

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA A PUNÇÃO  
EM LAJES LISAS COM ARMADURA DE CISALHAMENTO  
PARCIALMENTE ANCORADA**

**HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA**

**TESE DE DOUTORADO  
EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA A  
PUNÇÃO EM LAJES LISAS COM ARMADURA DE  
CISALHAMENTO PARCIALMENTE ANCORADA**

**HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA**

**ORIENTADOR: GUILHERME SALES S. A. MELO (UnB)  
TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.TD - 001 A/21  
BRASÍLIA/DF: JANEIRO – 2021**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA A  
PUNÇÃO EM LAJES LISAS COM ARMADURA DE  
CISALHAMENTO PARCIALMENTE ANCORADA**

**HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA**

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

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, PhD (ENC/UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Marcos Honorato de Oliveira, D.Sc (ENC/UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof., Maurício de Pina Ferreira, D.Sc (UFPA)  
(Examinador Externo)**

---

**Prof., Valter José da Guia Lúcio, D.Sc (UNL)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 29 DE JANEIRO DE 2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, HENRIQUE JORGE NERY

Análise experimental da resistência a punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento parcialmente ancorada [Distrito Federal] 2021.

xxiii, 194p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2021).  
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Punção

2.Lajes lisas

3.Ancoragem

4.Armadura de cisalhamento

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Doutor)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, H. J. N. de (2021). Análise experimental da resistência a punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento parcialmente ancorada. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD - 001 A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 194p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Henrique Jorge Nery de Lima

TÍTULO: Análise experimental da resistência a punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento parcialmente ancorada

GRAU: Doutorado

ANO: 2021

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



---

Henrique Jorge Nery de Lima

e-mail: hjnery@gmail.com

+55 61 982712415

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho à minha família e aos amigos que estão sempre ao meu lado.*

*Uns queriam um emprego melhor; outros, só um emprego.  
Uns queriam uma refeição mais farta; outros, só uma refeição.  
Uns queriam uma vida mais amena; outros, apenas viver.  
Uns queriam pais mais esclarecidos; outros, ter pais.  
Uns queriam ter olhos claros; outros, enxergar.  
Uns queriam ter voz bonita; outros, falar.  
Uns queriam silêncio; outros, ouvir.  
Uns queriam sapato novo; outros, ter pés.  
Uns queriam um carro; outros, andar.  
Uns queriam o supérfluo; outros, apenas o necessário.*

**Chico Xavier**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Guilherme Sales S. A. Melo pela orientação, acompanhamento e por toda confiança em mim depositada. O senhor mais que um orientador se tornou uma referência de homem digno e justo para mim, para sempre trarei comigo seus ensinamentos.

Agradeço ao professor Marcos Honorato, chefe do laboratório de estruturas, que nos auxiliou na execução dos modelos, na instrumentação e nos ensaios das lajes. Seus conhecimentos e experiência foram muito importantes. Também agradeço aos técnicos do laboratório de estruturas, materiais e funcionários da UnB que contribuíram para a conclusão desse trabalho.

Aos nobres e corajosos amigos feitos ao longo do doutorado que tanto me ajudaram na execução dos ensaios, Rodolfo Palhares, Manoel Mangabeira, Patrícia Cândida, Nataniel Wooton, Victor Dalosto, Júlia, João Paulo, Djalma, Iana, Sobral, Renata, Idalmo, pessoal do Getec (família Getec) e demais amigos/colegas do PECC. Agradeço aos amigos que, mesmo não estando presentes nessa fase de laboratório, foram muito importantes nessa jornada acadêmica, sem citar nomes pois seria injusto deixar de citar algum aqui.

Agradeço ao UDF – Centro Universitário do Distrito Federal, instituição que me acolheu como professor ao longo desse doutorado. Agradeço à Concrecon por ter nos cedido concreto para execução dos modelos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço imensamente à minha mãe Caubyra, ao meu irmão Anchiêta e ao pai que a vida me deu Flamberto, sem vocês eu não teria conseguido. Todo apoio, incentivo, palavras de conforto, educação, carinho e amor que vocês me deram foi que me motivou cada vez mais na realização desse sonho. Vocês são essenciais em cada etapa de minha vida. Meu profundo agradecimento ao meu pai Henrique Jorge Saraiva de Lima (*in memoriam*), meu avô José Anchiêta Nery (*in memoriam*) e ao meu padrinho Antônio Wagner Nery (*in memoriam*), que com seus bons exemplos deixados aqui me serviram de norte, sei que vocês mesmo aí de cima continuam olhando por mim e me guiando.

Deus, anjos de luz, muito obrigado por guiarem meus passos e me manterem firme até aqui e aqui é só o começo.

## RESUMO

### ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA A PUNÇÃO EM LAJES LISAS COM ARMADURA DE CISALHAMENTO PARCIALMENTE ANCORADA

Autor: Henrique Jorge Nery de Lima

Supervisor: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, janeiro de 2021

O comportamento da ligação laje-pilar localizada internamente à edificação, sendo o sistema adotado como de lajes lisas de concreto armado, é avaliado nessa pesquisa. Com foco principal na análise da influência da ancoragem da armadura de punção na armadura de flexão, busca-se se a variação dessa ancoragem é plausível visto que do ponto de vista construtivo ela é de mais fácil execução. É fato que as principais normativas versam que a ancoragem dessas armaduras deve ser completa, envolvendo as barras de flexão e, ainda, há normas que dizem que esse envolvimento deve se dar pelos cantos, no caso de estribos.

Nesta pesquisa, foram ensaiados à punção 20 modelos locais de ligação laje-pilar submetidos a carregamento simétrico. O primeiro modelo é um modelo de referência, sem armadura de punção. Os outros 19 modelos foram executados com reforço de punção, variando-se a taxa do reforço, quantidade de camadas, forma de ancoragem na armadura de flexão, e resistência à compressão do concreto. Todas as peças foram produzidas e ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília - LABEST, respeitando-se as limitações impostas pelo sistema de ensaio adotado (laje de reação e pórtico de ensaios).

Os pontos analisados nos resultados experimentais foram: o comportamento das lajes quanto aos deslocamentos verticais; deformação específica no concreto, no aço e na armadura de cisalhamento; carga última; fissuração; superfície e modo de ruptura. Os dados experimentais foram comparados com os métodos teóricos estabelecidos nas seguintes normas de projeto: o ACI 318 (2019), o Eurocode 2 (2004), ABNT NBR 6118 (2014) e o *fib* Model Code 2010 (2013). De posse dos resultados observa-se que as lajes com ancoragem tida como *parcial*, em que as armaduras de punção envolvem apenas as armaduras de flexão comprimidas, tiveram maiores valores de carga última quando comparadas às outras da série.

Palavras-chave: punção, lajes lisas, estribos, ancoragem, armadura de cisalhamento

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PUNCHING RESISTENCE ON FLAT SLABS WITH SHEAR REINFORCEMENT PARTIALLY CONNECTED**

Author: Henrique Jorge Nery de Lima  
Supervisor: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo  
Post-graduation Program in Structures and Civil Construction  
Brasília, January 2021

The behavior of the slab-column connection located inside the building subjected to symmetrical loading, the system called flat slabs, is evaluated in this research. This study experimentally assessed the influence of the anchoring of the shear reinforcement in the flexural reinforcement, trying to validate a type of reinforcement that is easy to execute and efficient. The codes state that the anchoring of these reinforcements must be complete, involving the flexure bars, and some codes describe that this involvement must occur in the corners, in the case of stirrups.

In this research, 20 models subjected to symmetrical loading were tested. The first one is a reference model, without shear reinforcement. The other 19 models were executed with this reinforcement, varying the reinforcement rate, number of layers, form of anchoring in the flexural reinforcement, resistance to compression of the concrete. All specimens were produced and tested at the Structures Laboratory at the University of Brasília - LABEST, respecting the limitations imposed by the adopted test system (reaction slab and test frame).

The points analyzed in the experimental results were the vertical displacements; deformation in concrete and flexure and shear reinforcement; punching resistance; cracking; surface and rupture mode. The results were compared with the theoretical methods established in the following design codes: ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2004), ABNT NBR 6118 (2014), and fib Model Code 2010 (2013). Based on the results, it was found that the slabs with anchoring considered as partial, in which the shear reinforcement only involves the compression flexural reinforcement, had higher values of the ultimate load when compared to the others of the series (one with full anchorage, another with anchoring only in the tension reinforcement and one none anchorage).

Keywords: punching, flat slabs, stirrups, anchorage, shear reinforcement

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	24
1.2.	MOTIVAÇÃO .....	30
1.3.	OBJETIVOS .....	30
1.4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	31
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	31
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>33</b>
2.1.	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO ...	35
2.1.1.	Resistência à compressão do concreto.....	35
2.1.2.	Taxa de armadura de flexão tracionada.....	36
2.1.3.	Dimensão e geometria do pilar.....	36
2.1.4.	Altura útil da laje e a consideração do <i>size effect</i> .....	37
2.2.	LAJES LISAS ARMADAS À PUNÇÃO - COMPORTAMENTO.....	38
2.2.1.	Tipos de armadura de punção.....	38
2.2.2.	Distribuição das armaduras de punção .....	41
2.2.3.	Espaçamento e ancoragem das armaduras de punção .....	43
2.3.	MODO DE RUPTURA DA LIGAÇÃO LAJE-PILAR COM ARMADURA DE PUNÇÃO .....	45
2.4.	PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA O DIMENSIONAMENTO À PUNÇÃO.....	47
2.4.1.	ABNT NBR 6118 (2014) .....	48
2.4.2.	ACI 318 (2019).....	49
2.4.3.	Eurocode 2 (2004) .....	51
2.4.4.	<i>fib</i> Model Code 2010 (2013) .....	53
2.5.	MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES .....	56
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>58</b>
3.1.	CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS.....	59
3.2.	DETALHAMENTO DAS ARMADURAS.....	63
3.2.1.	Armadura de flexão .....	63
3.2.2.	Armadura de punção.....	65

3.2.3.	Armadura dos pilares .....	77
3.3.	INSTRUMENTAÇÃO .....	77
3.3.1.	Deslocamentos verticais .....	77
3.3.2.	Deformações na armadura de flexão .....	79
3.3.3.	Deformações na armadura de punção.....	81
3.3.4.	Deformações no concreto .....	84
3.4.	PROCESSO CONSTRUTIVO DOS MODELOS LOCAIS .....	85
3.4.1.	Fôrmas e armaduras .....	85
3.4.2.	Concretagem.....	87
3.5.	MATERIAIS.....	89
3.5.1.	Concreto .....	89
3.5.2.	Aço .....	91
3.6.	SISTEMA DE ENSAIO E PROCESSO DE CARREGAMENTO .....	91
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>96</b>
4.1.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....	96
4.1.1.	Concreto .....	96
4.1.2.	Aço .....	97
4.2.	COMPORTAMENTO DAS LAJES .....	98
4.2.1.	Deslocamentos verticais das lajes .....	100
4.2.2.	Deformações na superfície do concreto.....	110
4.2.3.	Deformações na armadura de flexão .....	119
4.2.4.	Deformações nas armaduras de punção.....	143
4.2.5.	Mapas de fissuração.....	153
4.2.6.	Superfície de ruptura .....	160
4.2.7.	Carga de ruptura das lajes.....	167
4.2.8.	Modo de ruptura .....	173
4.3.	ANÁLISE E RESULTADOS - MODELOS TEÓRICOS DE CÁLCULO ...	176
4.3.1.	RESULTADOS DOS MODELOS TEÓRICOS – CARGAS ÚLTIMAS DE MODOS DE RUPTURA .....	177
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>184</b>
5.1.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	184
5.2.	ANÁLISE DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS .....	185
5.3.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	186

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>187</b>
---	------------

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Espaçamentos limites, em função da altura útil $d$ , entre as camadas da armadura de punção.....	44
Tabela 3.1 - Descrição das lajes em estudo .....	61
Tabela 3.2 - Características principais das lajes. ....	62
Tabela 3.3 – Características da armadura de punção.....	66
Tabela 3.4 – Controle das condições climáticas durante a concretagem.....	87
Tabela 3.5 – Quantitativo para produção de 1 m <sup>3</sup> do concreto utilizado nas Série 1, 2, 3 e Série 4 .....	89
Tabela 3.6 – Quantitativo para produção de 1 m <sup>3</sup> do concreto utilizado na Série 5.....	89
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto .....	97
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do aço .....	98
Tabela 4.3 – Grupos para análise dos modelos locais .....	100
Tabela 4.4 – Nível de solicitação à Flexão das lajes no momento da ruptura.....	122
Tabela 4.5 – Camadas analisadas na armadura de punção .....	143
Tabela 4.6 – Deformações na armadura de punção, por camada .....	152
Tabela 4.7 – Inclinação da superfície de ruptura e seu modo de ocorrência.....	167
Tabela 4.8 – Carga última das lajes e sua relação com a laje maciça de referência.....	168
Tabela 4.9 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 1 .....	168
Tabela 4.10 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 2.....	169
Tabela 4.11 – Cargas últimas pertencentes à Série 3 .....	169
Tabela 4.12 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 4.....	169
Tabela 4.13 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 5.....	169
Tabela 4.14 – Comparação de cargas últimas médias por grupo .....	170
Tabela 4.15 – Deformações medidas nos extensômetros de flexão e do concreto.....	174
Tabela 4.16 – Classificação do modo de ruptura das lajes .....	175
Tabela 4.17 – Resumo Característico das lajes ensaiadas .....	176
Tabela 4.18 – Cargas e modos de ruptura previstos pela ABNT NBR 6118 (2014)....	177
Tabela 4.19 – Cargas e modos de ruptura previstos pelo ACI 318 (2019).....	178
Tabela 4.20 – Cargas e modos de ruptura previstos pelo Eurocode 2 (2004) .....	179
Tabela 4.21 – Cargas e modos de ruptura previstos pelo <i>fib</i> Model Code 2010 (2013) .....	180
Tabela 4.22 – Resultados normativos, lajes Grupo 1 .....	181
Tabela 4.23 – Resultados normativos, lajes Grupo 2 .....	182
Tabela 4.24 – Resultados normativos, lajes Grupo 3 .....	182
Tabela 4.25 – Resultados normativos, lajes Grupo 4 .....	182

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistemas estruturais, exemplos, em concreto armado (PALHARES, 2018) .....	24
Figura 1.2 – Seção de ruptura de uma ligação laje-pilar sem armadura de punção (adaptado de CEB-FIP/MC90, 1993) .....	26
Figura 1.3 – Acidentes estruturais devido a punção em lajes lisas (SUBRAMANIAN, 2014).....	26
Figura 1.4 – Acidente ocorrido no condomínio Grand Parc, na Enseada do Tauá, Vitória ( <a href="https://www.gazetaonline.com.br/noticias/cidades/2016/07/como-a-area-de-lazer-do-grand-parc-desabou-1013960061.html">https://www.gazetaonline.com.br/noticias/cidades/2016/07/como-a-area-de-lazer-do-grand-parc-desabou-1013960061.html</a> ) .....	27
Figura 1.5 – Ancoragem parcial adotada na armadura de punção tipo estribo fechado. 29	
Figura 1.6 – Armadura de punção devidamente ancorada na armadura de flexão tracionada e comprimida .....	29
Figura 2.1 – Seção de uma ligação laje-pilar no momento de ruptura por puncionamento (adaptado de CEB-FIP/MC90, 1993) .....	33
Figura 2.2 – Modos de engrossamento da ligação laje-pilar para aumento da resistência .....	34
Figura 2.3 – Padrão de fissuração em uma face tracionada de laje no momento da ruptura.....	35
Figura 2.4 – Inclinação das fissuras características da punção, adaptado de Eurocode 2 (2004) .....	35
Figura 2.5 – Armadura de punção do tipo <i>barra dobrada</i> .....	39
Figura 2.6 – Armadura de punção tipo <i>estribo fechado</i> .....	39
Figura 2.7 – Armadura de punção do tipo <i>estribo aberto</i> .....	39
Figura 2.8 – Armadura de punção do tipo <i>estribo inclinado</i> .....	40
Figura 2.9 – Armadura de punção do tipo <i>pente</i> .....	40
Figura 2.10 – Armadura de punção tipo <i>shearhoops</i> .....	40
Figura 2.11 – Armadura de punção tipo estribo industrializado proposto por Beutel e Hegger (2000).....	41
Figura 2.12 – Variações de armaduras de punção .....	41
Figura 2.13 – Detalhamento ineficiente de armaduras de punção.....	42
Figura 2.14 – Tipos de distribuição de armaduras de punção .....	43
Figura 2.15 – Estribo devidamente ancorado na armadura de flexão, conforme recomendação do ACI 318 (2019) .....	44
Figura 2.16 – Ruptura por esmagamento da biela comprimida.....	45
Figura 2.17 – Ruptura dentro da região da armadura de punção.....	46
Figura 2.18 – Ruptura fora da região com armadura de punção .....	46
Figura 2.19 – Ruptura por delaminação .....	46

Figura 2.20 – Perímetro de controle em pilares internos de acordo com ABNT NBR 6118 (2014) .....	48
Figura 2.21 – Definição do perímetro de controle, fora da região das armaduras de punção, de acordo com ABNT NBR 6118 (2014) .....	49
Figura 2.22 – Perímetro crítico tomado para lajes sem armadura de punção, de acordo com o ACI 318 (2019).....	50
Figura 2.23 – Espaçamento entre pernas verticais de estribos como armadura de punção, de acordo com ACI 318 (2019) .....	50
Figura 2.24 – Definição do perímetro de controle para lajes com armadura de punção, de acordo com ACI 318 (2019) .....	51
Figura 2.25 – Perímetro de controle ao redor de pilar, na ligação laje-pilar de acordo com o Eurocode 2 (2004) .....	52
Figura 2.26- Definição do perímetro de controle de acordo com Eurocode 2 (2004) para lajes com armadura de punção.....	53
Figura 2.27 – Perímetros de controle <i>fib</i> Model Code 2010 (2013).....	54
Figura 2.28 – Linhas de ruptura considerado, adaptado de GUANDALINI, BURDET e MUTTONI (2009) .....	57
Figura 3.1 - Situação da laje estudada .....	59
Figura 3.2 - Detalhamento das armaduras de flexão das lajes (medidas em mm) .....	63
Figura 3.3 – Corte transversal das lajes e detalhe da ancoragem (medidas em mm) .....	64
Figura 3.4 – Detalhe do posicionamento dos ganchos de ancoragem (medidas em mm) .....	64
Figura 3.5 – Detalhe da armadura das lajes.....	65
Figura 3.6 – Perspectiva do arranjo em cruz da armadura de cisalhamento, do tipo estribo, utilizada nesta pesquisa.....	65
Figura 3.7 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-01 .....	67
Figura 3.8 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-01.....	67
Figura 3.9 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje NA-01.....	68
Figura 3.10 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-02 e FA-03 .....	68
Figura 3.11 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-02 e CA-03 .....	68
Figura 3.12 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje TA-02 e TA-03 .....	69
Figura 3.13 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje NA-02 e NA-03 .....	69
Figura 3.14 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-04 .....	69
Figura 3.15 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-04.....	70
Figura 3.16 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje TA-04.....	70

Figura 3.17 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje NA-04.....	70
Figura 3.18 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-05 .....	71
Figura 3.19 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-05.....	71
Figura 3.20 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje TA-05 .....	71
Figura 3.21 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje NA-05.....	72
Figura 3.22 – Distribuição das armaduras de punção em cada série de concretagem....	72
Figura 3.23 – Representação da armadura de punção da laje FA-01 .....	73
Figura 3.24 – Representação da armadura de punção da laje CA-01 .....	73
Figura 3.25 – Representação da armadura de punção da laje NA-01.....	73
Figura 3.26 – Representação da armadura de punção da laje FA-02 e FA-03 .....	74
Figura 3.27 – Representação da armadura de punção da laje CA-02 e CA-03 .....	74
Figura 3.28 – Representação da armadura de punção da laje TA-02 e TA-03.....	74
Figura 3.29 – Representação da armadura de punção da laje NA-02 e NA-03.....	74
Figura 3.30 – Representação da armadura de punção da laje FA-04 .....	74
Figura 3.31 – Representação da armadura de punção da laje CA-04.....	75
Figura 3.32 – Representação da armadura de punção da laje TA-04.....	75
Figura 3.33 – Representação da armadura de punção da laje NA-04.....	75
Figura 3.34 – Representação da armadura de punção da laje FA-05 .....	75
Figura 3.35 – Representação da armadura de punção da laje CA-05.....	75
Figura 3.36 – Representação da armadura de punção da laje TA-05 .....	76
Figura 3.37 – Representação da armadura de punção da laje NA-05.....	76
Figura 3.38 – Detalhe da variação de ancoragem da armadura de punção .....	76
Figura 3.39 - Projeto de armação dos pilares (medidas em mm) .....	77
Figura 3.40 - Posicionamento dos LVDT's (medidas em mm) .....	78
Figura 3.41 - Posicionamento LVDT em placa metálica .....	78
Figura 3.42 – Extensômetro elétrico de resistência já posicionado em barra de aço .....	79
Figura 3.43 - Procedimento de colagem dos extensômetros .....	80
Figura 3.44 - Instrumentação das lajes à flexão .....	81
Figura 3.45 - Barras de flexão já instrumentadas e posicionadas na laje .....	81
Figura 3.46 - Instrumentação da armadura de cisalhamento .....	82
Figura 3.47 - Detalhe, em corte, da posição dos extensômetros nos estribos .....	83
Figura 3.48 – Laje já com toda a instrumentação das barras de flexão e dos estribos de punção posicionados, pronta para concretagem .....	83
Figura 3.49 – Posicionamento dos extensômetros na superfície do concreto (medidas em mm).....	84
Figura 3.50 - Posicionamento dos extensômetros no concreto, face inferior da laje .....	85

Figura 3.51 - Fôrmas metálicas das lajes e posicionamento das armaduras.....	86
Figura 3.52 – Lajes já concretadas .....	86
Figura 3.53 - Detalhe da concretagem das lajes .....	88
Figura 3.54 - Ensaio de corpos de prova cilíndricos para caracterização do concreto... 90	90
Figura 3.55 – Ensaio de caracterização do aço.....	91
Figura 3.56 – Esquema do sistema de ensaios utilizado (medidas em mm) .....	92
Figura 3.57 – Sistema de ensaio – vista superior .....	93
Figura 3.58 – Corte esquemático do projeto do sistema de ensaio.....	93
Figura 3.59 – Sistema de ensaio .....	94
Figura 4.1 – Resumos das lajes ensaiadas .....	98
Figura 4.2 – Deslocamentos verticais da laje RS .....	101
Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da laje FA-01 .....	101
Figura 4.4 – Deslocamentos verticais da laje CA-01 .....	101
Figura 4.5 – Deslocamentos verticais da laje NA-01 .....	102
Figura 4.6 – Deslocamentos verticais da laje FA-02.....	102
Figura 4.7 – Deslocamentos verticais da laje CA-02 .....	102
Figura 4.8 – Deslocamentos verticais da laje TA-02.....	103
Figura 4.9 – Deslocamentos verticais da laje NA-02 .....	103
Figura 4.10 – Deslocamentos verticais da laje FA-03.....	103
Figura 4.11 – Deslocamentos verticais da laje CA-03 .....	104
Figura 4.12 – Deslocamentos verticais da laje TA-03.....	104
Figura 4.13 – Deslocamentos verticais da laje NA-03 .....	104
Figura 4.14 – Deslocamentos verticais da laje FA-04.....	105
Figura 4.15 – Deslocamentos verticais da laje CA-04 .....	105
Figura 4.16 – Deslocamentos verticais da laje TA-04.....	105
Figura 4.17 – Deslocamentos verticais da laje NA-04 .....	106
Figura 4.18 – Deslocamentos verticais da laje FA-05.....	106
Figura 4.19 – Deslocamentos verticais da laje CA-05 .....	106
Figura 4.20 – Deslocamentos verticais da laje TA-05.....	107
Figura 4.21 – Deslocamentos verticais da laje NA-05 .....	107
Figura 4.22 – Deslocamentos verticais médios de todas as lajes .....	108
Figura 4.23 – Deslocamentos verticais médios por cada grupo analisado .....	109
Figura 4.24 – Deformações na superfície do concreto na laje RS.....	110
Figura 4.25 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-01 .....	110
Figura 4.26 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-01.....	111

Figura 4.27 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-01 .....	111
Figura 4.28 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-02 .....	111
Figura 4.29 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-02.....	112
Figura 4.30 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-02.....	112
Figura 4.31 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-02 .....	112
Figura 4.32 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-03 .....	113
Figura 4.33 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-03.....	113
Figura 4.34 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-03.....	113
Figura 4.35 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-03 .....	114
Figura 4.36 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-04 .....	114
Figura 4.37 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-04.....	114
Figura 4.38 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-04.....	115
Figura 4.39 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-04 .....	115
Figura 4.40 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-05 .....	115
Figura 4.41 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-05.....	116
Figura 4.42 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-05.....	116
Figura 4.43 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-05 .....	116
Figura 4.44 – Biela em forma de cotovelo, adaptado de Muttoni (2008).....	117
Figura 4.45 – Flexão local na zona de compressão, adaptado de Guandalini, Burdet e Muttoni (2009).....	118
Figura 4.46 – Deformações tangenciais médias na superfície do concreto para cada laje .....	118
Figura 4.47 – Deformações tangenciais médias na superfície do concreto para cada laje, por grupo analisado .....	119
Figura 4.48 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 1.....	120
Figura 4.49 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 2.....	120
Figura 4.50 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 3.....	120
Figura 4.51 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 4.....	121
Figura 4.52 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 5.....	121
Figura 4.53 – Deformações nas armaduras de flexão da laje RS .....	123
Figura 4.54 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-01.....	124
Figura 4.55 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-01 .....	125
Figura 4.56 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-01 .....	126
Figura 4.57 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-02.....	127
Figura 4.58 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-02 .....	128
Figura 4.59 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-02 .....	129

Figura 4.60 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-02 .....	130
Figura 4.61 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-03.....	131
Figura 4.62 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-03 .....	132
Figura 4.63 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-03 .....	133
Figura 4.64 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-03 .....	134
Figura 4.65 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-04.....	135
Figura 4.66 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-04 .....	136
Figura 4.67 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-04 .....	137
Figura 4.68 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-04.....	138
Figura 4.69 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-05.....	139
Figura 4.70 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-05 .....	140
Figura 4.71 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-05 .....	141
Figura 4.72 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-05 .....	142
Figura 4.73 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-01 .....	143
Figura 4.74 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-01.....	143
Figura 4.75 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-01 .....	144
Figura 4.76 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-02 .....	144
Figura 4.77 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-02.....	144
Figura 4.78 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-02.....	144
Figura 4.79 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-02 .....	145
Figura 4.80 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-03 .....	145
Figura 4.81 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-03.....	145
Figura 4.82 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-03.....	145
Figura 4.83 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-03 .....	146
Figura 4.84 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-04.....	146
Figura 4.85 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-04.....	146
Figura 4.86 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-04.....	147
Figura 4.87 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-04 .....	147
Figura 4.88 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-05 .....	147
Figura 4.89 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-05.....	147
Figura 4.90 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-05.....	148
Figura 4.91 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-05 .....	148
Figura 4.92 – Análise das deformações nos estribos da Série 1 e Série 4.....	150
Figura 4.93 – Análise das deformações nos estribos da Série 2 e Série 3.....	150
Figura 4.94 – Análise das deformações nos estribos da Série 3 e Série 5.....	151

Figura 4.95 – Análise das deformações nos estribos da Série 4 e Série 5.....	151
Figura 4.96 – Mapa de fissuração da laje RS .....	153
Figura 4.97 – Mapa de fissuração da laje FA-01.....	153
Figura 4.98 – Mapa de fissuração da laje CA-01 .....	154
Figura 4.99 – Mapa de fissuração da laje NA-01 .....	154
Figura 4.100 – Mapa de fissuração da laje FA-02.....	154
Figura 4.101 – Mapa de fissuração da laje CA-02 .....	155
Figura 4.102 – Mapa de fissuração da laje TA-02 .....	155
Figura 4.103 – Mapa de fissuração da laje NA-02.....	155
Figura 4.104 – Mapa de fissuração da laje FA-03.....	156
Figura 4.105 – Mapa de fissuração da laje CA-03 .....	156
Figura 4.106 – Mapa de fissuração da laje TA-03 .....	156
Figura 4.107 – Mapa de fissuração da laje NA-03.....	157
Figura 4.108 – Mapa de fissuração da laje FA-04.....	157
Figura 4.109 – Mapa de fissuração da laje CA-04 .....	157
Figura 4.110 – Mapa de fissuração da laje TA-04 .....	158
Figura 4.111 – Mapa de fissuração da laje NA-04.....	158
Figura 4.112 – Mapa de fissuração da laje FA-05.....	158
Figura 4.113 – Mapa de fissuração da laje CA-05 .....	159
Figura 4.114 – Mapa de fissuração da laje TA-05 .....	159
Figura 4.115 – Mapa de fissuração da laje NA-05 .....	159
Figura 4.116 – Posição do corte das lajes.....	160
Figura 4.117 – Execução do corte da laje.....	161
Figura 4.118 – Seção de corte da Laje RS.....	161
Figura 4.119 – Seção de corte da Laje FA-01 .....	162
Figura 4.120 – Seção de corte da Laje CA-01.....	162
Figura 4.121 – Seção de corte da Laje NA-01 .....	162
Figura 4.122 – Seção de corte da Laje FA-02 .....	162
Figura 4.123 – Seção de corte da Laje NA-02 .....	163
Figura 4.124 – Seção de corte da Laje FA-03 .....	163
Figura 4.125 – Seção de corte da Laje CA-03.....	163
Figura 4.126 – Seção de corte da Laje TA-03.....	163
Figura 4.127 – Seção de corte da Laje NA-03 .....	164
Figura 4.128 – Seção de corte da Laje FA-04 .....	164
Figura 4.129 – Seção de corte da Laje CA-04.....	164

Figura 4.130 – Seção de corte da Laje TA-04.....	164
Figura 4.131 – Seção de corte da Laje NA-04 .....	165
Figura 4.132 – Seção de corte da Laje FA-05 .....	165
Figura 4.133 – Seção de corte da Laje CA-05.....	165
Figura 4.134 – Seção de corte da Laje TA-05 .....	165
Figura 4.135 – Seção de corte da Laje NA-05 .....	166
Figura 4.136 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 1 .....	171
Figura 4.137 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 2.....	171
Figura 4.138 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 3.....	172
Figura 4.139 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 4.....	172
Figura 4.140 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 5.....	173
Figura 4.141 – Gráfico para análise das normas .....	181

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$A_s$	Área de aço da armadura de flexão;
$A_{sw}$	Área de aço da armadura de cisalhamento;
$c$	Dimensão do pilar;
$C.V$	Coefficiente de variação;
$d$	Altura útil da laje;
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço da armadura de flexão;
$f_c$	Resistência à compressão do concreto em corpo de prova cilíndrico;
$f_{ct}$	Resistência à tração do concreto;
$f_{ys}$	Tensão de escoamento da armadura de flexão;
$f_{yw,s}$	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento;
$f_{yw,ef}$	Tensão efetiva na armadura de cisalhamento;
$h$	Altura efetiva da laje;
$S_0$	Distância da face do pilar à primeira camada de armaduras de cisalhamento;
$S_r$	Distância entre camadas de armadura de cisalhamento;
$s$	Distância da armadura de cisalhamento instrumentada à face do pilar;
$u$	Comprimento do perímetro de controle;
$u_1$	Comprimento do perímetro de controle afastado a uma determinada distância da face do pilar;
$u_{out}$	Comprimento do perímetro de controle afastado da camada mais externa das armaduras de cisalhamento;
$V_u$	Carga última de ensaio;

$V_{flex}$	Carga correspondente à ruína por flexão;
$V_{R,c}$	Contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento;
$V_{R,s}$	Contribuição de armaduras na resistência ao cisalhamento;
$V_{R,cs}$	Resistência ao cisalhamento para ruptura dentro da região das armaduras de cisalhamento;
$V_{R,out}$	Resistência ao cisalhamento para uma ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento;
$V_{R,máx}$	Resistência ao cisalhamento para ruptura da biela comprimida nas proximidades do pilar;
$v$	Tensão de cisalhamento nominal;
$\zeta$	Parâmetro que estabelece o fator de escala ( <i>size effect</i> );
$\rho$	Taxa de armadura de flexão;
$\varepsilon_{ys}$	Deformação correspondente a tensão de escoamento da armadura de flexão;
$x$	Altura da linha neutra;
$b_w$	Largura da seção da laje.
$r_q$	Distância do centro do pilar ao ponto de aplicação de carga;

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Alguns fatores devem ser levados em consideração para a definição do sistema estrutural a ser utilizado, visando atender requisitos de qualidade, desempenho, e durabilidade, tais como: fatores técnicos e econômicos envolvidos no desenvolvimento do projeto e execução da obra, ou seja, sua exequibilidade; determinação do método construtivo a ser utilizado; capacidade do meio técnico; disponibilidade de materiais e equipamentos; as condições impostas pela arquitetura e a compatibilização com os projetos suplementares. Park e Gamble (2000) apontam que os fatores que devem ser analisados, corroborando com o que foi dito, estão relacionados às cargas de projeto, vãos adotados, custos envolvidos e a uma análise das restrições impostas pelos estados limites últimos e de serviço.

Em construções usuais de menor porte, com vão a ser vencido em torno de 5 m, o sistema convencional em que se utiliza lajes maciças apoiadas em vigas é o mais utilizado. Porém, à medida em que o vão aumenta, esse sistema torna-se antieconômico, pois a espessura média no pavimento (considerando laje e a altura das vigas) torna-se elevada, afetando diretamente as cargas de peso próprio, deformações e consumo de materiais. Então, necessita-se de um sistema estrutural que, com reduzido consumo de material, consiga vencer os vãos impostos pela arquitetura, de forma a não afetar a capacidade estrutural. Ver Figura 1.1.

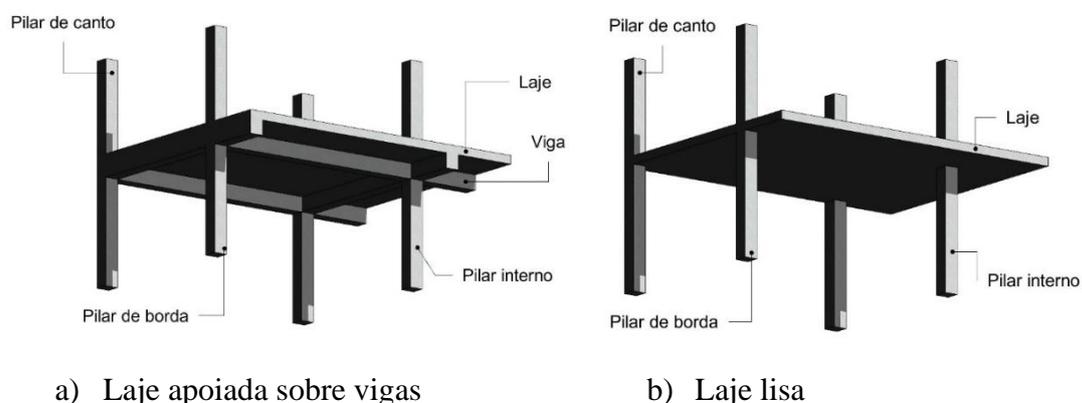


Figura 1.1 – Sistemas estruturais, exemplos, em concreto armado (PALHARES, 2018)

Uma das soluções adotadas é a utilização de lajes lisas ou lajes cogumelo, em que as lajes se apoiam diretamente sobre pilares, sem vigas, com ou sem capitéis, respectivamente. Esse sistema é consolidado, tem uso difundido em vários países da América do Norte, Europa e Ásia e, tem se consolidado cada vez mais no Brasil, principalmente na construção de edifícios comerciais.

A ausência das vigas no sistema de lajes lisas confere vantagens que ajudam a difundir seu uso, tais como: a espessura média dos elementos estruturais no pavimento é menor, com isso há uma possibilidade de redução do pé direito, podendo até se adotar mais pavimentos para uma mesma altura de edifício; por não possuir os recortes das vigas, que representam obstáculos nessa característica, há uma melhor ventilação, iluminação e consequente resistência a incêndios, concentrando menos calor; há mais agilidade no processo construtivo; devido à esbeltez estrutural, há um alívio nas fundações; e, finalmente, proporciona facilidade de disposição das instalações em geral.

É fato que, como todo sistema que traz vantagens, as desvantagens também estão presentes, tais como: redução da rigidez global da edificação quanto aos esforços horizontais, o que pode dificultar seu uso em prédios mais altos; estruturas tornam-se mais flexíveis, o que exige maior atenção quanto às flechas nos vãos dos pavimentos. Sendo o ponto mais crítico para a segurança estrutural desse sistema, a ruptura localizada por punção na ligação laje-pilar, pois ela pode se propagar e levar a estrutura à ruína, parcial ou total, devido ao colapso progressivo.

Essa ruptura por punção ocorre de modo frágil, por cisalhamento, e está associada à formação de um tronco de cone, ao redor do pilar, que tende a se desligar da laje devido a elevadas tensões originadas por esforços de flexão e de cisalhamento nessa região. Essa separação é representada na Figura 1.2, na qual as fissuras que originam a ruína partem do contorno da área carregada e se estendem até a outra face da laje, com angulação que pode variar entre 25° e 45° em relação ao plano da laje. Esse conceito de punção é reiterado por Guandalini (2006) quando o autor afirma que, devido a ação de uma carga concentrada em uma área (em geral uma reação de um pilar ou uma carga concentrada) uma ruptura brusca pode ocorrer na laje devido às elevadas tensões de cisalhamento. É fato que a resistência pós punção das ligações entre laje e pilar deve ser analisada com cautela e, Melo (1990) definiu que a resistência após a punção das ligações entre laje e pilar é essencial para evitar o colapso progressivo da estrutura, pois após a punção ocorrer,

uma fração da carga é conduzida aos pilares vizinhos, podendo gerar novas rupturas localizadas.

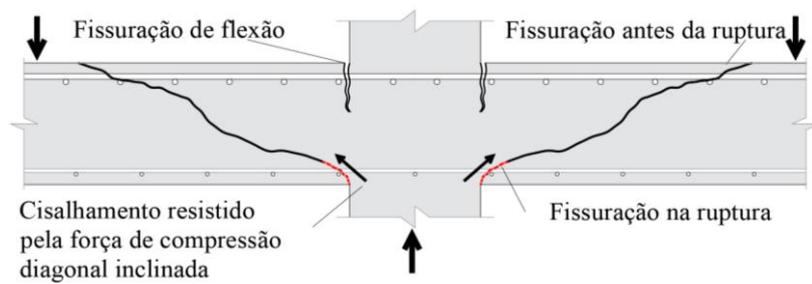


Figura 1.2 – Seção de ruptura de uma ligação laje-pilar sem armadura de punção (adaptado de CEB-FIP/MC90, 1993)

Devido a essa ruptura por punção, vários acidentes foram listados ao longo da história, conforme pode ser visto na Figura 1.3.



a) *Skyline Plaza*, Virginia, EUA, 1973.



b) *Harbour Cay Condominium*, Florida, EUA, 1981



c) *Bluche*, Switzerland, Suíça, 1981



d) *Sampoong Department Store*, Seoul, Coreia, 1995



e) *Piper Row Park*, Wolverhampton, Inglaterra, 1997.



f) *Cagliari*, Itália, 2004

Figura 1.3 – Acidentes estruturais devido a punção em lajes lisas (SUBRAMANIAN, 2014)

Na Figura 1.4 é apresentado um acidente ocorrido no Brasil.



Figura 1.4 – Acidente ocorrido no condomínio Grand Parc, na Enseada do Tauá, Vitória  
(<https://www.gazetaonline.com.br/noticias/cidades/2016/07/como-a-area-de-lazer-do-grand-parc-desabou-1013960061.html>)

Com o objetivo de se entender melhor esse modo de ruptura, várias pesquisas (experimentais ou analíticas) vêm sendo feitas desde o início do século passado. O pesquisador que iniciou esse estudo foi Talbot (1913) ao analisar, ainda que não lajes lisas, sapatas sem a utilização de armadura de cisalhamento até a ruptura, tendo observado que 20 dessas lajes romperam por punção. Mais especificamente e trazendo para o contexto local, várias teses foram desenvolvidas na Universidade de Brasília sobre este tema, com destaque para Oliveira (2003), primeira tese defendida no Programa De Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil - PECC, que analisou experimentalmente 15 lajes cogumelo utilizando concreto de alta resistência submetidas a punção simétrica, com o objetivo de investigar a influência do índice de retangularidade do pilar (variando de 1 a 5), na resistência última das lajes; e para a mais recente tese defendida no programa de Nicácio (2018) que ensaiou 11 lajes com vazios tipo *BubbleDeck*, submetida à punção simétrica, com o objetivo de avaliar comparativamente o comportamento dos modelos quanto aos deslocamentos verticais, deformação específica no concreto, no aço e na armadura de cisalhamento, carga última, fissuração, superfície e modo de ruptura. Outros

autores também se dedicaram ao estudo desse fenômeno em suas teses de doutoramento, tais como: Borges (2004); Silva (2005); Carvalho (2005); Villaverde (2008); Ferreira (2010); Gomes (2010); Lima Neto (2012); Oliveira (2013); Moraes Neto (2013); Albuquerque (2014); Santos (2014); Albuquerque (2015).

Para se determinar a capacidade resistente dessas ligações utiliza-se as recomendações normativas de projeto, porém salienta-se que essas recomendações muitas vezes são simplificadas e não abrangem vários tipos de armadura de punção, variação de ancoragem dessa armadura na armadura de flexão, entre outros fatores. Tais aspectos serão discutidos no Capítulo 2 do presente trabalho.

De forma direta, alguns parâmetros contribuem para a resistência à punção, tais como: geometria do pilar; espessura da laje; resistência a compressão do concreto ( $f_c$ ); taxa de armadura de flexão; uso de protensão; tipo e diâmetro dos agregados graúdos. Vale ressaltar que a presença de cargas excêntricas, de aberturas próximas ao pilar, bem como o posicionamento do pilar em planta, também interfere na resistência ao funcionamento. Alternativamente aos parâmetros citados, há uma maneira eficiente de conferir acréscimo de resistência às ligações utilizando-se armaduras de cisalhamento, que podem ser (de acordo com as principais normas em vigor) do tipo estribo ou conectores tipo pino (*studs*), com taxa suficiente para conferir resistência.

O uso de armadura de punção tem se tornado cada vez mais frequente sem a devida ancoragem, preconizada pelas normas, nas armaduras de flexão. Isso se deve a uma considerável melhoria na exequibilidade, facilitando sua montagem. Porém esse tipo de detalhamento precisa de uma validação do meio científico para que possa ser difundido no meio técnico. Na Figura 1.5 pode-se ver um exemplo de armadura de punção tipo estribo fechado sem a devida ancoragem na armadura de compressão, ancorando apenas na armadura tracionada. Na Figura 1.6 é ilustrada uma ligação laje-pilar com as armaduras de punção devidamente ancoradas na armadura de flexão tracionada e comprimida, com isso pode-se observar a densidade e interferências de todas as armaduras da ligação, evidenciando sua dificuldade de execução.



Figura 1.5 – Ancoragem parcial adotada na armadura de punção tipo estribo fechado

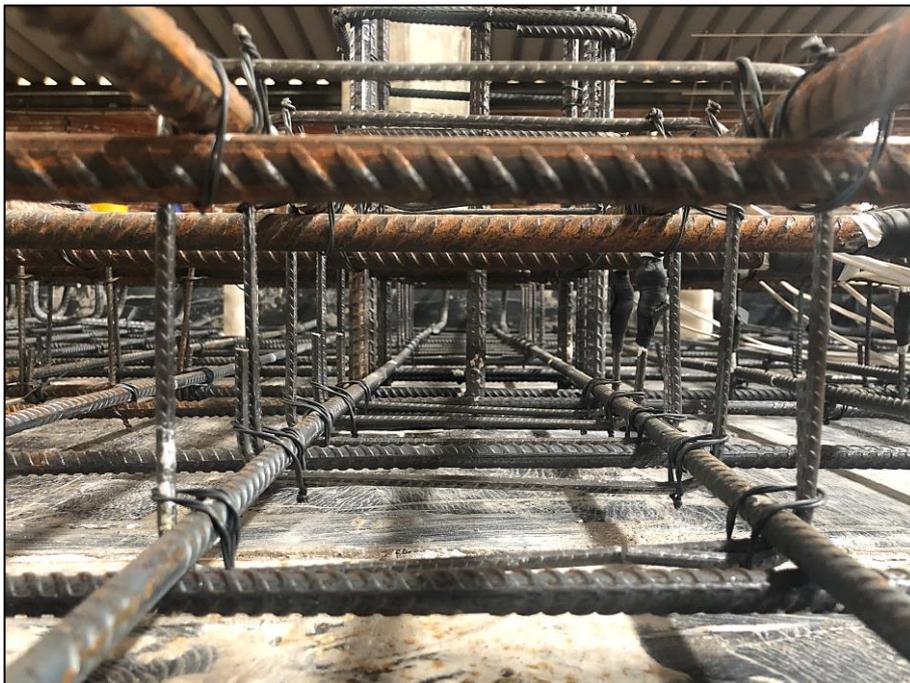


Figura 1.6 – Armadura de punção devidamente ancorada na armadura de flexão tracionada e comprimida

## 1.2. MOTIVAÇÃO

As armaduras de punção conferem um aumento da resistência última às lajes lisas, conforme visto por Moe (1961), Regan (1981), Gomes (1991), Beutel e Hegger (2002), Hegger et al. (2017), Hassan *et. al.* (2017) e Eom *et. al.* (2018), porém sua eficiência prática deve ser associada além da capacidade resistente a critérios de praticidade de instalação e viabilidade econômica. As normas versam que a armadura de punção para funcionar e conferir resistência à laje deve estar bem ancorada na armadura de flexão, envolvendo-as. Porém esse tipo de detalhamento muitas vezes é complexo e de difícil execução, do ponto de visto prático.

A partir daí surge a motivação dessa pesquisa experimental em analisar uma alternativa construtiva para a armadura de punção tipo estribo fechado, variando sua ancoragem na armadura de flexão, facilitando sua montagem nas obras, propiciando maior praticidade e agilidade na instalação. Para isso foram executadas e analisadas ligações laje-pilar armadas à punção em que as armaduras de cisalhamento estão ancoradas nas longitudinais, e modelos em que essa ancoragem não existe (parcialmente ou totalmente) analisando-se assim o efeito dessa desconexão. Esse tipo de estudo corrobora com outros pesquisadores, tais como: Yamada, Nanni e Endo (1992); Andrade (1999); Regan e Samadian (2001); Park *et al.* (2007); Trautwein *et al.* (2011); Caldentey *et al.* (2013); Furche e Bauermeister (2014); Ferreira *et al.* (2016); Hegger *et al.* (2017); e Eom *et. al.* (2018). Há de levar em consideração que as normas não consideram esse tipo de desconexão entre armadura de cisalhamento e armadura longitudinal.

## 1.3. OBJETIVOS

O principal objetivo dessa pesquisa é, por meio de análises experimentais, investigar o uso de armadura de punção variando sua ancoragem na armadura de flexão, em lajes lisas de concreto armado, com pilar interno, submetidas a carregamentos simétricos.

Especificamente os objetivos podem ser listados como:

- Avaliar a influência da variação da ancoragem da armadura de punção quanto: à carga última das lajes, aos deslocamentos verticais e às deformações na armadura

e no concreto, comparando, também, com uma laje maciça sem armadura de cisalhamento, de referência;

- Analisar a influência da variação da ancoragem da armadura de cisalhamento na armadura de flexão nos parâmetros citados acima, bem como na carga última resistente;
- Comparar os resultados dos ensaios com os critérios de dimensionamento, segundo as prescrições normativas descritas no Capítulo 3. Analisando a viabilidade do uso desses modelos de cálculo na estimativa da capacidade resistente à punção das lajes lisas com variação da ancoragem das armaduras de punção;

#### **1.4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Foram moldadas e ensaiadas 20 lajes lisas de concreto armado, com pilar interno e carregamento simétrico, no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (LABEST – UnB). Dezenove desses modelos possuem armadura de punção, diferenciando-se entre si quanto à sua ancoragem na armadura de flexão, número de camadas e taxa de armadura. Ressalta-se que foram mantidas as dimensões para todas as lajes e, foram realizadas 5 concretagens (cada concretagem equivale à execução de 4 lajes) devido à capacidade do laboratório.

#### **1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO**

A tese é composta por cinco capítulos mais as Referências Bibliográficas conforme descritos sucintamente a seguir.

No *Capítulo 1* apresentada uma introdução do trabalho, englobando a justificativa e objetivos.

O *Capítulo 2* é composto pela revisão bibliográfica que se inicia explanando sobre o efeito de punção, adentrando diretamente no comportamento de lajes lisas com e sem armadura de punção, descrevendo em paralelo pesquisas relevantes que se relacionam com o objetivo do trabalho. É feita, também, uma revisão normativa, evidenciando-se o processo

de cálculo proposto pelas normas ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib* Model Code 2010 (2013).

No *Capítulo 3* é descrito o programa experimental dos ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, sendo descritos os modelos e variáveis estudadas e, também, a instrumentação adotada e procedimentos do ensaio.

O *Capítulo 4* contém os resultados experimentais obtidos com os ensaios e uma análise comparativa deles. Dentre esses resultados estão as deformações nas armaduras de flexão e de punção, as deformações do concreto e os deslocamentos verticais das lajes. Com base nos resultados e nos mapas de fissuração apresentados é descrito o modo de ruptura das lajes. Concomitantemente, são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados para a confecção das lajes. No *Capítulo 4* são, ainda, apresentadas as cargas de ruptura obtidas a partir do cálculo utilizando os modelos teóricos das normas citadas no *Capítulo 2*.

O *Capítulo 5* contém as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em um sistema de lajes lisas, pode-se ocorrer uma ruptura por punção na ligação laje-pilar devido à concentração em alta intensidade de esforços cortantes e momentos negativos (BARTOLAC, DAMJANOVIĆ E DUVNJAK, 2015). Esse modo de ruptura ocorre de forma brusca, com pequenos deslocamentos, devendo ser evitado (REGAN, 1981). Para uma laje sem armadura de cisalhamento em uma situação de carregamento simétrico Regan (1985) concluiu que a superfície de ruptura forma um ângulo de aproximadamente  $25^\circ$  com o plano da laje, com origem na face do pilar, ver Figura 2.1. O Código Modelo CEB-FIP Model Code 1990 (1993), em seu item 6.4.2.5, versa que a superfície de ruptura faz um ângulo de  $25^\circ$  a  $30^\circ$  em relação ao plano da laje.

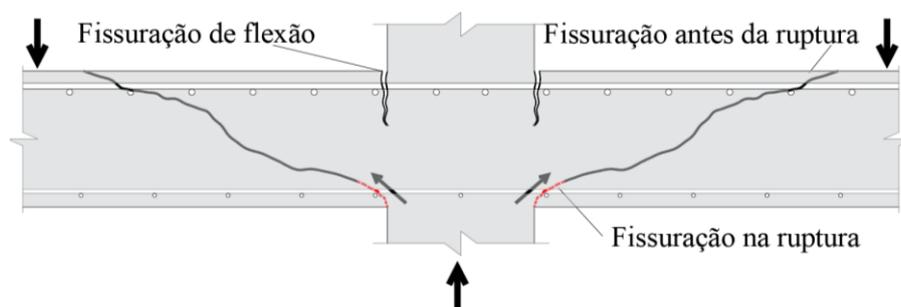


Figura 2.1 – Seção de uma ligação laje-pilar no momento de ruptura por punção (adaptado de CEB-FIP/MC90, 1993)

Um ponto importante que deve ser analisado é que, devido à ruptura por punção ocorrer antes do escoamento da armadura de flexão (ou de forma que o escoamento seja parcial ou quase total), se comportando de forma frágil (não são observados grandes deslocamentos na laje antes da ruptura), a estrutura como um todo pode colapsar, devido ao *colapso progressivo*. Então as lajes sempre devem ser dimensionadas de modo que a ligação delas com os pilares evite o fenômeno da punção.

Os principais fatores que influenciam na resistência de lajes lisas de concreto armado sem armadura de punção são, principalmente, a resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ), a taxa de armadura de flexão tracionada ( $\rho$ ), o tamanho e geometria do pilar, o *size effect* ( $\xi$ ), ou efeito de tamanho (tradução livre), fator que leva em consideração a altura útil ( $d$ ) da laje. Outro fator que atua significativamente no aumento dessa resistência é a utilização de armaduras de punção, cuja escolha está relacionada com a disponibilidade e praticidade de uso dentro do canteiro de obras. Vale ressaltar que sua eficiência, de acordo com as normas, pode estar diretamente ligada com a suas condições de ancoragem na

armadura de flexão, característica essa que se pretende analisar ao longo deste trabalho. Além desses fatores já citados, pode ser feito um espessamento da laje na região adjacente à ligação laje-pilar, chamado de capitel, ou então a laje ter sua espessura engrossada nessa região, este chamado de ábaco, para diminuir as tensões de cisalhamento na ligação, porém essas soluções de cunho estrutural podem ser inadequadas do ponto de vista arquitetônico, a Figura 2.2 ilustra tais soluções. A partir disso, considera-se como solução técnico-econômica mais eficiente a adoção de armaduras de cisalhamento.

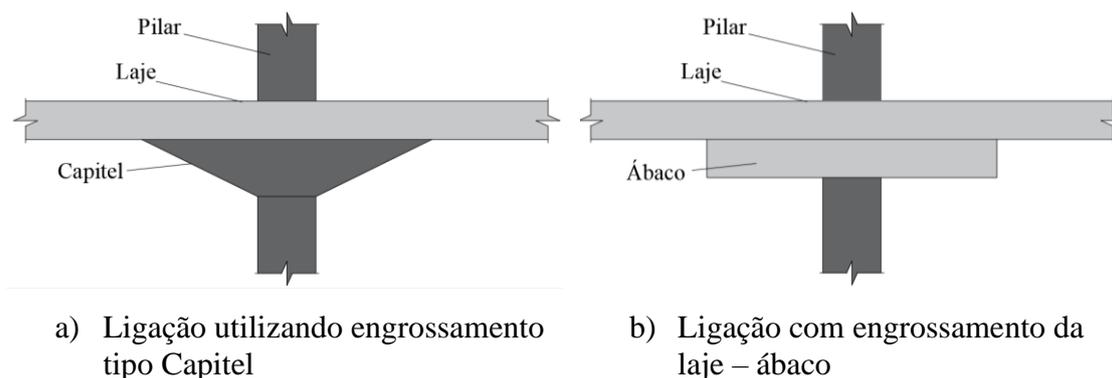


Figura 2.2 – Modos de engrossamento da ligação laje-pilar para aumento da resistência

No tocante ao padrão de fissuração observado nas lajes puncionadas, Cordovil (1997) relatou que se observa um panorama de fissuração na face tracionada predominantemente composto por fissuras radiais, considerando o período que antecede a ruptura. Leonhardt e Monning (1979) já haviam analisado isso e afirmaram que as primeiras fissuras significativas que surgem são as radiais (cabe destacar que essas surgem após a formação de fissuração tangencial paralela ao perímetro do pilar). Essas fissuras partem do centro da ligação em direção às bordas da laje e, para elevados níveis de carregamentos, surgem fissuras tangenciais, limitando o contorno do cone de punção. Essa fissura tangencial surge na face tracionada da laje se propagando, de forma inclinada, à base do pilar, já na face comprimida, ocorrendo a ruptura quando essa fissura tangencial atinge a superfície comprimida do concreto, no perímetro do pilar. Beutel (2002) a partir de uma série de ensaios, observou que quando a laje é armada ao cisalhamento, as fissuras radiais tendem a surgir próximas ou se sobrepondo a linha das armaduras de cisalhamento. Um esquema de padrão de fissuração pode ser visto na Figura 2.3.

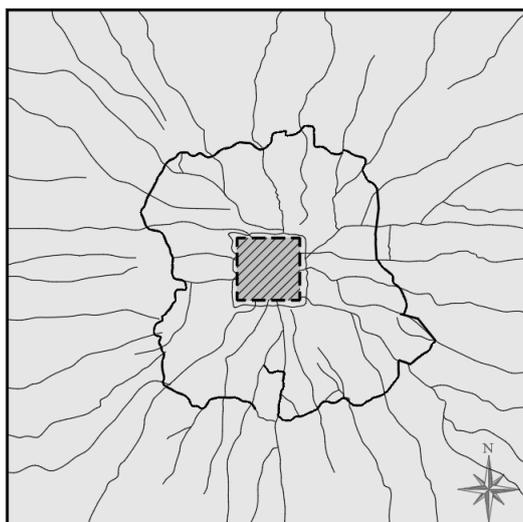


Figura 2.3 – Padrão de fissuração em uma face tracionada de laje no momento da ruptura

Em lajes que não exista armadura de punção, o Eurocode 2 (2004) admite uma inclinação de  $26,6^\circ$  para as fissuras características do puncionamento da laje, como mostra a Figura 2.4.

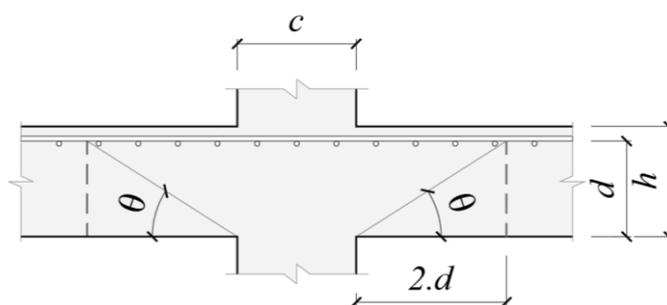


Figura 2.4 – Inclinação das fissuras características da punção, adaptado de Eurocode 2 (2004)

## 2.1. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

### 2.1.1. Resistência à compressão do concreto

Sacramento *et al.* (2012) constatou que Graf, em 1930, foi um dos primeiros a avaliar a influência da resistência à compressão do concreto na resistência à punção e, constatou que não há uma relação linear entre a resistência à punção da laje e a resistência à compressão do concreto.

Então, para melhor representar a influência dessa característica do concreto na resistência última das lajes, algumas normas consideram a resistência à compressão do concreto de

forma penalizada. A norma americana ACI 318 (2019) considera que a resistência à punção é expressa através de uma função proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão do concreto, conforme proposto por Moe (1961). Porém, essa consideração não se mostra tão eficiente para concretos de alta resistência, conforme observado por Inácio *et al.* (2015). Já a norma europeia Eurocode 2 (2004) e a norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014) a resistência à compressão do concreto é expressa através de sua raiz cúbica para determinação da resistência à punção fato que, de acordo com Regan (1986) e com Marzouk e Hussein (1991), representa uma melhor tendência quanto à estimativa de carga última da laje.

### **2.1.2. Taxa de armadura de flexão tracionada**

A ABNT NBR 6118 (2014) e o Eurocode 2 (2004) consideram que a taxa de armadura de flexão tracionada ( $\rho$ ) é definida como sendo a razão entre a área de armadura de flexão tracionada ( $A_s$ ) pela área de concreto ( $A_c$ ), sendo  $A_c$  igual ao produto entre a altura útil da laje ( $d$ ) por uma base equivalente ao comprimento do pilar acrescido de  $3 \cdot d$  para cada um dos lados. Ressalta-se que o ACI 318 (2019) não considera a taxa de armadura de flexão na resistência à punção em suas formulações.

Com o aumento da taxa de armadura de flexão há um acréscimo da zona de concreto comprimido, devido a um deslocamento da linha neutra da laje, e, por esse concreto ainda não estar fissurado resistirá ao cisalhamento conforme observado por Regan (1981). Há então uma atenuação na fissuração da laje, aumentando a zona íntegra do concreto, favorecendo o ganho de resistência, conforme relatado por Cordovil (1997).

Pesquisas como a de Guandalini, Burdet e Muttoni (2009), Inácio *et al.* (2015), Mabrouk, Bakr e Abdalla (2017), corroboram que o aumento da taxa de armadura de flexão confere acréscimo de resistência à punção para lajes. Porém, vale destacar que Regan (1981) considera que essa resistência deve ser proporcional à raiz cúbica da taxa de flexão, conforme utilizam a ABNT NBR 6118 (2014) e o Eurocode 2 (2004). Sagaseta, Ruiz e Muttoni (2009) concluíram que há uma redução na capacidade última à punção das lajes que possuem uma baixa taxa de armadura de flexão devido a uma maior rotação.

### **2.1.3. Dimensão e geometria do pilar**

A dimensão da seção do pilar afeta diretamente a resistência à punção da ligação laje-pilar visto que, quanto maior a área carregada (seção), menor tensão é desenvolvida,

o que confere uma maior capacidade de carga na ligação. Daí o uso de capitéis, quando necessário e possível, para aumentar a dimensão do pilar, aumentando a resistência à punção da laje.

Einpaal *et. al.* (2016) atestam que a força de cisalhamento unitária aferida a  $d/2$  da face do pilar diminui à medida que se aumenta sua dimensão, esse efeito pode ser explicado pela influência do processo de formação de fissuras nas proximidades da área carregada. Os autores concluem ainda que, a diminuição da resistência de cisalhamento nominal unitária preconizada pelo ACI 318 (2019) para pilares com grandes dimensões leva a uma superestimativa do puncionamento no caso de taxas de armaduras de flexão baixas e laje grossas. Porém, se o perímetro for localizado a  $2 \cdot d$ , como no Eurocode 2 (2004), o puncionamento em pilares com seção reduzida são superestimados.

A geometria também influencia diretamente, conforme visto por Bartolac, Damjanović e Duvnjak (2015), pois em pilares retangulares há uma concentração de tensão nos cantos dos pilares, causando uma redução da capacidade portante da ligação em comparação com pilares de seção transversal circular. Essa concentração de tensões nos cantos dos pilares também foi observada por Moe (1961), Regan (1981) e Vanderbilt (1961).

#### **2.1.4. Altura útil da laje e a consideração do *size effect***

Um aumento na altura da laje confere diretamente um aumento em sua altura útil, conferindo maior volume de concreto disponível para resistir ao cisalhamento e, uma forma de aumentar essa altura, é adotando ábacos (ou *drop painel*) que aumentam a espessura da laje na região da ligação com o pilar.

Porém devido a influência do *size effect* (efeito de tamanho) o aumento de resistência provocado pelo aumento da altura útil não é linear. Graf (1938) e Richart (1948) observaram que a resistência ao cisalhamento das lajes não varia de modo proporcional a sua espessura, por exemplo, uma laje com o dobro de altura de uma, guardadas propriedades semelhantes, não tem o dobro de resistência. Sacramento *et al.* (2012) evidenciou a dificuldade em ensaiar elementos em escala real e com isso a maioria dos ensaios realizados em lajes submetidas ao puncionamento foram feitos em modelos com dimensões reduzidas, e desta forma a influência do *size effect* não era evidenciada. Em

ressonância, pesquisadores como Guandalini *et al.* (2009) evidenciaram que a tensão resistente à punção diminui com o aumento da espessura da laje.

As normas ABNT NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2004) descrevem o *size effect* ( $\xi$ ) como sendo em função da altura útil da laje, de acordo a Equação 2.1. Com uma diferença entre elas, a norma europeia limita esse parâmetro a um valor máximo de 2,0, com o intuito de reduzir o aumento da resistência à punção de lajes lisas com altura útil inferior a 200 mm.

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad \text{Equação 2.1}$$

## 2.2. LAJES LISAS ARMADAS À PUNÇÃO - COMPORTAMENTO

No item anterior foram evidenciadas ações para aumentar a capacidade da laje quanto à ruptura por punção. Variar a seção do pilar ou da laje, do ponto de vista arquitetônico, pode ser uma medida não aceitável e, de forma estrutural, pode elevar os carregamentos estruturais, afetando o peso próprio da estrutura elevando as cargas nas fundações. Aumentar a taxa de armadura de flexão e a resistência do concreto podem não ser soluções viáveis devido ao problema de punção acontecer isoladamente em ligações e não em todo pavimento. Então uma maneira eficiente de aumentar a resistência na ligação laje-pilar é adotando uma armadura de cisalhamento.

Essa solução não necessita de engrossamentos na ligação, não interferindo nas imposições arquitetônicas. Porém para sua devida eficiência é preciso garantir, de acordo com as principais normas, ancoragem (envolvendo totalmente as armaduras de flexão), o que nem sempre é possível, podendo se tornar uma armadura de difícil instalação. Elas devem estar dispostas na laje próximas ao pilar, interceptando as fissuras de cisalhamento.

### 2.2.1. Tipos de armadura de punção

Diversos são os tipos de armaduras de punção adotadas, de acordo com a literatura, as primeiras armaduras utilizadas foram as do tipo *barra dobrada*, ver Figura 2.5, conforme estudado por Graf (1938), Elster e Hognestad (1956) e Anderson (1963).

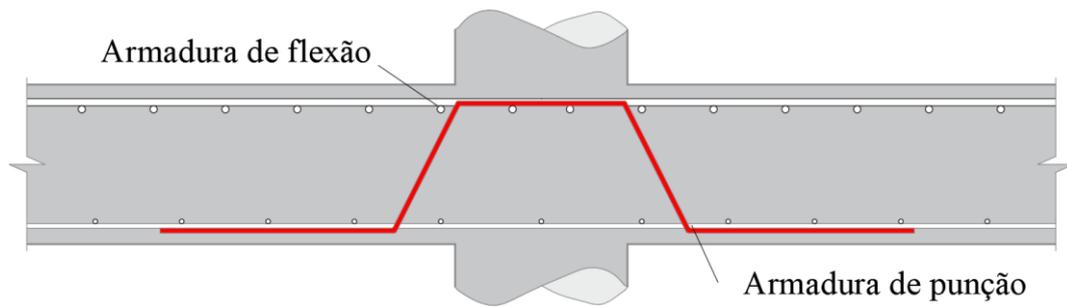


Figura 2.5 – Armadura de punção do tipo *barra dobrada*

Há o uso de armaduras do tipo *estribo*. Eles podem ser fechados, abertos, em pente ou contínua, conforme estudado por Eom *et al.* (2018), ou do tipo inclinados, a depender do seu detalhamento. Destaca-se que o uso de estribos fechados e do tipo pente são de difícil posicionamento na hora da execução, fato não observado com os estribos abertos. Estribos abertos com ângulos de inclinação de 45° e 60° em relação ao plano da laje foram pesquisados por Melo *et al.* (2000), Andrade (2000) e Trautwein (2001). Ver Figura 2.6 à Figura 2.9.

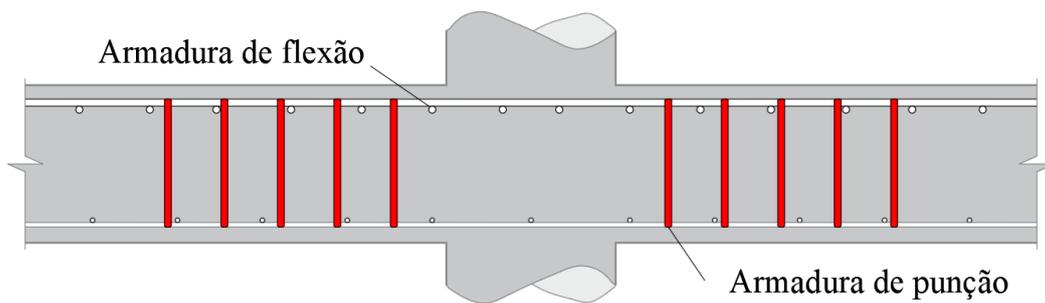


Figura 2.6 – Armadura de punção tipo *estribo fechado*

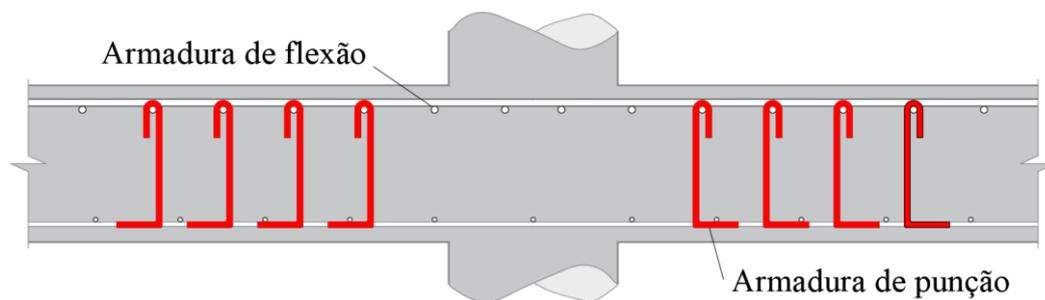


Figura 2.7 – Armadura de punção do tipo *estribo aberto*

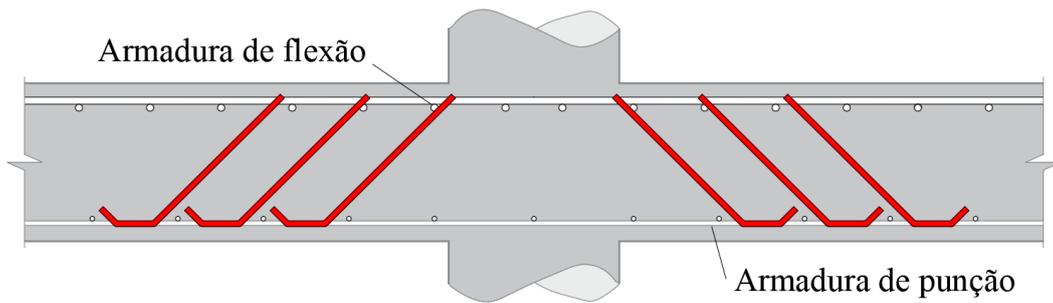


Figura 2.8 – Armadura de punção do tipo *estribo inclinado*

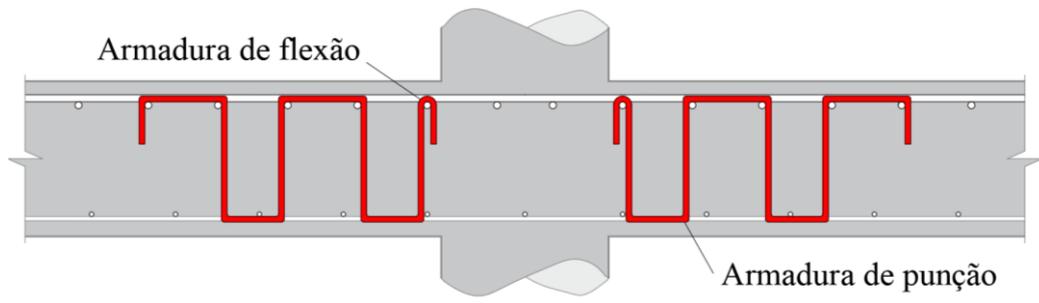


Figura 2.9 – Armadura de punção do tipo *pente*

Os estribos também podem ser do industrializados, como exemplo os *shearhoops* que foram desenvolvidos por Chana (1993) que são módulos de estribos em formato de U soldados em uma armadura em forma de aro colocados ao redor do pilar, ver Figura 2.10. Outro exemplo de estribos industrializados é o proposto por Beutel e Hegger (2000), que consistem em estribos em forma de U que se unem, envolvendo as armaduras de flexão, conforme Figura 2.11.

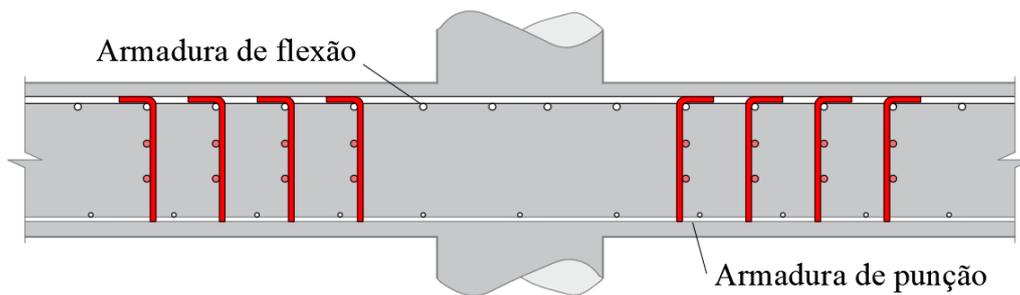


Figura 2.10 – Armadura de punção tipo *shearhoops*

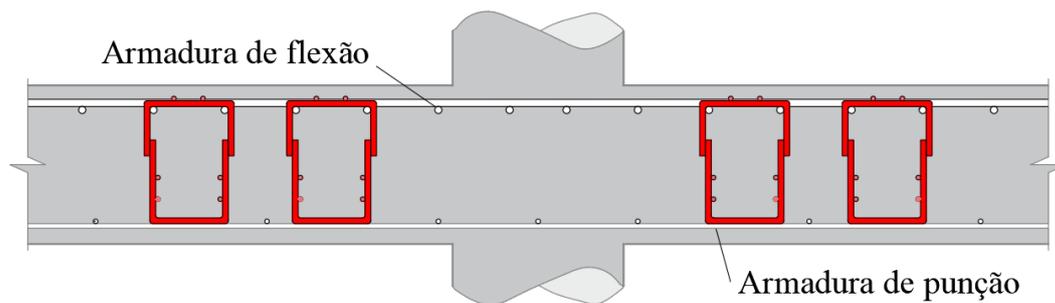


Figura 2.11 – Armadura de punção tipo estribo industrializado proposto por Beutel e Hegger (2000)

Outra forma eficiente de armadura de punção é a utilização de pinos com cabeças para ancoragem na armadura de flexão, industrializados, chamados de *stud rails* que são muito eficientes e de fácil montagem *in loco*, esse tipo de armadura pode não ancorar na armadura de flexão conforme estudo realizado por Gomes e Andrade (2000) e Trautwein et al. (2011). Como uma variação deles surgiram os *double head studs*, estudados por Andra e Matthaei (2000) e Regan e Samadian (2001). Alternativamente, Gomes e Regan (1999) utilizaram fatias de perfis I metálicos como armaduras de punção e, elas demonstraram eficiência satisfatória, alcançando o dobro de resistência em relação à laje de referência. Ver Figura 2.12.

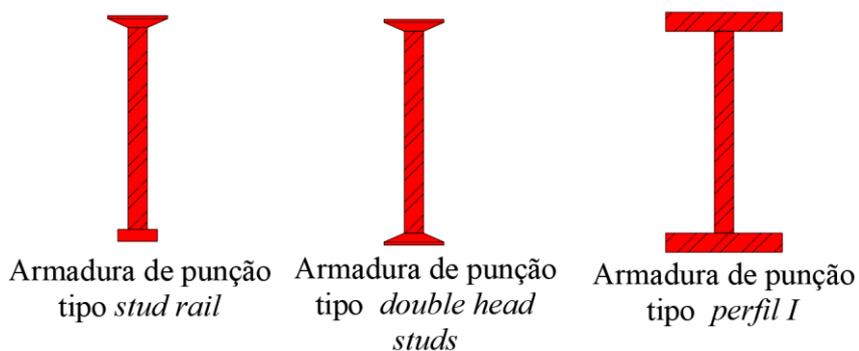


Figura 2.12 – Variações de armaduras de punção

Ressalta-se que outros tipos de detalhamento foram estudados ao longo da história, variando-se ancoragem, continuidade, material, dentre outros fatores.

### 2.2.2. Distribuição das armaduras de punção

A disposição das armaduras de punção na laje, buscando-se um arranjo tido como ideal, é feita de forma que haja uma distribuição igualitária em torno da superfície de ruptura, por exemplo, em uma conformação radial. Porém esse arranjo idealizado nem sempre é possível, devido a interferências com a armadura de flexão, daí a necessidade de se buscar

variações de arranjo. A Figura 2.13 mostra exemplo de detalhamentos não eficientes, nas quais as armaduras de punção não são ativadas pelo mecanismo de falha.

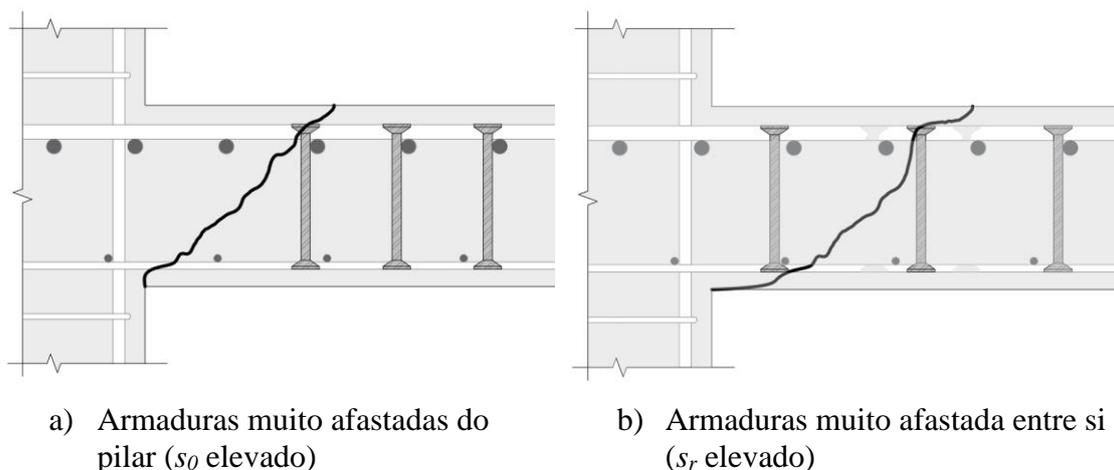
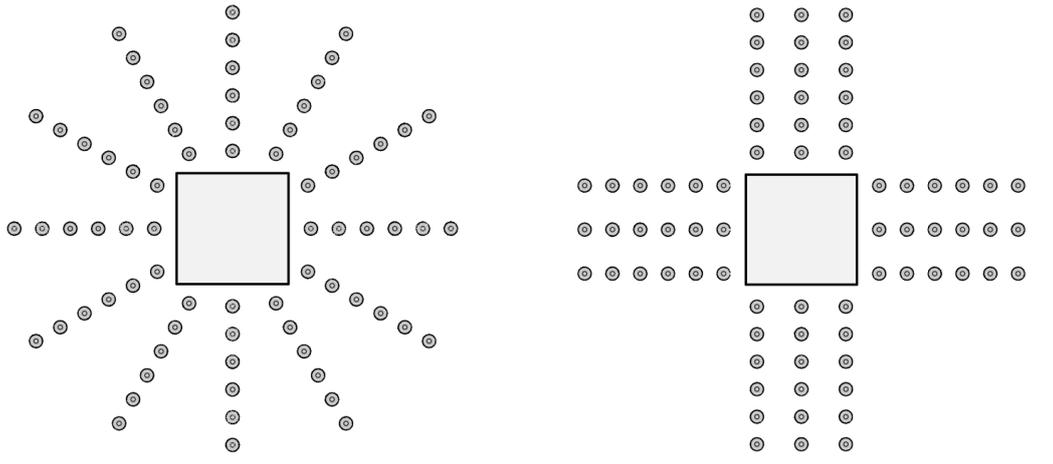


Figura 2.13 – Detalhamento ineficiente de armaduras de punção

Normativamente falando, o Eurocode 2 (2004), a ABNT NBR 6118 (2014) e o *fib* Model Code 2010 (2013) consideram como possíveis arranjos uma distribuição radial ou em cruz para as armaduras, porém cabe destacar que a distribuição está diretamente ligada ao tipo de armadura, por exemplo para estribos uma distribuição radial é de difícil disposição. O ACI 318 (2019) considera apenas uma distribuição em cruz.

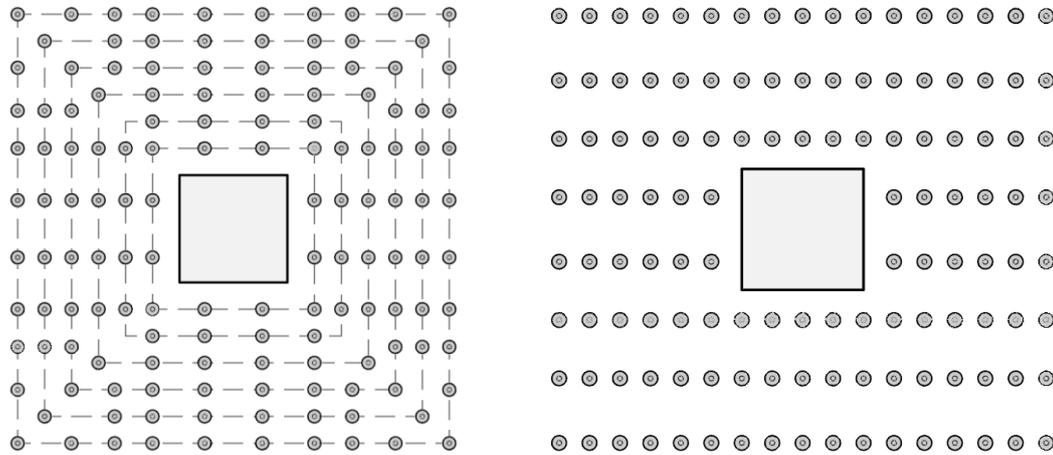
Outros tipos de distribuição podem ser feitos, como por exemplo o circunferencial, por exemplo adotado por Regan e Samadian (2001) e Beutel e Hegger (2002), ou tipo em grade utilizado, por exemplo, por Lips *et al.* (2012).

Na Figura 2.14 são apresentados de forma genérica os tipos de arranjo (em cruz, de forma radial, em forma de grade e em uma distribuição circunferencial) citados com base nos estudos e normas analisados.



a) Distribuição radial

b) Distribuição em cruz



c) Distribuição circunferencial

d) Distribuição em grade

Figura 2.14 – Tipos de distribuição de armaduras de punção

### 2.2.3. Espaçamento e ancoragem das armaduras de punção

De acordo com as principais normas utilizadas as armaduras de punção devem estar adequadamente posicionadas e ancoradas na armadura de flexão. Deve haver um espaçamento máximo entre a primeira camada de armadura e a face do pilar ( $S_0$ ) e entre as camadas ( $S_r$ ) de modo que o maior número possível de camadas de armadura seja cortado pela superfície de ruptura para que haja uma maior resistência. Deve-se tomar cuidado com armaduras muito próximas da face do pilar e com camadas espaçadas acima do limite pois isso afeta a atuação das mesmas, diminuindo sua eficiência, conforme observado por Yamada, Nanni e Endo (1992). As limitações quanto ao espaçamento, preconizadas pelas normas em análise, estão na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Espaçamentos limites, em função da altura útil  $d$ , entre as camadas da armadura de punção

Norma	Limite		Espaçamento entre pernas de estribos
	$S_o$	$S_r$	
ABNT NBR 6118 (2014)	$\leq 0,5 \cdot d$	$\leq 0,75 \cdot d$	$\leq 2 \cdot d$
ACI 318 (2019)	$\leq 0,5 \cdot d$		
Eurocode 2 (2004)	$\leq 0,5 \cdot d$	$\leq 0,75 \cdot d$	
<i>fib</i> Model Code 2010 (2013)	$\geq 0,35 \cdot d$ $\leq 0,75 \cdot d$	$\leq 0,75 \cdot d$	$\leq 3 \cdot d$

Todas as normas determinam que as armaduras devem estar perfeitamente ancoradas e, mais especificamente para os estribos, o ACI 318 (2019) determina que devem ser adequadamente ancorados em ambas as extremidades para serem totalmente efetivos, essa ancoragem deve ser garantida pelas dobras que envolvem a armadura de flexão, conforme ilustrado na Figura 2.15. Já o Eurocode 2 (2004), de forma mais genérica, descreve que a ancoragem da armadura de punção deve ser efetuada por meio de curvas e ganchos, ou por armadura transversal soldada. A ABNT NBR 6118 (2014) fala sobre ancoragem de forma análoga à norma europeia e acrescenta que deve haver contato mecânico das barras longitudinais com os cantos dos estribos. Corroborando com as normas, Regan (2000) constatou uma tendência de menores resistências quando se utilizam estribos dobrados sem envolver uma barra longitudinal. Para Brantschen (2016) e bulletin 43 (*fib*, 2008) as condições de aderência e ancoragem são fundamentais para que se tenha uma completa ativação das armaduras, e resistência suficiente à formação de fissuras.

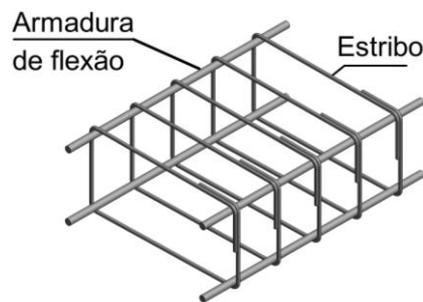


Figura 2.15 – Estribo devidamente ancorado na armadura de flexão, conforme recomendação do ACI 318 (2019)

Beutel e Hegger (2002) descrevem que, sendo as lajes lisas elementos delgados, as condições de ancoragem da armadura de cisalhamento são desfavoráveis. Em paralelo

Hegger *et al.* (2017) indicam a relação direta entre a eficiência da armadura e a qualidade de sua ancoragem, comprovando o dito por ensaios experimentais.

### 2.3. MODO DE RUPTURA DA LIGAÇÃO LAJE-PILAR COM ARMADURA DE PUNÇÃO

Quando se utiliza armadura de punção, podem ocorrer quatro tipos de ruptura, uma das possibilidades é a ruptura dar-se na zona entre o pilar e a primeira camada de armadura, por esmagamento da biela comprimida próxima à face do pilar, ver Figura 2.16. Outro modo é a superfície de ruptura ocorrer dentro da região da armadura de cisalhamento, por esgotamento da resistência à tração diagonal do concreto e do aço das armaduras de punção presentes na ligação laje-pilar, ver Figura 2.17. É possível, também, que a superfície de ruptura se desenvolva na região situada fora da armadura de cisalhamento, com características semelhantes à da ruptura da laje sem armadura de cisalhamento, por esgotamento da resistência à tração diagonal do concreto, ver Figura 2.18. E ainda há a possibilidade de ruptura caracterizado pela presença de fissuras nos dois planos horizontais entre a armadura de flexão e a de punção, com possível redução da carga de ruptura, denominada delaminação, conforme observado por Andrade (1999), Trautwein (2006) e Tapajós (2017), ver Figura 2.19.

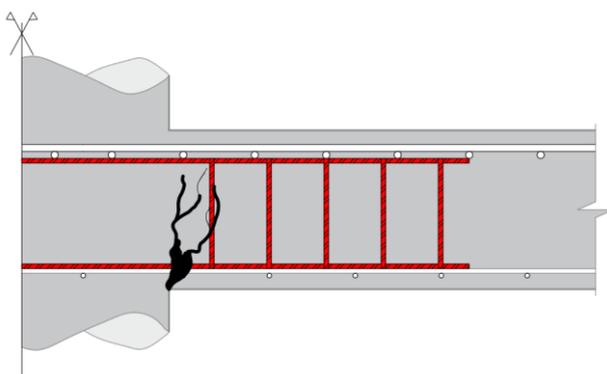


Figura 2.16 – Ruptura por esmagamento da biela comprimida

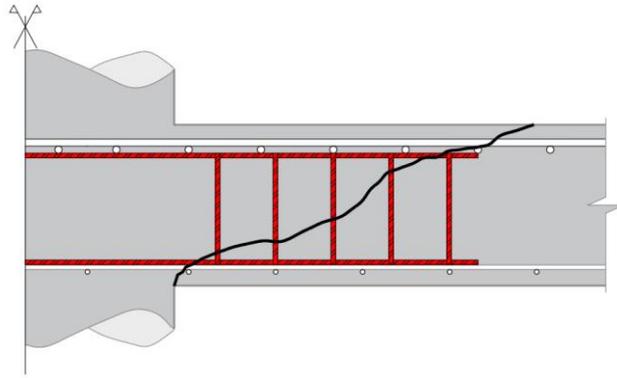


Figura 2.17 – Ruptura dentro da região da armadura de punção

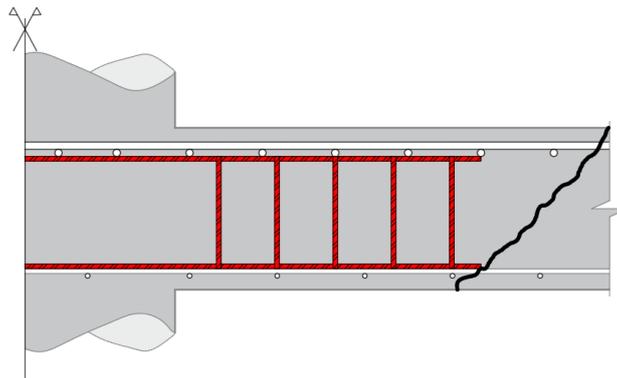


Figura 2.18 – Ruptura fora da região com armadura de punção

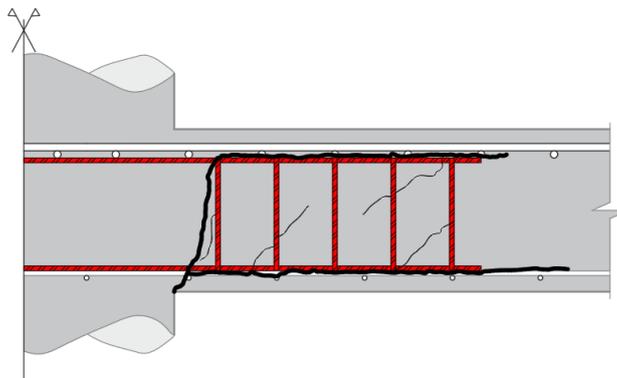


Figura 2.19 – Ruptura por delaminação

Ressalta-se que pode ocorrer ruptura por mal posicionamento da armadura de punção na laje, ou seja, armaduras muito espaçadas da face do pilar ou muito espaçadas entre si, conforme exemplificado no item 2.3.2 do Capítulo 2, que versa sobre a distribuição da armadura de punção.

Há, ainda, um modo de ruptura por flexão ocorrendo na ligação laje-pilar de forma mais dúctil que as anteriores citadas. Ferreira (2010) propôs um critério em que se classifica o modo de ruptura em: por punção, por flexo-punção e por flexão. Nesse critério, para lajes com deformações máximas no concreto e o raio de plastificação ( $r_y$  – raio em que as

armaduras de flexão escoaram) variando entre 80% e 100% de  $\epsilon_{cu}$  e  $r_q$  (raio de inflexão dos momentos) e formação de tronco de cone, a ruptura se caracteriza por flexo-punção. Quando  $r_y$  é superior a  $r_q$  e o concreto está na iminência do esmagamento, considera-se uma ruptura por flexão. Já a ruptura por punção surge quando o raio de plastificação é inferior a 80% do raio de inflexão dos momentos, com deformações máximas no concreto ( $\epsilon_c$ ) inferiores a 80% da deformação última e com evidente formação do cone de punção.

#### **2.4. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA O DIMENSIONAMENTO À PUNÇÃO**

A análise dos resultados experimentais realizados nessa pesquisa foi realizada comparando os resultados com o que regem as normas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004), ACI 318 (2019) e *fib* Model Code 2010 (2013). A descrição dos critérios normativos foi restringida a lajes lisas, submetidas a carregamento simétrico, apoiadas em pilares internos com distribuição da armadura de punção em cruz, visto que esta é a situação dos modelos experimentais em estudo. As expressões apresentadas referem-se a resultados característicos, e não de cálculo, para uma comparação direta com os valores experimentais.

Nessa ligação laje-pilar, a laje, através de tensões solicitantes de cisalhamento e normais, transfere esforços que podem ser representados simplificadaamente por uma carga vertical e duas componentes de momentos fletores ortogonais. A partir daí, após uma análise estrutural para obtenção dos esforços, calcula-se a tensão máxima solicitante para compará-la com a tensão resistente conforme preconizado pela norma arbitrada. As resistências são verificadas quanto ao esmagamento da biela, à tração dentro e fora da região das armaduras de cisalhamento.

Destaca-se que a expressão geral para a determinação da capacidade última das lajes lisas, sem armadura de punção, é determinada pelo produto da tensão de cisalhamento nominal pelo perímetro de controle (a ser definido de acordo com cada norma em análise) e pela altura útil.

Caso seja necessária a utilização de armadura de punção, as normas recomendam a verificação de dois possíveis modos de ruptura: no primeiro a região das armaduras é

cortada pela superfície de ruptura; e o no segundo a ruptura ocorre fora da região das armaduras. Ou ainda devido ao esmagamento da biela próxima ao pilar.

#### 2.4.1. ABNT NBR 6118 (2014)

A resistência à punção em lajes de concreto armado sem armadura de cisalhamento deve ser feita conforme Equação 2.5 e perímetro de controle representado na Figura 2.20.

$$V_{R,c} = 0,182 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.2}$$

sendo  $f_c$  a resistência à compressão do concreto;  $u_1$  é o perímetro de controle afastado a  $2d$  das faces do pilar;  $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$  correspondente à média geométrica de armadura de flexão nas duas direções  $x$  e  $y$ ; e  $d$  a altura útil da laje;  $k$  é um parâmetro que considera o efeito de escala, sendo  $k = 1 + \sqrt{\frac{20}{d}}$ , com  $d$  em centímetros.

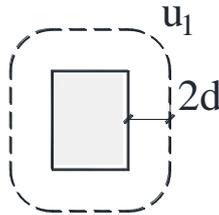


Figura 2.20 – Perímetro de controle em pilares internos de acordo com ABNT NBR 6118 (2014)

Caso haja a necessidade da utilização de armadura de punção, a resistência é obtida conforme a Equação 2.3 e seu perímetro determinado de acordo com a Figura 2.21. E a carga fora da região das armaduras pela Equação 2.4.

$$V_{R,cs} = 0,14 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d + \left( 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right) \quad \text{Equação 2.3}$$

$$V_{R,c} = 0,182 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.4}$$

sendo  $A_{sw}$  a área de aço total da armadura de cisalhamento na seção transversal de um perímetro de armaduras;  $f_{yw,ef}$  é a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, não maior do que 288 MPa para estribos em lajes com altura de até 150 mm, já para lajes com altura

maior que 350 mm, é considerada a resistência de 500 MPa, sendo permitida interpolação linear para valores intermediários.

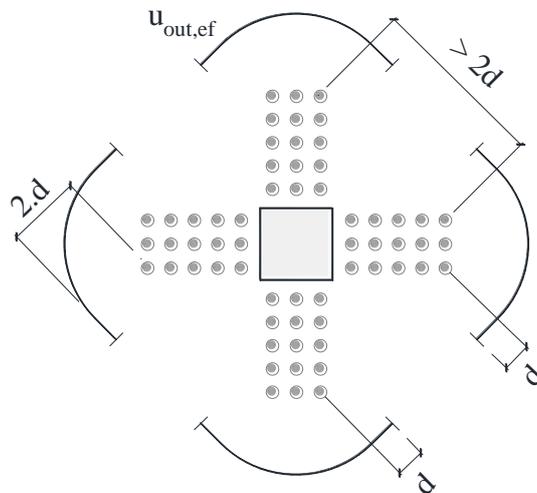


Figura 2.21 – Definição do perímetro de controle, fora da região das armaduras de punção, de acordo com ABNT NBR 6118 (2014)

A verificação da tensão resistente de compressão diagonal do concreto próxima das extremidades do pilar, deve ser obtida conforme Equação 2.5. Cabe destacar que o  $V_{R,máx}$  pode ser aumentado em 20 % por efeito de estado múltiplo de tensões junto a um pilar interno, quando os vãos que chegam a esse pilar não diferem mais de 50 % e não existem aberturas junto ao pilar.

$$V_{R,máx} = 0,27 \cdot k \cdot f_{ck} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.5}$$

onde  $u_{out}$  é o comprimento do perímetro de controle afastado à  $2 \cdot d$  da camada mais externa de armaduras de cisalhamento, respeitando-se um limite de  $2 \cdot d$  do último contorno de armaduras

#### 2.4.2. ACI 318 (2019)

A resistência ao puncionamento de uma laje sem armaduras de punção é expressa como o mínimo das três expressões apresentadas na Equação 2.6. Tais equações já levam em consideração os efeitos de retangularidade do pilar, a posição da ligação no pavimento em relação à altura útil. Destaca-se que o perímetro de controle é localizado à  $d/2$  da face do pilar. Conforme Figura 2.22.

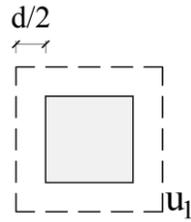


Figura 2.22 – Perímetro crítico tomado para lajes sem armadura de punção, de acordo com o ACI 318 (2019)

$$V_{R,c} = \min \begin{cases} 0,17 \cdot k \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,083 \cdot k \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{u_1} + 2\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,33 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{cases} \quad \text{Equação 2.6}$$

sendo  $f_c$  a resistência à compressão do concreto limitada ao valor máximo de 69 MPa;  $\beta_c$  a razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;  $\alpha_s$  uma constante que assume valor igual a 40 para o caso de pilares internos;  $u_1$  o comprimento de um perímetro de controle a  $d/2$  da face do pilar; e  $d$  a altura útil da laje;  $k$  é um parâmetro que considera o efeito de escala, sendo  $k = \sqrt{\frac{2}{1+0,004 \cdot d}} \leq 1,0$ .

Caso haja necessidade de armadura de punção para o ACI 318 (2019) a distância entre o pilar e a primeira camada de armadura não deve exceder o valor de  $d/2$  e o espaçamento entre suas pernas verticais não deve exceder  $2 \cdot d$ , conforme representado na Figura 2.23.

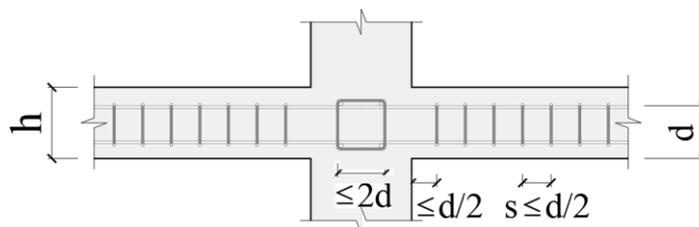


Figura 2.23 – Espaçamento entre pernas verticais de estribos como armadura de punção, de acordo com ACI 318 (2019)

A capacidade de carga fora da região reforçada ao cisalhamento ( $V_{R,out}$ ) para os elementos de laje lisa deve ser calculada de acordo com a Equação 2.7, utilizando a definição de

perímetro de controle ( $u_{out}$ ) mostrada na Figura 2.24. Por outro lado, a capacidade no interior da região reforçada ao cisalhamento ( $V_{R,cs}$ ) válida para estribos, pode ser expressa por meio da Equação 2.8, e o seu valor máximo expresso por meio da Equação 2.9.

$$V_{R,out} = 0,17 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.7}$$

$$V_{R,cs} = 0,17 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d + \left( \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ys,w} \right) \quad \text{Equação 2.8}$$

$$V_{R,cs} < V_{R,m\acute{a}x} = 0,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.9}$$

sendo  $A_{sw}$  a área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento;  $s_r$  a distância entre camadas; e  $f_{ys,w}$  a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, cujo valor não deve exceder 420 MPa.

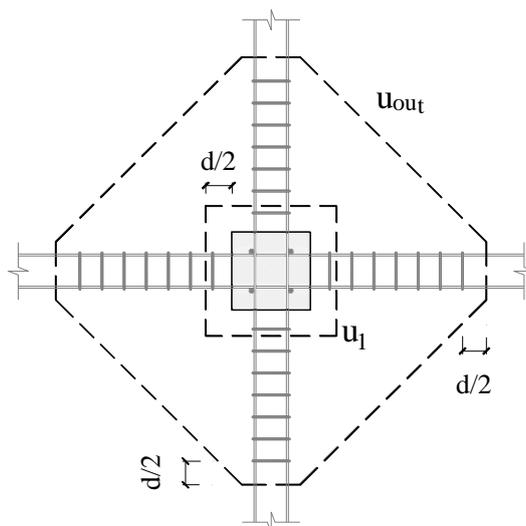


Figura 2.24 – Definição do perímetro de controle para lajes com armadura de punção, de acordo com ACI 318 (2019)

### 2.4.3. Eurocode 2 (2004)

Neste item, considera-se as atualizações EN 1992-1-1:2004/AC:2010 e EN 1992-1-1:2004/prA1:2013 e Eurocode 2 (2004).

A resistência à punção em lajes de concreto armado sem armadura de cisalhamento, com perímetro de controle à  $2 \cdot d$  da face do pilar, deve ser obtida conforme a Equação 2.10.

$$V_{Rc} = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \geq v_{\min} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.10}$$

sendo  $k$  o *size effect*, assumido como  $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$ , com  $d$  em milímetros,  $\rho$  a taxa de armadura de flexão, limitada em 0,02, levando-se em consideração apenas uma faixa de laje igual à dimensão do pilar naquela direção acrescida de  $3 \cdot d$  para cada lado;  $v_{\min}$  é a tensão resistente mínima para o caso de taxas de armadura de flexão muito baixas, igual a  $v_{\min} = 0,035 \cdot k^{2/3} \cdot \sqrt{f_c}$ ; e  $u_1$  é o comprimento do perímetro de controle afastado  $2 \cdot d$  das faces do pilar, como apresentado na Figura 2.25.

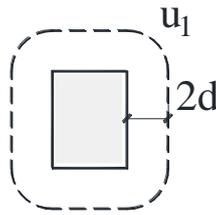


Figura 2.25 – Perímetro de controle ao redor de pilar, na ligação laje-pilar de acordo com o Eurocode 2 (2004)

Caso haja necessidade da utilização de armadura de punção, a resistência deve ser calculada de acordo com a Equação 2.11. A resistência fora da região das armaduras é dada pela Equação 2.12. E a verificação da resistência da diagonal comprimida, próxima das extremidades do pilar, deve ser realizada com a Equação 2.13.

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + \left( 1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right) \leq 1,5 \cdot V_{R,c} \quad \text{Equação 2.11}$$

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.12}$$

$$V_{R,m\acute{a}x} = 0,4 \cdot v \cdot f_c \cdot u_o \cdot d \quad \text{Equação 2.13}$$

onde  $v = 0,6 \cdot (1 - f_{ck}/250)$ , com  $f_{ck}$  em MPa e  $f_{yw,ef}$  sendo a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, de acordo com  $f_{yw,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{yw,d}$ .

A ruptura ocorrendo fora da região das armaduras de cisalhamento pode ser verificada com a Equação 2.10 utilizando o perímetro de controle ( $u_{out}$ ) conforme Figura 2.26.

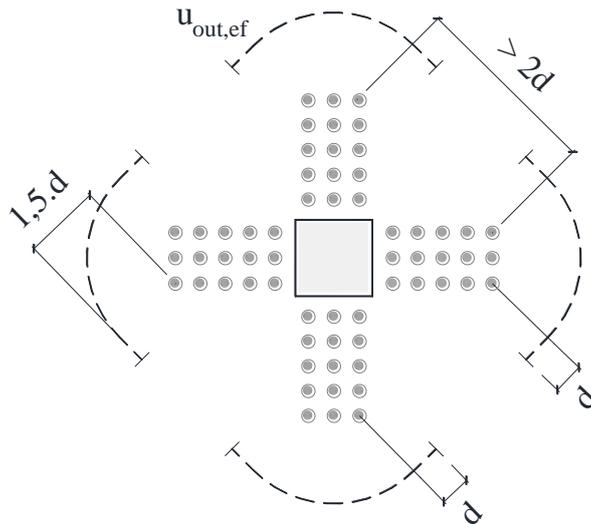


Figura 2.26- Definição do perímetro de controle de acordo com Eurocode 2 (2004) para lajes com armadura de punção

sendo  $u_{out}$  o comprimento do perímetro de controle afastado  $1,5 \cdot d$  da camada mais externa de armaduras de cisalhamento, respeitando-se um limite de  $2 \cdot d$  para a distância máxima entre duas linhas concêntricas, no caso de armaduras dispostas radialmente.

#### 2.4.4. *fib* Model Code 2010 (2013)

O *fib* Model Code 2010 (2013) tem seu modelo de cálculo baseado na Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento, que correlaciona a resistência da laje à punção com a abertura de uma fissura crítica, sendo que essa resistência diminui com o acréscimo de rotação da laje ( $\psi$ ), a qual é função da carga aplicada e da resistência à flexão da laje. Diante disso, a resolução do problema fica condicionada a uma forma iterativa, visto que a resistência é função da carga aplicada, de modo que a solução está condicionada que a carga resistente seja igual a carga solicitante.

Os perímetros críticos considerados pelo código modelo estão ilustrados na Figura 2.27.

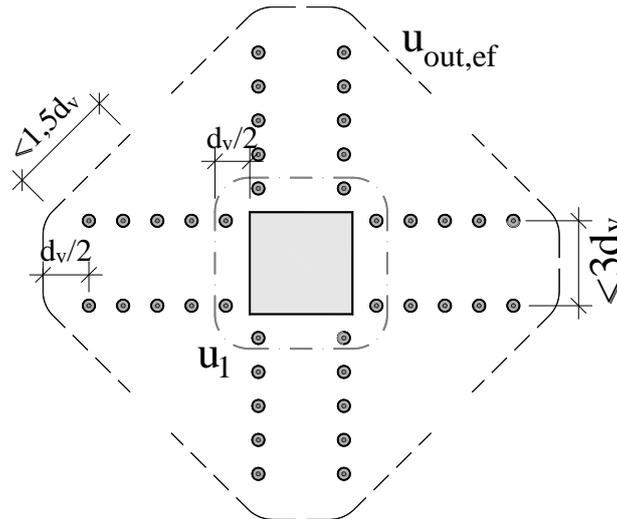


Figura 2.27 – Perímetros de controle *fib* Model Code 2010 (2013)

Para lajes sem armadura de cisalhamento, pode-se fazer a verificação da punção seguindo a Equação 2.14.

$$V_R = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde  $k_\psi$  é um parâmetro que depende da rotação da laje, obtido através da Equação 2.15.

$$k_\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0,6 \quad \text{Equação 2.15}$$

Onde  $d$  é a altura útil da laje em milímetros e  $k_{dg}$  é um parâmetro que depende do diâmetro máximo do agregado ( $d_g$ ) em milímetro, calculado pela Equação 2.16.

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \quad \text{Equação 2.16}$$

A rotação é definida de acordo com quatro níveis de deformação. O Nível I é indicado para um pré-dimensionamento rápido das lajes, sendo a rotação determinada de acordo com Equação 2.17. Já o Nível II é recomendado para o caso típico de dimensionamento de novas estruturas, sendo a rotação determinada de acordo com Equação 2.18. O Nível III de aproximação é indicado para as verificações especiais em estruturas existentes, reduzindo a constante para prevê a rotação com maior precisão, sendo a rotação determinada de acordo com Equação 2.19. Enquanto o Nível IV é utilizado apenas em casos especiais de verificação em que se sabe detalhadamente as características dos materiais e o detalhamento das armaduras, com a determinação da rotação obtida a partir de modelos computacionais não lineares.

$$\psi_1 = 1,5 \cdot \frac{r_q}{d} \cdot \frac{f_{yw}}{E_{sw}} \quad \text{Equação 2.17}$$

$$\psi_2 = 1,5 \cdot \frac{r_q}{d} \cdot \frac{f_{yw}}{E_{sw}} \cdot \left( \frac{m_S}{m_R} \right)^{3/2} \quad \text{Equação 2.18}$$

$$\psi_3 = 1,2 \cdot \frac{r_q}{d} \cdot \frac{f_{yw}}{E_{sw}} \cdot \left( \frac{m_S}{m_R} \right)^{3/2} \quad \text{Equação 2.19}$$

sendo  $r_q$  o raio de carregamento da laje;  $m_S$  o momento solicitante da laje, sugerido como sendo  $m_S = V/8$ ; e  $m_R$  o momento resistente da laje, obtido através de  $m_R = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 (1 - 0,5 \cdot \rho \cdot f_{ys} / f_c)$ .

A resistência à tração diagonal para as lajes com armadura de cisalhamento é calculada de acordo com a Equação 2.20.

$$V_{R,cs} = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d + \sum A_{sw} \cdot f_{sw} \quad \text{Equação 2.20}$$

Onde  $A_{sw}$  corresponde a soma da área de armaduras de cisalhamento presentes em uma faixa entre  $0,35 \cdot d_v$  e  $d_v$ . E a tensão da armadura de cisalhamento é calculada através da Equação 2.21.

$$f_{sw} = \frac{E_{sw} \cdot \psi}{6} \cdot \left( 1 + \frac{f_b}{f_{yw}} \cdot \frac{d_v}{\phi_w} \right) \leq f_{yw} \quad \text{Equação 2.21}$$

sendo  $f_{yw}$  e  $E_{yw}$  a tensão de escoamento e o módulo de escoamento, respectivamente da armadura de cisalhamento; e  $\phi_w$  seu respectivo diâmetro.

A tensão de aderência do concreto  $f_b$  é calculada pela Equação 2.22.

$$f_b = \alpha_2 + \alpha_3 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{25}} \quad \text{Equação 2.22}$$

Onde:

$\alpha_2$  representa a influência do confinamento do cobrimento, podendo ser adotado de forma conservadora igual a 1,0;

$\alpha_3$  representa a influência proporcionada pela armadura de cisalhamento, podendo ser adotado de forma conservadora igual a 0;

$\eta_1$  é o coeficiente que depende do tipo do aço, sendo igual a 1,75 para barras nervuradas;

$\eta_2$  é o coeficiente que representa a posição da armadura de cisalhamento no concreto, assumindo valor de 1,0 para zonas de boa aderência, como aquelas com posição entre 45° e 90° em relação a horizontal;

$\eta_3$  é função do diâmetro da armadura, sendo igual a 1,0 para  $\phi_w \leq 25mm$  ;

$\eta_4$  é função da tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, assumindo valor de 1,0 para aço com  $f_{yw} = 500MPa$  , 0,85 para aço com  $f_{yw} = 600MPa$  e 0,75 para aço com  $f_{yw} = 700MPa$  .

E a resistência a punção na região fora das armaduras de cisalhamento é calculada pela Equação 2.23 em função da altura útil  $d_{v,out} = d_v - c_v$ , com  $c_v \leq d_v / 6$ .

$$V_{Rk,out} = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d_{v,out} \quad \text{Equação 2.23}$$

## 2.5. MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES

Todas as lajes lisas pertencentes ao Programa Experimental em estudo foram projetadas para terem ruptura por punção e, para que isso fosse garantido, foi calculada a resistência à flexão das lajes conforme modelos descritos a seguir, sendo os menores valores de carga encontrados os utilizados para determinar a capacidade à flexão das lajes. Foi utilizado o modelo proposto por Guandalini, Burdet e Muttoni (2009) para a estimativa da resistência à flexão.

É um modelo baseado em linhas de ruptura em que, o momento fletor atuante se iguala ao momento de plastificação da laje ao longo das linhas de ruptura. A determinação do  $V_{flex}$  é definida conforme a Equação 2.24 e Equação 2.25. A Figura 2.28 ilustra as linhas de ruptura propostas para as lajes, de acordo com os autores.

$$V_{Flex} = \frac{4 \cdot m_R}{r_q \cdot (\cos \theta + \sin \theta) - c} \cdot \left( \frac{B^2 - Bc - \frac{c^2}{4}}{B - c} \right) \quad \text{Equação 2.24}$$

$$m_R = A_s \cdot f_y \cdot \left[ d - 0,53 \cdot A_s \cdot \left( \frac{f_y}{f_c} \right) \right] \quad \text{Equação 2.25}$$

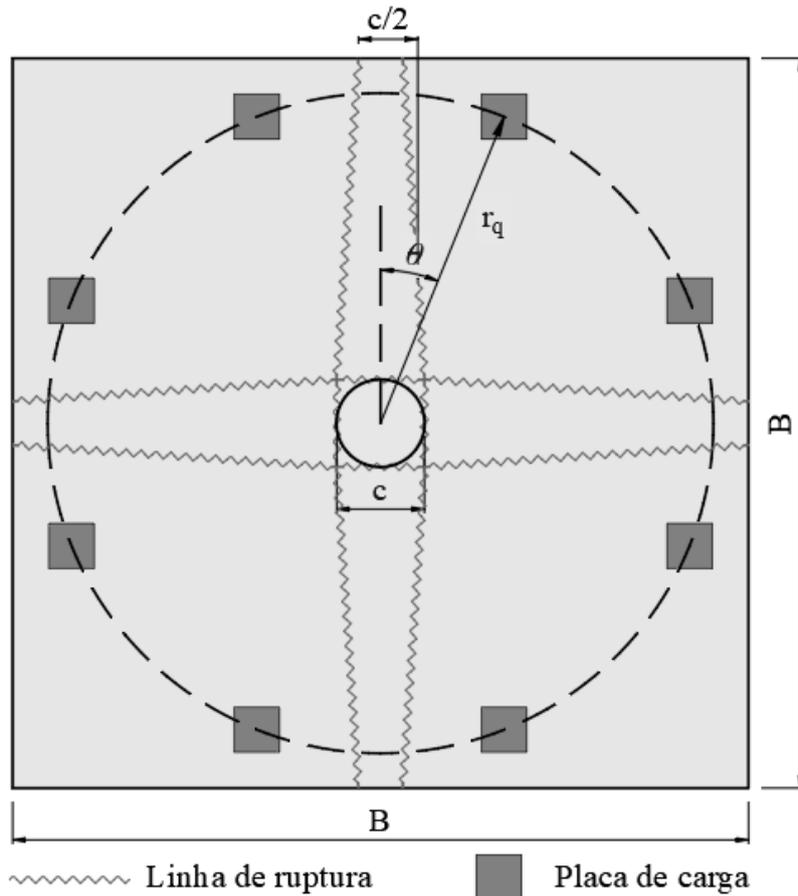


Figura 2.28 – Linhas de ruptura considerado, adaptado de GUANDALINI, BURDET e MUTTONI (2009)

### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Para simular o comportamento das estruturas a diferentes níveis de carregamento, pesquisadores adotam modelos experimentais de forma a retratar o comportamento estrutural. Simular lajes de um pavimento de uma edificação com dimensões reais em um laboratório é uma tarefa árdua e dispendiosa. Porém para estudos que analisam o fenômeno da punção em lajes lisas, modelos locais são suficientes para retratar o comportamento estrutural.

Nesta pesquisa, foram ensaiados à punção 20 modelos locais de ligação laje-pilar submetidos a carregamento simétrico. O primeiro modelo é um modelo de referência, sem armadura de punção, e os outros 19 modelos foram executados com reforço de punção, variando-se a taxa do reforço, quantidade de camadas, forma de ancoragem na armadura de flexão, resistência à compressão do concreto. Todas as peças foram produzidas e ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília - LABEST, respeitando-se as limitações impostas pelo sistema de ensaio adotado (laje de reação e pórtico de ensaio).

O modelo local de laje quadrada representa uma região de momento negativo em torno do pilar considerando um pavimento de geometria e carregamentos simétricos. Essa região é limitada por pontos de momentos nulos à uma distância de aproximadamente 22% do vão entre pilares que é de 5,7 m para o estudo em questão. As lajes então ficaram com dimensões de 2500 x 2500 mm, altura nominal de 180 mm e pilares internos quadrados medindo 300 mm de lado, conforme Figura 3.1.

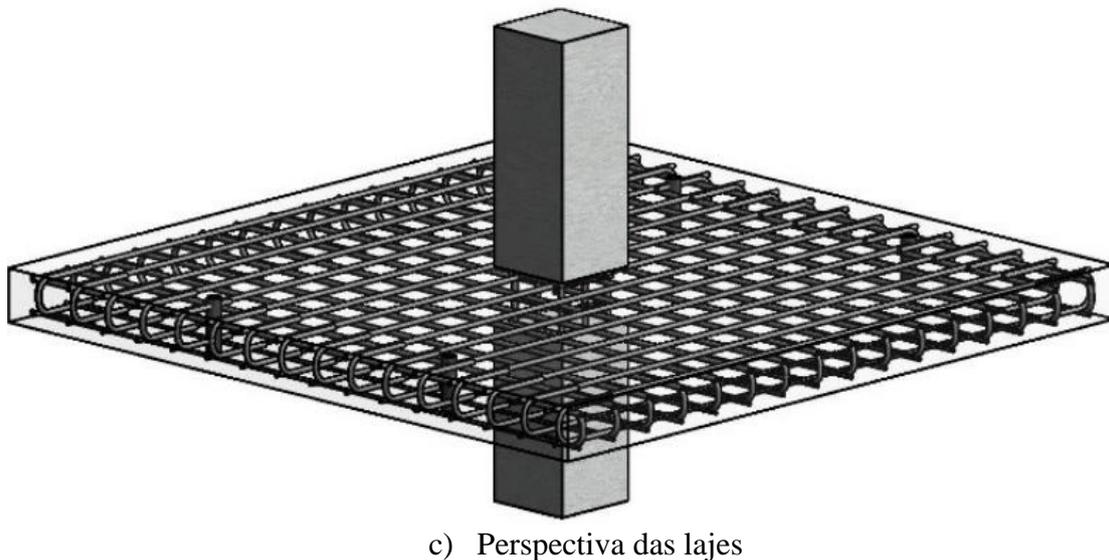
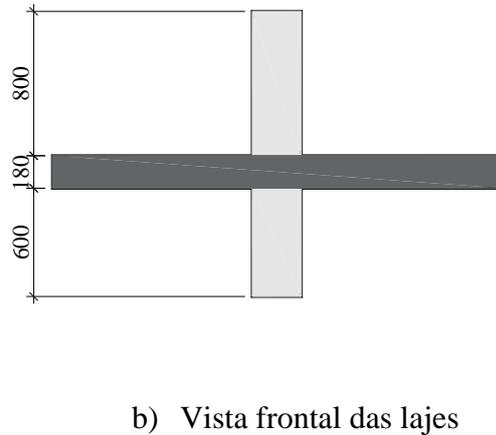
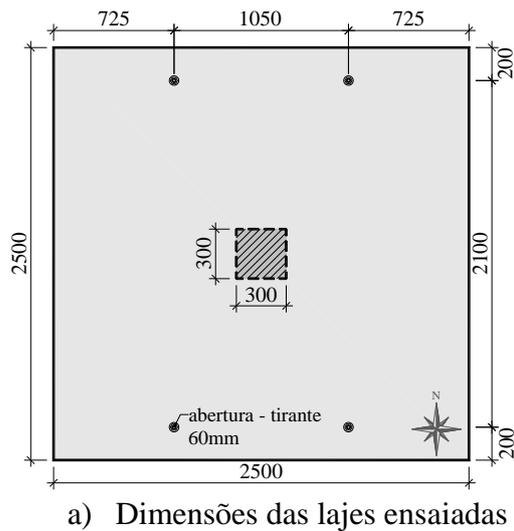


Figura 3.1 - Situação da laje estudada

Ressalta-se que para todas as lajes foram mantidos o detalhamento das armaduras de flexão, com a taxa variando apenas em função da altura útil real medida antes da concretagem (o valor médio da taxa de armadura de flexão  $\rho$  foi de 0,93%), com isso, a ruptura das lajes foi prevista para ocorrer por punção e não por flexão, evidenciando o fenômeno.

### 3.1. CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS

Foram moldadas 20 lajes, sendo de referência por estar sem armadura de punção, denominada *Reference Slab* (RS). As demais 19 lajes possuem como armadura de punção estribos fechados, diferenciando-se basicamente quanto à forma de ancoragem adotada

para esses estribos nas armaduras de flexão. As lajes *FA-01*, *FA-02*, *FA-03*, *FA-04* e *FA-05* (*FA* refere-se a *Full Anchorage*), possuem ancoragem tida como completa, ou seja, os estribos de punção envolvem completamente as armaduras de flexão tracionadas e comprimidas. Já as lajes *CA-01*, *CA-02*, *CA-03*, *CA-04* e *CA-05* (*CA* refere-se a *Compression Anchorage*), possuem ancoragem tida como parcial, ou seja, os estribos de punção não envolvem completamente as armaduras de flexão tracionadas e comprimidas, envolvendo apenas as armaduras comprimidas. As lajes *TA-02*, *TA-03*, *TA-04* e *TA-05* (*TA* refere-se a *Tension Anchorage*), possuem também ancoragem tida como parcial, ou seja, os estribos de punção não envolvem completamente as armaduras de flexão tracionadas e comprimidas, porém envolvem apenas as armaduras tracionadas. E por fim, as lajes *NA-01*, *NA-02*, *NA-03*, *NA-04* e *NA-05* (*NA* refere-se a *None Anchorage*), não possuem ancoragem, ou seja, os estribos de punção não envolvem as armaduras de flexão tracionadas e nem as comprimidas.

Ressalta-se que os ensaios realizados nessa pesquisa embasaram outras, sendo que a primeira série de ensaios serviu como base para a defesa de Projeto Final de Curso de Djalma da Costa Souza (UnB), a terceira série de ensaios serviu como base para a dissertação de mestrado apresentada por Rodolfo de Azevedo Palhares (UnB), e a quinta série de ensaios foi base para a dissertação de mestrado a ser apresentada por Victor Hugo Dalosto de Oliveira (UnB).

As características construtivas das lajes são apresentadas na Tabela 3.1, bem como as pesquisas a que cada laje pertence. E para uma melhor compreensão das características das lajes ensaiadas, relacionadas com as características das armaduras de punção, apresenta-se um resumo na Tabela 3.2.

Ressalta-se que para determinação da altura útil foram feitas 10 medições em 5 pontos de cada laje, e o valor final equivale à média aritmética dos valores aferidos. A taxa de armadura foi determinada conforme prescrição da ABNT NBR 6118 (2014) e do Eurocode 2 (2004), levando-se em conta uma largura da laje igual à largura do pilar acrescida de  $3 \cdot d$  para cada lado.

Tabela 3.1 - Descrição das lajes em estudo

<b>Laje</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pesquisas Relacionadas</b>
RS	Laje de referência, sem armadura de punção	1 ; 2 ; 3
FA-01	Laje com armadura de punção totalmente ancorada, ou seja, ancorando na armadura de flexão comprimida e tracionada	1
CA-01	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão comprimida	1
NA-01	Laje com armadura de punção parcialmente sem ancoragem, ou seja, os estribos não envolvem as armaduras de flexão	1
FA-02	Laje com armadura de punção totalmente ancorada, ou seja, ancorando na armadura de flexão comprimida e tracionada	--
CA-02	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão comprimida	--
TA-02	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão tracionada	--
NA-02	Laje com armadura de punção parcialmente sem ancoragem, ou seja, os estribos não envolvem as armaduras de flexão	--
FA-03	Laje com armadura de punção totalmente ancorada, ou seja, ancorando na armadura de flexão comprimida e tracionada	2
CA-03	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão comprimida	2
TA-03	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão tracionada	2
NA-03	Laje com armadura de punção parcialmente sem ancoragem, ou seja, os estribos não envolvem as armaduras de flexão	2
FA-04	Laje com armadura de punção totalmente ancorada, ou seja, ancorando na armadura de flexão comprimida e tracionada	--
CA-04	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão comprimida	--
TA-04	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão tracionada	--
NA-04	Laje com armadura de punção parcialmente sem ancoragem, ou seja, os estribos não envolvem as armaduras de flexão	--
FA-05	Laje com armadura de punção totalmente ancorada, ou seja, ancorando na armadura de flexão comprimida e tracionada	3
CA-05	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão comprimida	3
TA-05	Laje com armadura de punção parcialmente ancorada, ou seja, ancorando apenas na armadura de flexão tracionada	3
NA-05	Laje com armadura de punção parcialmente sem ancoragem, ou seja, os estribos não envolvem as armaduras de flexão	3
<i>1 – Projeto Final de Graduação de Djalma da Costa Souza (UnB)</i> <i>2 – Dissertação de Mestrado de Rodolfo de Azevedo Palhares (UnB)</i> <i>3 – Dissertação de Mestrado de Victor Hugo Dalosto de Oliveira (UnB)</i>		

Tabela 3.2 - Características principais das lajes.

Série	Laje	$d$ (mm)	$f_{cm}$ (MPa)	$\rho$ (%)	Armadura de Punção					
					Cam.	Anc.	$\Phi$ (mm)	$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> )	$S_o$ e $S_r$ (mm)	$\rho_{sw}$ (%)
1	RS	148	30	0,92	-	-	-	-	-	-
	FA-01	147		0,93	5	Total	8	4,02	80	0,30
	CA-01	148		0,91		Parcial				0,30
	NA-01	148		0,92		Sem				0,30
2	FA-02	145	15	0,95	5	Total	5	1,57	72	0,13
	CA-02	148		0,92		Parcial				0,13
	TA-02	144		0,96		Parcial				0,13
	NA-02	147		0,93		Sem				0,13
3	FA-03	146	30	0,94	5	Total	5	1,57	72	0,13
	CA-03	148		0,92		Parcial				0,13
	TA-03	147		0,93		Parcial				0,13
	NA-03	148		0,92		Sem				0,13
4	FA-04	147	30	0,93	8	Total	8	4,02	65	0,37
	CA-04	147		0,93		Parcial				0,37
	TA-04	148		0,91		Parcial				0,37
	NA-04	148		0,91		Sem				0,37
5	FA-05	143	30	0,97	5	Total	5	1,57	72	0,13
	CA-05	142		0,98		Parcial				0,13
	TA-05	143		0,97		Parcial				0,13
	NA-05	144		0,96		Sem				0,13

**Notas:**

- 1) Todas as armaduras de punção são do tipo Estribo Fechado com distribuição em Cruz (duas direções);
- 2) As lajes são apoiadas em pilares quadrados internos com 300 mm de lado;
- 3) As dimensões de todas as lajes são 2500 mm x 2500 mm x 180 mm.
- 4)  $A_{sw}$  é a área de aço por camada de estribo

Cabe destacar que devido ao concreto especificado para a Série 2 ter vindo diferente do solicitado, valor de  $f_c$  inferior ao especificado (foi solicitado 30 MPa e foi entregue com valor igual a 14,9 MPa), repetiu-se a série, agora com o concreto com resistência correta, na Série 3. As Série 4 e 5 têm seus estribos detalhados de forma a abraçar pelos cantos a armadura de flexão, mesmo com a variação de ancoragem proposta, com isso busca-se um detalhamento dos estribos conforme preconizado nas normas. A Série 5 é uma repetição da Série 3 variando apenas o detalhamento dos estribos como mencionado.

## 3.2. DETALHAMENTO DAS ARMADURAS

### 3.2.1. Armadura de flexão

A armadura das lajes foi composta por barras de aço CA50 nas faces superior e inferior das lajes, dispostas ortogonalmente de forma simétrica formando malhas, ressaltasse que foi utilizado o mesmo detalhamento das armaduras para todas as lajes. A armadura de flexão tracionada (superior) é composta por barras de 16,0 mm de diâmetro com espaçamento de 155 mm nas duas direções, enquanto a armadura de flexão comprimida (inferior) é composta de barras de 10,0 mm também com 155 mm de espaçamento; foi considerado um cobrimento de 2 cm em ambas as faces. Como ancoragem das barras tracionadas, foram utilizados ganchos em forma de “U” nas suas extremidades, com diâmetro de 16,0 mm. Para garantir o posicionamento das barras, foi utilizado arame recozido número 18 em cada encontro de armaduras. A Figura 3.2 mostra o projeto com o detalhamento das armaduras de flexão das lajes.

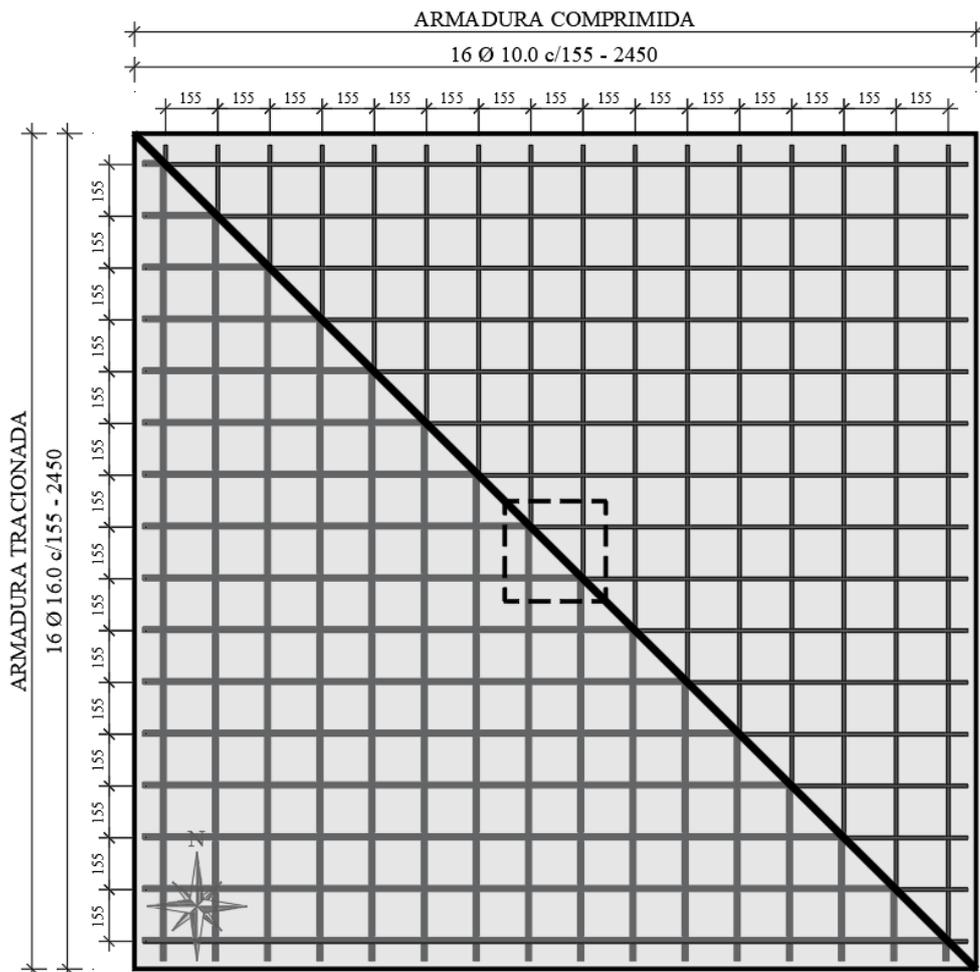


Figura 3.2 - Detalhamento das armaduras de flexão das lajes (medidas em mm)

Para uma melhor visualização da disposição das armaduras de flexão, foi detalhado na Figura 3.3 um corte esquemático da seção transversal da laje, no meio da mesma, e apresentado, também, o detalhe dos ganchos de ancoragem. Já com a Figura 3.4 demonstra-se o posicionamento dos ganchos de ancoragens, bem como sua instalação.

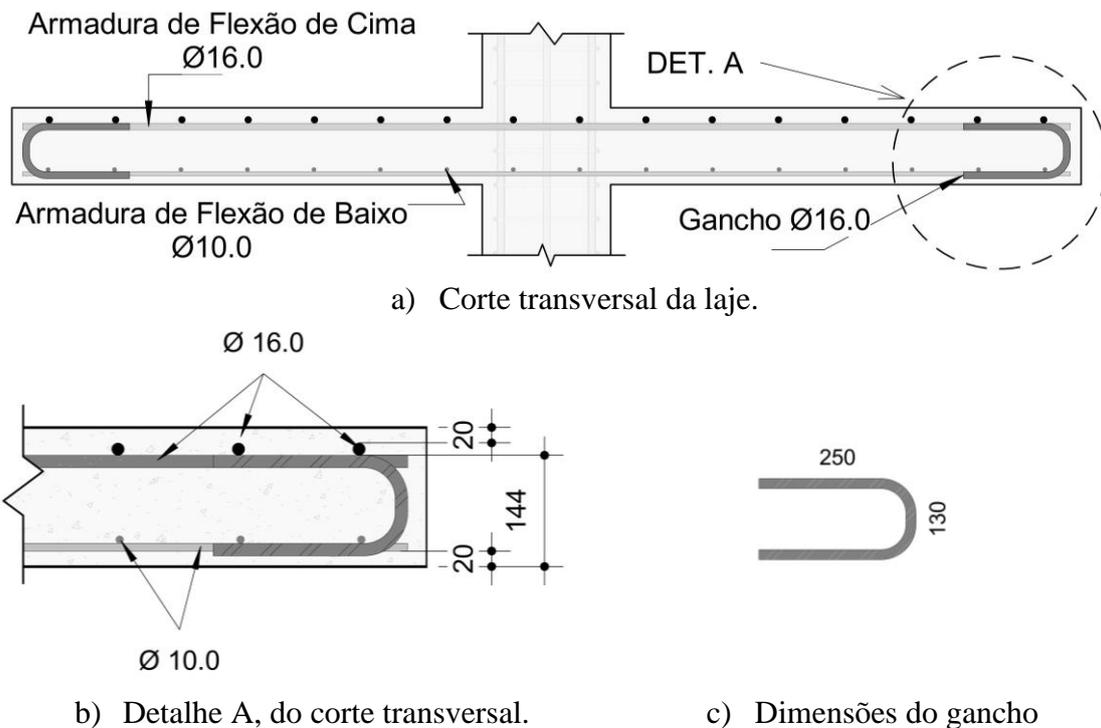


Figura 3.3 – Corte transversal das lajes e detalhe da ancoragem (medidas em mm)

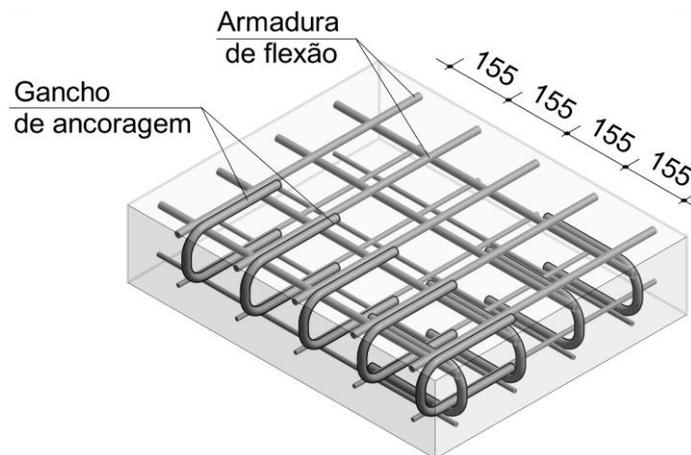
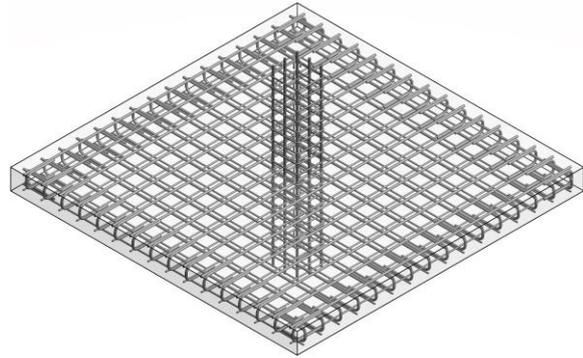


Figura 3.4 – Detalhe do posicionamento dos ganchos de ancoragem (medidas em mm)  
 Após a montagem de todas as armaduras, todas as lajes foram cuidadosamente posicionadas nas fôrmas, que serão descritas no item 3.4.1, conforme ilustra a Figura 3.5.



a) Laje RS posicionada na fôrma



b) Perspectiva da armadura do modelo estrutural

Figura 3.5 – Detalhe da armadura das lajes

### 3.2.2. Armadura de punção

A armadura de punção utilizada como reforço da ligação laje-pilar é do tipo estribo fechado (ver Figura 3.6), com distribuição em cruz simetricamente em torno do pilar.

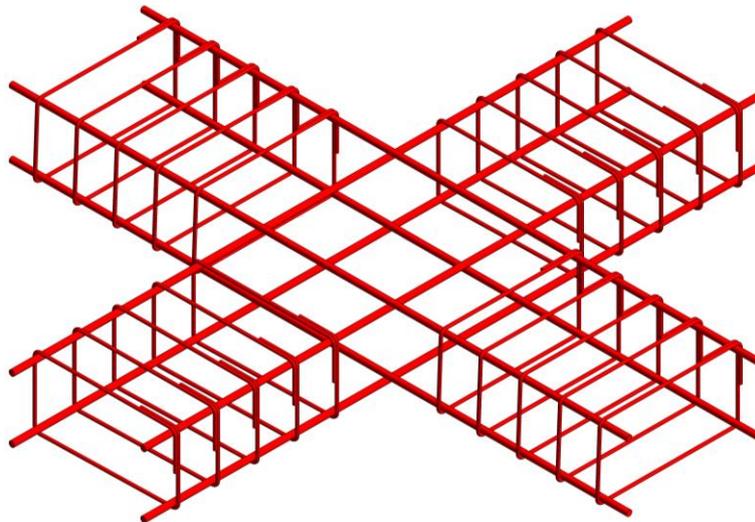


Figura 3.6 – Perspectiva do arranjo em cruz da armadura de cisalhamento, do tipo estribo, utilizada nesta pesquisa

As particularidades de cada laje, com relação às armaduras de cisalhamento, são destacadas na Tabela 3.3. Cabe ressaltar que a Série 3 se difere da Série 2 em relação à resistência do concreto e, a Série 5 foi uma repetição da Série 3 porém com as pernas dos estribos mais próximas, de modo que as armaduras de flexão (mantido o espaçamento de 155 mm) passem pelos cantos dos estribos.

Tabela 3.3 – Características da armadura de punção

Série	Lajes	Armadura de Punção							
		Camadas	Ancoragem	$\Phi$ (mm)	$A_{sw} /$ cam. (cm <sup>2</sup> )	$S_0$ (mm)	$S_r$ (mm)	$\rho_{sw}$ (%)	$A_{sw} /$ laje (cm <sup>2</sup> )
1	RS	-	-	-	-	-	-	-	-
	FA-01	5	Total	8,0	4,02	80	80	0,302	20,1
	CA-01		Parcial					0,302	20,1
	NA-01		Sem					0,302	20,1
2	FA-02	5	Total	5,0	1,57	72	72	0,132	7,9
	CA-02		Parcial					0,131	7,9
	TA-02		Parcial					0,132	7,9
	NA-02		Sem					0,131	7,9
3	FA-03	5	Total	5,0	1,57	72	72	0,132	7,9
	CA-03		Parcial					0,131	7,9
	TA-03		Parcial					0,131	7,9
	NA-03		Sem					0,131	7,9
4	FA-04	8	Total	8,0	4,02	65	65	0,372	32,2
	CA-04		Parcial					0,373	32,2
	TA-04		Parcial					0,371	32,2
	NA-04		Sem					0,371	32,2
5	FA-05	5	Total	5,0	1,57	72	72	0,132	7,9
	CA-05		Parcial					0,131	7,9
	TA-05		Parcial					0,131	7,9
	NA-05		Sem					0,131	7,9

Sendo  $S_0$  a distância entre o pilar e a primeira linha de estribos;  $S_r$  o espaçamento entre os estribos;  $\Phi_w$  o diâmetro dos estribos; foi apresentada a quantidade de armadura por camada, em  $A_{sw}/cam.$ , e por laje, em  $A_{sw}/laje$ .

O foco principal da pesquisa está na análise da influência da variação da ancoragem da armadura de punção na resistência última da laje, e para melhor entendimento dessa variação, ilustrasse nas Figura 3.7 a Figura 3.21 (todas as medidas estão em milímetros) os possíveis tipos de ancoragem e detalhamento dos estribos, para cada laje. Ressalta-se

que as normas indicam que a ancoragem deve envolver ambas as armaduras de flexão, de cima e de baixo.

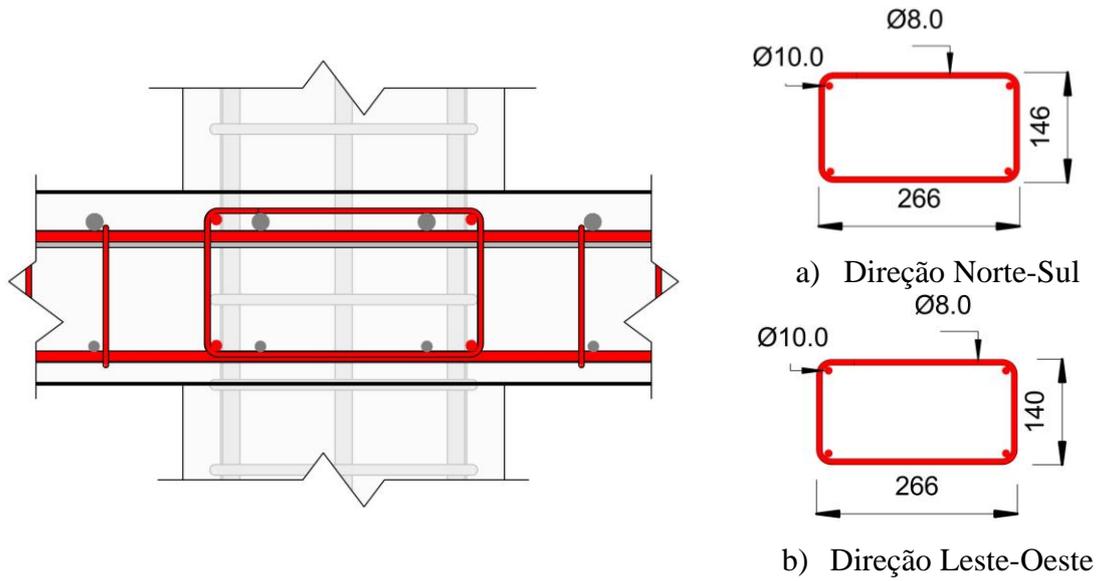


Figura 3.7 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-01

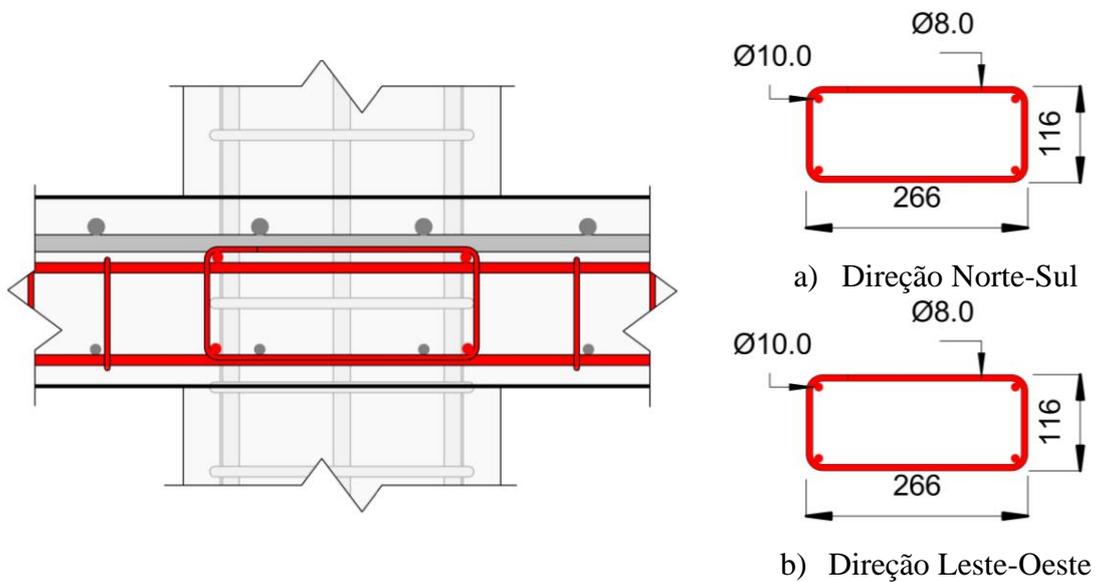
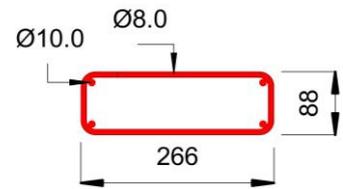
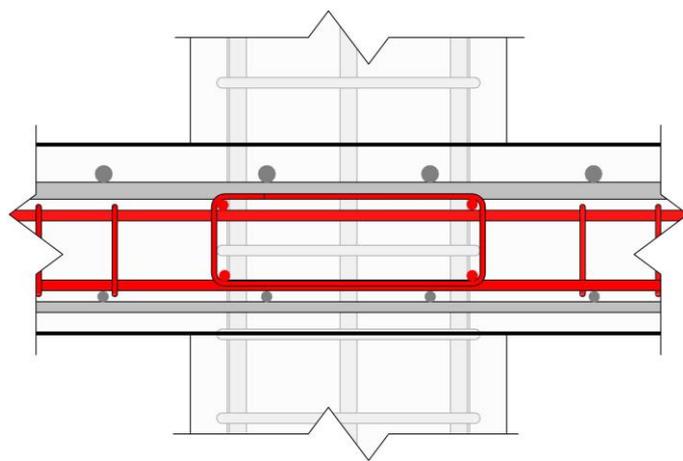
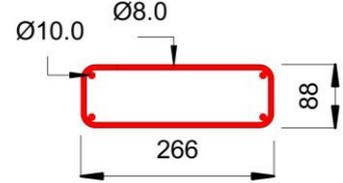


Figura 3.8 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-01

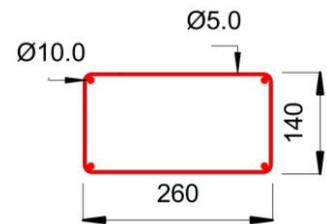
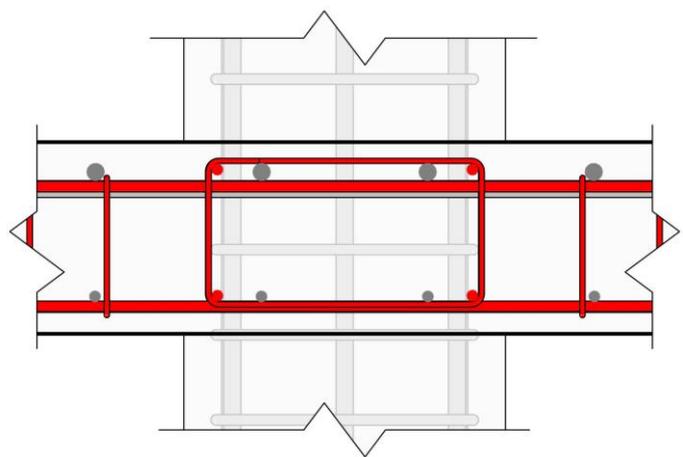


a) Direção Norte-Sul

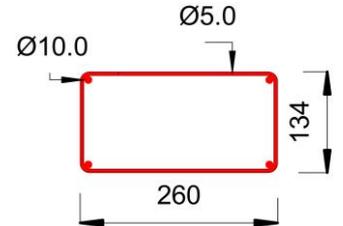


b) Direção Leste-Oeste

Figura 3.9 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje NA-01

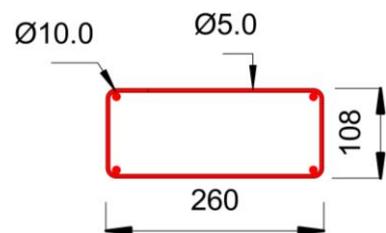
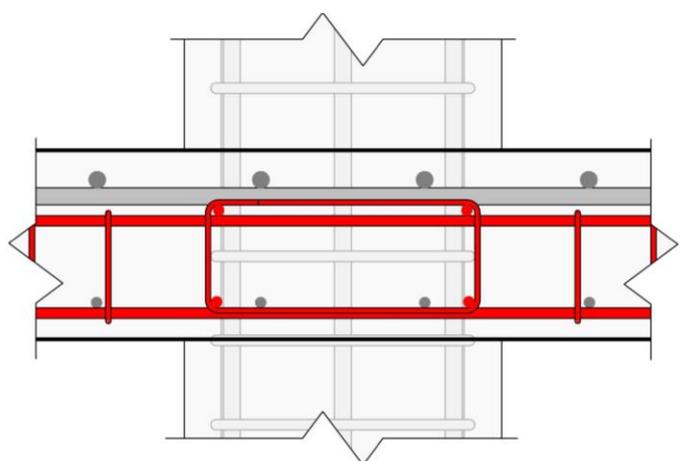


a) Direção Norte-Sul

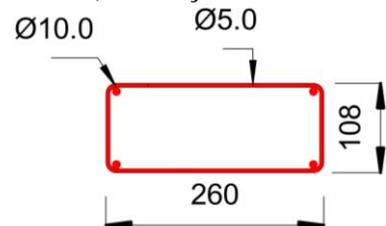


b) Direção Leste-Oeste

Figura 3.10 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-02 e FA-03



a) Direção Norte-Sul



b) Direção Leste-Oeste

Figura 3.11 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-02 e CA-03

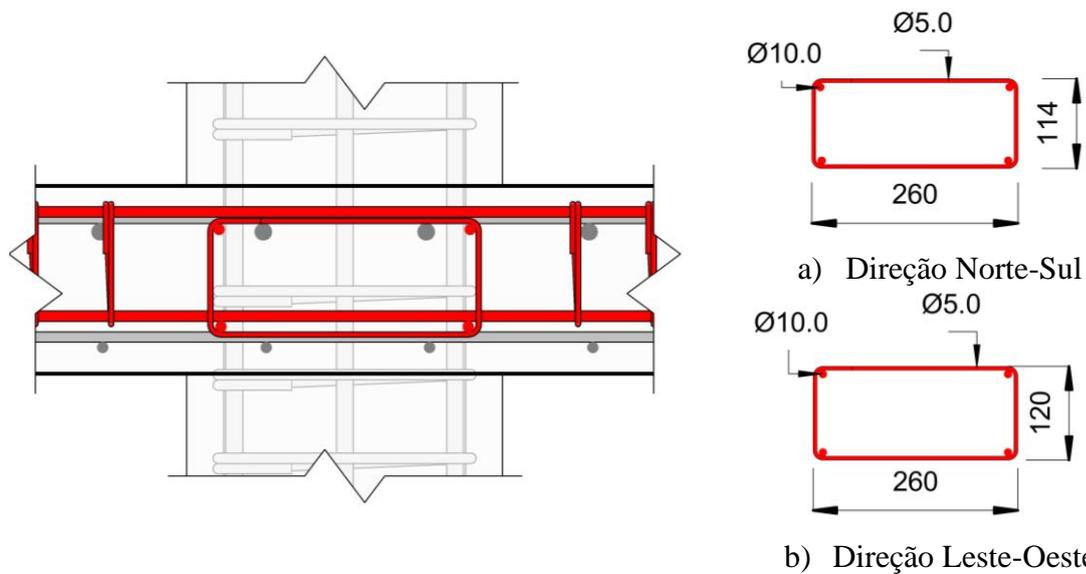


Figura 3.12 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje TA-02 e TA-03

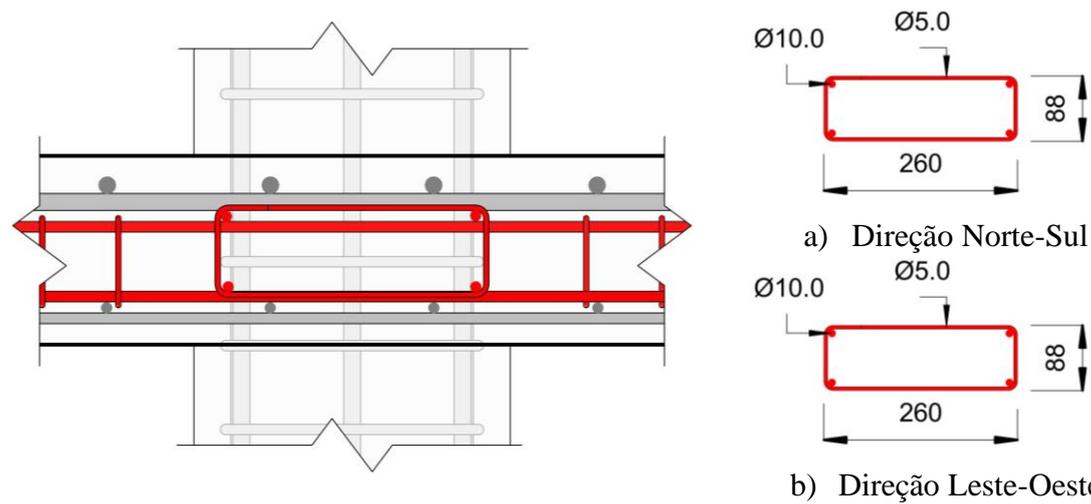


Figura 3.13 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje NA-02 e NA-03

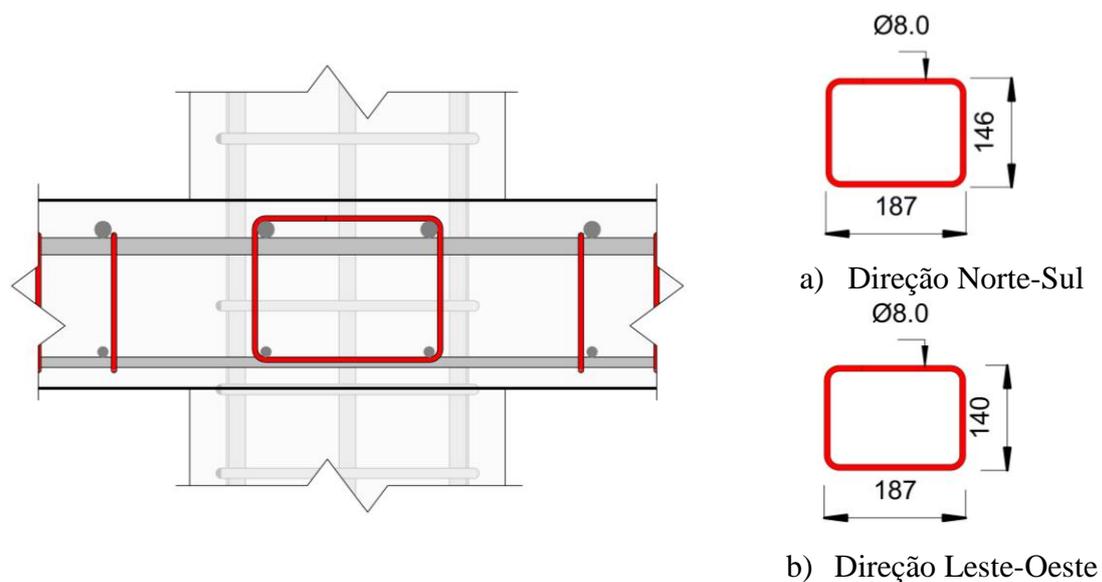


Figura 3.14 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-04

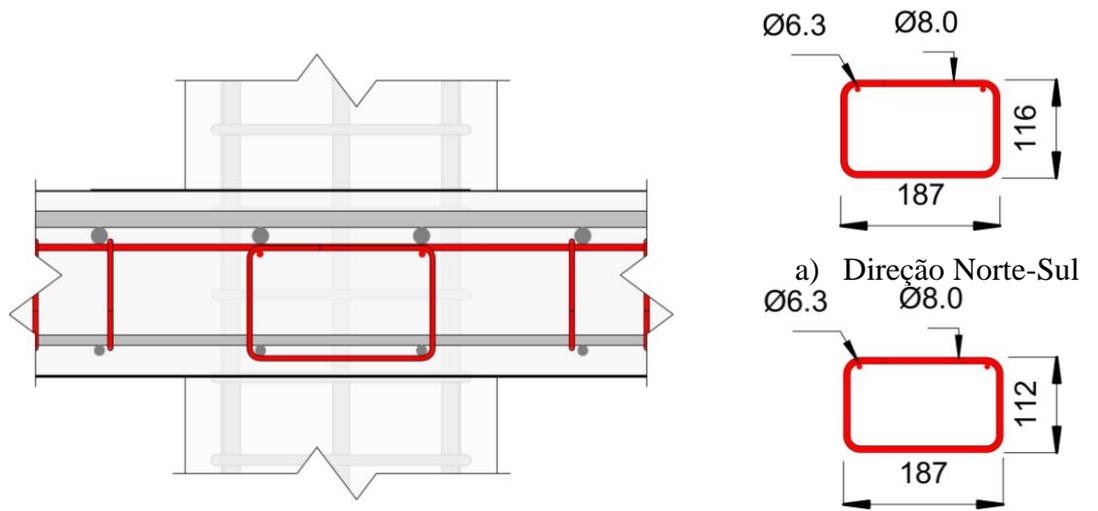


Figura 3.15 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-04

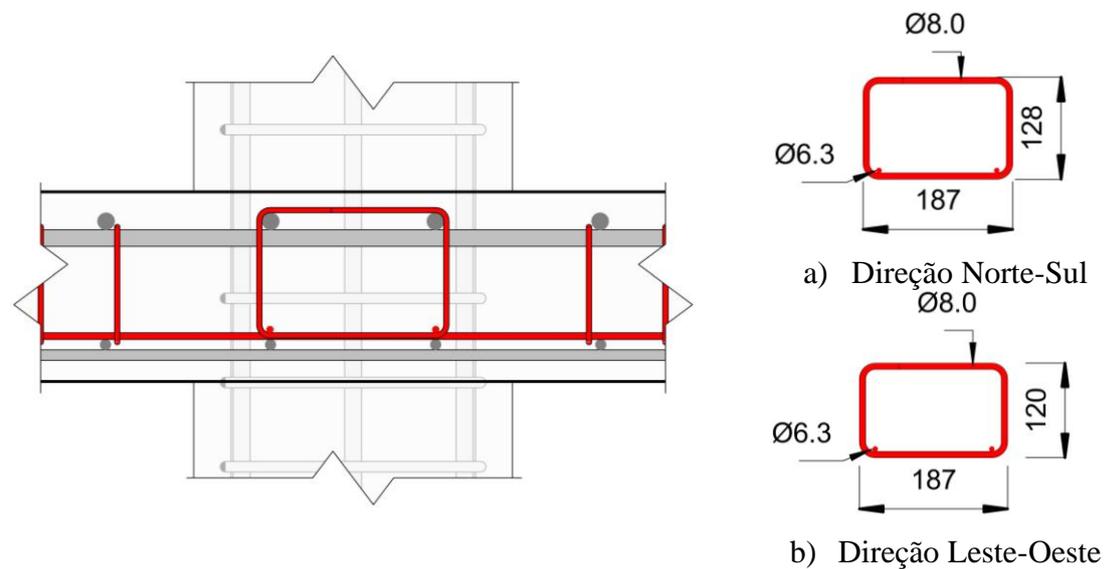


Figura 3.16 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje TA-04

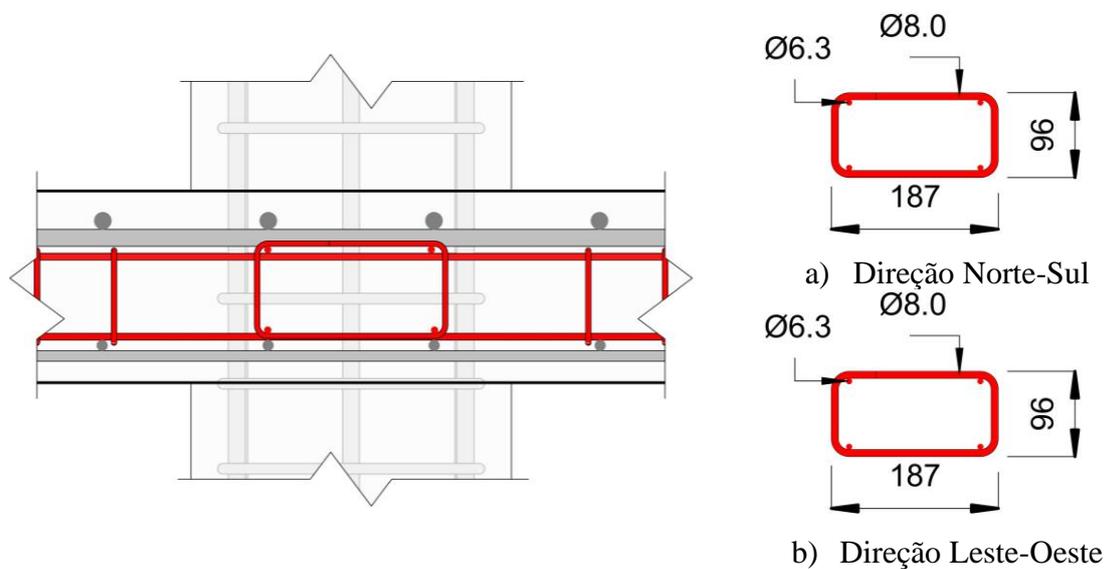


Figura 3.17 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje NA-04

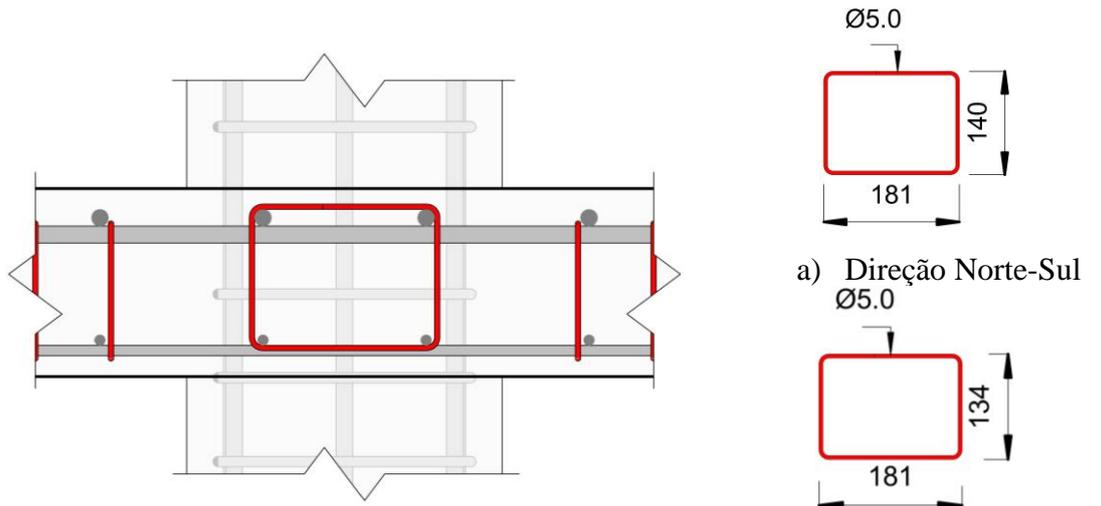


Figura 3.18 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje FA-05

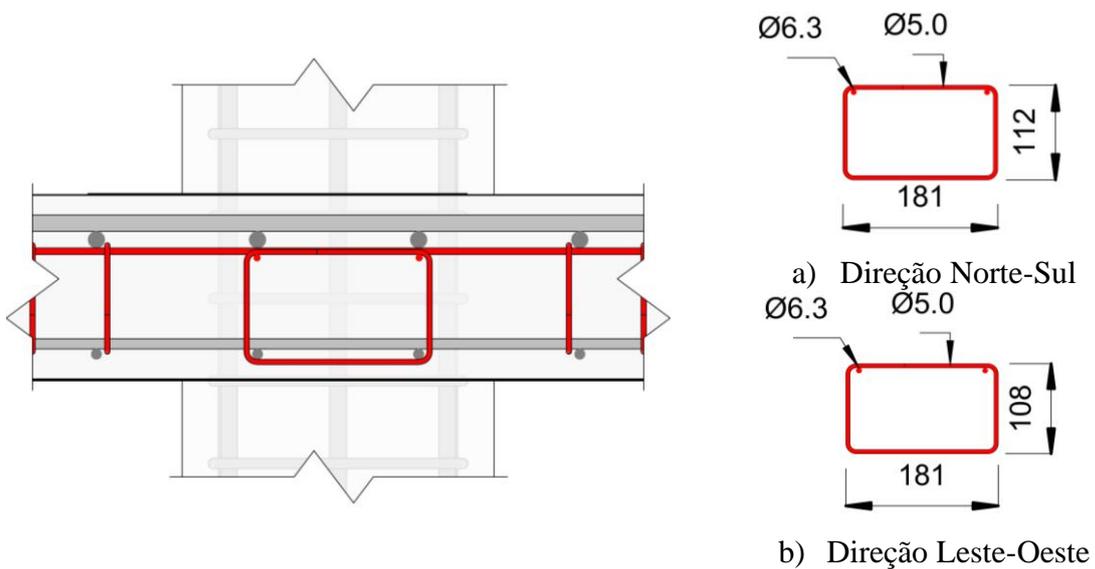


Figura 3.19 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje CA-05

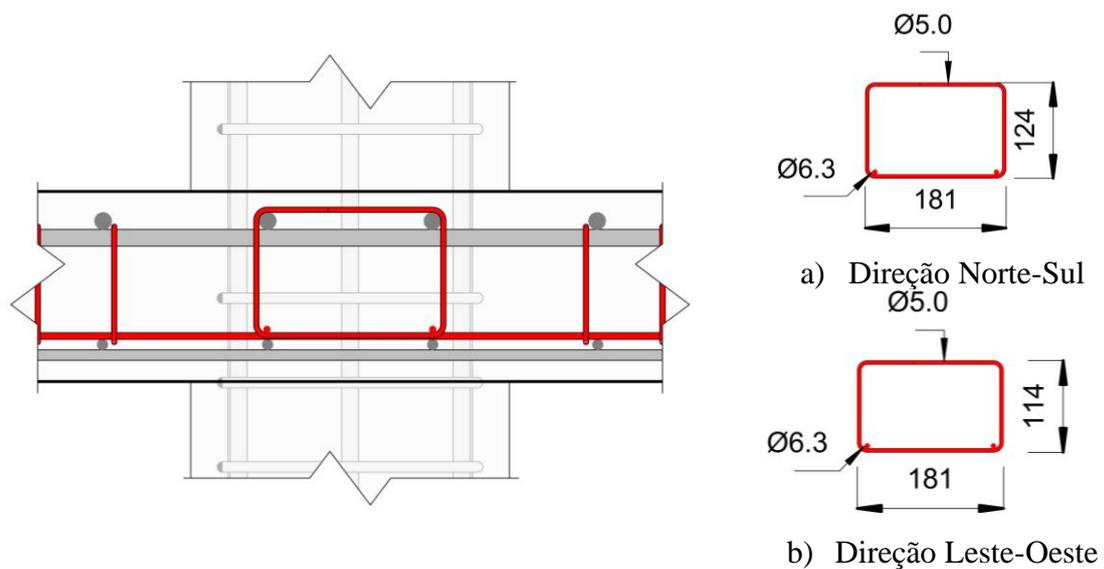
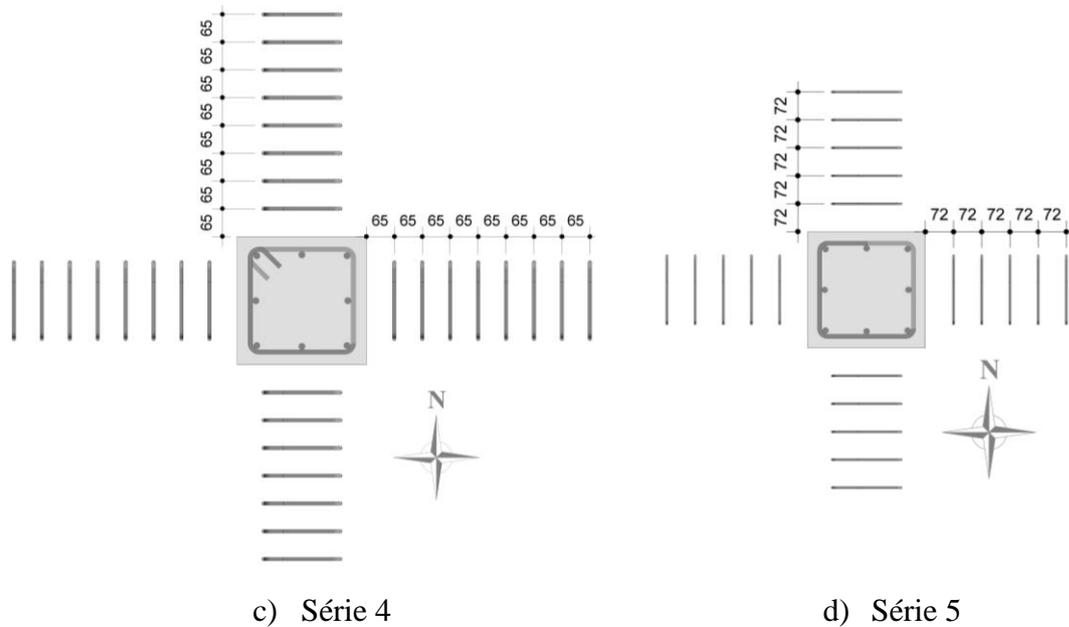


Figura 3.20 – Detalhe da ancoragem e dimensões dos estribos, para laje TA-05





c) Série 4 d) Série 5  
 Figura 3.22 – Distribuição das armaduras de punção em cada série de concretagem  
 (Continuação)

Para melhor visualização do detalhamento das armaduras de punção, bem como de sua ancoragem, foram detalhados da Figura 3.23 à Figura 3.37 cortes transversais Norte-Sul e Leste-Oeste das lajes.

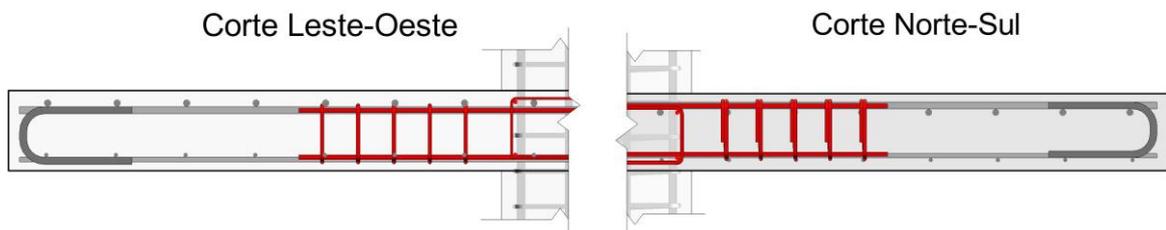


Figura 3.23 – Representação da armadura de punção da laje FA-01

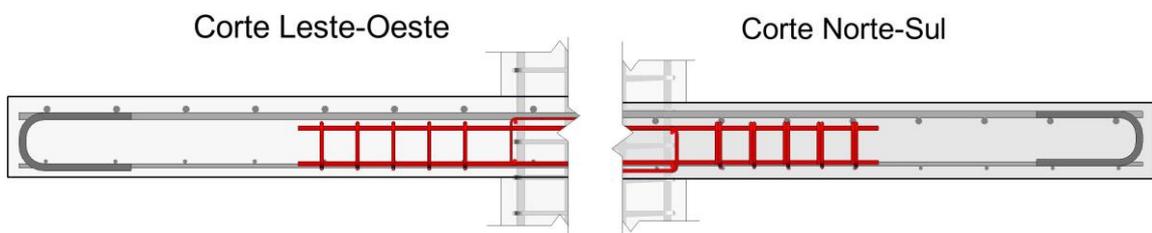


Figura 3.24 – Representação da armadura de punção da laje CA-01

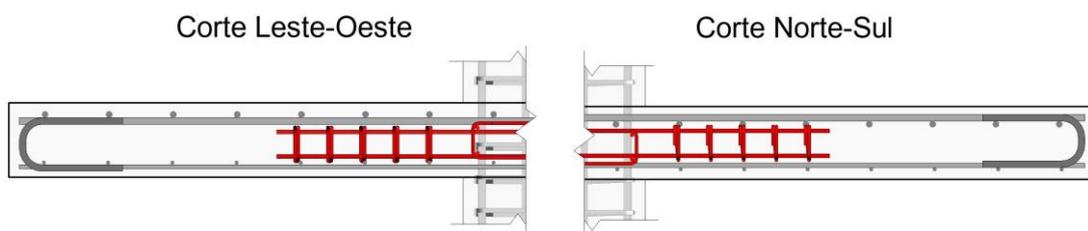


Figura 3.25 – Representação da armadura de punção da laje NA-01

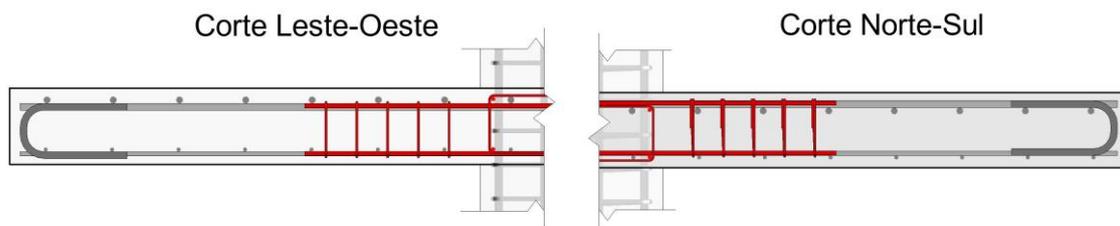


Figura 3.26 – Representação da armadura de punção da laje FA-02 e FA-03

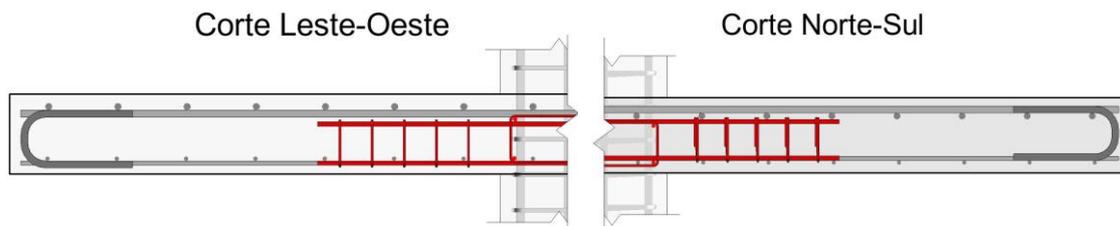


Figura 3.27 – Representação da armadura de punção da laje CA-02 e CA-03

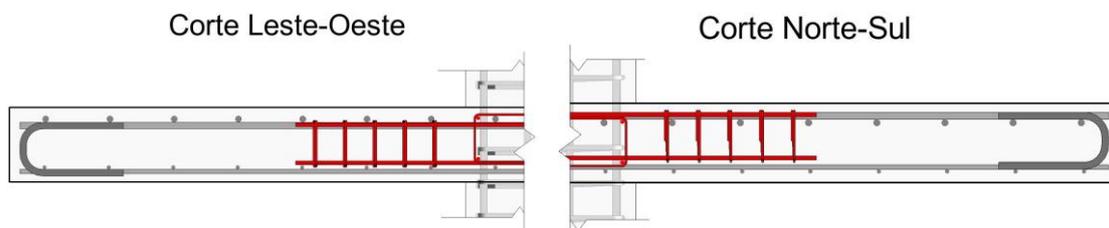


Figura 3.28 – Representação da armadura de punção da laje TA-02 e TA-03

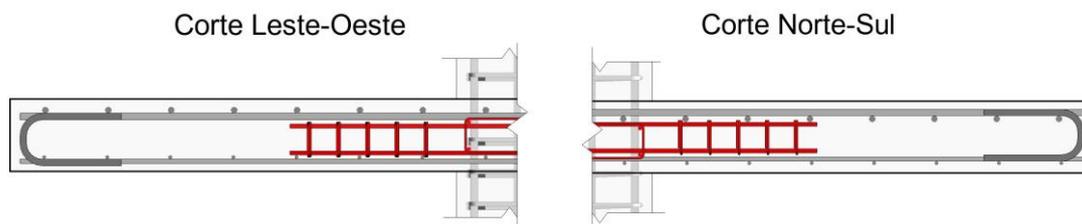


Figura 3.29 – Representação da armadura de punção da laje NA-02 e NA-03

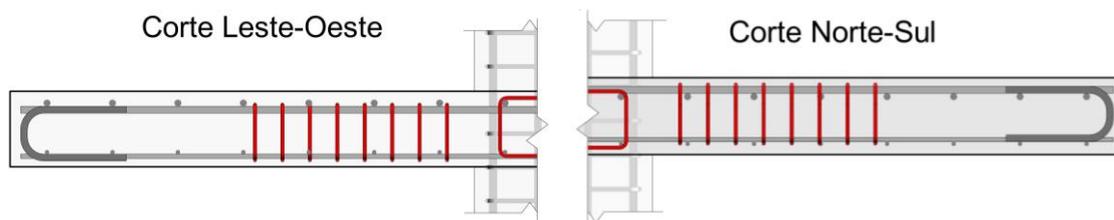


Figura 3.30 – Representação da armadura de punção da laje FA-04

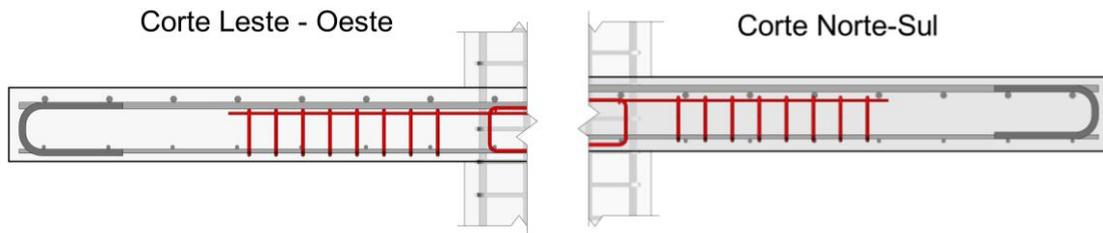


Figura 3.31 – Representação da armadura de punção da laje CA-04

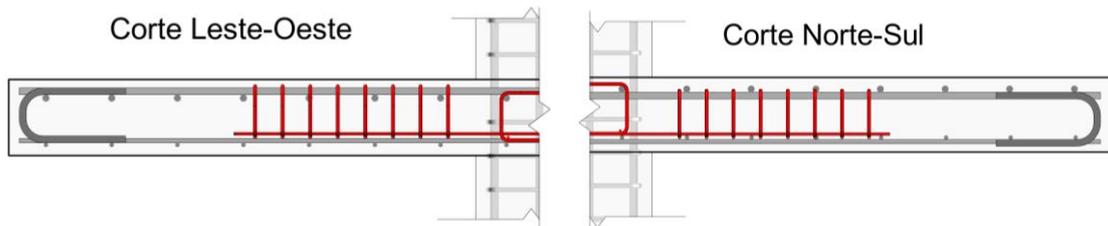


Figura 3.32 – Representação da armadura de punção da laje TA-04

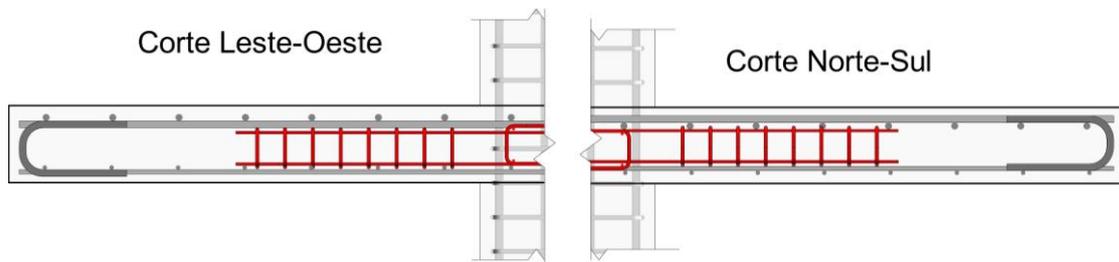


Figura 3.33 – Representação da armadura de punção da laje NA-04

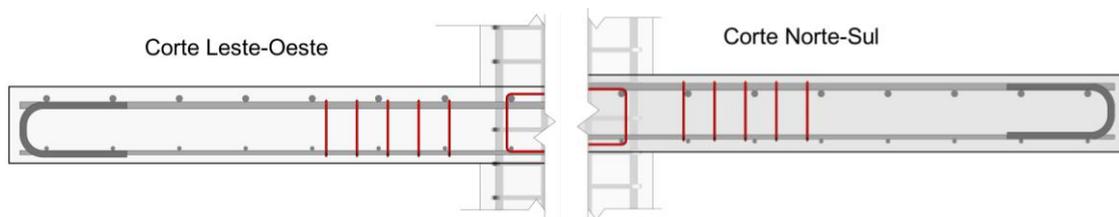


Figura 3.34 – Representação da armadura de punção da laje FA-05

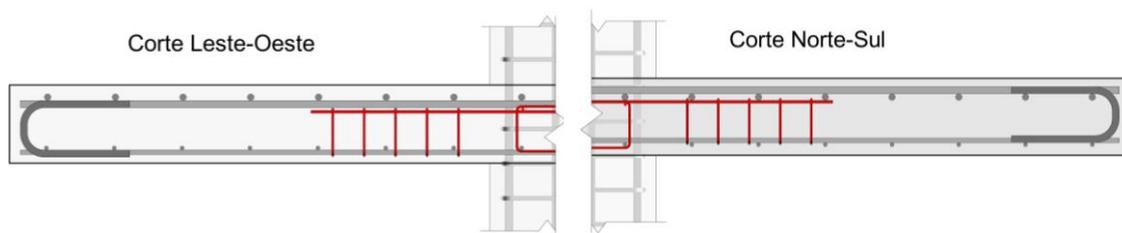


Figura 3.35 – Representação da armadura de punção da laje CA-05

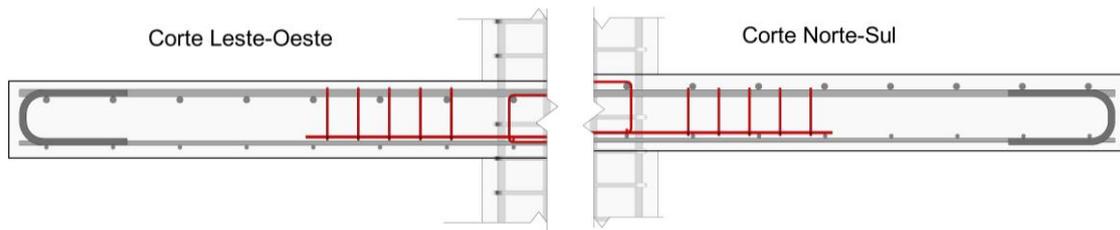


Figura 3.36 – Representação da armadura de punção da laje TA-05

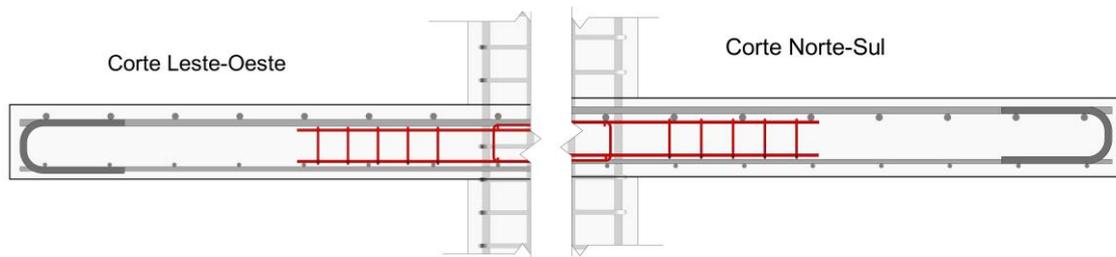


Figura 3.37 – Representação da armadura de punção da laje NA-05

Para uma melhor visualização das armaduras de punção e sua variação de ancoragem, na Figura 3.38 tem-se exemplos de como essa armadura envolve as armaduras de flexão (*total, parcial e sem*) para 4 lajes.



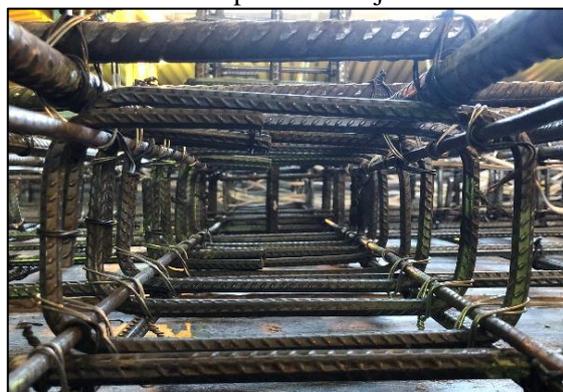
a) Ancoragem *total* – laje FA-04



b) Ancoragem *parcial*, na armadura de flexão comprimida – laje CA-04



c) Ancoragem *parcial*, na armadura de flexão tracionada – laje TA-04

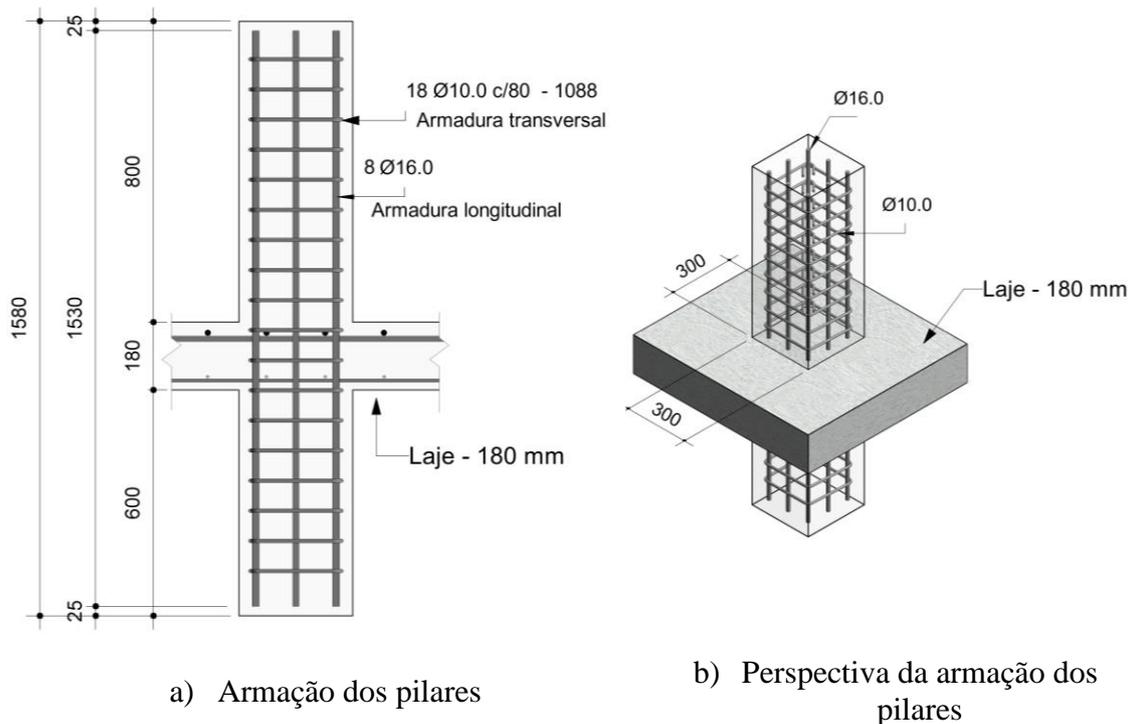


d) *Sem* ancoragem – Laje NA-04

Figura 3.38 – Detalhe da variação de ancoragem da armadura de punção

### 3.2.3. Armadura dos pilares

Para todos os pilares foi mantido o detalhamento de armaduras, composto por 8 barras longitudinais de aço CA-50 com 16,0 mm de diâmetro, com estribos de 10,0 mm de diâmetro espaçados a cada 80 mm, foi adotado cobrimento igual a 25 mm. A Figura 3.39 detalha essas armaduras.



a) Armação dos pilares  
b) Perspectiva da armação dos pilares  
Figura 3.39 - Projeto de armação dos pilares (medidas em mm)

## 3.3. INSTRUMENTAÇÃO

### 3.3.1. Deslocamentos verticais

Para medição dos deslocamentos verticais foram selecionados 12 pontos na parte superior das lajes, utilizando-se LVDT's - *Linear Variable Differential Transformer* (transdutores de variação de deslocamento linear), modelo WA50, fabricados pela empresa HBM. Os LVDT's de 1 a 6 foram posicionados na direção Leste-Oeste em sequência e, na direção Sul-Norte foram posicionados os LVDT's 7 a 12, também em sequência. Ressaltasse que para uma leitura precisa há a necessidade de um adequado posicionamento do LVDT e, para isso, foram utilizadas hastes metálicas para apoiá-los, assim são evitadas eventuais

deslocabilidades durante o ensaio. Na Figura 3.40 estão mostradas as posições dos LVDT's.

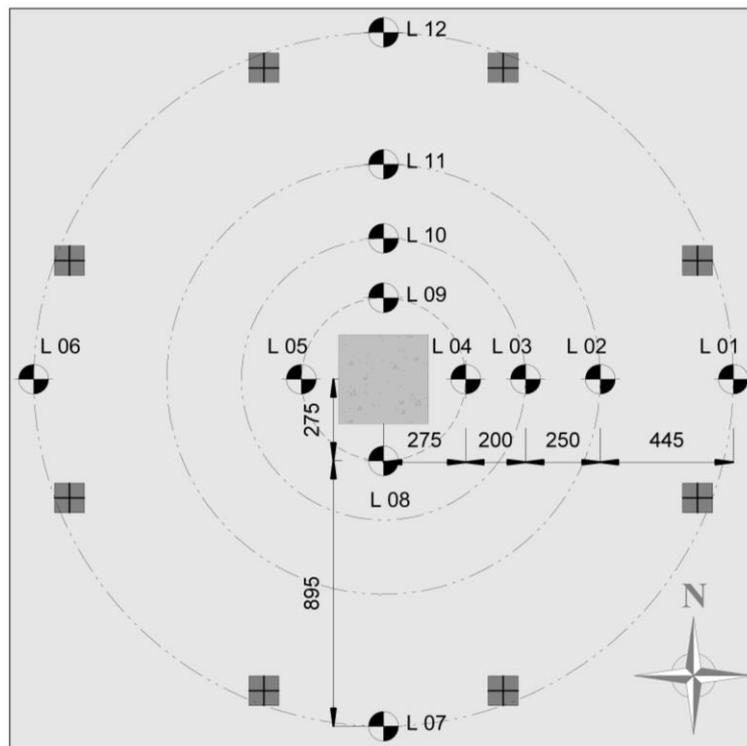


Figura 3.40 - Posicionamento dos LVDT's (medidas em mm)

Com o intuito de garantir a precisão das leituras dos deslocamentos feitas pelos LVDT's foram coladas chapas de aço no ponto de medição para deixar a superfície plana, conforme ilustrado na Figura 3.41.



Figura 3.41 - Posicionamento LVDT em placa metálica

### 3.3.2. Deformações na armadura de flexão

A instrumentação das armaduras de flexão garante o monitoramento das deformações sofridas nas barras durante todo o ensaio, com isso consegue-se acompanhar o comportamento das lajes durante as fases de carregamento.

A medição dessas deformações foi feita utilizando extensômetros elétricos de resistência (EER) da marca *Kyowa Eletronic Instruments*, tipo KFG-5-120-C1-11, de resistência  $119,8 \pm 0,2 \Omega$ . O posicionamento dos extensômetros foi feito colocando-se dois deles em cada ponto diametralmente opostos na barra de aço de modo a eliminar efeitos de flexão localizada das barras, conforme Figura 3.42. Para se obter a deformação na barra foi tomada uma média aritmética dos resultados registrados pelos pares de extensômetros, porém caso se observasse uma discrepância significativa (variação maior que 25% entre os resultados adquiridos nos dois extensômetros) adotou-se o maior valor.

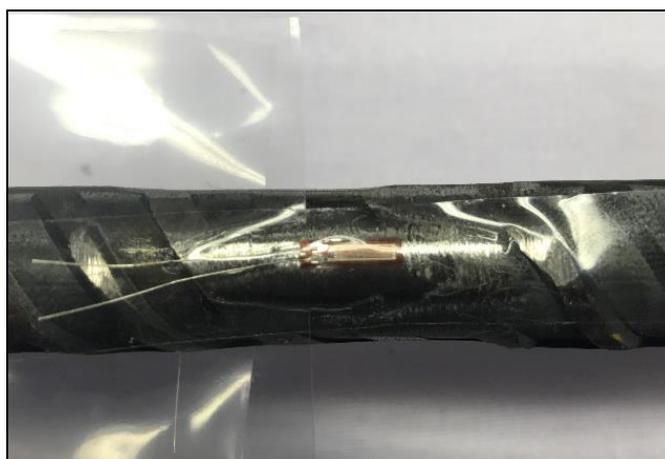


Figura 3.42 – Extensômetro elétrico de resistência já posicionado em barra de aço

A fixação dos extensômetros de seguir um roteiro cuidadoso para evitar perdas de leituras. Inicialmente as barras foram limadas e lixadas para retiradas das nervuras na região a ser instrumentada, com o cuidado de não retirar seção nominal. Em seguida essa área foi limpa com álcool. Os extensômetros então são preparados e colados nas barras com adesivo instantâneo à base de cianoacrilato (cola *Super Bonder*). Já com os extensômetros fixados, cada terminal foi soldado à ponta de um cabo paralelo flexível, fixado à barra com o auxílio de braçadeiras plásticas. Para proteção dessa região de solda foi colocada uma camada de adesivo a base de resina epóxi (*Araldite*), que funciona também como isolamento elétrico. Então a área instrumentada é envolta com uma camada de silicone em gel para garantir proteção aos choques mecânicos e por fim foi envolvida com uma

fita crepe e uma isolante de auto-fusão. Todos o extensômetros utilizados na instrumentação foram testados, com teste de resistência elétrica, para evitar perdas de leitura. Na Figura 3.43 são apresentadas algumas etapas do procedimento de colagem dos extensômetros nas barras de aço.



Figura 3.43 - Procedimento de colagem dos extensômetros

Para as lajes ensaiadas optou-se por instrumentar sete barras de flexão tracionadas em dois quadrantes da laje, na região próxima do pilar, com esse monitoramento é possível (após uma análise das deformações e outras variáveis) verificar eventual ruptura por flexão das lajes, pois é acompanhado o nível de deformação das armaduras com a aplicação das cargas. Das barras instrumentadas quatro estão localizadas na camada superior das armaduras tracionadas, direção Sul-Norte, e três estão na camada inferior das armaduras tracionadas, na direção Leste-Oeste. A Figura 3.44 apresenta essa instrumentação, sendo atribuído a nomenclatura  $E_E$  para os extensômetros de flexão. A Figura 3.45 apresenta as armaduras instrumentadas já posicionadas na laje.

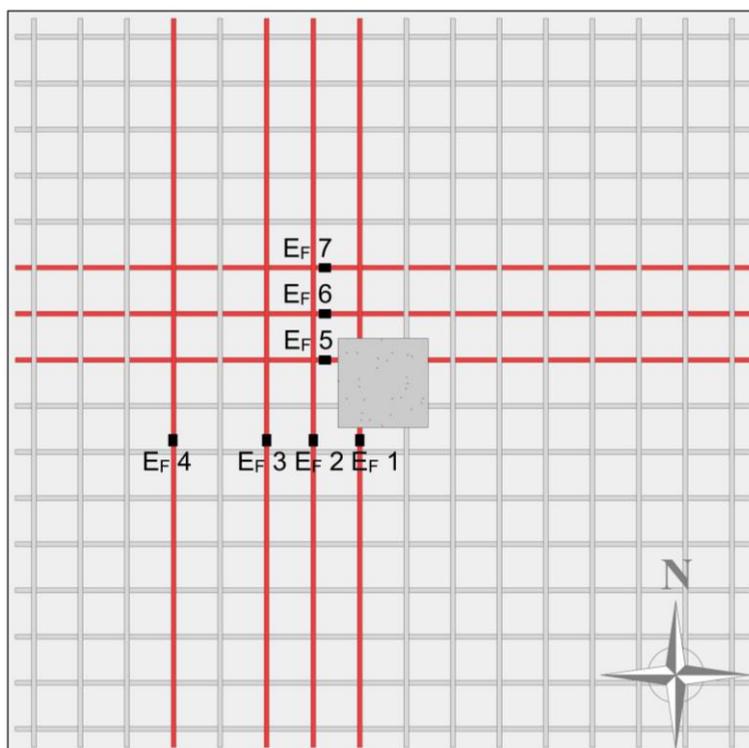


Figura 3.44 - Instrumentação das lajes à flexão

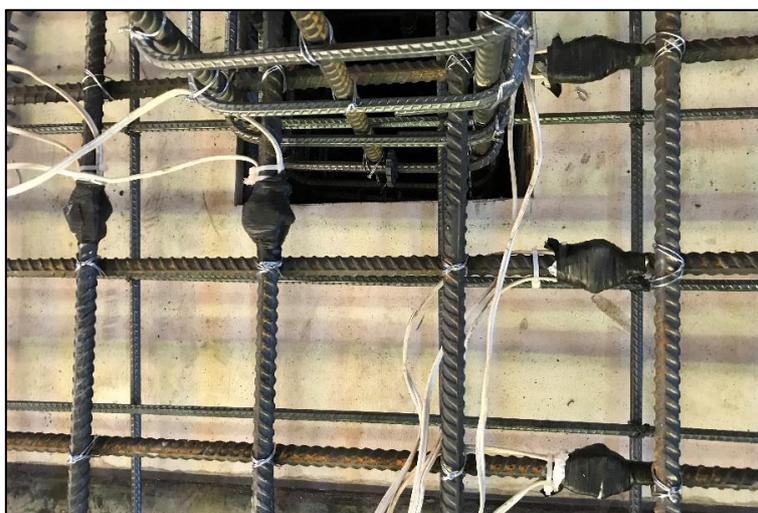
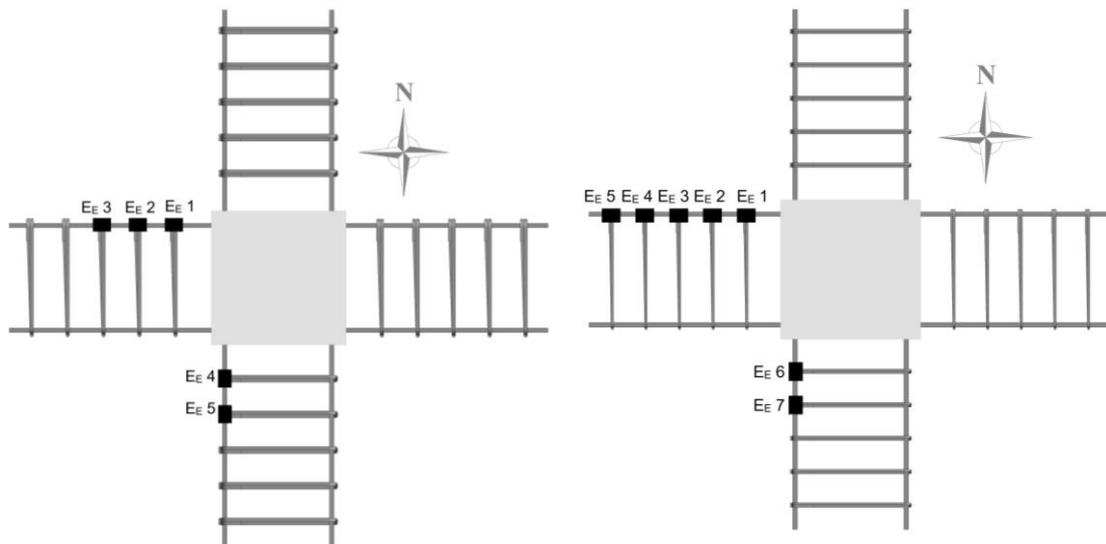


Figura 3.45 - Barras de flexão já instrumentadas e posicionadas na laje

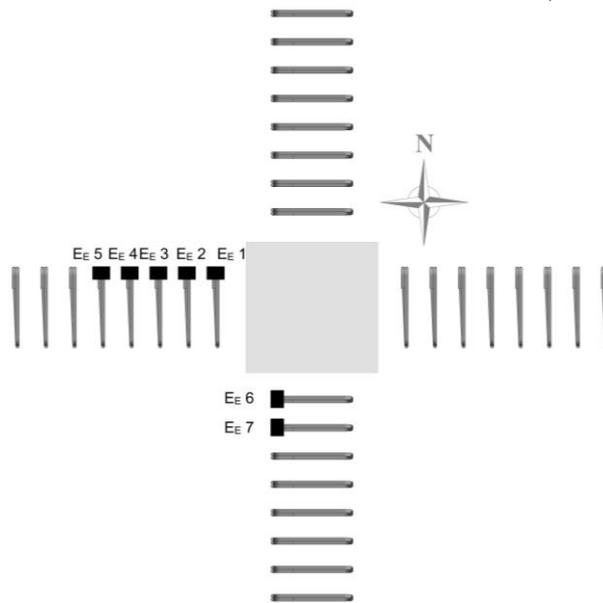
### 3.3.3. Deformações na armadura de punção

Para se analisar e entender o comportamento da armadura de punção, foi realizada, também, uma instrumentação seguindo os passos de colagem dos extensômetros da mesma forma que nas barras de flexão. Destaca-se que houve uma variação de instrumentação entre as séries de concretagem, com o intuito de melhorar o controle das deformações das armaduras e obter leituras mais coerentes com o comportamento das lajes. O modelo seguido para instrumentação das lajes pode ser observado na Figura 3.46.



a) Posicionamento dos extensômetros adotado na Série 1

b) Posicionamento dos extensômetros adotado na Série 2, Série 3 e Série 5



c) Posicionamento dos extensômetros adotado na Série 4  
 Figura 3.46 - Instrumentação da armadura de cisalhamento

Ressaltasse que todos os extensômetros foram posicionados no meio perna dos estribos, para melhor leitura das deformações, conforme evidenciado em corte esquemático na

Figura 3.47. Na Figura 3.48 pode-se ver uma laje já com as barras instrumentadas, posicionada na fôrma, pronta para ser concretada.

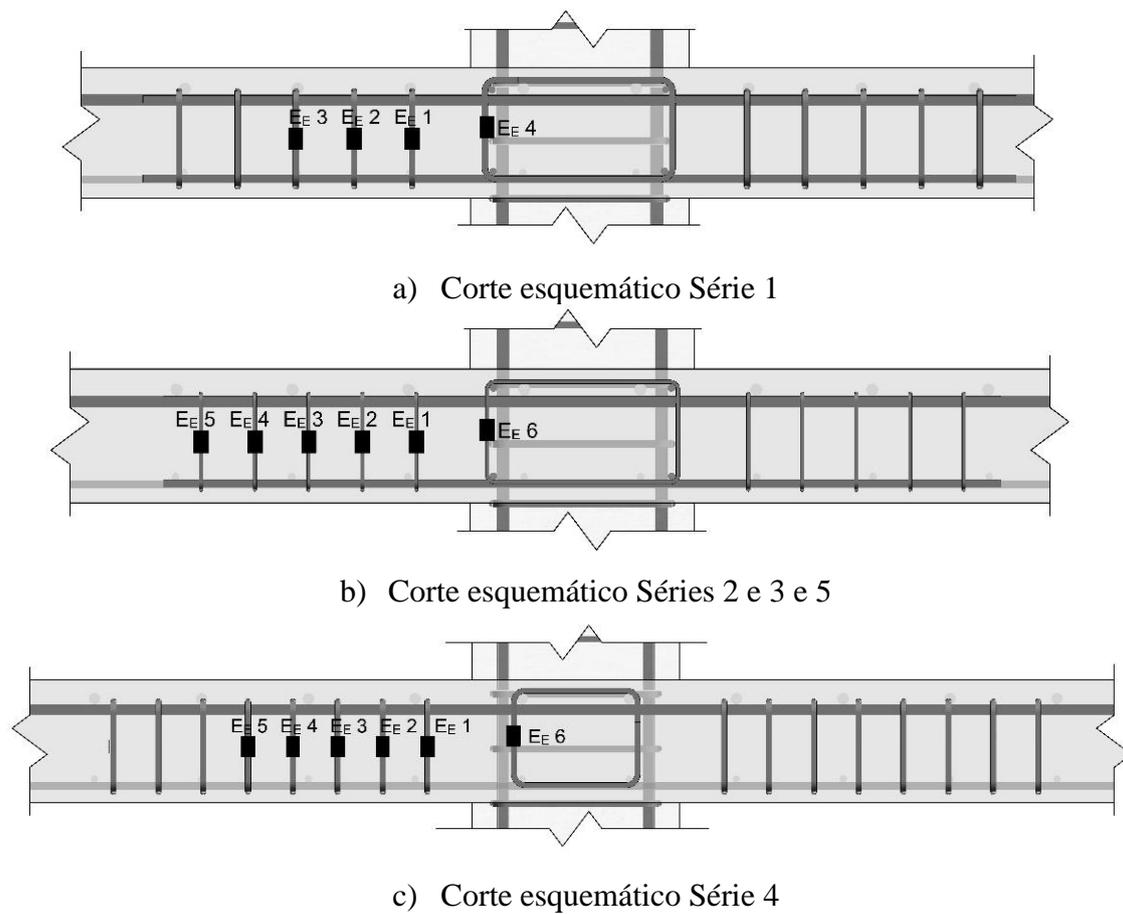


Figura 3.47 - Detalhe, em corte, da posição dos extensômetros nos estribos



Figura 3.48 – Laje já com toda a instrumentação das barras de flexão e dos estribos de punção posicionados, pronta para concretagem

### 3.3.4. Deformações no concreto

Com o intuito de monitorar as deformações na superfície de concreto, para analisar a possibilidade de esmagamento, foram monitorados na superfície inferior das lajes quatro pontos na região próxima do pilar onde espera-se encontrar as maiores deformações. Os extensômetros utilizados para medição das deformações do concreto são da marca *Kyowa Electronic Instruments*, modelo KC-70-120-A1-11, sendo dois para registrar as deformações radiais e dois para registrar as deformações tangenciais.

Ressaltasse que, como também observado por Ferreira (2010), a determinação da posição exata onde ocorre a máxima deformação no concreto é complicada, no entanto esperasse que ocorra na região próxima do pilar. Com isso decidiu-se posicionar os extensômetros para leitura das deformações tangenciais distantes 50 mm da face do pilar e os que fazem a leitura das deformações radiais distantes 100 mm da face do pilar. A Figura 3.49 ilustra a instrumentação utilizadas nas lajes.

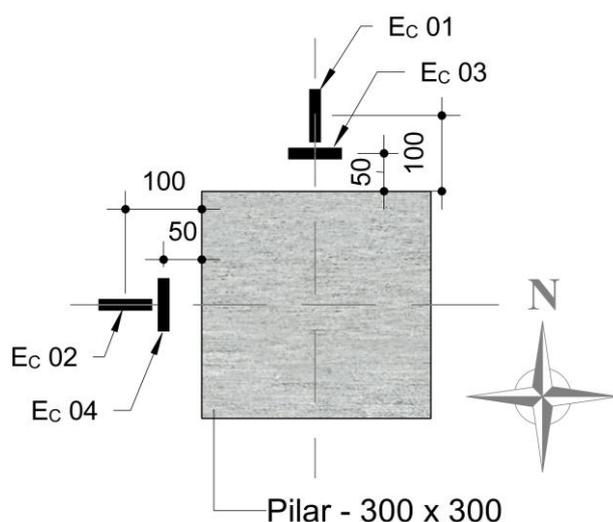


Figura 3.49 – Posicionamento dos extensômetros na superfície do concreto (medidas em mm)

O processo de aplicação demanda um cuidado similar ao procedimento exemplificado para os extensômetros do aço, sendo apenas desnecessária a proteção com resina epóxi e silicone. Alguns cuidados foram tomados: a superfície do concreto foi lixada (caso necessitasse) e limpa com álcool e algodão; para a colagem dos extensômetros foi utilizado adesivo instantâneo à base de cianoacrilato. A união entre cada terminal do extensômetro e a ponta do cabo flexível foi feita por solda. Na Figura 3.50 observa-se os extensômetros já posicionados na laje.



a) Extensômetros posicionados.

b) Extensômetros já soldados aos cabos flexíveis.

Figura 3.50 - Posicionamento dos extensômetros no concreto, face inferior da laje

### **3.4. PROCESSO CONSTRUTIVO DOS MODELOS LOCAIS**

#### **3.4.1. Fôrmas e armaduras**

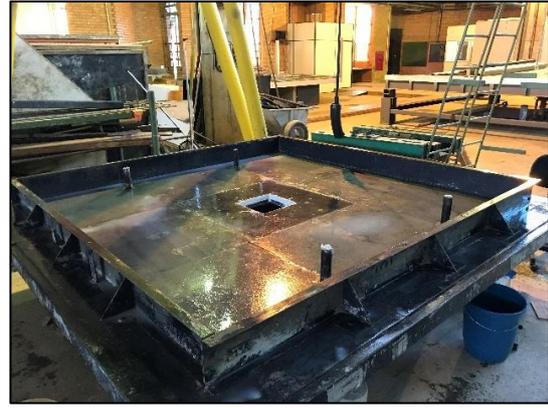
Para execução dos modelos foram utilizadas fôrmas metálicas, conforme Figura 3.51, fabricadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Com o sistema de fôrmas do LABEST consegue-se concretar até 4 lajes por série.

Alguns procedimentos foram tomados para prepará-las para concretagem: todas as peças metálicas foram limpas e posicionadas em seu devido lugar; então foram travadas utilizando parafusos e porcas e soldas, garantindo a estabilidade das fôrmas; com isso pôde-se vedar com silicone possíveis aberturas. Foram fixados às fôrmas tubos de PVC com diâmetro de 60 mm para execução dos furos para a passagem dos tirantes (constituintes do sistema de ensaio). Com tudo pronto, aplicou-se o desmoldante utilizando rolos de espuma para que o processo de desenforme das lajes fosse facilitado.

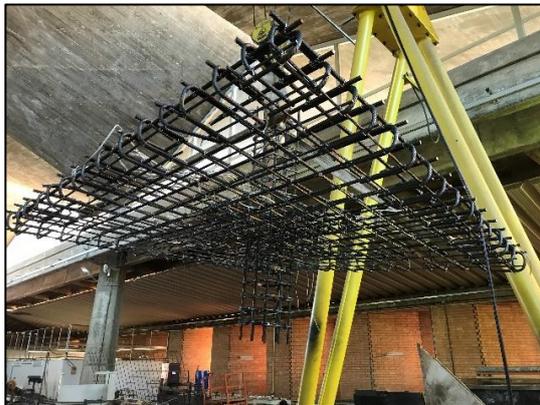
A montagem das armaduras das lajes foi feita fora das fôrmas, sobre cavaletes, e o transporte e posicionamento nas fôrmas foi realizado utilizando o pórtico rolante do laboratório. Para essa movimentação foram posicionados quatro ganchos de içamentos, em cada canto da laje.



a) Fôrma já travada e vedada.



b) Fôrma já com o desmoldante aplicado



c) Içamento da armadura para posicionamento na fôrma



d) Armaduras já posicionadas nas fôrmas

Figura 3.51 - Fôrmas metálicas das lajes e posicionamento das armaduras

Para as fôrmas dos pilares quadrados foram utilizadas estruturas metálicas posicionadas e travadas sob as fôrmas (Figura 3.52).



Figura 3.52 – Lajes já concretadas

### 3.4.2. Concretagem

Para a realização da concretagem foi empregado concreto usinado e bombeável, com solicitação de que fosse classe C30, e abatimento por *Slump Test* especificado de  $10 \pm 2$  cm. Alguns cuidados foram tomados nessa etapa, desde o recebimento do concreto, com a realização do *Slump Test* para verificar a trabalhabilidade em seu estado fresco, até a cura final da laje.

O concreto foi adensado por vibração mecânica com uso de vibrador de imersão tipo agulha, de modo a preencher totalmente as fôrmas, envolvendo completamente as armaduras, com o cuidado de evitar que agulha vibrasse as armaduras para não surgirem problemas de formação de vazios que prejudicassem a aderência. Na Figura 3.53 são apresentadas as etapas de concretagem.

Para controle das condições climáticas durante a concretagem, foram monitoradas a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, conforme observa-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Controle das condições climáticas durante a concretagem

<b>Concretagem</b>	<b>Data</b>	<b>Temperatura Ambiente</b>	<b>Umidade Relativa do Ar</b>
Série 1	19/07/2017	26 °C	37%
Série 2	11/12/2017	24 °C	32%
Série 3	28/03/2018	28 °C	42%
Série 4	03/07/2018	29 °C	36%
Série 5	29/12/2018	27 °C	55%



a) Recebimento do concreto



b) Moldagem dos corpos de prova



c) Durante a concretagem e vibração



d) Acabamento das lajes



e) Cura das lajes



f) Desforma das lajes

Figura 3.53 - Detalhe da concretagem das lajes

### 3.5. MATERIAIS

#### 3.5.1. Concreto

O concreto utilizado para a confecção das lajes pertencentes às Série 1 à Série 4 foi do tipo usinado comprado da empresa *Polimix Concreto S.A.* Foram especificados 30 MPa, como resistência característica à compressão para 28 dias e  $10 \pm 2$  cm, como resultado de teste de abatimento. Para a usinagem do concreto foi utilizada brita 0 (granito), como agregado graúdo; areia fina e areia artificial como agregado miúdo; cimento tipo CII F (cimento Portland de alta resistência inicial composto com fíler); fator água cimento de 0,58; e ainda um aditivo plastificante PXT 74, da empresa *Matchem*. A Tabela 3.5 resume o traço utilizado. Já o concreto utilizado para a confecção das lajes pertencentes à Série 5 foi também do tipo usinado fornecido pela empresa *Concrecon Concreto e Construções LTDA*. Foram especificados 30 MPa, como resistência característica à compressão para 28 dias, e  $10 \pm 2$  cm como resultado de teste de abatimento. Para a usinagem do concreto foi utilizada brita 0 (granito), como agregado graúdo; areia natural e areia artificial como agregado miúdo; cimento tipo CPV ARI (cimento Portland de alta resistência inicial); fator água cimento de 0,66; e ainda um aditivo plastificante polifuncional. A Tabela 3.6 resume o traço utilizado.

Tabela 3.5 – Quantitativo para produção de 1 m<sup>3</sup> do concreto utilizado nas Série 1, 2, 3 e Série 4

INSUMO	QUANTIDADE (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CII F	350
Areia fina	459
Areia artificial	306
Brita 0 com diâmetro máximo de 9,5 mm	980
Água	203
Aditivo plastificante PXT 74	3,1

Tabela 3.6 – Quantitativo para produção de 1 m<sup>3</sup> do concreto utilizado na Série 5

INSUMO	QUANTIDADE (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CPV ARI	280
Areia natural	358
Areia artificial	537
Brita 0 com diâmetro máximo de 9,5 mm	982
Água	186
Aditivo plastificante polifuncional	1.96 litros/m <sup>3</sup>

Para caracterização do concreto utilizado, para cada série, foram moldados 9 corpos de prova por laje concretada (sendo 3 para serem utilizados no ensaio de resistência à compressão, 3 no de resistência à tração e 3 no de módulo de elasticidade), com dimensões de 100 mm x 200 mm. Foram seguidas as recomendações das normas brasileiras de referência ABNT NBR 5739 (2007), ABNT NBR 7222 (2011) e ABNT NBR 8522 (2008), para a determinação das propriedades mecânicas do concreto utilizado nas lajes. A Figura 3.54 ilustra o ensaio dos corpos de prova para determinação de suas propriedades.



a) Regularização da superfície do CP



b) Ensaio à compressão



c) Ensaio à tração



Ensaio de módulo de elasticidade

Figura 3.54 - Ensaio de corpos de prova cilíndricos para caracterização do concreto

### 3.5.2. Aço

Com o intuito de caracterizar as propriedades mecânicas do aço utilizado na armação das lajes, foram utilizados três corpos de prova com 600 mm de comprimento para cada diâmetro diferente utilizado, para cada série. As dimensões utilizadas foram 5,0 mm e 8,0 mm para os estribos, e 16,0 mm para as armaduras de flexão tracionadas.

O ensaio utilizado foi o de tração axial realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília, utilizando a prensa hidráulica Emic modelo DL 3000, com capacidade de 300 kN, e um extensômetro eletrônico Emic modelo EE09, de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 6892 (2013), ver Figura 3.55. Os resultados, para cada série, foram determinados tomando a média aritmética dos três corpos de prova ensaiados para cada diâmetro.



a) Ensaio de tração na EMIC

b) Extensômetro posicionado

Figura 3.55 – Ensaio de caracterização do aço

### 3.6. SISTEMA DE ENSAIO E PROCESSO DE CARREGAMENTO

O sistema de ensaio adotado nessa pesquisa foi feito no pórtico de reação, montado sobre uma laje de reação, existente no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, sem a necessidade de adaptações ao pórtico ou às dimensões dos modelos, ver Figura

3.56. Dentre os equipamentos utilizados, cita-se: quatro cilindros hidráulicos fabricados pela empresa *ENERPAC*, com capacidade de 500 kN; quatro conjuntos de células de carga fabricado pela *HBM* com capacidade de 500 kN; quatro rótulas de aço; duas bombas hidráulicas para o acionamento dos cilindros hidráulicos; seis vigas metálicas rígidas, sendo quatro de distribuição e duas de reação; e quatro tirantes de aço com diâmetro de 32,0 mm.

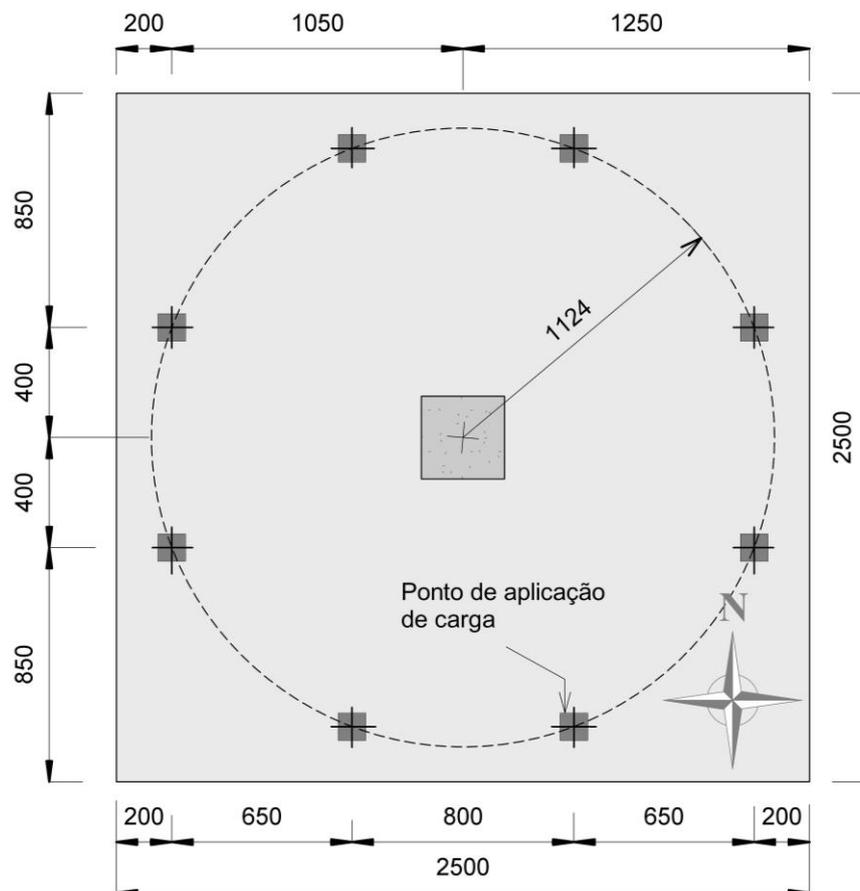


Figura 3.56 – Esquema do sistema de ensaios utilizado (medidas em mm)

Através das Figura 3.57 e Figura 3.58 observa-se o projeto do sistema de ensaio utilizado nessa pesquisa. E a Figura 3.59 mostra foto real do sistema, em que é possível ver como ficou este sistema no laboratório durante o ensaio da e as bombas hidráulicas.

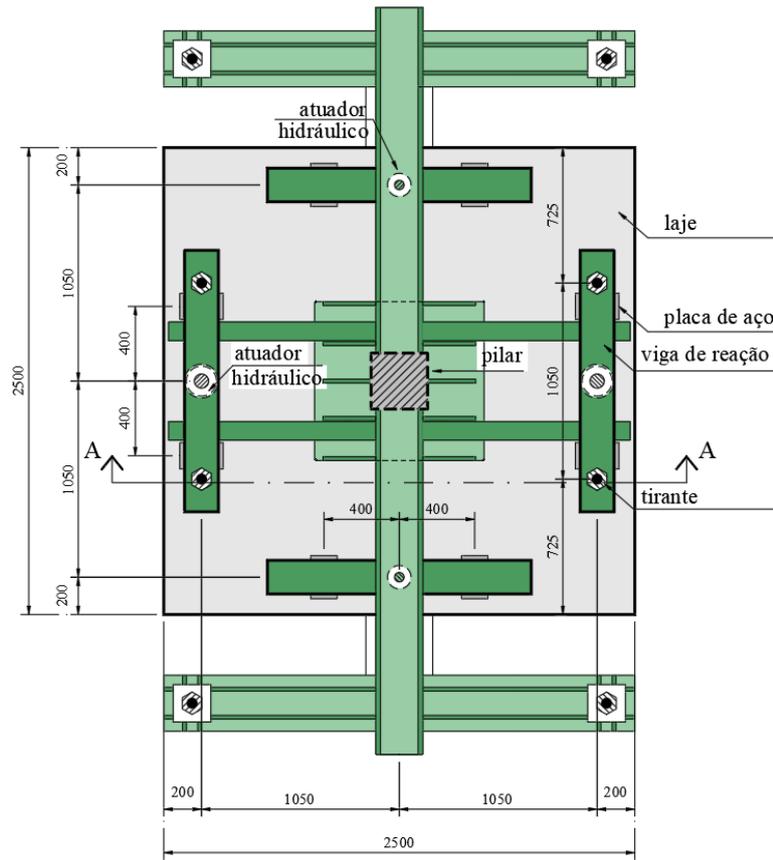


Figura 3.57 – Sistema de ensaio – vista superior

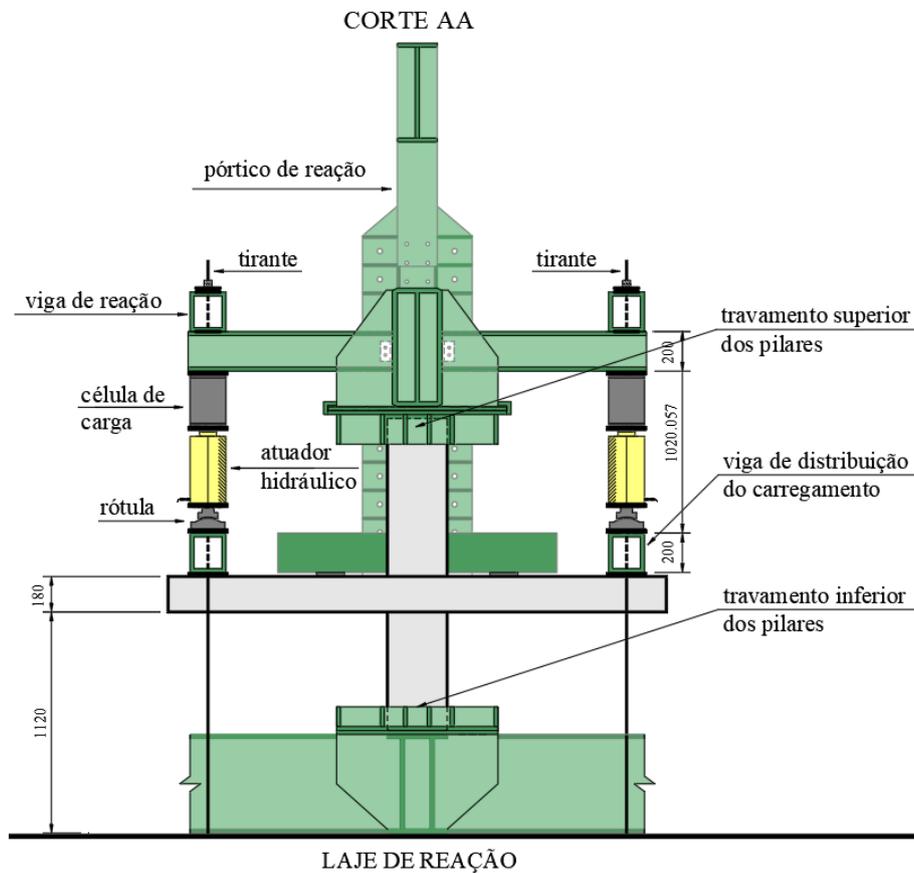


Figura 3.58 – Corte esquemático do projeto do sistema de ensaio



Figura 3.59 – Sistema de ensaio

Como roteiro a ser seguido para o ensaio de cada laje, primeiro posicionou-se a mesma no pórtico de reação e, seguindo as marcações previamente feitas na superfície superior da laje, colocou-se chapas maciças de aço sobre mantas de neoprene nos oito pontos de aplicação de carga para homogeneizar a distribuição das cargas. Em seguida, foram posicionadas as quatro vigas metálicas rígidas sobre estas chapas para distribuir o carregamento, em dois pontos, aplicado pelos cilindros hidráulicos. Para compensar a rotação das vigas de distribuição devido ao deslocamento da laje, foram posicionadas rótulas de aço acima das vigas de distribuição e, sob elas foram colocados os 4 conjuntos de células de carga, cuja função é medir o nível de carregamento aplicado durante o ensaio. Posteriormente foram posicionados os quatro tirantes para reação dos carregamentos aplicados pelos cilindros hidráulicos na direção Norte-Sul. Por fim, são posicionados os quatro cilindros hidráulicos responsáveis pela aplicação de carga por meio do deslocamento do êmbolo acionados individualmente por bombas hidráulicas. de reação.

Com o sistema todo montado parte-se para o ensaio. Primeiro executa-se um pré-carregamento para acomodação do sistema e, posteriormente, o carregamento contínuo até a ruptura. O sistema de aquisição de dados é composto por módulos *Spider 8*, da empresa HBM, sendo todos os extensômetros (concreto e aço), os LVDT's e as células de carga em conectados a eles. O processo de ensaio e obtenção dos dados

ocorreram de duas formas. Para a Série 1, utilizou-se um processo já utilizado em outras pesquisas (FERREIRA (2010); OLIVEIRA (2013); SANTOS (2014); Nicácio (2018)) que consiste em aplicação de carga leitura de carga intervalada, buscando uma taxa de variação crescente de 5 kN em cada cilindro hidráulico, totalizando 20 kN a cada passo, até que cada macaco atingisse 100 kN e a partir daí o passo de carga aumentou para 10 kN até a ruptura, a aquisição dos dados foi feita através da conexão dos módulos *Spider 8* ao *software Catman*.

Com o intuito de melhorar o sistema de ensaio e garantir maior controle dos resultados e comportamento das lajes durante o processo, para as outras séries (Série 2, 3, 4 e 5) o processo de leitura de carga ocorreu de forma contínua, buscando uma taxa de variação crescente de 5 kN por minuto, em cada cilindro hidráulico, a aquisição de dados se deu da mesma forma com *software Catman*. As leituras foram feitas de forma contínua com frequência de aquisição de dados de 1 Hz para todas as lajes. Também foi realizada a marcação da evolução de fissuras na laje ao longo dos ensaios.

## **4. RESULTADOS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS**

Serão apresentados e analisados nesse capítulo os estudos comparativos dos resultados experimentais dos 20 modelos locais de lajes lisas apresentados no Capítulo 3. Os resultados envolvem: as propriedades mecânicas dos materiais; as cargas experimentais de ruptura; os deslocamentos verticais; as deformações no concreto; as deformações no aço da armadura de flexão e de punção; mapa de fissuração para cada laje, bem como sua superfície e modo de ruptura; e as cargas previstas pelos modelos teóricos de cálculo.

### **4.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

#### **4.1.1. Concreto**

São apresentados nas Tabela 4.1 a média dos resultados dos ensaios realizados em três corpos de prova de concreto, por laje, resultantes dos ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, conforme descrito no Capítulo 3. Sendo a idade apresentada como sendo com quantos dias após a concretagem os corpos de prova foram ensaiados.

Observa-se para a Série 2 um concreto de Classe C15, com resistência bem inferior à solicitada. Isso ocorreu devido a um erro da concreteira, que enviou para a execução dos modelos um concreto com qualidade abaixo da esperada, porém decidiu-se utilizar os resultados dessa série por serem críveis e manterem o padrão observado nas demais séries. A Série 3 é uma repetição da Série 2, porém já com um concreto conforme especificações de dosagem e propriedades mecânicas.

Com exceção das Série 2, observa-se um padrão das propriedades mecânicas do concreto verificadas nas séries de concretagem, isso permite que as lajes possam ser analisadas diretamente entre si, sem grandes influências em relação ao concreto. As Série 1, Série 3, Série 4 e Série 5 se enquadram na classe do concreto C30.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto

Série	Laje	Idade (dias)	$f_{c,m}$ (MPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)
1	RS	70	30	2,6	27,8
	FA-01				
	CA-01				
	NA-01				
2	FA-02	56	15	1,8	19,1
	CA-02				
	TA-02				
	NA-02				
3	FA-03	51	30	2,7	30,9
	CA-03				
	TA-03				
	NA-03				
4	FA-04	28	30	2,8	35,9
	CA-04				
	TA-04				
	NA-04				
5	FA-05	34	30	2,9	29,1
	CA-05				
	TA-05				
	NA-05				

#### 4.1.2. Aço

Os resultados da caracterização do aço quanto à tensão de escoamento ( $f_{ys}$ ), à deformação de escoamento do aço ( $\epsilon_{ys}$ ), e ao módulo de elasticidade ( $E_s$ ), obtidos a partir do ensaio à tração realizado para cada tipo de aço, conforme apresentado no item 3.5.2 do Capítulo 3, são apresentados na Tabela 4.2. Os resultados obtidos foram extraídos diretamente do sistema de ensaio utilizando a *EMIC*.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do aço

Série	Propriedade	Barras		
		Flexão - tracionadas	Estribos	
		$\phi$ 16 mm	$\phi$ 5 mm	$\phi$ 8 mm
1	$f_{ys}$ (MPa)	549	--	542
	$E_s$ (GPa)	197	--	186
	$\varepsilon_s$ (‰)	2,79	--	2,91
2	$f_{ys}$ (MPa)	623	706	--
	$E_s$ (GPa)	183	191	--
	$\varepsilon_s$ (‰)	3,40	3,69	--
3	$f_{ys}$ (MPa)	615	698	--
	$E_s$ (GPa)	179	193	--
	$\varepsilon_s$ (‰)	3,43	3,61	--
4	$f_{ys}$ (MPa)	593	--	674
	$E_s$ (GPa)	188	--	186
	$\varepsilon_s$ (‰)	3,15	--	3,62
5	$f_{ys}$ (MPa)	525	660	--
	$E_s$ (GPa)	192	189	--
	$\varepsilon_s$ (‰)	2,74	3,50	--

#### 4.2. COMPORTAMENTO DAS LAJES

De posse dos resultados obtidos a partir da realização dos ensaios experimentais, o comportamento estrutural dos modelos é discutido e, para facilitar o processo de análise, bem como a associação dos modelos com suas respectivas nomenclaturas, na Figura 4.1 é apresentado um resumo das lajes ensaiadas.

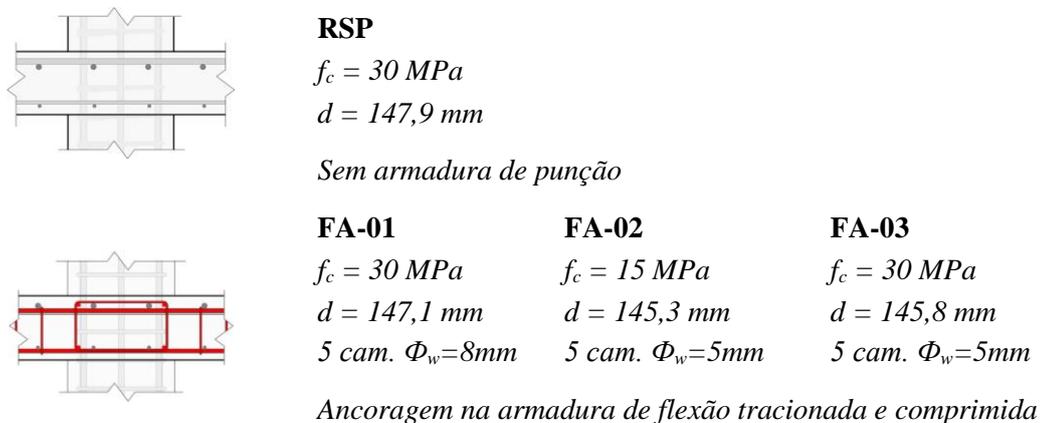


Figura 4.1 – Resumos das lajes ensaiadas

	<b>CA-01</b>	<b>CA-02</b>	<b>CA-03</b>
	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 148,1 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=8\text{mm}$	$f_c = 15 \text{ MPa}$ $d = 147,9 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 148,0 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$
<i>Ancoragem na armadura de flexão comprimida</i>			
	<b>TA-02</b>	<b>TA-03</b>	
	$f_c = 15 \text{ MPa}$ $d = 144,4 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 147,1 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	
<i>Ancoragem na armadura de flexão tracionada</i>			
	<b>NA-01</b>	<b>NA-02</b>	<b>NA-03</b>
	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 148,0 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=8\text{mm}$	$f_c = 15 \text{ MPa}$ $d = 147,0 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 147,6 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$
<i>Sem ancoragem</i>			
	<b>FA-04</b>	<b>FA-05</b>	
	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 146,8 \text{ mm}$ 8 cam. $\Phi_w=8\text{mm}$	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 143,0 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	
<i>Ancoragem na armadura de flexão tracionada e comprimida</i>			
	<b>CA-04</b>	<b>CA-05</b>	
	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 146,6 \text{ mm}$ 8 cam. $\Phi_w=8\text{mm}$	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 142,2 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	
<i>Ancoragem na armadura de flexão comprimida</i>			
	<b>TA-04</b>	<b>TA-05</b>	
	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 148,2 \text{ mm}$ 8 cam. $\Phi_w=8\text{mm}$	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 143,0 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	
<i>Ancoragem na armadura de flexão tracionada</i>			
	<b>NA-04</b>	<b>NA-05</b>	
	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 148,4 \text{ mm}$ 8 cam. $\Phi_w=8\text{mm}$	$f_c = 30 \text{ MPa}$ $d = 144,4 \text{ mm}$ 5 cam. $\Phi_w=5\text{mm}$	
<i>Sem ancoragem</i>			

Figura 4.1 – Resumos das lajes ensaiadas (Continuação)

Como forma de comparação e análise dos resultados experimentais, as lajes foram divididas em Grupos, de acordo com os parâmetros em comum. Com isso as lajes com

armadura de punção podem ser comparadas diretamente entre si e nos seus respectivos grupos e, quando necessário for, podem ser comparadas diretamente com a laje de referência sem armadura de punção RS. Na Tabela 4.3 é apresentado o resumo dos grupos.

Tabela 4.3 – Grupos para análise dos modelos locais

Grupo	Lajes	Parâmetros variáveis
1	FA-01	Uso da armadura de Punção com ancoragem <i>total</i> ancorando na armadura principal tracionada e na armadura comprimida
	FA-02	
	FA-03	
	FA-04	
	FA-05	
2	CA-01	Uso da armadura de Punção com ancoragem <i>parcial</i> na armadura comprimida
	CA-02	
	CA-03	
	CA-04	
	CA-05	
3	TA-02	Uso da armadura de Punção com ancoragem <i>parcial</i> na armadura principal tracionada
	TA-03	
	TA-04	
	TA-05	
4	NA-01	Uso da armadura de Punção <i>sem</i> ancoragem na armadura de flexão
	NA-02	
	NA-03	
	NA-04	
	NA-05	

#### 4.2.1. Deslocamentos verticais das lajes

Os deslocamentos verticais das lajes foram medidos em 12 pontos específicos posicionados na face superior das lajes, conforme descrito no Capítulo 3. Na Figura 4.2 à Figura 4.21 são apresentadas as leituras a cada 20% da carga de ruptura na direção Oeste - Leste (O-L) e na direção Sul – Norte (S-N) de cada laje ensaiada. Os valores das abscissas correspondem a posição dos LVDT's na laje, e as ordenadas referem-se aos deslocamentos verticais. Sugere-se que para as próximas pesquisas os LVDT's sejam apoiados diretamente na laje, evitando assimetrias geradas pelos movimentos de corpo rígido do sistema.

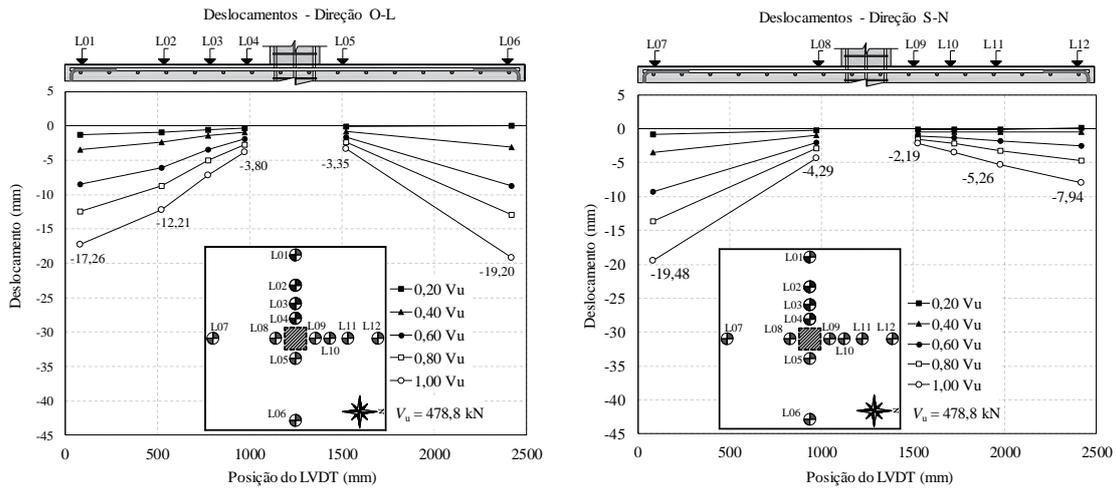


Figura 4.2 – Deslocamentos verticais da laje RS

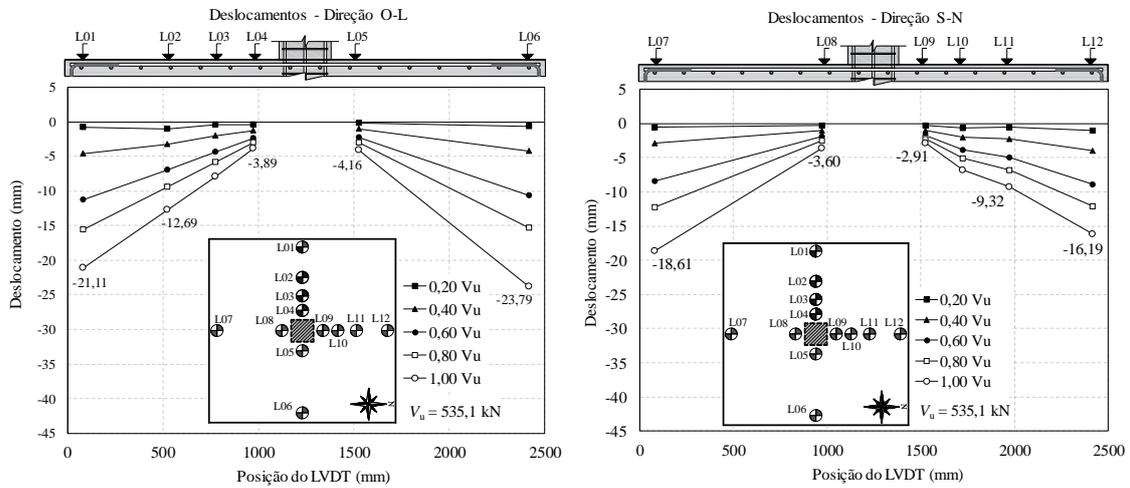


Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da laje FA-01

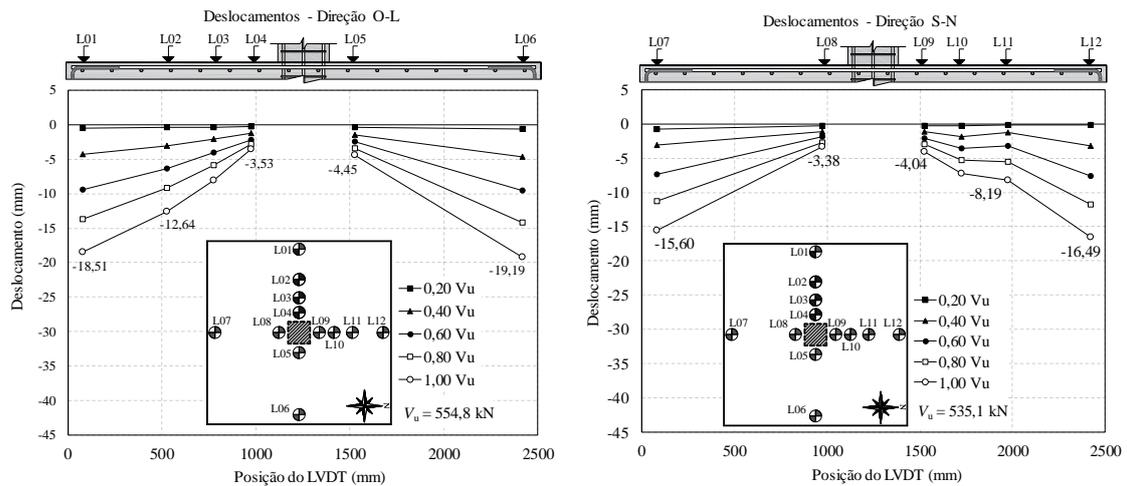


Figura 4.4 – Deslocamentos verticais da laje CA-01

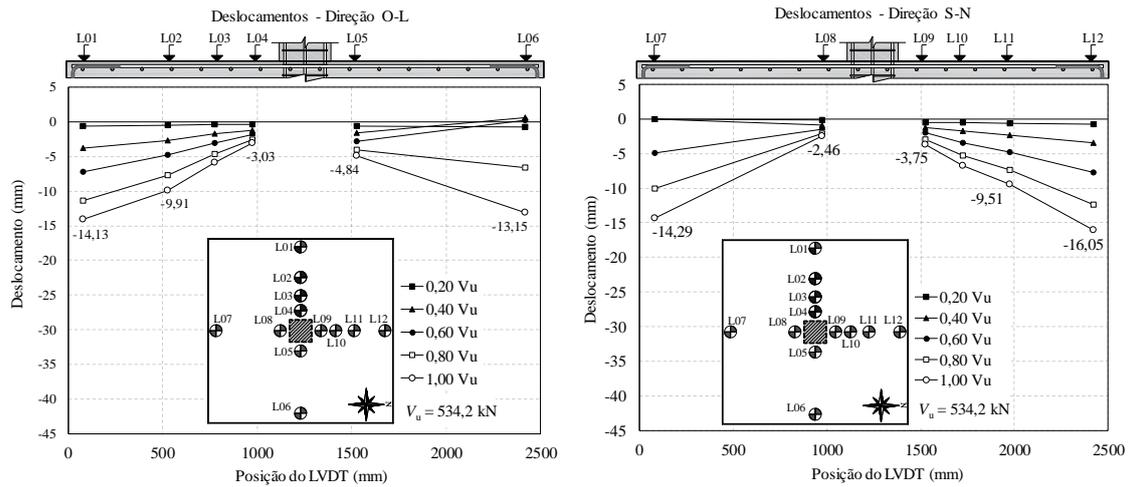


Figura 4.5 – Deslocamentos verticais da laje NA-01

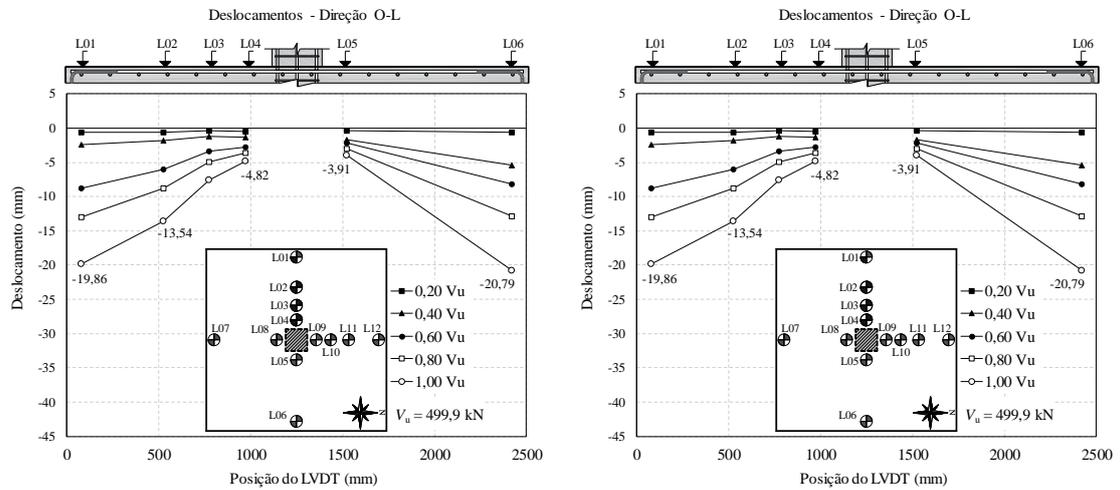


Figura 4.6 – Deslocamentos verticais da laje FA-02

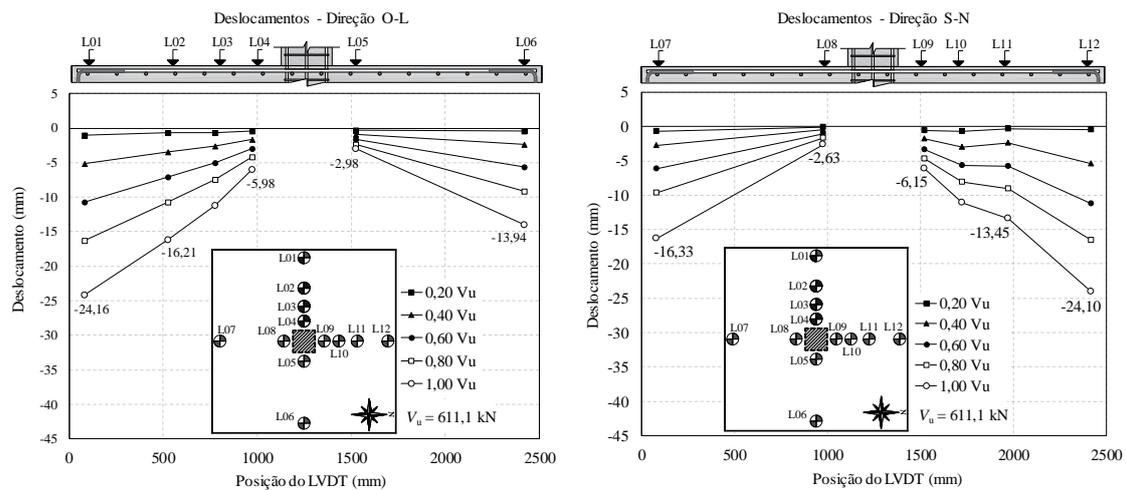


Figura 4.7 – Deslocamentos verticais da laje CA-02

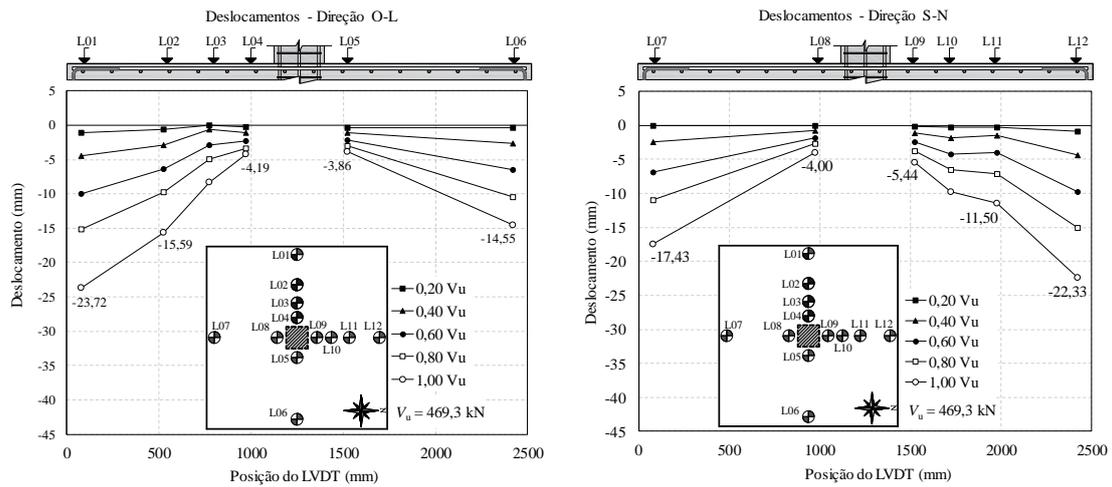


Figura 4.8 – Deslocamentos verticais da laje TA-02

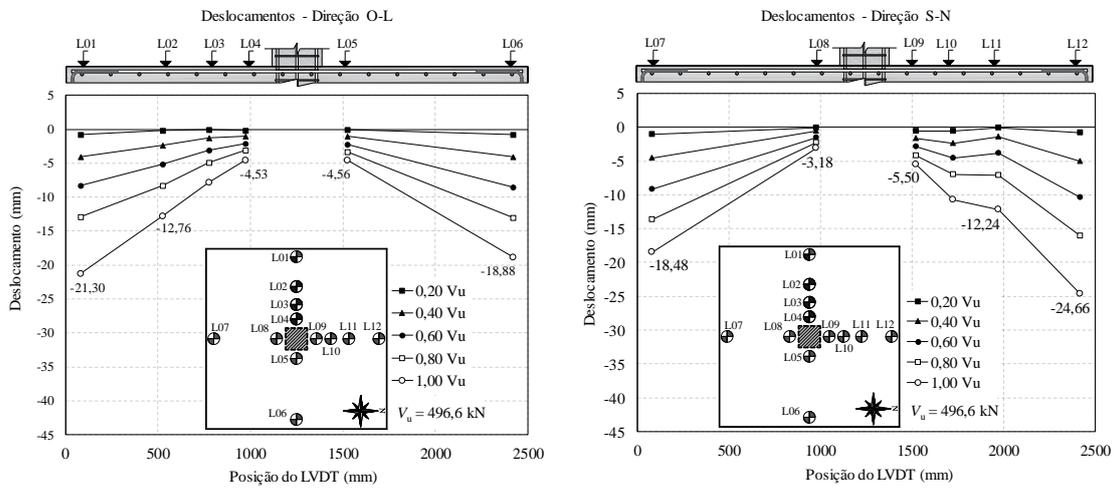


Figura 4.9 – Deslocamentos verticais da laje NA-02

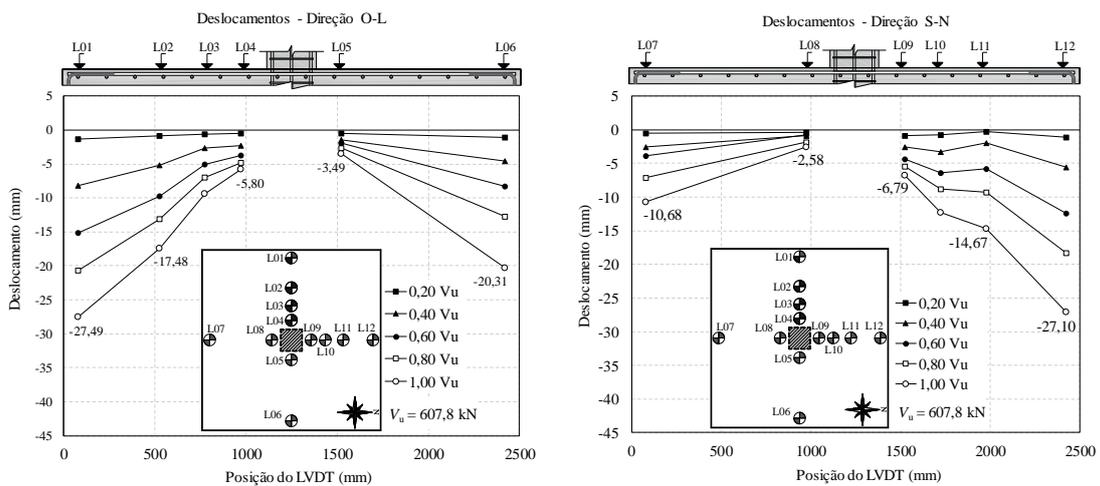


Figura 4.10 – Deslocamentos verticais da laje FA-03

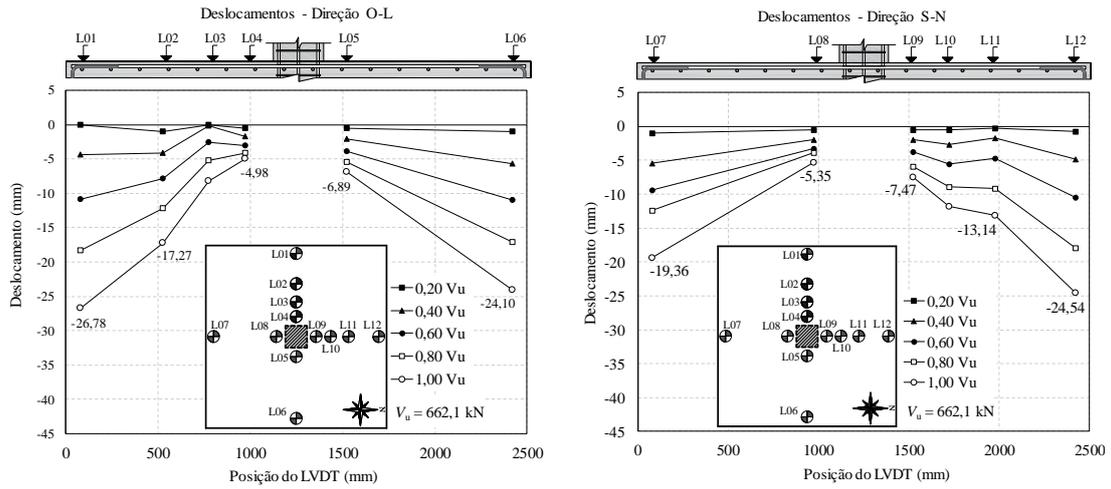


Figura 4.11 – Deslocamentos verticais da laje CA-03

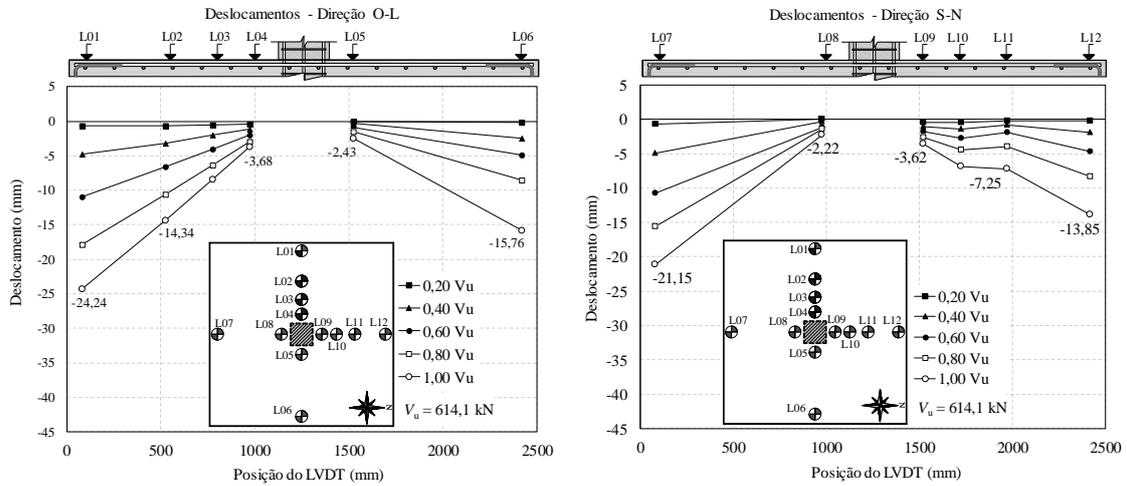


Figura 4.12 – Deslocamentos verticais da laje TA-03

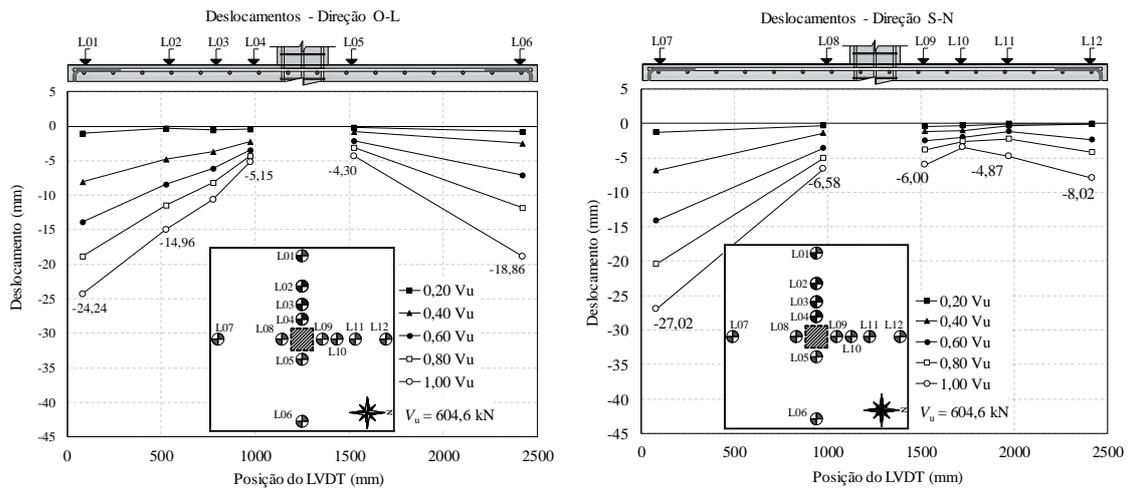


Figura 4.13 – Deslocamentos verticais da laje NA-03

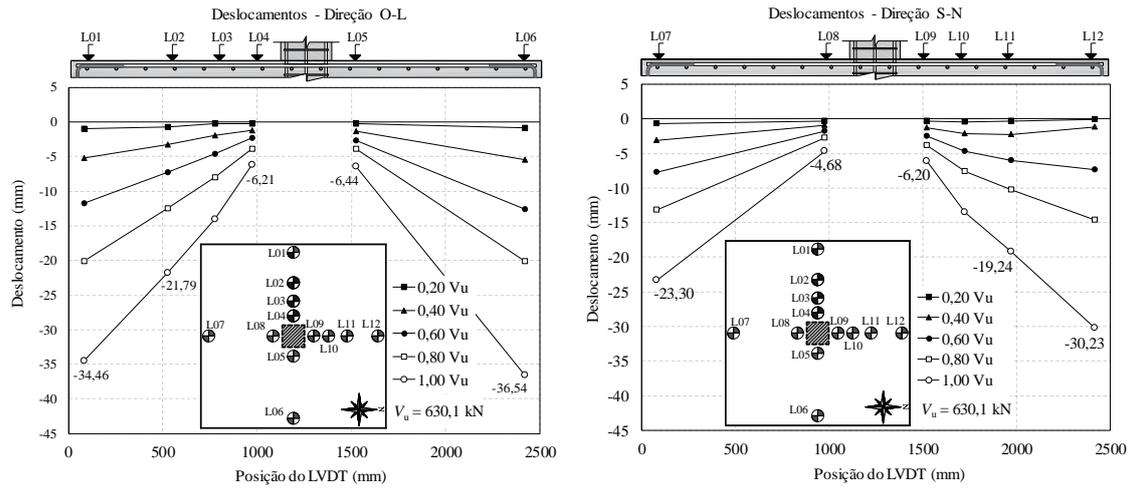


Figura 4.14 – Deslocamentos verticais da laje FA-04

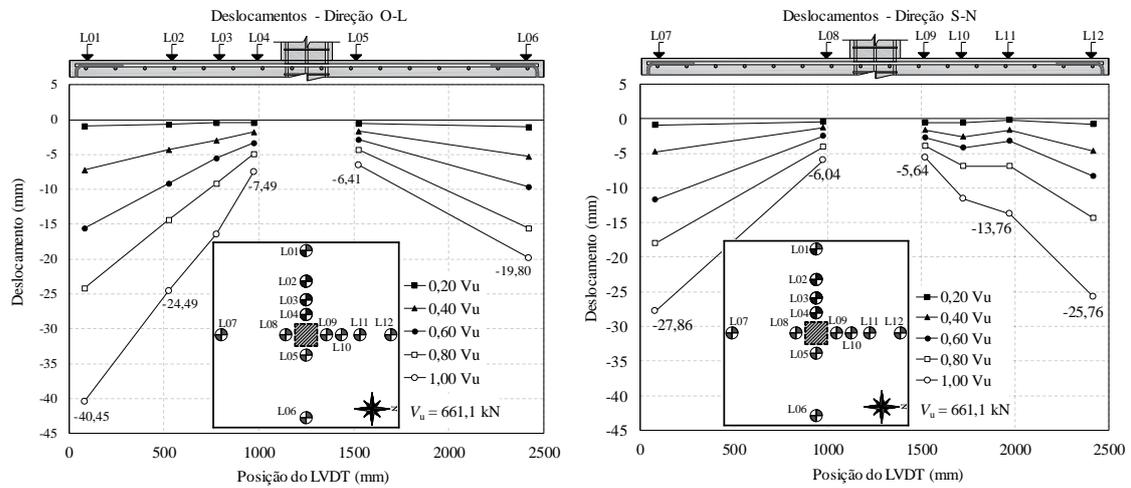


Figura 4.15 – Deslocamentos verticais da laje CA-04

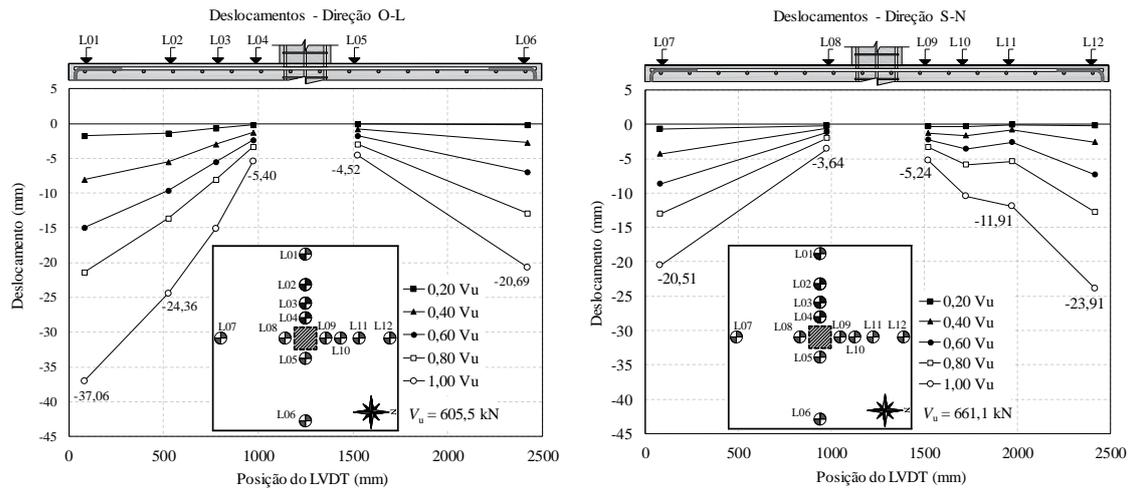


Figura 4.16 – Deslocamentos verticais da laje TA-04

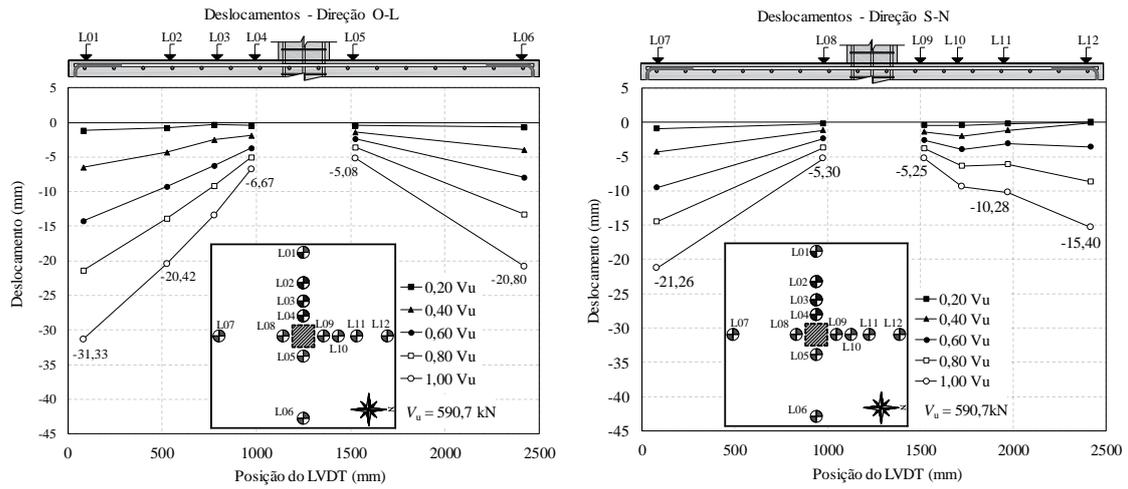


Figura 4.17 – Deslocamentos verticais da laje NA-04

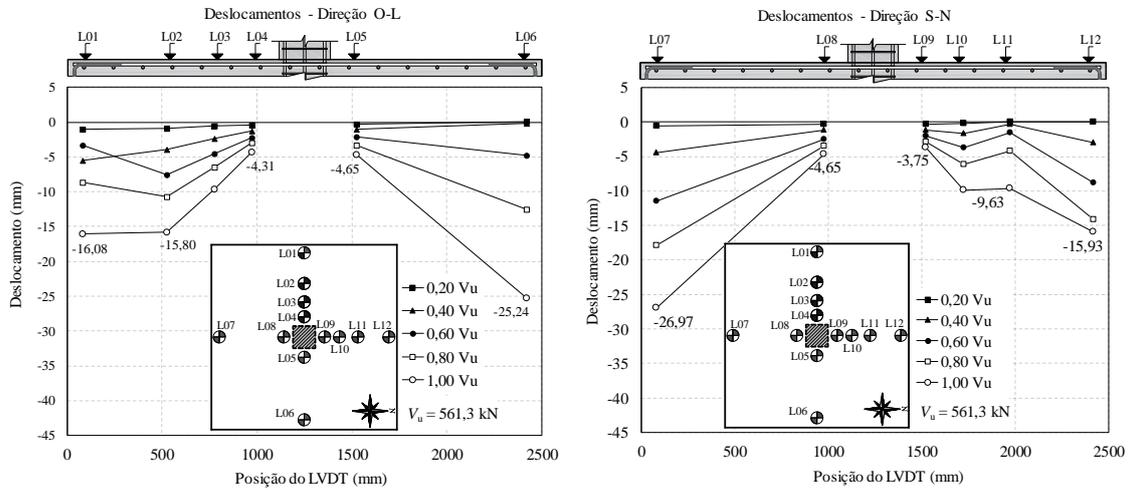


Figura 4.18 – Deslocamentos verticais da laje FA-05

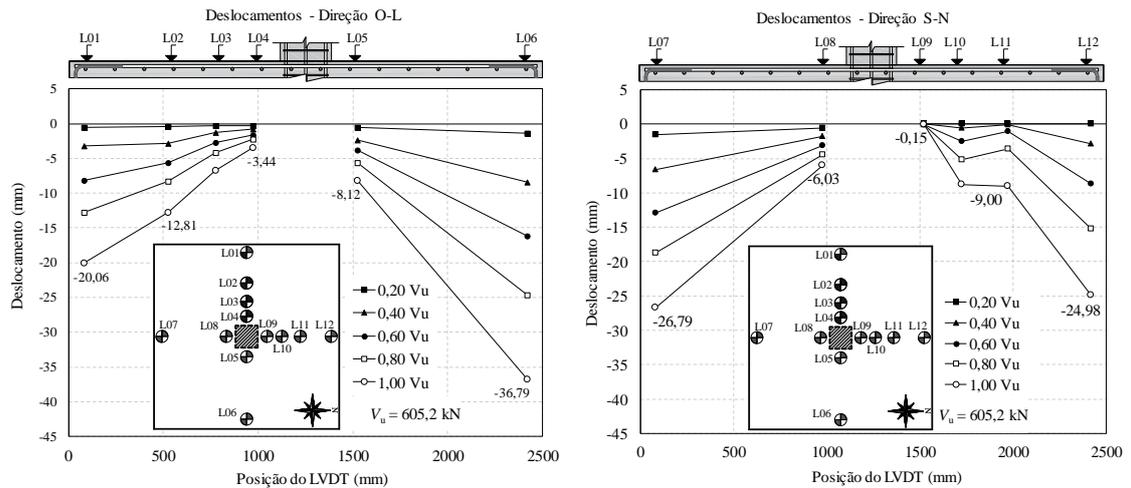


Figura 4.19 – Deslocamentos verticais da laje CA-05

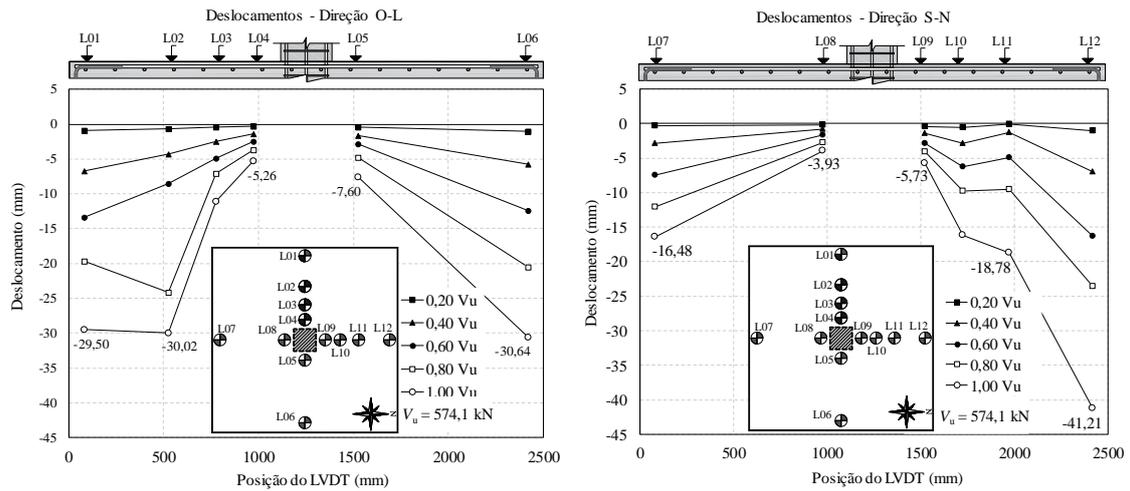


Figura 4.20 – Deslocamentos verticais da laje TA-05

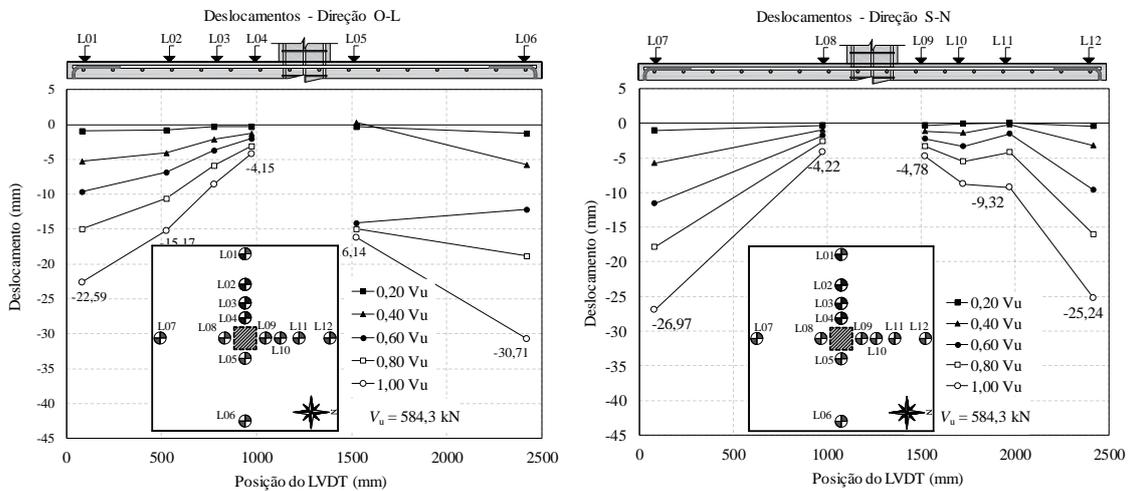


Figura 4.21 – Deslocamentos verticais da laje NA-05

Ao se analisar os deslocamentos aferidos nas lajes, observa-se um padrão predominantemente simétrico para a maioria. Porém casos pontuais de assimetria mais acentuada foram observados. Acredita-se que essa assimetria esteja relacionada a instabilidade do sistema de aplicação de carga que utiliza quatro cilindros hidráulicos controlados individualmente de forma manual, porém ao se analisar o padrão de aplicação de carga, observa-se que não houveram discrepâncias significativas, quanto aos valores de carga entre os quatro cilindros hidráulicos no momento do ensaio. Outro ponto a ser analisado é o possível travamento de algum LVDT durante o ensaio, observa-se que houve uma pausa de leitura e só após algum estágio de carregamento a leitura foi continuada, conforme observa-se no L07 da laje NA-01, no L12 das lajes NA-03 e NA-04, no L05 da laje NA-05, esse problema pontual pode ter ocorrido por um incorreto manuseio do equipamento ou por uma falta de manutenção do mesmo.

A relação carga deslocamento médio é representada na Figura 4.22, onde se pode ter uma melhor análise dos deslocamentos máximos (representados pela média dos LVDT's L01, L06, L07 e L12) medidos das lajes. Analisando o referido gráfico, observa-se um aumento proporcional dos deslocamentos verticais médios até a formação das primeiras fissuras de flexão na face tracionada das lajes, com um nível de carregamento em torno de 130 kN. Após a formação das fissuras, nota-se uma mudança de rigidez na curva carga-deslocamento por meio da redução da inclinação da curva, rigidez essa alterada após o surgimento de novas fissuras. Observa-se, também, que as armaduras de punção permitiram que maiores níveis de deslocamento vertical fossem atingidos antes da ruína por retardar a punção.

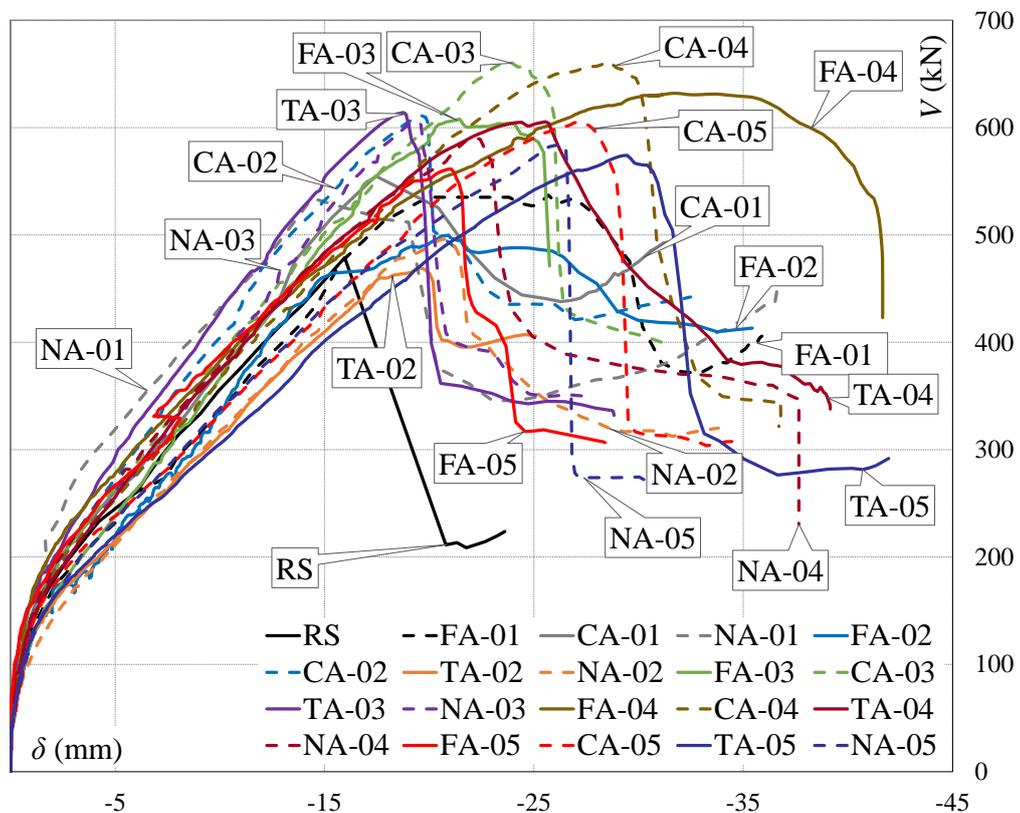
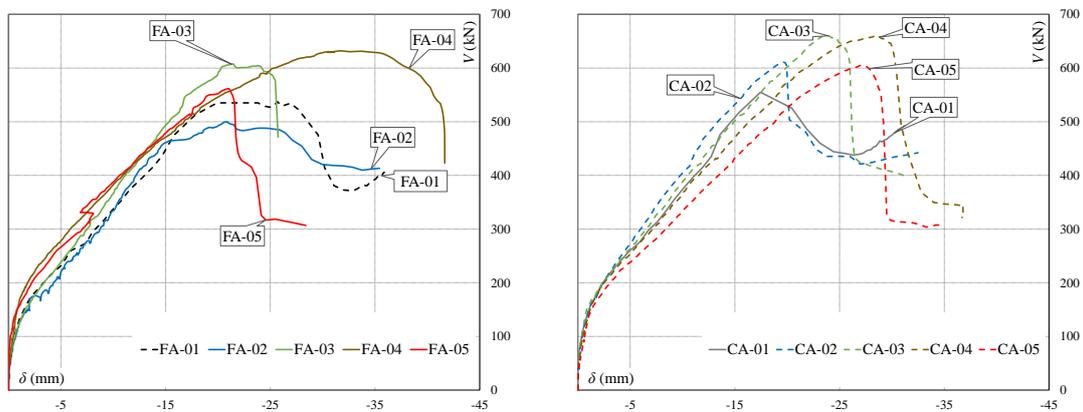


Figura 4.22 – Deslocamentos verticais médios de todas as lajes

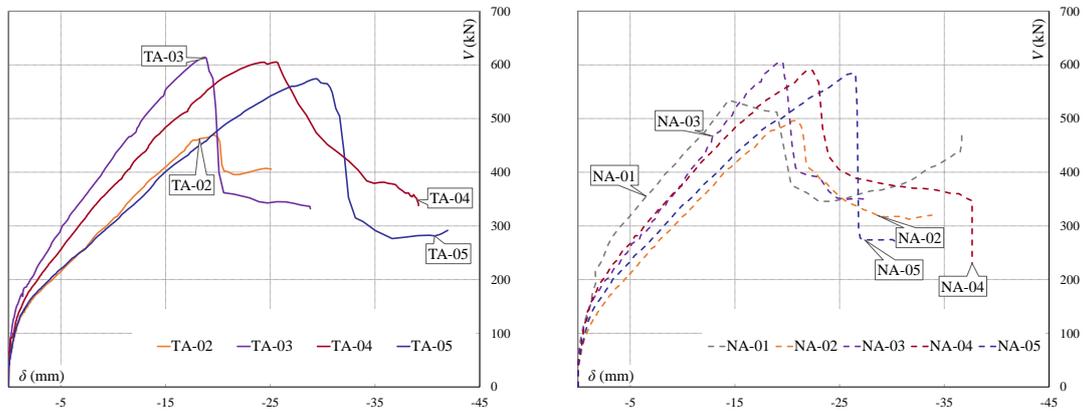
Na Figura 4.23 estão os gráficos carga-deslocamento para cada grupo analisado. As lajes da quarta e quinta séries de concretagem foram as que apresentaram maior deslocamento médio, evidenciando que o detalhamento das armaduras de punção utilizado nessa série foi o mais vantajoso (envolvendo a armadura de flexão pelos cantos, quando houve ancoragem), apresentando melhor desempenho. A laje FA-04 apresentou um acréscimo de carga, em comparação com a de referência, em torno de 32% e a CA-04 em torno de 38%, o que evidencia que ancorar as armaduras de cisalhamento pelo menos na armadura

longitudinal de baixo é necessário para um melhor desempenho estrutural, e que o detalhamento utilizado se mostra mais vantajoso para as lajes em análise.



a) Grupo 1 – Lajes FA-01, FA-02, FA-03, FA-04 e FA-05

b) Grupo 2 – Lajes CA-01, CA-02, CA-03, CA-04 e CA-05



c) Grupo 3 – Lajes TA-02, TA-03, TA-04 e TA-05

d) Grupo 4 – Lajes NA-01, NA-02, NA-03, NA-04 e NA-05

Figura 4.23 – Deslocamentos verticais médios por cada grupo analisado

Analisando o comportamento das lajes após a carga de ruptura, observa-se que as lajes com ancoragem *total*, Grupo 1, foram as que tiveram melhor comportamento, apresentando um acréscimo de deslocamento, característica de um comportamento mais dúctil, sugerindo uma ancoragem mais eficiente da armadura de punção. As lajes do Grupo 2, com ancoragem *parcial*, apresentaram comportamento similar às do Grupo 1, o que mostra que ancorar as armaduras de punção apenas na armadura de flexão comprimida pode ser vantajoso, mas não o ideal, quanto aos deslocamentos verticais. As lajes do Grupo 3 e Grupo 4 apresentaram uma queda brusca na resistência, após a carga de pico, evidenciando que a ruptura foi de forma frágil, brusca e sem aviso, que é uma característica de lajes sem armadura de punção.

#### 4.2.2. Deformações na superfície do concreto

Com o intuito de registrar as deformações radiais e tangenciais do concreto foram posicionados quatro extensômetros em pontos específicos na região adjacente ao pilar, sendo os extensômetros denominados EC1 e EC2 destinados a medir às deformações radiais, e o EC3 e EC4 às deformações tangenciais. Na Figura 4.24 à Figura 4.43 são apresentadas as leituras de deformações na superfície inferior de cada laje até a ruptura.

É importante ressaltar que a laje CA-01 perdeu o extensômetro EC03, impossibilitando a leitura da deformação tangencial naquele ponto.

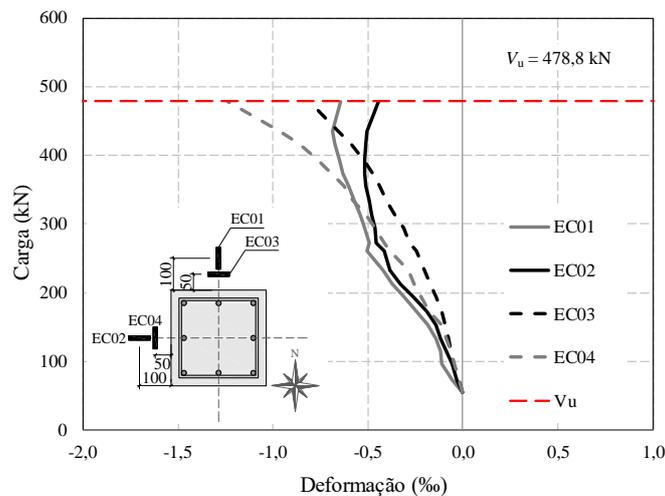


Figura 4.24 – Deformações na superfície do concreto na laje RS

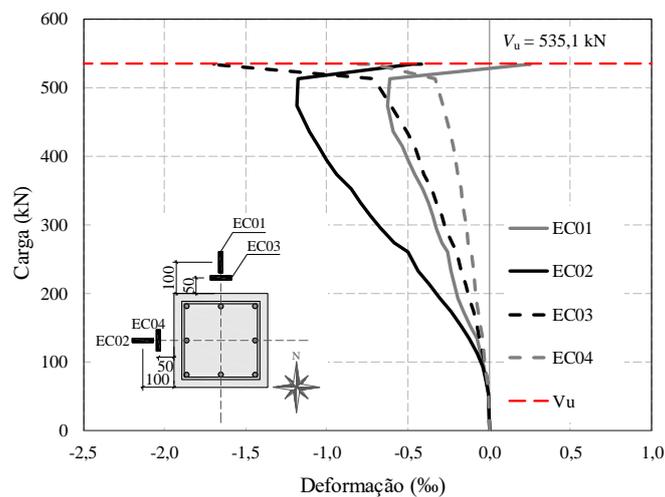


Figura 4.25 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-01

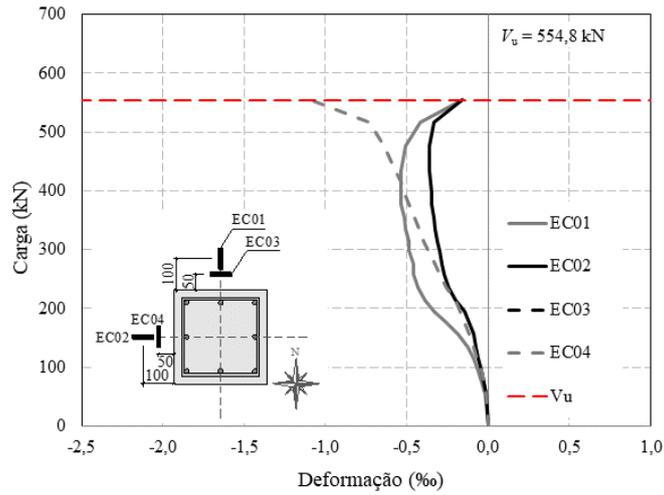


Figura 4.26 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-01

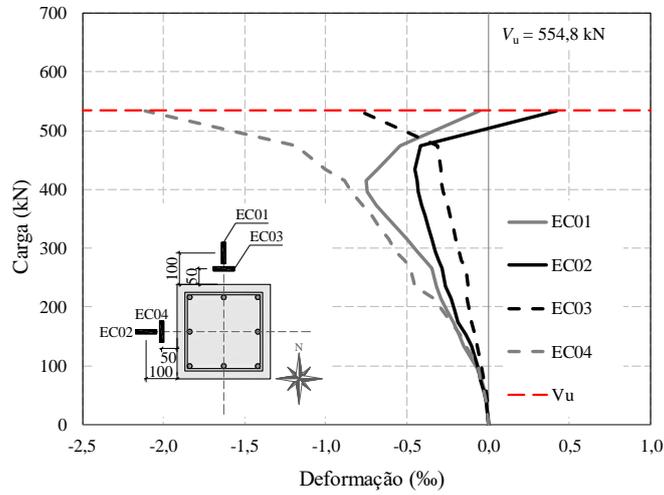


Figura 4.27 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-01

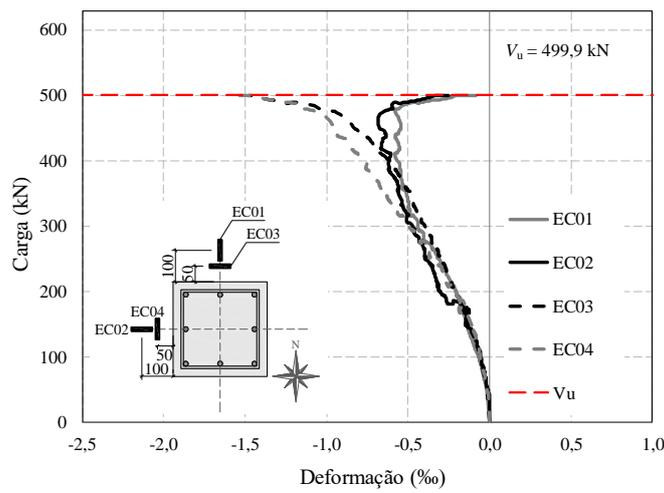


Figura 4.28 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-02

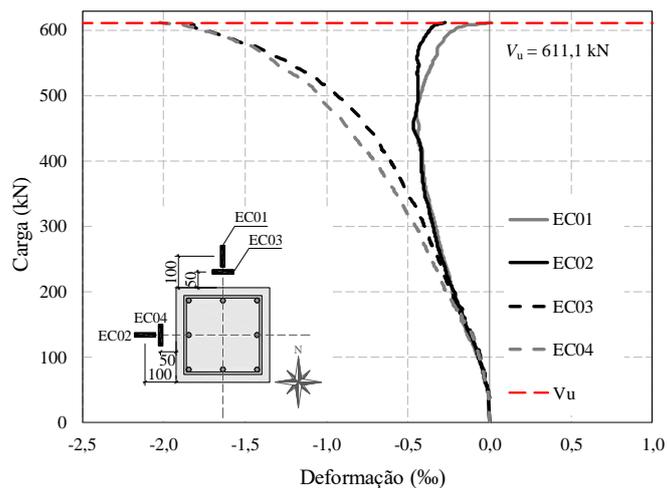


Figura 4.29 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-02

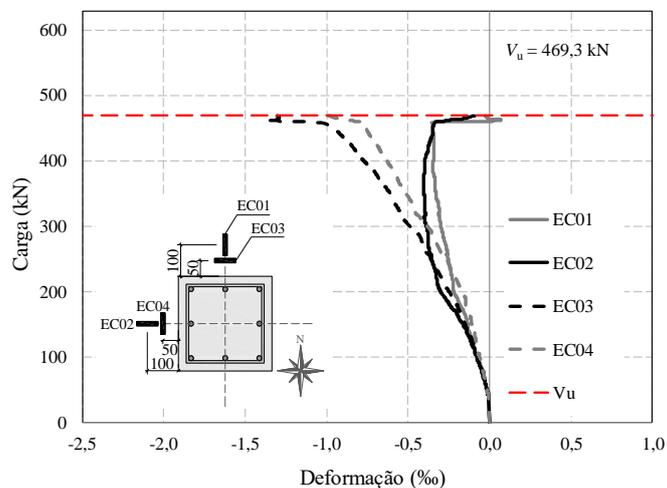


Figura 4.30 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-02

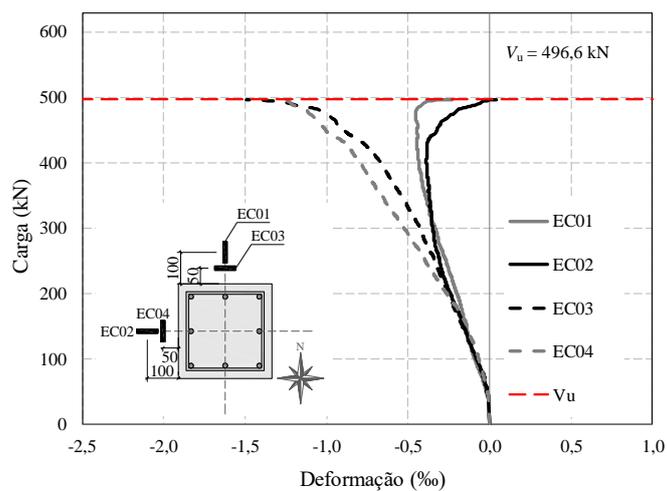


Figura 4.31 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-02

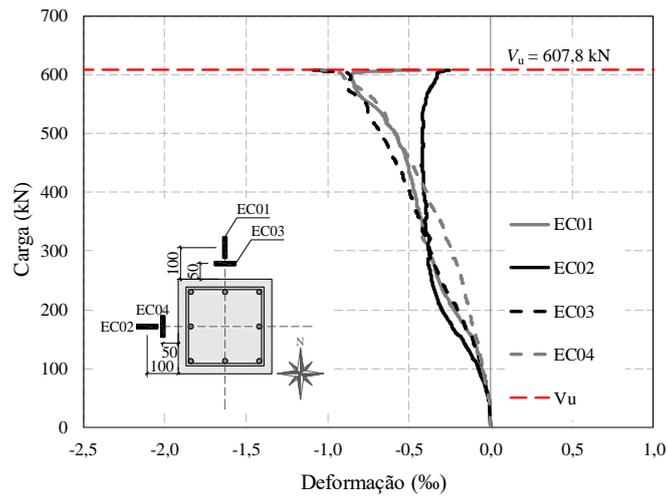


Figura 4.32 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-03

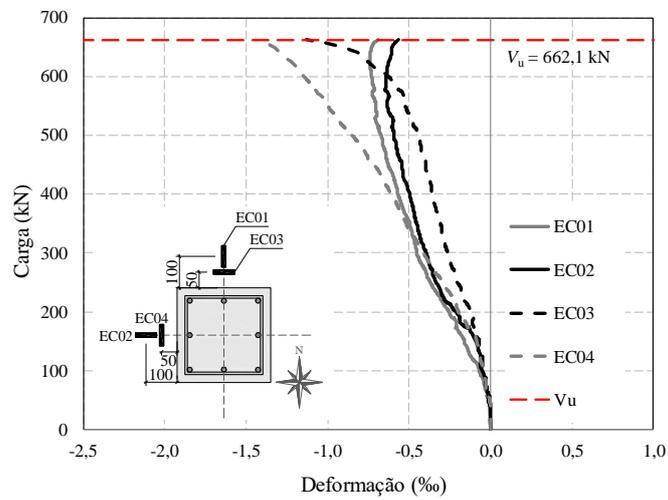


Figura 4.33 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-03

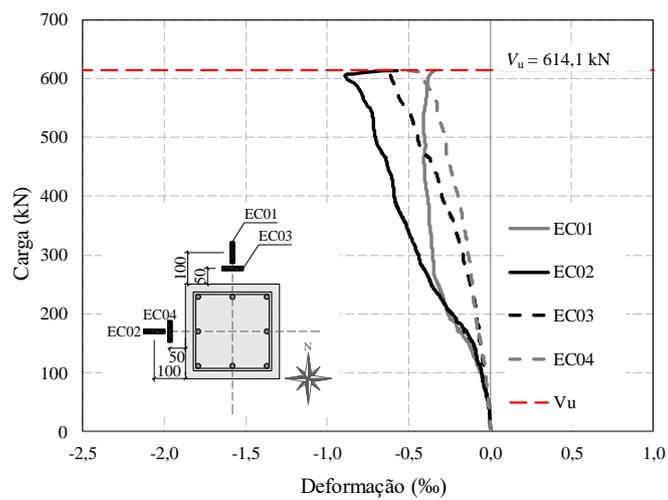


Figura 4.34 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-03

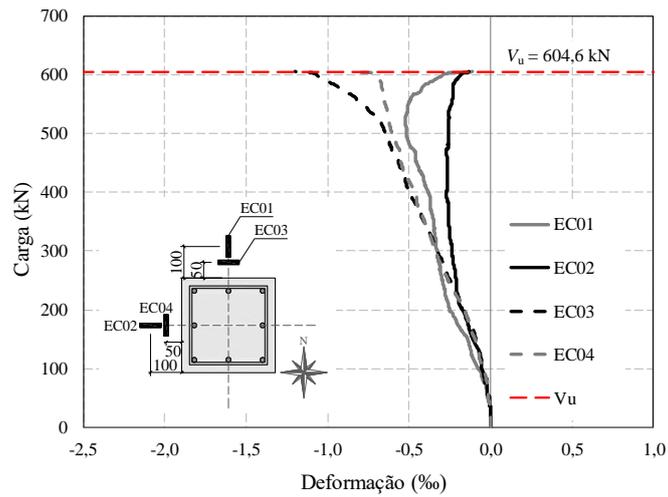


Figura 4.35 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-03

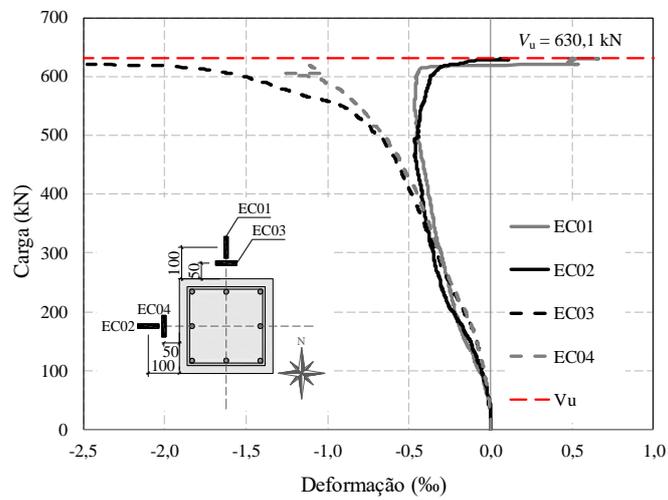


Figura 4.36 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-04

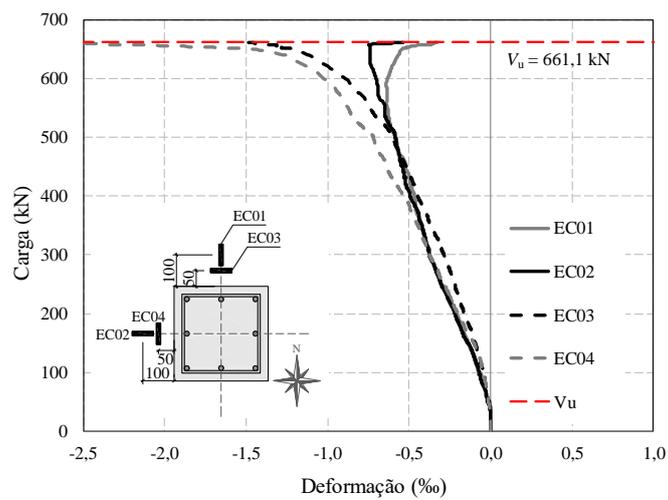


Figura 4.37 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-04

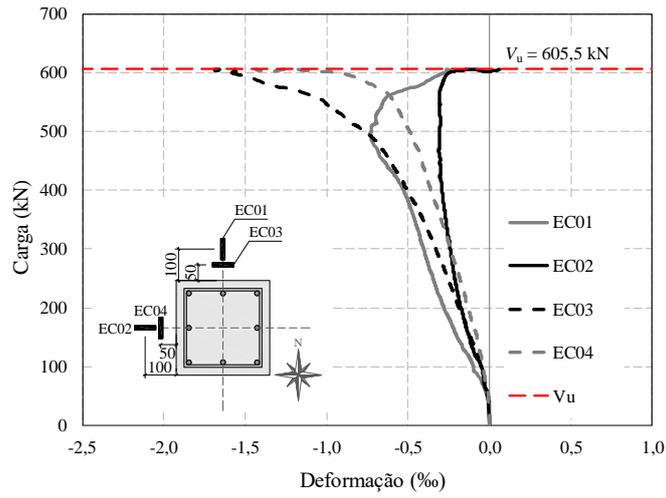


Figura 4.38 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-04

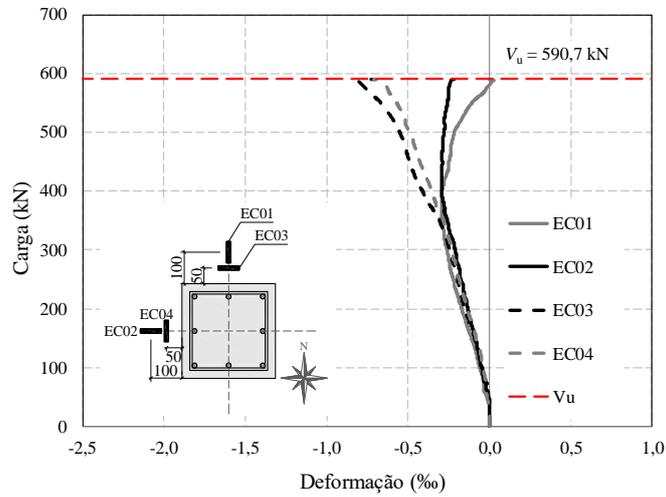


Figura 4.39 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-04

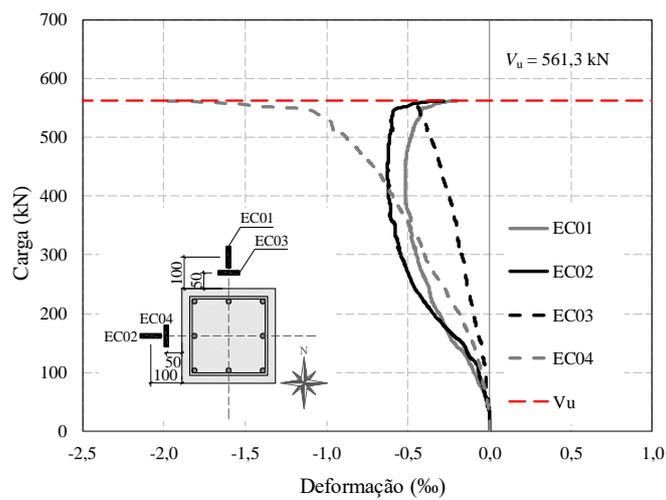


Figura 4.40 – Deformações na superfície do concreto na laje FA-05

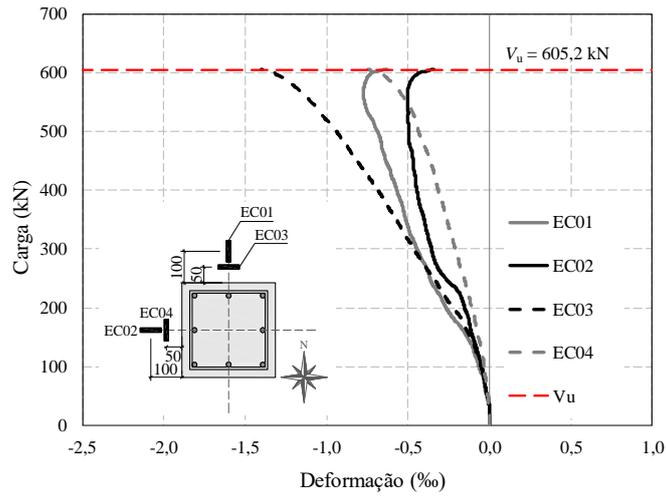


Figura 4.41 – Deformações na superfície do concreto na laje CA-05

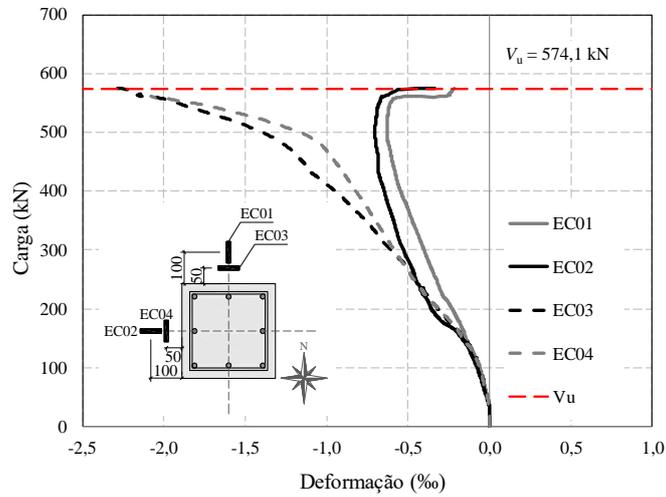


Figura 4.42 – Deformações na superfície do concreto na laje TA-05

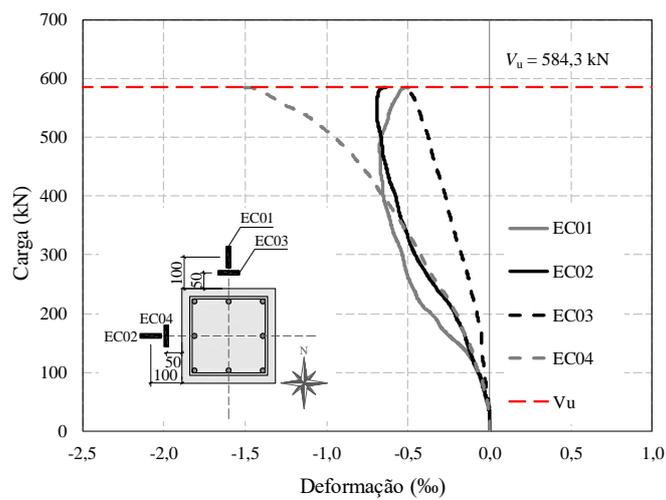


Figura 4.43 – Deformações na superfície do concreto na laje NA-05

Observa-se, analisando os gráficos, que as deformações radiais e tangenciais apresentaram uma tendência de crescimento similar, para todas as lajes, até o surgimento das primeiras fissuras de flexão. Após essa fissuração, as deformações crescem em diferentes taxas e, para as deformações tangenciais, foram observadas as maiores deformações, quando comparadas com as deformações radiais. Próximo à ruptura, as deformações radiais diminuem, podendo até apresentar valores de tração. Esse comportamento também foi observado por outros autores, que também desenvolveram pesquisas na Universidade de Brasília [MORAES NETO (2013); OLIVEIRA (2013); SANTOS (2014); NICÁCIO (2018)].

Muttoni (2008) constatou que deformações radiais de tração, na face comprimida da laje, próximo ao pilar, ocorre pouco antes da ruptura por punção. O autor explica este fenômeno por meio de um modelo de bielas e tirantes para ruptura por punção, em que, devido ao desenvolvimento da fissura crítica de cisalhamento, surge uma biela em forma de cotovelo com um elemento de tração ao longo da superfície inferior da laje próxima ao pilar (Figura 4.44). Na superfície inferior da laje, conforme apontado por Guandalini, Burdet e Muttoni (2009), se desenvolve uma curvatura local próximo ao pilar devido a uma flexão local na zona de compressão fazendo com que o concreto sofra uma descompressão nesta região (Figura 4.45).

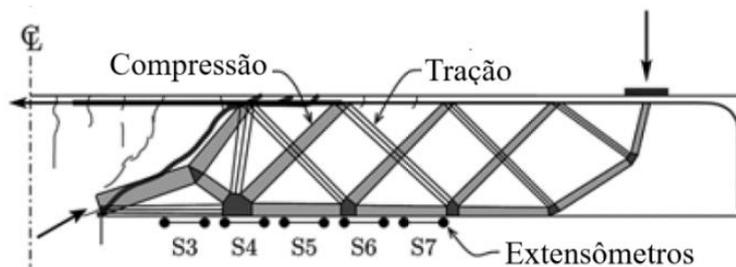


Figura 4.44 – Biela em forma de cotovelo, adaptado de Muttoni (2008)

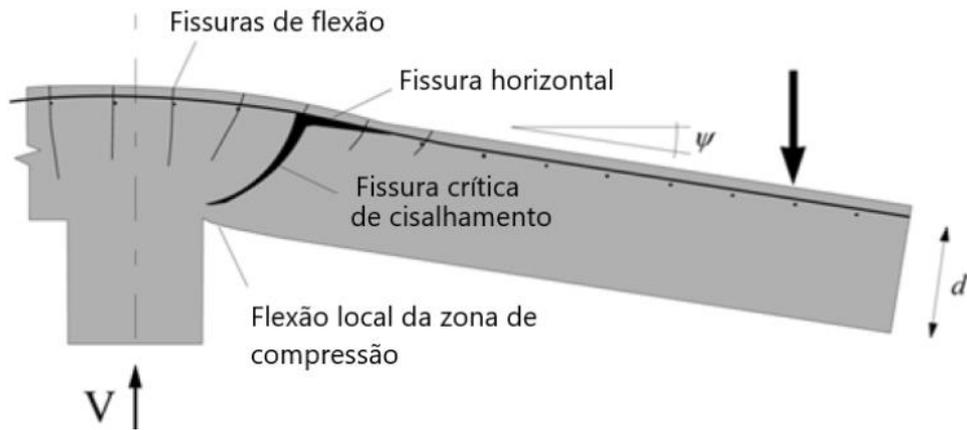


Figura 4.45 – Flexão local na zona de compressão, adaptado de Guandalini, Burdet e Muttoni (2009)

Quantitativamente, nenhuma das 20 lajes atingiu deformações superiores à deformação de esmagamento do concreto, que é de 3,5 ‰. A maior deformação registrada na ruptura, ocorreu na laje FA-04, com valor de 2,47 ‰ para o extensômetro tangencial EC3.

As deformações tangenciais apresentam maiores valores, e dessa forma uma comparação entre as deformações tangenciais médias de cada modelo é apresentada na Figura 4.46, e na Figura 4.47 as deformações são apresentadas por grupo.

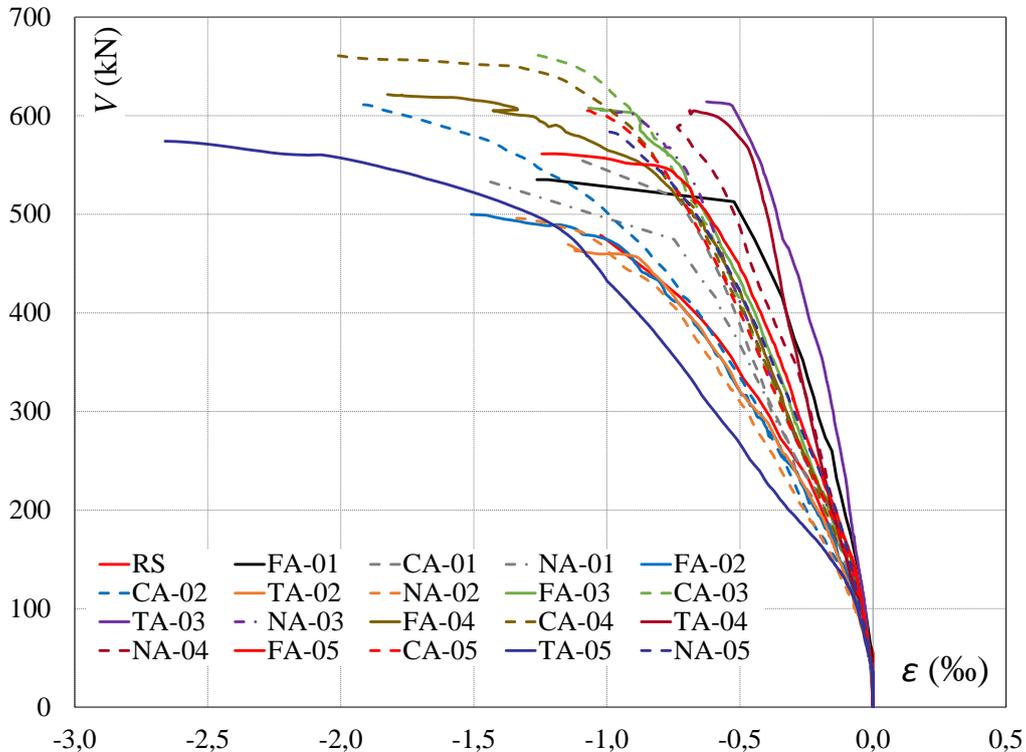


Figura 4.46 – Deformações tangenciais médias na superfície do concreto para cada laje

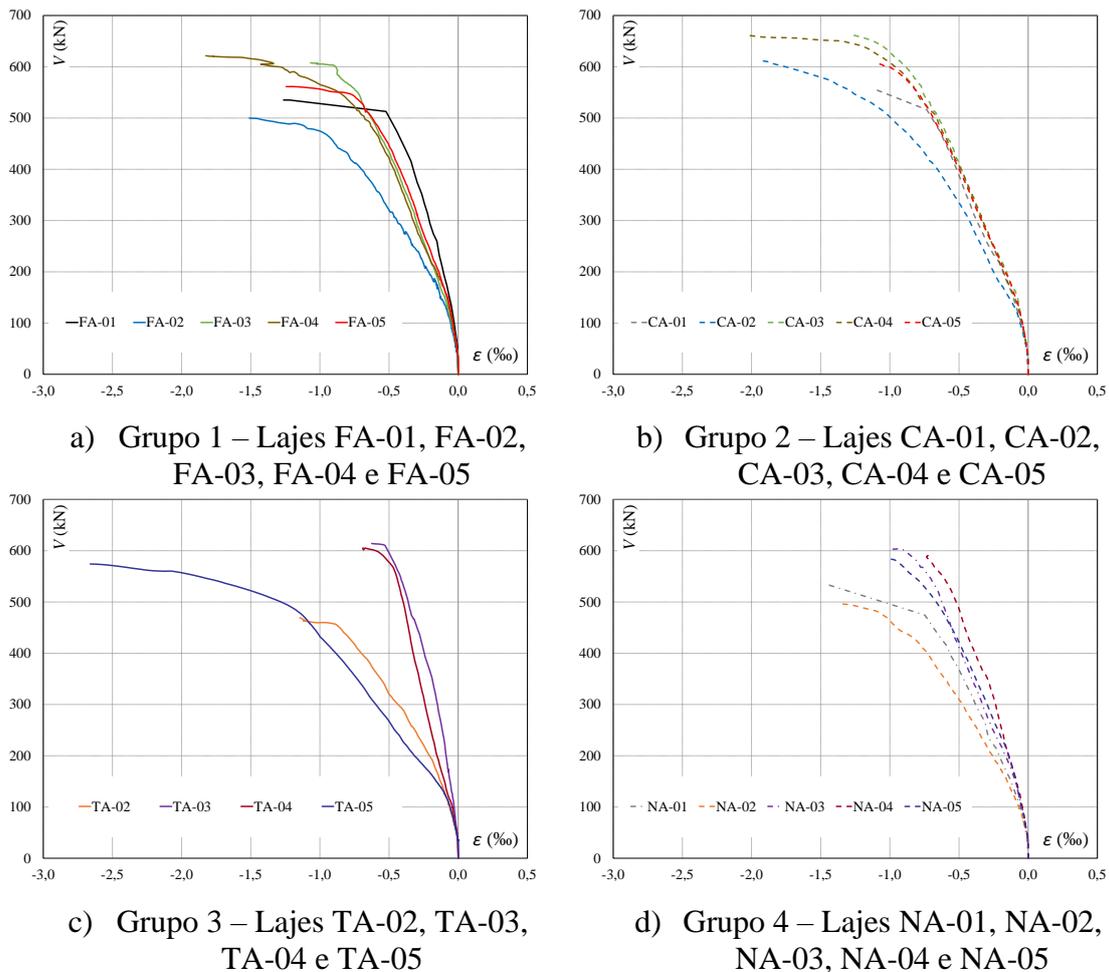


Figura 4.47 – Deformações tangenciais médias na superfície do concreto para cada laje, por grupo analisado

Observa-se que as lajes com menores deslocamentos verticais também foram as que tiveram menores deformações tangenciais médias na superfície do concreto. As lajes com ancoragem *parcial*, do Grupo 3, e as lajes *sem* armadura de punção, do Grupo 4, tem comportamento semelhantes; bem como as do Grupo 1 tem com as do Grupo 2, evidenciando esse fato também observado na análise dos deslocamentos verticais. Para uma maior deformabilidade do concreto, evidencia-se que as armaduras devem estar *totalmente* ancoradas ou pelo menos, ancoradas na armadura de flexão comprimida.

#### 4.2.3. Deformações na armadura de flexão

Todas as lajes tiveram 7 pontos monitorados, para leitura das deformações nas armaduras de flexão, conforme descrito no item 3.3.2. Nas Figura 4.48 à Figura 4.52 são apresentadas as deformações nas armaduras de flexão em todas as lajes, na ocasião de ruptura, para cada série. A partir da análise desses gráficos é possível avaliar a distribuição dos esforços de flexão, bem como as deformações nas armaduras, e com isso

obter uma real noção da iminência de uma possível ruptura por flexão, analisando se essas armaduras atingem o escoamento.

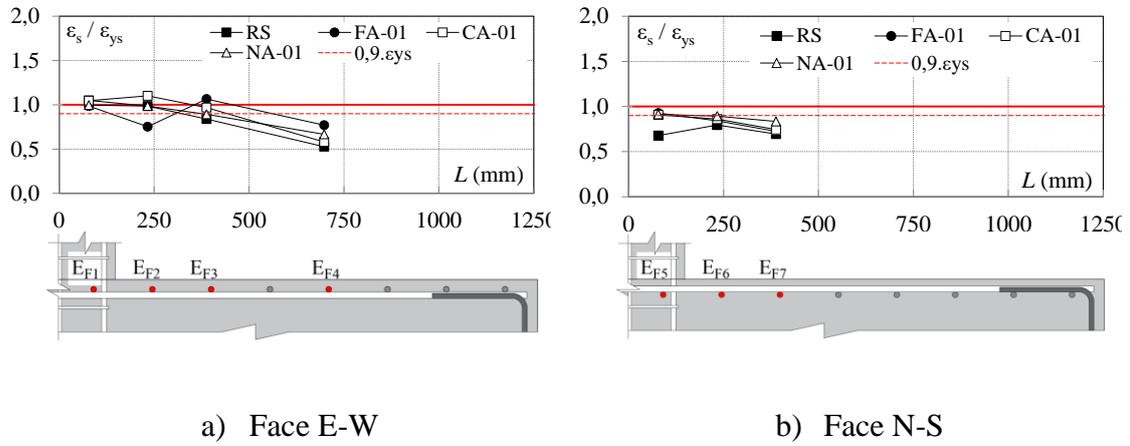


Figura 4.48 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 1.

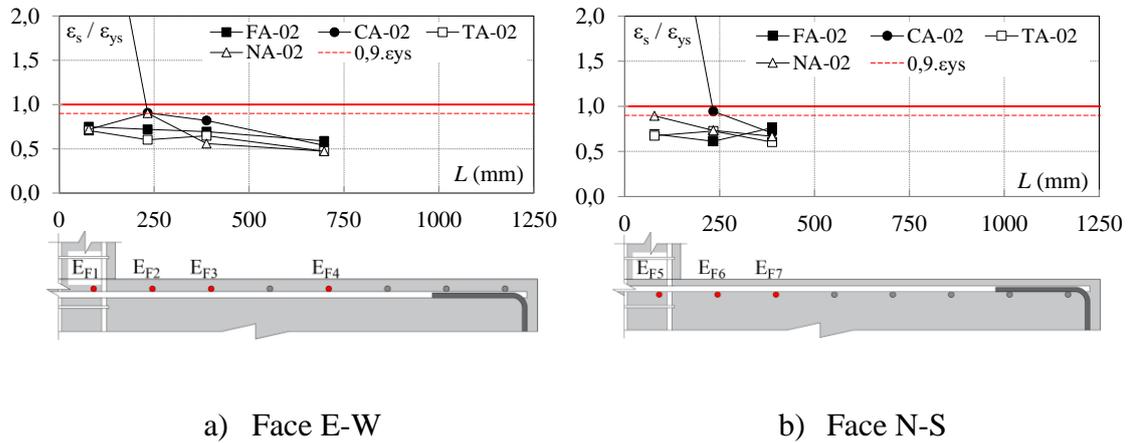


Figura 4.49 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 2.

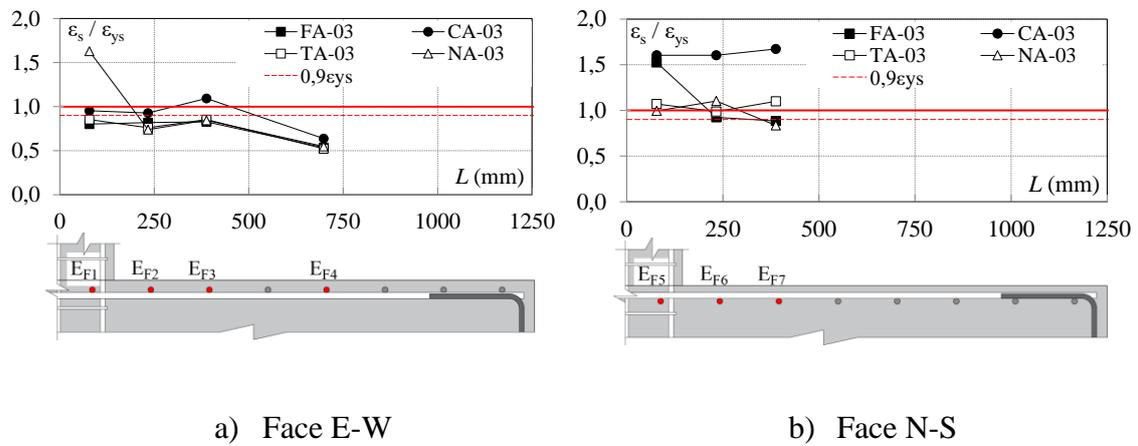


Figura 4.50 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 3.

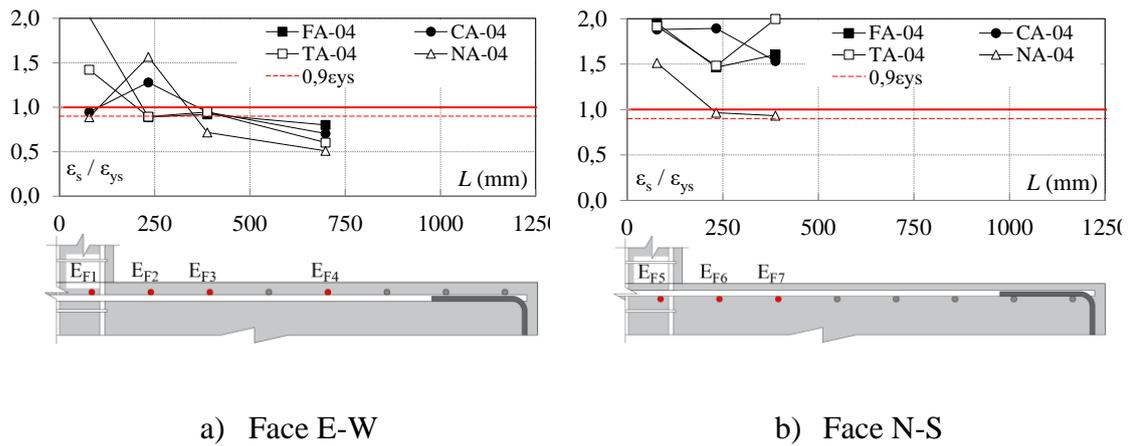


Figura 4.51 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 4.

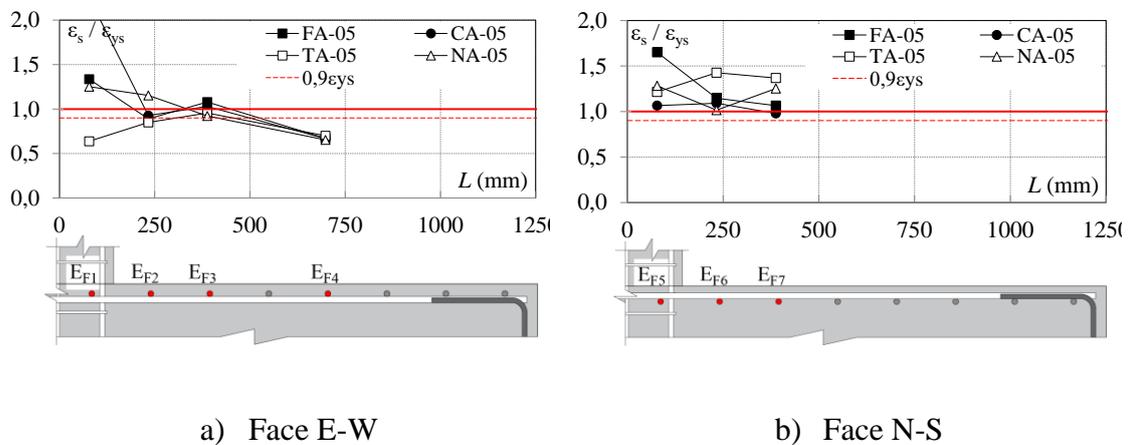


Figura 4.52 – Deformações nas armaduras de flexão da Série 5.

Cabe ressaltar que as lajes da Série 4 e Série 5 tiveram maiores deformações nas armaduras de flexão em relação à demais, correspondentes. O detalhamento dos estribos, envolvendo as armaduras de flexão (com essas passando pelos cantos dos estribos) pode ser fator determinante para esse comportamento.

Pode-se observar, que as lajes com armadura de cisalhamento apresentaram maior deformação das armaduras de flexão por atingirem níveis de carregamento maiores. Sendo que as lajes com armadura de cisalhamento ancorada apenas nas armaduras de flexão de baixo obtiveram maiores deformações nas armaduras de flexão tracionadas, evidenciando a formação de um mecanismo entre armadura de cisalhamento e armadura de flexão que combate a ruptura, que se inicia de baixo para cima, fazendo com que as armaduras sejam mais ativadas. As lajes NA-01, NA-02, NA-03, NA-04 e NA-05 possuem uma menor quantidade de barras escoadas, ou próximas ao escoamento, porém apresentam nível de deformação considerável, o que evidencia que o tipo de ancoragem utilizado não

interferiu consideravelmente na deformabilidade das armaduras. Observa-se que a variação da ancoragem e taxa de cisalhamento não interferiram na rigidez da laje quanto as deformações da armadura de flexão.

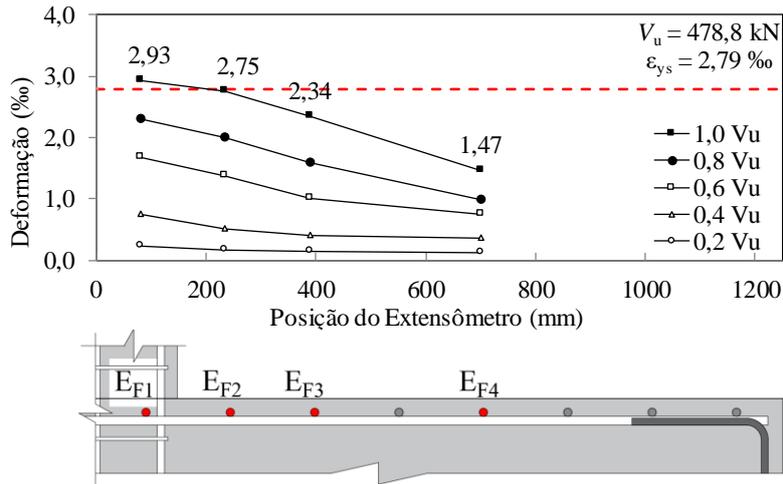
Na Tabela 4.4 é apresentado um resumo do nível de solicitação à flexão das lajes no momento de sua ruptura ao relacionar a tensão de cada barra monitorada no momento da ruptura com sua posição em relação ao eixo da laje, facilitando a análise do comportamento das lajes à flexão.

Tabela 4.4 – Nível de solicitação à Flexão das lajes no momento da ruptura

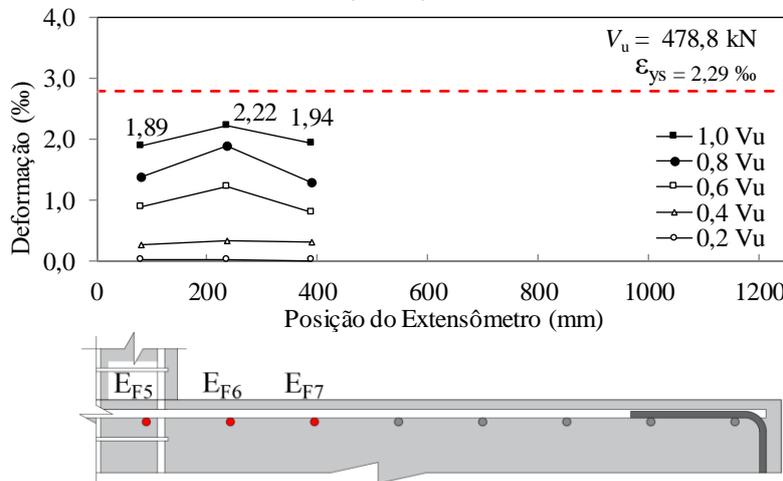
Série	Laje	Deformação medida nos extensômetros (%)						
		EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7
1	RS	2,93	2,75*	2,34	1,47	1,89	2,22	1,94
	FA-01	2,75*	2,1	2,97	2,15	2,59*	2,35	2,02
	CA-01	2,92	3,07	2,7*	1,62	2,53*	2,4	2,08
	NA-01	2,78*	2,75*	2,49	1,86	2,55*	2,49	2,33
2	FA-02	2,55	2,45	2,36	2	2,35	2,08	2,59
	CA-02	-	3,08*	2,79	1,83	-	3,21*	2,39
	TA-02	2,4	2,05	2,2	1,61	2,29	2,47	2,05
	NA-02	2,45	3,07	1,9	1,61	3,04	2,49	2,27
3	FA-03	2,75	2,81	2,84	1,84	5,23	3,17*	3,03
	CA-03	3,27*	3,18*	3,75	2,19	>> $\epsilon_{ys}$	>> $\epsilon_{ys}$	5,74
	TA-03	2,93	2,61	2,93	1,79	3,67	3,39*	3,77
	NA-03	5,59	2,54	2,9	1,88	3,41*	3,78	2,87
4	FA-04	>> $\epsilon_{ys}$	3,05	3,16	2,75	>> $\epsilon_{ys}$	5,02	>> $\epsilon_{ys}$
	CA-04	3,25	4,39	3,25	2,42	>> $\epsilon_{ys}$	>> $\epsilon_{ys}$	5,26
	TA-04	4,88	3,07	3,25	2,07	>> $\epsilon_{ys}$	5,08	>> $\epsilon_{ys}$
	NA-04	3,05	5,38	2,46	1,75	5,19	3,31	3,20
5	FA-05	3,66	2,44	2,96	1,84	4,52	3,14	2,92
	CA-05	>> $\epsilon_{ys}$	2,54*	2,82	1,83	2,92	2,99	2,68*
	TA-05	1,75	2,33	2,62*	1,92	3,33	3,91	3,75
	NA-05	3,43	3,16	2,53*	1,79	3,51	2,78	3,43

Nota: (\*) representa a deformação superior a 90% de  $\epsilon_{ysm}$  e, (>>  $\epsilon_{ys}$ ) representa os casos de deformações muito maiores que as deformações de escoamento

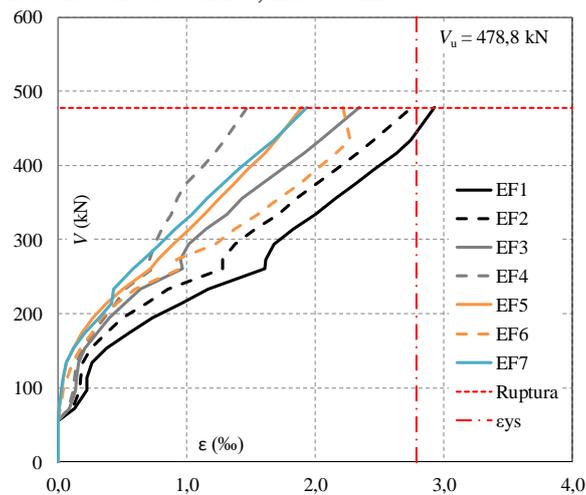
Na Figura 4.53 à Figura 4.72 são apresentados os gráficos das deformações nas armaduras de flexão tracionadas da laje em função do posicionamento do extensômetro na barra. As leituras de deformação são apresentadas a cada 20% da carga de ruptura, e são visualizadas as deformações dos extensômetros EF1 à EF7.



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

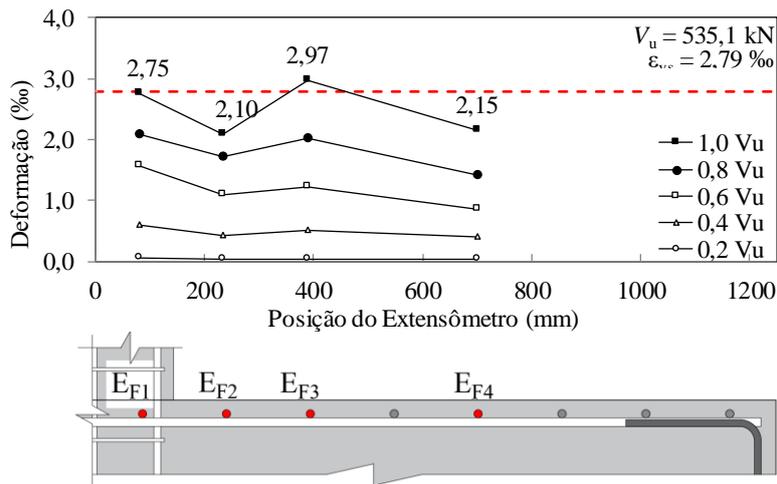


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

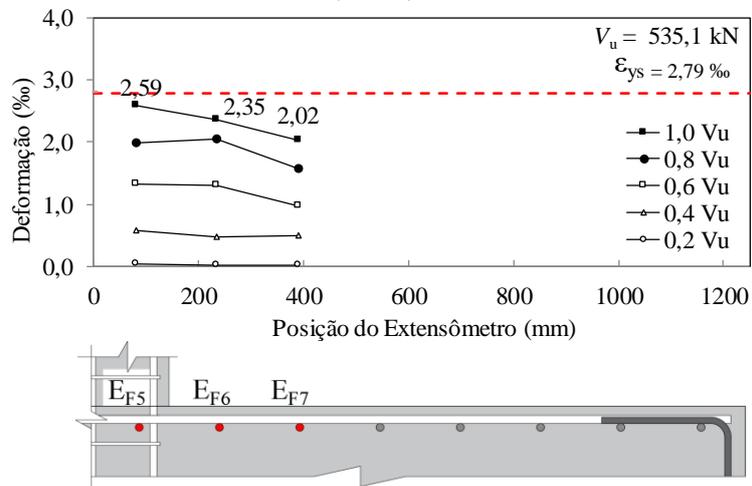


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

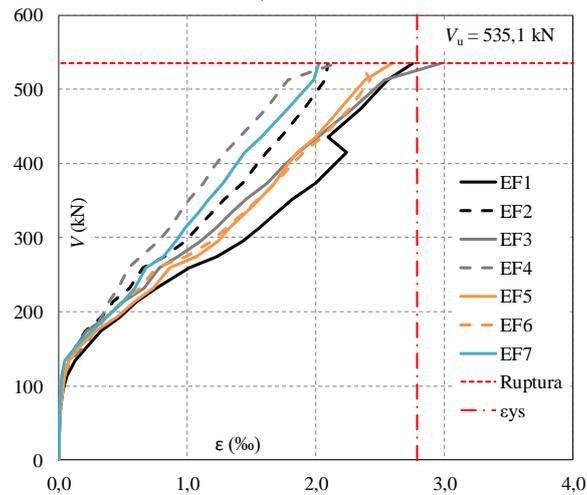
Figura 4.53 – Deformações nas armaduras de flexão da laje RS



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

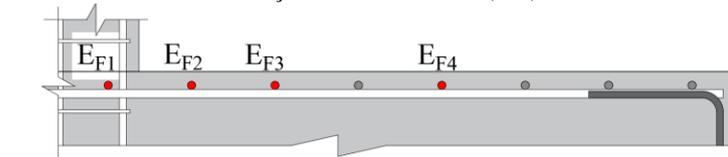
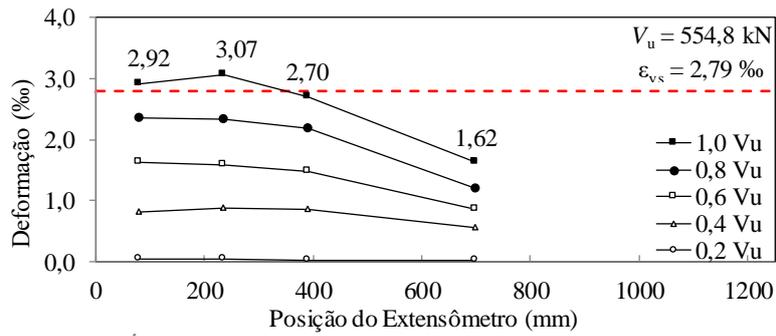


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

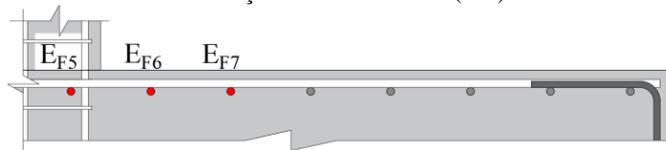
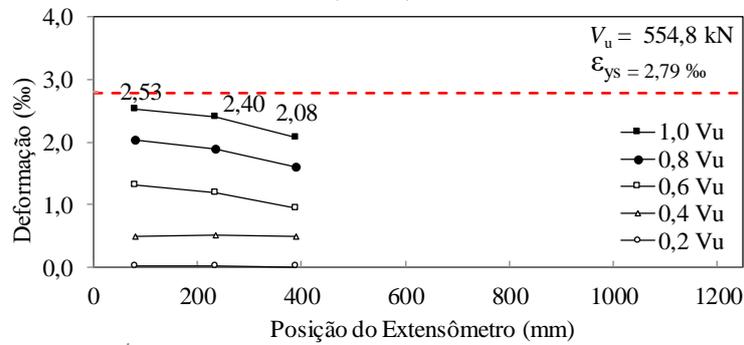


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

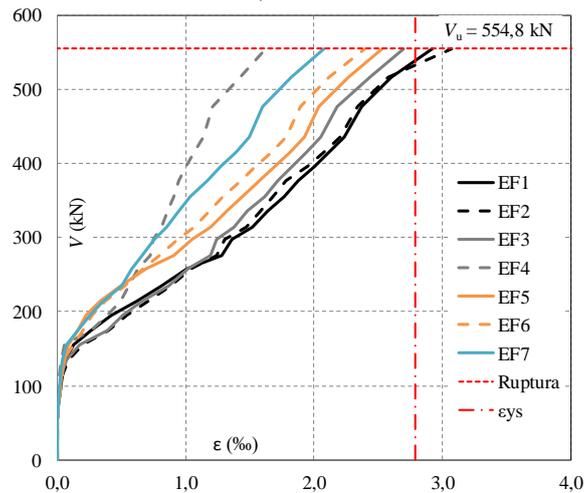
Figura 4.54 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-01



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

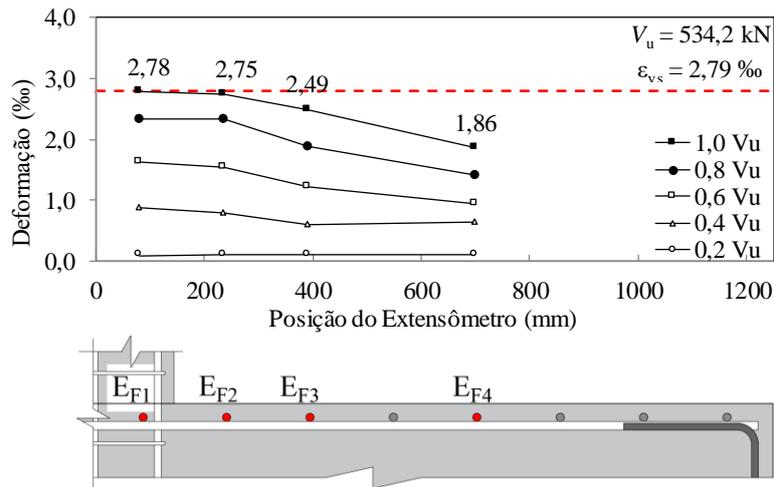


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

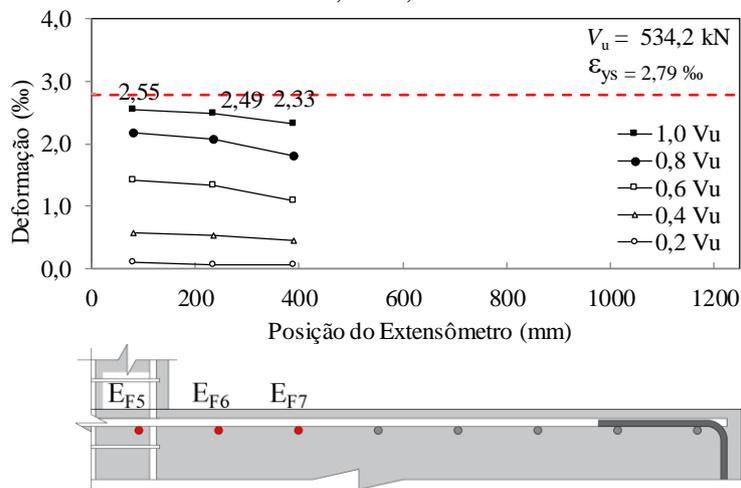


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

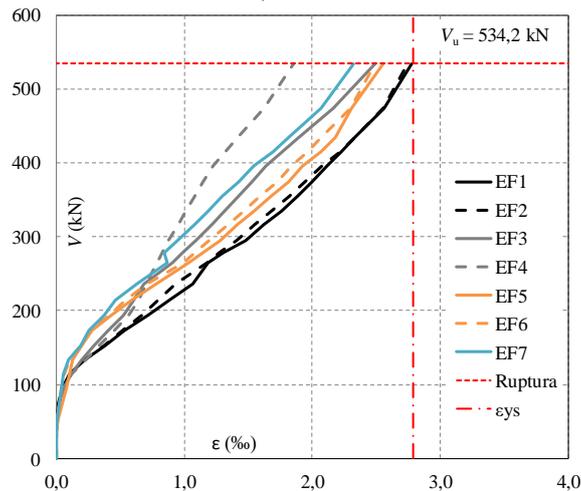
Figura 4.55 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-01



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

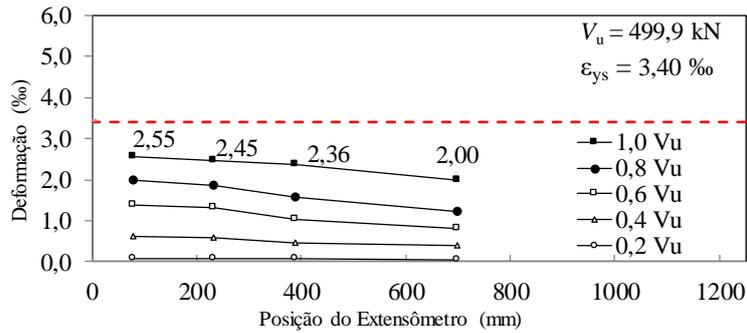


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

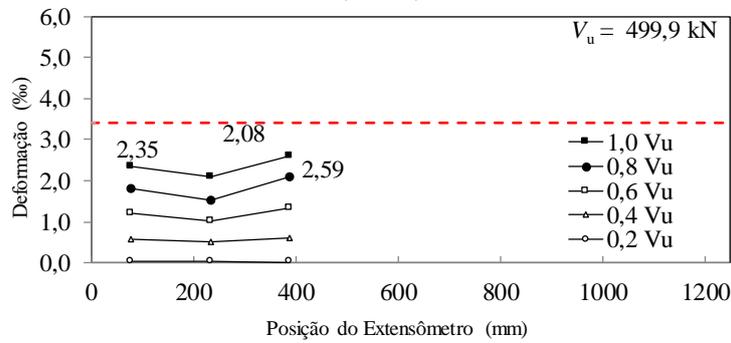


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

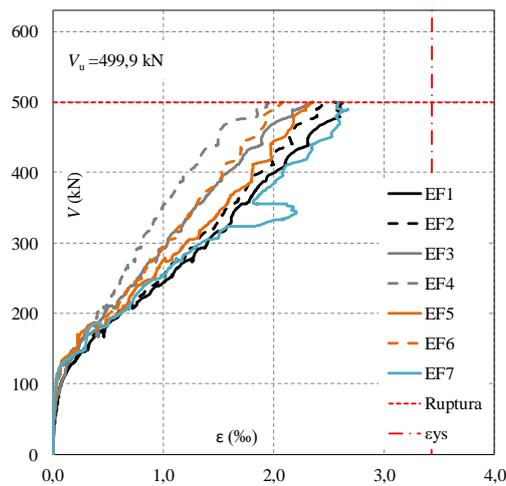
Figura 4.56 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-01



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

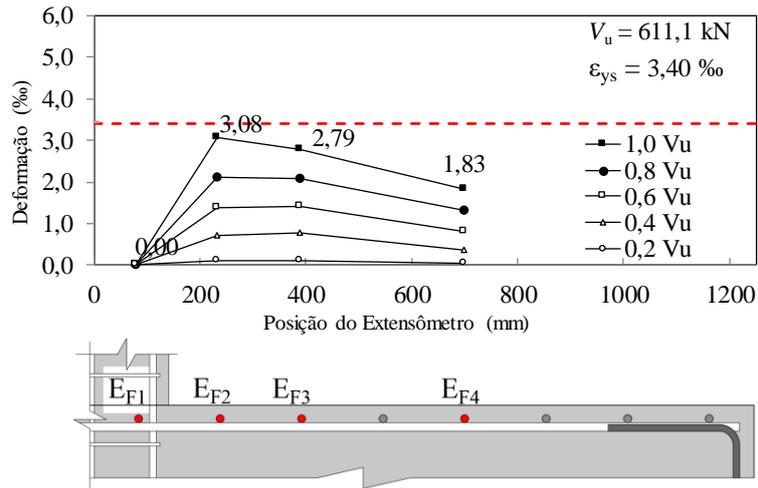


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

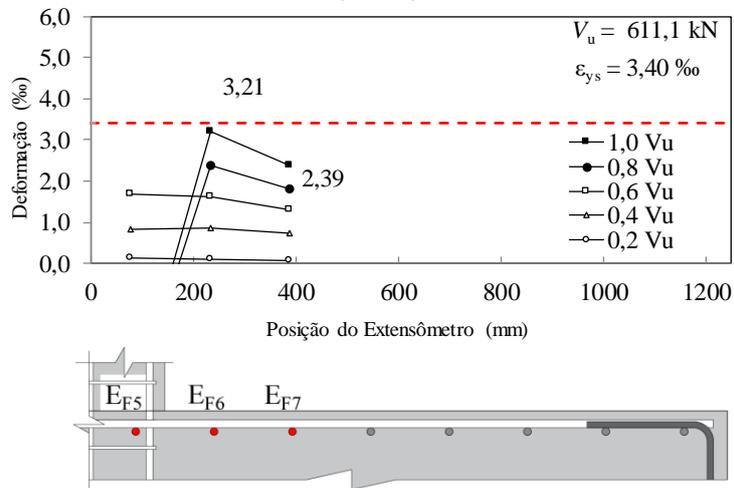


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

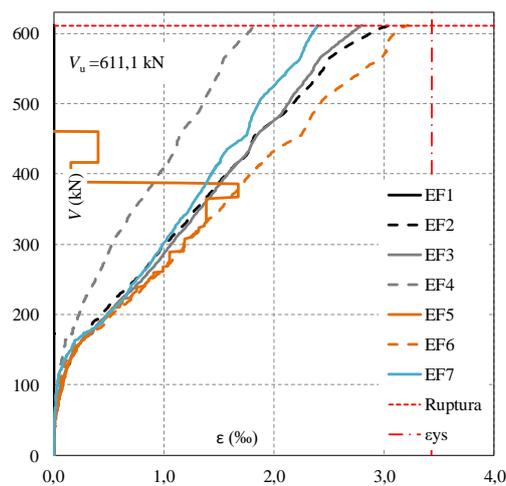
Figura 4.57 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-02



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

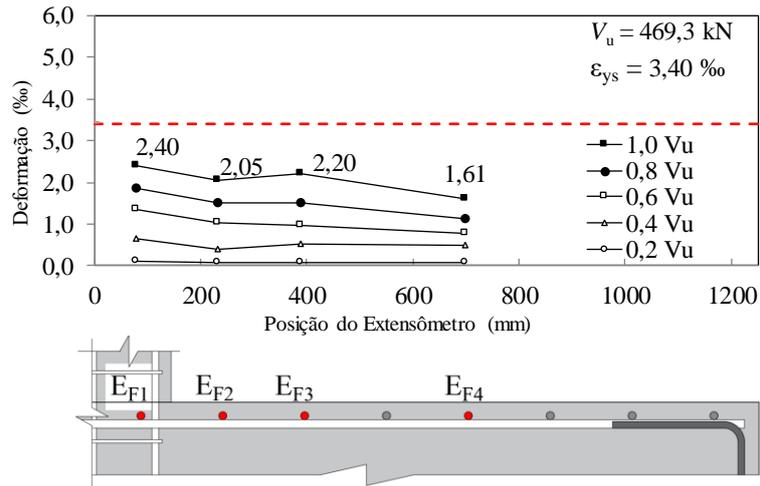


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

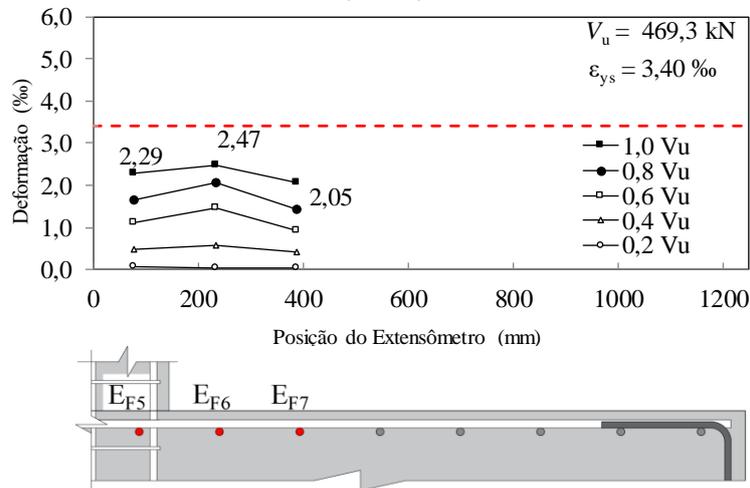


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

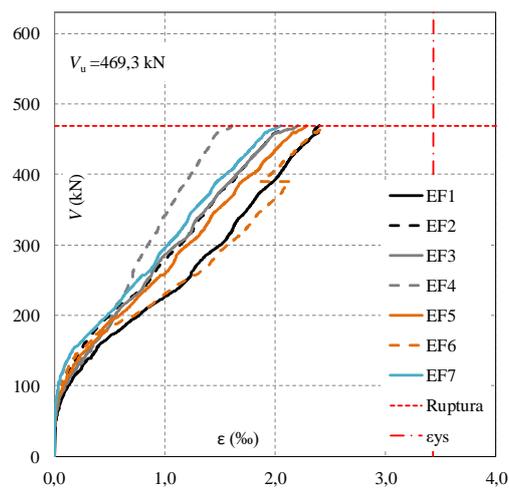
Figura 4.58 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-02



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

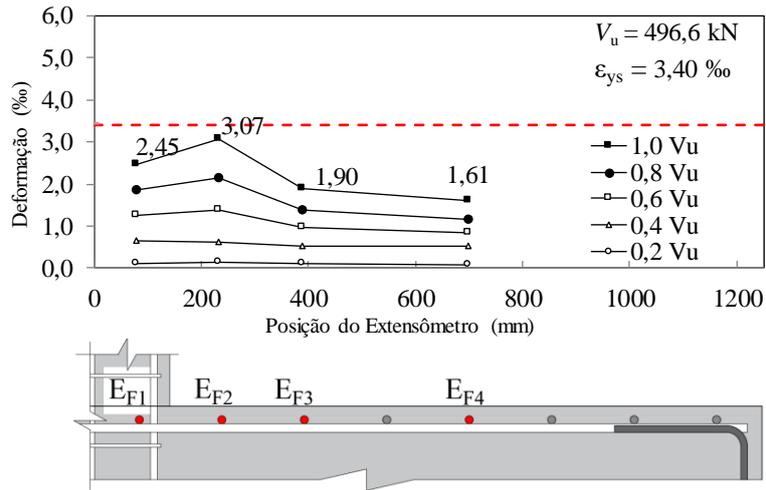


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

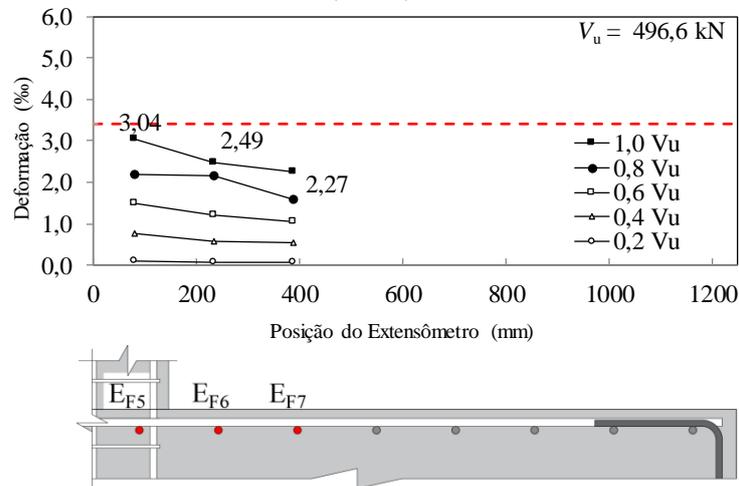


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

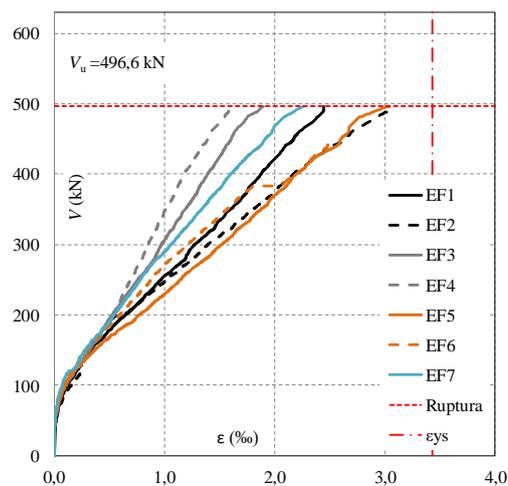
Figura 4.59 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-02



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

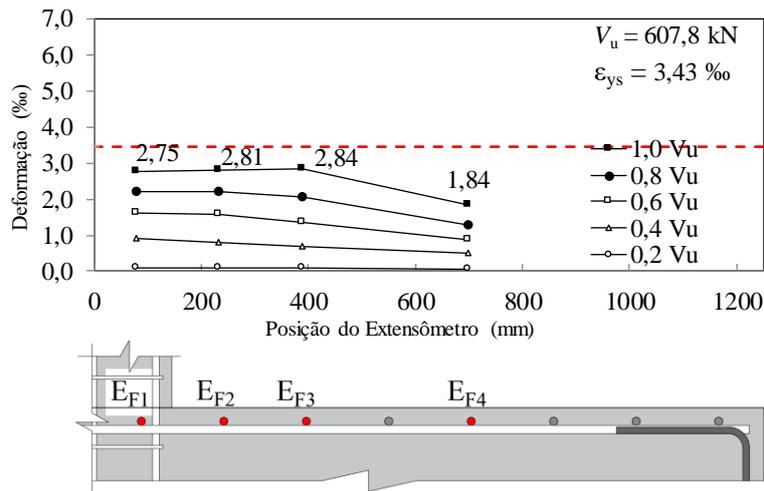


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

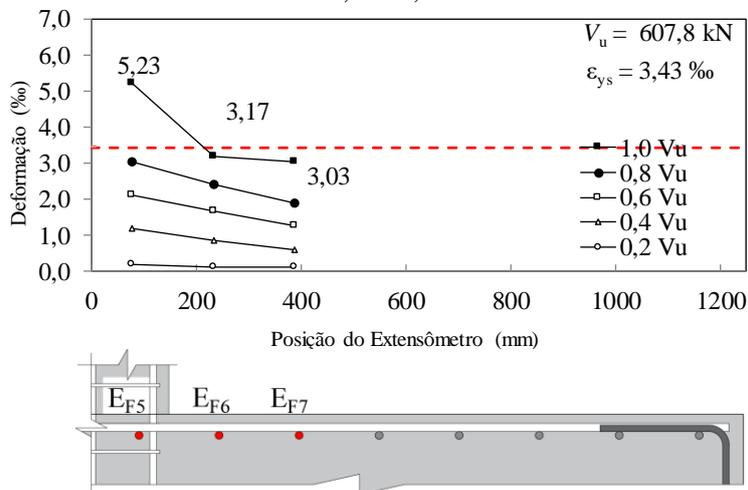


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

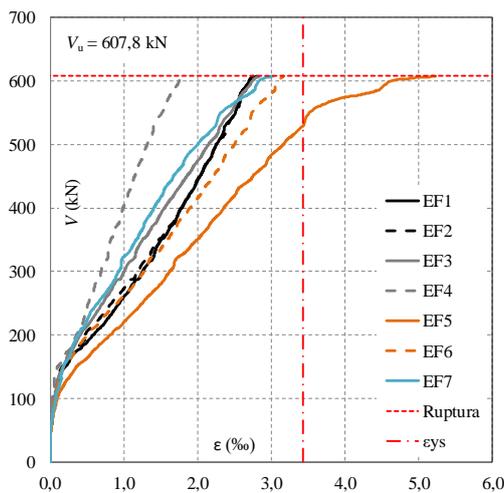
Figura 4.60 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-02



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

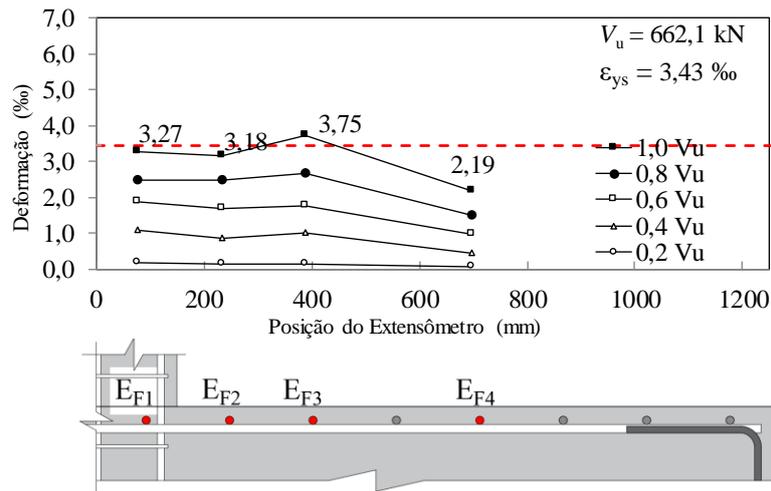


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

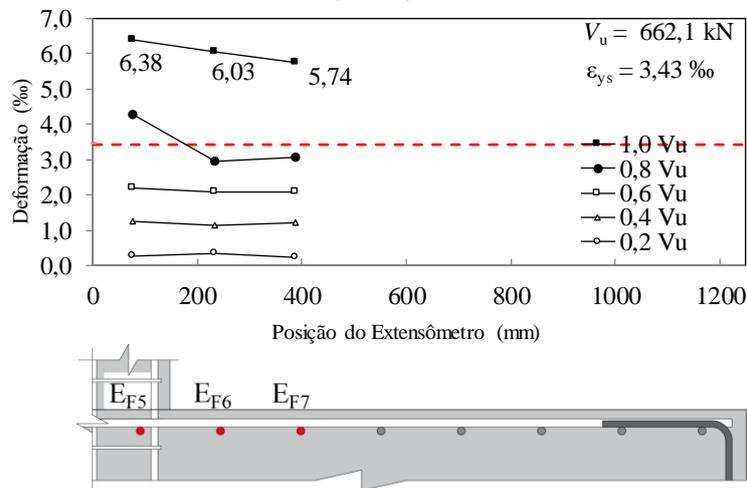


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

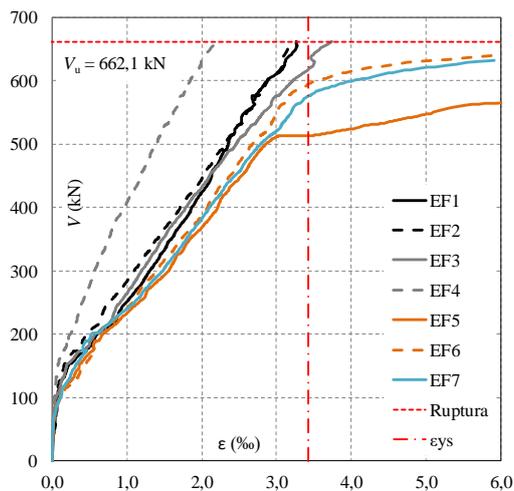
Figura 4.61 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-03



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

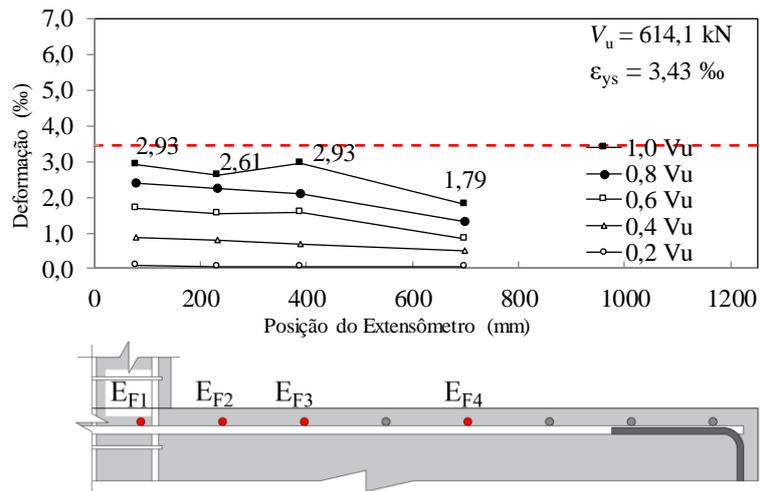


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

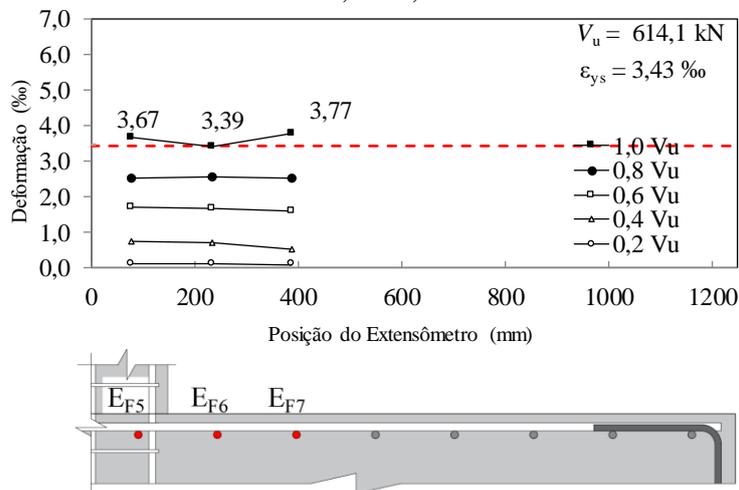


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

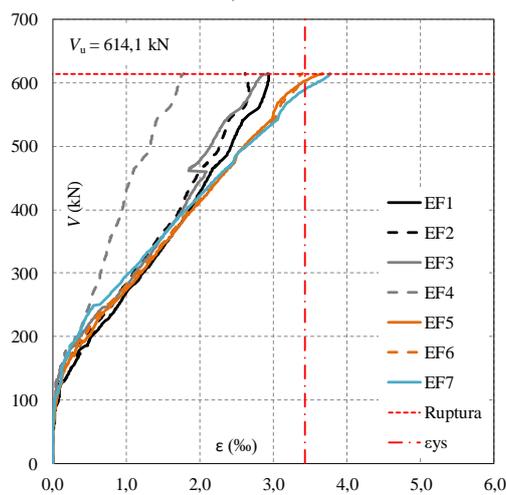
Figura 4.62 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-03



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

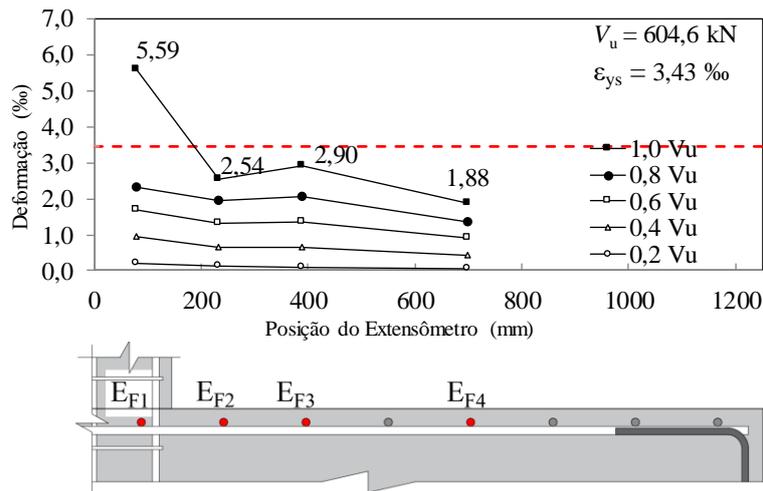


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

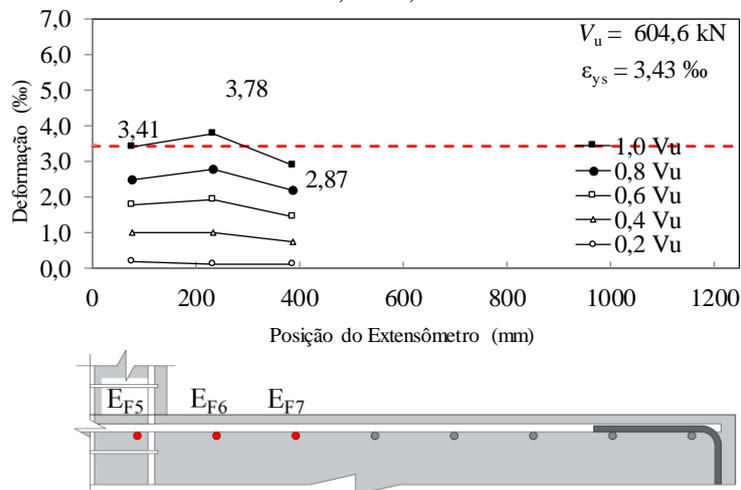


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

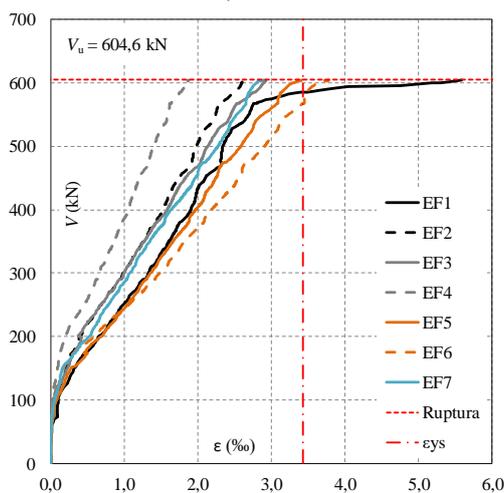
Figura 4.63 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-03



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

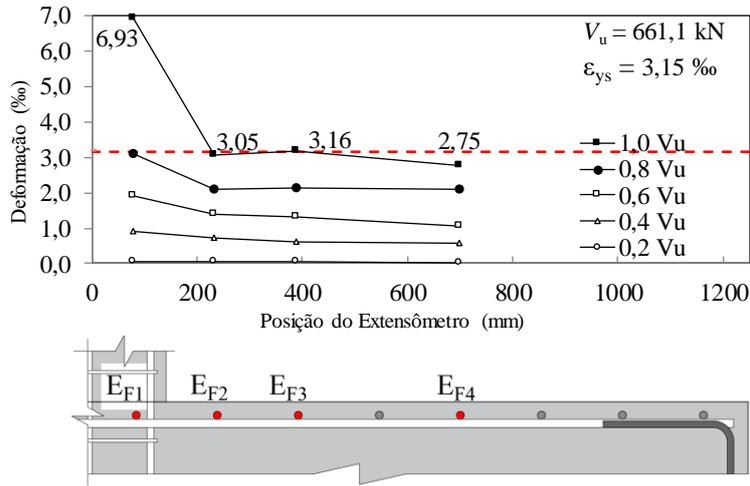


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

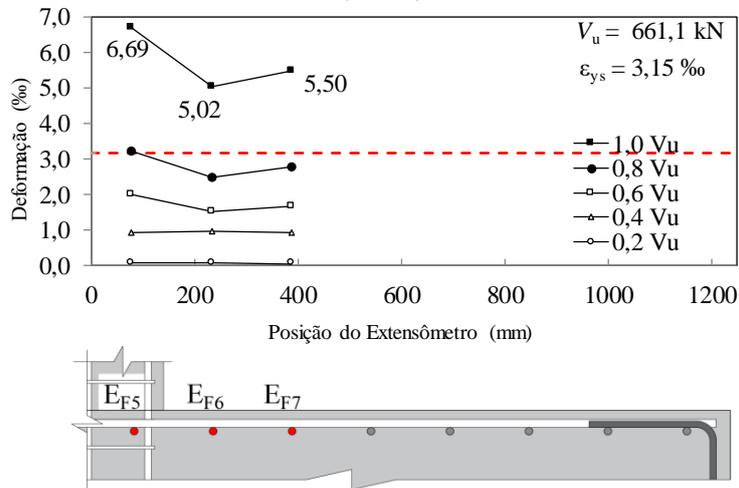


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

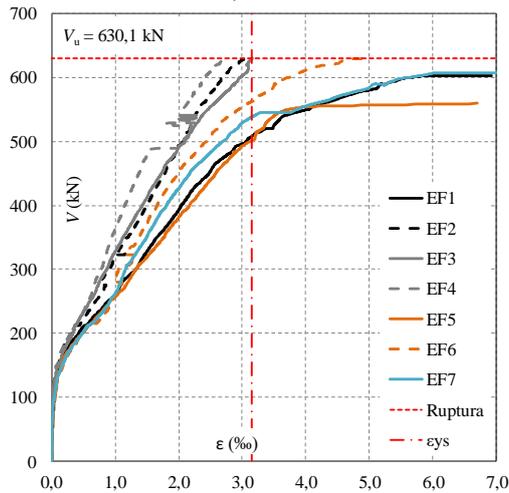
Figura 4.64 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-03



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

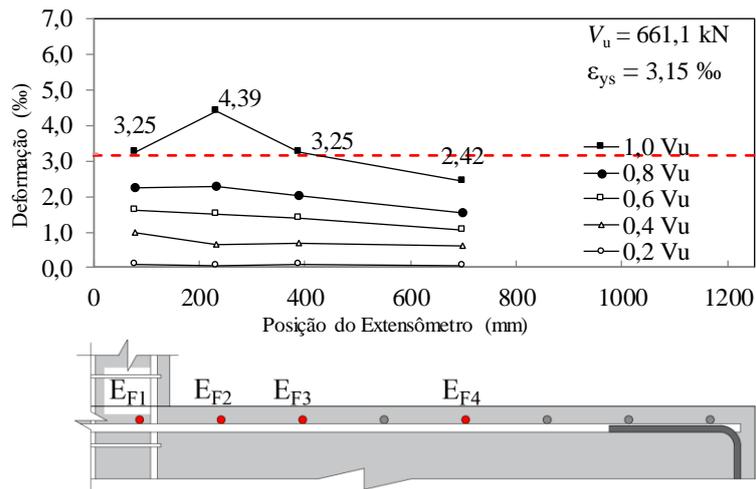


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

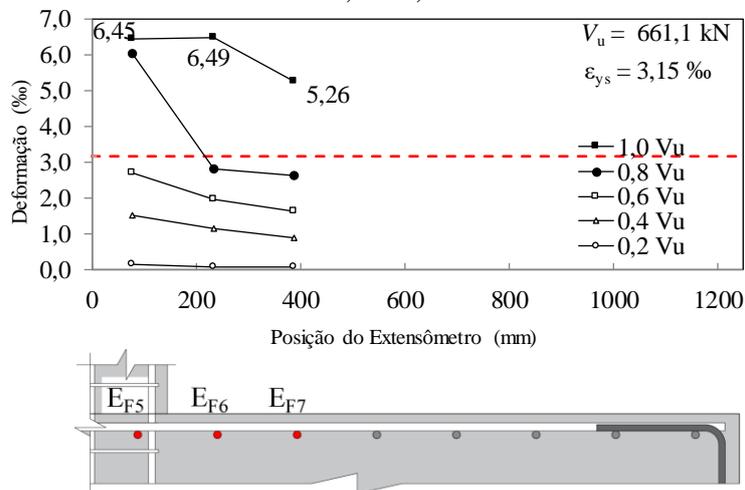


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

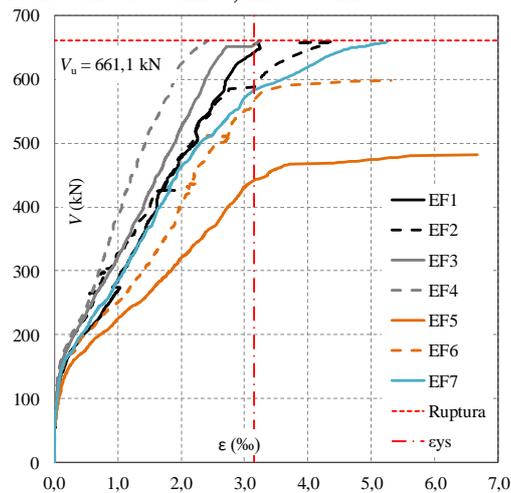
Figura 4.65 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-04



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

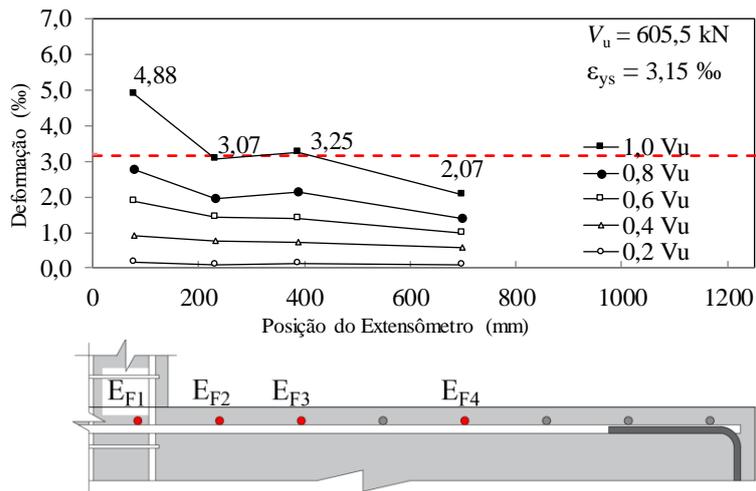


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

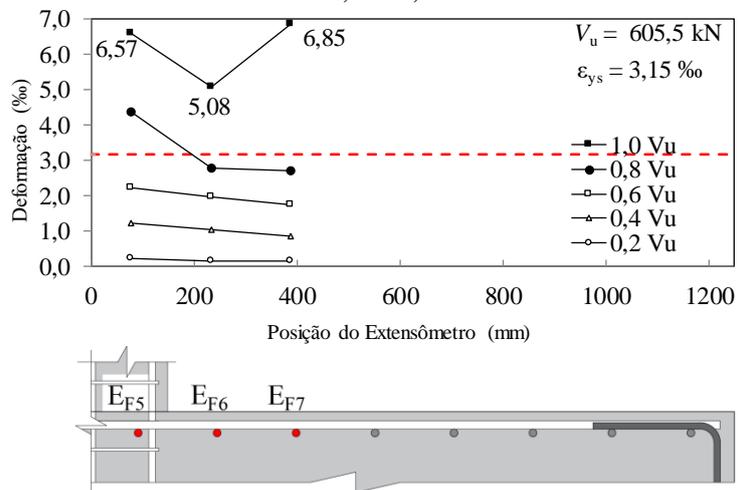


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

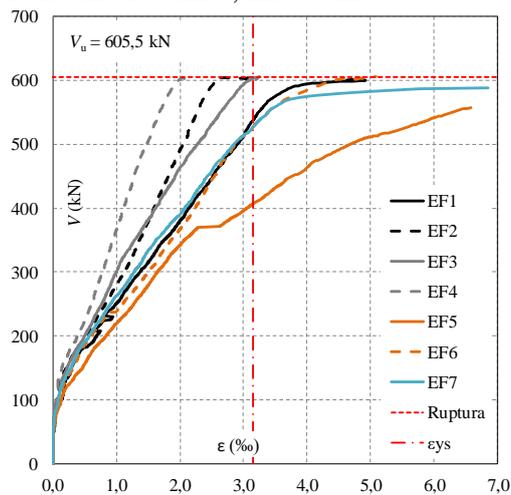
Figura 4.66 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-04



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

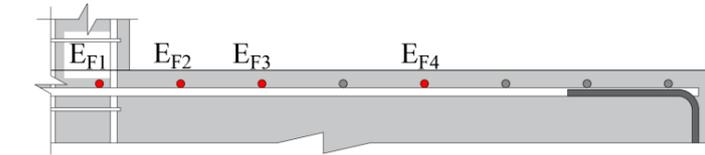
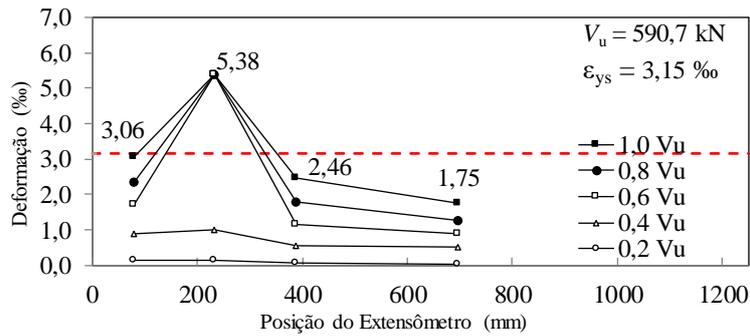


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

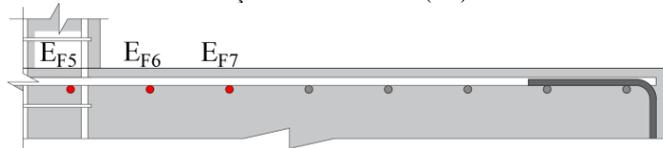
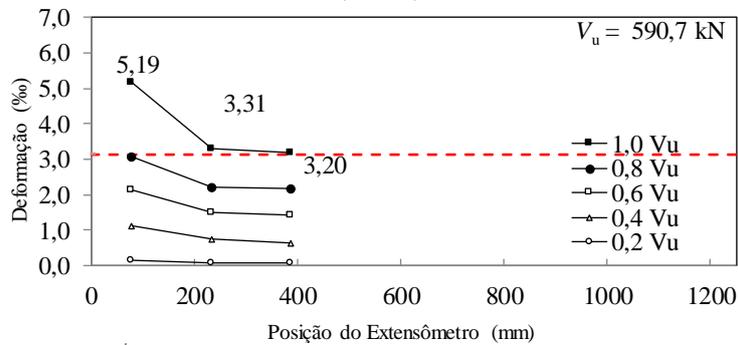


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

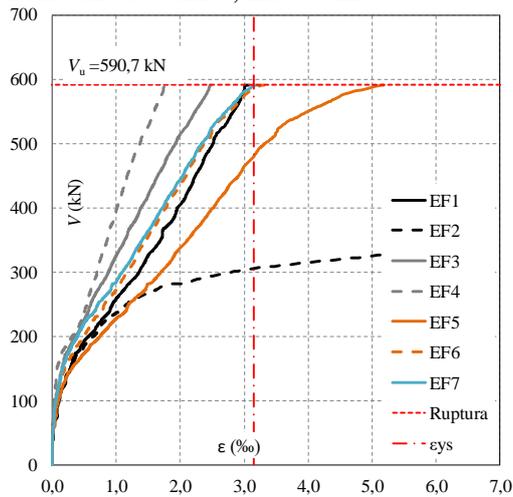
Figura 4.67 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-04



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

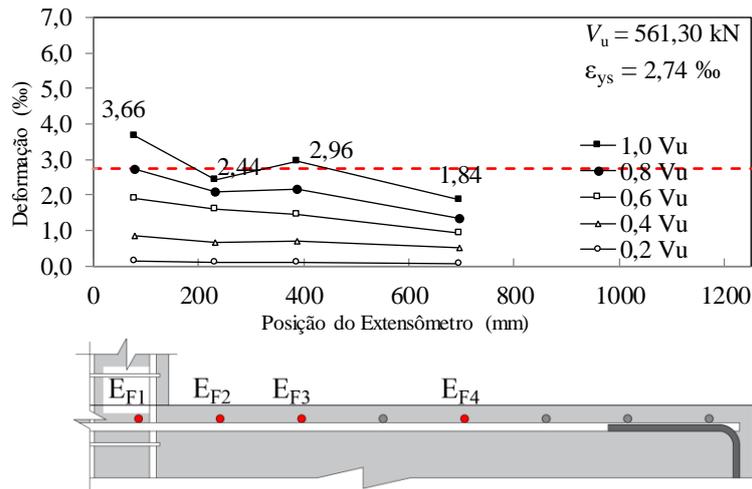


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

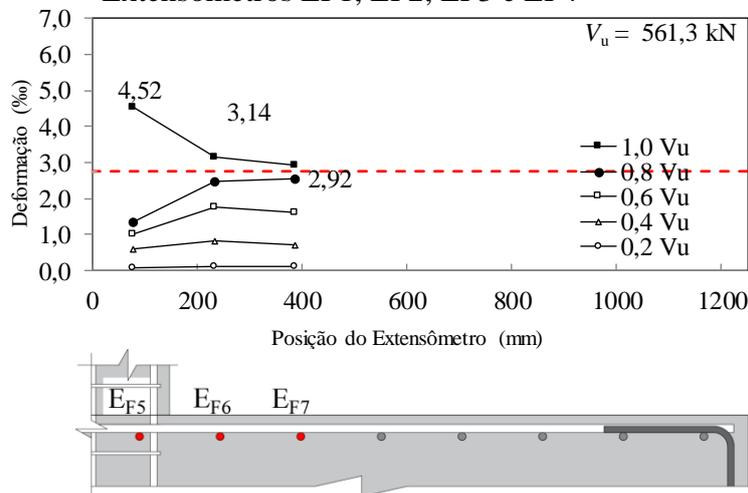


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

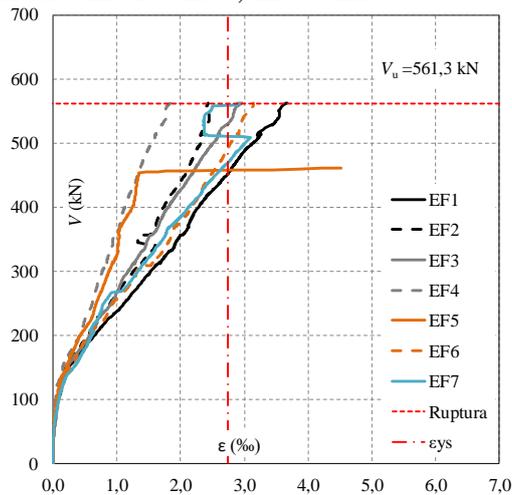
Figura 4.68 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-04



a) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

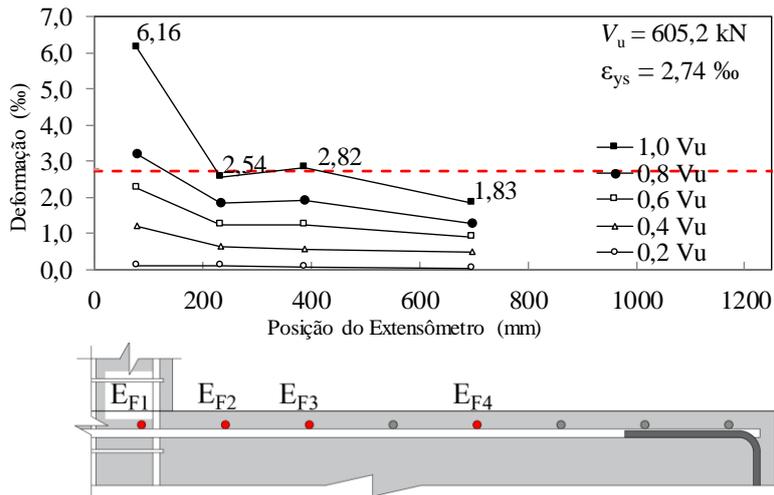


b) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

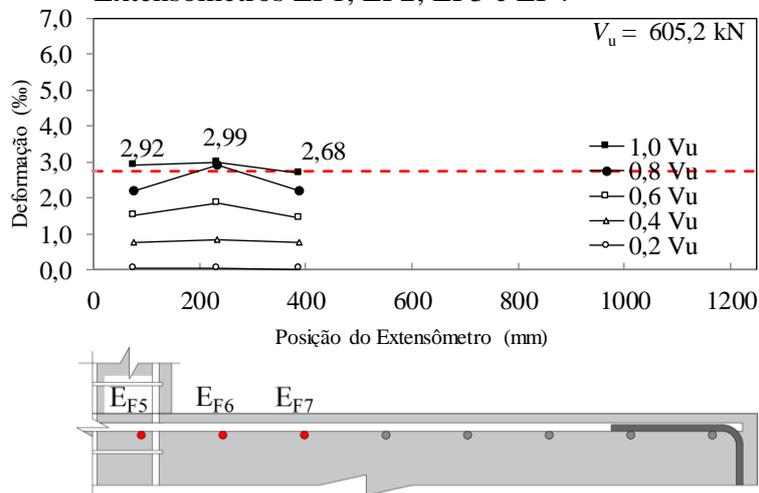


c) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

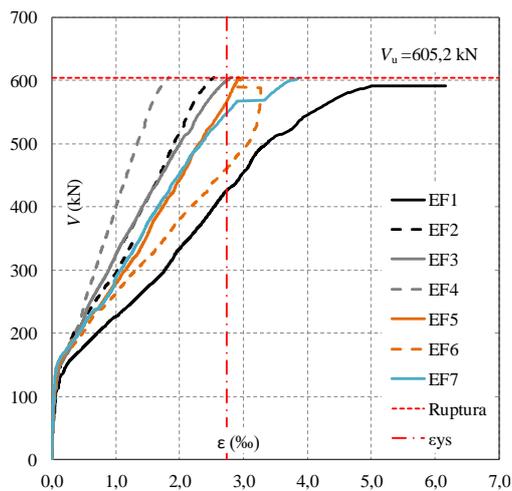
Figura 4.69 – Deformações nas armaduras de flexão da laje FA-05



d) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

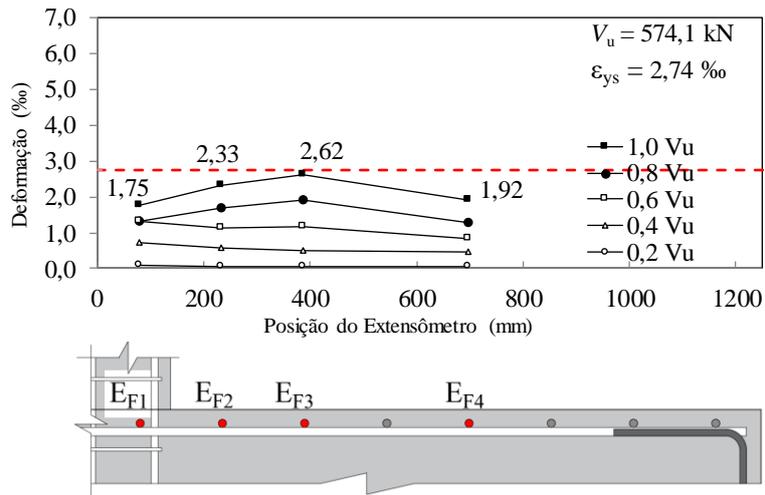


e) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

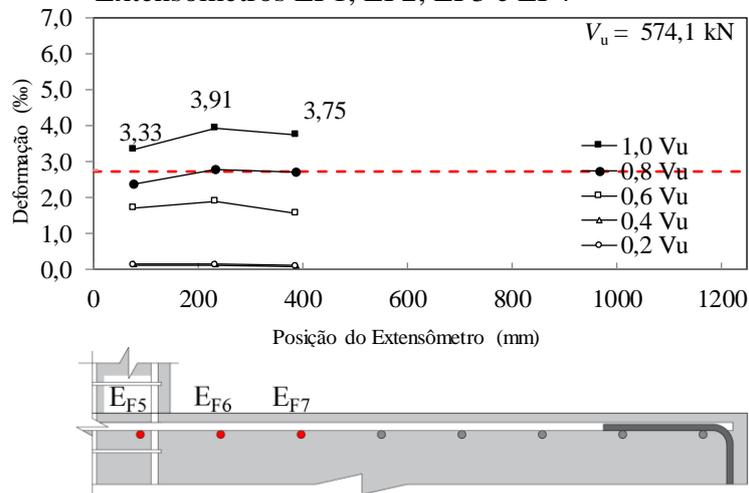


f) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

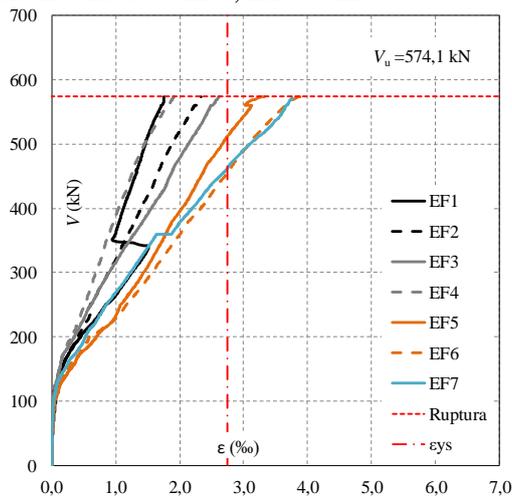
Figura 4.70 – Deformações nas armaduras de flexão da laje CA-05



g) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4

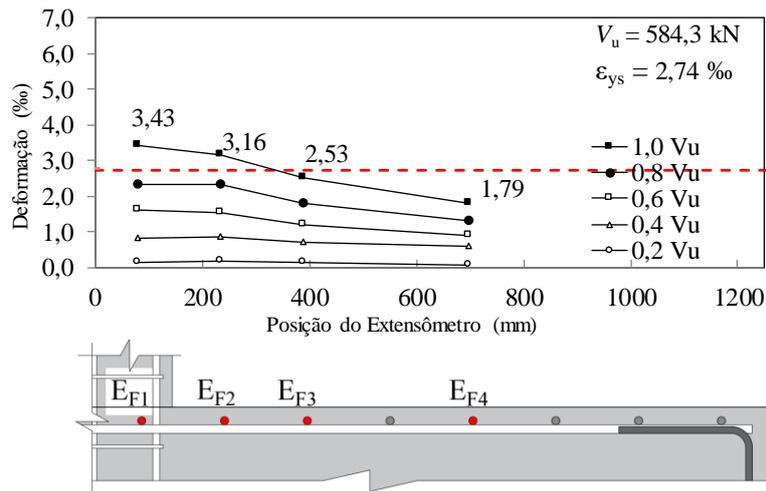


h) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7

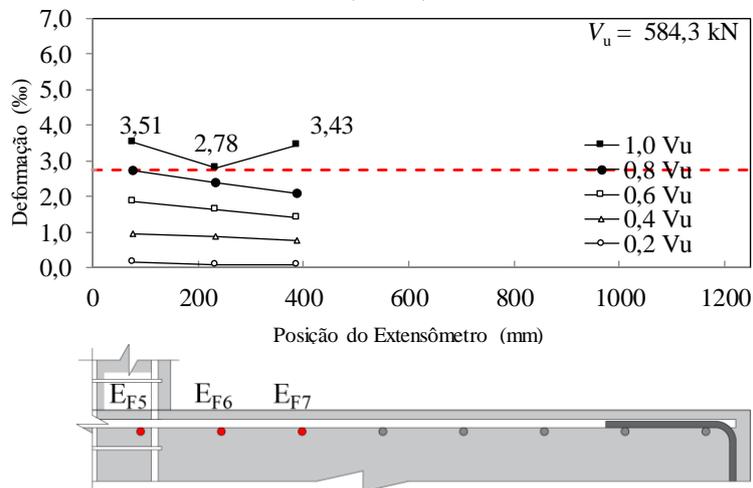


i) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

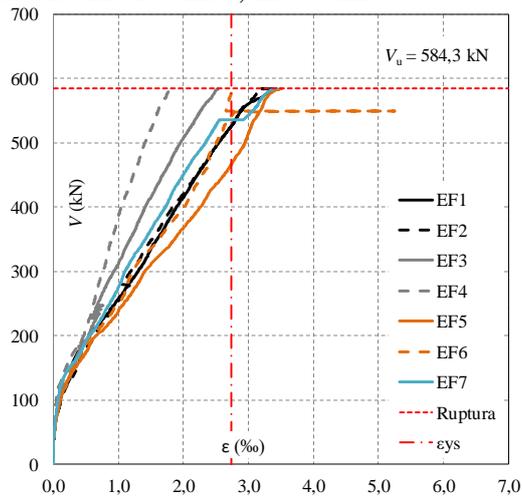
Figura 4.71 – Deformações nas armaduras de flexão da laje TA-05



j) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF1, EF2, EF3 e EF4



k) Gráfico deformação – posição do extensômetro – Extensômetros EF5, EF6 e EF7



l) Gráfico carga-deformação para todos os Extensômetros

Figura 4.72 – Deformações nas armaduras de flexão da laje NA-05

#### 4.2.4. Deformações nas armaduras de punção

Na Figura 4.73 à Figura 4.91 são apresentadas as deformações médias obtidas nas camadas analisadas da armadura de punção de cada laje. As leituras de deformação são apresentadas para os diferentes estágios de carregamento até a ruptura. Na Tabela 4.5 tem o número de camadas analisada, por laje, essa variação da quantidade de camadas analisadas foi feita para uma melhor leitura das deformações.

Tabela 4.5 – Camadas analisadas na armadura de punção

Série	Camadas Analisadas
S1	3
S2, S3, S4 e S5	5

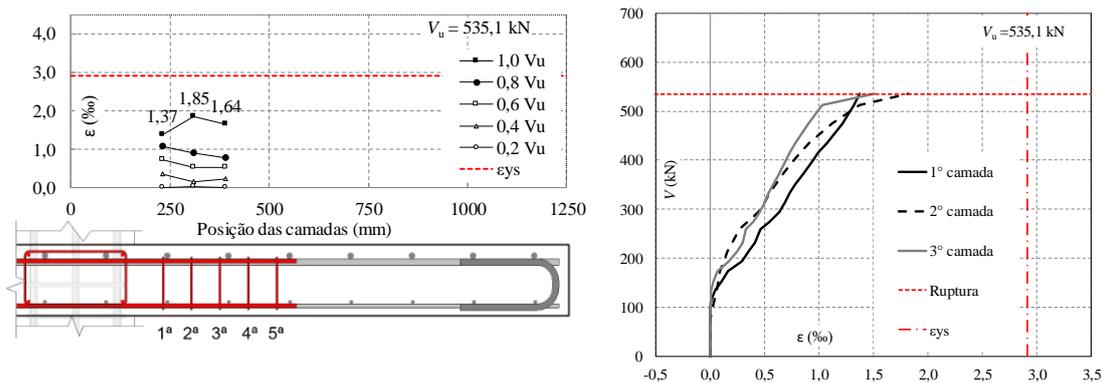


Figura 4.73 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-01

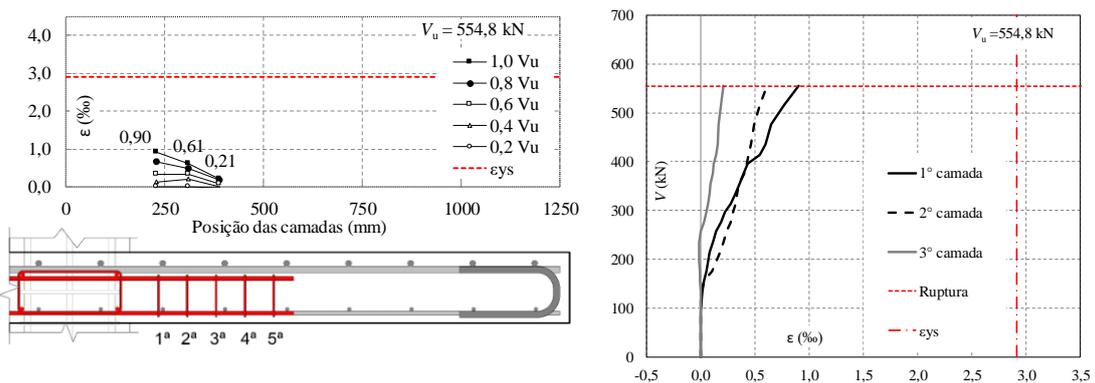


Figura 4.74 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-01

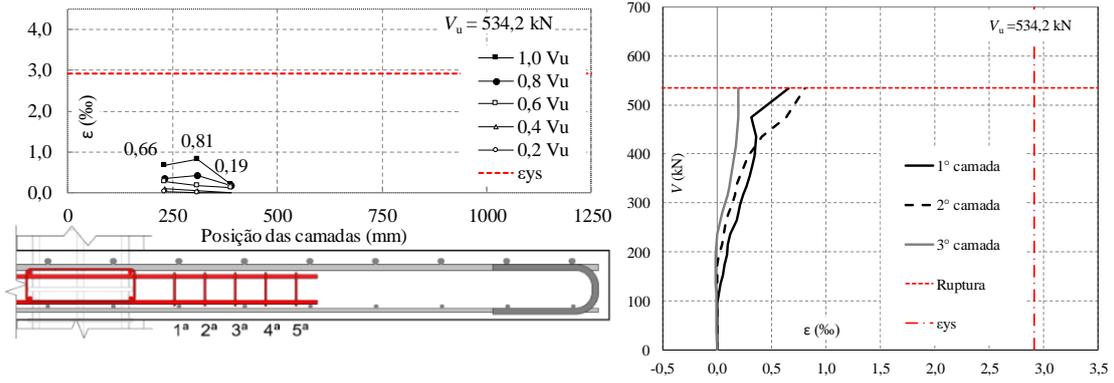


Figura 4.75 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-01

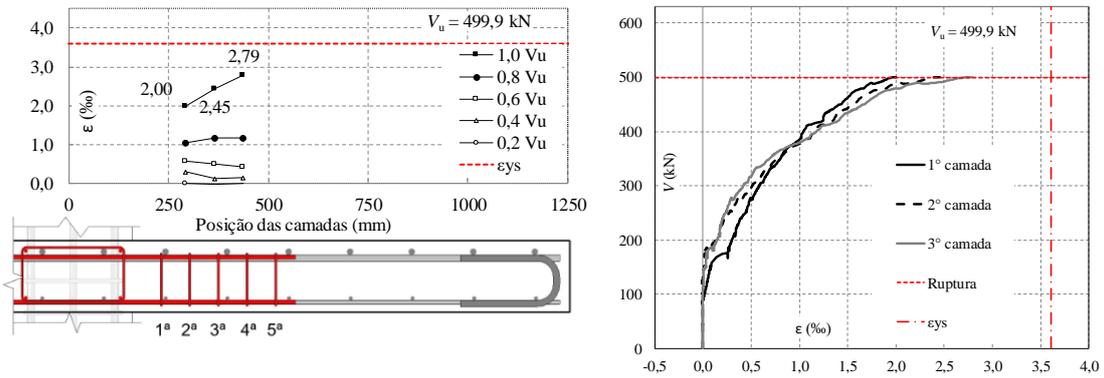


Figura 4.76 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-02

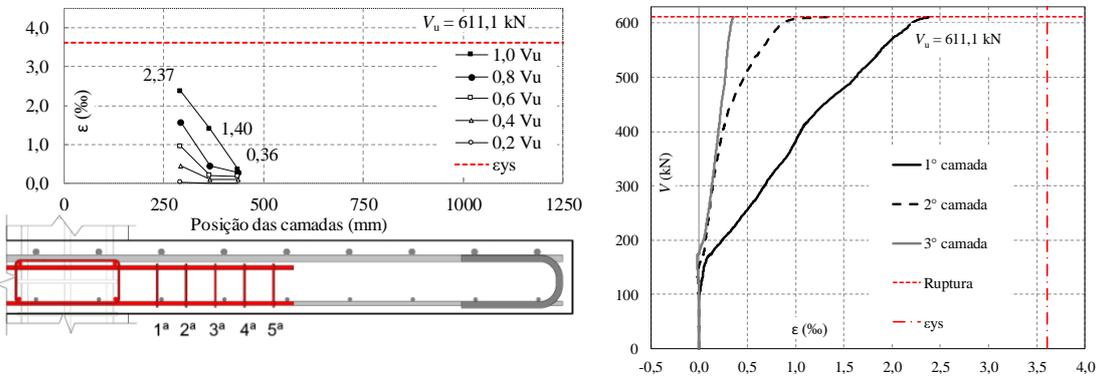


Figura 4.77 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-02

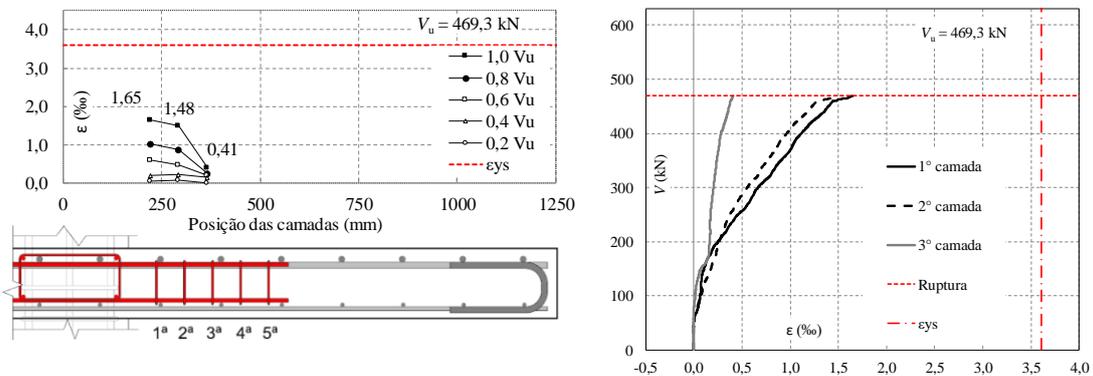


Figura 4.78 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-02

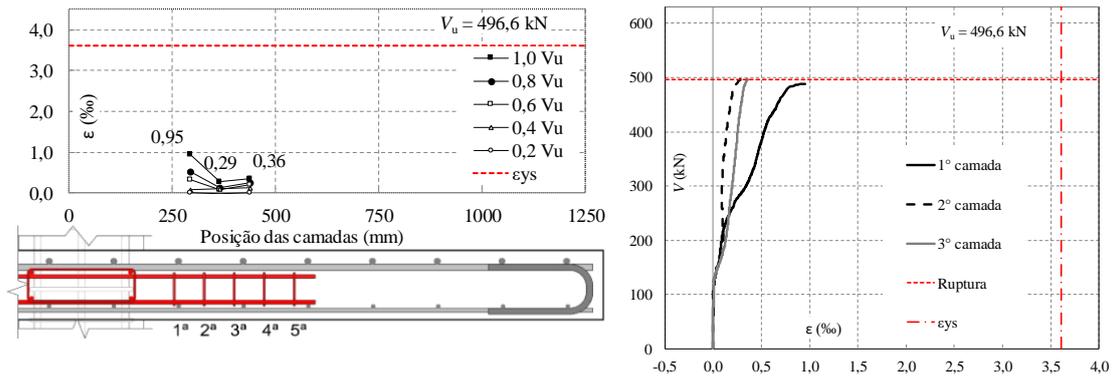


Figura 4.79 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-02

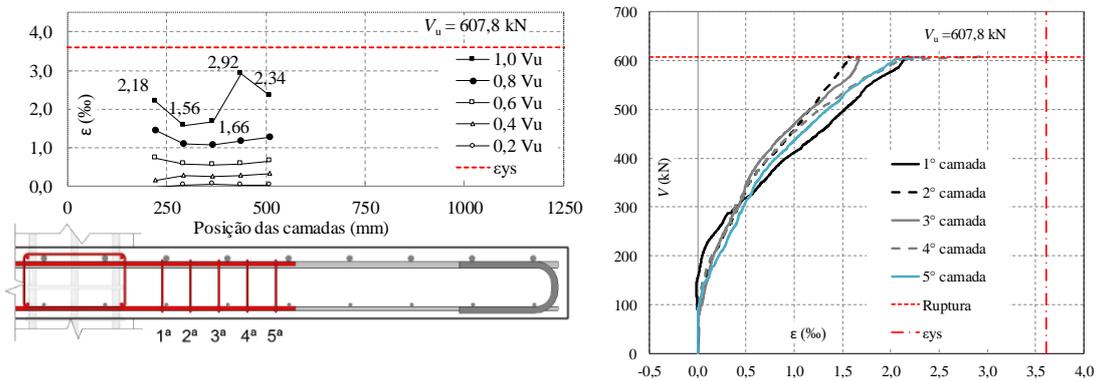


Figura 4.80 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-03

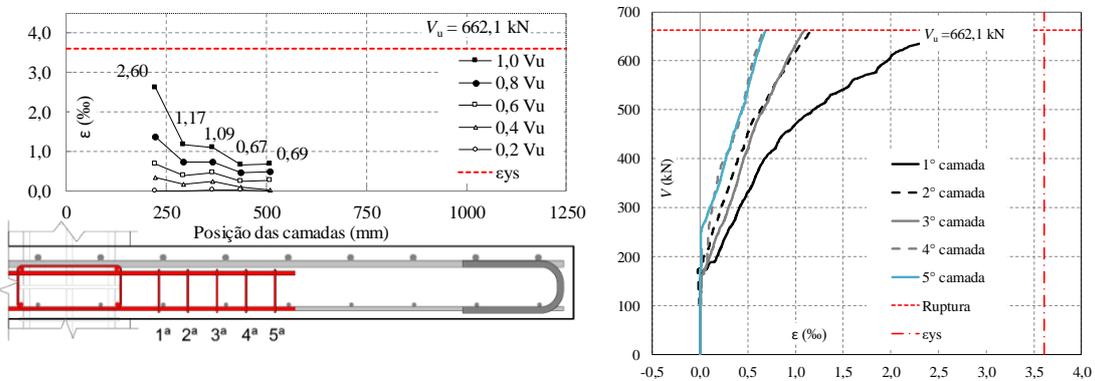


Figura 4.81 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-03

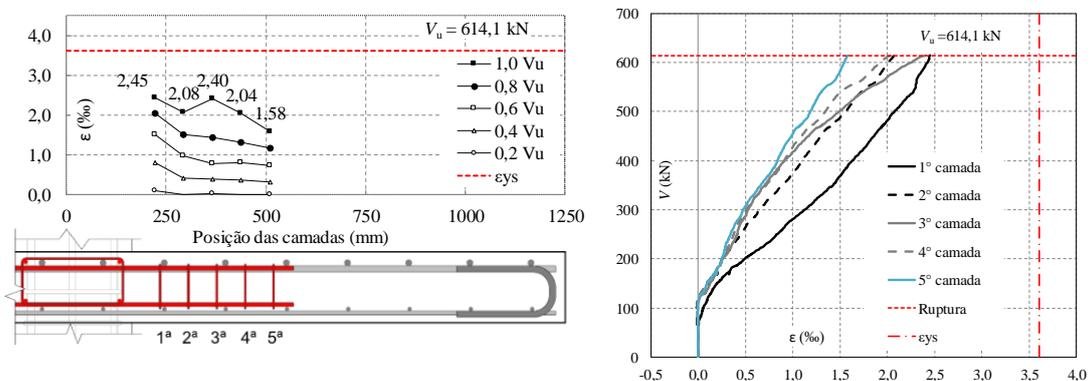


Figura 4.82 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-03

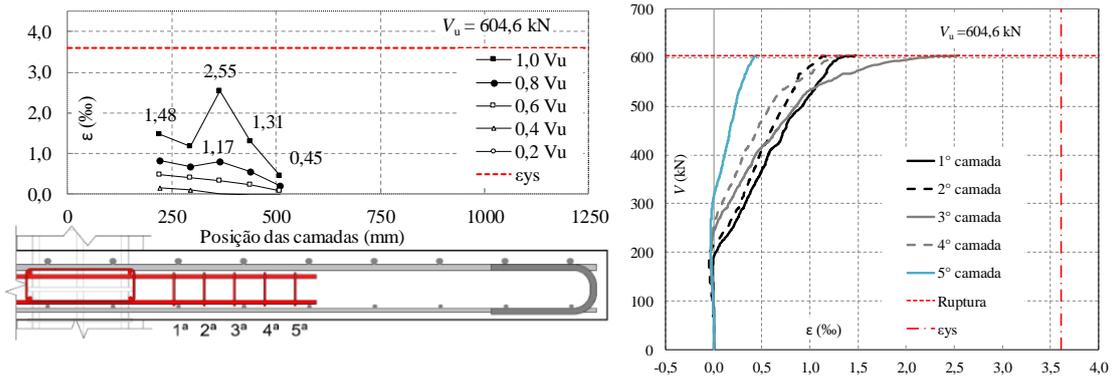


Figura 4.83 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-03

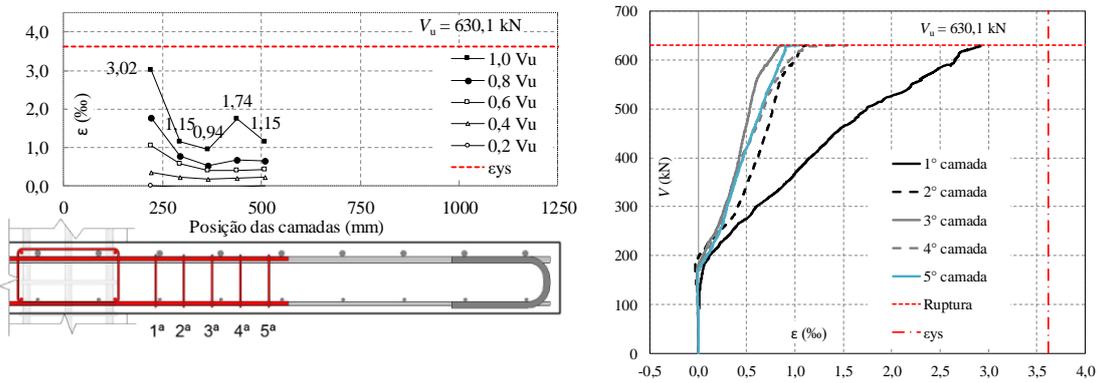


Figura 4.84 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-04

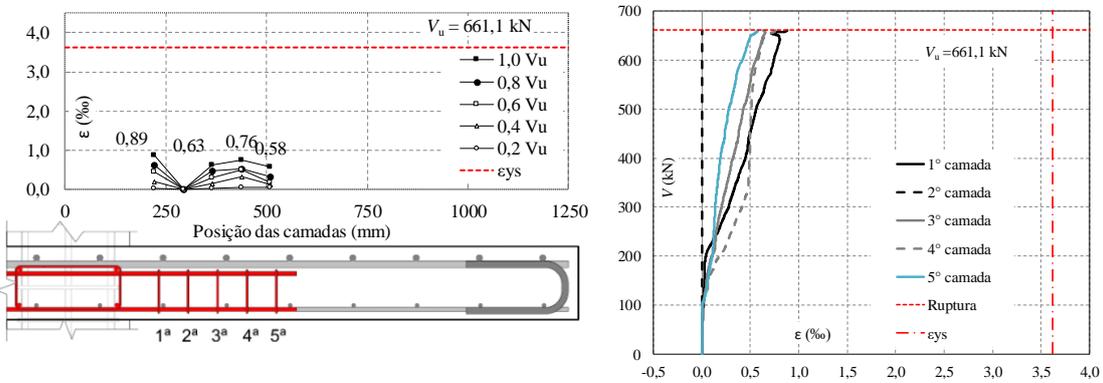


Figura 4.85 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-04

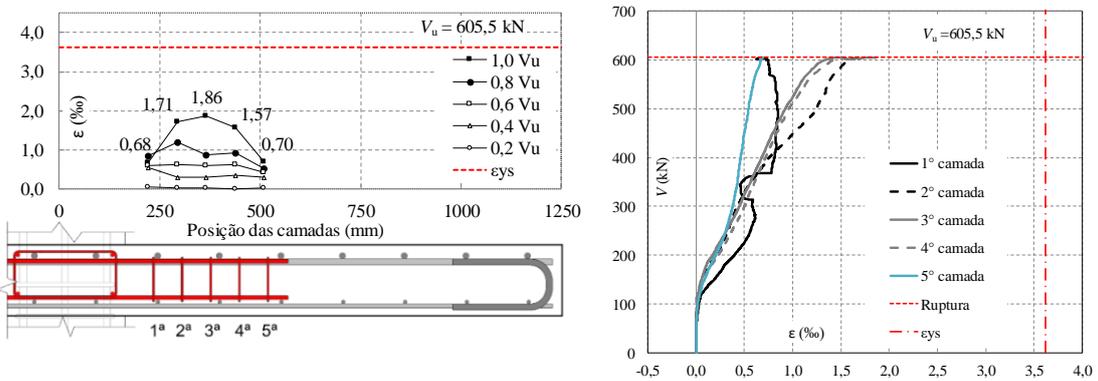


Figura 4.86 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-04

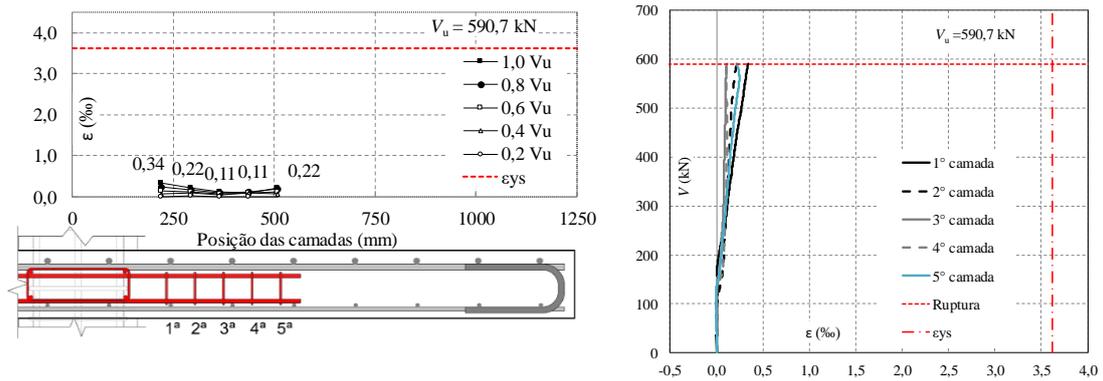


Figura 4.87 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-04

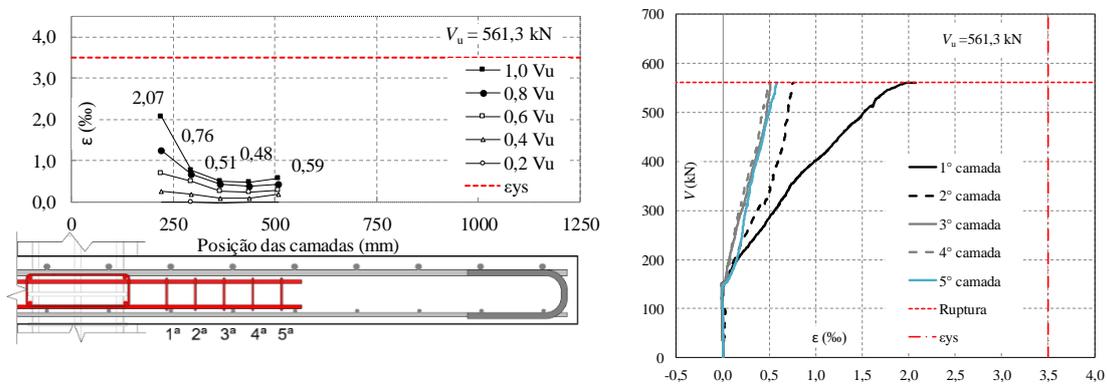


Figura 4.88 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje FA-05

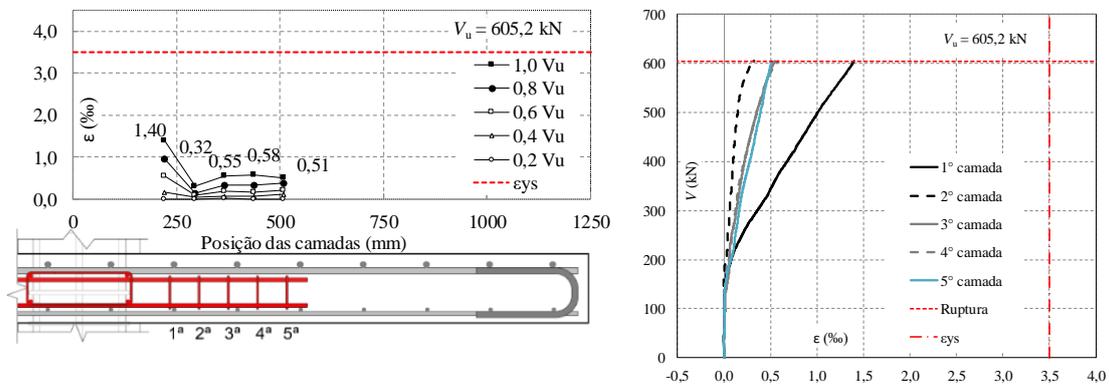


Figura 4.89 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje CA-05

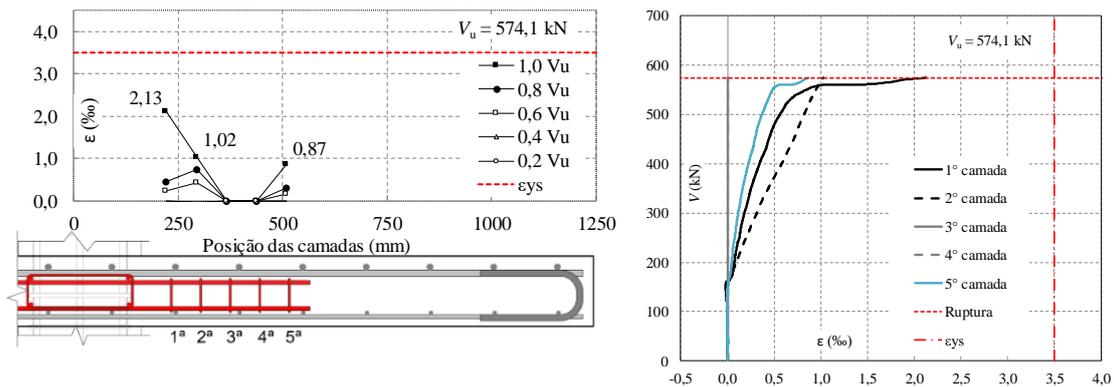


Figura 4.90 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje TA-05

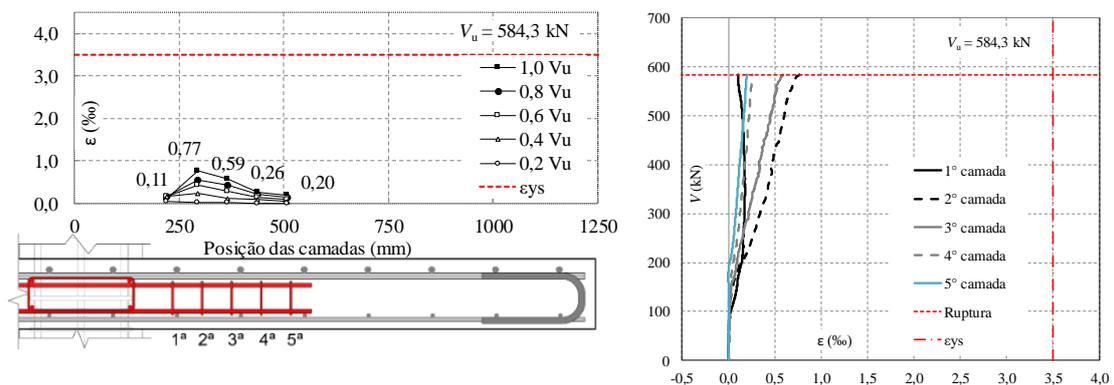


Figura 4.91 – Deformações nas camadas da armadura de punção da laje NA-05

Observando os resultados das deformações nas camadas da armadura de cisalhamento é possível verificar que as deformações ocorridas nas armaduras de cisalhamento, considerando todas as lajes, apresentaram-se inferiores à deformação de escoamento do aço. Isso mostra que essas armaduras não atingem a sua capacidade máxima, o que justifica a limitação imposta pelos códigos normativos aqui estudados quanto à consideração da tensão de escoamento no dimensionamento à punção.

Pode-se notar que as lajes com ancoragem total obtiveram os maiores valores de deformação, evidenciando que o mecanismo imposto por esse tipo de ancoragem ativa melhor os estribos, o que pode contribuir para uma maior ductilidade das lajes. Os estribos não ancorados têm deformações reduzidas.

Observa-se uma maior ativação das armaduras de cisalhamento para a Série 3, Série 4 e Série 5, isso se deve a um melhor detalhamento em planta utilizado nas lajes, limitando o espaçamento entre a primeira camada de armadura e a face do pilar e entre as camadas de armadura, em  $0,5d$ . É possível notar que a armadura de cisalhamento das lajes FA-03, CA-03, TA-03, NA-03, FA-04, FA-05 e TA-5 se mostrou bem solicitada, uma vez que

três camadas atingiram valores de deformação superiores à 2,0‰ no momento da ruptura. Ressalta-se a similaridade entre o comportamento do estribo da camada mais próxima ao pilar, na primeira camada; e os estribos das camadas mais afastadas do pilar, na quarta e na quinta camada, que apresentaram níveis de deformação muito próximos para os mesmos níveis de carregamento até a ruptura. Para as lajes CA-03, FA-04, FA-05 e TA-05, apenas o estribo da primeira camada atingiu deformação superior a 2,0‰, as outras camadas apresentaram leituras de deformação inferiores a esse valor. Avaliando a laje TA-03, assim como observado para a laje FA-03, na ocasião da ruptura, a armadura de cisalhamento se mostrou bem solicitada, uma vez que os estribos das quatro primeiras camadas atingiram deformações superiores a 2,0‰. Já para a laje NA-03, com exceção do estribo posicionado na terceira camada, os demais apresentaram deformações inferiores a 1,4 ‰.

A Figura 4.92 à Figura 4.95 representam uma análise das deformações últimas da armadura de cisalhamento com sua respectiva deformação de escoamento com a relação entre o ponto de instrumentação (medido da face do pilar à perna do estribo instrumentado) e a altura última da laje. Com isso pretende-se analisar o perfil de deformação no momento de ruptura de cada série de concretagem.

Ao se comparar a Série 1 e Série 4 de lajes (ressalta-se que ambas séries possuem mesma classe do concreto, mesmo diâmetro de armadura de cisalhamento variando-se seu espaçamento entre camadas) na Figura 4.92, observa-se que a influência do detalhamento dos estribos com o uso de porta estribos foi notória visto a maior ativação das lajes da Série 1, mesmo havendo maior concentração de estribos próximo ao pilar na Série 4, fato também observado ao se analisar a Figura 4.94. Observando a Figura 4.93 constata-se que a variação da resistência do concreto não afetou o comportamento dos estribos quanto a deformação. Já para um comparativo entre a Série 4 e Série 5, ver Figura 4.95, infere-se um comportamento muito semelhante para as lajes CA-04 e CA-05 e para as lajes NA-04 e NA-05, enquanto as lajes FA-04 e TA-04 tiveram maior ativação em comparação com suas semelhantes da Série 5 (FA-05 e TA-05) o que evidencia que o menor espaçamento entre camadas de armaduras e maior bitola utilizada contribuíram para um melhor desempenho.

A maior ativação das armaduras de cisalhamento das lajes que tiveram em seu detalhamento o uso de porta estribos contrapõe o que as normas citam, conforme descrito

no item 2.2.3, porém cabe destacar que para se obter conclusões mais aceitáveis há uma necessidade de um maior número de ensaios – investigando, além de outros fatores, a influência desse porta estribo como agente ativo na armadura de flexão e a influência do espaçamento entre as pernas dos estribos, na ativação dos mesmos (visto que nas séries 4 e 5 esse espaçamento foi reduzido para que as armaduras de flexão passassem pelos cantos dos mesmos).

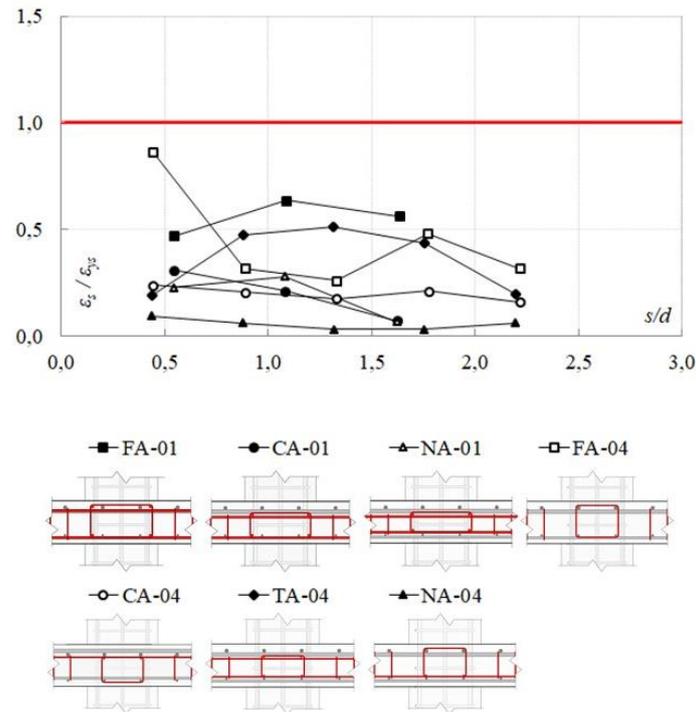


Figura 4.92 – Análise das deformações nos estribos da Série 1 e Série 4

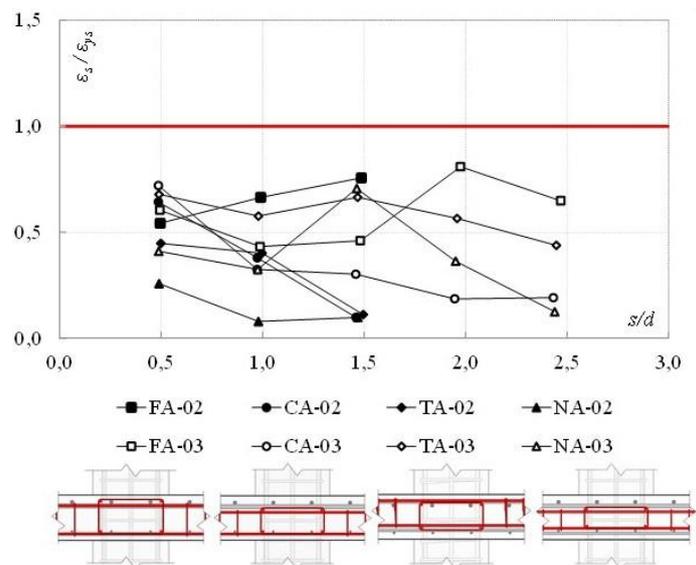


Figura 4.93 – Análise das deformações nos estribos da Série 2 e Série 3

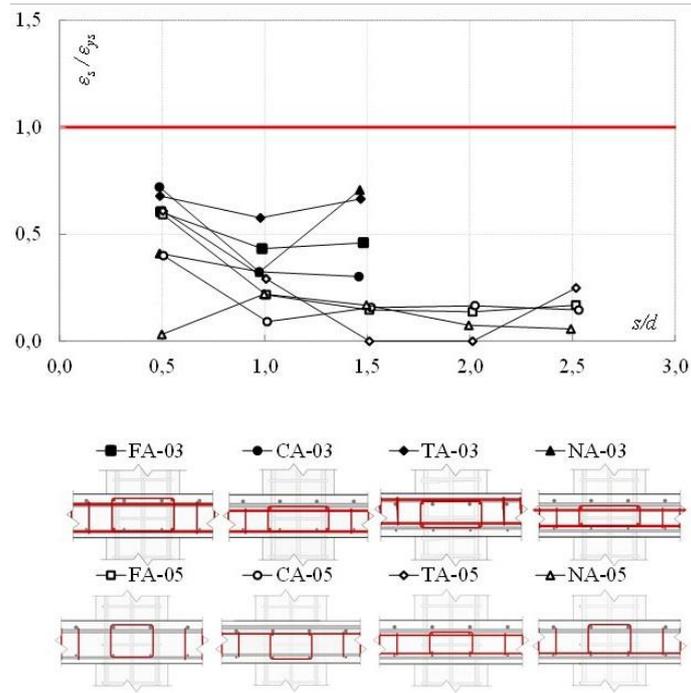


Figura 4.94 – Análise das deformações nos estribos da Série 3 e Série 5

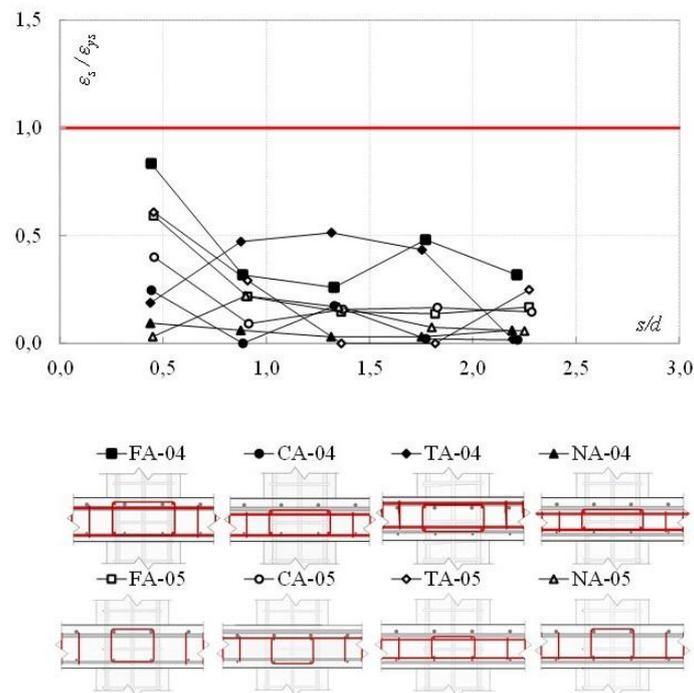


Figura 4.95 – Análise das deformações nos estribos da Série 4 e Série 5

As deformações das armaduras estão listadas na Tabela 4.6. Vale ressaltar que na laje CA-04 foi perdida de deformação a leitura na Camada 2 e, na laje TA-05, foi perdida a leitura na Camada 3 e 4.

Tabela 4.6 – Deformações na armadura de punção, por camada

Série	Laje	Deformação medida nos extensômetros (%)				
		Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
1	FA-01	1,37	1,85	1,64	Não foi feita leitura nessas camadas	
	CA-01	0,90	0,61	0,21		
	NA-01	0,66	0,81	0,19		
2	FA-02	2,00	2,45	2,79		
	CA-02	2,37	1,40	0,36		
	TA-02	1,65	1,48	0,41		
	NA-02	0,95	0,29	0,36		
3	FA-03	2,18	1,56	1,66	2,92	2,34
	CA-03	2,60	1,17	1,09	0,67	0,69
	TA-03	2,45	2,08	2,40	2,04	1,58
	NA-03	1,48	1,17	2,55	1,31	0,45
4	FA-04	3,02	1,15	0,94	1,74	1,15
	CA-04	0,89	-	0,63	0,76	0,58
	TA-04	0,68	1,71	1,86	1,57	0,70
	NA-04	0,34	0,22	0,11	0,11	0,22
5	FA-05	2,07	0,76	0,51	0,48	0,59
	CA-05	1,40	0,32	0,55	0,58	0,51
	TA-05	2,13	1,02	-	-	0,87
	NA-05	0,11	0,77	0,59	0,26	0,20

Pode-se notar que as lajes com ancoragem *total* obtiveram os maiores valores de deformação, evidenciando que o mecanismo imposto por esse tipo de ancoragem ativa melhor os estribos, o que pode contribuir para uma maior resistência última e maior ductilidade das lajes. Em contraponto, as lajes *sem* ancoragem da armadura de punção obtiveram as menores deformações, sendo as lajes com pior comportamento nesse aspecto, corroborando com o observado quanto à carga de ruptura e deslocamentos.

Com isso, ressalta-se que, com base nos dados obtidos nessa pesquisa, o melhor rendimento dos estribos está associado à uma melhor ancoragem. Porém, conforme também observado por Albrecht *et al.* (2012) e Beutel (1999), o uso de armaduras de punção com ancoragem parcial na armadura de flexão é uma prática comum, facilitando a aplicação do reforço, otimizando a construção. Caldentey et al. (2013), ressaltou que, mesmo não cumprindo os requisitos específicos de grande parte das normas de projeto, o uso de estribos verticais não ancorados diretamente nas armaduras longitudinais tracionadas é um tipo de detalhamento admissível, limitando a abertura da fissura crítica de cisalhamento.

#### 4.2.5. Mapas de fissuração

Foi realizada uma inspeção e controle visual, ininterruptos, da face tracionada de cada laje à medida que o carregamento era aplicado. Com isso realizou-se um mapeamento das fissuras, assinalando sua trajetória de propagação e com qual nível de carregamento ela aconteceu. Esse processo, durante o ensaio, foi realizado apenas na metade da face superior de cada laje, devido à simetria. E, após o ensaio, as fissuras foram marcadas ao longo de toda a face. Ressalta-se que nos estágios finais de carregamento, não foi possível realizar a marcação devido a velocidade com que se dava o surgimento de novas fissuras concomitantemente com a abertura das existentes.

A partir da Figura 4.96 até a Figura 4.115 são apresentados os mapas de fissuração após a ruptura de cada laje.

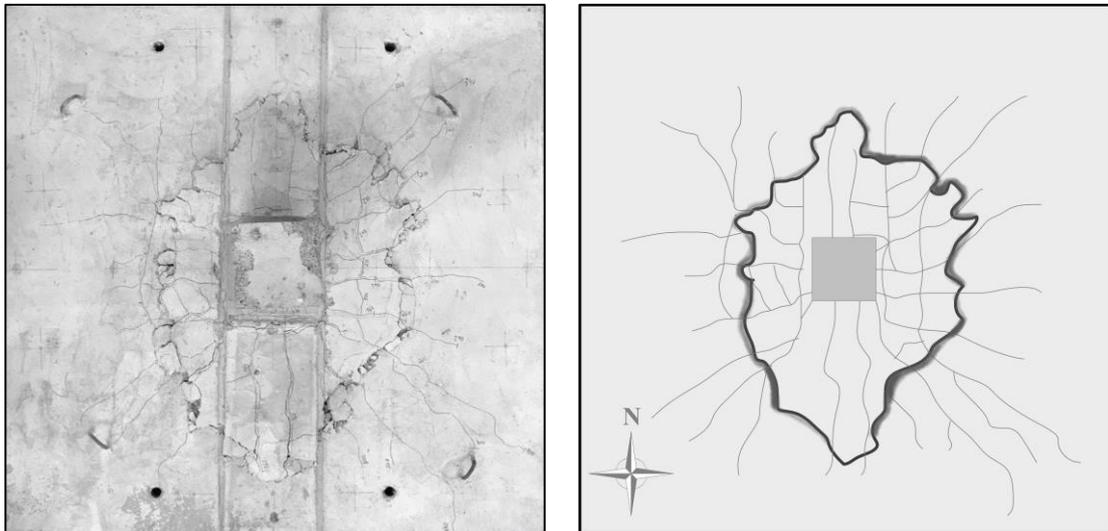


Figura 4.96 – Mapa de fissuração da laje RS

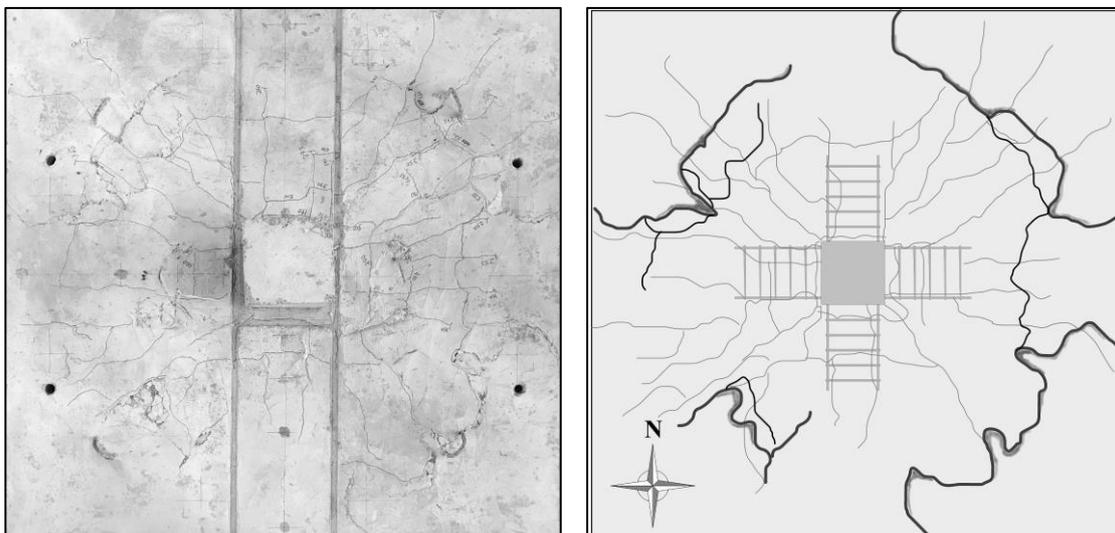


Figura 4.97 – Mapa de fissuração da laje FA-01

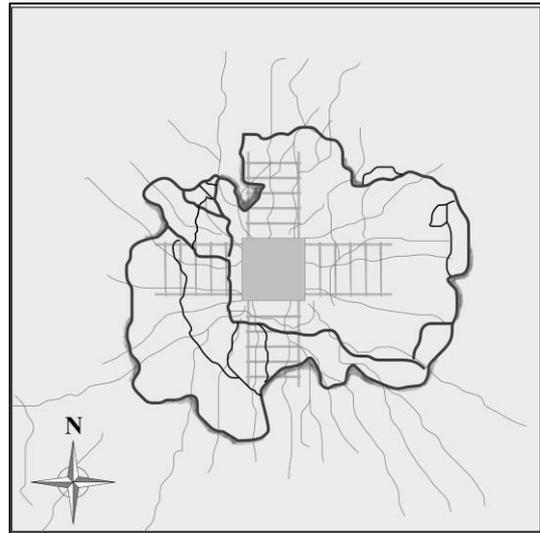
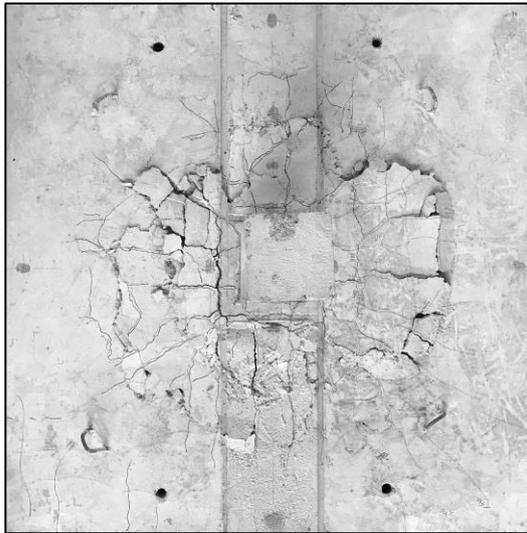


Figura 4.98 – Mapa de fissuração da laje CA-01

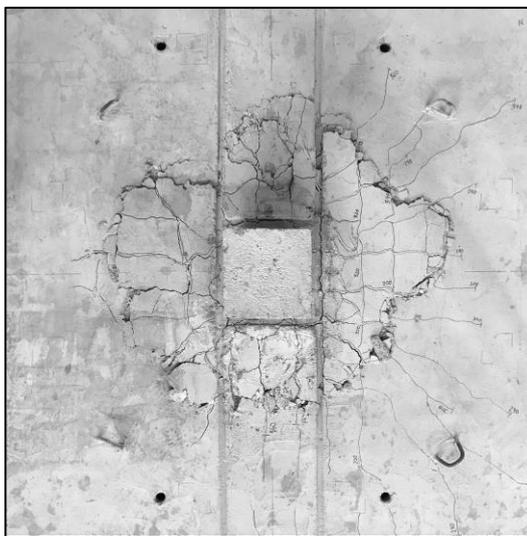


Figura 4.99 – Mapa de fissuração da laje NA-01

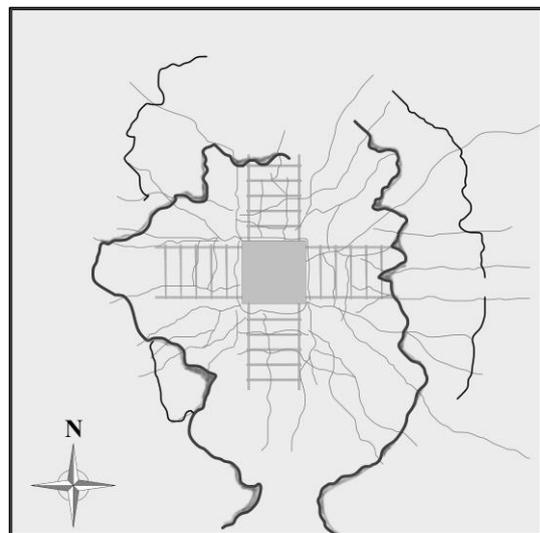
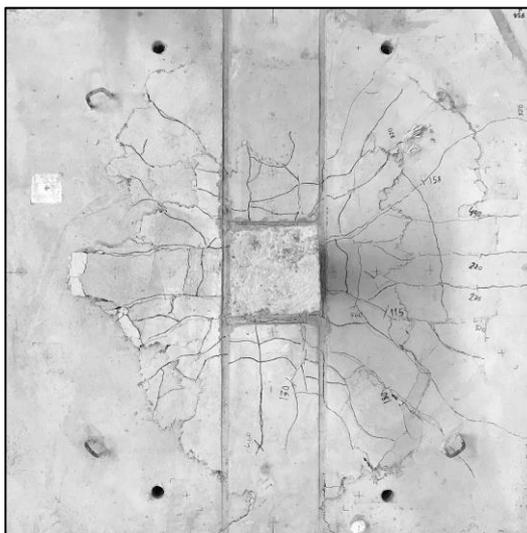


Figura 4.100 – Mapa de fissuração da laje FA-02

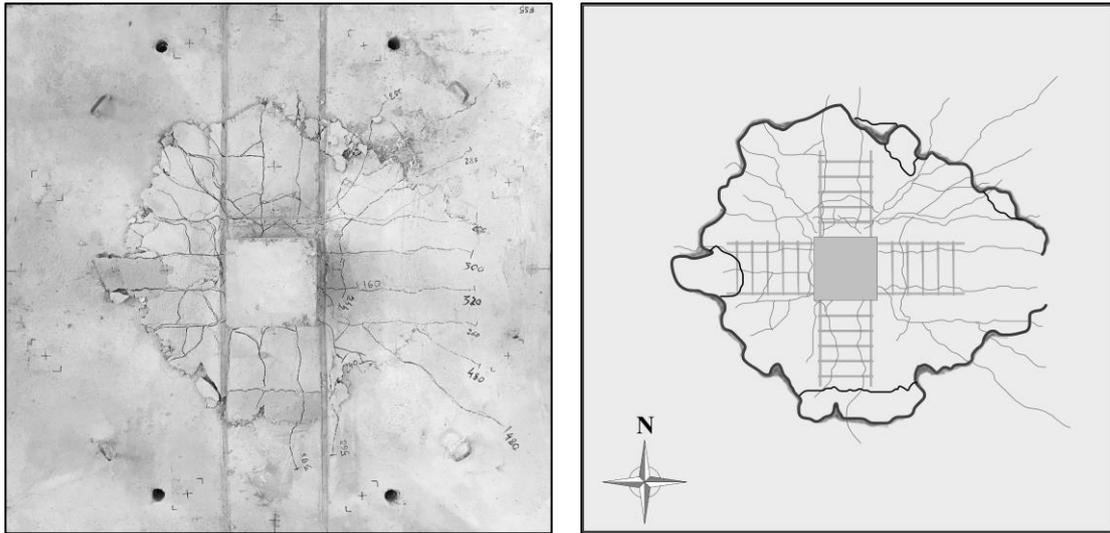


Figura 4.101 – Mapa de fissuração da laje CA-02

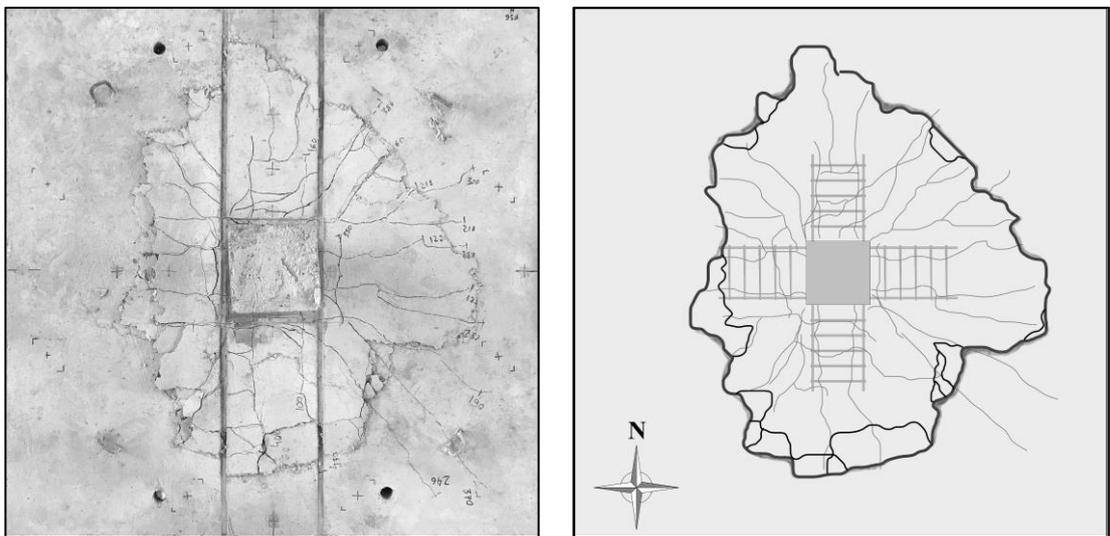


Figura 4.102 – Mapa de fissuração da laje TA-02

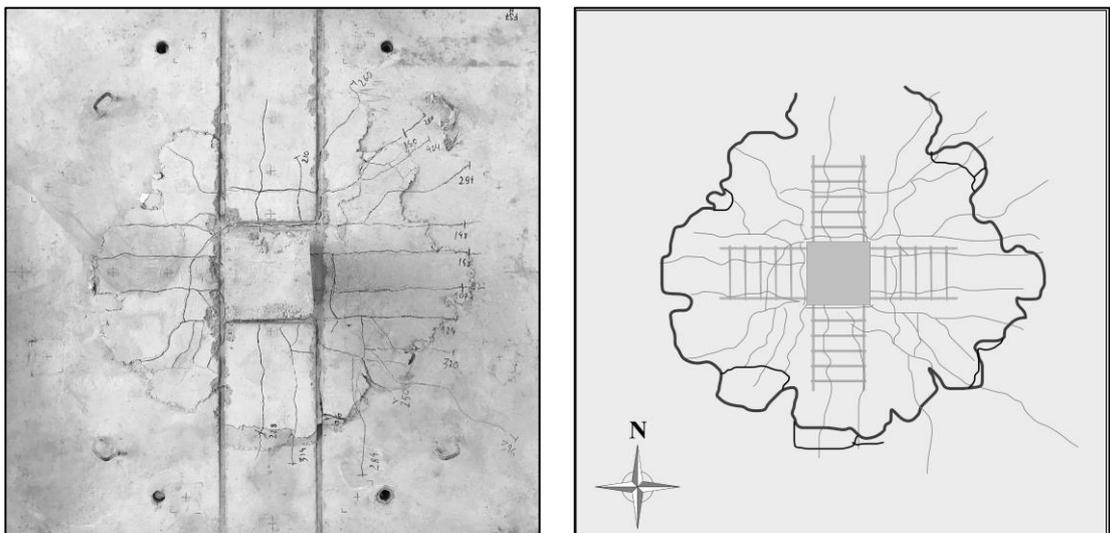


Figura 4.103 – Mapa de fissuração da laje NA-02



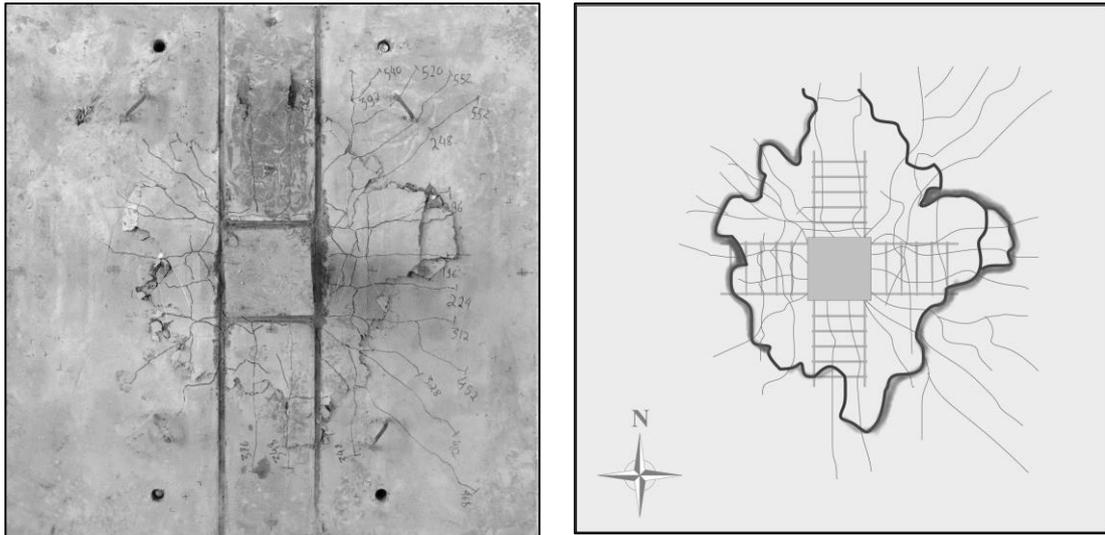


Figura 4.107 – Mapa de fissuração da laje NA-03

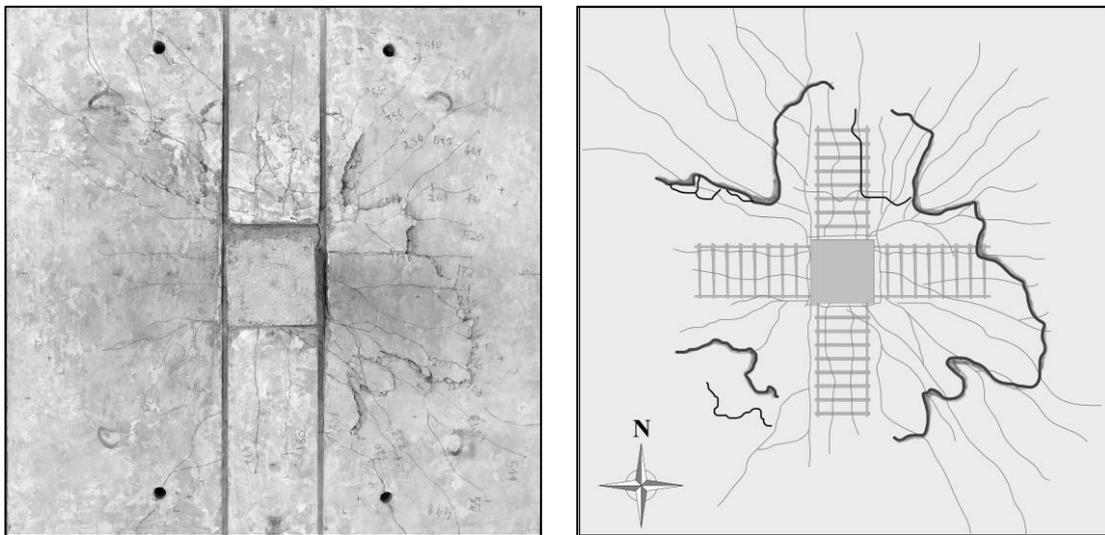


Figura 4.108 – Mapa de fissuração da laje FA-04

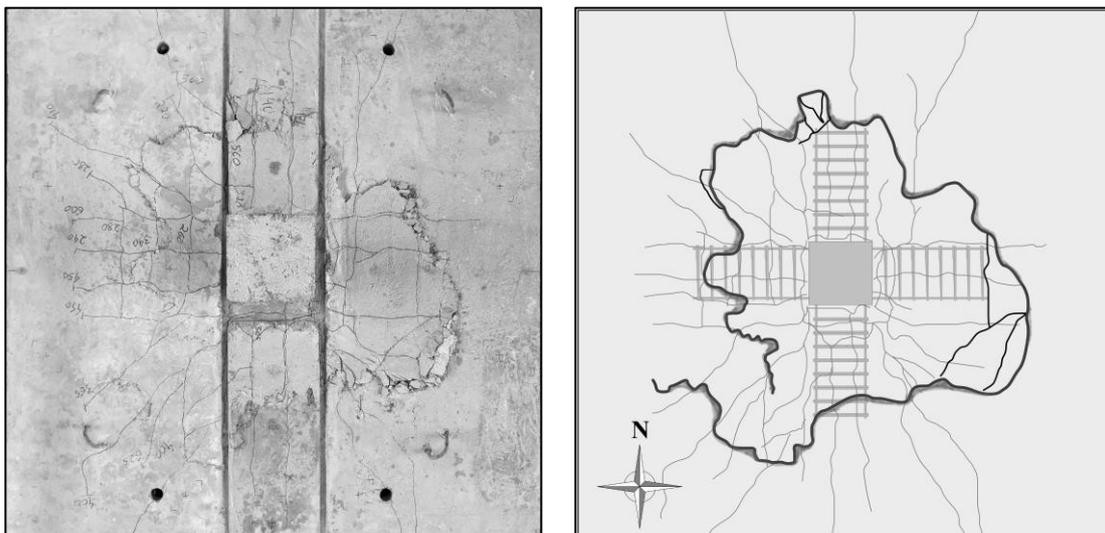


Figura 4.109 – Mapa de fissuração da laje CA-04

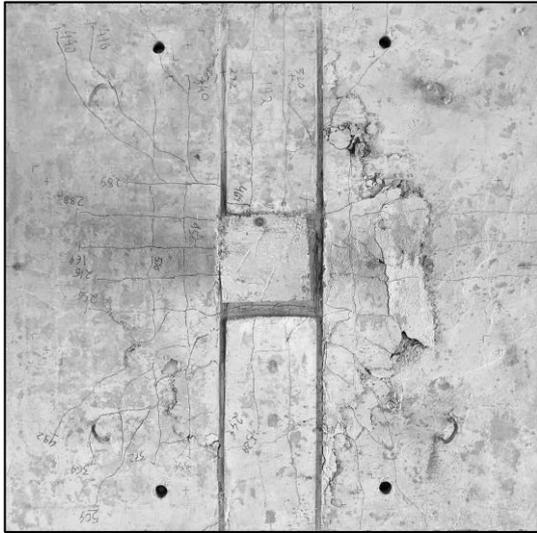


Figura 4.110 – Mapa de fissuração da laje TA-04

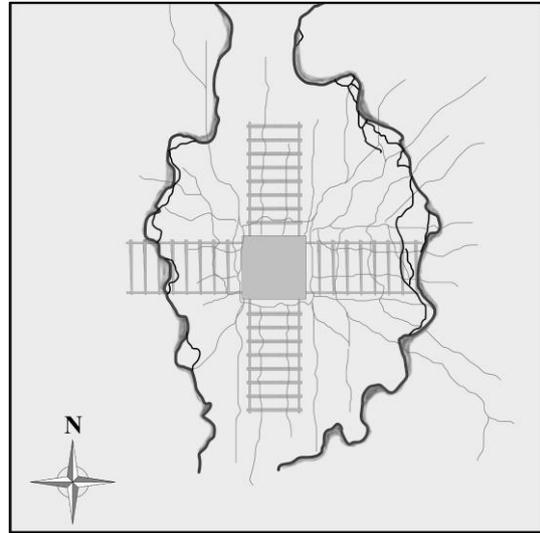
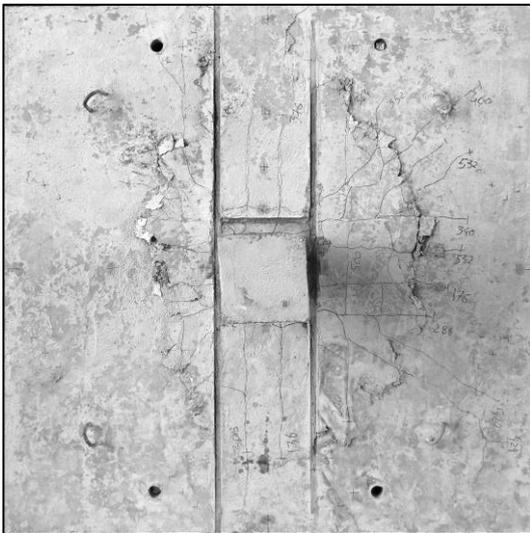


Figura 4.111 – Mapa de fissuração da laje NA-04

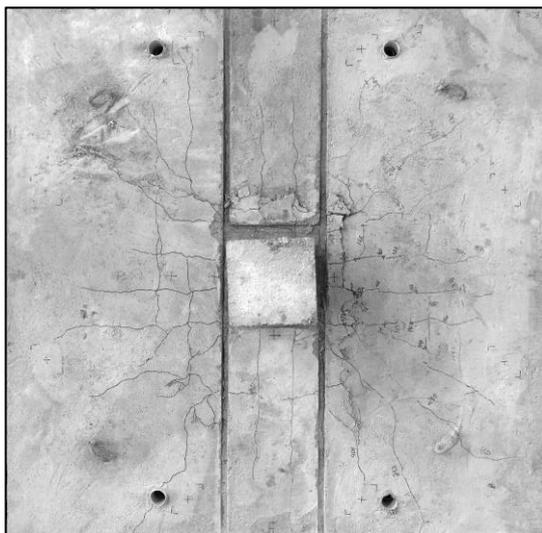


Figura 4.112 – Mapa de fissuração da laje FA-05

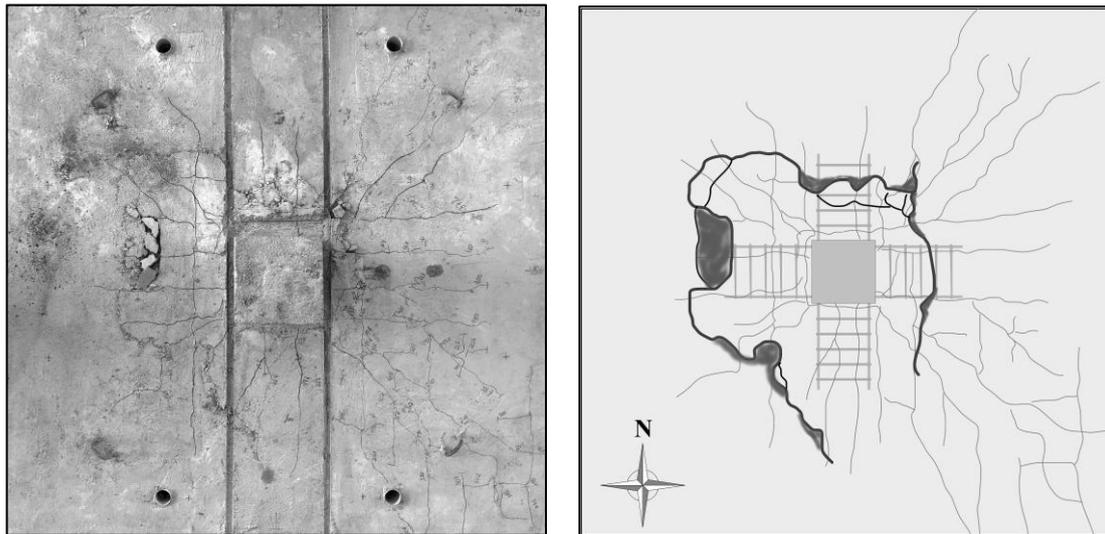


Figura 4.113 – Mapa de fissuração da laje CA-05

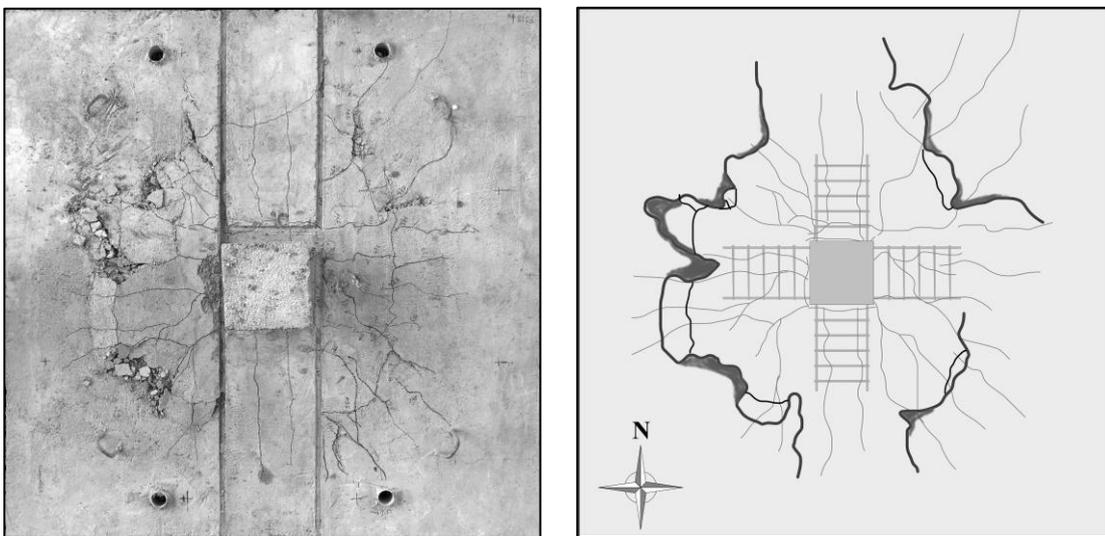


Figura 4.114 – Mapa de fissuração da laje TA-05

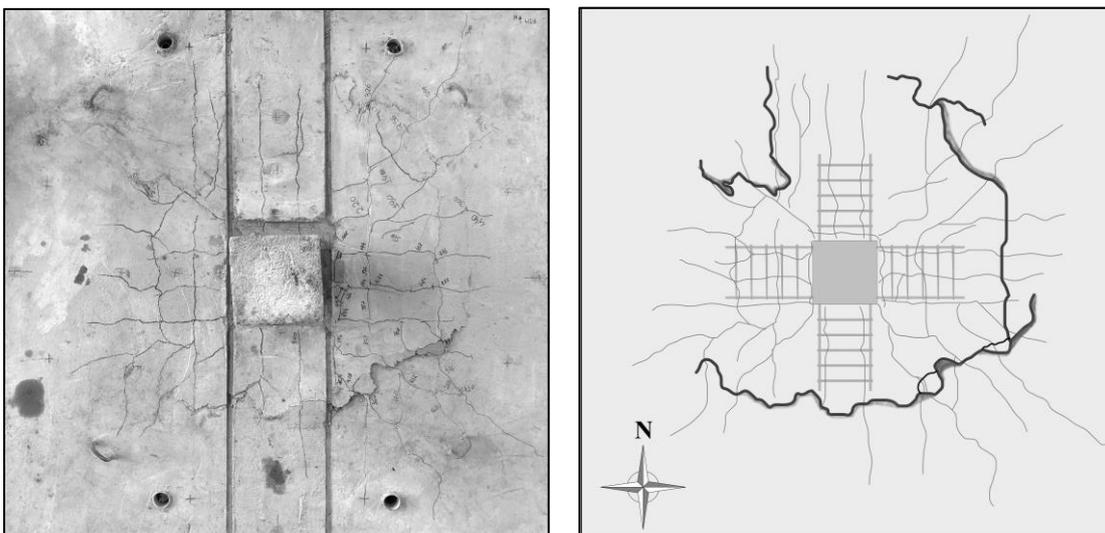


Figura 4.115 – Mapa de fissuração da laje NA-05

As fissuras observadas são classificadas como radiais e tangenciais. As primeiras fissuras radiais surgem com um nível de carregamento em torno de 20% da carga última e, à medida que o carregamento aumenta, se propagam partindo do pilar em direção às bordas. Já as tangenciais surgem com elevados estágios de carga, em torno de 70% da carga última. Geralmente as lajes apresentam duas fissuras tangenciais bem características, sendo a primeira logo no 70% de carga última e a segunda já na iminência de ruptura.

Para determinação da superfície de ruptura das lajes de forma precisa, precisa-se cortá-las transversalmente, com isso consegue-se determinar o modo de ruptura ocorrido, conforme a ser descrito no item 4.2.6. Ressalta-se que, com base nos mapas de fissuração, há uma formação do cone de punção em todas as lajes ensaiadas.

#### 4.2.6. Superfície de ruptura

Com o intuito de identificar a superfície de ruptura e sua equivalente inclinação, algumas lajes foram cortadas após os ensaios. Com isso consegue-se determinar a formação do tronco de cone de punção das lajes de forma mais precisa que com apenas uma análise dos mapas de fissuração.

Foram cortadas 18 lajes e, devido à simetria, só foi cortado o quadrante Nordeste, conforme esquematizado na Figura 4.116. O procedimento de corte das lajes está demonstrado na Figura 4.117.

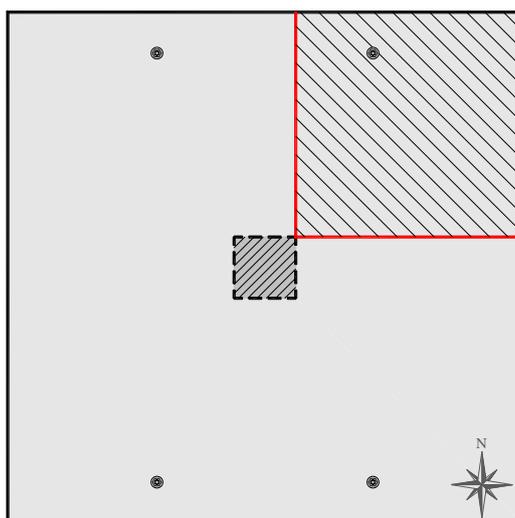


Figura 4.116 – Posição do corte das lajes



a) Posicionamento dos trilhos por onde a máquina de corte passa



b) Máquina de corte já posicionada



c) Corte sendo executado



d) Quadrante retirado da laje

Figura 4.117 – Execução do corte da laje

O resultado do corte das lajes é apresentado da Figura 4.118 à Figura 4.135.

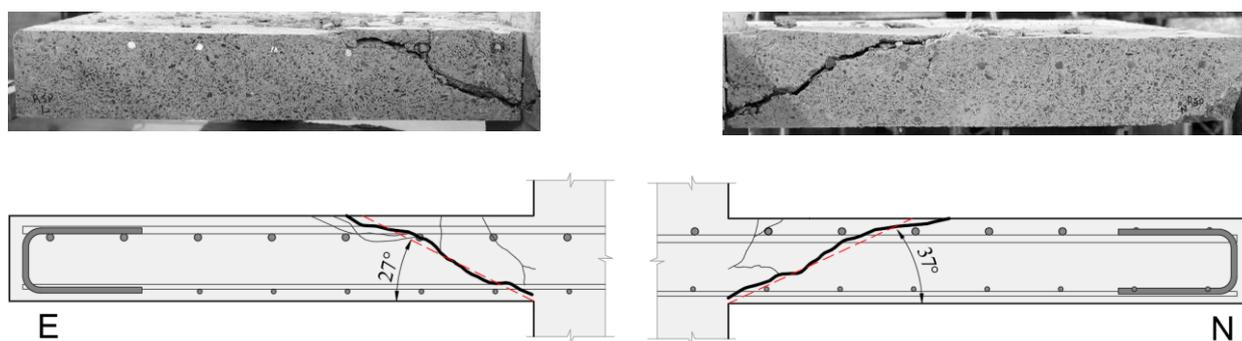


Figura 4.118 – Seção de corte da Laje RS

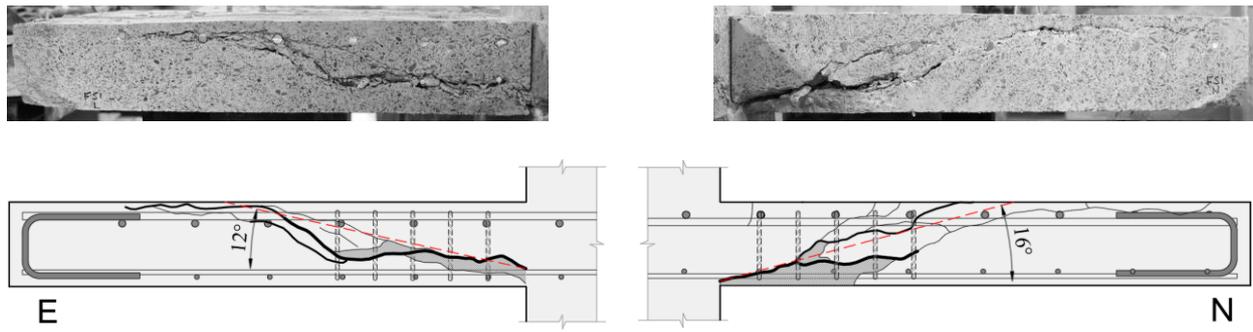


Figura 4.119 – Seção de corte da Laje FA-01

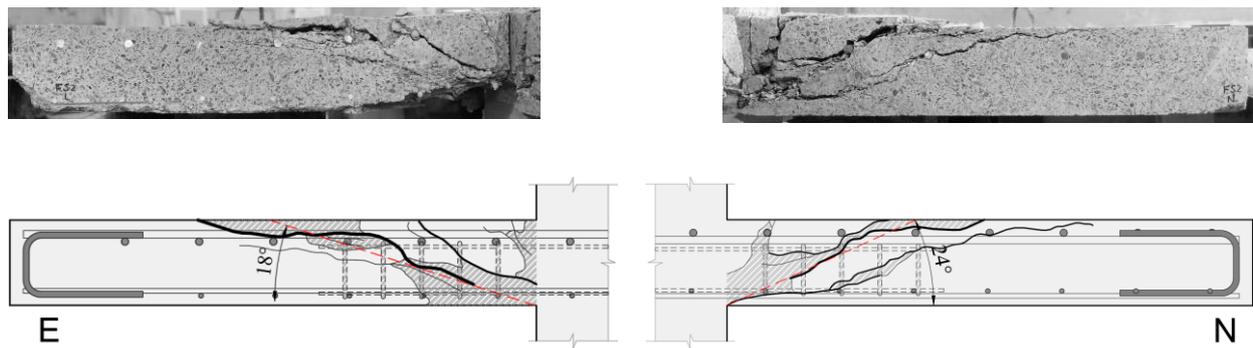


Figura 4.120 – Seção de corte da Laje CA-01

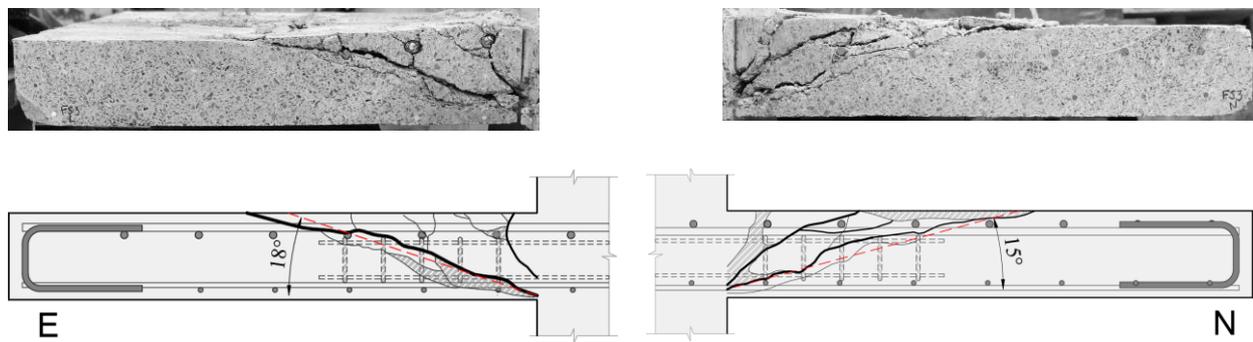


Figura 4.121 – Seção de corte da Laje NA-01

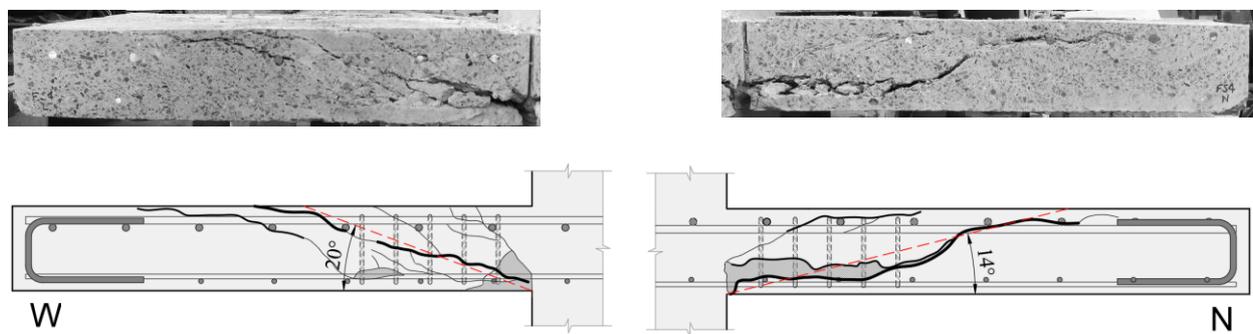


Figura 4.122 – Seção de corte da Laje FA-02

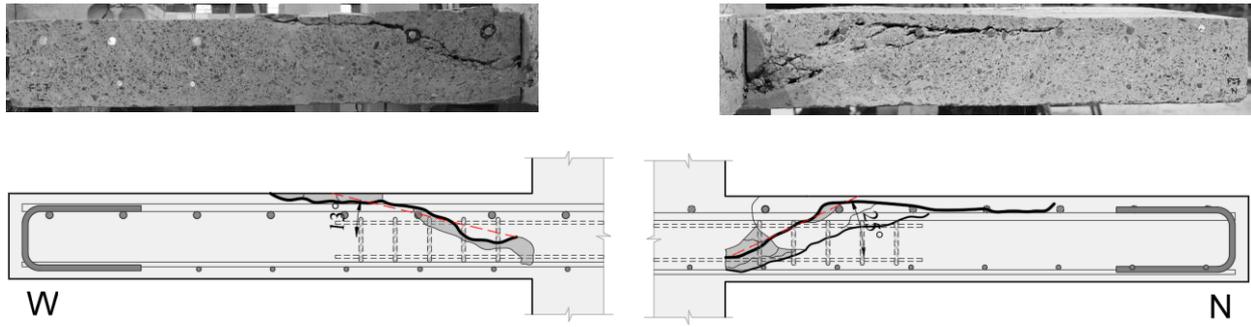


Figura 4.123 – Seção de corte da Laje NA-02

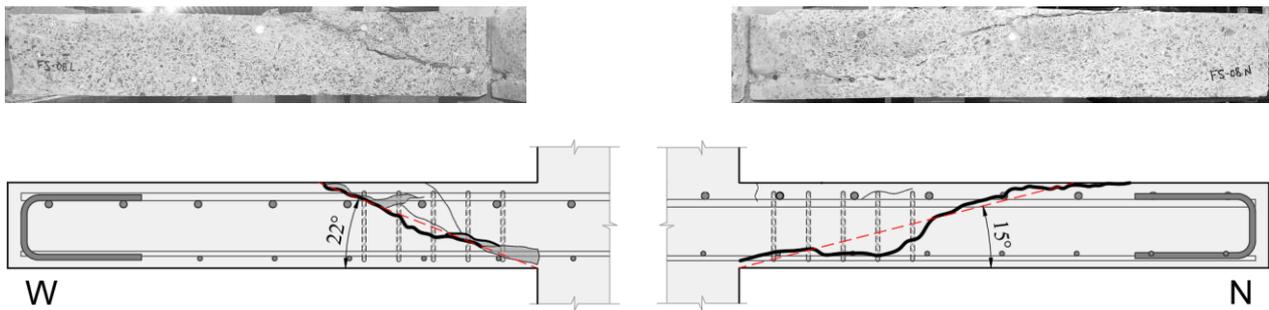


Figura 4.124 – Seção de corte da Laje FA-03

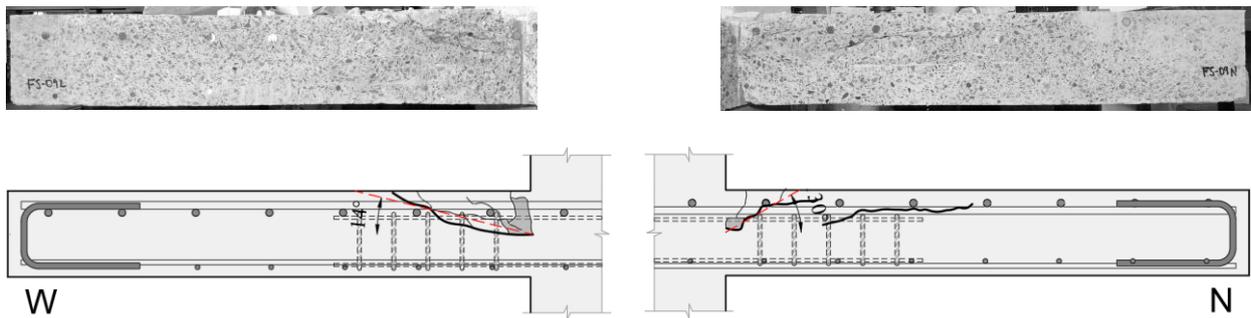


Figura 4.125 – Seção de corte da Laje CA-03

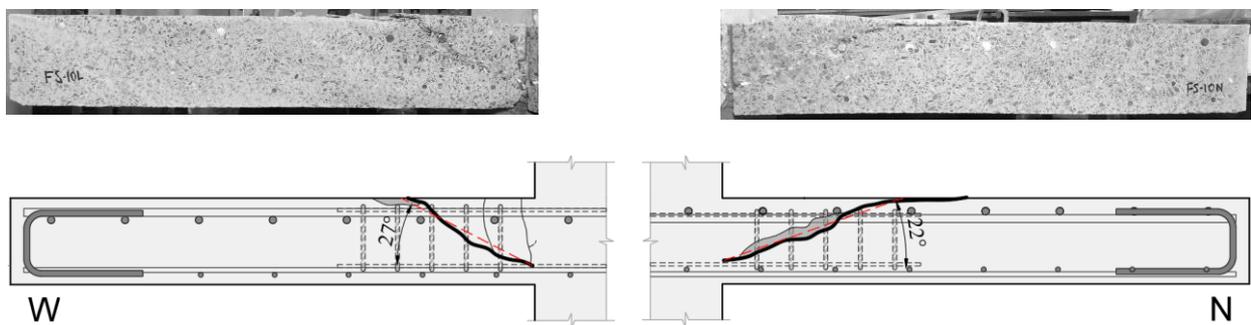


Figura 4.126 – Seção de corte da Laje TA-03

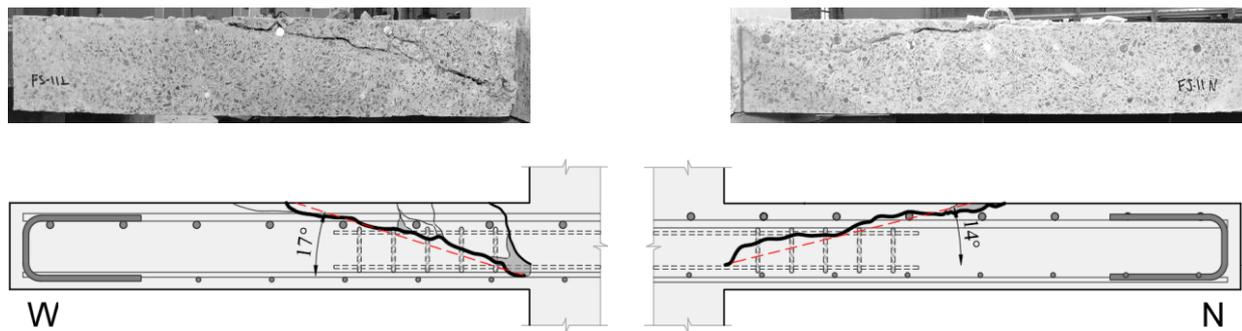


Figura 4.127 – Seção de corte da Laje NA-03

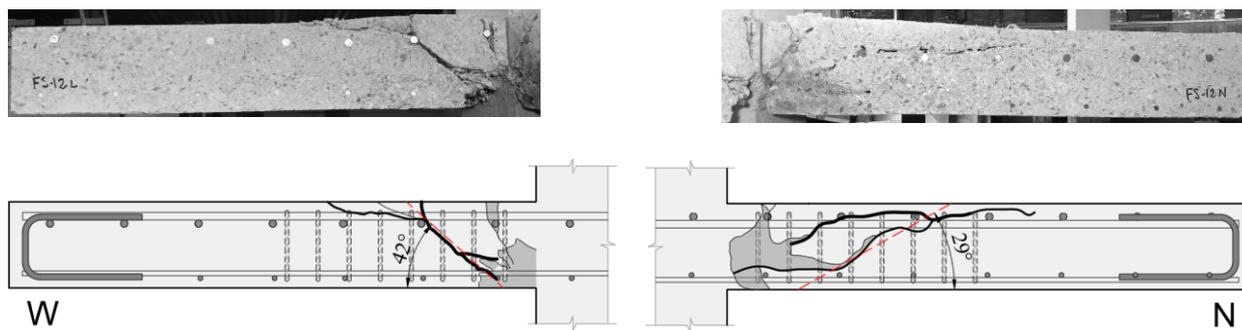


Figura 4.128 – Seção de corte da Laje FA-04

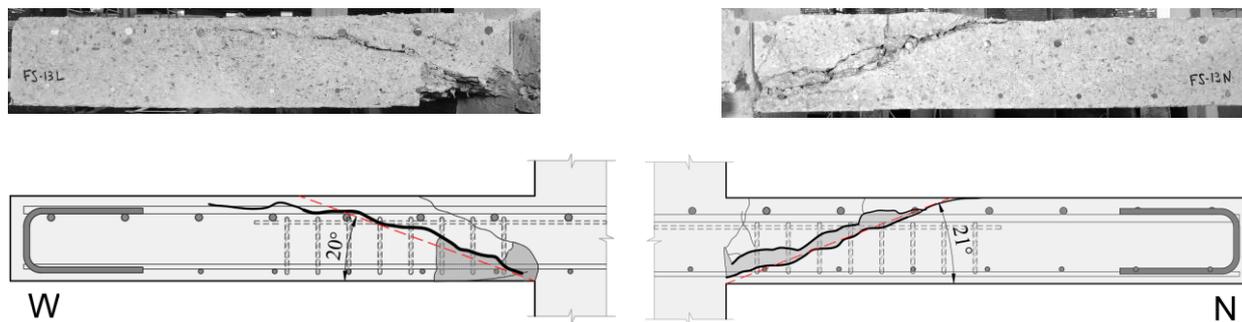


Figura 4.129 – Seção de corte da Laje CA-04

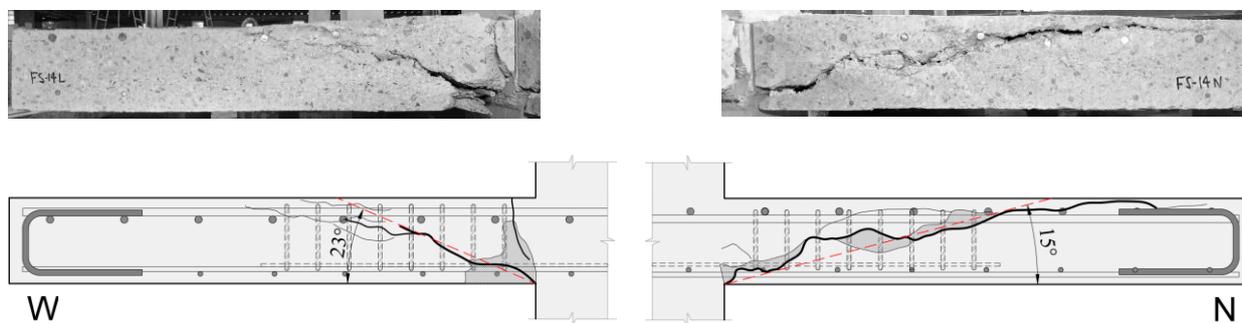


Figura 4.130 – Seção de corte da Laje TA-04

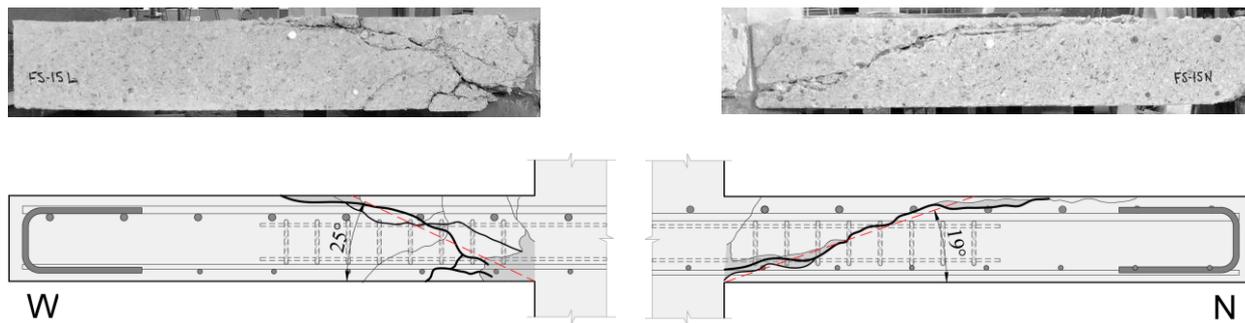


Figura 4.131 – Seção de corte da Laje NA-04

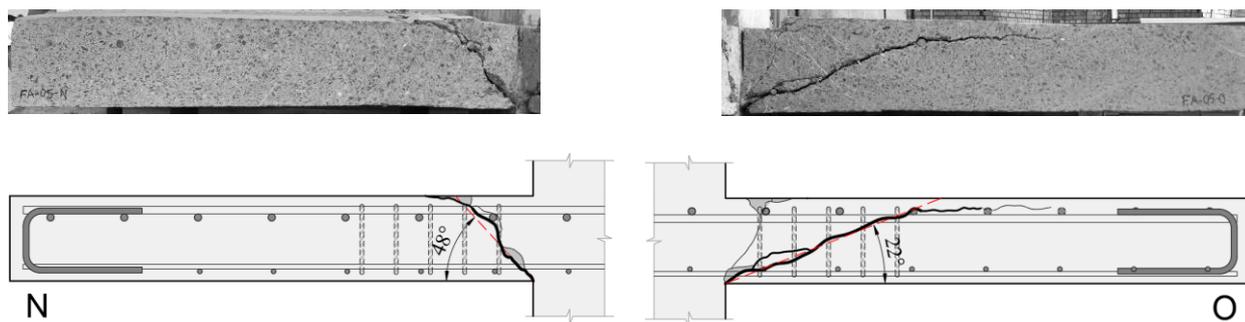


Figura 4.132 – Seção de corte da Laje FA-05

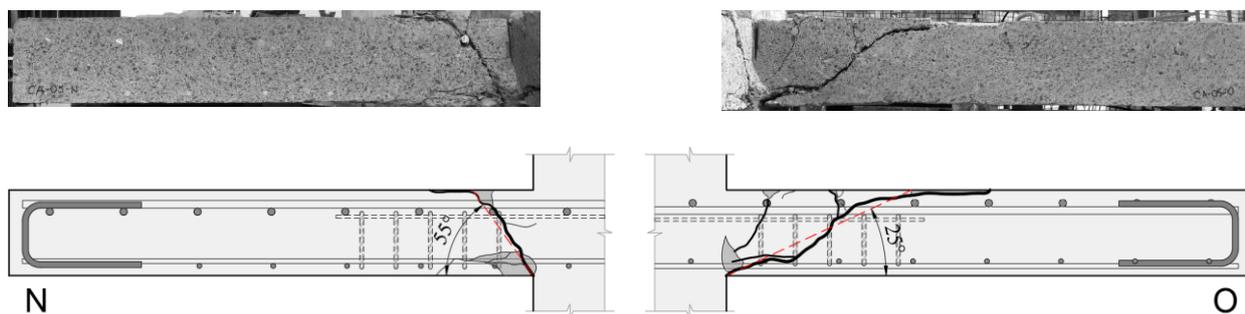


Figura 4.133 – Seção de corte da Laje CA-05

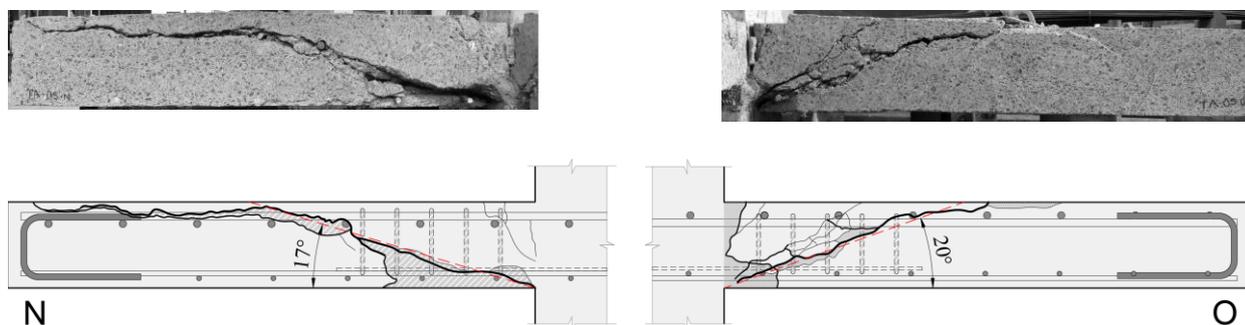


Figura 4.134 – Seção de corte da Laje TA-05

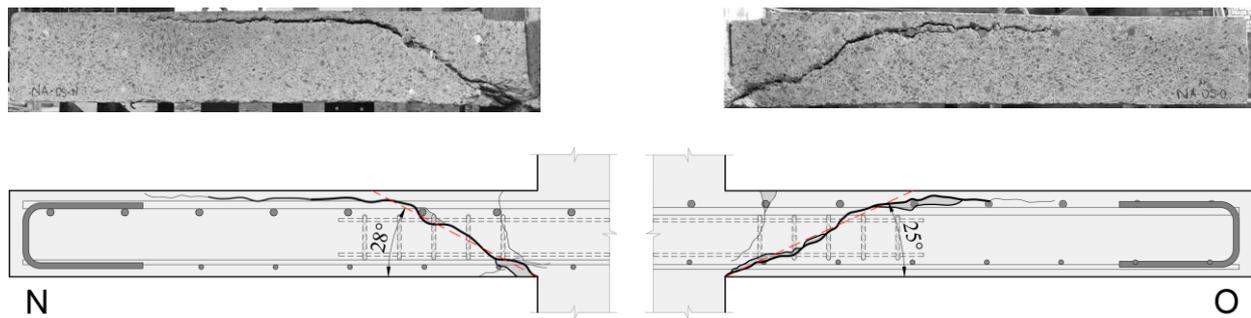


Figura 4.135 – Seção de corte da Laje NA-05

A partir do corte das lajes, pode-se observar que, para as lajes da Série 1, a previsão do posicionamento da superfície de ruptura pelas normas foi diferente do real. Isso se explica devido à  $S_0$  e  $S_R$  estarem acima de  $0,5d$ , analisando-se rigorosamente o valor limite. Excetuando-se o ACI 318, as normas para determinação do perímetro de controle fora da região das armaduras de cisalhamento consideram um comprimento reduzido, onde até certo ponto a quantidade de camadas de armadura e seu espaçamento influenciam e, após esse ponto, o perímetro de controle fica constante (não elevando a resistência, que está diretamente proporcional a esse perímetro), isso ocorreu em todas as lajes estudadas e, de forma mais evidente nas lajes da Série 1 pois, para valores de  $S_0$  e  $S_R$  maiores esse efeito se evidencia mais, fazendo com que a carga de ruptura dentro da região das armaduras ultrapasse a carga de ruptura fora dessa região, induzindo a um modo de ruptura normativo *out*.

Na Tabela 4.7 resume-se os resultados obtidos a partir das análises das superfícies de ruptura, para determinação do modo de ruptura. Onde *in* refere-se a ruptura que passa dentro da região com armadura de cisalhamento; *out* refere-se a ruptura que passa fora da região com armadura de cisalhamento.

Tabela 4.7 – Inclinação da superfície de ruptura e seu modo de ocorrência

Série	Laje	Modo de ruptura	Inclinação		
			Norte	Leste	Média
1	RS	-	23°	22°	22,5°
	FA-01	<i>out</i>	12°	11°	11,5°
	CA-01	<i>in</i>	25°	24°	24,5°
	NA-01	<i>in</i>	23	18	20,5°
2	FA-02	<i>in</i>	26°	18°	22,0°
	CA-02	<i>in*</i>	-	-	-
	TA-02	<i>in*</i>	-	-	-
	NA-02	<i>in</i>	25°	24°	24,5°
3	FA-03	<i>in</i>	30°	23°	26,5°
	CA-03	<i>in</i>	7°	18°	12,5°
	TA-03	<i>in</i>	22°	31°	26,5°
	NA-03	<i>in</i>	16°	16°	16,0°
4	FA-04	<i>in</i>	16°	30°	23,0°
	CA-04	<i>in</i>	17°	16°	16,5°
	TA-04	<i>in</i>	14°	20°	17,0°
	NA-04	<i>in</i>	15°	25°	20,0°
5	FA-05	<i>in</i>	48°	22°	35,0°
	CA-05	<i>in</i>	55°	25°	40,0°
	TA-05	<i>in</i>	17°	20°	18,5°
	NA-05	<i>in</i>	28°	25°	26,5°

**Nota:** (*in\**) refere-se a uma ruptura dentro da região de armadura de punção determinada visualmente a partir do mapa de fissuração.

#### 4.2.7. Carga de ruptura das lajes

Na Tabela 4.8 é apresentada a carga última (já acrescido o peso próprio e o peso dos equipamentos),  $V_u$ , resistida para cada laje ensaiada; e é apresentado, também, o acréscimo de carga dos modelos com armadura de punção em relação ao modelo de referência RS, em valores percentuais, dado por  $V_u / V_{RS}$ .

Tabela 4.8 – Carga última das lajes e sua relação com a laje maciça de referência

Laje	$V_u$ (kN)	$V_u / V_{RS}$ (%)
RS	478,8	-
FA-01	535,1	11,8%
CA-01	554,8	15,9%
NA-01	534,2	11,6%
FA-02	499,9	4,4%
CA-02	611,1	27,6%
TA-02	469,3	-2,0%
NA-02	496,6	3,7%
FA-03	607,8	26,9%
CA-03	662,1	38,3%
TA-03	614,1	28,3%
NA-03	604,6	26,3%
FA-04	630,1	31,6%
CA-04	661,1	38,1%
TA-04	605,5	26,5%
NA-04	590,7	23,4%
FA-05	561,3	17,2%
CA-05	605,2	26,4%
TA-05	574,1	19,9%
NA-05	584,3	22,0%

Excetuando-se a série 2, que tem classe do concreto inferior às demais, ao se realizar uma comparação direta das cargas últimas, em relação à carga última da laje de referência RS, observa-se que a utilização da armadura de punção conferiu acréscimos de carga que variaram de 11,6%, para a laje NA-01, e 38,3%, para a laje CA-03. Isso evidencia que a adoção de armadura de punção, para todos os modos de ancoragem adotados, conferiu acréscimo de carga para a laje, demonstrando um bom comportamento estrutural.

Para analisar melhor o efeito que a ancoragem das armaduras de punção provoca nas lajes, no que diz respeito à carga última, é apresentado a seguir na Tabela 4.9 à Tabela 4.13 as cargas últimas específicas para cada laje de cada série de concretagem,  $V_u$ , e a relação entre a carga última de cada laje em relação à de referência,  $V_u / V_{REF}$  (que nesse caso é a laje com ancoragem *total*).

Tabela 4.9 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 1

Série	Laje	$V_u$ (kN)	$V_u / V_{REF}$ (%)
1	FA-01	535,1	-
	CA-01	554,8	3,7%
	NA-01	534,2	-0,2%

Tabela 4.10 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 2

Série	Laje	$V_u$ (kN)	$V_u / V_{REF}$ (%)
2	FA-02	499,9	-
	CA-02	611,1	22,2%
	TA-02	469,3	-6,1%
	NA-02	496,6	-0,7%

Tabela 4.11 – Cargas últimas pertencentes à Série 3

Série	Laje	$V_u$ (kN)	$V_u / V_{REF}$ (%)
3	FA-03	607,8	-
	CA-03	662,1	8,9%
	TA-03	614,1	1,0%
	NA-03	604,6	-0,5%

Tabela 4.12 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 4

Série	Laje	$V_u$ (kN)	$V_u / V_{REF}$ (%)
4	FA-04	630,1	-
	CA-04	661,1	4,9%
	TA-04	605,5	-3,9%
	NA-04	590,7	-6,3%

Tabela 4.13 – Cargas últimas das lajes pertencentes à Série 5

Série	Laje	$V_u$ (kN)	$V_u / V_{REF}$ (%)
5	FA-05	561,3	-
	CA-05	605,2	7,8%
	TA-05	574,1	2,3%
	NA-05	584,3	4,1%

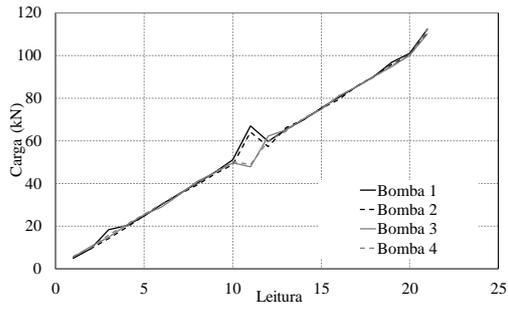
Observa-se que para todas as séries para as lajes com ancoragem *parcial* da armadura de punção ancorada apenas na armadura de flexão comprimida, lajes CA-01, CA-02, CA-03, CA-04 e CA-05, foram observados os maiores valores de carga última, por série, evidenciando que o melhor comportamento quanto à carga última, considerando a variação da ancoragem, está nesse tipo de detalhamento. As lajes *sem* ancoragem NA-01, NA-02, NA-03 e NA-04 apresentaram decréscimo de carga última, quando comparadas com a de referência por série, porém a maior diferença foi de apenas 6,3% (para a laje NA-04 em relação à laje FA-04), o que mostra que a *não ancoragem* da armadura de punção não afetou consideravelmente o comportamento das lajes. Apenas a laje NA-05, *sem* ancoragem, teve acréscimo de carga última ao ser comparada com a de referência da série FA-05. As lajes com ancoragem *parcial* da armadura de punção ancorada apenas na armadura de flexão tracionada, tiveram comportamento similar às lajes *sem* ancoragem, com a maior variação aferida de 6,1% (laje TA-02 em relação à laje FA-02), evidenciando que esse tipo de ancoragem também não afeta consideravelmente o comportamento das

lajes; verificou-se um ligeiro acréscimo de carga da laje TA-03 em relação à FA-03, de 1,0%, considerada insignificante e, um acréscimo de 2,3% comparando-se a laje TA-05 com a FA-05.

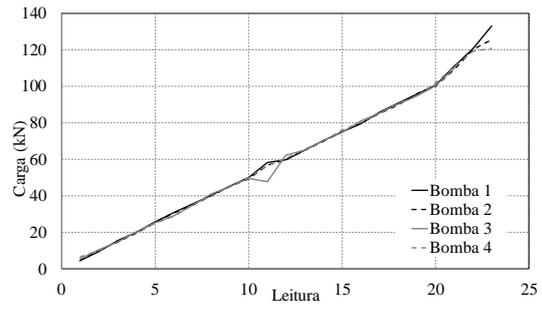
Da Figura 4.136 à Figura 4.140 apresentam-se as curvas carga *versus* leitura obtidas durante o ensaio de todas as lajes, em que são apresentadas as leituras para cada estágio de carregamento até a ruptura. Destaca-se que o sistema de aplicação de cargas é feito manualmente e individualmente para cada bomba, o que gera dificuldade em manter o equilíbrio de cargas entre os quatro cilindros hidráulicos ao longo do ensaio. Para as lajes referentes às Séries 2, 3, 4 e 5, com o novo tipo de sistema de ensaio, obteve-se maior quantidade de leituras, facilitando o controle das deformações e deslocamentos ao longo de todo ensaio, mostrando ser o melhor sistema para o estudo em questão. Evidencia-se que, por meio da análise das curvas, houve um padrão de evolução de carga similar entre as quatro bombas hidráulicas em todas as lajes. Destaca-se que eventualmente o ensaio era pausado, para que se fossem observadas possíveis rotações das lajes e acomodações do sistema, essa pausa está bem evidenciada na aplicação da carga na laje TA-05 e, por ser um sistema de aquisição de dados contínuo, as leituras continuavam.

Tabela 4.14 – Comparação de cargas últimas médias por grupo

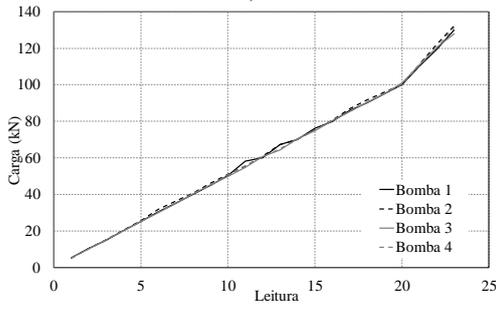
Grupo	Lajes	$V_u$ (kN)	Média $V_u$ (kN)	$V_u / V_{REF}$
1	FA-01	535,1	566,8	-
	FA-02	499,9		
	FA-03	607,8		
	FA-04	630,1		
	FA-05	561,3		
2	CA-01	554,8	618,9	9,2%
	CA-02	611,1		
	CA-03	662,1		
	CA-04	661,1		
	CA-05	605,2		
3	TA-02	469,3	565,8	-0,2%
	TA-03	614,1		
	TA-04	605,5		
	TA-05	574,1		
4	NA-01	534,2	562,1	-0,8%
	NA-02	496,6		
	NA-03	604,6		
	NA-04	590,7		
	NA-05	584,3		



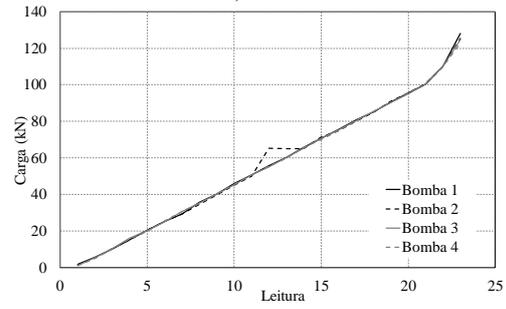
a) RS



b) FA-01

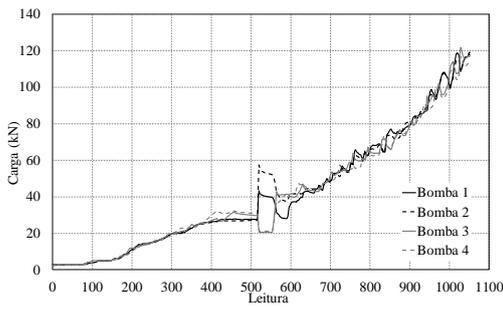


c) CA-01

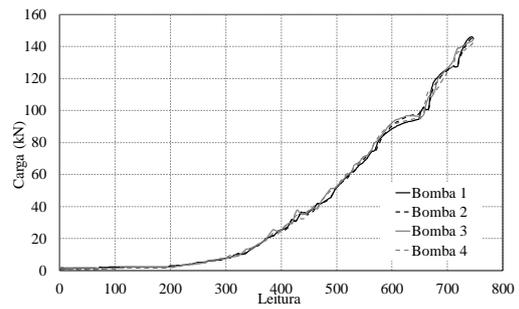


d) NA-01

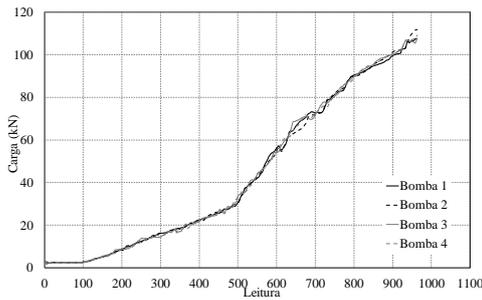
Figura 4.136 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 1



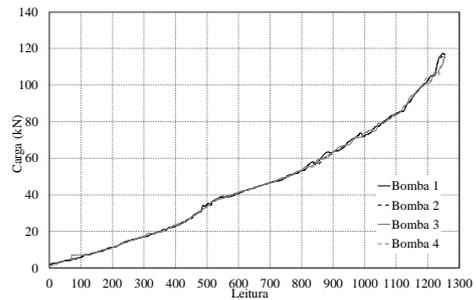
a) FA-02



b) CA-02

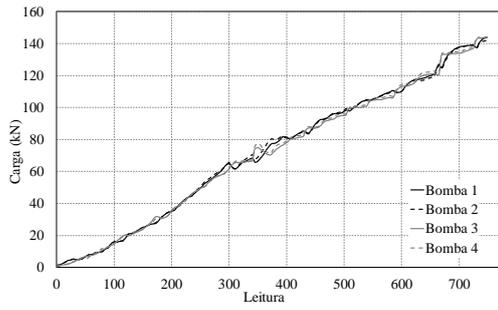


c) TA-02

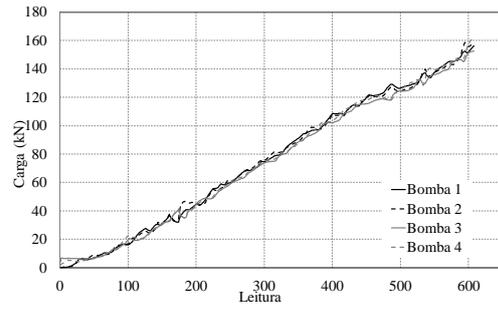


d) NA-02

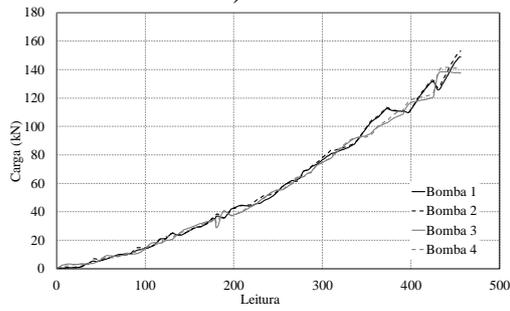
Figura 4.137 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 2



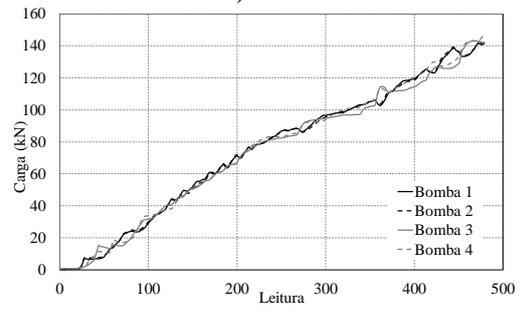
a) FA-03



b) CA-03

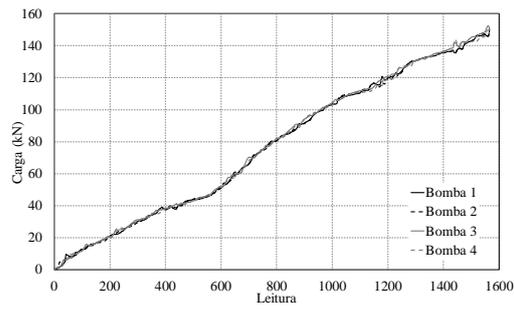


c) TA-03

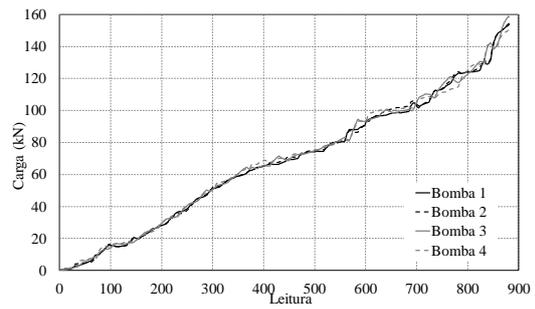


d) NA-03

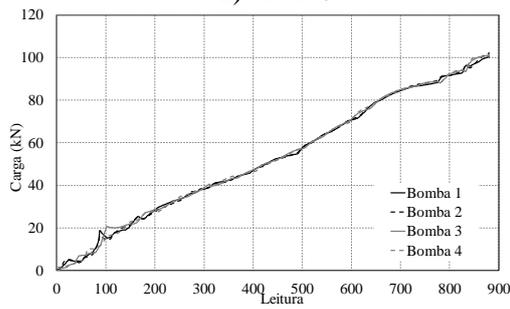
Figura 4.138 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 3



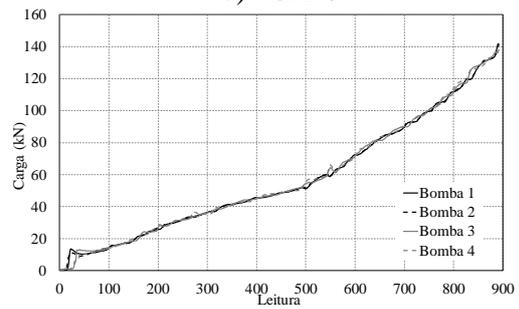
a) FA-04



b) CA-04



c) TA-04



d) NA-04

Figura 4.139 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 4

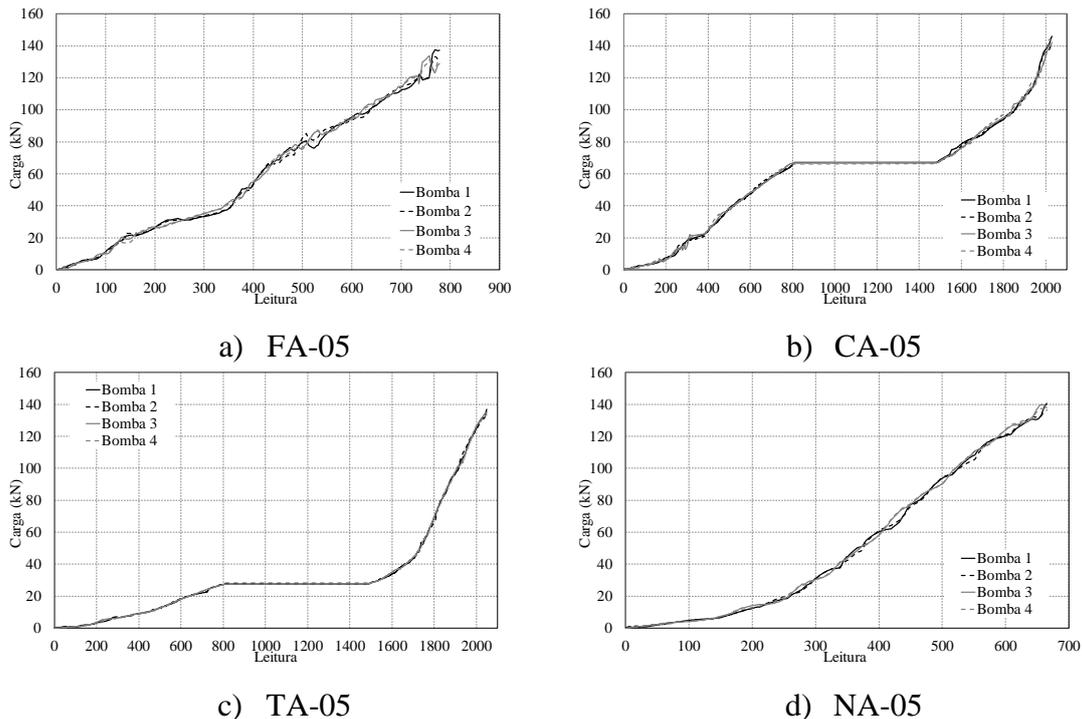


Figura 4.140 – Processo de aplicação de cargas/leituras para a Série 5

#### 4.2.8. Modo de ruptura

Para se determinar o modo de ruptura das lajes variáveis devem ser analisadas, no tocante ao comportamento das lajes durante os ensaios, tais como: deformações no concreto radiais e tangenciais, dando especial atenção às tensões tangenciais próximas às de esmagamento do concreto ou às radiais que apresentem comportamento conforme observado por Muttoni (2008) e Guandalini, Burdet e Muttoni (2009), que afirmam que em rupturas por punção há uma descompressão radial do concreto; o grau de sollicitação e deformação das armaduras de flexão; o mapa de fissuração bem como a superfície de ruptura das lajes; os deslocamentos verticais associados com a capacidade portante das lajes; e, em uma comparação direta, a razão entre a carga última experimental ( $V_u$ ) e a carga resistente à flexão ( $V_{flex}$ ), calculada conforme critérios já descritos.

São definidos então três modos de ruptura que podem ocorrer: *ruptura por punção* em que o critério determinante para classificação por esse modo foi estabelecido atribuindo maior relevância a visualização do cone de punção, com uma ruptura ocorrendo de forma brusca, apresentando deformações no concreto abaixo de  $\epsilon_{cu}$  e com as armaduras de flexão apresentando pouca deformação (podendo apresentar escoamento até a terceira camada de armadura em volta do pilar); *ruptura por flexo-punção*, como também comentado por Ferreira (2010), em que apresenta deformações no concreto iguais ou superiores a 80%

de  $\epsilon_{cu}$ , e/ou escoamento das barras de flexão tracionadas dentro de um raio igual ou superior à 80% do raio do carregamento, ou seja, além da terceira camada ao redor do pilar, abrangendo todas as barras monitoradas; *ruptura por flexão*, quando a carga de ruptura à punção é maior que a carga de ruptura à flexão.

Na Tabela 4.15 são apresentados os dados das deformações das armaduras de flexão e do concreto (médias aferidas na superfície), no momento da ruptura.

Tabela 4.15 – Deformações medidas nos extensômetros de flexão e do concreto

Série	Laje	Deformação medida nos extensômetros (%)							Deformação Concreto (%)	
		EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	Radial	Tangencial
1	RS	2,93	2,75*	2,34	1,47	1,89	2,22	1,94	-0,54	-1,02
	FA-01	2,75*	2,10	2,97	2,15	2,59*	2,35	2,02	-0,11	-1,22
	CA-01	2,92	3,07	2,7*	1,62	2,53*	2,40	2,08	-0,16	-1,10
	NA-01	2,78*	2,75*	2,49	1,86	2,55*	2,49	2,33	0,18	-1,45
2	FA-02	2,55	2,45	2,36	2,00	2,35	2,08	2,59	-0,17	-1,51
	CA-02	-	3,08*	2,79	1,83	-	3,21*	2,39	-0,13	-1,91
	TA-02	2,40	2,05	2,20	1,61	2,29	2,47	2,05	-0,58	-1,15
	NA-02	2,45	3,07	1,90	1,61	3,04	2,49	2,27	-0,09	-1,38
3	FA-03	2,75	2,81	2,84	1,84	5,23	3,17*	3,03	-0,34	-1,07
	CA-03	3,27*	3,18*	3,75	2,19	>> $\epsilon_{ys}$	>> $\epsilon_{ys}$	5,74	-0,62	-1,28
	TA-03	2,93	2,61	2,93	1,79	3,67	3,39*	3,77	-0,46	-0,63
	NA-03	5,59	2,54	2,90	1,88	3,41*	3,78	2,87	-0,12	-1,01
4	FA-04	>> $\epsilon_{ys}$	3,05	3,16	2,75	>> $\epsilon_{ys}$	5,02	>> $\epsilon_{ys}$	0,35	-0,18
	CA-04	3,25	4,39	3,25	2,42	>> $\epsilon_{ys}$	>> $\epsilon_{ys}$	5,26	-0,43	-2,02
	TA-04	4,88	3,07	3,25	2,07	>> $\epsilon_{ys}$	5,08	>> $\epsilon_{ys}$	-0,91	-0,69
	NA-04	3,05	5,38	2,46	1,75	5,19	3,31	3,20	-0,11	-0,71
5	FA-05	3,66	2,44	2,96	1,84	4,52	3,14	2,92	-0,24	-1,24
	CA-05	>> $\epsilon_{ys}$	2,54*	2,82	1,83	2,92	2,99	2,68*	-0,49	-1,07
	TA-05	1,75	2,33	2,62*	1,92	3,33	3,91	3,75	-0,27	-2,66
	NA-05	3,43	3,16	2,53*	1,79	3,51	2,78	3,43	-0,57	-1,01

\* Equivale às deformações medidas acima 80% de  $\epsilon_{ys}$

Na tabela, foram hachuradas em tom azul claro as células em que a armadura de flexão atingiu a deformação de escoamento, e em laranja claro foram hachuradas as células cuja deformação radial do concreto apresentou valores de tração nos estágios finais de carregamento.

Analisando as deformações das armaduras de flexão pode-se afirmar que a laje com maior proximidade de uma ruptura por flexo-punção foi a CA-04, pois das sete barras de flexão

instrumentadas seis escoaram, com sua carga de ruptura em torno de 84% da carga de resistência à flexão.

As deformações na superfície do concreto apresentaram um padrão para todas as lajes, sendo observado em todas as lajes um comportamento de descompressão radial do concreto, característico de uma ruptura por punção, chegando a haver tração em duas lajes, NA-01 e FA-04.

Para analisar se as lajes atingiram uma ruptura por flexão, comparou-se na Tabela 4.16 a carga última experimental ( $V_u$ ) com a carga resistente à flexão ( $V_{flex}$ ), por meio do método proposto por Guandalini, Burdet e Muttoni (2009), já descrito no Capítulo 2. Com isso observa-se que nenhuma laje atingiu a carga teórica resistente à flexão, com valor mais próximo para a laje CA-02 em que  $V_u$  atingiu 86% de  $V_{flex}$ .

A partir da análise dos resultados determinou-se o modo de ruptura para cada laje, bem como seu nível de fissuração que foi determinado na alteração da rigidez inicial da curva carga-deformação das armaduras de flexão principal.

Tabela 4.16 – Classificação do modo de ruptura das lajes

Laje	$V_u$ (kN)	$V_{flex}$ (kN)	$V_u / V_{flex}$	Nível de Fissuração	Modo de Ruptura
RS	478,8	786,9	0,61	15%	Punção
FA-01	535,1	785,1	0,68	21%	Punção
CA-01	554,8	787,4	0,70	24%	Punção
NA-01	534,2	787,1	0,68	25%	Punção
FA-02	499,9	706,4	0,71	25%	Punção
CA-02	611,1	714,2	0,86	23%	Punção
TA-02	469,3	703,7	0,67	24%	Punção
NA-02	496,6	711,5	0,70	21%	Punção
FA-03	607,8	783,7	0,78	22%	Punção
CA-03	662,1	788,6	0,84	18%	Punção
TA-03	614,1	786,6	0,78	25%	Punção
NA-03	604,6	787,7	0,77	25%	Punção
FA-04	630,1	784,7	0,80	22%	Flexo-punção
CA-04	661,1	784,3	0,84	24%	Flexo-punção
TA-04	605,5	787,8	0,77	21%	Flexo-punção
NA-04	590,7	788,2	0,75	21%	Punção
FA-05	561,3	775,8	0,72	20%	Flexo-punção
CA-05	605,2	774,0	0,78	24%	Punção
TA-05	574,1	775,8	0,74	23%	Punção
NA-05	584,3	779,1	0,75	19%	Punção

### 4.3. ANÁLISE E RESULTADOS - MODELOS TEÓRICOS DE CÁLCULO

Para a análise da resistência à punção da ligação laje-pilar em lajes maciças utilizam-se, geralmente, os modelos normativos, essencialmente empíricos, propostos. Basicamente, para lajes lisas sem armadura de cisalhamento, a expressão geral para o cálculo da carga última da ligação é o produto da tensão de cisalhamento nominal pelo perímetro de controle e pela altura útil, porém cada norma define o posicionamento do perímetro de controle.

A variação da ancoragem da armadura de punção utilizada neste trabalho não é preconizada pelas normas, contudo avaliou-se os modelos teóricos de cálculos das normas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004), ACI 318 (2019) e *fib* Model Code 2010 (2013), comparando-se os valores de carga última obtidos com os ensaios de cada laje com as cargas últimas teóricas normativas. Objetivando facilitar o entendimento das proposições, na Tabela 4.17 estão apresentadas as principais características das lajes ensaiadas.

Tabela 4.17 – Resumo Característico das lajes ensaiadas

Série	Laje	$h$ (mm)	$d$ (mm)	$\rho$ (%)	$f_c$ (MPa)	$f_{y,16mm}$ (MPa)	$A_{sw} /$ <i>cam.</i> ( $cm^2$ )
1	RS	180	147,9	0,92	29,9	549	-
	FA-01		147,1	0,92			4,02
	CA-01		148,1	0,91			
	NA-01		148,0	0,91			
2	FA-02		145,3	0,94	14,9	624	
	CA-02		147,9	0,92			
	TA-02		144,4	0,96			
	NA-02		147,0	0,93			
3	FA-03		145,8	0,94	30,5	624	1,57
	CA-03		148,0	0,91			
	TA-03		147,1	0,92			
	NA-03		147,6	0,92			
4	FA-04		146,8	0,93	30	593	4,02
	CA-04		146,6	0,93			
	TA-04		148,2	0,91			
	NA-04		148,4	0,91			
5	FA-05	143,0	0,97	29,9	525	1,57	
	CA-05	142,2	0,98				
	TA-05	143,0	0,97				
	NA-05	144,4	0,96				

### 4.3.1. RESULTADOS DOS MODELOS TEÓRICOS – CARGAS ÚLTIMAS DE MODOS DE RUPTURA

A partir da Tabela 4.18 à Tabela 4.21 são apresentadas as cargas teóricas e modos de ruptura previstos pelas normas analisadas, já descritas no item 2.5 do Capítulo 2. Ressalta-se que o modo de ruptura denominado *out* refere-se a uma ruptura fora da região de amadura de punção, enquanto o modo *in* refere-se a uma ruptura dentro da região de armadura de punção.

Tabela 4.18 – Cargas e modos de ruptura previstos pela ABNT NBR 6118 (2014)

Lajes	$V_{R,max}$ (kN)	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,Asw}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_u$ (kN)	$V_{NBR}$ (kN)	$V_u / V_{NBR}$	Modo de Ruptura - Teórico
RS	1261,4	536,7	-	-	478,8	536,7	0,89	-
FA-01	1254,6	534,5	765,5	726,8	535,1	726,8	0,74	OUT
CA-01	1263,1	537,3	770,0	731,1	554,8	731,1	0,76	OUT
NA-01	1262,3	537,0	769,5	730,7	534,2	730,7	0,73	OUT
FA-02	659,6	419,9	474,9	571,9	499,9	474,9	1,05	IN
CA-02	671,4	425,5	481,9	580,8	611,1	481,9	1,27	IN
TA-02	655,6	417,9	472,4	568,8	469,3	472,4	0,99	IN
NA-02	667,4	423,6	479,5	577,7	496,6	479,5	1,04	IN
FA-03	1265,0	534,5	563,6	728,3	607,8	563,6	1,08	IN
CA-03	1284,1	540,6	570,5	737,9	662,1	570,5	1,16	IN
TA-03	1276,3	538,1	567,7	734,0	614,1	567,7	1,08	IN
NA-03	1280,6	539,5	569,3	736,2	604,6	569,3	1,06	IN
FA-04	1255,7	534,3	846,1	664,7	630,1	664,7	0,95	OUT
CA-04	1254,0	533,8	845,1	663,8	661,1	663,8	1,00	OUT
TA-04	1267,6	538,2	853,2	670,7	605,5	670,7	0,90	OUT
NA-04	1269,4	538,7	854,3	671,6	590,7	671,6	0,88	OUT
FA-05	1219,6	523,3	552,0	650,1	561,3	552,0	1,02	IN
CA-05	1212,8	521,1	549,5	646,6	605,2	549,5	1,10	IN
TA-05	1219,6	523,3	552,0	650,1	574,1	552,0	1,04	IN
NA-05	1231,6	527,1	556,4	656,0	584,3	556,4	1,05	IN
						MÉDIA	0,99	
						DP	0,14	
						CV	0,14	

Tabela 4.19 – Cargas e modos de ruptura previstos pelo ACI 318 (2019)

Lajes	$V_{R,max}$ (kN)	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,Asw}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_u$ (kN)	$V_{ACI}$ (kN)	$V_u / V_{ACI}$	Modo de Ruptura - Teórico
RS	724,5	478,1	-	-	478,8	478,1	1,00	-
FA-01	719,3	474,7	555,1	546,7	535,1	546,7	0,98	OUT
CA-01	725,8	479,0	559,4	551,0	554,8	551,0	1,01	OUT
NA-01	725,1	478,6	559,0	550,6	534,2	550,6	0,97	OUT
FA-02	499,5	329,7	303,0	359,0	499,9	329,7	1,52	IN
CA-02	511,4	337,5	309,4	366,4	611,1	337,5	1,81	IN
TA-02	495,4	327,0	300,8	356,4	469,3	327,0	1,44	IN
NA-02	507,3	334,8	307,2	363,8	496,6	334,8	1,48	IN
FA-03	717,9	473,8	377,7	515,6	607,8	473,8	1,28	IN
CA-03	732,4	483,4	384,6	524,6	662,1	483,4	1,37	IN
TA-03	726,4	479,4	381,8	521,0	614,1	479,4	1,28	IN
NA-03	729,7	481,6	383,4	523,0	604,6	481,6	1,26	IN
FA-04	718,5	474,2	625,7	627,0	630,1	625,7	1,01	IN
CA-04	717,2	473,4	624,8	626,0	661,1	624,8	1,06	IN
TA-04	727,6	480,2	632,5	633,7	605,5	632,5	0,96	IN
NA-04	728,9	481,1	633,4	634,7	590,7	633,4	0,93	IN
FA-05	692,8	457,2	366,5	487,7	561,3	457,2	1,23	IN
CA-05	687,7	453,9	364,0	484,6	605,2	453,9	1,33	IN
TA-05	692,8	457,2	366,5	487,7	574,1	457,2	1,26	IN
NA-05	701,8	463,2	370,9	493,3	584,3	463,2	1,26	IN
						MÉDIA	1,22	
						DP	0,23	
						CV	0,19	

Tabela 4.20 – Cargas e modos de ruptura previstos pelo Eurocode 2 (2004)

Lajes	$V_{R,max}$ (kN)	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,Asw}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_u$ (kN)	$V_{EC2}$ (kN)	$V_u / V_{EC2}$	Modo de Ruptura - Teórico
RS	1121,3	490,9	-	-	478,8	490,9	0,98	-
FA-01	1115,2	488,1	731,9	589,7	535,1	589,7	0,91	OUT
CA-01	1122,8	491,5	737,2	594,2	554,8	594,2	0,93	OUT
NA-01	1122,0	491,2	736,7	593,7	534,2	593,7	0,90	OUT
FA-02	586,4	382,2	443,2	462,9	499,9	443,2	1,13	IN
CA-02	596,8	389,2	451,6	472,1	611,1	451,6	1,35	IN
TA-02	582,7	379,7	440,3	459,7	469,3	440,3	1,07	IN
NA-02	593,2	386,7	448,7	468,9	496,6	448,7	1,11	IN
FA-03	1124,5	486,9	522,4	589,9	607,8	522,4	1,16	IN
CA-03	1141,4	494,5	530,7	599,8	662,1	530,7	1,25	IN
TA-03	1134,5	491,4	527,3	595,8	614,1	527,3	1,16	IN
NA-03	1138,3	493,1	529,2	598,0	604,6	529,2	1,14	IN
FA-04	1116,1	487,7	731,5	532,8	630,1	532,8	1,18	OUT
CA-04	1114,6	487,0	730,5	531,9	661,1	531,9	1,24	OUT
TA-04	1126,8	492,4	738,7	538,8	605,5	538,8	1,12	OUT
NA-04	1128,3	493,1	739,7	539,7	590,7	539,7	1,09	OUT
FA-05	1084,1	474,2	509,5	518,0	561,3	509,5	1,10	IN
CA-05	1078,1	471,5	506,5	514,6	605,2	506,5	1,19	IN
TA-05	1084,1	474,2	509,5	518,0	574,1	509,5	1,13	IN
NA-05	1094,7	479,0	514,7	524,0	584,3	514,7	1,14	IN
						MÉDIA	1,11	
						DP	0,12	
						CV	0,10	

Tabela 4.21 – Cargas e modos de ruptura previstos pelo *fib* Model Code 2010 (2013)

Lajes	$V_{R,max}$ (kN)	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,Asw}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_u$ (kN)	$V_{MC}$ (kN)	$V_u / V_{MC}$	Modo de Ruptura - Teórico
RS	663,8	420,8	-	-	478,8	420,8	1,14	-
FA-01	659,7	418,1	533,5	517,0	535,1	517,0	1,03	OUT
CA-01	665,0	421,5	535,3	522,4	554,8	522,4	1,06	OUT
NA-01	664,4	421,2	535,1	521,9	534,2	521,9	1,02	OUT
FA-02	512,6	319,9	393,6	396,6	499,9	393,6	1,27	IN
CA-02	524,2	327,1	398,3	408,1	611,1	398,3	1,53	IN
TA-02	508,7	317,4	392,0	392,6	469,3	392,0	1,20	IN
NA-02	520,2	324,6	396,6	404,1	496,6	396,6	1,25	IN
FA-03	644,4	409,5	499,3	505,8	607,8	499,3	1,22	IN
CA-03	656,0	416,9	504,4	517,5	662,1	504,4	1,31	IN
TA-03	651,2	414,0	502,3	512,7	614,1	502,3	1,22	IN
NA-03	653,9	415,6	503,5	515,4	604,6	503,5	1,20	IN
FA-04	654,5	415,2	770,7	513,0	630,1	499,7	1,26	OUT
CA-04	653,5	414,5	770,1	511,8	661,1	498,8	1,33	OUT
TA-04	661,9	420,0	774,8	520,5	605,5	471,9	1,28	OUT
NA-04	663,0	420,6	775,4	521,5	590,7	472,6	1,25	OUT
FA-05	628,9	399,2	488,6	489,9	561,3	481,9	1,16	IN
CA-05	624,7	396,6	486,8	485,7	605,2	477,8	1,27	OUT
TA-05	628,9	399,2	488,6	489,9	574,1	451,5	1,27	IN
NA-05	636,1	403,8	491,7	497,2	584,3	457,8	1,28	IN
						MÉDIA	1,23	
						DP	0,11	
						CV	0,09	

Na Figura 4.141 visualiza-se os gráficos gerados para cada norma com o intuito de analisar o grau de precisão e segurança. E na Tabela 4.22 à Tabela 4.25 os valores normativos em comparação com a carga última para cada grupo de laje incluindo, foi incluída a laje de referência nas tabelas, apenas para fins comparativos, porém ressalta-se que para o cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação ela foi excluída, deixando-se apenas as lajes de cada grupo.

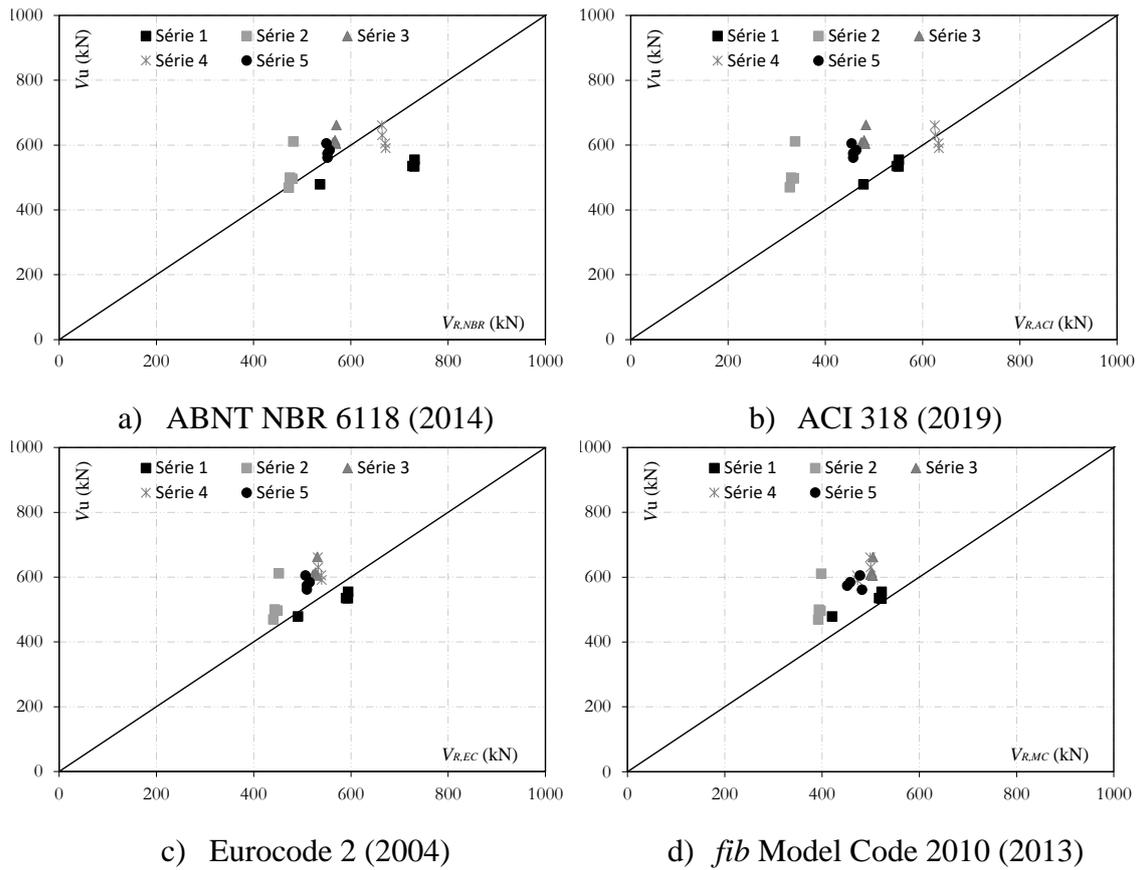


Figura 4.141 – Gráfico para análise das normas

Tabela 4.22 – Resultados normativos, lajes Grupo 1

Modelos	$V_u$ (kN)	ACI 318:2014	EUROCODE 2:2004	NBR 6118:2014	MODEL CODE 2010
		$V_u / V_{ACI}$	$V_u / V_{EC02}$	$V_u / V_{NBR}$	$V_u / V_{MC}$
RS	479	1,00	0,98	0,89	1,14
FA-01	535	0,98	0,91	0,74	1,03
FA-02	500	1,52	1,13	1,05	1,27
FA-03	608	1,28	1,16	1,08	1,22
FA-04	630	1,01	1,18	0,95	1,26
FA-05	561	1,23	1,10	1,02	1,16
	<b>MED</b>	1,20	1,10	0,97	1,19
	<b>DP</b>	0,22	0,11	0,14	0,10
	<b>CV</b>	0,18	0,10	0,14	0,08

Tabela 4.23 – Resultados normativos, lajes Grupo 2

Modelos	V <sub>u</sub> (kN)	ACI 318:2014	EUROCODE 2:2004	NBR 6118:2014	MODEL CODE 2010
		V <sub>u</sub> / V <sub>ACI</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>EC02</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>NBR</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>MC</sub>
RS	479	1,00	0,98	0,89	1,14
CA-01	555	1,01	0,93	0,76	1,06
CA-02	611	1,81	1,35	1,27	1,53
CA-03	662	1,37	1,25	1,16	1,31
CA-04	661	1,06	1,24	1,00	1,33
CA-05	605	1,33	1,19	0,00	1,27
	<b>MED</b>	1,32	1,19	0,84	1,30
	<b>DP</b>	0,32	0,16	0,51	0,17
	<b>CV</b>	0,24	0,13	0,60	0,13

Tabela 4.24 – Resultados normativos, lajes Grupo 3

Modelos	V <sub>u</sub> (kN)	ACI 318:2014	EUROCODE 2:2004	NBR 6118:2014	MODEL CODE 2010
		V <sub>u</sub> / V <sub>ACI</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>EC02</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>NBR</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>MC</sub>
RS	479	1,00	0,98	0,89	1,14
TA-02	469	1,44	1,07	0,99	1,20
TA-03	614	1,28	1,16	1,08	1,22
TA-04	606	0,96	1,12	0,90	1,28
TA-05	574	1,26	1,13	1,04	1,27
	<b>MED</b>	1,23	1,12	1,00	1,24
	<b>DP</b>	0,20	0,04	0,08	0,04
	<b>CV</b>	0,16	0,04	0,08	0,03

Tabela 4.25 – Resultados normativos, lajes Grupo 4

Modelos	V <sub>u</sub> (kN)	ACI 318:2014	EUROCODE 2:2004	NBR 6118:2014	MODEL CODE 2010
		V <sub>u</sub> / V <sub>ACI</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>EC02</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>NBR</sub>	V <sub>u</sub> / V <sub>MC</sub>
RS	479	1,00	0,98	0,89	1,14
NA-01	534	0,97	0,90	0,73	1,02
NA-02	497	1,48	1,11	1,04	1,25
NA-03	605	1,26	1,14	1,06	1,20
NA-04	591	0,93	1,09	0,88	1,25
NA-05	584	1,26	1,14	1,05	1,28
	<b>MED</b>	1,18	1,08	0,95	1,20
	<b>DP</b>	0,23	0,10	0,14	0,10
	<b>CV</b>	0,19	0,09	0,15	0,09

Observa-se que para a ABNT NBR 6118 (2014) quando analisadas apenas as lajes com ancoragem *total*, conforme preconiza a norma, o percentual médio da razão entre a carga última experimental e a carga teórica é 0,97, fato que mostra assertividade de norma. Para as lajes com ancoragem *parcial*, com a armadura de punção ancorada apenas na armadura de flexão comprimida, esse índice é de 1,06, média muito próxima para se comparadas com as lajes do grupo 1. Para as lajes com ancoragem *parcial*, com a armadura de punção ancorada apenas na armadura de flexão tracionada, o valor médio de  $V_w/V_{NBR}$  é igual a 1,00 indicando que a norma, nesse caso previu o comportamento das lajes de forma contundente. Como não houve grandes variações com relação às cargas últimas das lajes, para as lajes *sem* ancoragem o valor médio de  $V_w/V_{NBR}$  se manteve próximo de 1,00, com valor igual a 0,95.

O ACI 318 (2019) obteve os valores mais conservadores de carga para as lajes do presente estudo, com valores de 1,36, para as lajes com ancoragem *total*, 1,48, para as lajes com ancoragem *parcial* com as armaduras de punção envolvendo apenas as armaduras de flexão comprimidas, 1,42, para as lajes com ancoragem *parcial* com as armaduras de punção envolvendo apenas as armaduras de flexão tracionada e, 1,33 para as lajes *sem* ancoragem da armadura de punção na armadura de flexão. Tais valores trazem o que já era esperado, um grau de conservadorismo da norma.

O Eurocode 2 (2004) possui formulações semelhantes às da ABNT NBR 6118 (2014), com as diferenças conforme descrito no Capítulo 2, porém os resultados encontrados não foram tão semelhantes assim. Os resultados evidenciam que a norma é mais conservadora em comparação à norma brasileira, porém não tanto quanto à norma americana.

Assim como a norma americana, o *fib* Model Code 2010 (2013) apresenta um certo grau de conservadorismo, com valores de 1,19, para as lajes com ancoragem *total*, 1,30, para as lajes com ancoragem *parcial* com as armaduras de punção envolvendo apenas as armaduras de flexão comprimidas, 1,24, para as lajes com ancoragem *parcial* com as armaduras de punção envolvendo apenas as armaduras de flexão tracionada e, 1,20 para as lajes *sem* ancoragem da armadura de punção na armadura de flexão.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um fator que pode aumentar significativamente a capacidade resistente à punção é a utilização de armadura de cisalhamento, cuja escolha está relacionada principalmente à disponibilidade e praticidade de instalação local na região entorno dos pilares. Ressalta-se que sua eficiência, conforme prescrições normativas, pode estar diretamente ligada às condições de ancoragem à armadura de flexão. A variação dessa ancoragem em estribos, de acordo com os resultados apresentados neste trabalho, é capaz de elevar a resistência à punção, no entanto, ainda se faz necessário entender melhor os mecanismos de ancoragem deste tipo de armadura.

O sistema de ensaio e o mecanismo de carregamento utilizado nas séries de ensaio apresentaram resultados satisfatórios, porém para uma melhor aferição dos deslocamentos nos pontos das lajes sugere-se que os LVDTs sejam fixados sobre a laje (e não em um suporte apoiado no chão) para evitar as assimetrias geradas pelos movimentos de corpo rígido do sistema. De todo modo, o sistema adotado foi considerado adequado ao que era proposto.

Quanto as armaduras de cisalhamento, seu uso confere maior ductilidade às lajes, quando tem-se uma boa ancoragem da mesma. Ao se analisar os deslocamentos da laje de referência e das lajes sem *ancoragem*, constata-se um comportamento menos dúctil, com uma ruptura abrupta, sem apresentar nenhum patamar de deslocamento após a carga última. Já para as lajes com ancoragem *total* e com ancoragem *parcial em baixo* observa-se um comportamento mais dúctil na ruptura pois, o mecanismo de ativação da armadura de cisalhamento, no combate ao puncionamento da laje, ativa-se de baixo para cima (sentido da abertura do tronco de cone de ruptura) com isso a ancoragem na armadura de baixo das lajes se faz necessário. Verificou-se, ainda, que o uso de armadura de cisalhamento adotado propiciou acréscimo de carga última em relação a laje sem essa armadura, sendo que a laje com ancoragem apenas na parte de baixo obteve melhor resultado.

Quanto a variação do detalhamento de ancoragem dos estribos se mostrou aceitável para os resultados em análise, visto que a variação quanto a carga última não é considerável do ponto de vista de projeto, bem como os deslocamentos verticais e deformações. O uso

da armadura de cisalhamento sem ancoragem na armadura de flexão, para os modelos do presente estudo, se mostrou aceitável e uma boa alternativa construtiva se mostrando uma solução viável. Cabe ressaltar que as lajes tiveram melhores resultados quando os estribos envolveram as armaduras de flexão pelos cantos, dispensando o uso de porta estribos, com ancoragem *total* das armaduras, fato evidenciado pelas cargas últimas atingidas e por uma maior ativação das armaduras de flexão e deslocamentos totais (maior ductilidade).

## 5.2. ANÁLISE DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Nesse tópico são abordadas as conclusões a respeito da avaliação do desempenho das recomendações normativas e código modelo a seguir: ACI 318 (2019), ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004) e *fib* Model Code 2010 (2013). Avaliando-se suas previsões para ruptura dentro da região armada à punção com os resultados experimentais obtidos no Laboratório de Estruturas da UnB. Cabe destacar que nenhuma das normas analisadas levam em consideração a variação da ancoragem da armadura de cisalhamento na armadura de flexão, ou seja, são apresentados os valores obtidos a partir de simulações feitas das equações existentes para as condições de variação de ancoragem.

Para o ACI 318 (2019) e *fib* Model Code 2010 (2013) observa-se um conservadorismo maior devido as baixas taxas de armadura de cisalhamento. Enquanto a ABNT NBR 6118 (2014) apresentou resultados mais inseguros no geral (maior dispersão de resultados ao se comparar  $V_u$  e  $V_{NORMA}$ ).

Os modelos de cálculo ainda precisam ser refinados para uma melhor acertabilidade no quesito da determinação do modo de ruptura das lajes, principalmente quando as cargas últimas dentro da região de armadura de cisalhamento e fora dessa região são muito próximas.

Ao se entender melhor os mecanismos de resistência dos estribos como armadura de cisalhamento é importante ressaltar que para garantir as condições de ancoragem exigidas pelos códigos de projeto e métodos teóricos muitas vezes a execução da armadura de cisalhamento no canteiro de obras pode se tornar excessivamente complexa ou demorada.

### **5.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Objetivando compreender melhor a influência da ancoragem da armadura de cisalhamento na armadura de flexão para melhor desempenho das ligações laje-pilar, é de suma importância o estudo continuado com os seguintes objetivos/ações:

- Realizar ensaios adicionais variando-se a taxa de armadura de cisalhamento, para cada variação de ancoragem;
- Realizar ensaios adicionais com lajes de maior espessura, aumentando-se assim o comprimento da perna dos estribos para analisar melhor a formação do mecanismo gerado na ligação;
- Repetir as séries de ensaio porém com carregamento desbalanceado;
- Variar o tipo de armadura de cisalhamento para que se possa analisar a influência da ancoragem nos diferentes tipos de detalhamento (por exemplo com estribos abertos, armaduras do tipo pino, armaduras do tipo treliçada, etc.);
- Analisar os resultados experimentais encontrados nessa pesquisa com outros modelos desenvolvidos por outros autores, visando formar um banco de dados maior para melhor análise dos parâmetros estudados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318 – Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-14) and Commentary**. Farmington Hills, EUA, 2014.

ANDERSON, J. L. (1963). **Punching of Concrete Slabs with Shear Reinforcement**. Royal Institute of Technology, Bulletin N° 212, KTH Estocolmo. Suíça.

ANDRA H. P. e MATTHAEI, O. (2000) **Effectiveness of Punching Shear Reinforcement a Question of Rotational Capacity**. International Workshop on Punching Shear Capacity on RC Slabs, Proceedings, Stockholm, Sweden, pp. 163-170.

ANDRADE, M. A. S. **Punção em lajes cogumelo - Estudo do posicionamento da armadura de cisalhamento em relação à armadura de flexão**. 1999. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

ANDRADE, J. L. S. (2000). **Estudo Experimental da Inclinação de Estribos Abertos em Lajes Cogumelo de Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Pp 142.

ALBUQUERQUE, N. G. B. (2014). **Comportamento das Ligações de Lajes Lisas de Concreto Armado com Pilares de Borda Sujeitas a Excentricidades Interna e Externas**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-005A/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 204p.

ALBUQUERQUE, E. J. P. (2015). **Punção em Lajes Lisas com Armadura de Cisalhamento e Pilar de Canto Reentrante**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 002 A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 380 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892: Materiais metálicos - Ensaio de tração**. Rio de Janeiro, 2013.

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

BARTOLAC, M; DAMJANOVIĆ, D; DUVNJAK, I. Punching strength of flat slabs with and without shear reinforcement. **Gradevinar**, [s.l.], v. 67, n. 8, p.771-786, set. 2015.

BEUTEL, R.; HEGGER, J. The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 24, n. 6, p.539-549, dez. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00070-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00070-1).

BORGES, L. L. J. **Comportamento ao puncionamento de lajes cogumelo de concreto armado com pilares retangulares e furos de grandes dimensões** [Distrito Federal] 2004. xxiv, 367p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2004). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

CALDENTEY, A. P. et al. Influence of stirrup detailing on punching shear strength of flat slabs. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 49, p.855-865, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.12.032>.

CARVALHO, A. L. **Punção em lajes cogumelo de concreto protendido com cabos não-aderentes e armadura de cisalhamento** [Distrito Federal] 2005. xxiv, 423p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2005). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

CHANA, P. S. (1993). A Prefabricated Shear Reinforcement System for Flat Slabs. Proc. **Instn. Civil Engineering Structural & Buildings**. Vol. 99, pp 345-358.

COMITÊ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990**. Design code. London, Thomas Telford, 1993

CORDOVIL, F. A. B. **Lajes de concreto armado - punção**. Santa Catarina: UFSC, 1997. 221 p.

EOM, T. et al. Punching Shear Tests of Slabs with High-Strength Continuous Hoop Reinforcement. **ACI Structural Journal**, [s.l.], v. 115, n. 5, p.1295-1305, setembro 2018. American Concrete Institute.

ELSTER e HOGNESTAD (1956). Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs. **ACI Journal, Proceedings**. Vol. 53, Nº 1 Julho.

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

EINPAUL, J.; BUJNAK, J.; Fernández Ruiz M.; Muttoni, A. Study on Influence of Column Size and Slab Slenderness on Punching Strength. **ACI Structural Journal**. V. 113, Farmington Hills, USA, 2016, pp. 135-145.

ERX ENGENHARIA. **Portfolio**. Disponível em: <<https://www.ernx.eng.br/portiflio>>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2019.

EUROPEAN STANDARD. **Corrigendum AC – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels. European Committee for Standardization, 2010.

EUROPEAN STANDARD. **Draft BS – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels. European Committee for Standardization, 2014.

*fib* MODEL CODE 2010. **Model Code 2010: Model code for concrete structures 2010**. Lausanne: Special Activity Group 5, 2013. 390 p.

FERREIRA, M. P. **Punção em lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento e momentos desbalanceados**. 2010. 275 f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

FERREIRA, M. P. et al. One-way shear resistance of rc members with unconnected stirrups. **Latin American Journal of Solids And Structures**, [s.l.], v. 13, n. 15, p.2970-2990, dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78252872>.

FURCHE, J.; BAUERMEISTER, U. Highly effective punching shear reinforcement for semi precast slabs. **Concrete Innovation Conference**, Oslo, p.1-10, jun. 2014.

GRAF, O. Versuche über die Widerstandsfähigkeit von allseitig aufliegenden dicken Eisenbetonplatten unter Einzellasten. **Deutscher Ausschuß für Eisenbeton**, Heft 88, Berlin, Alemanha, 1938. 22p.

GOMES, R. B. e ANDRADE, M. A. S. (2000). Does a punching shear reinforcement need to embrace a flexural reinforcement of a RC flat slab, **International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs**, KTH Stockholm, June, Proceedings pp109-117.

GOMES, R. B. **Punching resistance of reinforced concrete flat slabs with shear reinforcement**. 1991, 185p. Polytechnic of Central London, M.Phil. PhD Thesis, London, 1991.

GOMES, H. Pontes. (2010). **Puncionamento Em Lajes Lisas Protendidas Com Pilares De Extremidade E Momentos Desbalanceados Nas Duas Direções**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD? – 001 A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 309 p.

GUANDALINI, Stefano; BURDET, Olivier L.; MUTTONI, Aurelio. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios. **ACI Structural Journal**, [s. L.], v. 1, n. 106, p.87-85, jun. 2009.

HEGGER, J. et al. Efficiency of various punching shear reinforcement systems for flat slabs. **ACI Structural Journal**, [s.l.], v. 114, n. 3, p.631-642, maio 2017. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51689434.v>

HASSAN, J. et al. Pilot Experimental Tests on Punching Shear Strength of Flat Plates Reinforced with Stirrups Punching Shear Reinforcement. **Journal of Materials and Engineering Structures**, n. 3, p.3-10, 2017.

INÁCIO, M. M. G. et al. Punching of high strength concrete flat slabs without shear reinforcement. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 103, p.275-284, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.010>.

KOPPITZ, R. KENEL, A. KELLER, T. Effect of punching shear on load–deformation behavior of flat slabs. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 103, p.444-457, sep. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.023>.

LEONHARDT, F. MONNIG, E. **Construções de concreto: Casos especiais de dimensionamento de estruturas de concreto armado**. 2. ed. Interciência, 1979.

LIMA NETO, A. F., 2012. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Capitéis**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD. – 003 A/12 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 167p.

LIPS, S., RUIZ, M. F. e MUTTONI, A. (2012). Experimental Investigation on the Punching Strength and the Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs. **ACI Structural Journal**. Vol. 109. Nº 6. Pp. 889-899.

MABROUK, R. T. S; BAKR, A.; ABDALLA, H. Effect of flexural and shear reinforcement on the punching behavior of reinforced concrete flat slabs. **Alexandria Engineering Journal**, [s.l.], v. 56, n. 4, p.591-599, dez. 2017. Elsevier BV.

MARZOUK, H.; HUSSEIN, A. Experimental Investigation on the Behavior of High-Strength Concrete Slabs. **ACI Structural Journal**, v. 88, n. 6. 1991.

MELO, G.; COELHO, A. E. G. e OLIVEIRA, D. R. C. (2000), RC flat slabs with inclined stirrups as shear reinforcement. **International Workshop of Punching Shear Capacity of RC Slabs**, KTH, Stockholm, June, Proceedings pp 155-162.

MELGES, J. L. P. **Punção em lajes: exemplos de cálculo e análise teórico-experimental**. 1995. 252 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

MOE, J. Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads. **Bulletin D47**. Portland Cement Association, 1961.

MORAES NETO, B.N. (2013). **Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-001A/13 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 343 p.

MUTTONI, A. Punching shear strength of reinforced concrete flat slabs without transverse reinforcement. **ACI Structural Journal**, v. 105, n. ° 4, p. 440-450, agosto, 2008.

NICÁCIO, W. G. **Comportamento à punção de lajes de concreto armado tipo BubbleDeck** [Distrito Federal] 2018. xxii, 175p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2018). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

OLIVEIRA, M. H. **Punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento submetidas a carregamento excêntrico e apoiadas sobre pilares retangulares**. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

OLIVEIRA, D. R. C. **Análise experimental de lajes cogumelo de concreto armado com pilares retangulares** [Distrito Federal] 2003. xxiv, 214p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2003). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

PARK, R.; GAMBE, W. L. **Reinforced concrete slabs**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

PARK, H. et al. Lattice shear reinforcement for slab-column connections. **ACI Structural Journal**, [s. L.], v. 104, n. 4, p.294-303, jun. 2007.

PEREIRA FILHO, M. J. M. **Avaliação dos métodos normativos para previsão da resistência à punção de lajes sem armadura de cisalhamento e com conectores de Aço**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

RICHART, F. E. Reinforced Concrete Wall and Column Footings. **ACI Journal, Proceedings**. v. 45. n. 10. 1948.

REGAN, P. E. **Behaviour of reinforced concrete flat slabs**. Construction Industry Research and Information Association, 1981.

REGAN, P.E Shear combs, reinforcement against punching. **The Structural Engineer**, [s. L.], v. 63, p.76-84, dez. 1985.

REGAN, P. E. Symmetric punching of reinforced concrete slabs. **Magazine of Concrete Research**, [s.l.], v. 38, n. 136, p.115-128, set. 1986. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/mac.1986.38.136.115>.

REGAN, P. E. Shear reinforcement of flat slabs. **International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs**. Stockholm, p. 99-107. 2000.

REGAN, P. E.; SAMADIAN, F. Shear reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs. **The Structural Engineer**, [s. L.], v. 79, n. 10, p.24-31, 15 maio 2001

SAGASETA, J.; RUIZ, M. F.; MUTTONI, A. **Non-symmetrical punching of flat slabs and slab bridges without transverse reinforcement**. 2009.

SACRAMENTO, P. V. P. et al. Punching strength of reinforced concrete flat slabs without shear reinforcement. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 5, n. 5, p.659-691, out. 2012. FapUNIFESP (SciELO).

SANTOS, E. V. **Análise experimental da punção em lajes lisas de concreto armado com sistema construtivo *Bubbledeck***. 2016. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SANTOS, G. S. (2014). **Aplicação de Mantas de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) como Reforço à Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-002A/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 191p.

SILVA, R. J. C. **Punção em lajes cogumelo protendidas com cordoalhas não aderentes e pilares de diferentes dimensões** [Distrito Federal] 2005. xxiv, 223p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2005). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

SUBRAMANIAN. Alternative punching shear reinforcement for RC Flat Slabs. **The Indian Concrete Journal**, [s. l.], p.33-44, jan. 2014.

TAPAJÓS, L. S. **Cisalhamento em elementos de concreto armado com estribos desconectados**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2017.

TALBOT, A. N. **Reinforced concrete wall footings and column footings**, n. 67, University of Illinois, Engineering Experiment Station, 1913, 114 p.

TASSINARI, L., **Asymmetric punching of R/C slabs with shear reinforcement (in French: Poinçonnement asymétrique des dalles en béton armé avec armature de poinçonnement)**, Thèse EPFL No. 5030, Lausanne, Switzerland, 2011, p. 197.

TRAUTWEIN, L. M. (2001). **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento tipo “Stud” Interno e Tipo Estribo Inclinado**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Pp 185.

TRAUTWEIN, L. M. **Punção em lajes cogumelo de concreto armado: Análise experimental e numérica**. 2006. 350 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TRAUTWEIN, L. M. et al. Punching strength of flat slabs with unbraced shear reinforcement. **ACI Structural Journal: Technical Paper**. [s. l.], p. 197-205. 3 jan. 2011.

VILLAVERDE, B.V. (2008). **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Protendido com Cabos Não-Aderentes na Ligação Laje-Pilar de Borda**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-001/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 378 p.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete: Mechanics and Design**. 6. ed. [s. L.]: Pearson, 2012. 1177 p.

YAMADA, T.; NANNI, A.; ENDO, K. Punching shear resistance of flat slabs: influence of reinforcement type and ratio. **ACI Structural Journal**, [s.l.], v. 88, n. 4, p.555-563, ago. 1993.