0,38	-0,49	-4,07	-5,98	-7,02	-4,18	-0,23	-0,08	-5,12	-7,70
400	-7,30	-4,99	-0,49	-0,63	-4,98	-7,29	-8,54	-5,17	-0,31	-0,15	-5,26	-9,02
450	-8,54	-5,86	-0,60	-0,72	-5,68	-8,31	-10,12	-6,15	-0,40	-0,20	-6,14	-9,02
500	-9,89	-6,37	-0,71	-0,84	-6,50	-9,51	-11,59	-7,23	-0,46	-0,26	-7,30	-10,61
550	-11,23	-7,37	-0,80	-1,00	-7,72	-11,23	-13,40	-8,73	-0,55	-0,21	-8,96	-11,85
600	-13,35	-8,94	-0,96	-1,13	-9,37	-13,46	-15,25	-9,07	-0,64	-0,03	-8,63	-14,40
650	-16,25	-10,97	-1,02	-1,47	-12,48	-17,74	-17,26	-10,15	-0,77	0,16	-10,86	-16,63
700	-21,06	-14,00	-1,19	-1,54	-14,63	-21,36	-22,72	-14,83	-0,95	-0,57	-14,31	-22,69
707,6	Ruptura.											

Deslocamentos verticais da laje L6												
Carga	Direção W–E						Direção N–S					
(kN)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-0,13	0,15	-0,01	-0,02	-0,06	-0,09	-0,05	-0,03	0,00	-0,01	-0,15	0,00
50	-0,34	0,07	-0,03	-0,03	-0,17	-0,26	-0,29	-0,23	-0,01	-0,02	-0,21	0,00
75	-0,67	-0,06	-0,05	-0,04	-0,32	-0,49	-0,69	-0,49	-0,03	-0,04	-0,48	0,00
100	-1,08	-0,23	-0,07	-0,06	-0,53	-0,83	-1,24	-0,90	-0,05	-0,06	-0,89	-0,56
150	-1,79	-1,22	-0,16	-0,12	-1,10	-1,71	-2,57	-1,71	-0,09	-0,12	-1,54	-2,20
200	-2,71	-1,85	-0,22	-0,18	-1,68	-2,61	-3,81	-2,58	-0,13	-0,16	-2,51	-3,52
250	-3,68	-2,83	-0,31	-0,25	-2,35	-3,58	-5,12	-3,58	-0,19	-0,22	-3,32	-5,42
300	-4,92	-3,40	-0,40	-0,32	-3,02	-4,57	-6,36	-4,32	-0,27	-0,29	-4,43	-6,47
350	-5,95	-5,07	-0,49	-0,40	-3,80	-5,74	-7,73	-5,18	-0,37	-0,39	-5,28	-7,40
400	-6,92	-4,70	-0,58	-0,47	-4,54	-6,80	-9,02	-5,96	-0,47	-0,49	-6,18	-9,12
450	-8,50	-5,52	-0,70	-0,57	-5,58	-8,36	-10,91	-6,97	-0,58	-0,60	-7,54	-11,14
500	-9,98	-6,54	-0,74	-0,60	-6,43	-9,64	-12,52	-8,18	-0,70	-0,72	-8,33	-12,52
550	-13,65	-9,11	-0,84	-0,65	-8,61	-13,14	-15,92	-10,88	-1,11	-1,13	-11,35	-16,17
583	Ruptura.											

APENDICE B - RESULTADOS DOS EXTENSÔMETROS DAS ARMADURAS DE FLEXÃO E CISALHAMENTO





LAJE L1												
Carga (kN)	Armadura de flexão									Arm. de cisalhamento		
	Barra 1			Barra 2			Barra 3			Linha 1		
	1 e 2	3 e 4	5 e 6	7 e 8	9 e 10	11 e 12	13	15 e 16	17 e 18	19 e 20	21 e 22	23 e 24
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,01	0,01	0,00	0,09	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,06	0,01	0,00
75	0,01	0,01	0,01	0,09	0,05	0,02	0,02	0,02	0,00	0,12	0,01	0,01
100	0,02	0,04	0,01	0,12	0,10	0,04	0,01	0,01	-0,01	0,21	0,05	0,01
150	0,05	0,08	0,03	0,15	0,16	0,07	0,02	0,00	-0,02	0,35	0,10	0,02
200	0,03	0,13	0,03	0,24	0,30	0,14	0,05	0,00	-0,02	0,64	0,39	0,07
250	0,09	0,15	0,03	0,34	0,35	0,18	0,10	0,00	-0,02	0,83	0,64	0,23
300	0,11	0,18	0,07	0,47	0,40	0,22	0,18	0,00	-0,02	1,02	0,90	0,46
350	0,17	0,24	0,10	0,63	0,45	0,27	0,30	0,01	-0,01	1,26	1,10	0,74
400	0,23	0,28	0,12	0,80	0,50	0,32	0,38	0,02	-0,01	1,49	1,32	0,95
450	0,33	0,32	0,13	0,99	0,57	0,38	0,44	0,03	0,00	1,68	1,52	1,15
500	0,48	0,35	0,18	1,31	0,64	0,56	0,53	0,09	0,02	1,78	1,73	1,38
550	0,61	0,35	0,19	1,67	0,89	0,88	1,17	0,26	0,29	2,00	1,88	1,59
591,7	Ruptura.											

LAJE L1									
Carga (kN)	**Armadura de cisalhamento**								
	Linha 2			**Linha 3**			**Linha 4**		
	25 e 26	**27 e 28**	**29 e 30**	**25 e 26**	**27 e 28**	**29 e 30**	**25 e 26**	**27 e 28**	**29 e 30**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
75	0,06	0,02	0,02	0,12	0,02	0,01	0,05	0,02	-0,01
100	0,12	0,05	0,03	0,30	0,05	0,00	0,10	0,06	0,01
150	0,22	0,15	0,06	0,51	0,15	0,02	0,20	0,11	0,03
200	0,41	0,35	0,15	0,91	0,40	0,04	0,28	0,21	0,05
250	0,67	0,58	0,29	1,23	0,60	0,06	0,39	0,29	0,05
300	0,92	0,79	0,45	1,51	0,82	0,08	0,43	0,34	0,05
350	1,18	0,99	0,68	1,79	1,07	0,10	0,49	0,45	0,03
400	1,42	1,17	0,88	2,05	1,30	0,12	0,59	0,53	0,07
450	1,72	1,36	1,07	2,32	1,51	0,15	0,70	0,64	0,08
500	1,89	1,59	1,25	2,72	1,75	0,21	0,85	0,74	0,10
550	2,09	1,98	1,37	3,20	1,96	0,32	1,38	1,04	0,42
591,7	Ruptura.								

LAJE L2												
Carga (kN)	**Armadura de flexão**									**Arm. de cisalhamento**		
	Barra 1			**Barra 2**			**Barra 3**			**Linha 1**		
	1 e 2	**3 e 4**	**5 e 6**	**7 e 8**	**9 e 10**	**11 e 12**	**13**	**15 e 16**	**17 e 18**	**19 e 20**	**21 e 22**	**23 e 24**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,12	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,04	0,05	0,01	0,02	0,00	0,00	0,25	0,08	0,01	0,01	0,03	0,00
75	0,10	0,13	0,01	0,08	0,00	0,00	0,64	0,59	0,03	0,05	0,04	0,02
100	0,19	0,24	0,02	0,17	0,00	0,00	0,67	0,77	0,06	0,09	0,10	0,02
150	0,50	0,47	0,00	0,38	0,00	0,00	0,80	1,17	0,18	0,14	0,15	0,03
200	0,80	0,68	0,02	0,60	0,00	0,00	1,42	1,44	0,37	0,19	0,16	0,04
250	1,08	0,87	0,07	0,79	0,00	0,00	1,28	1,65	0,56	0,24	0,18	0,06
300	1,37	1,11	0,14	1,02	0,00	0,00	1,45	1,86	0,80	0,26	0,17	0,08
350	1,67	1,33	0,20	1,22	0,00	0,00	1,93	2,03	1,02	0,27	0,17	0,07
400	1,94	1,53	0,28	1,42	0,00	0,00	2,17	2,17	1,27	0,34	0,16	0,12
450	2,22	1,82	0,40	1,70	0,00	0,00	2,41	2,26	1,57	0,44	0,18	0,14
500	2,42	2,06	0,50	1,96	0,00	0,00	2,27	2,33	1,81	0,63	0,16	0,17
510,8	Ruptura.											

LAJE L2									
Carga (kN)	**Armadura de cisalhamento**								
	Linha 2			**Linha 3**			**Linha 4**		
	25 e 26	**27 e 28**	**29 e 30**	**31 e 32**	**34**	**35 e 36**	**37 e 38**	**39 e 40**	**41 e 42**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
50	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00
75	0,02	0,01	0,06	0,01	0,05	0,07	0,06	0,00	0,02
100	0,02	0,00	0,06	0,02	0,04	0,12	0,09	0,00	0,03
150	0,04	0,00	0,07	0,13	0,14	0,16	0,16	0,00	0,05
200	0,04	0,02	0,07	0,27	0,24	0,22	0,26	0,02	0,09
250	0,04	0,04	0,07	0,37	0,30	0,26	0,35	0,04	0,11
300	0,05	0,04	0,08	0,45	0,38	0,29	0,46	0,08	0,13
350	0,20	0,05	0,08	0,59	0,44	0,31	0,58	0,12	0,14
400	0,57	0,08	0,11	0,80	0,52	0,36	0,79	0,21	0,14
450	0,92	0,17	0,18	1,19	0,60	0,47	1,25	0,28	0,14
500	1,40	0,45	0,28	1,61	0,67	0,62	1,81	0,48	0,15
510,8	Ruptura.								

LAJE L3												
Carga (kN)	**Armadura de flexão**									**Arm. de cisalhamento**		
	Barra 1			**Barra 2**			**Barra 3**			**Linha 1**		
	2	**3 e 4**	**6**	**7**	**9 e 10**	**12**	**13**	**15**	**17 e 18**	**20**	**22**	**24**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
50	0,09	0,04	0,01	0,13	0,02	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
75	0,20	0,09	0,01	0,29	0,07	0,02	0,15	0,04	0,01	0,06	0,03	0,02
100	0,34	0,17	0,03	0,45	0,15	0,05	0,28	0,09	0,07	0,15	0,05	0,04
150	0,62	0,38	0,01	0,74	0,44	0,22	0,59	0,33	0,21	0,25	0,07	0,06
200	0,90	0,56	0,01	0,99	0,69	0,31	0,86	0,55	0,30	0,30	0,09	0,09
250	1,16	0,76	0,02	1,22	0,98	0,44	1,11	0,78	0,43	0,36	0,12	0,12
300	1,41	0,96	0,07	1,43	1,26	0,59	1,34	1,02	0,59	0,48	0,14	0,17
350	1,67	1,17	0,14	1,67	1,52	0,77	1,63	1,24	0,78	0,68	0,17	0,28
400	1,94	1,41	0,24	1,90	1,82	1,00	1,89	1,48	1,02	0,97	0,23	0,34
450	2,18	1,64	0,31	2,16	2,09	1,22	2,14	1,69	1,23	1,29	0,31	0,41
500	2,38	1,85	0,38	2,48	2,30	1,57	2,57	1,93	1,48	1,69	0,38	0,53
550	2,97	2,07	0,46	2,73	2,47	1,92	2,82	2,08	1,68	1,82	0,42	0,57
600	10,60	2,28	0,54	3,47	2,71	2,71	3,15	2,14	1,88	2,22	0,72	0,71
636,1	Ruptura.											

LAJE L3												
Carga (kN)	**Armadura de cisalhamento**											
	Linha 2			**Linha 3**			**Linha 4**			**Linha 5**		
	25 e 26	**27 e 28**	**29 e 30**	**31 e 32**	**33 e 34**	**35 e 36**	**37**	**39 e 40**	**41 e 42**	**43 e 44**	**45 e 46**	**47 e 48**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
50	0,03	0,03	0,03	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05	0,03	0,01
75	0,05	0,04	0,04	0,13	-0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,08	0,06	0,01
100	0,05	0,03	0,06	0,17	-0,01	0,04	0,02	0,05	0,01	0,09	0,04	0,06
150	0,14	0,04	0,09	0,26	0,00	0,07	0,05	0,09	0,14	0,15	0,11	0,12
200	0,09	0,05	0,12	0,32	0,04	0,10	0,07	0,10	0,15	0,19	0,13	0,18
250	0,12	0,07	0,17	0,50	0,06	0,15	0,10	0,12	0,17	0,26	0,17	0,20
300	0,19	0,10	0,21	0,56	0,11	0,20	0,10	0,13	0,18	0,44	0,27	0,22
350	0,37	0,20	0,28	0,69	0,18	0,25	0,17	0,15	0,20	0,53	0,35	0,21
400	0,54	0,34	0,31	0,96	0,24	0,31	0,29	0,17	0,21	0,74	0,42	0,37
450	0,81	0,41	0,28	1,29	0,36	0,38	0,45	0,21	0,21	1,11	0,51	0,37
500	1,29	0,61	0,31	1,55	0,61	0,49	0,73	0,26	0,21	1,72	0,63	0,37
550	1,85	0,89	0,41	1,63	0,97	0,59	1,09	0,46	0,25	2,77	0,77	0,36
600	2,61	1,13	0,86	2,07	1,42	0,77	1,64	1,54	1,07	3,46	1,19	0,66
636,1	Ruptura.											

LAJE L4												
Carga (kN)	**Armadura de flexão**									**Arm. de cisalhamento**		
	Barra 1			**Barra 2**			**Barra 3**			**Linha 1**		
	2	**3 e 4**	**6**	**7**	**9 e 10**	**12**	**13**	**15**	**17 e 18**	**20**	**22**	**24**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,09	-0,01	0,01	0,07	0,03	0,01	0,00	0,05	0,03	0,13	0,01	0,00
50	0,06	-0,02	0,01	0,11	0,15	0,04	0,00	0,14	0,08	0,17	0,02	0,00
75	0,09	-0,06	0,01	0,13	0,35	0,11	0,00	0,26	0,12	0,20	0,00	0,00
100	0,08	-0,12	0,03	0,13	0,61	0,19	0,00	0,41	0,19	0,23	0,00	0,00
150	-0,01	-0,32	0,03	0,02	1,17	0,38	0,00	0,73	0,37	0,27	0,02	0,00
200	-0,01	-0,53	0,03	-0,02	1,69	0,60	0,00	1,02	0,55	0,32	0,03	0,00
250	0,02	-0,72	0,13	-0,02	2,15	0,85	0,00	1,27	0,72	0,33	0,04	0,00
300	0,01	-0,94	0,17	0,01	2,62	1,16	0,00	1,51	0,88	0,34	0,08	0,00
350	-0,03	-1,17	0,24	-0,02	3,04	1,52	0,00	1,72	1,03	0,37	0,10	0,00
400	-0,02	-1,38	0,28	-0,02	3,46	1,95	0,00	1,98	1,18	0,39	0,18	0,00
450	0,06	-1,60	0,36	0,07	3,86	2,43	0,00	2,23	1,34	0,41	0,30	0,00
500	0,07	-1,73	0,40	0,04	4,28	2,83	0,00	2,47	1,55	0,43	0,40	0,00
550	0,05	-1,81	0,45	0,07	4,73	3,35	0,00	2,93	1,67	0,44	0,51	0,00
595,5	Ruptura.											

LAJE L4												
Carga (kN)	**Armadura de cisalhamento**											
	Linha 2			**Linha 3**			**Linha 4**			**Linha 5**		
	25 e 26	**27 e 28**	**29 e 30**	**31 e 32**	**33 e 34**	**35 e 36**	**37**	**39 e 40**	**41 e 42**	**43 e 44**	**45 e 46**	**47 e 48**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	-0,01	-0,01	-0,01
50	0,04	0,04	0,01	0,04	0,05	0,03	0,04	0,02	0,04	-0,01	-0,01	-0,01
75	0,05	0,09	0,05	0,09	0,08	0,06	0,10	0,04	0,08	-0,03	-0,03	-0,02
100	0,18	0,13	0,08	0,15	0,13	0,10	0,17	0,06	0,10	-0,05	-0,06	-0,02
150	0,10	0,18	0,14	0,21	0,21	0,18	0,29	-0,09	0,14	-0,07	-0,13	-0,01
200	0,12	0,23	0,22	0,27	0,28	0,23	0,36	0,13	0,17	-0,08	-0,17	-0,01
250	0,15	0,29	0,29	0,33	0,36	0,28	0,42	0,18	0,20	-0,10	-0,20	-0,02
300	0,18	0,32	0,34	0,36	0,41	0,32	0,45	0,20	0,20	-0,10	-0,23	-0,02
350	0,23	0,33	0,35	0,34	0,42	0,35	0,49	0,25	0,23	-0,12	-0,26	-0,01
400	0,20	0,36	0,39	0,36	0,46	0,39	0,53	0,34	0,30	-0,16	-0,32	-0,02
450	0,28	0,43	0,39	0,39	0,50	0,45	0,60	0,48	0,37	-0,21	-0,42	-0,02
500	0,31	0,46	0,40	0,43	0,56	0,51	0,67	0,65	0,43	-0,26	-0,52	-0,04
550	1,36	2,21	1,48	2,69	1,58	1,38	1,97	2,22	2,01	-1,25	-1,03	-1,25
595,5	Ruptura.											

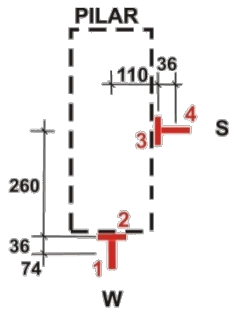
LAJE L5												
Carga (kN)	**Armadura de flexão**									**Arm. de cisalhamento**		
	Barra 1			**Barra 2**			**Barra 3**			**Linha 1**		
	1 e 2	**3 e 4**	**5 e 6**	**7 e 8**	**9 e 10**	**11 e 12**	**13 e 14**	**16**	**17 e 18**	**19 e 20**	**21 e 22**	**23 e 24**
10	-0,04	0,10	0,00	0,13	0,08	0,00	0,06	0,14	0,04	0,00	0,00	0,00
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-0,03	0,13	0,01	0,18	0,10	0,02	0,30	0,17	0,06	0,17	0,21	0,04
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	-0,02	0,19	0,01	0,28	0,16	0,04	0,32	0,21	0,11	0,22	0,24	0,06
150	-0,03	0,61	0,10	0,59	0,35	0,15	0,41	0,38	0,29	0,25	0,32	0,14
200	-0,03	0,69	0,09	0,86	0,59	0,34	0,65	0,57	0,51	0,29	0,33	0,21
250	-0,03	0,91	0,14	1,08	0,84	0,46	0,84	0,73	0,72	0,35	0,32	0,21
300	-0,02	1,13	0,21	1,31	1,10	0,60	1,04	0,92	0,94	0,43	0,31	0,18
350	-0,02	1,34	0,29	1,49	1,34	0,74	1,24	1,08	1,13	0,53	0,31	0,17
400	-0,01	1,56	0,38	1,66	1,58	0,89	1,42	1,28	1,34	0,60	0,33	0,19
450	0,02	1,78	0,51	1,82	1,80	1,06	1,57	1,46	1,50	0,72	0,33	0,18
500	-0,01	2,00	4,63	1,99	2,00	1,26	1,68	1,64	1,70	0,76	0,37	0,19
550	-0,03	2,33	-	2,13	2,17	1,46	1,91	1,79	1,86	0,88	0,46	0,21
600	0,02	2,56	-	2,31	2,33	1,74	2,09	2,01	2,03	0,99	0,48	0,23
650	-0,15	2,76	-	2,47	2,46	2,06	2,10	2,05	2,06	1,01	0,59	0,31
700	0,00	3,84	-	2,70	2,55	2,13	2,30	2,18	2,12	1,32	0,71	0,58
707,6	Ruptura.											

LAJE L5												
Carga (kN)	**Armadura de cisalhamento**											
	Linha 2			**Linha 3**			**Linha 4**			**Linha 5**		
	25 e 26	**27 e 28**	**29 e 30**	**31 e 32**	**33 e 34**	**35 e 36**	**37 e 38**	**39 e 40**	**41 e 42**	**43**	**45 e 46**	**47 e 48**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,07	0,02	0,01	0,00	0,04	0,04	0,06	0,02	0,11	0,01	0,03	0,03
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,08	0,02	0,00	0,02	0,06	0,06	0,08	0,03	0,13	0,01	0,04	0,05
150	0,19	0,01	0,04	0,12	0,10	0,13	0,13	0,02	0,18	0,04	0,05	0,06
200	0,30	0,02	0,04	0,27	0,14	0,20	0,17	0,04	0,19	0,08	0,07	0,11
250	0,32	0,01	0,04	0,30	0,17	0,20	0,20	0,06	0,18	0,11	0,09	0,12
300	0,33	0,01	0,04	0,33	0,20	0,22	0,24	0,10	0,18	0,16	0,10	0,14
350	0,35	0,01	0,04	0,37	0,23	0,24	0,27	0,14	0,17	0,16	0,10	0,17
400	0,39	0,03	0,04	0,42	0,28	0,24	0,31	0,20	0,17	0,22	0,11	0,22
450	0,42	0,03	0,05	0,46	0,31	0,25	0,32	0,29	0,17	0,23	0,10	0,24
500	0,49	0,06	0,04	0,48	0,34	0,27	0,31	0,32	0,17	0,22	0,12	0,24
550	0,58	0,25	0,05	0,48	0,36	0,29	0,32	0,30	0,17	0,20	0,16	0,25
600	0,66	0,36	0,24	0,60	0,37	0,31	0,35	0,35	0,25	0,28	0,31	0,31
650	1,17	1,07	0,74	0,84	0,62	0,38	0,62	0,51	0,51	0,68	0,45	0,34
700	2,58	1,90	1,61	1,34	0,78	0,77	1,35	0,77	1,01	1,78	0,72	0,85
707,6	Ruptura.											

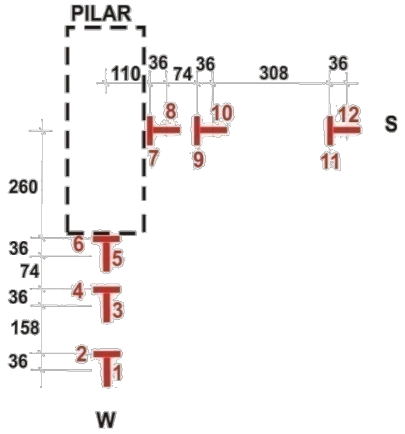
LAJE L6												
Carga (kN)	**Armadura de flexão**									**Arm. de cisalhamento**		
	Barra 1			**Barra 2**			**Barra 3**			**Linha 1**		
	1 e 2	**3 e 4**	**5 e 6**	**7 e 8**	**9 e 10**	**11 e 12**	**13 e 14**	**16**	**17 e 18**	**19 e 20**	**21 e 22**	**23 e 24**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,23	0,11	0,02	-0,01	-0,01	0,02	0,11	0,14	0,19	0,03	0,07	0,02
150	0,42	0,15	-0,01	0,41	0,30	0,16	0,57	0,25	0,18	0,03	0,07	0,03
200	0,56	0,25	0,01	0,56	0,41	0,20	0,78	0,40	0,29	0,03	0,13	0,06
250	0,62	0,36	0,00	0,72	0,52	0,50	1,17	0,94	0,38	0,03	0,14	0,15
300	0,88	0,50	0,04	0,89	0,66	0,63	1,23	1,19	0,59	0,06	0,18	0,19
350	1,02	0,61	0,02	1,00	0,72	0,75	1,38	1,22	0,71	0,11	0,19	0,18
400	1,19	0,72	0,03	1,09	0,80	0,91	1,41	1,27	0,84	0,16	0,26	0,26
450	1,44	0,87	0,08	1,21	0,91	1,20	1,58	1,39	1,04	0,31	0,27	0,27
500	2,68	0,96	0,07	1,30	0,97	1,33	1,78	1,56	1,12	0,36	0,28	0,27
550	9,21	1,00	0,10	1,37	1,08	1,58		1,77	1,25	0,49	0,50	0,33
583	Ruptura.											

LAJE L6												
Carga (kN)	Armadura de cisalhamento											
	Linha 2			Linha 3			Linha 4			Linha 5		
	25 e 26	27 e 28	29 e 30	31 e 32	33 e 34	35 e 36	37 e 38	39 e 40	41 e 42	43	45 e 46	47 e 48
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	0,05	0,02	0,03	0,16	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
150	0,11	0,02	0,10	0,40	0,05	0,05	0,19	0,08	0,03	0,33	0,01	0,01
200	0,13	0,04	0,13	0,45	0,08	0,11	0,34	0,23	0,15	0,56	0,01	0,01
250	0,19	0,14	0,22	0,52	0,12	0,19	0,43	0,25	0,18	0,76	0,05	0,01
300	0,20	0,18	0,22	0,52	0,12	0,19	0,55	0,31	0,27	1,04	0,05	0,01
350	0,22	0,27	0,23	0,58	0,12	0,20	0,79	0,46	0,46	1,45	0,07	0,04
400	0,23	0,27	0,30	0,64	0,14	0,24	0,95	0,48	0,51	1,73	0,07	0,09
450	0,26	0,30	0,32	1,26	0,28	0,33	1,06	0,48	0,54	1,90	0,08	0,14
500	0,27	0,38	0,32	1,70	0,49	0,34	1,33	0,55	0,66	2,01	0,15	0,24
550	0,69	0,50	0,35	2,33	0,87	0,56	1,48	0,58	0,66	2,60	0,25	0,29
583	Ruptura.											

APENDICE C - RESULTADOS DOS EXTENSÔMETROS DO CONCRETO



Lajes L1,L2,L3 E L4



Lajes L5 e L6

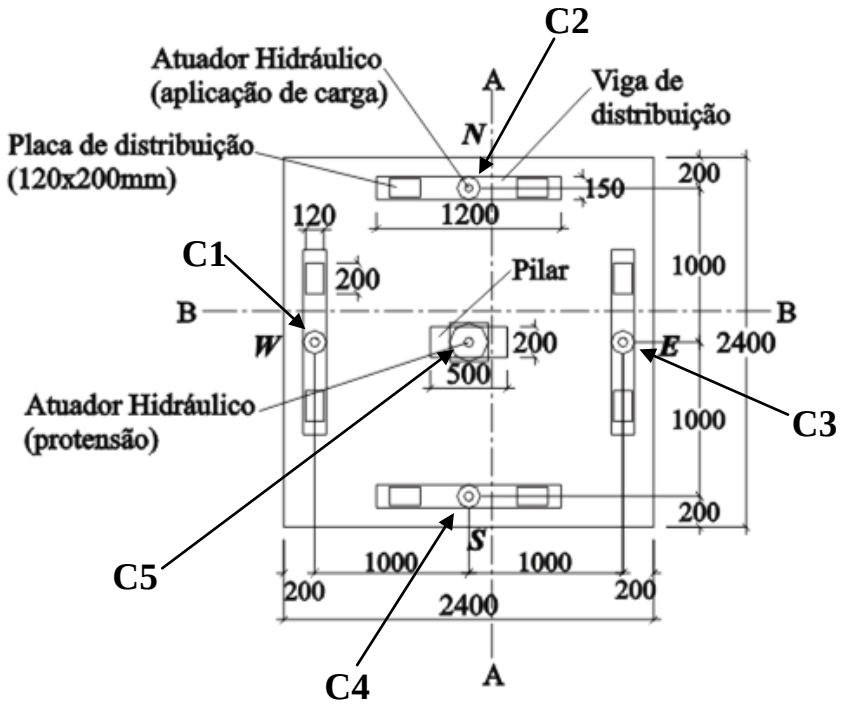
Laje L1						Laje L2				
Carga (kN)	Extensômetros					Carga (kN)	Extensômetros			
	1	2	3	4			1	2	3	4
10	0,00	0,00	-	-		10	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	-	-		25	0,01	-0,16	-0,20	-0,15
50	0,01	0,02	-	-		50	0,02	-0,13	-0,19	-0,08
75	0,02	0,04	-	-		75	0,03	-0,14	-0,23	0,00
100	0,03	0,06	-	-		100	0,05	-0,07	-0,21	0,17
150	0,05	0,15	-	-		150	0,06	0,09	-0,19	0,47
200	0,07	0,23	-	-		200	0,09	0,22	-0,19	0,71
250	0,09	0,31	-	-		250	0,13	0,41	-0,15	0,98
300	0,10	0,43	-	-		300	0,15	0,66	-0,11	1,24
350	0,12	0,58	-	-		350	0,19	0,85	-0,23	1,44
400	0,13	0,62	-	-		400	0,19	1,10	-0,38	1,64
450	0,11	0,65	-	-		450	0,18	1,34	-0,60	1,83
500	0,06	0,66	-	-		500	-0,19	1,60	-0,96	1,97
550	0,07	0,72	-	-		510,8	Ruptura.			
591,7	Ruptura.									

Laje L3						Laje L4				
Carga (kN)	**Extensômetros**					**Carga (kN)**	**Extensômetros**			
	1	**2**	**3**	**4**			**1**	**2**	**3**	**4**
10	0,00	0,00	0,00	0,00		10	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,04	0,06	0,00		25	0,01	-0,09	-0,06	-0,29
50	0,00	0,06	0,13	0,00		50	0,01	-0,06	-0,01	-0,30
75	0,00	0,10	0,22	0,00		75	0,01	-0,01	0,08	-0,43
100	0,00	0,23	0,47	0,01		100	0,02	0,08	0,18	-0,38
150	0,00	0,25	0,66	0,01		150	0,02	0,27	0,39	-0,22
200	0,00	0,34	0,90	0,01		200	0,02	0,44	0,54	-0,07
250	0,00	0,41	1,13	0,01		250	0,03	0,63	0,64	0,11
300	0,00	0,48	1,37	0,01		300	0,02	0,84	0,73	0,34
350	0,00	0,52	1,73	0,02		350	0,02	1,08	0,79	0,61
400	0,01	0,58	2,21	0,01		400	0,02	1,35	0,82	0,68
450	0,01	0,56	2,42	0,02		450	0,02	1,64	0,71	0,12
500	0,01	0,57	2,62	0,05		500	0,03	1,94	0,67	-0,70
550	0,01	0,66	2,95	0,07		550	0,16	2,70	0,36	-3,14
600	0,01	0,67	3,56	0,07		595,5	Ruptura.			
636,1	Ruptura.									

Laje L5												
Carga (kN)	**Extensômetros**											
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	-0,02	0,01	0,00	0,00	0,01
50	0,03	0,02	0,00	0,04	0,04	0,07	0,03	-0,03	0,03	0,01	0,00	0,03
75	0,07	0,06	0,00	0,10	0,07	0,15	0,06	-0,02	0,04	0,02	0,00	0,06
100	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01	0,05	0,00	-0,03	0,00	0,01	-0,01	-0,73
150	0,04	0,03	0,00	0,08	0,05	0,12	0,04	-0,05	0,03	0,02	-0,01	-0,64
200	0,08	0,06	0,00	0,14	0,07	0,20	0,06	-0,05	0,06	0,04	0,00	-0,68
250	0,14	0,13	0,00	0,30	0,16	0,37	0,14	-0,02	0,09	0,06	0,00	-0,59
300	0,22	0,25	0,00	0,44	0,26	0,51	0,21	-0,01	0,12	0,09	0,00	-0,40
350	0,26	0,30	0,00	0,53	0,32	0,65	0,27	-0,04	0,13	0,12	-0,01	-0,29
400	0,32	0,37	0,00	0,63	0,39	0,77	0,34	-0,02	0,15	0,15	-0,02	-0,26
450	0,38	0,42	0,00	0,72	0,47	0,89	0,39	-0,04	0,16	0,18	-0,03	-0,20
500	0,45	0,49	0,00	0,83	0,58	1,04	0,47	-0,04	0,16	0,22	-0,04	-0,14
550	0,53	0,52	0,00	0,91	0,69	1,15	0,49	0,01	0,16	0,28	-0,07	-0,04
600	0,59	0,53	0,00	0,99	0,78	1,22	0,42	-0,01	0,17	0,33	-0,09	-0,04
650	0,68	0,55	0,00	1,03	0,96	1,41	0,11	-0,03	0,19	0,40	-0,13	-0,48
700	0,80	0,51	0,00	0,97	1,15	1,43	-0,84	-0,12	0,16	0,48	-0,17	-0,30
707,6	Ruptura.											

Laje L6												
Carga (kN)	**Extensômetros**											
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	0,00	0,05	0,01	-0,01	0,03	-0,06	-0,02	-0,03	-0,11	-0,05	-0,03	-0,01
100	0,00	0,13	0,02	-0,04	0,03	-0,13	-0,04	-0,06	-0,25	-0,14	-0,05	-0,02
150	0,00	0,29	0,04	-0,02	0,04	-0,37	-0,09	-0,18	-0,55	-0,36	-0,20	-0,13
200	0,00	0,42	0,06	0,00	0,06	-0,56	-0,13	-0,27	-0,75	-0,48	-0,31	-0,19
250	0,00	0,56	0,06	-0,01	0,04	-0,48	-0,19	-0,37	-0,96	-0,60	-0,43	-0,25
300	0,00	0,71	0,06	0,01	0,04	-0,39	-0,26	-0,47	-1,14	-0,67	-0,55	-0,29
350	0,00	0,89	0,03	0,00	0,04	-0,24	-0,40	-0,59	-1,34	-0,73	-0,68	-0,33
400	0,00	1,06	-0,01	0,00	0,03	-0,20	-0,50	-0,71	-1,50	-0,76	-0,78	-0,35
450	-0,01	1,29	-0,08	0,00	0,04	-0,30	-0,74	-0,84	-1,68	-0,77	-0,89	-0,37
500	-0,02	1,54	-0,19	-0,09	-0,06	-0,10	-0,98	-1,03	-1,80	-0,74	-1,04	-0,36
550	-0,04	1,83	-0,33	-0,32	-0,27	0,66	-0,71	-1,36	-1,69	-0,57	-1,30	-0,27
583	Ruptura.											

APENDICE D - LEITURAS DAS CÉLULAS DE CARGAS



Laje L1							Laje L2						
Carga	Células de carga (t)				Total	C5	Carga	Células de carga (t)				Total	C5
(kN)	C1	C2	C3	C4	(kN)	(kN)	(kN)	C1	C2	C3	C4	(kN)	(kN)
10	0,230	0,250	0,220	0,225	9,3	52,730	10	0,280	0,260	0,240	0,200	9,8	49,390
25	0,650	0,625	0,655	0,620	25,5	52,700	25	0,635	0,655	0,640	0,635	25,7	49,260
50	1,825	1,255	1,260	1,235	55,8	52,640	50	1,265	1,260	1,265	1,245	50,4	49,190
75	1,925	1,925	1,865	1,880	76,0	52,580	75	1,875	1,875	1,875	1,875	75,0	49,120
100	2,530	2,550	2,540	2,575	102,0	52,510	100	2,610	2,625	2,610	2,500	103,5	49,040
150	3,785	3,785	3,770	3,800	151,4	52,380	150	3,760	3,920	3,760	3,770	152,1	48,890
200	5,060	5,005	5,010	5,005	200,8	52,240	200	4,980	5,000	5,035	5,000	200,2	48,750
250	6,355	6,250	6,305	6,285	252,0	52,100	250	6,250	6,255	6,250	6,260	250,2	48,610
300	7,350	7,535	7,535	7,520	299,4	51,960	300	7,545	7,565	7,500	7,540	301,5	48,340
350	8,900	8,770	8,785	8,765	352,2	51,760	350	8,750	8,990	8,765	8,755	352,6	48,160
400	10,065	10,030	10,110	10,025	402,3	51,560	400	10,005	10,010	10,045	10,000	400,6	48,000
450	11,505	11,505	11,515	11,352	458,8	51,430	450	11,250	11,250	11,260	11,270	450,3	47,820
500	12,550	12,475	12,405	12,600	500,3	51,260	500	12,550	12,600	12,565	12,520	502,4	47,650
550	13,810	13,715	13,765	13,780	550,7	51,080	P.Rup.	12,754	12,789	12,764	12,774	510,8	48,500
P.Rup..	14,729	14,379	15,139	14,919	591,7	-							

C1, C2, C3 e C4 - Células de carga do carregamento aplicado, em toneladas;
C5 - célula de carga da protensão do pilar central da laje.

Laje L3	Laje L4

Carga (kN)	Células de carga (t) C1	C2	C3	C4	Total (kN)	C5 (kN)	Carga (kN)	Células de carga (t) C1	C2	C3	C4	Total (kN)	C5 (kN)
10	0,235	0,280	0,245	0,275	10,4	50,060	10	0,295	0,240	0,280	0,315	11,3	43,010
25	0,635	0,690	0,640	0,665	26,3	50,010	25	0,680	0,740	0,670	0,670	27,6	42,960
50	1,245	1,265	1,260	1,265	50,4	49,950	50	0,255	1,250	1,260	1,255	40,2	42,020
75	1,860	1,870	1,895	1,870	75,0	49,860	75	1,900	1,860	1,920	1,845	75,3	42,740
100	2,585	2,515	2,520	2,505	101,3	49,780	100	2,505	2,510	2,515	2,500	100,3	42,680
150	3,680	3,830	3,650	4,025	151,9	49,620	150	3,750	3,750	3,760	3,750	150,1	42,550
200	5,125	4,950	5,050	4,985	201,1	49,470	200	5,115	5,045	5,035	5,020	202,2	42,400
250	6,225	6,270	6,250	6,250	250,0	49,230	250	6,300	6,245	6,280	6,270	251,0	42,250
300	7,505	7,565	7,500	7,515	300,9	49,070	300	7,590	7,560	7,535	7,550	302,4	42,100
350	8,725	8,820	8,700	8,770	350,2	48,870	350	8,760	8,790	8,800	8,760	351,1	41,920
400	10,090	10,000	10,125	10,020	402,4	48,690	400	10,025	10,015	10,020	10,065	401,3	41,780
450	11,270	11,250	11,250	11,280	450,5	48,530	450	11,250	11,300	11,200	11,260	450,1	41,620
500	12,730	12,920	12,550	12,595	508,0	48,300	500	12,585	12,540	12,650	12,595	503,7	41,380
550	13,765	13,750	13,700	13,800	550,2	48,170	550	13,900	13,775	13,850	13,910	554,4	41,150
600	15,390	15,280	15,100	15,105	608,8	47,940	P.Rup..	15,049	15,184	14,404	14,914	595,5	
P.Rup.	15,829	16,104	15,824	15,849	636,1	47,810							

C1, C2, C3 e C4 - Células de carga do carregamento aplicado, em toneladas;
C5 - célula de carga da protensão do pilar central da laje.

Laje L5							Laje L6						
Carga (kN)	Células de carga (t) C1	C2	C3	C4	Total (kN)	C5 (kN)	Carga (kN)	Células de carga (t) C1	C2	C3	C4	Total (kN)	C5 (kN)
10	0,250	0,250	0,250	0,250	10,0	54,220	10	0,270	0,200	0,185	0,265	9,2	52,680
25	0,655	0,660	0,650	0,670	26,4	54,170	25	0,695	0,650	0,680	0,640	26,7	52,630
50	1,305	1,275	1,330	1,275	51,9	54,100	50	1,290	1,270	1,250	1,260	50,7	52,560
75	1,840	1,950	1,840	1,945	75,8	54,030	75	1,885	1,865	1,880	1,870	75,0	52,460
10	0,270	0,265	0,265	0,245	10,5	54,090	100	2,515	2,500	2,480	2,515	100,1	52,390
50	1,300	1,255	1,265	1,275	51,0	54,010	150	3,790	3,800	3,800	3,770	151,6	52,210
100	2,475	2,495	2,445	2,560	99,8	53,940	200	5,015	5,020	5,005	5,010	200,5	52,050
150	3,775	3,730	3,785	3,740	150,3	53,770	250	6,260	6,285	6,275	6,270	250,9	51,820
200	5,000	5,025	5,030	5,015	200,7	53,620	300	7,560	7,540	7,555	7,500	301,6	51,620
250	6,210	6,230	6,220	6,250	249,1	53,450	350	8,760	8,800	8,750	8,750	350,6	51,440
300	7,520	7,465	7,490	7,490	299,7	53,270	400	10,050	10,100	10,025	10,040	402,2	51,250
350	8,820	8,665	8,760	8,745	349,9	53,100	450	11,280	11,255	11,250	11,260	450,5	51,090
400	10,015	9,995	9,930	10,045	399,9	52,880	500	12,500	12,580	12,500	12,250	498,3	50,870
450	11,255	11,225	11,250	11,215	449,5	52,640	550	13,810	13,750	13,750	13,750	550,6	50,690
500	12,525	12,420	12,505	12,440	498,9	52,440	P.Rup.	14,474	14,619	14,639	14,569	583,0	
550	13,790	13,725	13,670	13,845	550,3	52,230							
600	15,140	14,900	15,125	14,855	600,2	52,030							
650	17,050	15,980	16,255	16,090	653,8	51,830							
700	17,994	17,439	17,539	17,789	707,6	51,640							

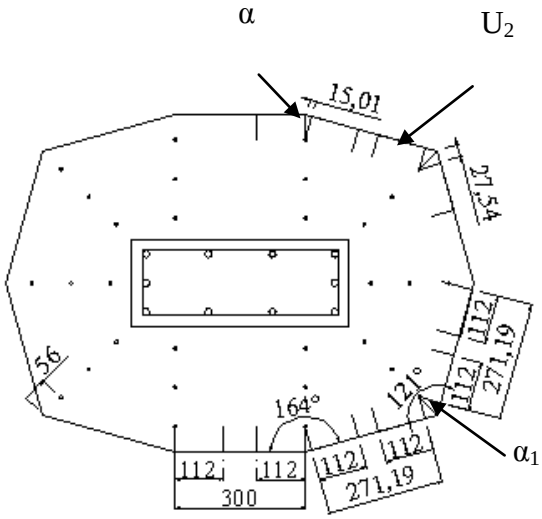
C1, C2, C3 e C4 - Células de carga do carregamento aplicado, em toneladas;
C5 - célula de carga da protensão do pilar central da laje.

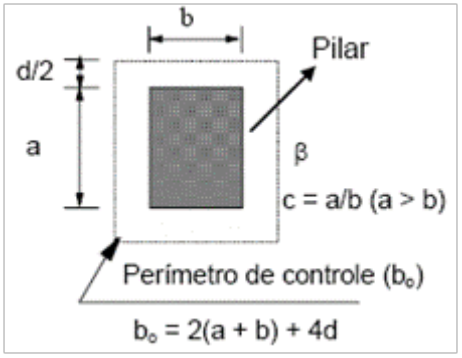
APENDICE D - CÁLCULOS DAS CARGAS DE RUPTURA ESTIMADAS

Para exemplificação dos cálculos realizados na determinação das cargas de ruptura previstas segundo cada norma adotam-se os dados da laje L1 desta pesquisa. Os coeficientes de segurança usados foram iguais a 1,0.

Laje	f_c (MPa)	d (mm)	ρ (%)	Ø (mm)	Nº de linhas	Nº de camadas	f_{yw} (MPa)	Âng. Entre linhas	S_0 (mm)	S_r (mm)
L1	35,9	112	1,23	6.3	10	3	680	45º	50	90

ACI 318/2005





Como a distância entre as últimas linhas de armadura de cisalhamento são maiores que 2d, deve ser descontado para u_2 o perímetro excedente;

(1) Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar;

$$b_0 = 2(a+b) + 4d = 2(500+200) + 4(112) = 1848\text{mm}$$

$$V_{(1)} = \frac{1}{2}\sqrt{f_c'}\,b_0 d = \left(\frac{1}{2}\sqrt{35{,}9}(1848)(112)\right)/1000 = 620\text{kN}$$

(2) Carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento;

$$V_{(2)} = \frac{1}{6}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d + \frac{A_s f_y d}{s_r} \leq 0{,}5\sqrt{f_c^{'}}b_0 d = \left(0{,}5\sqrt{35{,}9}(1848)(112)\right)/1000 = 620\text{kN}$$

$$V_{(2)} = \frac{1}{6}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d + \frac{A_s f_y d}{s_r} = \left(\frac{1}{6}\sqrt{35{,}9}(1848)(112) + \frac{(10)(31{,}17)(680)(112)}{90}\right)/1000 = 470\text{kN}$$

(3) Carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento;

$$u_2 = (4\cos(\alpha)d/2) + (\cos(\alpha_1)(\text{n}^\text{o}\,\text{linhas} - 4)d) + \text{n}^\text{o}\,\text{linhas}(d)$$

$$u_2 = (4\cos(74^\text{o}))112 + (\cos(60{,}25^\text{o})(10-4))112 + 10(2)(112) = 2969{,}49\text{mm}$$

$$V_{(3)} = \frac{1}{3}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d = \left(\frac{1}{3}\sqrt{35{,}9}(2969{,}49)(112)\right)/1000 = 664\text{kN}$$

(4) Carga para laje sem armadura de cisalhamento; menor valor entre:

$$V_{(4)} = \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right)\frac{1}{6}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d\,;\; V_{(4)} = \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2\right)\frac{1}{12}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d\,;\;\; V_{(4)} = \frac{1}{3}\sqrt{f_c^{'}} \cdot b_0 \cdot d$$

$$V_{(4)} \leq \begin{cases} \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right)\frac{1}{6}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d = \left(\left(1 + \frac{2}{2{,}5}\right)\frac{1}{6}\sqrt{35{,}9}(1848)(112)\right)/1000 = 372\text{kN} \\ \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2\right)\frac{1}{12}\sqrt{f_c^{'}}b_0 d = \left(\left(\frac{40(112)}{1848} + 2\right)\frac{1}{12}\sqrt{35{,}9}(1848)(112)\right)/1000 = 470\text{kN} \\ \frac{1}{3}\sqrt{f_c^{'}} \cdot b_0 \cdot d = \left(\frac{1}{3}\sqrt{35{,}9}(1848)(112)\right)/1000 = 573\text{kN} \end{cases}$$

<u>CEB-FIP MC/1990</u>

(1) Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar;

$$u_0 = 2(a+b) = 2(500+200) = 1400\text{mm}$$

$$V_1 = u_0 d(0{,}5 f_{cd2}) = \left(1400(112)\left\{0{,}5(0{,}6)\left[1 - \left(\frac{35{,}9}{250}\right)\right]35{,}9\right\}\right)/1000 = 1446\text{kN}$$

(2) Carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento;

$$u_1 = 2(a+b) + 4\pi d = 4095mm$$

$$V_2 \leq 0{,}75V_4 + 1{,}5\left(\frac{d}{s_r}\right)A_{sw}f_{ywd}sen\alpha(u_1)(d)$$

$$V_2 = 0{,}75(467)\left(+1{,}5\left(\frac{112}{90}\right)311{,}70(680)sen\alpha\right)/1000$$

$$V_2 = 630kN$$

(3) Carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento;

$$V_3 \leq \frac{0{,}18}{\gamma_c}\xi(100\rho f_{ck})^{1/3}u_2 d = \left(0{,}12\left(1+\sqrt{\frac{200}{112}}\right)(100(0{,}0123)(35{,}9))^{1/3}4095(112)\right)/1000$$

$$V_3 = 682kN$$

(4) Carga para laje sem armadura de cisalhamento;

$$V_4 = \frac{0{,}18}{\gamma_c}\xi(100\rho f_{ck})^{1/3}u_1 d = \left(0{,}18\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)(100(0{,}0123)(35{,}9))^{1/3}2807(112)\right)/1000$$

$$V_3 = 467kN$$

<u>EUROCODE 2/2004</u>

(1) Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar;

$$V_1 = 0{,}3\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)f_{cd}ud = \left(0{,}3\left(1-\frac{35{,}9}{250}\right)35{,}9(1400)(112)\right)/1000 = 1446kN$$

(2) Carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar;

$$V_2 = 0{,}75V_4 + 1{,}5\frac{d}{s_r}A_{sw}f_{ywd,ef}\left(\frac{1}{u_1 d}\right)sen\alpha$$

$$V_2 = 0{,}75(467) + \left(1{,}5\frac{112}{90}(311{,}70)(680)\left(\frac{1}{2807{,}43(112)}\right)sen\alpha\right)/1000 = 630kN$$

(3) Carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento;

$$V_3 = V_4 u_2 d = 430((3744)(112))/1000 = 623kN$$

(4) Carga para laje sem armadura de cisalhamento;

$$V_4 = 0{,}18\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)(100\rho_1 f_{ck})^{1/3} u_1 d$$

$$V_4 = \left(0{,}18\left(1+\sqrt{\frac{200}{112}}\right)(100(0{,}0123)(35{,}9))^{1/3}(2807{,}43)(112)\right)/1000 = 467kN$$

<u>NBR 6118:2003</u>

(1) carga para laje com armadura de cisalhamento, superfície de ruptura adjacente ao pilar;

$$V_1 = 0{,}27\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right)\frac{f_{ck}}{\gamma_c} u_0 d = \left(0{,}27\left(1-\frac{35{,}9}{250}\right)35{,}9(1400)(112)\right)/1000 = 1302kN$$

(2) carga de ruptura para a superfície cruzando a região com armadura de cisalhamento;

$$V_2 = 0{,}14\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)(100\rho_1 f_{ck})^{1/3} + 1{,}5\frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd} \text{sen}\alpha \frac{1}{ud}$$

$$V_2 = \left(0{,}14\left(1+\sqrt{\frac{200}{112}}\right)(100(0{,}0123)(35{,}9))^{1/3} + 1{,}5\frac{112}{90}(311{,}70)(680)\text{sen}\alpha\frac{1}{(2807{,}43)(112)}\right)/1000$$

$$V_2 = 643N$$

(3) carga de ruptura para a superfície externa à região com armadura de cisalhamento;

$$V_3 = 0{,}18\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)(100\rho f_{ck})^{1/3} = \left(0{,}18\left(1+\sqrt{\frac{200}{112}}\right)(100(0{,}0123)(35{,}9))^{1/3}\right)/1000$$

$$V_3 = 682kN$$

(4) carga para laje sem armadura de cisalhamento;

$$V_4 = \frac{0{,}18}{\gamma_c}\left(1+\sqrt{\frac{200}{d}}\right)\left(100\rho_1 f_{ck}\right)^{1/3} u_1 d$$

$$V_4 = \left(\frac{0{,}18}{1{,}0}\left(1+\sqrt{\frac{200}{112}}\right)\left(100(0{,}0123)(35{,}9)\right)^{1/3}(2807{,}43)(112)\right)/1000 = 467\text{kN}$$

REGISTRO FOTOGRÁFICO

Montagem de armaduras

Montagem de armaduras e concretagem

Ensaios e estágio das lajes pós-ruptura