



**ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO EM LAJES TIPO *BUBBLEDECK*  
COM ARMADURA DE CISALHAMENTO**

**Manuel Alejandro Ceballos**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO EM LAJES TIPO  
*BUBBLEDECK* COM ARMADURA DE CISALHAMENTO**

**Manuel Alejandro Ceballos**

**ORIENTADOR: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo**

**CO-ORIENTADOR: Marcos Honorato de Oliveira**

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

**PUBLICAÇÃO: E. DM -14A/17**

**BRASÍLIA/DF: ABRIL - 2017.**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO EM LAJES TIPO  
*BUBBLEDECK* COM ARMADURA DE CISALHAMENTO**

**MANUEL ALEJANDRO CEBALLOS**

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

**APROVADO POR:**

---

**Prof. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, Ph.D (UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Marcos Honorato de Oliveira, D.Sc (UnB)  
(Co-orientador)**

---

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

---

**Galileu Silva Santos, D.Sc (UnB)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, ABRIL DE 2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CEBALLOS, MANUEL ALEJANDRO

Análise experimental à punção em lajes tipo *Bubbledeck* com armadura de cisalhamento [Brasília, Distrito Federal] 2017.

xxi, 104 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2017).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Punção

2.Laje tipo *Bubbledeck*

I.ENC/FT/UnB

4.Armadura de cisalhamento

3.Laje Lisa

II.Título (Mestre)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CEBALLOS, M. A (2017). Análise experimental à punção em lajes tipo *Bubbledeck* com armadura de cisalhamento. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM - 14A/17 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Manuel Alejandro Ceballos.

TÍTULO: Análise experimental à punção em lajes tipo *Bubbledeck* com armadura de cisalhamento.

GRAU: Mestre

ANO: 2017

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

---

Manuel Alejandro Ceballos  
SQN 406 Bloco A Apt. 301  
70847-010 Brasília – DF – Brasil.  
m.alejandroczbz@gmail.com



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que todos os dias da minha vida me deu forças para nunca desistir e continuar lutando por meus sonhos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo e ao meu co-orientador Dr. Marcos Honorato de Oliveira, por seu apoio e a sua dedicação nas revisões e sugestões, fatores fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos grandes amigos feitos durante todo este processo, Izabel Castro, Calebe Araújo Azevedo, Fernando Hipolito, Max Douglas Silva, Magno Ernesto Calvacante, Wanderley Nicacio, Wallison Barbosa, Carlos Arturo Moreno, Fellipe Sobreira, Hamilton Costa, que fizeram parte fundamental no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos que, mesmo não estando presentes durante a execução do programa experimental, fizeram parte da minha vida em Brasília, tornando meus dias nesta cidade mais agradáveis: Dyaloisio Fonteles, Samara Pimentel, Gabriel Martins, Jéssica Borges, Nicolas Roa, Carlos Eduardo Monte, Denise Cardoso, Iago Freitas, Manoel Mangabeira.

A CAPES, pelo apoio financeiro, a Bubbledeck Brasil por acreditar e financiar parte de nossa pesquisa.

A todos os professores do mestrado que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Aos familiares e amigos (novos e antigos) que sempre me incentivaram e apoiaram nessa jornada. Especialmente a minha mãe Nohra Ceballos, que sempre esteve comigo nos momentos que mais precisei, a Esmeralda Hoyos e Yolima Fernandez, pelo imenso carinho recebido, muito obrigado.

# ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO EM LAJES TIPO BUBBLEDECK COM ARMADURA DE CISALHAMENTO.

**Autor:** Manuel Alejandro Ceballos

**Orientador:** Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

**Programa de Pós-graduação em Estrutura e Construção Civil**

**Brasília, abril de 2017**

## RESUMO

Esta pesquisa avalia o comportamento experimental à punção da ligação laje pilar interno numa edificação submetida a carregamento simétrico usando lajes *Bubbledeck* reforçadas ao cisalhamento mediante utilização de Pinos (*Studs*) e treliças entre as nervuras.

As seis lajes ensaiadas (cinco lajes do tipo *Bubbledeck* e uma laje maciça), foram confeccionadas no laboratório de estruturas da UnB e apresentaram as seguintes características: lajes com lados de 2500 x 2500 mm e com espessura de 280 mm, moldadas com concreto de resistência em torno de 33 MPa, e apoiadas em segmentos de pilar de seção circular com 300 mm de diâmetro e mesma taxa de armadura.

Os parâmetros medidos no desenvolvimento deste programa experimental foram, os deslocamentos verticais, deformações na superfície do concreto, deformações na armadura de flexão e cisalhamento (pinos e treliças), além da inspeção visual do modo de ruptura e a fissuração de cada laje, os quais foram comparados e analisados com os métodos teóricos estabelecidos nas seguintes Normas: ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004), NBR 6118 (2014) e fib MC2010 (2010). Tudo isto permitiu estudar a influência de parâmetros como: o uso de armadura de cisalhamento nas nervuras (treliças), e o uso de armadura de cisalhamento (*studs*) na resistência à punção da ligação laje-pilar.

Já que nenhuma dessas normas considera os vazios deixados pelas esferas no cálculo da resistência à punção em lajes *Bubbledeck*, foi proposta uma adaptação na determinação da área de concreto a ser considerada na seção do perímetro crítico. Verificou-se que as adaptações feitas no fib MC2010 (2010) apresentaram os valores de carga última de punção mais próximos dos resultados experimentais, e que o uso de treliças de 60° ou 45° geraram um incremento na resistência das lajes testadas ao serem comparadas com a laje *Bubbledeck* de referência.

**Palavras chave:** Punção, Lajes *Bubbledeck*, Laje lisa, Armadura de cisalhamento.

# **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PUNCHING SHEAR IN BUBBLEDECK SLABS WITH SHEAR REINFORCEMENT.**

**Author: Manuel Alejandro Ceballos**

**Supervisor: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo**

**Programa de Pós-graduação em Estrutura e Construção Civil**

**Brasília, April 2017**

## **ABSTRACT**

This paper evaluates the experimental behavior of punching shear correspond to interior column/slab connection of a building subject to symmetrical loading, using Bubbledeck slabs, reinforced to shear using Studs and trusses between the ribs.

The six slabs tested (five Bubbledeck-type slabs and one massive slab) were made in the UnB structures laboratory and had the following properties: slabs with sides of 2500 x 2500 mm and 280 mm thick, molded with resistance concrete around 33 MPa, and supported on circular column with 300 mm diameter and same flexural reinforcement ratio .

The parameters measured in the development of this experimental program included: vertical displacements, deformations on the concrete surface, deformations in the flexural reinforcement and deformations in shear reinforcement (studs and trusses), cracking and rupture mode of each slab, which were compared and analyzed with the theoretical methods established in the following Standards: ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004), NBR 6118 (2014) and fib MC2010 (2010). This allowed the opportunity to study the influence of parameters such as: the use of shear reinforcement in the ribs (trusses), and the use of shear reinforcement, in the punching shear resistance of the column/slab connection.

Given that none of these norms considers the voids left by the spheres in the calculation of the punching shear resistance in Bubbledeck slabs, an adjustment was proposed in the determination of the concrete area to be considered in the critical perimeter section. It was found that the use of 60° or 45 ° trusses generated an increase in the resistance of the slabs tested when compared to the reference Bubbledeck slab, and that while the modified standards were estimated, fib MC2010 (2010) showed the highest values the experimental results.

**Keywords:** Punching Shear, Bubbledeck slabs, flat slab , Shear reinforcement.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES</b>	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	1
1.2 MOTIVAÇÃO . . . . .	3
1.3 OBJETIVOS . . . . .	4
1.3.1 Objetivo geral . . . . .	4
1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .	4
1.4 METODOLOGIA . . . . .	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1 PUNÇÃO . . . . .	5
2.2 SISTEMA CONSTRUTIVO DE LAJE <i>BUBBLEDECK</i> . . . . .	8
2.2.1 Sistema com Pré-lajes . . . . .	8
2.2.2 Sistema com módulo reforçado . . . . .	8
2.2.3 Sistema de painéis acabados . . . . .	9
2.3 PESQUISAS SOBRE LAJES TIPO <i>BUBBLEDECK</i> . . . . .	10
2.3.1 Pesquisa realizada por Held (2002) . . . . .	10
2.3.2 Pesquisa realizada por Souza (2007) . . . . .	12
2.3.3 Pesquisa realizada por Aldejohann (2008) . . . . .	13
2.3.4 Pesquisa realizada por Lai (2010) . . . . .	14
2.3.5 Pesquisa realizada por Lima (2015) . . . . .	15
2.3.6 Pesquisa realizada por Ledo (2016) . . . . .	18
2.4 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS . . . . .	19
2.4.1 <i>ACI 318</i> (2014) . . . . .	20
2.4.2 <i>EUROCODE 2</i> (2004) . . . . .	21
2.4.3 <i>NBR 6118</i> (2014) . . . . .	23
2.4.4 <i>fib MC2010</i> (2010) . . . . .	25
2.5 RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES . . . . .	27
2.6 CÁLCULO DA ALTURA ÚTIL E DA TAXA DE ARMADURA DE FLEXÃO EM LAJES <i>Bubbledeck</i> . . . . .	29
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>

3.1	CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS . . . . .	32
3.2	DETALHAMENTO DAS ARMADURAS . . . . .	35
3.2.1	Armadura de flexão . . . . .	35
3.2.2	Armadura dos pilares . . . . .	36
3.2.3	Armaduras de cisalhamento . . . . .	37
3.2.4	Treliças . . . . .	38
3.3	INSTRUMENTAÇÃO . . . . .	41
3.3.1	Deslocamentos verticais . . . . .	41
3.3.2	Deformações na armadura de flexão . . . . .	43
3.3.3	Deformações na armadura de cisalhamento . . . . .	44
3.3.4	Deformações no concreto . . . . .	50
3.4	FABRICAÇÃO DOS MODELOS LOCAIS . . . . .	51
3.4.1	Formas . . . . .	51
3.4.2	Concretagem . . . . .	51
3.5	SISTEMA DE ENSAIO . . . . .	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>54</b>
4.1	PROPRIEDADE DOS MATERIAIS . . . . .	54
4.1.1	Concreto . . . . .	54
4.1.2	Aço . . . . .	56
4.2	DESLOCAMENTOS VERTICAIS . . . . .	57
4.3	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO . . . . .	62
4.4	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO . . . . .	66
4.5	DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO . . . . .	74
4.6	MAPA DE FISSURAÇÃO . . . . .	77
4.7	CARGAS ULTIMAS E MODOS DE RUPTURAS . . . . .	82
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>84</b>
5.1	COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DOS MODELOS . . . . .	86
5.1.1	Grupo 1: Modelos RSP-A01 e BD-A01 . . . . .	86
5.1.2	Grupo 2: Modelos BD-A02 e BD-A03 . . . . .	87
5.1.3	Grupo 3: Modelos BD-A04 e BD-A05 . . . . .	88
5.1.4	Grupo 4: Modelos BD-A02 e BD-A04 . . . . .	88
5.1.5	Grupo 5: Modelos BD-A03 e BD-A05 . . . . .	89
5.1.6	Grupo 6: Modelos BD-A01, BD-A02, e BD-A03 . . . . .	90
5.1.7	Grupo 7: Modelos BD-A01, BD-A04, e BD-A05 . . . . .	91
5.2	ADAPTAÇÃO ÀS NORMAS VIGENTES PARA O CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DE PUNÇÃO PARA LAJES <i>BUBBLEDECK</i> . . . . .	91

5.3	COMPARAÇÕES DAS CARGAS DE RUPTURA EXPERIMENTAIS COM AS CARGAS DE RUPTURA ESTIMADAS PELAS ADAPTAÇÕES FEITAS NAS NORMAS . . . . .	94
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>100</b>
6.1	DESLOCAMENTOS VERTICAIS . . . . .	100
6.2	DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO . . . . .	100
6.3	DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE CISALHAMENTO ( <i>STUDS</i> ) . . . . .	100
6.4	DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE CISALHAMENTO (TRELIÇAS) . . . . .	100
6.5	DEFORMAÇÕES NO CONCRETO . . . . .	101
6.6	MAPAS DE FISURAÇÃO . . . . .	101
6.7	CARGAS DE RUPTURA . . . . .	101
6.8	ESTIMATIVAS DAS NORMAS MODIFICADAS . . . . .	101
6.9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	101
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>104</b>

## LISTA DE TABELAS

2.1	Modelos ensaiados por Held (2002) . . . . .	10
2.2	Principais características das lajes ensaiadas por Souza (2007) . . . . .	12
2.3	resposta estática da laje de escritório, Lai (2010) . . . . .	14
2.4	Comparação das respostas dinâmicas obtidas, Lai (2010) . . . . .	15
2.5	Descrição das lajes ensaiadas à punção, Lima (2015) . . . . .	15
2.6	Cargas de ruptura, Lima (2015) . . . . .	17
2.7	Descrição de lajes ensaiadas a punção , Ledo (2016) . . . . .	18
3.1	Características das lajes ensaiadas . . . . .	33
4.1	Propriedades mecânicas do concreto, concretagem 04 novembro do 2016 (lajes BD-A01 e a BD-A04) . . . . .	55
4.2	Propriedades mecânicas do concreto, concretagem 06 de dezembro do 2016 (lajes BD-A02, BD-A03, BD-A05 e a laje RSP-A01) . . . . .	56
4.3	Propriedades do aço empregado . . . . .	57
4.4	Características das lajes ensaiadas . . . . .	65
4.5	Modos de ruptura das lajes . . . . .	83
5.1	Grupos e parâmetros analisados . . . . .	84
5.2	Critérios de avaliação . . . . .	94
5.3	Principais parâmetros de cálculo da carga última à punção . . . . .	94
5.4	Cargas últimas de punção pelo <i>ACI 318</i> (2014) para todos os Modelos . . . . .	95
5.5	Cargas últimas de punção pelo <i>EUROCODE 2</i> (2004) para todos os Modelos . . . . .	96
5.6	Cargas últimas de punção pelo <i>NBR 6118</i> (2014) para todos os Modelos . . . . .	97
5.7	Cargas últimas de punção pelo <i>fib MC2010</i> (2010), usando o nível II para todos os Modelos . . . . .	97
5.8	Cargas últimas de punção pelo <i>fib MC2010</i> (2010), usando o nível III para todos os Modelos . . . . .	98

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Laje tipo <i>Bubbledeck</i> ( <i>Bubbledeck International</i> , 2016.) . . . . .	2
1.2	Colapso parcial do edifício <i>Pipers Row Car Park</i> , Lima (2015) . . . . .	3
2.1	Ruptura por punção, <i>CEB-FIP model code 1990</i> (1993) . . . . .	5
2.2	Tipos de lajes lisas, Lima (2015) . . . . .	6
2.3	Tipos de armaduras de cisalhamento, Ferreira (2010) . . . . .	7
2.4	Tipos de arranjos para armadura de cisalhamento, Ferreira (2010) . . . . .	7
2.5	Laje tipo <i>Bubbledeck</i> com pré-laje, <i>Bubbledeck Brasil</i> (2016) . . . . .	8
2.6	Laje tipo <i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado, <i>Bubbledeck Paraguai</i> (2016) . . . . .	9
2.7	Laje <i>Bubbledeck</i> tipo painel acabado, <i>Bubbledeck Brasil</i> (2016) . . . . .	9
2.8	Dimensões das lajes ensaiadas, Held (2002) . . . . .	10
2.9	Padrão de fissuração, seção transversal Held (2002) . . . . .	11
2.10	Diagrama carga-deflexão experimental e computacional, Held (2002) . . . . .	11
2.11	Padrão de fissuração computacional e Experimental, Held (2002) . . . . .	11
2.12	Dimensões das lajes ensaiadas, Souza (2007) . . . . .	12
2.13	Caraterísticas da seção proposta por Aldejohann (2008) . . . . .	13
2.14	Dimensões das lajes ensaiadas, Lima (2015) . . . . .	16
2.15	Arranjo armadura de cisalhamento laje BD28 – P3, Lima (2015) . . . . .	16
2.16	Comparação entre a carga última experimental e a estimada pelas normas, Lima (2015) . . . . .	18
2.17	Posição do perímetro de controle $b_0$ , <i>ACI 318</i> (2014) . . . . .	20
2.18	Posição do perímetro de controle $b_{out}$ , <i>ACI 318</i> (2014) . . . . .	21
2.19	Posição do perímetro de controle $u_1$ , <i>EUROCODE 2</i> (2004) . . . . .	22
2.20	Posição do perímetro de controle $u_{out}$ , <i>EUROCODE 2</i> (2004) . . . . .	23
2.21	Posição do perímetro de controle $u_1$ , <i>NBR 6118</i> (2014) . . . . .	24
2.22	Posição do perímetro de controle $u_{out}$ , <i>NBR 6118</i> (2014) . . . . .	24
2.23	Altura efetiva da laje $d_v$ , <i>fib MC2010</i> (2010) . . . . .	25
2.24	Armadura de cisalhamento ativada na ruptura, <i>fib MC2010</i> (2010) . . . . .	27
2.25	Perímetro $b_{out}$ , <i>fib MC2010</i> (2010) . . . . .	27
2.26	Mecanismo de Ruptura para os modelos ensaiados, Guandalini (2009) . . . . .	28
2.27	Cálculo da altura útil (d), em lajes <i>Bubbledeck</i> . . . . .	29
2.28	Cálculo da taxa de armadura de flexão ( $\rho$ ), em lajes <i>Bubbledeck</i> . . . . .	30
3.1	Situação da laje estudada ,Lima (2015) . . . . .	32
3.2	Dimensões das lajes ensaiadas, medidas em mm . . . . .	33
3.3	Dimensões das lajes ensaiadas (continuação), medidas em mm . . . . .	34



3.4	Dimensões das lajes ensaiadas (continuação) , medidas em mm . . . . .	34
3.5	Detalhe da armadura de flexão, medidas em mm . . . . .	35
3.6	Detalhe da armadura de flexão, seção transversal, medidas em mm . . . . .	35
3.7	Armadura de flexão laje RSP-A01 . . . . .	36
3.8	Detalhe armadura dos pilares, medidas em mm . . . . .	36
3.9	Armadura dos pilares . . . . .	36
3.10	Arranjo armadura de cisalhamento, medidas em mm . . . . .	37
3.11	Detalhamento <i>Studs</i> das lajes RSP-A01, BD-A01, BD-A02, e BD-A03, medidas em mm . . . . .	37
3.12	Armadura de cisalhamento ( <i>studs</i> ) . . . . .	38
3.13	Tipos de treliças usadas, medidas em mm . . . . .	38
3.14	Fabricação de treliças no laboratório de estruturas da UnB . . . . .	39
3.15	Detalhamento treliças com inclinação de 60°, medidas em mm . . . . .	39
3.16	Detalhamento treliças com inclinação de 45°, medidas em mm . . . . .	39
3.17	Distribuição das treliças nas lajes BD-A02, e BD-A03 . . . . .	40
3.18	Distribuição das treliças nas lajes BD-A04, e BD-A05 . . . . .	41
3.19	Detalhe do posicionamento dos LVDT's, medidas em mm . . . . .	42
3.20	Posicionamento dos LVDT's na superfície superior das lajes . . . . .	42
3.21	Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão, medidas em mm . . . . .	43
3.22	Sequência de fixação do extensômetro na barra . . . . .	44
3.23	Armadura de flexão . . . . .	44
3.24	Instrumentação dos <i>studs</i> , medidas em mm . . . . .	44
3.25	Armaduras de cisalhamento instrumentadas . . . . .	44
3.26	Detalhe posicionamento extensômetros na armadura de cisalhamento na região maciça, lajes RSP-A01, BD-A01, BDA-02, e BDA-03 . . . . .	45
3.27	Armaduras de cisalhamento instrumentadas . . . . .	45
3.28	Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A02 . . . . .	46
3.29	Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A03 . . . . .	47
3.30	Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A04 . . . . .	48
3.31	Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A05 . . . . .	49
3.32	Posicionamentos dos extensômetros no concreto . . . . .	50
3.33	Instrumentação concreto, medidas em mm . . . . .	50
3.34	Formas metálicas usadas na concretagem das lajes . . . . .	51
3.35	Etapas da concretagem e cura das lajes . . . . .	52
3.36	Sistema de ensaio, Pórtico de Reação . . . . .	53
3.37	Sistema de aquisição de dados . . . . .	53
4.1	Ensaio de compressão . . . . .	54
4.2	Ensaio de tração por compressão diametral . . . . .	55

4.3	Ensaio de módulo de elasticidade . . . . .	55
4.4	Ensaio de tração do aço . . . . .	56
4.5	Deslocamentos verticais na direção L-O da laje RSP-A01 . . . . .	57
4.6	Deslocamentos verticais na direção S-N da laje RSP-A01 . . . . .	57
4.7	Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A01 . . . . .	58
4.8	Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A01 . . . . .	58
4.9	Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A02 . . . . .	58
4.10	Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A02 . . . . .	59
4.11	Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A03 . . . . .	59
4.12	Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A03 . . . . .	59
4.13	Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A04 . . . . .	60
4.14	Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A04 . . . . .	60
4.15	Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A05 . . . . .	60
4.16	Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A05 . . . . .	61
4.17	Comparação dos deslocamentos verticais médios para todas as lajes . . . . .	61
4.18	Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP-A01 . . . . .	63
4.19	Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A01 . . . . .	63
4.20	Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A02 . . . . .	63
4.21	Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A03 . . . . .	64
4.22	Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A04 . . . . .	64
4.23	Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A05 . . . . .	64
4.24	Deformações da armadura de cisalhamento ( <i>Studs</i> ) na laje BD-A01 . . . . .	66
4.25	Deformações da armadura de cisalhamento ( <i>Studs</i> ) na laje BD-A02 . . . . .	66
4.26	Deformações da armadura de cisalhamento ( <i>Studs</i> ) na laje BD-A03 . . . . .	67
4.27	Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A02 . . . . .	67
4.28	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção A-A	68
4.29	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção B-B	68
4.30	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção C-C	68
4.31	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção D-D	69
4.32	Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A03 . . . . .	69
4.33	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção A-A	69
4.34	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção B-B	70
4.35	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção C-C	70
4.36	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção D-D	70
4.37	Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A04 . . . . .	71
4.38	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção A-A	71
4.39	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção B-B	71
4.40	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção C-C	72
4.41	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção D-D	72

4.42	Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A05 . . . . .	72
4.43	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção A-A	73
4.44	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção B-B	73
4.45	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção C-C	73
4.46	Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção D-D	74
4.47	Deformações na superfície do concreto da laje RSP-A01 . . . . .	75
4.48	Deformações na superfície do concreto da laje BD-A01 . . . . .	75
4.49	Deformações na superfície do concreto da laje BD-A02 . . . . .	75
4.50	Deformações na superfície do concreto da laje BD-A03 . . . . .	76
4.51	Deformações na superfície do concreto da laje BD-A04 . . . . .	76
4.52	Deformações na superfície do concreto da laje BD-A05 . . . . .	76
4.53	Mapa de fissuração - Laje RSP-A01 . . . . .	77
4.54	Vista inferior depois da ruptura – Laje RSP-A01 . . . . .	78
4.55	Mapa de fissuração - Laje BD-A01 . . . . .	78
4.56	Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A01 . . . . .	78
4.57	Mapa de fissuração - Laje BD-A02 . . . . .	79
4.58	Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A02 . . . . .	79
4.59	Mapa de fissuração - Laje BD-A03 . . . . .	79
4.60	Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A03 . . . . .	80
4.61	Mapa de fissuração - Laje BD-A04 . . . . .	80
4.62	Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A04 . . . . .	80
4.63	Mapa de fissuração - Laje BD-A05 . . . . .	81
4.64	Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A05 . . . . .	81
5.1	Resumo das características dos modelos . . . . .	85
5.2	Perímetros de controle na laje BD-A02 . . . . .	92
5.3	Relação carga última experimental, $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no <i>ACI 318</i> (2014) . . . . .	96
5.4	Relação carga última experimental, $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no <i>EUROCODE 2</i> (2004) . . . . .	96
5.5	Relação carga última experimental, $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no <i>NBR 6118</i> (2014) . . . . .	97
5.6	Relação carga última experimental, $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no <i>fib MC2010</i> (2010) . . . . .	98
5.7	Relação carga última experimental, $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no <i>fib MC2010</i> (2010) . . . . .	98

# LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

## Abreviaturas

EC	Extensômetros no concreto
EF	Extensômetros de flexão
EP	Extensômetros na armadura de punção (Pinos)
ET	Extensômetros nas treliças
L	LVDT

## Símbolos do Alfabeto Grego

$\alpha$	Ângulo de inclinação da armadura de cisalhamento
$\alpha_s$	Valor que leva em consideração se o pilar é interior, de borda ou de canto
$\alpha_{st}$	Ângulo de inclinação dos <i>studs</i>
$\alpha_t$	Ângulo de inclinação das treliças
$\beta$	Razão entre a maior e a menor dimensão do pilar
$\lambda$	Fator de modificação para levar em conta a redução das propriedades mecânicas dos concretos de baixa densidade
$\phi_w$	Diâmetro das barras da armadura de cisalhamento
$\phi_x$	Diâmetro das barras de flexão na direção x
$\phi_y$	Diâmetro das barras de flexão na direção y
$\phi_{esf}$	Diâmetro das esferas <i>Bubbledeck</i>
$\phi_{xmalha}$	Diâmetro das barras da malha superior na direção x
$\phi_{ymalha}$	Diâmetro das barras da malha superior na direção y
$\psi$	Raio de rotação da laje
$\rho$	Taxa de armadura de flexão
$\rho_x$	Taxa de armadura de flexão na direção x
$\rho_y$	Taxa de armadura de flexão na direção y

$\xi$  Efeito de tamanho (size effect)

### Símbolos do Alfabeto Latino

$f_y$  Tensão de escoamento do aço

$A_s$  Área de aço da armadura de flexão tracionada da faixa unitária da laje

$A_{DG}$  Área de concreto determinada pelo plano inclinado de 45° da seção da laje, passando pelas esferas

$A_{SOL}$  Área de concreto de uma laje maciça de referência

$A_{st}$  Área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento

$A_{swtOut}$  Área de aço correspondente à seção transversal das diagonais das treliças interceptadas pelo perímetro de controle  $u_{out}$

$A_{swtu1}$  Área de aço correspondente à seção transversal das diagonais das treliças interceptadas pelo perímetro de controle  $u_1$

$A_{sw}$  Área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento

$AC_{ef}$  Área de concreto efetiva na seção do perímetro crítico

$B$  Comprimento do modelo de laje

$b_o$  Comprimento do perímetro de controle afastado  $d/2$  da face do pilar

$b_w$  Largura unitária de faixa de laje

$b_x$  Comprimento na direção x da área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar

$b_y$  Comprimento na direção y da área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar

$b_{out}$  Comprimento do perímetro de controle externo afastado a uma distância  $d/2$  da última camada de armadura transversal disposta

$c$  Diâmetro do pilar

$c_e$  Comprimento geradas pela intercepção do perímetro afastado  $3d$  da face do pilar e as esferas *Bubbledeck* nas esquinas desta área

$C_o$  Cobrimento da região com vazios

$c_{arc}$  Comprimento de arco gerado pela interseção entre o perímetro crítico ( $u$ ) e a projeção da esfera na superfície da laje

$D$  Diâmetro esfera *Bubbledeck*

$d$	Altura útil da laje
$d_v$	Altura efetiva da laje
$d_x$	Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra de flexão posicionada na direção x
$d_y$	Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra de flexão posicionada na direção y
$d_{xmalha}$	Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra da malha superior posicionada na direção x
$d_{ymalha}$	Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra da malha superior posicionada na direção y
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$f_c$	Resistência a compressão do concreto
$f_{bd}$	Tensão de aderência ao concreto
$f_{cd}$	Tensão de resistência de projeto do concreto à compressão
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{yt}$	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento
$f_{yw,d}$	Tensão efetiva da armadura de cisalhamento
$h$	Espessura da laje
$h_c$	Altura das calotas
$k$	Coefficiente que relaciona o cobrimento da região com vazios e a posição do eixo neutro
$k_{dg}$	Influencia do tamanho do agregado
$k_{sys}$	Influencia do tipo de armadura de cisalhamento utilizado
$m_R$	Momento resistente da seção transversal de laje com largura unitária
$N_c$	Número de calotas geradas pela intercepção do perímetro afastado $3d$ da face do pilar e as esferas <i>Bubbledeck</i>
$N_e$	Número de esferas completas dentro da área gerada pelo perímetro afastado $3d$ da face do pilar

$N_x$	Número de barras na direção x contidas na área gerada pelo perímetro afastado $3d$ da face do pilar
$N_y$	Número de barras na direção y contidas na área gerada pelo perímetro afastado $3d$ da face do pilar
$N_{xmalha}$	Número de barras da malha superior na direção x contidas na área gerada pelo perímetro afastado $3d$ da face do pilar
$N_{ymalha}$	Número de barras da malha superior na direção y contidas na área gerada pelo perímetro afastado $3d$ da face do pilar
$r$	Raio das esferas <i>Bubbledeck</i>
$r_q$	Distância do centro do pilar ao ponto de aplicação da carga
$r_s$	Posição onde o momento é zero, medido desde os eixos do apoio da laje
$s_o$	Distância entre a primeira camada do reforço de cisalhamento e a face do pilar
$s_r$	Distância entre as camadas do reforço
$s_{rs}$	Distância entre camadas de <i>studs</i>
$s_{rt}$	Distância entre as diagonais das treliças
$u$	Perímetro de controle definido para lajes sem armadura de cisalhamento
$u_1$	Comprimento do perímetro de controle afastado $2d$ das faces do pilar
$u_o$	Perímetro do pilar
$u_{out}$	Comprimento do perímetro de controle afastado da camada mais externa das armaduras de cisalhamento
$v$	Tensão de cisalhamento na ligação laje-pilar
$V_u$	Carga última atingida durante o ensaio
$V_{ACI}$	Carga última estimada pelo <i>ACI 318</i> (2014)
$V_{EC2}$	Carga última estimada pelo <i>EUROCODE 2</i> (2004)
$V_{fib}$	Carga última estimada pelo <i>fib MC2010</i> (2010)
$V_{flex}$	Carga estimada de ruptura por flexão
$V_{NBR}$	Carga última estimada pelo <i>NBR 6118</i> (2014)

- $V_{Norma}$  Carga última estimada pela norma
- $V_{R,cout}$  Contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento fora da região maciça reforçada
- $V_{R,csout}$  Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar fora da região maciça reforçada
- $V_{R,cs}$  Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar com armadura de cisalhamento
- $V_{R,c}$  Resistência ao cisalhamento para lajes lisas sem armadura de cisalhamento
- $V_{R,max}$  Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar entre a face do pilar e a armadura de cisalhamento
- $V_{R,sout}$  Contribuição das treliças na resistência ao cisalhamento fora da região maciça reforçada
- $V_{Rc,out}$  Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar fora da armadura de cisalhamento
- $V_{Rc}$  Contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento
- $V_{Rd,comvazios}$  Resistência ao cisalhamento da laje com vazios
- $V_{Rd,macica}$  Resistência ao cisalhamento da laje maciça
- $V_{Rs}$  contribuição da armadura de cisalhamento na resistência ao cisalhamento
- $vol_{macico}$  Volume maciço contido na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar nas direções  $x$  e  $y$
- $vol_{sx}$  Volume de aço total contido na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar na direção  $x$
- $vol_{sy}$  Volume de aço total contido na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar na direção  $y$
- $x$  Posição do eixo neutro
- $L_x$  Comprimento do vão na direção  $x$
- $L_y$  Comprimento do vão na direção  $y$



# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo da história, o homem sempre procurou o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas que permitissem melhorar a forma de conceber as estruturas, buscando soluções que aliem economia e segurança. No Brasil, os sistemas com lajes maciças ou nervuradas apoiadas em vigas são uma das alternativas mais utilizadas na construção de edificações de mediana envergadura.

Porém com o aumento da quantidade dos pavimentos, das novas exigências arquitetônicas e do aumento do peso das edificações, surge a necessidade de buscar novas alternativas, que permitam reduzir o custo da obra, bem como o seu tempo de execução. Devido a esses fatores, faz alguns anos se começou a implantar no Brasil um sistema construtivo muito utilizado em países como Estados Unidos, Canadá, parte da Europa e da Ásia, no qual a laje é apoiada diretamente sobre os pilares, denominado laje lisa.

Esse sistema construtivo apresenta as seguintes vantagens: Menor uso de fôrmas (que propicia maior agilidade ao processo construtivo e reduz o custo da mão-de-obra), facilidade na disposição de instalações elétricas, hidráulicas e de ar-condicionado, assim como possibilitar uma maior flexibilidade ao *layout* do imóvel.

Um inovador sistema chamado *Bubbledeck*, ainda pouco utilizado no Brasil, foi desenvolvido por engenheiros dinamarqueses, tal sistema pode ser visto na Figura 1.1. De acordo com a *Bubbledeck Brasil* (2016), este sistema combina a utilização de esferas plásticas entre telas de aço com o conceito de lajes lisas, permitindo, com isso, a eliminação do concreto que não exerce função estrutural. Isso reduz significativamente o peso próprio da estrutura, além de permitir o aumento dos vãos nas duas direções.

As lajes *Bubbledeck* ao estarem apoiadas diretamente sobre pilares e não sobre vigas apresentam um comportamento igual que as lajes lisas. As lajes lisas tem como ponto mais crítico, a possibilidade de uma ruptura localizada por punção na ligação laje-pilar, uma vez que ela pode se propagar e levar a estrutura à ruína parcial ou total, por colapso progressivo.

Segundo Nasvik (2011), entre as vantagens do sistema *Bubbledeck* pode-se citar as seguintes:

- Maior flexibilidade nos *layouts* dos projetos, adaptando-se a arquiteturas curvas e irregulares;

- Redução do peso próprio em até 35%, se comparado com uma laje maciça equivalente, o que possivelmente implicaria menores cargas nas fundações, de tal forma que seja factível a diminuição o tamanho das mesmas;
- Aumento dos vãos entre colunas, até 50% a mais do que lajes maciças, devido à redução do peso próprio da laje.
- Eliminação de vigas, gerando maior rapidez e economia.
- Redução da logística de transporte de materiais, o que conseqüentemente minimiza os riscos operacionais e de segurança de trabalho.

Entretanto, esse sistema apresenta algumas desvantagens como:

- A necessidade de mão de obra especializada;
- Por ser um sistema relativamente novo, não é normatizado em alguns países;
- Segundo Held (2002), este sistema apresenta uma redução a resistência ao cisalhamento de até 40% devido aos vazios deixados pelas esferas plásticas;
- Possibilidade de ruptura por punção devido à elevada concentração de tensões na ligação laje-pilar, se comparado com lajes apoiadas sobre vigas.



Figura 1.1 – Laje tipo *Bubbledeck* (*Bubbledeck International*, 2016.)

Conforme Melo (1990), o primeiro caso registrado de ruptura por punção foi no edifício *Presto-Lite* em Indianápolis (1911), onde as lajes se desprenderam completamente dos pilares e levaram a estrutura à ruína. Outro exemplo deste fenômeno, segundo Wood (1997), foi o colapso parcial do edifício *Pipers Row Car Park* localizado na cidade de *Wolverhampton*, Inglaterra, como mostrado na Figura 1.2.

A punção é uma forma de ruptura brusca, por cisalhamento, ocorre devido a concentração de cargas em áreas pequenas de um elemento estrutural e se caracteriza por acontecer de forma frágil e sem dar nenhum aviso prévio.

O modo mais eficiente para combater a punção em lajes lisas é através do uso de armaduras de cisalhamento, pois aumenta a ductilidade e a capacidade resistente das mesmas. Pesquisas desenvolvidas por diversos autores Gomes (1991), Oliveira *et al.* (2000) e Broms (2000), *apud* Lima (2015) mostraram que o uso de armaduras de cisalhamento pode ser muito eficiente no combate à punção, podendo até mesmo mudar o modo de ruptura para flexão, dobrando a capacidade resistente.



Figura 1.2 – Colapso parcial do edifício *Pipers Row Car Park*, Lima (2015)

## 1.2 - MOTIVAÇÃO

A tecnologia *Bubbledeck* tem chamado a atenção ao ser difundido como um sistema construtivo simples e eficaz. Já que devido à utilização de esferas plásticas cujo objetivo é substituir o concreto que não desempenha função estrutural, consegue-se economizar materiais (formas e concreto) e ainda assim apresentar comportamento estrutural, acústico e térmico superior, ou pelo menos igual, quando comparado à laje lisa tradicional.

No Brasil assim como em muitos outros países, ainda não existem normas associadas a essa tecnologia apesar de existir alguns estudos feitos por pesquisadores em países como Alemanha e Dinamarca, razão pela qual se faz necessário um estudo mais profundo e detalhado dos fatores que afetam a sua resistência, para assim consolidar seus parâmetros de dimensionamento. Este trabalho tem como principal motivação o estudo da capacidade resistente ao cisalhamento na ligação laje-pilar em lajes tipo *Bubbledeck*. Com isso, procura-se obter uma melhor compreensão do fenômeno de punção através da utilização de armadura de cisalhamento e diferentes tipos de treliças nas nervuras.

## 1.3 - OBJETIVOS

### 1.3.1 - Objetivo geral

Avaliar experimentalmente o comportamento à punção da ligação laje-pilar para o sistema estrutural de laje tipo *Bubbledeck* utilizando pinos (*studs*) e treliças como armadura de cisalhamento.

### 1.3.2 - Objetivos Específicos

- Avaliar a influência dos pinos (*studs*) no comportamento à punção de lajes *Bubbledeck*.
- Avaliar a influência dos diferentes tipos de treliças no comportamento à punção de lajes *Bubbledeck*.
- Comparar os resultados experimentais obtidos com adaptações das normas: *ACI 318* (2014), *EUROCODE 2* (2004), *NBR 6118* (2014), e *fib MC2010* (2010)).

## 1.4 - METODOLOGIA

O procedimento realizado no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (UnB) consistiu na construção e instrumentação de seis lajes, uma laje maciça e cinco do tipo *Bubbledeck*. Todas as lajes estiveram submetidas a carregamento simétrico, o qual foi aplicado em oito pontos da laje até a ruptura da mesma. Todas as lajes *Bubbledeck* possuem as mesmas dimensões, taxa da armadura de flexão, e método construtivo, variando-se os seguintes parâmetros: uso ou não de armadura de cisalhamento (*studs*), uso ou não de treliças nas nervuras, e inclinação das treliças.

Nestes ensaios foram analisados os seguintes parâmetros: deslocamentos verticais, cargas de ruptura, deformação específica no concreto e no aço (na armadura de flexão, na armadura de cisalhamento e nas treliças) e modo de ruptura. As cargas de ruptura obtidas foram comparadas com as estimadas segundo as adaptações feitas nas normas *ACI 318* (2014), *EUROCODE 2* (2004), *NBR 6118* (2014), e *fib MC2010* (2010).

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - PUNÇÃO

Segundo Guandalini (2006) a punção é um fenômeno que acontece em elementos de placa submetidos a uma força cortante de grande intensidade, que provoca elevadas tensões de cisalhamento em torno de regiões muito pequenas, resultando em rupturas frágeis e bruscas. Nas lajes lisas, esta situação normalmente acontece na ligação laje-pilar, onde como dito anteriormente existe uma elevada força concentrada, relativa à reação de apoio junto ao pilar. A ruptura por punção está associada à formação de um tronco de cone que tende a se desligar da laje, como pode ser visto na Figura 2.1.

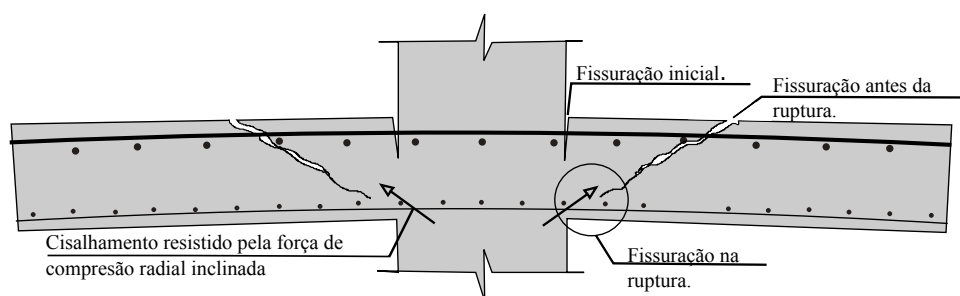


Figura 2.1 – Ruptura por punção, *CEB-FIP model code 1990* (1993)

Existem muitas alternativas para aumentar a resistência da ligação laje-pilar e evitar assim a punção, para isso é preciso conhecer os principais fatores que influenciam na resistência das lajes lisas de concreto armado que são: a resistência a compressão do concreto ( $f_c$ ), a taxa de armadura tracionada ( $\rho$ ), o tamanho e geometria do pilar, o efeito de tamanho (*size effect*) ( $\xi$ ), e a armadura de cisalhamento.

Segundo Carvalho (2013), quando se verifica que a ligação laje-pilar não atende os critérios de segurança é possível elevar a sua resistência aumentando a espessura da laje na região adjacente à ligação laje-pilar chamado de ábaco ou então fazendo um engrossamento do pilar nessa região, chamado de capitel, como pode ser visto na Figura 2.2. Pode-se, também, aumentar a seção do pilar e/ou da laje, porém maiores dimensões provoca um acréscimo significativo no custo da obra, além de representar um problema do ponto de vista arquitetônico. Finalmente, tanto o aumento da taxa de armadura de flexão quanto o da resistência à compressão do concreto seriam pouco efetivos, tornando-os por si só muitas vezes inviáveis. Porém a alternativa mais eficiente é a utilização de armadura de cisalhamento, que para alguns casos pode até dobrar a resistência da laje, se comparada com uma laje sem presença desse tipo de armadura.

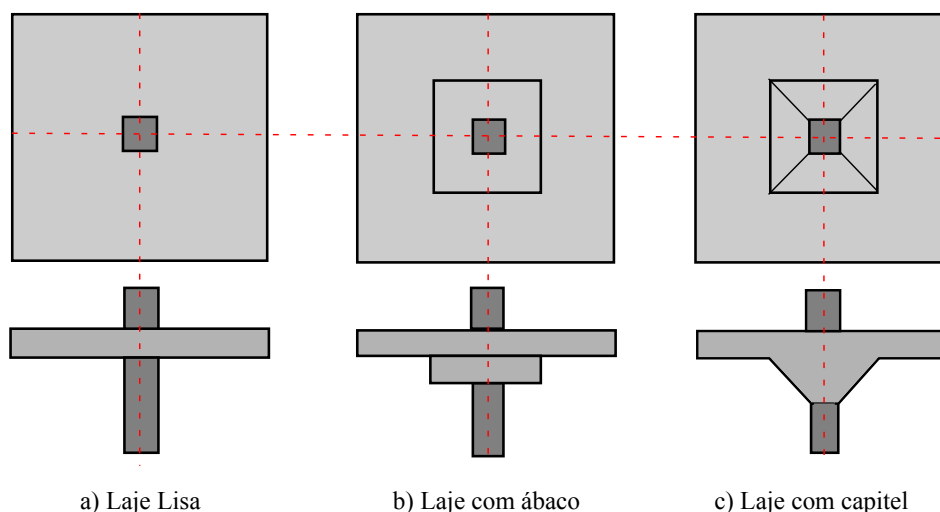


Figura 2.2 – Tipos de lajes lisas, Lima (2015)

De acordo com Macgregor (2012), para que uma armadura de cisalhamento possa ser considerada eficiente desde o ponto de vista técnico é necessário que ela esteja bem ancorada. Atender aos critérios de ancoragem é importante para que o aço utilizado nestas armaduras possa atingir a tensão de escoamento e, deste modo, a armadura possa ser considerada como completamente efetiva. Outro critério que as armaduras de cisalhamento devem apresentar segundo Ferreira (2010), diz respeito às questões de facilidade para sua instalação já que a região da ligação laje-pilar é submetida a elevados esforços de flexão e é comum ter-se nessa área uma forte concentração de barras de flexão, o que dificulta a distribuição das armaduras de cisalhamento.

Estas duas características levaram a muitos pesquisadores a testar e avaliar diversos tipos de armadura de cisalhamento, tais como : barras dobradas, estribos fechados, estribos abertos, estribos tipo “pente”, estribos inclinados, armaduras do tipo *studs* (pinos) e *Shearheads*, as quais podem ser vistas na Figura 2.3. Dentro dos diferentes tipos de armaduras de cisalhamento existentes, a mais popular atualmente segundo Ferreira (2010) é o tipo *studs*, devido ao fato de serem industrializadas e fornecidas por empresas especializadas, o qual propicia um correto espaçamento entre as diferentes camadas de armadura, uma vez que os *studs* são soldados em guias de aço.

Por outro lado além do tipo de armadura de cisalhamento a ser usado, outros fatores que influenciam diretamente na resistência à punção de lajes lisas são a quantidade e a disposição das armaduras adotadas. Teoricamente o arranjo ideal seria o arranjo radial, mas na maioria das vezes este tipo de colocação não é possível, portanto se torna necessário outras forma de distribuição como a distribuição ortogonal ou arranjo em cruz, como se pode verificar na Figura 2.4.

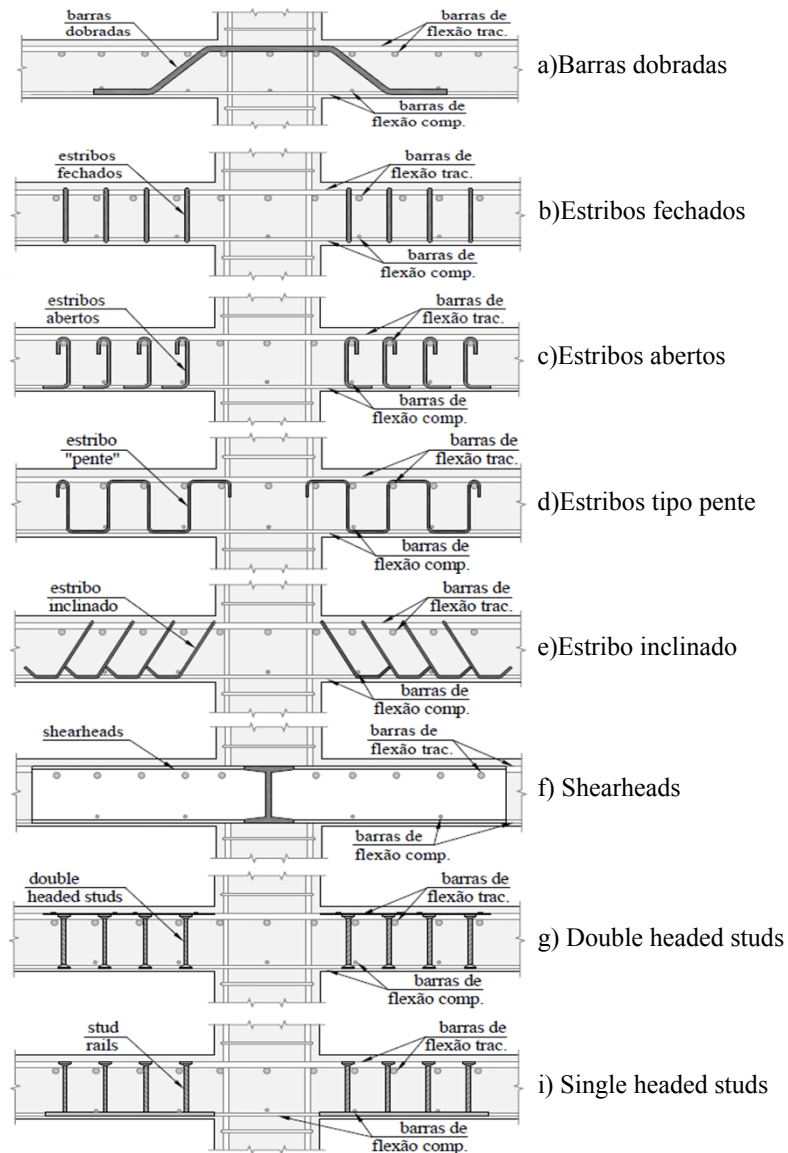


Figura 2.3 – Tipos de armaduras de cisalhamento, Ferreira (2010)

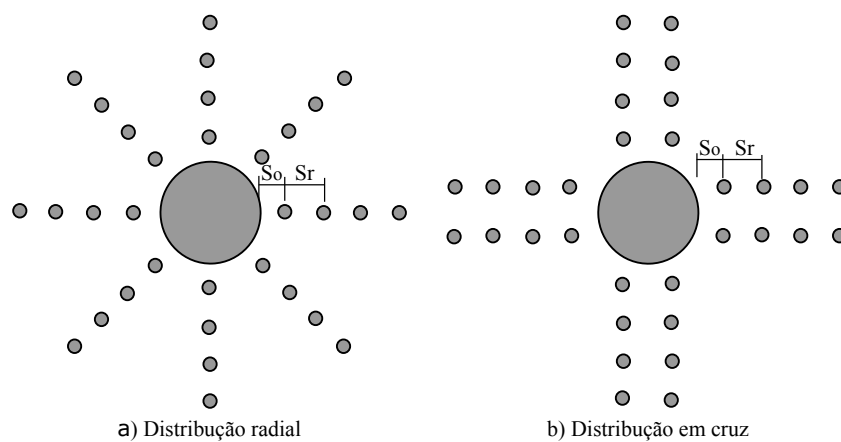


Figura 2.4 – Tipos de arranjos para armadura de cisalhamento, Ferreira (2010)



## 2.2 - SISTEMA CONSTRUTIVO DE LAJE *BUBBLEDECK*

Segundo a *Bubbledeck Brasil* (2016), o sistema *Bubbledeck* constitui uma solução de engenharia inovadora, que permite reduzir em até 35% o peso da laje se comparado com o método de execução tradicional de uma laje maciça. Esta tecnologia baseia-se no conceito de colocar esferas de plástico entre duas telas metálicas, no espaço onde o concreto tem menor desempenho estrutural, melhorando significativamente os projetos de construção, com uma redução nos custos de materiais e mão de obra, além de assegurar agilidade no processo construtivo.

As lajes *Bubbledeck* podem ser feitas com o uso de módulos, pré-lajes, ou em painéis acabados.

### 2.2.1 - Sistema com Pré-lajes

Consiste basicamente em um módulo *Bubbledeck* composto por uma armadura superior e uma inferior com várias bolas plásticas em seu interior. Este módulo é fixado a uma camada de concreto com 60 mm de espessura, como apresentado na Figura 2.5, logo os demais elementos são posicionados e a segunda etapa da concretagem executada. O uso deste sistema além de ser o mais comum, apresenta uma grande vantagem, pois dispensa o uso de fôrmas inferiores, sendo possível colocar a laje diretamente sobre vigas metálicas. Porém esse sistema precisa de um guindaste móvel para o posicionamento dos elementos pré-moldados devido ao seu peso.

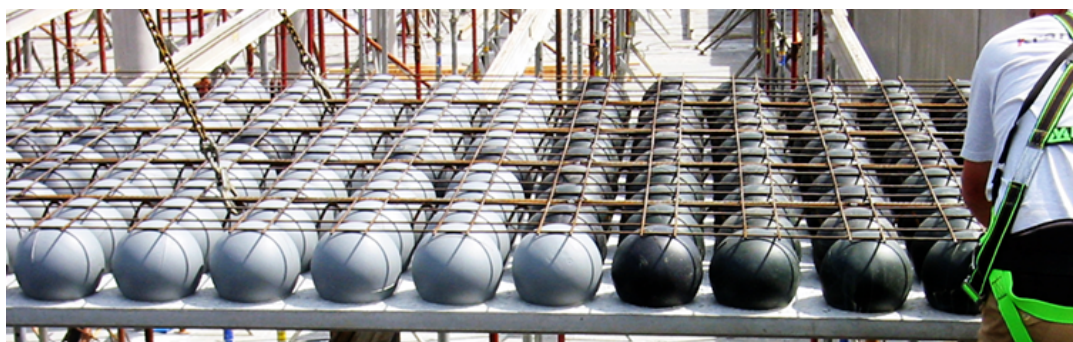


Figura 2.5 – Laje tipo *Bubbledeck* com pré-laje, *Bubbledeck Brasil* (2016)

### 2.2.2 - Sistema com módulo reforçado

As esferas são posicionadas no interior de duas telas metálicas, formando módulos que são dispostos sobre as formas. Posteriormente são colocadas as armaduras (barras de flexão, armadura de cisalhamento, etc.) e para finalizar é efetuada a concretagem, a qual é realizada em duas etapas, sendo a primeira uma camada de 60 mm (executada no sistema com pré-laje) e na segunda etapa ocorre a concretagem do restante da laje. A concretagem é feita em duas



etapas para evitar a flutuação das esferas e garantir assim uma correta posição dos elementos que compõem a laje.

A principal vantagem deste sistema construtivo é a facilidade que têm enquanto ao transporte e posicionamento dos módulos *Bubbledeck*, já que o mesmo pode ser feito de maneira manual. Na Figura 2.6 pode-se ver o içamento do módulo reforçado.



Figura 2.6 – Laje tipo *Bubbledeck* com módulo reforçado, *Bubbledeck Paraguai* (2016)

### 2.2.3 - Sistema de painéis acabados

Neste tipo de sistema, os processos construtivos de colocação de armadura e concretagem da laje são feitos em fábricas. Este tipo de laje trabalha em apenas uma direção, necessitando de vigas ou paredes para seu apoio. O desenho esquemático desse sistema pode ser visto na Figura 2.7.

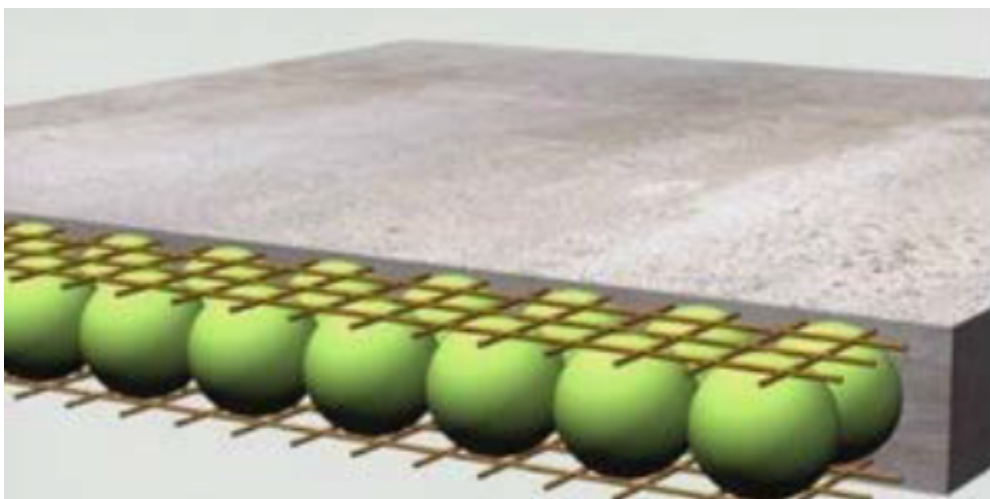


Figura 2.7 – Laje *Bubbledeck* tipo painel acabado, *Bubbledeck Brasil* (2016)

## 2.3 - PESQUISAS SOBRE LAJES TIPO *BUBBLEDECK*

### 2.3.1 - Pesquisa realizada por Held (2002)

No Instituto para Estruturas de Concreto em *Darmstadt*, Alemanha, Held (2002) realizou uma pesquisa para estudar a influência dos vazios no comportamento à punção das lajes *Bubbledeck*, empregando um programa experimental em conjunto com análise não linear pelo Método dos Elementos Finitos. Para a análise experimental foram utilizadas seis lajes tipo *Bubbledeck*, três delas com uma espessura de 24 cm e as outras três com uma espessura de 45 cm, como pode ser visto na figura 2.8 e na Tabela 2.1.

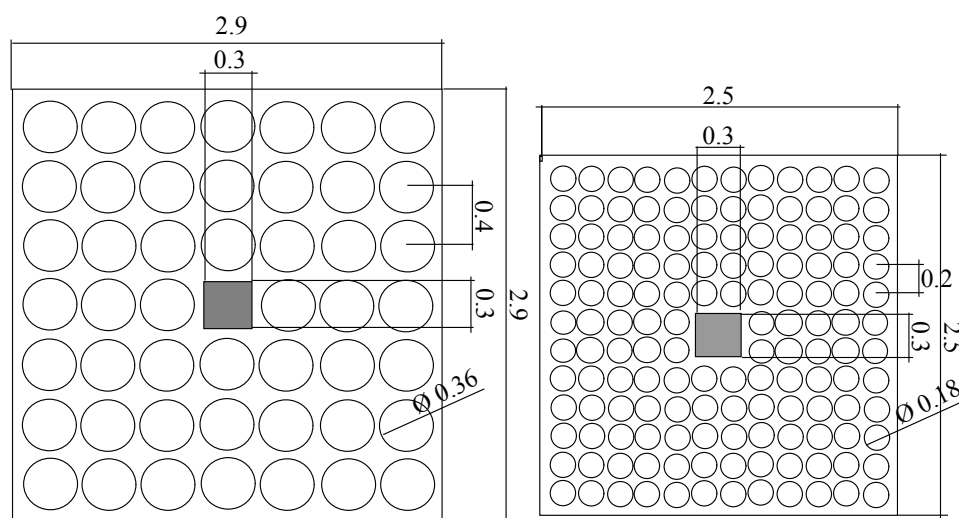


Figura 2.8 – Dimensões das lajes ensaiadas, Held (2002)

Tabela 2.1 – Modelos ensaiados por Held (2002)

Modelo	Espessura (cm)	d (cm)	Aço ( $cm^2/m$ )	$A_{sinf}$ ( $cm^2/m$ )	$f_c$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)	<i>Bubbledeck</i> Carga última (kN)	Laje maciça Carga última (kN) (calculada)
D1-24	24	19	34.25	11.31	44.4	2.8	520	840
D2-24	24	19	34.25	11.31	50.8	2.5	580	945
D3-24	24	19	34.25	11.31	46.7	2.9	525	893
D4-45	45	38	40.29	15.71	29.6	2.9	935	1503
D5-45	45	38	40.29	15.71	37.9	2.1	990	1701
D6-45	45	38	40.29	15.71	40.5	3.0	1180	1795

Depois de realizar os ensaios das lajes, Held (2002) fez um corte da seção transversal das mesmas, verificando que os vazios deixados pelas esferas não influenciaram na formação da superfície de ruptura, pois as inclinações apresentadas (entre 30° e 40°) foram similares as apresentadas em lajes maciças. Como esperado o valor da resistência à punção foi menor que a de uma laje maciça. Percebendo-se que este valor está relacionado intimamente com o número de esferas *Bubbledeck* que atravessam a superfície cônica de ruptura, como pode ser visto na Figura 2.9.

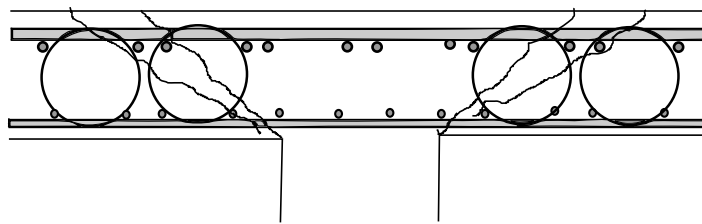


Figura 2.9 – Padrão de fissuração, seção transversal Held (2002)

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos do modelo experimental com um modelo computacional, Held (2002) utilizou o *software* Diana de elementos finitos para modelar as lajes ensaiadas. Após a modelagem computacional, determinou-se que os resultados dos modelos foram satisfatórios ao ser confrontados com os resultados dos modelos experimentais, nos quais se comparou as curvas de comportamento carga-deslocamento e o padrão de fissuração, como pode se observar, respectivamente, nas Figura 2.10 e Figura 2.11.

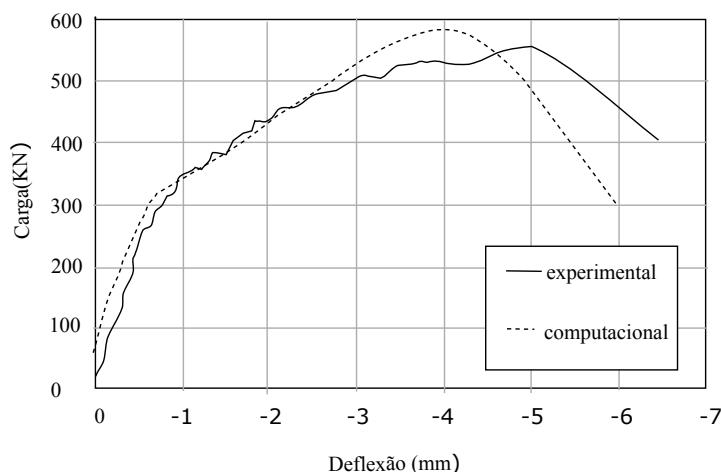


Figura 2.10 – Diagrama carga-deflexão experimental e computacional, Held (2002)

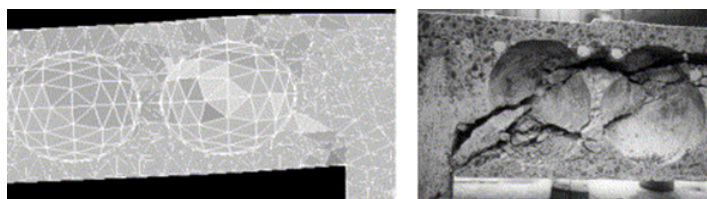


Figura 2.11 – Padrão de fissuração computacional e Experimental, Held (2002)

A autora concluiu que o modo de ruptura nas lajes com vazios esféricos é semelhante ao de lajes maciças, definindo que para a determinação da resistência à punção das lajes *Bubbledeck*, caso alguma esfera esteja situada entre o perímetro de controle e a borda do pilar, deve-se considerar o vazio deixado por essas esferas na determinação da área considerada nos cálculos.

### 2.3.2 - Pesquisa realizada por Souza (2007)

Na Universidade Federal do Pará a autora avaliou o comportamento de lajes lisas nervuradas, usando armadura de cisalhamento e punção, para tal fim foram confeccionadas oito lajes de concreto armado. As lajes eram quadradas de lados iguais a 1800 mm de comprimento e altura total de 140 mm. A seção transversal das lajes foi formada por nervuras de 50 mm de largura na base menor e 100 mm na base maior e os vazios entre as nervuras foram preenchidos com blocos de EPS (poliestireno expandido), ver Figura 2.12. As principais variáveis consideradas foram o tipo de armadura de cisalhamento nas nervuras (treliça, estribo vertical fechado e estribo aberto inclinado a 45°) e a utilização de estribo aberto inclinado a 45° como armadura de punção na região maciça, como pode-se ver na Tabela 2.2.

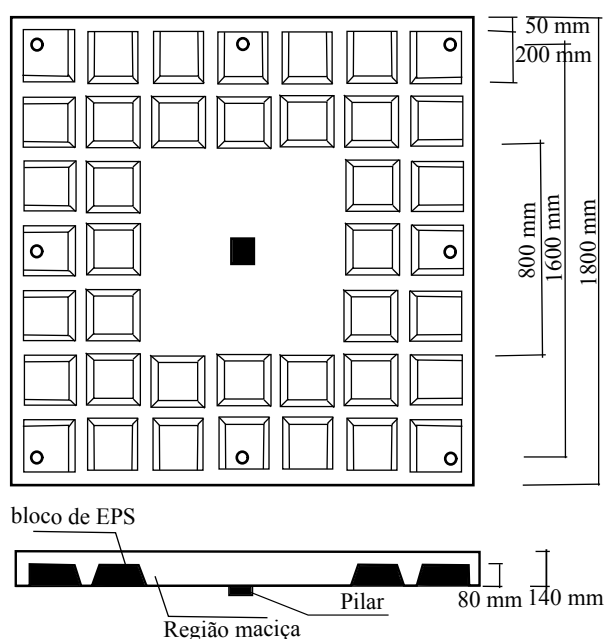


Figura 2.12 – Dimensões das lajes ensaiadas, Souza (2007)

Tabela 2.2 – Principais características das lajes ensaiadas por Souza (2007)

Laje	d (mm)	Arm. flexão $\rho$ (%)	$f_c$ (MPa)	Armadura de cisalhamento Nervura	Armadura de cisalhamento Região maciça	$V_u$ (kN)	Modo de Ruptura
L1	120	1,27	36,6	-	-	280	Flexão
L2	106	1,44	37,8	Treliça	-	278,5	Flexão
L3	111	1,37	41,4	Treliça	-	287,5	Punção
L4	118	1,29	39,2	Treliça	-	287	Punção
L5	115	1,33	37,9	Estribo vertical fechado	-	235	Punção
L6	104	1,47	39,8	Treliça	Estribo aberto inclinado	380	Flexão
L7	112	1,36	40,9	Estribo vertical fechado	Estribo aberto inclinado	361	Flexão
L8	108	1,41	39	Estribo aberto inclinado	Estribo aberto inclinado	322	Punção

Souza (2007), conclui que a utilização das armaduras de cisalhamento nas nervuras foram pouco solicitadas, devido à resistência à flexão ou à punção ter sido atingida antes que essas armaduras fossem requeridas, visto que seu uso não ocasionou um aumento nas cargas últimas. Dessa forma, as lajes com armadura de cisalhamento nas nervuras apresentaram cargas últimas muito próximas da verificada na laje de referência. As lajes com armadura de cisalhamento na região maciça obtiveram um acréscimo de carga de aproximadamente 26% em relação a laje de referência, com a máxima carga de ruptura tendo sido alcançada pela laje L6. Quanto aos modos de ruptura, foram observadas ruptura por flexão, com a armadura de flexão alcançando o escoamento nas lajes L1, L2, L6 e L7, e ruptura por punção dentro da zona maciça nas lajes L3, L4, L5 e L8.

### 2.3.3 - Pesquisa realizada por Aldejohann (2008)

Segundo a *Bubbledeck* Internacional, a resistência à punção de lajes feitas com este sistema é 60% a resistência à punção de uma laje maciça da mesma espessura. Então, com a finalidade de corroborar o fator de redução de 40% sugerido pela *Bubbledeck International*, Aldejohann (2008), propôs modificações nas formulações da norma alemã DIN 1045-1, adaptando o cálculo da resistência ao cisalhamento para lajes de concreto armado com vazios esféricos em seu interior. Para o autor a resistência ao cisalhamento das lajes tipo *Bubbledeck*, é função da relação entre a área de concreto determinada pelo plano inclinado de 45° da seção da laje e a área maciça de uma laje equivalente, passando pelas esferas, além do cobrimento dos vazios e a posição do eixo neutro, como pode ser visto na Figura 2.13. A resistência ao cisalhamento será determinada pela Equação 2.1.

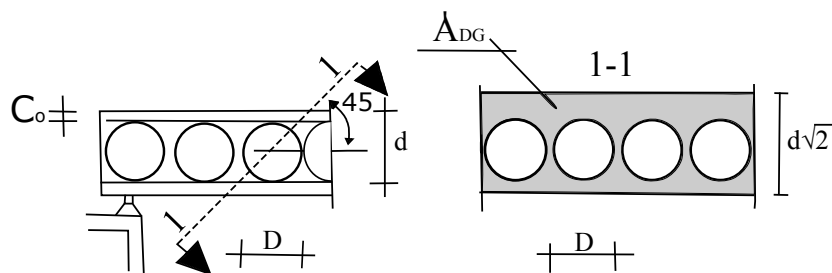


Figura 2.13 – Características da seção proposta por Aldejohann (2008)

$$V_{Rd,comvazios} = k \cdot \frac{A_{DG}}{A_{SOL}} \cdot V_{Rd,macica} \quad (2.1)$$

Onde:

$V_{Rd,comvazios}$ : Resistência ao cisalhamento da laje com vazios;

$V_{Rd,macica}$ : Resistência ao cisalhamento da laje maciça;

$A_{DG}$ : Área de concreto determinada pelo plano inclinado de 45° da seção da laje, passando

pelas esferas;

$A_{SOL}$ : Área de concreto determinada pelo plano inclinado de 45° da seção de uma laje maciça equivalente;

$D$ : Diâmetro esfera *Bubbledeck*;

$d$  é a altura útil da laje;

$k$  : Coeficiente que relaciona o cobrimento da região com vazios e a posição do eixo neutro;

$$k = 1,16 - \frac{C_o}{X} \cdot 0,03 \text{ para } 0,9 < \frac{C_o}{X} < 1,2$$

$$k = 0,8 + \frac{C_o}{X} \cdot 0,4 \text{ para } \frac{C_o}{X} \leq 0,9$$

$C_o$ : Cobrimento da região com vazios;

$x$ : Posição do eixo neutro.

Aldejohann (2008), concluiu que as suas formulações propostas eram validas e suficientes para a determinação da resistência a cisalhamento em lajes *Bubbledeck*.

### 2.3.4 - Pesquisa realizada por Lai (2010)

Com o objetivo de compreender o comportamento das lajes *Bubbledeck*, a autora realizou análises numéricas no *software* SAP 2000, comparando o desempenho (estático e dinâmico) de lajes tipo *Bubbledeck* e lajes maciças ao serem submetidas a um carregamento de 4,8  $kN/m^2$ , além de seu peso próprio, sendo o caso de estudo uma laje de escritório. Na análise estática os resultados obtidos no *software* SAP 2000, mostraram que os momentos máximos, forças cortantes e tensões, foram entre 30% e 40% menores para as lajes *Bubbledeck*, isto se deve ao fato dessas lajes possuírem menor peso próprio. No entanto, os deslocamentos das lajes *Bubbledeck* são aproximadamente 10% maiores que na laje maciça, já que o uso de esferas plásticas reduz a sua rigidez, como observado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – resposta estática da laje de escritório, Lai (2010)

Tipo de laje	M11 $N - m/m$	M22 $N - m/m$	M12 $N - m/m$	V13 $N/m$	V23 $N/m$	S11Top $MPa$	S22Top $MPa$	S12Top $MPa$	U3 $mm$
Laje maciça	-906769,9	-906899	-166568,1	-2158788,5	-2157737,7	26,8	26,7	4,9	-18,9
Bubbledeck	-598526	-598584	99484,2	1309773,6	1309773,6	17,6	17,7	3,5	-20,85
% diferencia	-34%	-34%	-40%	-39%	-39%	-34%	-34%	-29%	10%

No caso da análise dinâmica as respostas tanto da laje tipo *Bubbledeck* como da laje maciça foram aproximadamente iguais, o resumo dos dados obtidos são mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Comparação das respostas dinâmicas obtidas, Lai (2010)

Modo	espessura (cm)	$f_c$ (MPa)	LAJE MACIÇA		BUBBLEDECK	
			Frequência (Hz)	Período (s)	Frequência (Hz)	Período (s)
1	45	27,58	4,234	0,236	4,226	0,237
2	45	27,58	4,482	0,223	4,522	0,221
3	45	27,58	4,482	0,223	4,522	0,221
4	45	27,58	4,558	0,219	4,524	0,22
5	45	27,58	4,575	0,219	4,679	0,214
6	45	27,58	5,192	0,193	5,322	0,188
7	45	27,58	5,192	0,193	5,322	0,188
8	45	27,58	5,641	0,177	5,692	0,176
9	45	27,58	6,928	0,159	6,64	0,151
10	45	27,58	8,292	0,121	8,224	0,122
11	45	27,58	8,404	0,119	8,397	0,119
12	45	27,58	8,404	0,119	8,397	0,119

Depois de realizar as análises dos resultados obtidos, Lai (2010) concluiu que para pisos de escritórios o desempenho da *Bubbledeck* é semelhante ao de lajes maciças armadas nas duas direções.

### 2.3.5 - Pesquisa realizada por Lima (2015)

Lima (2015) realizou uma pesquisa de análise experimental à punção de lajes lisas tipo *Bubbledeck* no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília, confeccionando quatro modelos de lajes, três tipo *Bubbledeck* e uma maciça, as quais apresentavam as mesmas características de largura, comprimento, altura, e taxa de armadura de flexão, como pode ser observado na Figura 2.14. Além disso, todas foram apoiadas sobre pilares circulares de 300 mm de diâmetro, porém variando parâmetros como a utilização ou não de armadura de cisalhamento e a utilização ou não de pré-laje. A Tabela 2.5, mostra uma descrição das lajes ensaiadas nesta pesquisa.

Tabela 2.5 – Descrição das lajes ensaiadas à punção, Lima (2015)

Laje	Descrição
RSP	Laje maciça
BD28 - P1	<i>Bubbledeck</i> sem pré-laje pré-moldada
BD28 - P2	<i>Bubbledeck</i> com pré-laje pré-moldada
BD28 - P3	<i>Bubbledeck</i> com pré-laje pré-moldada e com armadura de cisalhamento

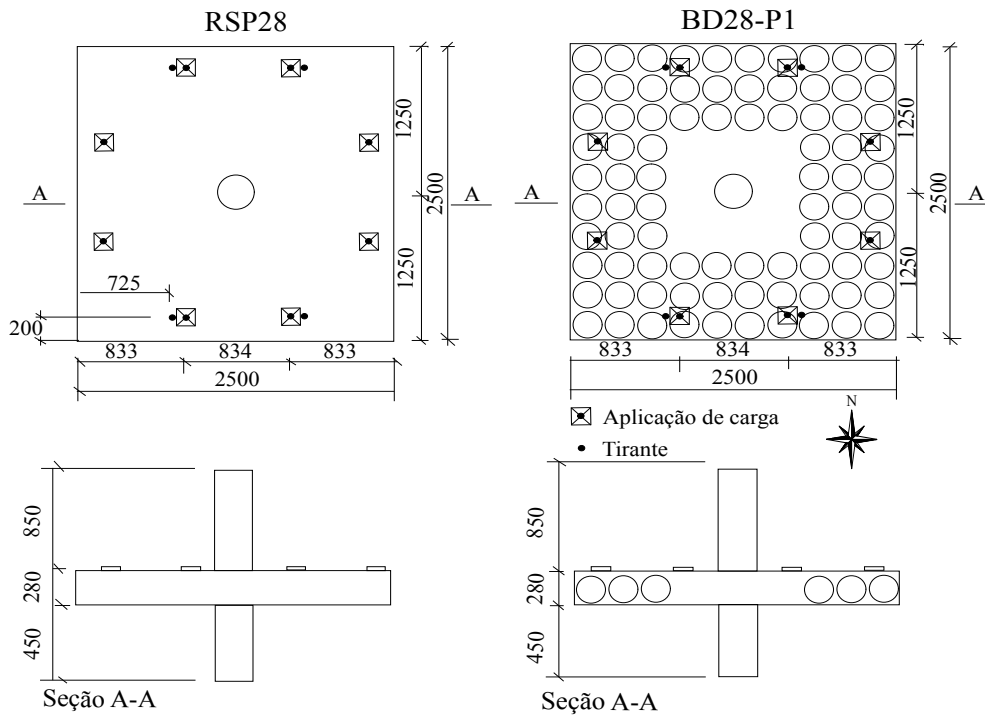


Figura 2.14 – Dimensões das lajes ensaiadas, Lima (2015)

As lajes tipo *Bubbledeck* foram armadas com duas telas de aço CA60, uma tela superior feita com barras de 6 mm de diâmetro e uma tela inferior confeccionada com barras de 8 mm de diâmetro, ambas com espaçamentos alternando entre 100 mm e 150 mm. Por outro lado o reforço a flexão foi feito com barras de aço CA50 de 12,5 mm, com espaçamento igual que nas telas superior e inferior. Para a armadura de cisalhamento da laje BD28 - P3 foram utilizados estribos fechados de 6 mm de diâmetro e aço CA50, adaptando para seu arranjo o padrão proposto pela *Bubbledeck International*, como se pode ver na Figura 2.15.

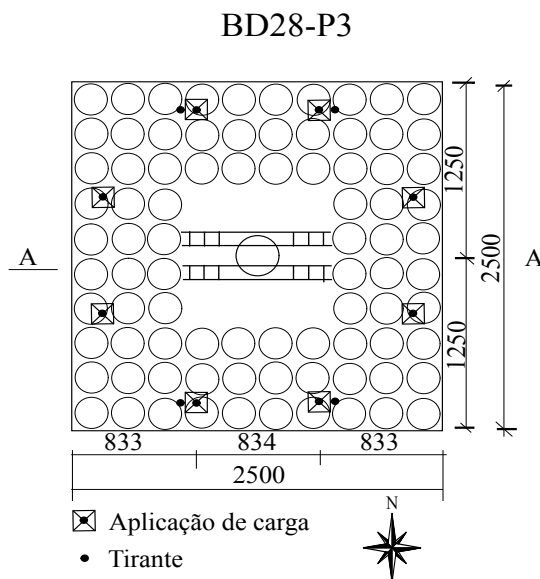


Figura 2.15 – Arranjo armadura de cisalhamento laje BD28 – P3, Lima (2015)



Em cada laje foram colocados múltiplos LVDT's, e extensômetros tanto na armadura de flexão como no concreto, com o fim de medir os deslocamentos verticais da laje e as deformações apresentadas pela armadura de flexão bem como do concreto ao longo do ensaio. Para o caso da laje BD28-P3, foram dispostos também extensômetros na armadura de cisalhamento. Ao fazer um análise dos resultados adquiridos nos ensaios das quatro lajes, o autor concluiu que:

- Avaliando as cargas de ruptura experimentais juntamente com as cargas estimadas de ruptura por punção de acordo com os critérios da formação do cone de ruptura, todas as lajes ensaiadas romperam por punção. A Tabela 2.6 mostra as cargas de ruptura obtidas por Lima (2015).
- O método construtivo (uso ou não de pré-laje) não influencia na resistência à punção das lajes.
- A laje BD28-P3 com armadura de cisalhamento apresentou um incremento de aproximadamente 7% em sua resistência à punção, ao se comparar com as outras lajes *Bubbledeck* sem este tipo de armadura. O autor considerou como um valor pouco satisfatório e atribuiu tal resultado ao fato dos estribos não estarem ancorados nas barras da armadura de flexão principal.
- No método de cálculo proposto para norma *ACI 318* (2014) cujo perímetro de controle encontra-se afastado a  $0.5d$  da face do pilar, pode se verificar que os valores de resistência ao cisalhamento calculados tendem a superestimar a capacidade resistente da ligação laje-pilar, em virtude do perímetro de controle não passar pelas esferas, desconsiderando, com isso, os vazios deixados pelas mesmas. No caso do método de cálculo proposto para as normas *NBR 6118* (2014) e *EUROCODE 2* (2004) os resultados obtidos mostram-se satisfatórios para a determinação das cargas de ruptura das lajes, sendo estas a favor da segurança. Essa conclusão foi obtidas através da Figura 2.16.

Tabela 2.6 – Cargas de ruptura, Lima (2015)

Lajes	d (mm)	$f_c$ (MPa)	$\rho$ (%)	$V_{flex}$ kN	$V_u$ kN	$V_u/V_{flex}$ kN	Redução de carga em relação à laje maciça (%)
RSP	238	47,7	0,41	1004	858	0,85	-
BD28-P1	250	47,7	0,39	1058	642	0,61	25%
BD28-P2	255	47,7	0,39	1076	651	0,6	24%
BD28-P3	255	47,7	0,39	1077	697	0,65	19%

Onde:  $\rho$ : Taxa de armadura de flexão adotada, assim como  $V_{flex}$  é Carga estimada de ruptura por flexão e o  $V_u$  a carga última atingida durante o ensaio.

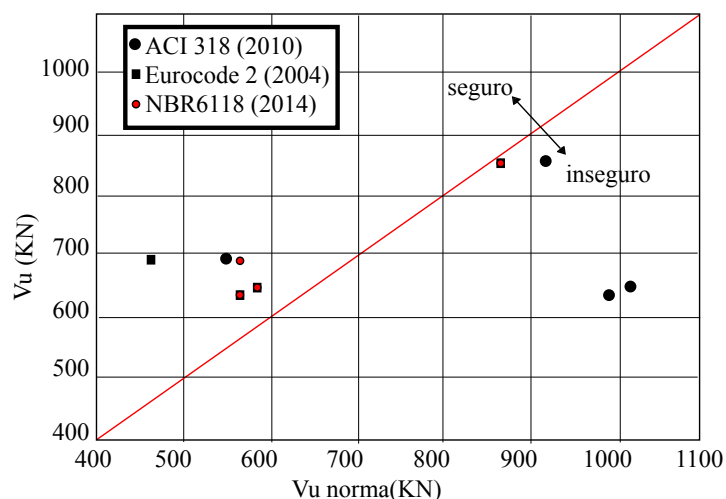


Figura 2.16 – Comparação entre a carga última experimental e a estimada pelas normas, Lima (2015)

### 2.3.6 - Pesquisa realizada por Ledo (2016)

Ledo (2016) realizou a sua pesquisa (análise experimental à punção de lajes lisas tipo *Bubbledeck* com pilar interno) no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília, confeccionando quatro modelos de lajes, dois tipo *Bubbledeck* e dois maciça, as quais apresentavam as mesmas dimensões das lajes ensaiadas por Lima, (2015). Ver Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Descrição de lajes ensaiadas a punção , Ledo (2016)

Laje	espessura (mm)	d (mm)	$f_c$ (MPa)	Tipo	Pre-laje	Armadura de cisalhamento	Distribuição da armadura	Estribo ancorado	$V_u$ (kN)
SS1	280	232	44,6	Maciça	Não	Estribo	Cruz	Sim	1040,8
SS2	280	246	44,6	Maciça	Sim	Estribo	Cruz	Semi-Ancorado	986,8
BD1	280	241	44,6	<i>Bubbledeck</i>	Não	Estribo	Padrão <i>Bubbledeck</i>	Não	817,2
BD2	280	255	44,6	<i>Bubbledeck</i>	Sim	Estribo	Padrão <i>Bubbledeck</i>	Não	832,5

Nesta pesquisa o autor mede a resistência à punção em lajes tipo *Bubbledeck* e lajes maciças avaliando parâmetros como a utilização ou não de armadura de cisalhamento e a utilização ou não de pré-laje. Uma vez obtidos os resultados experimentais o autor conclui que:

- As lajes *Bubbledeck* atingiram cargas de ruptura aproximadamente 20% menores que as lajes maciças;
- O uso ou não de pré-laje não influenciou na resistência última à punção das lajes;
- Para as lajes *Bubbledeck* o método proposto para o cálculo da punção nas normas *ACI 318* (2014) e *EUROCODE 2* (2004) foram as que melhor estimativa de cargas ultimas

apresentaram, com média de 97% para o *ACI 318* (2014) e 95% para o *EUROCODE 2* (2004).

## 2.4 - RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

As normas *ACI 318* (2014), *EUROCODE 2* (2004), *NBR 6118* (2014) e *fib MC2010* (2010), que serão utilizadas nesta dissertação, abordam de maneira diferente o cálculo da resistência ao cisalhamento para ligações laje-pilar interno, dependendo sim a laje tem ou não armadura de cisalhamento. O cálculo da resistência ao cisalhamento para lajes lisas sem armadura de cisalhamento é obtido através de uma expressão geral, como apresentado na Equação 2.2, que relaciona a tensão de cisalhamento com a altura útil e o perímetro de controle. Este último parâmetro varia dependendo da norma utilizada.

$$V_{R,c} = v \cdot d \cdot u \quad (2.2)$$

Onde:

$v$  é a tensão de cisalhamento na ligação laje-pilar;

$u$  é o perímetro de controle definido para lajes sem armadura de cisalhamento;

$d$  é a altura útil da laje.

Para o caso de lajes lisas com armadura de cisalhamento, é necessário verificar três possíveis modos de ruptura: ruptura por esmagamento da diagonal comprimida no perímetro do pilar, ruptura cortando a região das armaduras de cisalhamento e ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento. Para o cálculo do último caso citado pode-se utilizar a Equação 2.2, variando-se unicamente o perímetro de controle  $u$  de acordo com a norma usada. Na região onde há armadura de cisalhamento, a forma de obter a resistência ao cisalhamento é de acordo com a Equação 2.3. Ressalta-se que a forma de determinação dessas parcelas varia de acordo com cada norma.

$$V_{R,cs} = V_{Rc} + V_{Rs} \quad (2.3)$$

Onde:

$V_{R,cs}$  é a resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar com armadura de cisalhamento;

$V_{Rc}$  é a contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento;

$V_{Rs}$  é a contribuição da armadura de cisalhamento na resistência ao cisalhamento.

Nas expressões para o cálculo da resistência ao cisalhamento apresentadas a seguir, não serão considerados os coeficientes de minoração da resistência do concreto (1,4) e do aço (1,15) por se tratar de uma análise experimental.

### 2.4.1 - ACI 318 (2014)

Para o caso de lajes sem armadura de cisalhamento, o valor da resistência ao cisalhamento será dado pelo menor valor obtido pelas Equações 2.4, 2.5 e 2.6. Considerando um perímetro de controle localizado a uma distância  $d/2$  da face do pilar, como mostrado na Figura 2.17, onde  $d$  é a altura útil da laje.

$$V_{R,c} = 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad (2.4)$$

$$V_{R,c} = 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad (2.5)$$

$$V_{R,c} = 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad (2.6)$$

Onde:

$\alpha_s$ : Valor que leva em consideração se o pilar é interior, de borda ou de canto;

$\beta$ : Razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;

$\lambda$ : É uma função da densidade do concreto (toma o valor “1” para concretos de peso específico normal);

$f'_c$ : Resistência à compressão especificada do concreto, com  $f'_c \leq 69$  MPa;

$b_0$ : Comprimento do perímetro de controle afastado  $d/2$  da face do pilar;

$d$ : Altura útil da laje na região de análise.

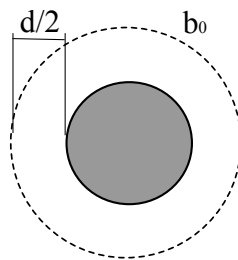


Figura 2.17 – Posição do perímetro de controle  $b_0$ , ACI 318 (2014)

No caso de lajes com armadura de cisalhamento esta norma propõe as seguintes situações para o cálculo da capacidade resistente ao cisalhamento:

- Para o cálculo da capacidade resistente dentro da região reforçada ( $V_{R,cs}$ ), esta norma recomenda para o uso de estribos a Equação 2.7, e para o uso de *studs* a Equação 2.8.
- Se deve verificar a Equação 2.9.

- Já para o caso da capacidade resistente fora da região das armaduras de cisalhamento ( $V_{Rc,out}$ ) utiliza-se a Equação 2.10, ressaltando que o perímetro de controle ( $b_{out}$ ) é determinado conforme mostra a Figura 2.18.

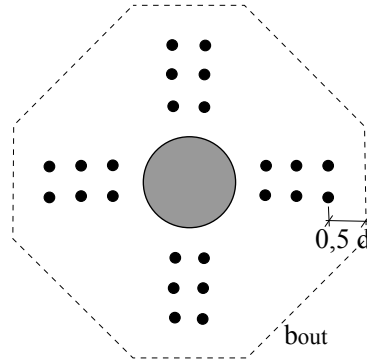


Figura 2.18 – Posição do perímetro de controle  $b_{out}$ , *ACI 318* (2014)

$$V_{R,cs} = 0,17 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d + \frac{d}{s_r} \cdot A_{st} \cdot f_{yt} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (2.7)$$

$$V_{R,cs} = 0,25 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d + \frac{d}{s_r} \cdot A_{st} \cdot f_{yt} \quad (2.8)$$

$$V_{R,max} = \begin{cases} 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d & s_r \leq 0,5d \\ 0,5 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d & 0,5d < s_r < 0,75d \end{cases} \quad (2.9)$$

$$V_{Rc,out} = 0,17 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_{out} \cdot d \quad (2.10)$$

onde:

$s_r$ : Distância entre as camadas do reforço. Destacando que o número de camadas totais deve ser maior ou pelo menos igual a  $d/s_r$ ;

$A_{st}$ : Área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento;

$f_{yt}$ : Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, com  $f_{yt} \leq 420$  MPa;

$\alpha$ : Ângulo de inclinação da armadura de cisalhamento;

$b_{out}$ : Perímetro de controle externo afastado a uma distância  $d/2$  da última camada de armadura transversal disposta.

#### 2.4.2 - *EUROCODE 2* (2004)

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento em lajes lisas sem armadura de cisalhamento a verificação deve ser feita para um perímetro de controle afastado  $2d$  da face do pilar ou área

carregada pontualmente, como pode-se verificar na Figura 2.19, aplicando a Equação 2.11, que considera a taxa de armadura de flexão tracionada e o efeito de tamanho, diferenciando-se da norma americana *ACI 318* (2014) que não leva em consideração tais fatores.

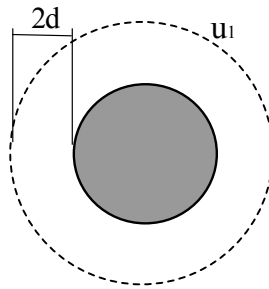


Figura 2.19 – Posição do perímetro de controle  $u_1$ , *EUROCODE 2* (2004)

$$V_{R,c} = C_{Rd,c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad (2.11)$$

Onde:

$$C_{Rd,c} : \frac{0,18}{\gamma_c};$$

$\xi$  : *Size effect*,  $\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$ ,  $d$  em mm;

$\rho$  : é a taxa de armadura de flexão tracionada média da laje, calculada como  $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$ , onde  $\rho_x$  e  $\rho_y$  são, respectivamente, as taxas de armadura de flexão nas direções x e y.

$f_{ck}$ : Resistência à compressão do concreto, de acordo com o *EUROCODE 2* (2004) deve ser menor que 90 MPa, porém respeitando os limites estabelecidos pelos anexos de cada país membro da comunidade europeia.

$u_1$  : Comprimento do perímetro de controle afastado  $2d$  das faces do pilar.

$d$  : Altura útil da laje;

$\gamma_c$  : Coeficiente de minoração da resistência do concreto.

Já no caso de lajes lisas, com armadura de cisalhamento, o *EUROCODE 2* (2004) propõe três possíveis situações de ruptura:

- Ruptura na região localizada entre a face do pilar e a armadura de cisalhamento (caso de esmagamento da biela) cuja força resistente ( $V_{R,max}$ ) é determinada mediante a Equação 2.12;
- Ruptura passando pela armadura de cisalhamento, onde as parcelas referentes ao concreto e aço trabalham em conjunto para resistir os esforços externos, neste caso a força resistente é obtida a partir da Equação 2.13;
- Ruptura fora da região reforçada, sendo a capacidade resistente calculada pela Equação 2.14.

$$V_{R,max} = 1,5 \cdot C_{Rd,c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad (2.12)$$

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \cdot \sin \alpha \quad (2.13)$$

$$V_{R,c,out} = C_{Rd,c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d \quad (2.14)$$

Onde:

$u_o$  : Perímetro do pilar;

$u_{out}$  : Comprimento do perímetro de controle afastado  $1.5d$  da camada mais externa da armadura de cisalhamento, respeitando-se um limite de  $2d$  para a distância máxima entre duas linhas concêntricas de armadura, como verificado na Figura 2.20;

$f_{cd}$  : Resistência de cálculo à compressão do concreto; com  $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$

$\alpha$  : Ângulo de inclinação da armadura de cisalhamento;

$s_r$  : Distância entre camadas da armadura de cisalhamento;

$A_{sw}$  : Área de aço correspondente a uma camada de armadura de cisalhamento;

$f_{yw,ef}$  : Tensão efetiva da armadura de cisalhamento, obtida como:

$f_{yw,ef} = 1,15 \cdot 250 + 0,25 \cdot d \leq f_{yw}$ , obtido em (MPa) e com  $d$  em (mm).

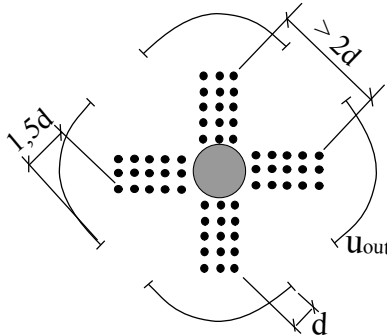


Figura 2.20 – Posição do perímetro de controle  $u_{out}$ , *EUROCODE 2* (2004)

### 2.4.3 - *NBR 6118* (2014)

De acordo com a *NBR 6118* (2014), a verificação da resistência ao cisalhamento em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento, é obtida mediante a Equação 2.15, para um perímetro de controle afastado  $2d$  da borda do pilar (Figura 2.21) e considerando ademais a taxa de armadura de flexão e o efeito de tamanho de forma semelhante ao *EUROCODE 2* (2004).

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad (2.15)$$

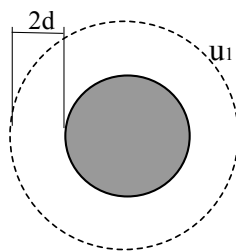


Figura 2.21 – Posição do perímetro de controle  $u_1$ , *NBR 6118* (2014)

A *NBR 6118* (2014) aborda de forma semelhante ao *EUROCODE 2* (2004), a verificação da resistência à punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento, propondo três casos de ruptura: Ruptura na região localizada entre a face do pilar e a armadura de cisalhamento (esmagamento da biela) calculado pela Equação 2.16, ruptura passando pela armadura de cisalhamento (Equação 2.17) e ruptura fora da região da armadura de cisalhamento (Equação 2.18).

$$V_{R,max} = 0,324 \cdot f_{ck} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot u_o \cdot d \quad (2.16)$$

$$V_{R,cs} = 0,14 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,k} \cdot \sin \alpha \quad (2.17)$$

$$V_{Rc,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d \quad (2.18)$$

O perímetro de controle ( $u_{out}$ ) encontra-se afastado a uma distância  $2d$  da última camada de armaduras de cisalhamento e a sua geometria para o caso do arranjo radial é circular, como visto na Figura 2.22. Embora a *NBR 6118* (2014), esteja baseada no *EUROCODE 2* (2004), ela

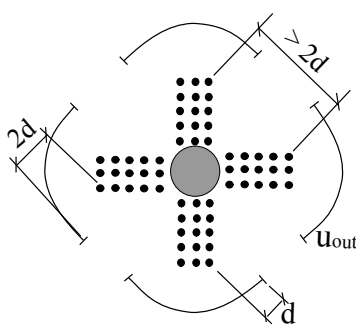


Figura 2.22 – Posição do perímetro de controle  $u_{out}$ , *NBR 6118* (2014)

apresenta as seguintes diferenças com relação da norma europeia:

- A taxa de armadura de flexão, pode assumir valores superior a 2%;
- O *size effect* ( $\xi$ ) pode adquirir valores superiores a 2,0;



- Para o caso de ruptura passando pela armadura de cisalhamento, o valor da tensão efetiva da armadura de cisalhamento ( $f_{yw,k}$ ) é limitada a  $f_{yw,k} \leq 345$  MPa para *studs*. Para o caso de estribos, se a altura da laje for de até 15 cm a limitação é de 250 MPa; e se a altura for 35 cm ou maior, limita-se a 435 MPa, permitindo interpolação para alturas intermediárias.

#### 2.4.4 - *fib MC2010 (2010)*

Para lajes lisas com armadura de cisalhamento o *fib MC2010 (2010)* assim como as normas anteriores propõe três tipos de ruptura. O primeiro tipo de ruptura, acontece na região localizada entre a face do pilar e a armadura de cisalhamento (caso de esmagamento da biela) onde a máxima resistência a punção ( $V_{R,max}$ ) é obtida a partir da Equação 2.19 e considerando a altura efetiva da laje, ver Figura 2.23.

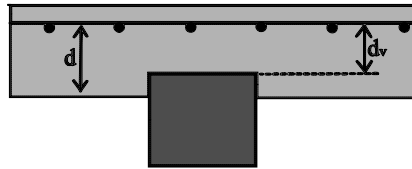


Figura 2.23 – Altura efetiva da laje,  $d_v$ , *fib MC2010 (2010)*

$$V_{R,max} = k_{sys} \cdot k\psi \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \cdot b_o \cdot d_v \leq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_o \cdot d_v \quad (2.19)$$

Onde:

$k_{sys}$ : coeficiente que considera o desempenho das armaduras de cisalhamento para controlar a fissuração e para confinar as bielas comprimidas,  $k_{sys} = 2,8$  para *studs*;

$b_o$  = Perímetro de controle afastado uma distância de  $0,5d_v$  da face do pilar para o caso de carregamentos simétricos;

$d_v$ : Altura efetiva da laje;

$f_{ck}$ : Resistência à compressão do concreto;

$\gamma_c$ : Coeficiente de minoração da resistência do concreto.

$$k\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0,6 \quad (2.20)$$

Se o tamanho máximo do agregado é menor que 16 mm,  $k_{dg} = \frac{32}{16+d_g} \geq 0,75$ , caso contrario  $k_{dg} = 1$ . No caso onde a ruptura ocorre passando pela armadura de cisalhamento, a resistência à punção é obtida a partir da Equação 2.21.

$$V_{R,cs} = V_{R,c} + V_{R,s} \geq V_{Ed} \quad (2.21)$$

$$V_{R,c} = k\psi \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \cdot b_o \cdot d_v \quad (2.22)$$

$$V_{R,s} = \sum A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{swd} \cdot \sin \alpha \quad (2.23)$$

$$\sigma_{swd} = \frac{E_s \cdot \psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \cdot \frac{d}{\phi_w}\right) \leq f_{ywd} \quad (2.24)$$

Onde:

$k_{dg}$  : Tamanho máximo do agregado;

$A_{sw}$ : soma da área da seção transversal de todas as armaduras de cisalhamento, que se encontram entre a zona delimitada por  $0, 3d_v$  e  $d_v$  desde a borda do pilar, tal e como pode ser visto na Figura 2.24;

$\alpha$  : Ângulo de inclinação da armadura de cisalhamento;

$\phi_w$ : diâmetro das barras da armadura de cisalhamento;

$f_{bd}$  : Tensão de aderência ao concreto,  $f_{bd} = 3$  MPa, para barras corrugadas;

$f_{ywd}$ : Tensão escoamento da armadura de cisalhamento;

$\sigma_{swd}$ : Tensão que é ativada nas armaduras de cisalhamento;

$\psi$ : radio de rotação da laje;

$V_E$ : carga solicitante;

$m_R$ : momento resistente por unidade de largura da laje;

$E_s$ : módulo de elasticidade do aço;

$r_s$ : Posição onde o momento é zero, medido desde os eixos do apoio da laje;

Para relação de vão  $\frac{L_x}{L_y} = 0,5$  ou  $2$ ,  $r_s = 0,22 \cdot L_x$  ou  $r_s = 0,22 \cdot L_y$ .

As rotações  $\psi$  podem ser calculadas em 4 diferentes “níveis de aproximação”. O nível 1 fornece uma estimativa segura.

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (2.25)$$

O nível 2 fornece uma boa estimativa nos casos em que são consideradas significativas redistribuições dos momentos fletores.

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s} \cdot \left(\frac{V_E/8}{m_R}\right)^{1,5} \quad (2.26)$$

O nível 3 fornece uma melhor estimativa para lajes calculadas por modelo linear-elástico.

$$\psi = 1,2 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s} \cdot \left(\frac{V_E/8}{m_R}\right)^{1,5} \quad (2.27)$$

O nível 4 é utilizado com base em análises não lineares da estrutura, levando em conta os

efeitos da fissuração e enrijecimento, o escoamento das armaduras e outros efeitos não lineares relevantes.

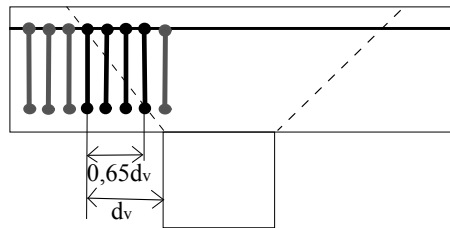


Figura 2.24 – Armadura de cisalhamento ativada na ruptura, *fib MC2010* (2010)

Finalmente é considerado o caso onde a ruptura acontece fora da região com armadura de cisalhamento, e a resistência a punção é obtida mediante o uso da Equação 2.28.

$$V_{Rc,out} = k\psi \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \cdot b_{out} \cdot d_v \quad (2.28)$$

Onde:

$b_{out}$ : Perímetro de controle afastado uma distância de da última camada de *studs* ou armadura de cisalhamento, e calculada de acordo com a Figura 2.25.

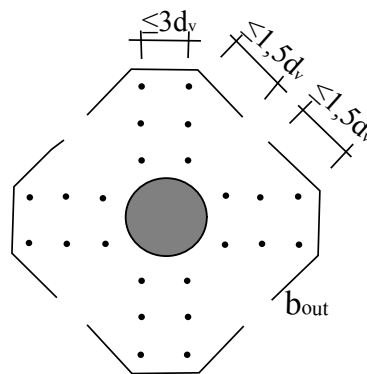


Figura 2.25 – Perímetro  $b_{out}$ , *fib MC2010* (2010)

## 2.5 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES

Para o cálculo da resistência última à flexão das lajes foi usado o método proposto por Guandalini (2009), o qual está fundamentado na ocorrência de charneiras plásticas ao longo das linhas de ruptura, dividindo para este caso a laje em porções rígidas e planas entre linhas de plastificação, ocorrendo o colapso quando as linhas de ruptura formam um mecanismo deformável. A Figura 2.26 mostra o mecanismo de ruptura proposto por Guandalini (2009), e

seguidamente na Equação 2.29 a formulação analítica para o cálculo da carga que produziria a ruptura por flexão das lajes.

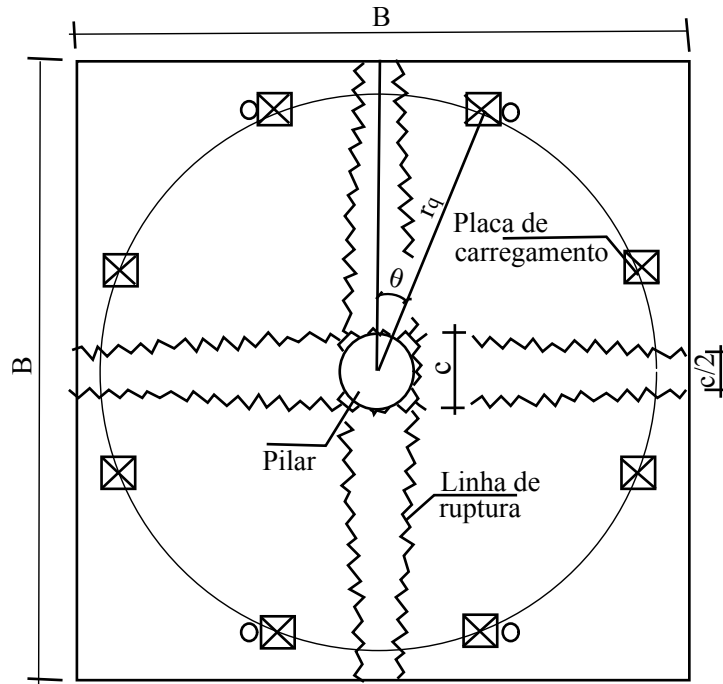


Figura 2.26 – Mecanismo de Ruptura para os modelos ensaiados, Guandalini (2009)

$$V_{flex} = \frac{4 \cdot m_R}{r_q \cdot (\cos \theta + \sin \theta) - c} \cdot \frac{B^2 - B \cdot c - \frac{c^2}{4}}{B - c} \quad (2.29)$$

Sendo:

$m_R$ : momento resistente da seção transversal de laje com largura unitária;

$r_q$ : distância do centro do pilar ao ponto de aplicação da carga;

$B$ : comprimento do modelo de laje;

$c$ : diâmetro do pilar.

Para calcular o momento resistente foi adotada a formulação descrita pela *NBR 6118* (2014), considerando como tensão do concreto o valor de  $0,95f_c$  no lugar de  $0,85f_c$  desconsiderando o efeito *Rüsch* (carga mantida ao longo do tempo) e o aumento de resistência do concreto no tempo devido ao processo de hidratação do cimento.

Para o caso experimental o momento resistente foi calculado como:

$$m_R = 0,95 \cdot f_c \cdot 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot d - 0,4 \cdot d - 0,4 \cdot x \quad (2.30)$$

$$x = \frac{\sum A_s \cdot f_y}{0,95 \cdot f_c \cdot b_w \cdot 0,8} \quad (2.31)$$

Sendo:

$f_c$ : Resistência à compressão do concreto;

$x$ : Profundidade da linha neutra;  
 $b_w$ : Largura unitária de faixa de laje;  
 $d$ : Altura útil da laje;  
 $A_s$ : Área de aço da armadura de flexão tracionada da faixa unitária da laje;  
 $f_y$ : Tensão de escoamento do aço.

## 2.6 - CÁLCULO DA ALTURA ÚTIL E DA TAXA DE ARMADURA DE FLEXÃO EM LAJES *BUBBLEDECK*

O cálculo da altura útil ( $d$ ) foi feito considerando no cálculo a malha superior disposta embaixo da armadura de flexão e que tem como função conter as esferas *Bubbledeck*. A figura 2.27 e a equação 2.32 mostram como foi feito este cálculo.

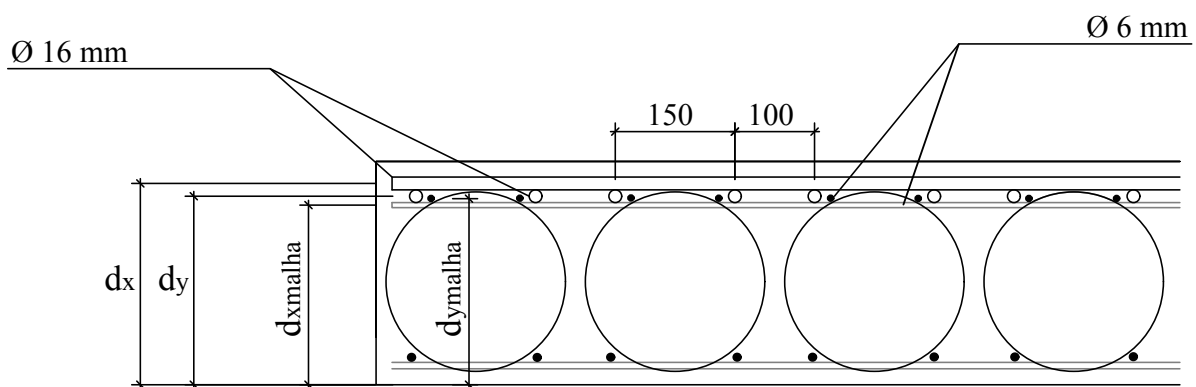


Figura 2.27 – Cálculo da altura útil ( $d$ ), em lajes *Bubbledeck*

$$d = \frac{(d_x + d_y + d_{xmalha} + d_{ymalha})}{4} \quad (2.32)$$

Onde:

$d$ : Altura útil da laje;

$d_x$ : Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra de flexão posicionada na direção  $x$ ;

$d_y$ : Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra de flexão posicionada na direção  $y$ ;

$d_{xmalha}$ : Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra da malha superior posicionada na direção  $x$ ;

$d_{ymalha}$ : Altura medida desde a face inferior da laje até o meio da barra da malha superior posicionada na direção  $y$ .

Para o cálculo da taxa de armadura de flexão ( $\rho$ ) em lajes *Bubbledeck* foram feitas algumas adaptações na forma como este parâmetro é calculado pela *NBR 6118* (2014) e o *EUROCODE 2* (2004), já que estas normas não contemplam este tipo de lajes. A figura 2.27 e a equação 2.38 apresentam as variáveis que influenciam e a forma como foi calculado este parâmetro.

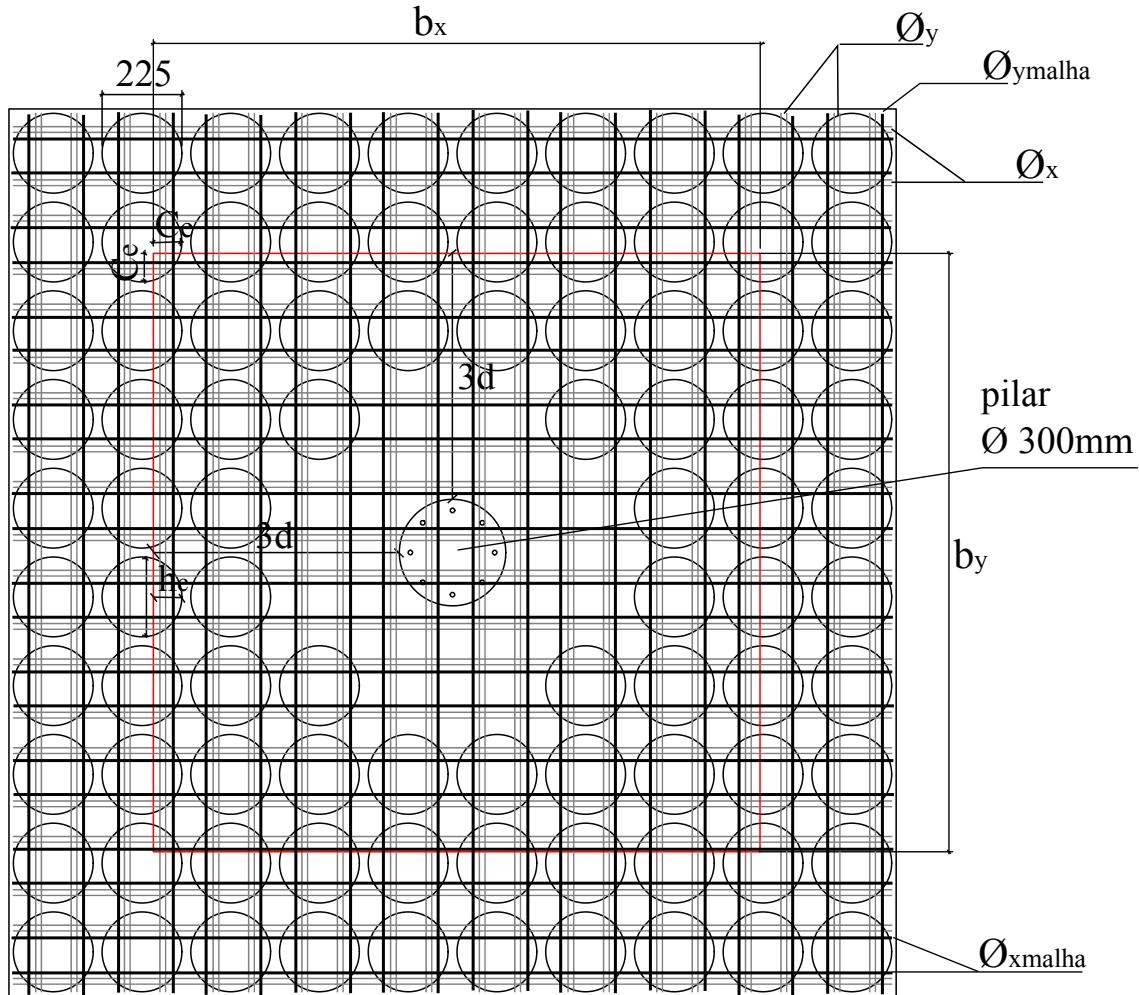


Figura 2.28 – Cálculo da taxa de armadura de flexão ( $\rho$ ), em lajes *Bubbledeck*

$$vol_{sx} = N_x \cdot \frac{\Pi \cdot \phi_x^2}{4} \cdot b_x + N_{xmalha} \cdot \frac{\Pi \cdot \phi_{xmalha}^2}{4} \cdot b_x \quad (2.33)$$

$$vol_{sy} = N_y \cdot \frac{\Pi \cdot \phi_y^2}{4} \cdot b_y + N_{ymalha} \cdot \frac{\Pi \cdot \phi_{ymalha}^2}{4} \cdot b_y \quad (2.34)$$

$$vol_{macico} = b_x \cdot b_y \cdot h - \left( N_{esf} \cdot \frac{\Pi \cdot \phi_{esf}^2}{4} + N_c \cdot \frac{1}{3} \cdot \Pi \cdot h_c^2 \cdot (3 \cdot r - h_c) + 4 \cdot \frac{c_e^2}{2} \cdot \phi_{esf} \right) \quad (2.35)$$

$$\rho_x = vol_{sx} / vol_{macico} \quad (2.36)$$

$$\rho_y = vol_{sy}/vol_{macico} \quad (2.37)$$

$$\rho = \frac{\rho_x + \rho_y}{2} \quad (2.38)$$

Onde:

$vol_{sx}$ : Volume de aço total contido na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar na direção  $x$  ;

$vol_{sy}$ : Volume de aço total contido na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar na direção  $y$  ;

$vol_{macico}$ : Volume maciço contido na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar nas direções  $x$  e  $y$ ;

$N_x$ : Número de barras de flexão na direção  $x$  contidas na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar;

$N_y$ : Número de barras de flexão na direção  $y$  contidas na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar;

$N_{xmalha}$ : Número de barras da malha superior na direção  $x$  contidas na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar;

$N_{ymalha}$ : Número de barras da malha superior na direção  $y$  contidas na área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar;

$\phi_x$ : Diâmetro das barras de flexão na direção  $x$ ;

$\phi_y$ : Diâmetro das barras de flexão na direção  $y$ ;

$\phi_{xmalha}$ : Diâmetro das barras da malha superior na direção  $x$ ;

$\phi_{ymalha}$ : Diâmetro das barras da malha superior na direção  $y$ ;

$b_x$ : Comprimento na direção  $x$  da área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar;

$b_y$ : Comprimento na direção  $y$  da área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar;

$h$ : Espessura da laje;

$N_e$ : Número de esferas completas dentro da área gerada pelo perímetro afastado  $3d$  da face do pilar;

$\phi_{esf}$ : Diâmetro das esferas *Bubbledeck*;

$N_c$ : Número de calotas geradas pela intercepção do perímetro afastado  $3d$  da face do pilar e as esferas *Bubbledeck*;

$h_c$ : Altura das calotas;

$r$ : Raio das esferas *Bubbledeck*;

$c_e$ : Comprimento geradas pela intercepção do perímetro afastado  $3d$  da face do pilar e as esferas *Bubbledeck* nas esquinas desta área;

$\rho_x$ : Taxa de armadura de flexão na direção  $x$ ;

$\rho_y$ : Taxa de armadura de flexão na direção  $y$

### 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 - CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS

Os ensaios em escala real de lajes apresentam muitos obstáculos entre os quais podemos destacar os elevados custos e o árduo trabalho necessário para obter os resultados desejados. Os modelos experimentais locais entretanto simulam o comportamento da estrutura para determinadas condições, e permitem conseguir de maneira simplificada os dados necessários para as análises.

Nesta pesquisa, foram construídos e, posteriormente, ensaiados à punção no laboratório de Estruturas da UnB, seis modelos locais de ligação laje-pilar interno submetidos a carregamento simétrico. O modelo local representa a região de momentos negativos de um pilar interno, em um pavimento de geometria e carregamento simétrico, com vãos de 5,7m entre pilares. A região é limitada por pontos de momentos nulos, a qual corresponde um valor próximo a 0,22 do vão entre pilares (Figura 3.1).

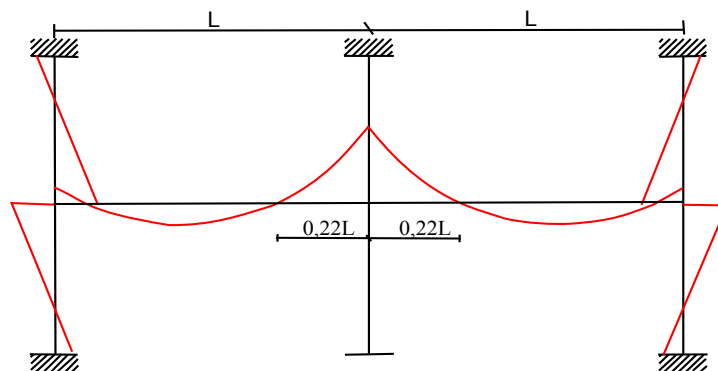


Figura 3.1 – Situação da laje estudada ,Lima (2015)

Cinco dos seis modelos testados, foram construídos como lajes *Bubbledeck*, variando-se os seguintes parâmetros na sua confecção:

- uso ou não de armadura de cisalhamento na região maciça (*studs*);
- uso ou não de treliça nas nervuras;
- inclinação das treliças.

Os resultados obtidos destes testes foram comparados com um sexto modelo construído como laje maciça e usado como referência. As características das lajes ensaiadas são apresentadas na



Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características das lajes ensaiadas

Laje	$d$ (cm)	$\rho$	Tipo	Armadura de cisalhamento	
				Região maciça	Nervuras
RSP-A01	231	0,0068	Maciça	Pino( <i>Stud</i> ) em cruz	-
BD-A01	236	0,0083	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	Pino( <i>Stud</i> ) em cruz	-
BD-A02	241	0,0081	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	Pino( <i>Stud</i> ) em cruz	Treliças com inclinação de 60°
BD-A03	243	0,0080	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	Pino( <i>Stud</i> ) em cruz	Treliças com inclinação de 45°
BD-A04	242	0,0081	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	-	Treliças com inclinação de 60°
BD-A05	244	0,0080	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	-	Treliças com inclinação de 45°

A Figura 3.2, 3.3 e 3.4 mostram um esquema com as dimensões em planta e seção transversal das seis lajes ensaiadas, apresentado além disso a distribuição da armadura de cisalhamento usada na região maciça e/ou nas nervuras, e a posição dos pontos de aplicação das cargas.

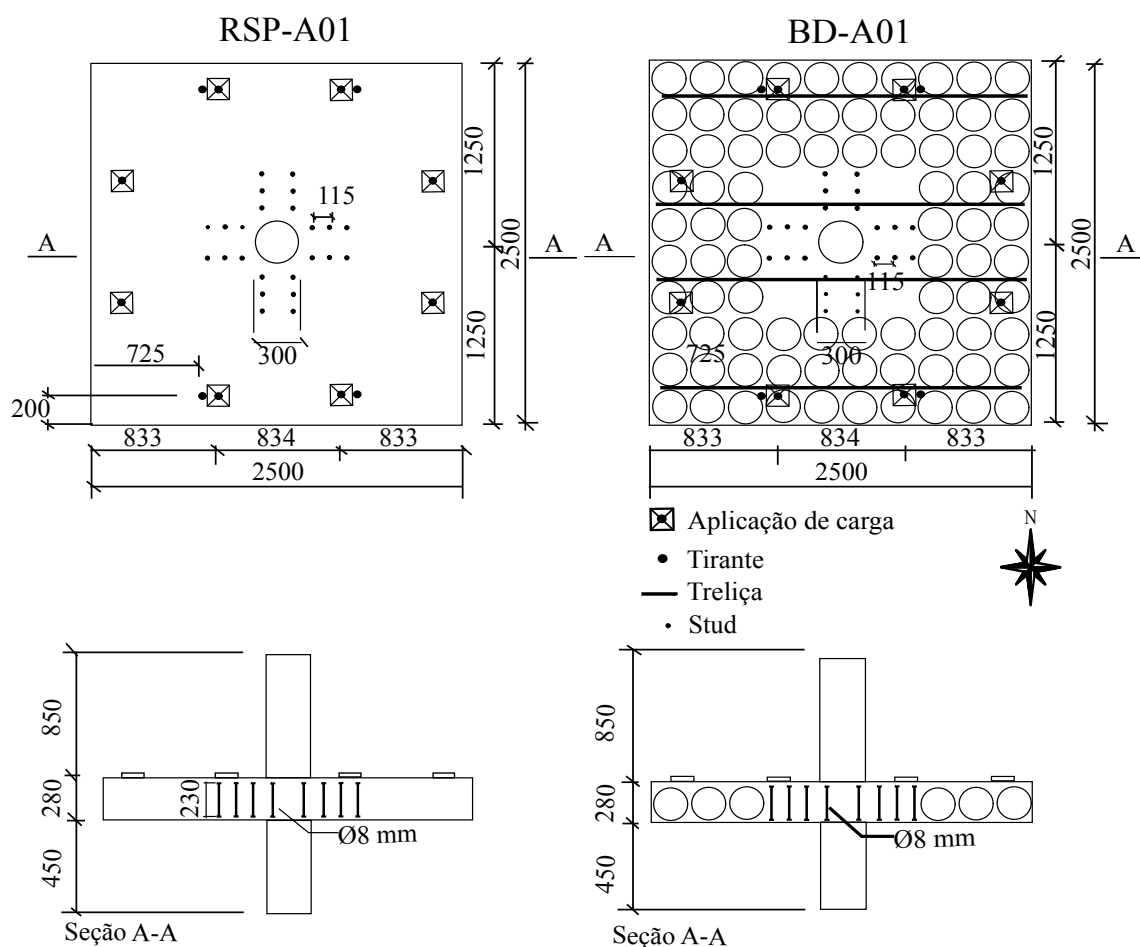


Figura 3.2 – Dimensões das lajes ensaiadas, medidas em mm

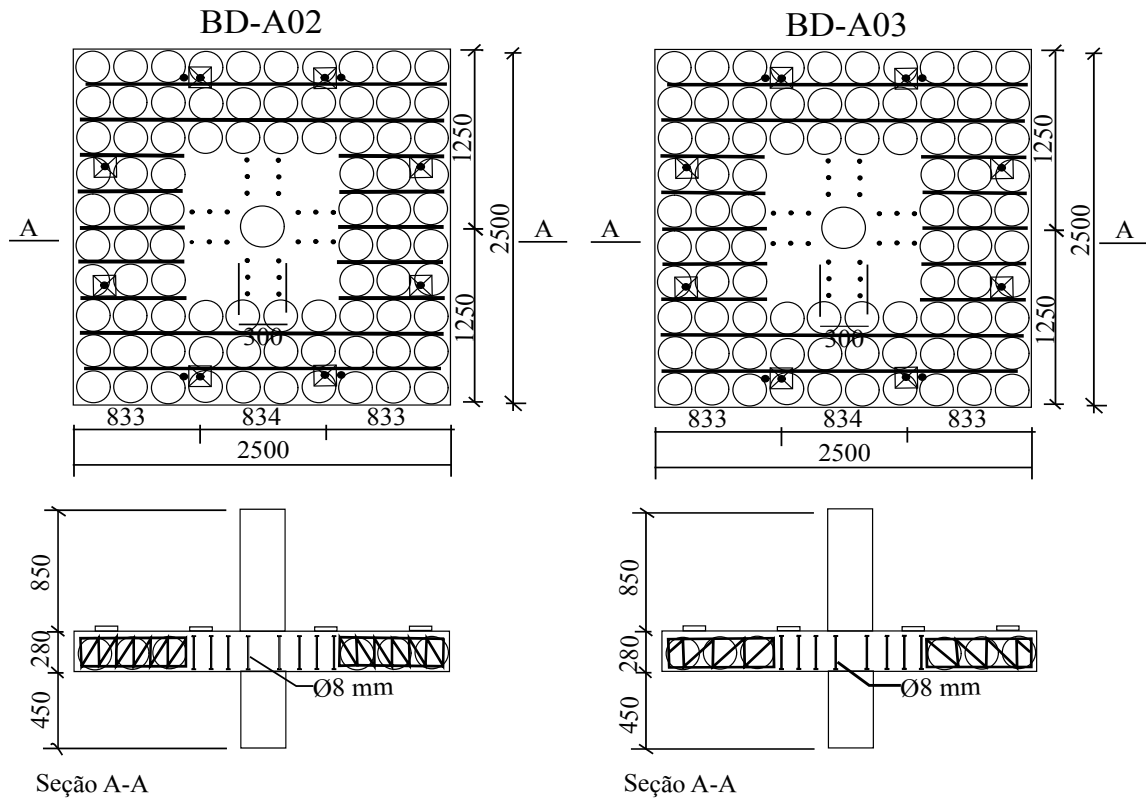


Figura 3.3 – Dimensões das lajes ensaiadas (continuação), medidas em mm

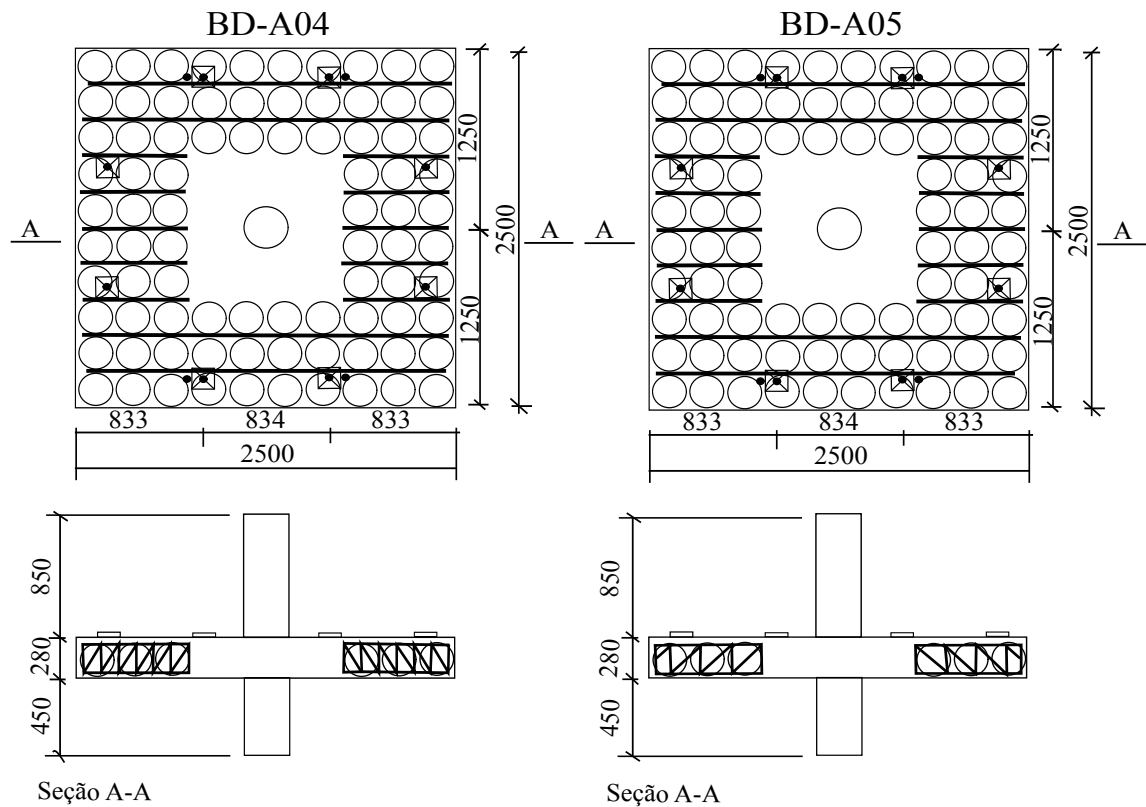


Figura 3.4 – Dimensões das lajes ensaiadas (continuação), medidas em mm

## 3.2 - DETALHAMENTO DAS ARMADURAS

### 3.2.1 - Armadura de flexão

A armadura de flexão principal foi fabricada com barras de 16 mm (aço CA50) com espaçamento variando entre 100 mm e 150 mm alternadamente. De igual maneira foram feitos os reforços nas bordas das lajes com barras de 16 mm (aço CA50). Ver Figura 3.5, Figura 3.6, e Figura 3.7.

Todas as lajes ensaiadas tiveram uma armadura especial que foi confeccionada com duas telas de aço, uma malha superior feita com barras de 6,0 mm de diâmetro e uma malha inferior com barras de 8,0 mm de diâmetro, ambos com aço CA60 e igual espaçamento que a armadura de flexão principal, cuja função foi conter as bolas *Bubbledeck*.

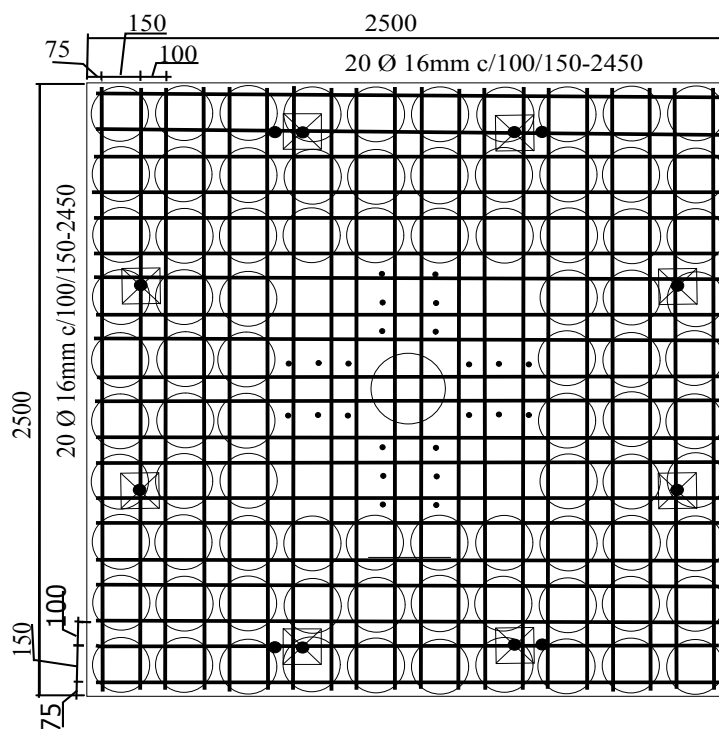


Figura 3.5 – Detalhe da armadura de flexão, medidas em mm

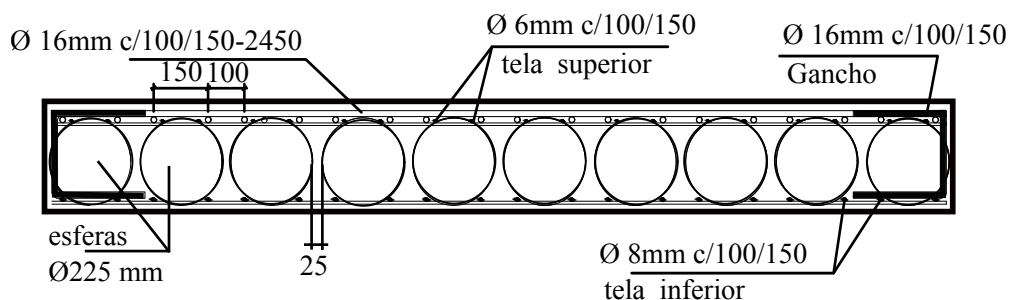


Figura 3.6 – Detalhe da armadura de flexão, seção transversal, medidas em mm



Figura 3.7 – Armadura de flexão laje RSP-A01

### 3.2.2 - Armadura dos pilares

A armadura dos pilares foi composta por 8 barras longitudinais de aço CA50 com 12,5 mm de diâmetro e 15 estribos de aço CA50 com 8,0 mm de diâmetro espaçados a cada 100 mm. Ver Figura 3.8 e Figura 3.9.

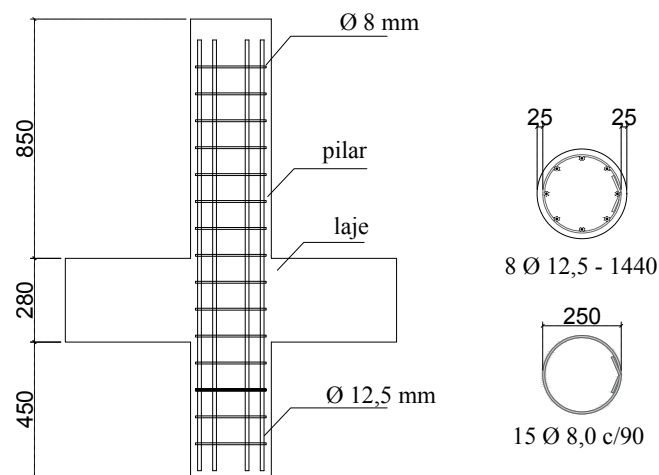


Figura 3.8 – Detalhe armadura dos pilares, medidas em mm



Figura 3.9 – Armadura dos pilares

### 3.2.3 - Armaduras de cisalhamento

Apenas na região maciça das lajes RSP-A01, BD-A01, BD-A02, e BD-A03 se empregou *studs* como armadura de cisalhamento, adotando-se uma distribuição em cruz e *studs* com 8.0 mm de diâmetro e aço CA50.

Os *studs* ficaram separados a 115 mm entre eles e 110 mm da face do pilar, a armadura de cisalhamento foi disposta em três camadas de oito *studs* cada uma, proporcionando uma área de aço de 402 mm<sup>2</sup> por camada, ver Figura 3.10 e Figura 3.11.

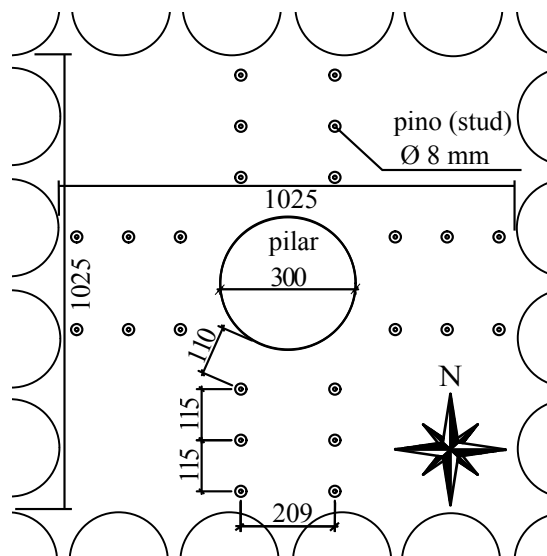


Figura 3.10 – Arranjo armadura de cisalhamento, medidas em mm

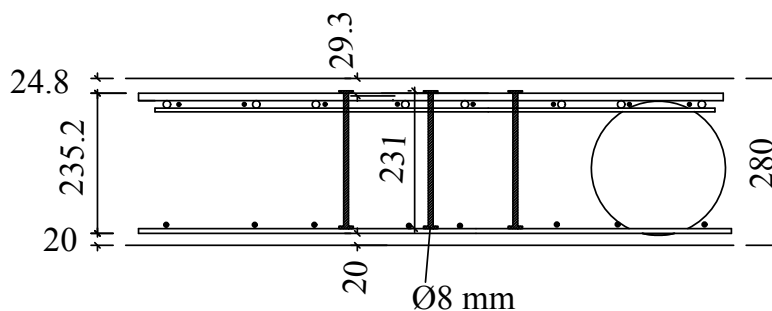


Figura 3.11 – Detalhamento *Studs* das lajes RSP-A01, BD-A01, BD-A02, e BD-A03, medidas em mm

As armaduras de cisalhamento para as quatro lajes desta pesquisa nas quais se empregou este tipo de reforço (*studs*), foram fabricadas no laboratório de mecânica da Universidade de Brasília, o processo criado consistiu de fatiar barras de aço com diâmetro aproximadamente igual a  $3\phi_w$ , mantendo-se uma espessura constante de 10 mm. Depois de fatiadas, essas “bolachas” de aço eram furadas e as barras de aço que iriam formar o corpo do stud eram

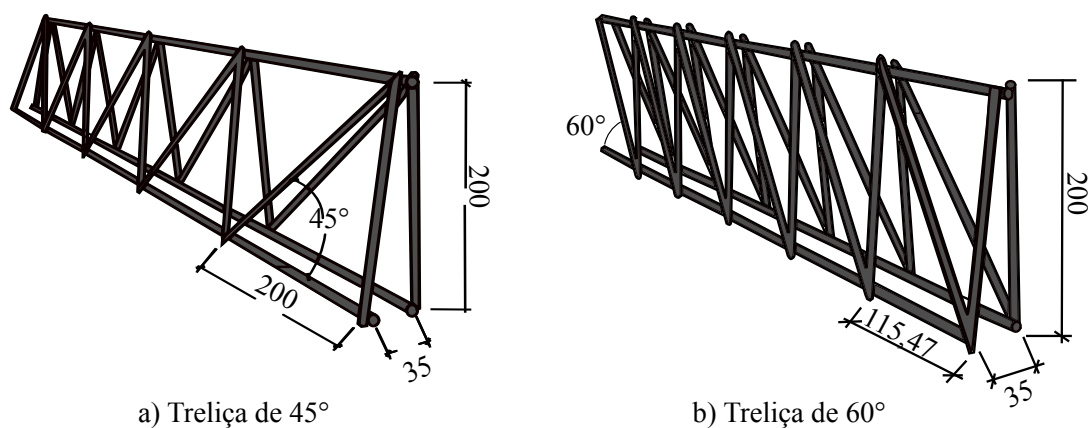
instaladas. Posteriormente, utilizando-se um processo de soldagem MIG, as barras de aço eram unidas com as cabeças de ancoragem. Os studs eram então unidos em grupos de três elementos através de barras chatas de aço e eram instalados após a montagem das armaduras de flexão, como pode ser observado na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Armadura de cisalhamento (*studs*)

### 3.2.4 - Treliças

Com o propósito de combater os esforços cisalhantes produzidos nas nervuras, e aumentar a capacidade resistente à punção das lajes *Bubbledeck*, foram propostas e empregadas dois tipos de treliças, ver Figura 3.13. Elas foram fabricadas no próprio laboratório de estruturas da UnB conforme mostrado na Figura 3.14. Para isso usou-se aço CA50 com um diâmetro de 6,3 mm.



a) Treliça de 45°

b) Treliça de 60°

Figura 3.13 – Tipos de treliças usadas, medidas em mm



Figura 3.14 – Fabricação de treliças no laboratório de estruturas da UnB

As treliças apresentaram as seguintes características: altura de 200 mm, comprimento variando entre 0,7 m e 2,4 m, e espaçamento entre eixos dos nós, variando de 200 mm para as treliças com uma inclinação de 60° e 115,47 mm para as treliças com uma inclinação de 45°, de acordo com a Figura 3.15 e Figura 3.16.

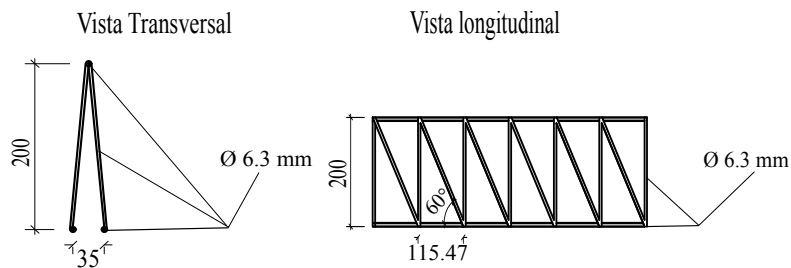


Figura 3.15 – Detalhamento treliças com inclinação de 60°, medidas em mm

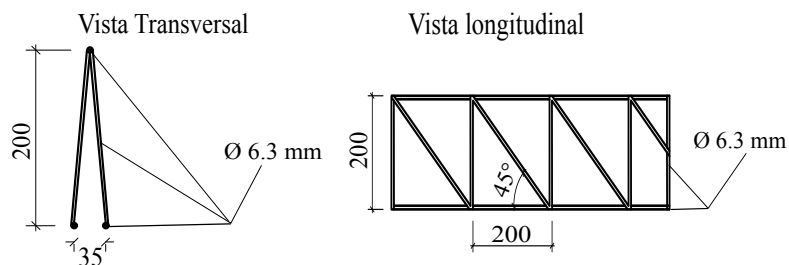


Figura 3.16 – Detalhamento treliças com inclinação de 45°, medidas em mm

Essas treliças foram colocadas exclusivamente na direção x das nervuras das lajes BD-A02, BD-A03, BD-A04 e BD-A05, uma vez que as outras duas lajes foram usadas como lajes de

referência. A laje RSP-A01, constituiu uma laje maciça, enquanto que a laje BD-A01, foi uma laje *Bubbledeck* confeccionada usando os padrões da *Bubbledeck internacional*.

Já para as outras lajes a distribuição das treliças foi feita da seguinte maneira: Nas lajes BD-A02 e BD-A04 usou-se somente treliças com uma inclinação de  $60^\circ$ , enquanto que nas lajes BD-A03, e BD-A05, utilizou-se treliças com uma inclinação de  $45^\circ$ , Ver Figura 3.17 e Figura 3.18.

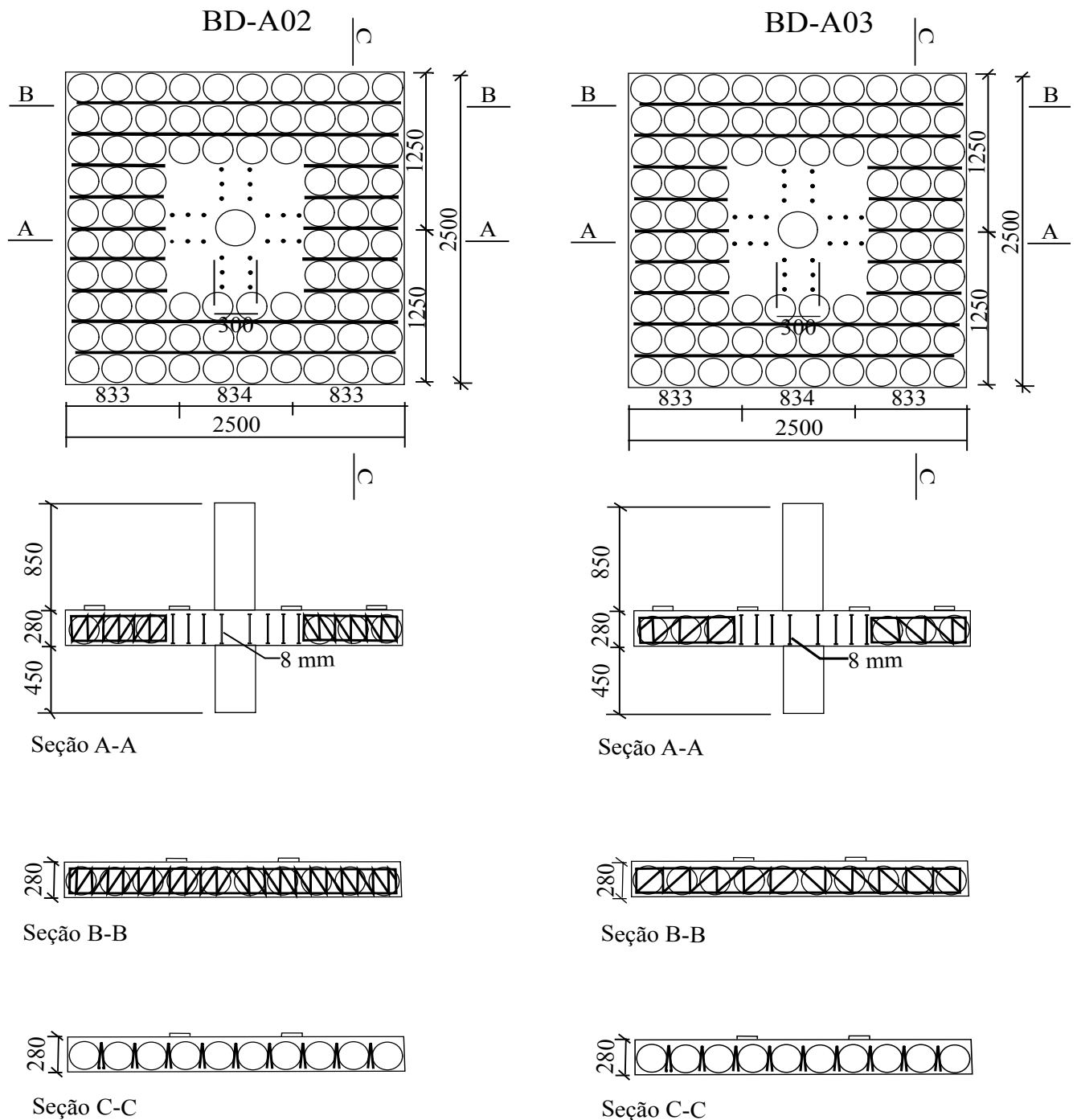


Figura 3.17 – Distribuição das treliças nas lajes BD-A02, e BD-A03



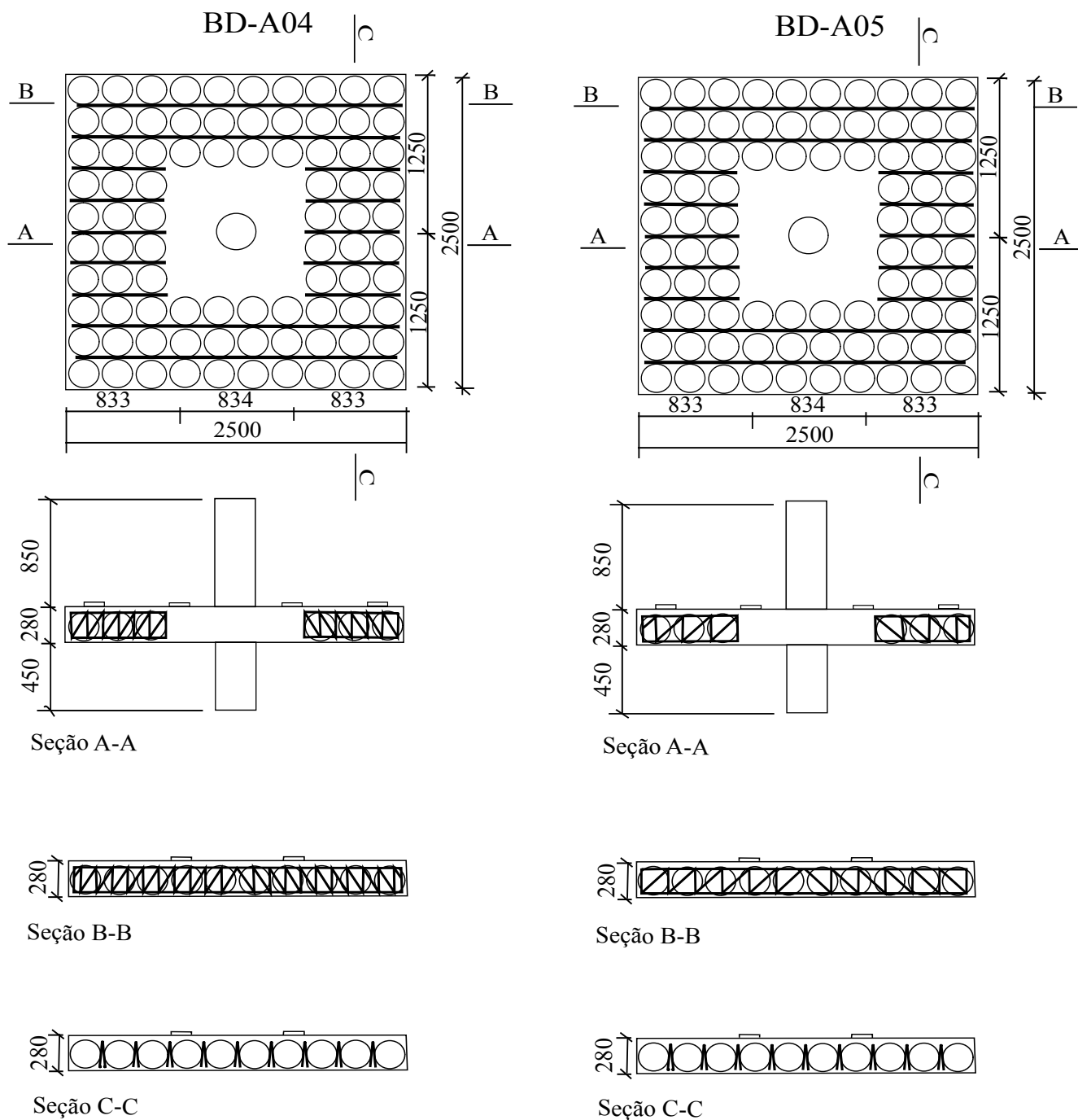


Figura 3.18 – Distribuição das treliças nas lajes BD-A04, e BD-A05

### 3.3 - INSTRUMENTAÇÃO

#### 3.3.1 - Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais das lajes durante os ensaios foram medidos em doze pontos seleccionados previamente e localizados na face superior de cada uma delas. Para isso usou-se

LVDT's (transdutores de variação de deslocamento linear) da marca *HBM*, com leitura máxima de 50 mm e precisão de 0,01 mm e posicionados no meio do vão nas direções principais (Norte-Sul, Leste-Oeste). Seis LVDT's foram posicionados na direção Norte-Sul, enquanto que os seis LVDT's restantes estiveram posicionados na direção Leste-Oeste. A Figura 3.19 mostra o posicionamento dos LVDT's nas lajes, indicados pela letra L.

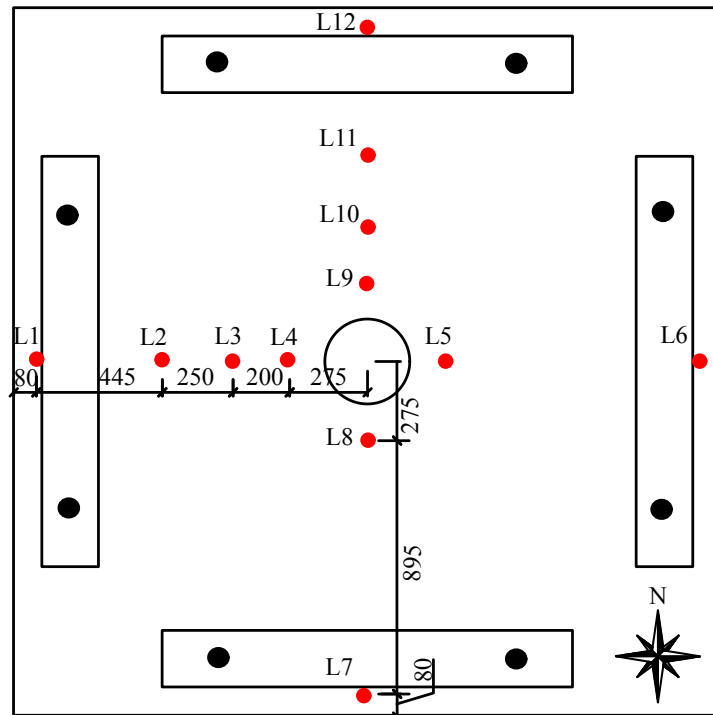


Figura 3.19 – Detalhe do posicionamento dos LVDT's, medidas em mm

Os LVDT's tiveram o mesmo posicionamentos nas seis lajes e foram fixados com o auxílio de bases magnéticas em perfis metálicos, que por sua vez estiveram apoiados sobre um cavalete metálico, a fim de não gerar dependência em relação ao sistema de ensaio e evitar erros nas leituras dos deslocamentos. Ver Figura 3.20



Figura 3.20 – Posicionamento dos LVDT's na superfície superior das lajes

### 3.3.2 - Deformações na armadura de flexão

A fim de monitorar o comportamento à flexão e medir as deformações sofridas pelo aço durante os ensaios, foram instrumentadas sete barras de flexão em cada uma das lajes a fim de auxiliar na classificação do modo de ruptura. Três barras foram instrumentadas no quadrante leste, e quatro no quadrante norte. Neste monitoramento utilizou-se extensômetros elétricos da marca EXCEL SENSORES tipo PA-06-125AA-120-L, empregando dois extensômetros por barra, aqui denominados pelas letras EF seguidas de um número ( Figura 3.21) os quais foram conectados a um sistema de aquisição de dados. Para obter a deformação de cada armadura, foi feita uma média aritmética das leituras dos dois extensômetros.

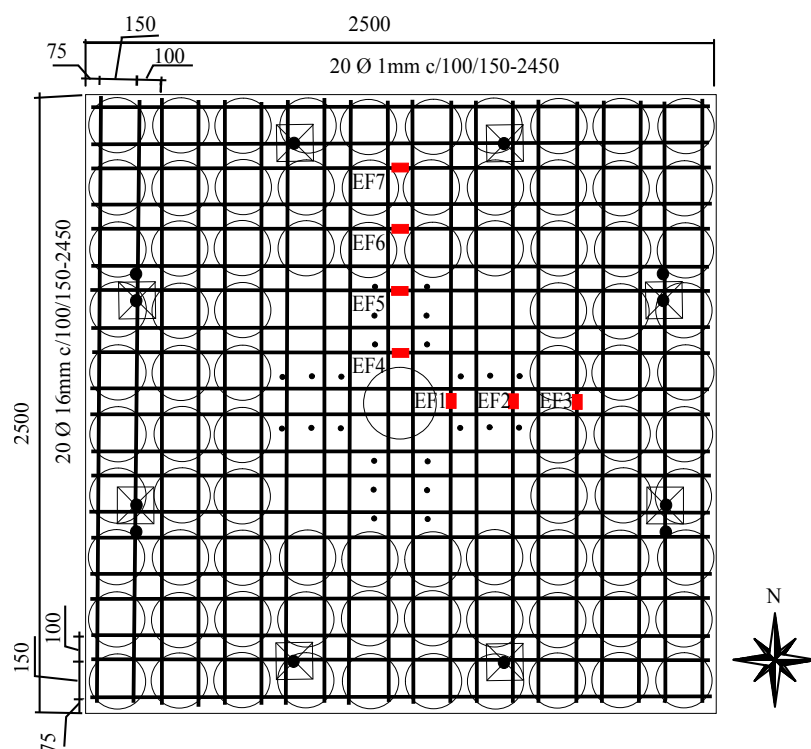


Figura 3.21 – Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão, medidas em mm

A sequência de fixação dos extensômetros nas barras, começou com a regularização da superfície (retirando as nervuras das barras sem retirar a seção nominal das mesmas). Logo foi feita uma limpeza com álcool com a finalidade de remover as impurezas presentes nas barras. Em seguida se continuou com a colagem dos extensômetros com auxílio de adesivo a base de cianocrilato. Depois foi feita a proteção do extensômetro mediante o uso de um adesivo a base de resina epóxi, e finalmente se fez a ligação dos extensômetros ao cabo flexível, o qual era conectado ao *SPIDER 8*. Essa última ligação era protegida através de fita isolante de auto fusão. A Figura 3.22 e Figura 3.23 mostram, respectivamente a sequência de fixação dos extensômetros e as armaduras de flexão posicionadas para uma das lajes confeccionadas.

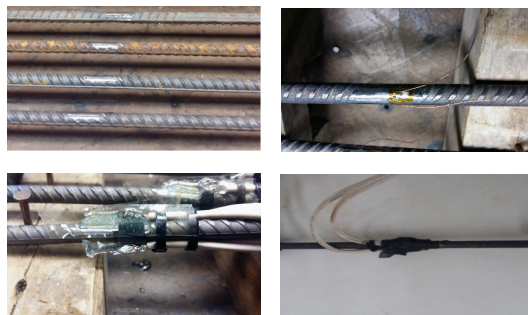


Figura 3.22 – Sequência de fixação do extensômetro na barra



Figura 3.23 – Armadura de flexão

### 3.3.3 - Deformações na armadura de cisalhamento

Para medir as deformações nas armaduras de cisalhamento foi usado o mesmo modelo de extensômetros (PA-06-125AA-120-L) e o mesmo procedimento para seu posicionamento que nas armaduras de flexão. Igualmente foram empregados dois extensômetros por *stud*, e dispostos no meio deste, tal como se pode observar na Figura 3.24 e Figura 3.25.

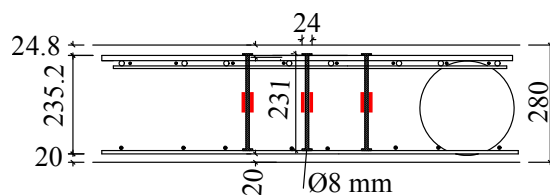


Figura 3.24 – Instrumentação dos *studs*, medidas em mm



Figura 3.25 – Armaduras de cisalhamento instrumentadas

Foram Instrumentados seis *studs* por laje, três na direção norte e três na direção leste, e foram marcados para sua identificação pelas letras EP seguida de um número. A Figura 3.26 mostra o detalhe do posicionamento dos extensômetros nos *studs* nas lajes RSP-A01, BD-A01, BDA-02, e na laje BDA-03. Somente as lajes RSP-A01, BD-A01, BDA-02, e a laje BD-A03 foram reforçadas com armadura de cisalhamento na região maciça.

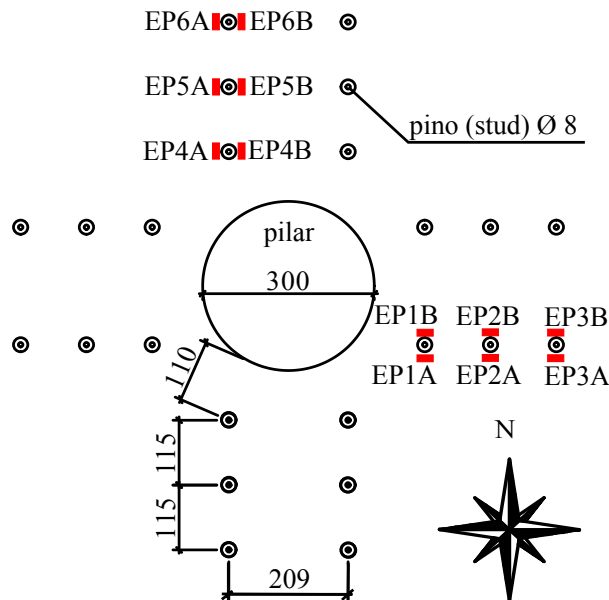


Figura 3.26 – Detalhe posicionamento extensômetros na armadura de cisalhamento na região maciça, lajes RSP-A01, BD-A01, BDA-02, e BDA-03

Para monitorar as deformações nas treliças foram utilizados extensômetros do mesmo modelo que os usados nas armaduras de flexão e cisalhamento (PA-06-125AA-120-L). Para isto utilizou-se apenas um extensômetro por barra, sendo posicionado a meia altura em uma das diagonais tracionadas da treliça, ver Figura 3.27.



Figura 3.27 – Armaduras de cisalhamento instrumentadas

Só as lajes BD-A02, BD-A03, BDA-04, e a laje BDA-05 foram reforçadas com treliças nas nervuras, e a identificação dos extensômetros usados em cada uma delas foi feita mediante o uso das letras ET seguidas de um número, conforme mostrado na Figura 3.28, Figura 3.29, Figura 3.30 e Figura 3.31.

BD-A02

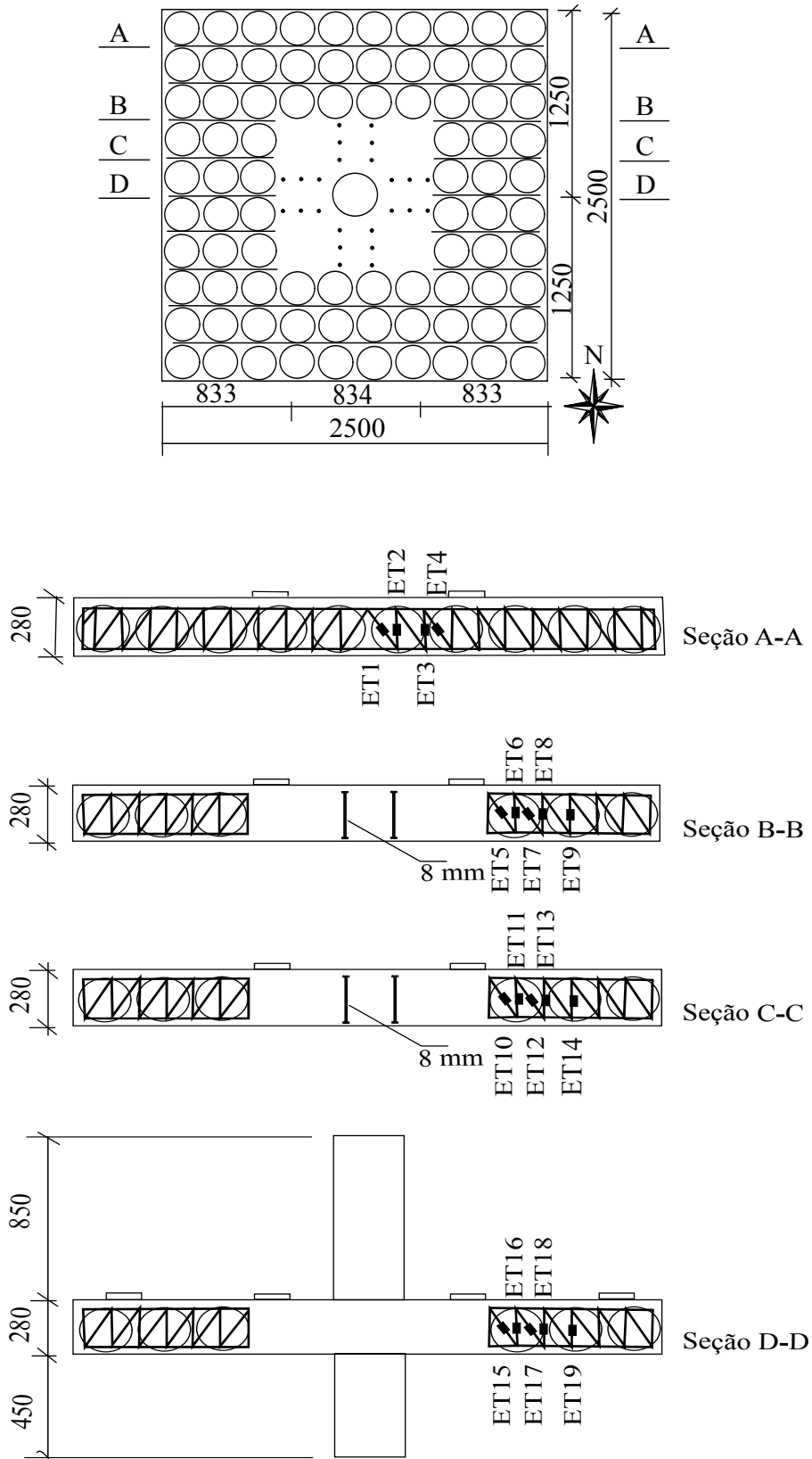


Figura 3.28 – Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A02

BD-A03

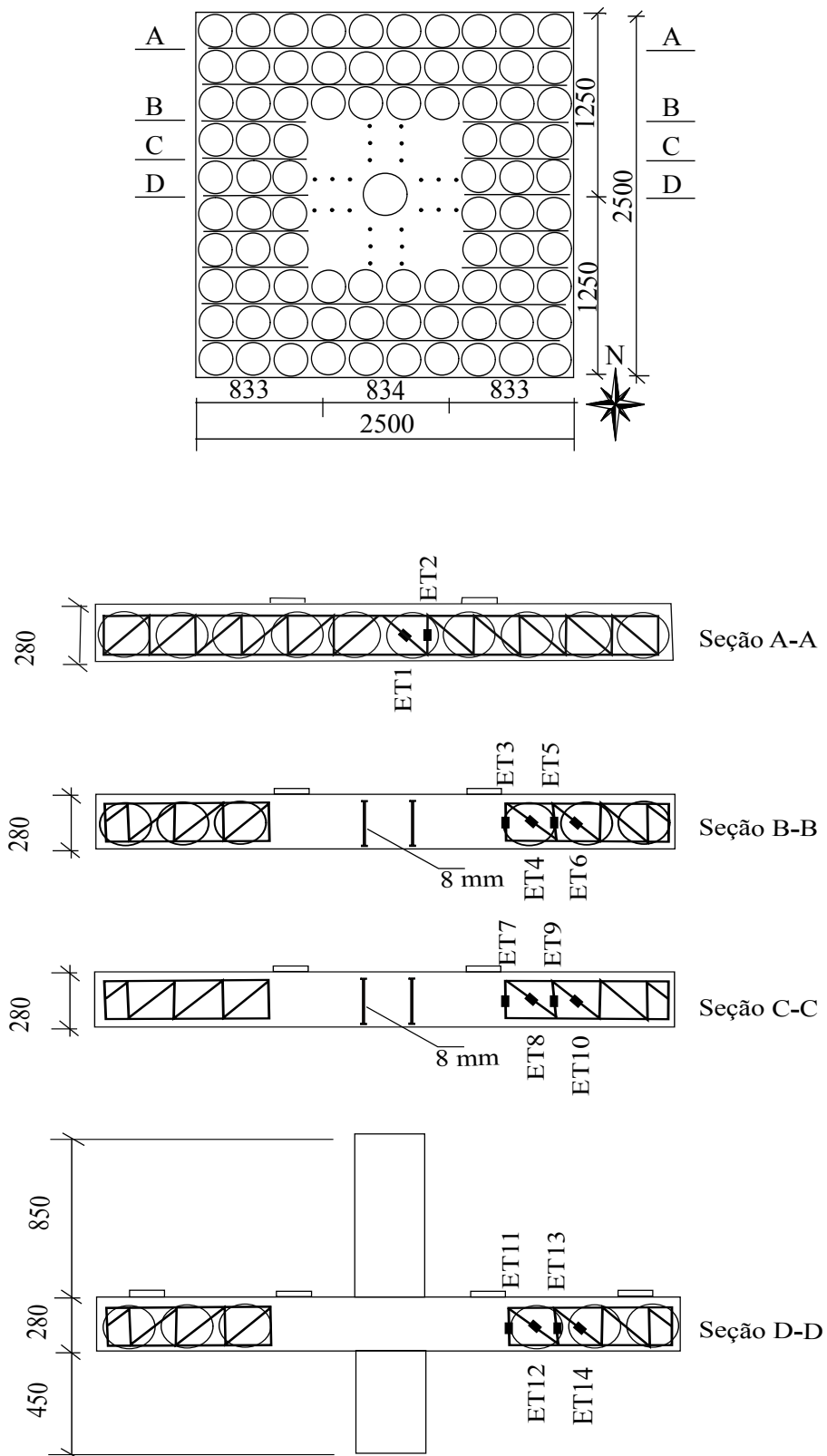


Figura 3.29 – Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A03

BD-A04

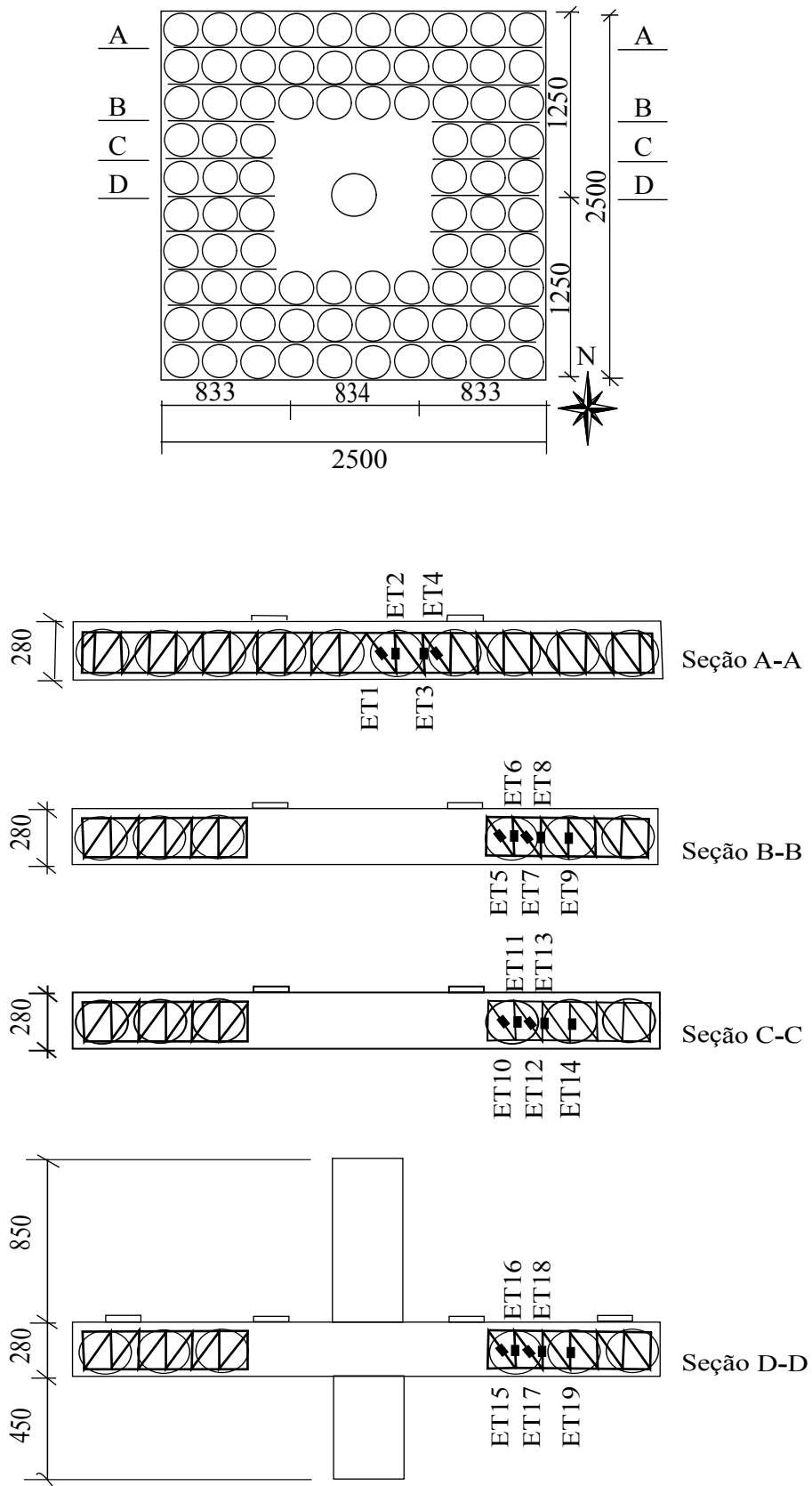


Figura 3.30 – Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A04



BD-A05

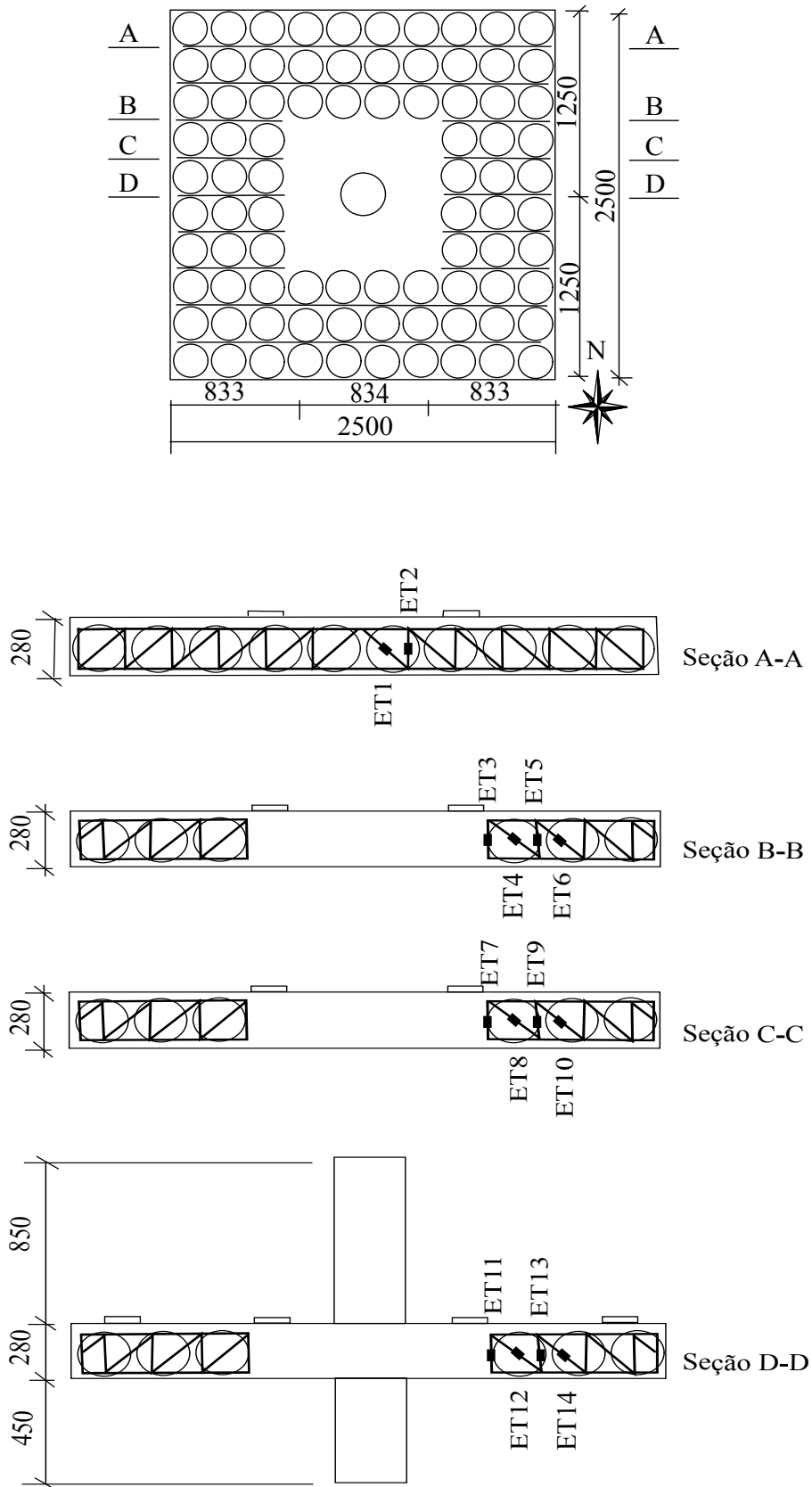


Figura 3.31 – Posicionamento dos extensômetros nas treliças da laje BD-A05

### 3.3.4 - Deformações no concreto

Para medir as deformações no concreto, foram utilizados extensômetros da marca Excel sensores, modelo PA-06-1500BA-120-L. Para cada laje usou-se quatro extensômetros, denominados pelas letras EC seguidas de um número, sendo dois para registrar as deformações tangenciais e dois para registrar as deformações radiais, tal como pode ser visto na Figura 3.32.

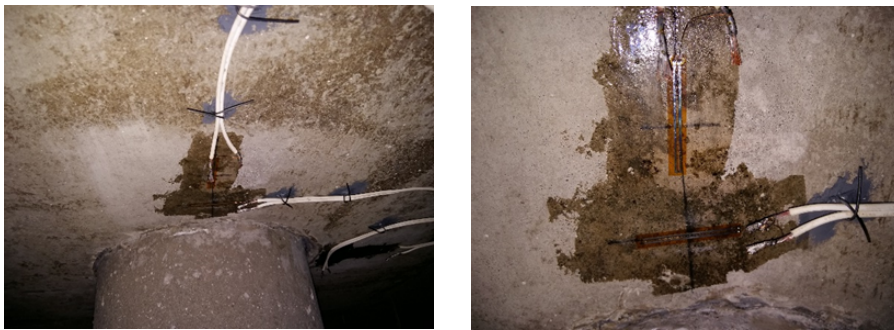


Figura 3.32 – Posicionamentos dos extensômetros no concreto

Os extensômetros foram fixados na superfície inferior das lajes, próximos dos pilares onde esperou-se encontrar as maiores deformações. A Figura 3.33 mostra a instrumentação utilizada em todas as lajes.

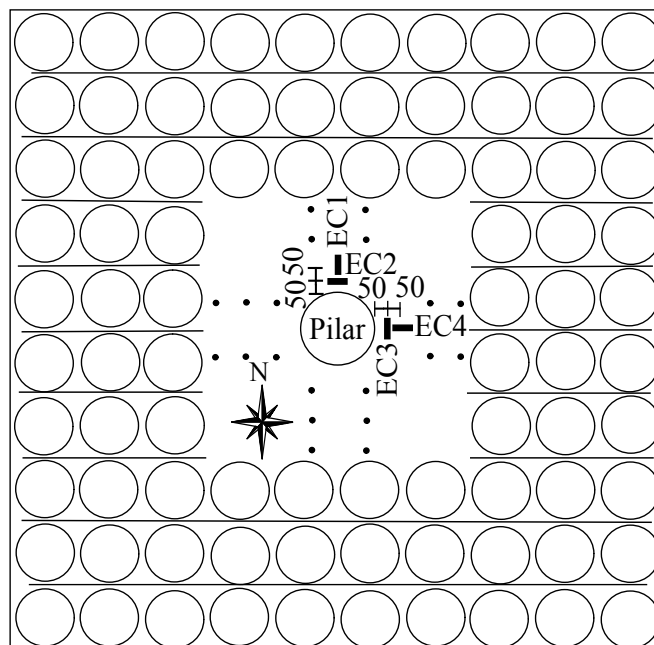


Figura 3.33 – Instrumentação concreto, medidas em mm

## 3.4 - FABRICAÇÃO DOS MODELOS LOCAIS

### 3.4.1 - Formas

Para a confecção das lajes foram utilizadas formas metálicas fabricadas no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília, tal e como pode-se observar na Figura 3.34. Enquanto que para os pilares circulares foram empregados tubos de PVC com um diâmetro de 300 mm. Antes de cada concretagem as formas receberam uma camada de desmoldante, com a finalidade de facilitar o processo de desforma, além de servir como proteção das mesmas e garantir seu reuso em futuras concretagens.



Figura 3.34 – Formas metálicas usadas na concretagem das lajes

### 3.4.2 - Concretagem

Foram feitas duas concretagens, a primeira foi realizada o dia 4 de novembro do 2016 onde se concretou as lajes BD-A01 e a laje BD-A04, enquanto que a outra concretagem foi feita o dia 06 de dezembro do 2016 concretando as lajes restantes (lajes BD-A02, BD-A03, BD-A05 e a laje RSP-A01).

Antes de iniciar a concretagem realizou-se o ensaio de abatimento de cone, com o objetivo de verificar a consistência inicial do concreto. Em seguida o concreto foi bombeado até as formas, ao mesmo tempo que o adensamento era realizado com ajuda de um vibrador de imersão. Depois as superfícies das lajes foram regularizadas e por fim, após a concretagem iniciou-se com o processo de curado, este processo iniciou quatro horas depois de terminada a concretagem, molhando totalmente as superfícies das lajes com uma frequência de três vezes ao dia durante sete dias. A Figura 3.35 mostra as etapas da concretagem e cura das lajes.



Figura 3.35 – Etapas da concretagem e cura das lajes

### 3.5 - SISTEMA DE ENSAIO

Os ensaios das lajes desta pesquisa foram feitos no pórtyco de reação existente no laboratório de estruturas da Universidade de Brasília, como mostrado na Figura 3.36. Os carregamentos foram aplicados de cima para baixo na face superior das lajes de maneira simétrica e uniforme mediante o uso de quatro cilindros hidráulicos. A distribuição do carregamento nas lajes foi feita utilizando quatro vigas metálicas, cada uma delas com dois pontos de apoio, para um total de oito pontos de aplicação de carga por laje.

Na primeira etapa do ensaio aplicou-se um carregamento com um incremento de 20 kN para cada passo de carga até atingir os 400 kN. A partir dos 400 kN e até a ruptura das lajes, o carregamento de cada passo de carga teve um incremento de 40 kN.



Junto com cada um dos cilindros hidráulicos foi disposta uma célula de carga para poder determinar a magnitude do carregamento aplicado. Essas leituras foram feitas mediante o uso de indicadores digitais. As células de carga tinham capacidade de 500 kN e as mesmas foram fabricadas pela empresa *HBM*, enquanto que os cilindros hidráulicos utilizados foram da marca *ENERPAC* e possuíam capacidade de 500 kN.

Para a aquisição dos dados fornecidos pelos LVDTs e os extensômetros nas armaduras de flexão, nas armaduras de cisalhamento (studs), nas treliças e no concreto foi utilizado o sistema *Spider 8* (modelos SR30 e SR55) em conjunto com o *software CATMAN*. Ver Figura 3.37.



Figura 3.36 – Sistema de ensaio, Pórtico de Reação



Figura 3.37 – Sistema de aquisição de dados

## 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, referente aos seis modelos propostos nesta pesquisa. Inicialmente são expostos os resultados de caracterização dos materiais (concreto e aço), assim como as leituras dos deslocamentos verticais, deformações do concreto, deformações nas armaduras de flexão, deformações nos *studs*, deformações nas treliças, padrão de fissuração, e finalmente são mostradas as cargas e os modos de ruptura observados nos ensaios.

### 4.1 - PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 - Concreto

Para a determinação das propriedades mecânicas do concreto utilizado na confecção das lajes, realizou-se ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Estes ensaios foram feitos seguindo as recomendações das normas brasileiras de referência *ABNT NBR 5739* (2007), *ABNT NBR 8522* (2008) e da *ABNT NBR 7222* (2011). Para cada concretagem moldou-se nove corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm assim: três corpos de prova para calcular a resistência à compressão, três corpos de prova para obtenção da resistência à tração, e por fim três corpos de prova para o cálculo do módulo de elasticidade. A Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 mostram respectivamente os ensaios de compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, realizados no laboratório de materiais da Universidade de Brasília. Os valores médios das propriedades mecânicas do concreto utilizado para fabricação dos modelos, nas idades de controle, são apresentados na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2.

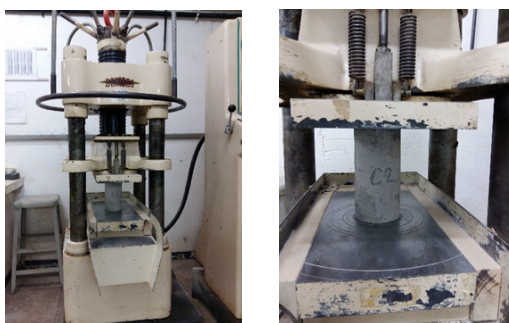


Figura 4.1 – Ensaio de compressão



Figura 4.2 – Ensaio de tração por compressão diametral



Figura 4.3 – Ensaio de módulo de elasticidade

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto, concretagem 04 novembro do 2016 (lajes BD-A01 e a BD-A04)

CP	Tipo de ensaio	Idade Dias	$f_c$ MPa	$f_{ct}$ MPa	$E_{ci}$ GPa
CP1	Compressão	41	28	-	-
CP2	Compressão	41	31	-	-
CP3	Compressão	41	29	-	-
CP4	Tração	41	-	3,19	-
CP5	Tração	41	-	2,79	-
CP6	Tração	41	-	3,23	-
CP7	Módulo de elasticidade	47	-	-	30
CP8	Módulo de elasticidade	47	-	-	30
CP9	Módulo de elasticidade	47	-	-	31
Média			29	3,07	30
Desvio padrão			1,42	0,24	0,66
C.V (%)			4,85	7,97	2,20

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do concreto, concretagem 06 de dezembro do 2016 (lajes BD-A02, BD-A03, BD-A05 e a laje RSP-A01)

CP	Tipo de ensaio	Idade Dias	$f_c$ MPa	$f_{ct}$ MPa	$E_{ci}$ GPa
CP1	Compressão	49	40	-	-
CP2	Compressão	49	35	-	-
CP3	Compressão	49	36	-	-
CP4	Tração	49	-	3,90	-
CP5	Tração	49	-	3,96	-
CP6	Tração	49	-	2,72	-
CP7	Módulo de elasticidade	57	-	-	29
CP8	Módulo de elasticidade	57	-	-	25
CP9	Módulo de elasticidade	57	-	-	25
Média			37	3,53	26
Desvio padrão			2,41	0,70	2,08
C.V (%)			6,52	19,9	7,96

#### 4.1.2 - Aço

Para determinar a resistência à tração e o módulo de elasticidade das barras de aço usadas na confecção das lajes, foram retiradas três amostras de corpo de prova de 600 mm de comprimento para cada uma das bitolas usadas. Estes ensaios foram feitos seguindo as recomendações da Norma Brasileira ABNT NBR ISO 6892 (2013). A Figura 4.4 mostra o ensaio de tração feito no Laboratório de Materiais da Universidade de Brasília. A Tabela 4.3 mostra o resumo das propriedades mecânicas do aço empregado.



Figura 4.4 – Ensaio de tração do aço



Tabela 4.3 – Propriedades do aço empregado

Tipo de aço	Diâmetro nominal (mm)	$f_y$ (MPa)	$\varepsilon_y$ ( $^{\circ}/_{\infty}$ )	$E_s$ (GPa)
CA-60	6,3	623	3,52	177
CA-50	8	580	3,11	186
CA-50	12,5	541	2,72	199
CA-50	16	589	3,12	189

## 4.2 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Como mencionado anteriormente, para medir os deslocamentos verticais das lajes foram utilizados doze LVDTs posicionados na superfície superior de cada uma das lajes. Os LVDTs foram distribuídos nas duas direções principais com a finalidade de monitorar a rigidez dos modelos. Da Figura 4.5 até a Figura 4.16 mostram-se os deslocamentos verticais obtidos para cada uma das lajes na direção Sul - Norte (S-N) e na direção Leste - Oeste (L-O).

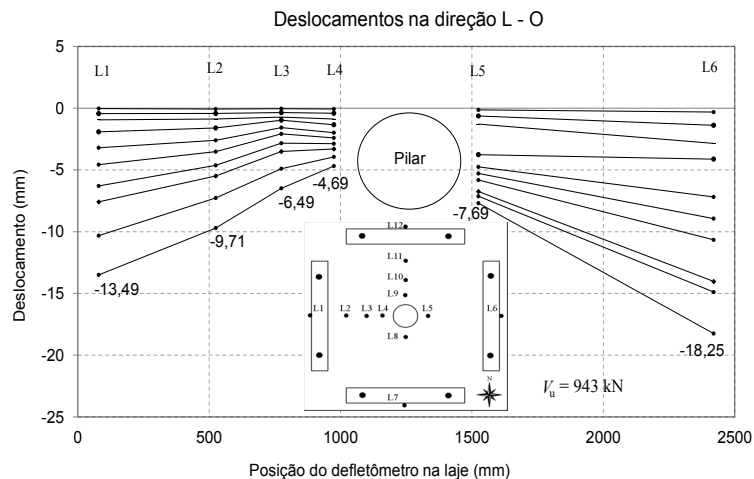


Figura 4.5 – Deslocamentos verticais na direção L-O da laje RSP-A01

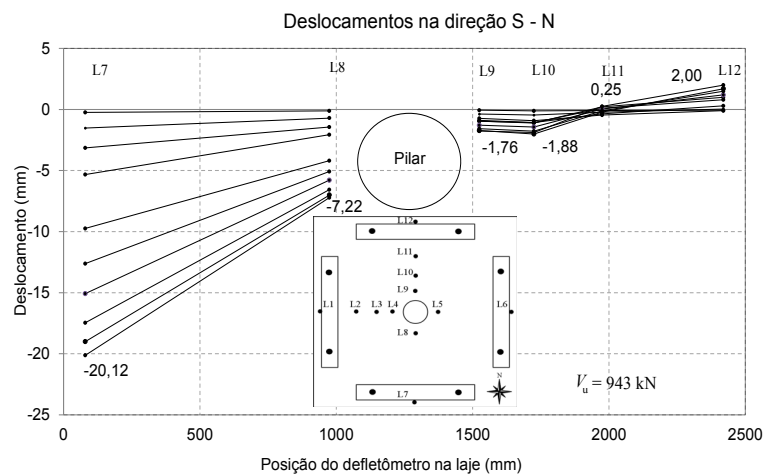


Figura 4.6 – Deslocamentos verticais na direção S-N da laje RSP-A01

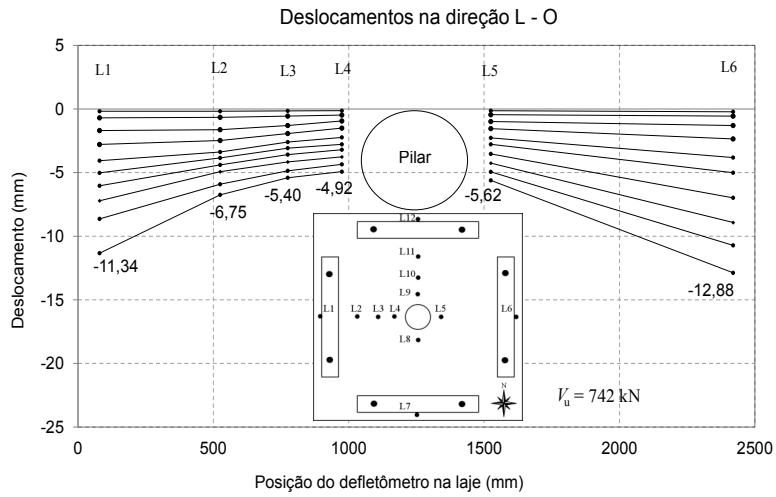


Figura 4.7 – Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A01

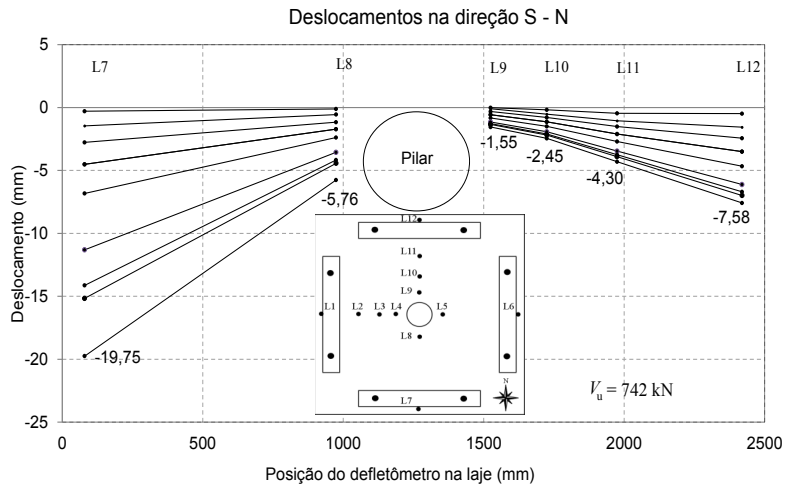


Figura 4.8 – Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A01

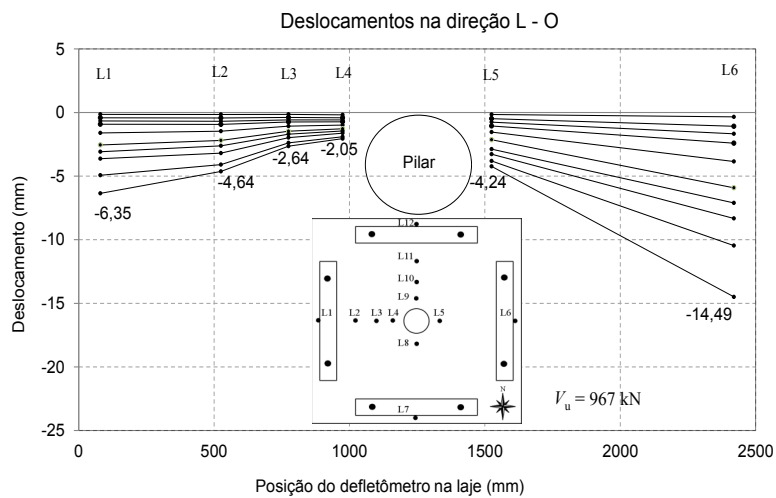


Figura 4.9 – Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A02

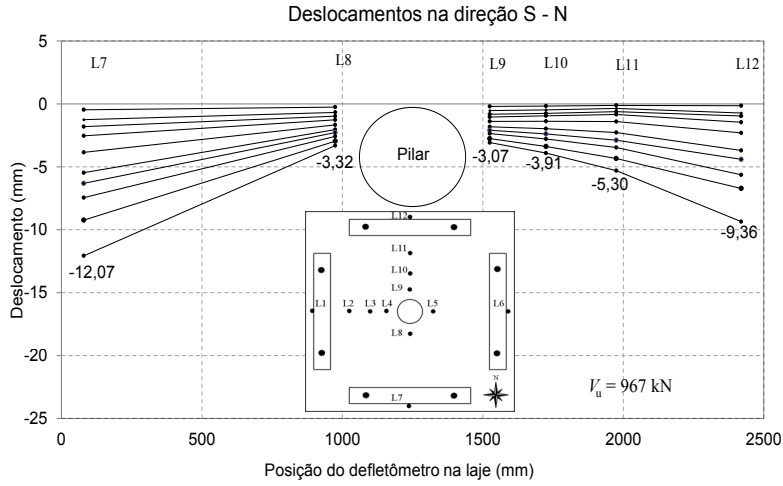


Figura 4.10 – Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A02

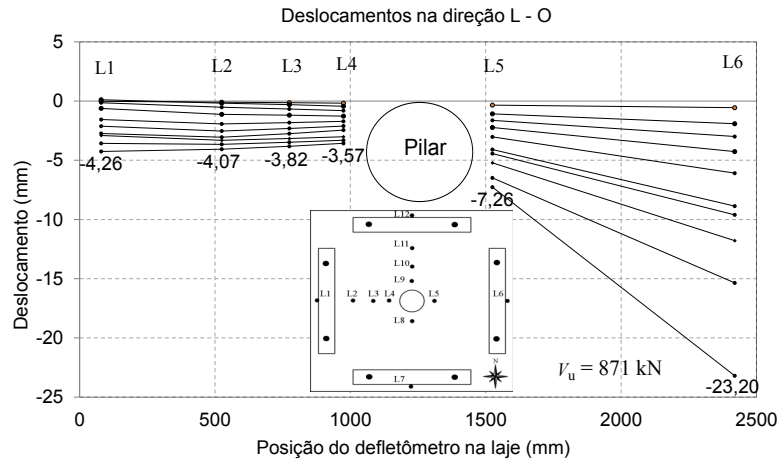


Figura 4.11 – Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A03

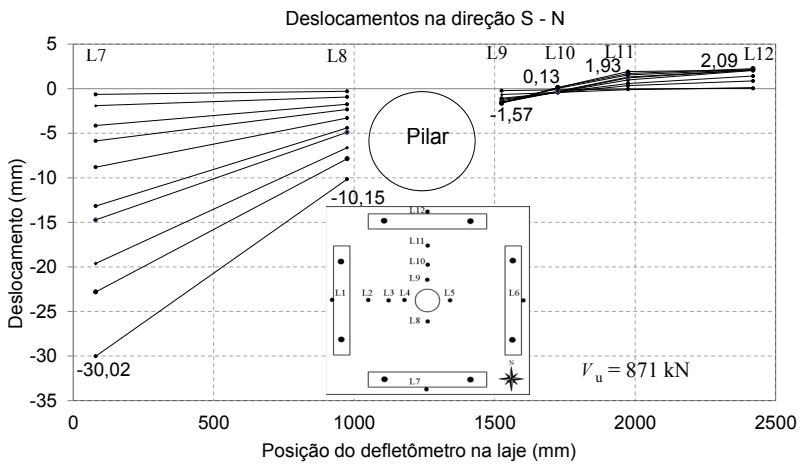


Figura 4.12 – Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A03

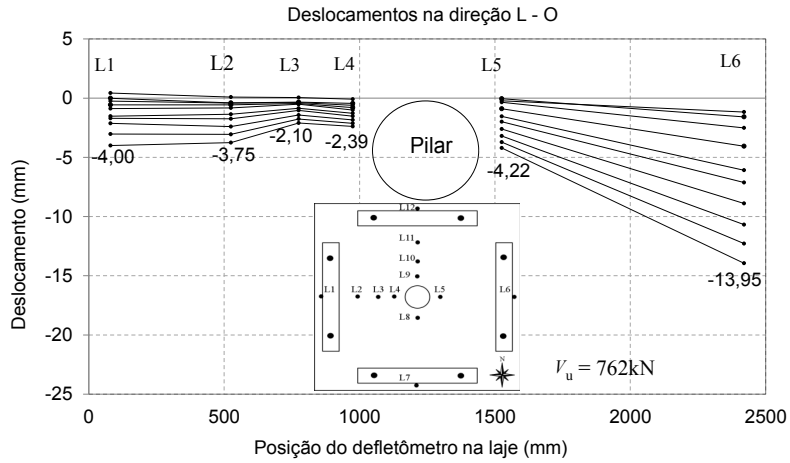


Figura 4.13 – Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A04

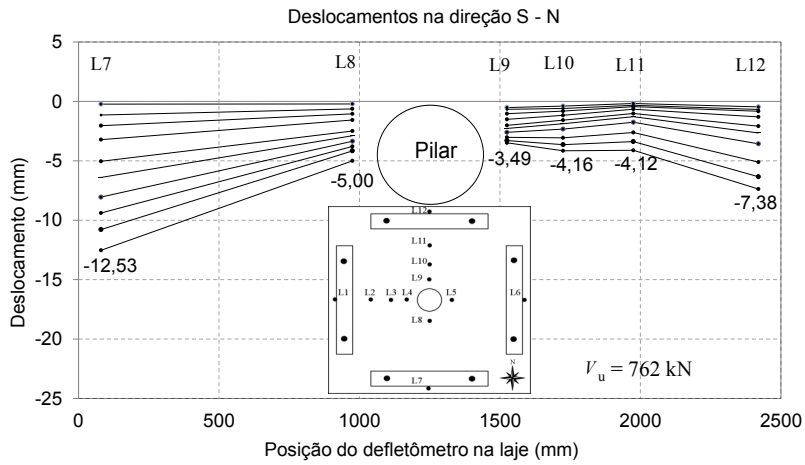


Figura 4.14 – Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A04

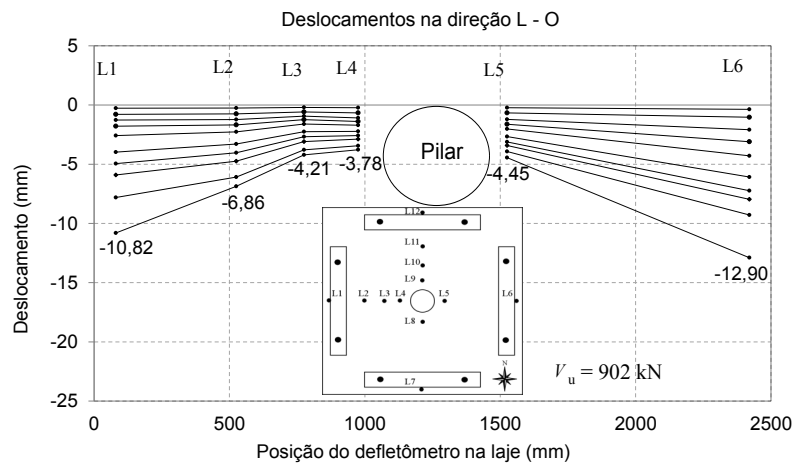


Figura 4.15 – Deslocamentos verticais na direção L-O da laje BD-A05

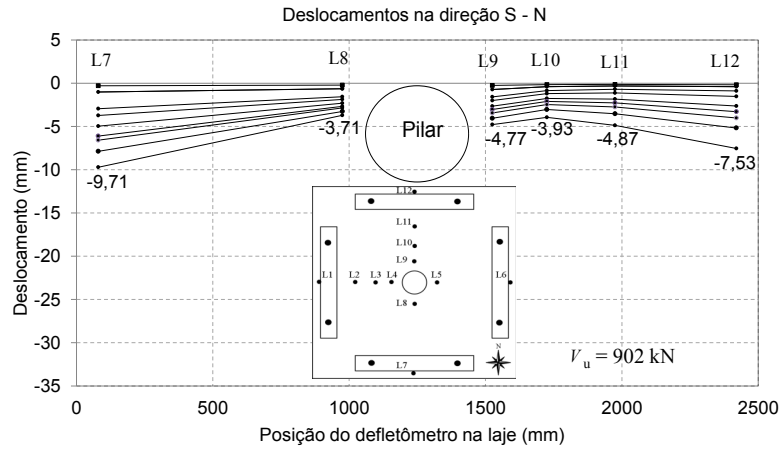


Figura 4.16 – Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD-A05

A Figura 4.17 mostra uma comparação entre os deslocamentos médios de todas as lajes, calculados a partir das leituras dos LVDTs dispostos nos extremos de cada laje (LVDT01, LVDT06, LVDT07, e LVDT12).

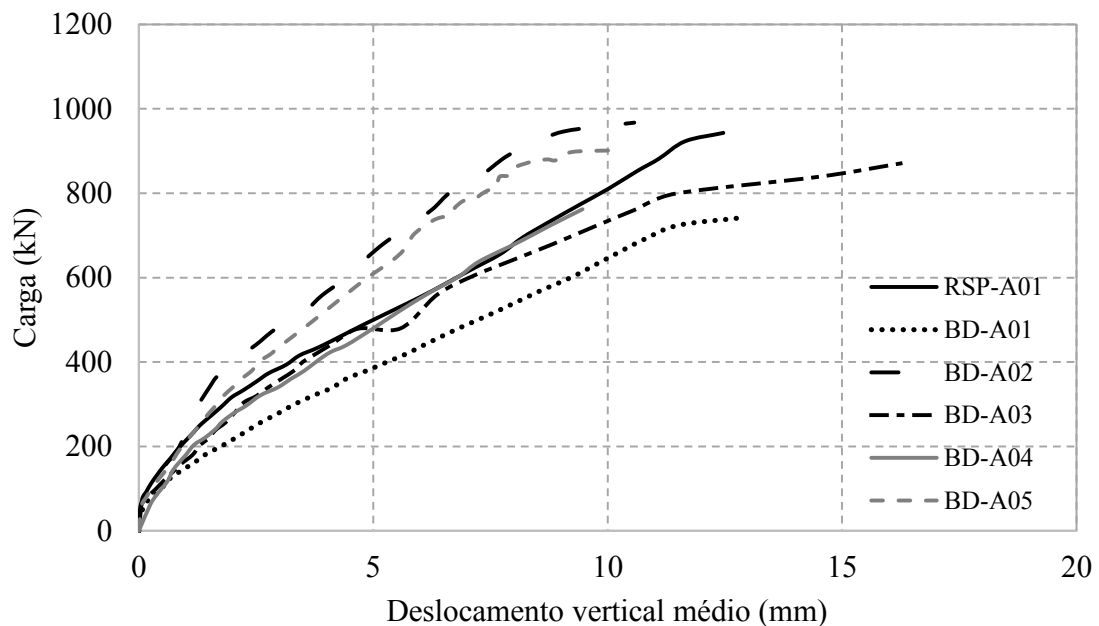


Figura 4.17 – Comparação dos deslocamentos verticais médios para todas as lajes

Das seis lajes ensaiadas, a laje BD-A01 (laje *Bubbledeck* de referência), apresentou os maiores deslocamentos verticais para todas as cargas. Já para o caso das lajes *Bubbledeck* BD-A02, BD-A03, BD-A04 e BD-A05 seus comportamentos foram influenciados pelo uso de treliças. Para estas lajes o uso de treliças influenciou nos deslocamentos, proporcionando uma redução destes

em relação à laje de referência (BD-A01), para um mesmo valor de carga, o que sugere um aumento na sua rigidez.

A laje BD-A02 foi o modelo que apresentou a maior rigidez. Este fato possivelmente está associado ao uso de treliças com uma inclinação de  $60^\circ$ .

As lajes BD-A02 e BD-A03, tiveram as mesmas características (uso de armadura de cisalhamento, e uso de treliças), diferenciando-se apenas na inclinação das treliças que para a laje BD-A02 foi de  $60^\circ$  enquanto que para a laje BD-A03 foi de  $45^\circ$ . No entanto a laje BD-A02 apresentou maior rigidez. Isso poderia indicar que a inclinação das treliças influencia na rigidez da ligação.

Já no caso das lajes que foram confeccionadas sem armadura de cisalhamento (*studs*) na região maciça e com treliças nas nervuras pode-se observar como a laje BD-04 e a laje BD-A05 apresentaram deslocamentos verticais similares, no entanto a carga de ruptura foi maior para a laje BD-A05. O que contraria a lógica segundo a qual a quantidade de armadura vertical aumentaria a resistência à punção.

Continuando-se com esta análise e comparando a laje BD-A02 (armadura de cisalhamento na região maciça e nervuras com treliças de  $60^\circ$ ) com a laje BD-A04 (nervuras com treliças de  $60^\circ$ ), pode-se observar que a laje BD-A02 apresentou maior rigidez. Finalmente para o caso das lajes BD-A03 e BD-A05 o comportamento se inverte em relação com as lajes anteriores, sendo a laje BD-A05 a que apresenta a maior rigidez.

Nas lajes RSP-A01 e BD-A03 foi observado que os deslocamentos na direção Sul foram superiores aos da direção Norte, mesmo com carregamento simétrico e mesmo nível de carga. Esse comportamento está relacionado às folgas no travamento superior dos pilares durante a montagem do ensaio.

### **4.3 - DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO**

Da Figura 4.18 até a 4.23 apresentam-se os gráficos das deformações nas armaduras de flexão das lajes em relação ao carregamento aplicado. Para medir as deformações nas armaduras de flexão foram monitoradas sete barras em cada uma das lajes, quatro barras na direção S-N, e três barras na direção L-O. Estes monitoramentos foram feitos para auxiliar na determinação do tipo de ruptura das lajes.

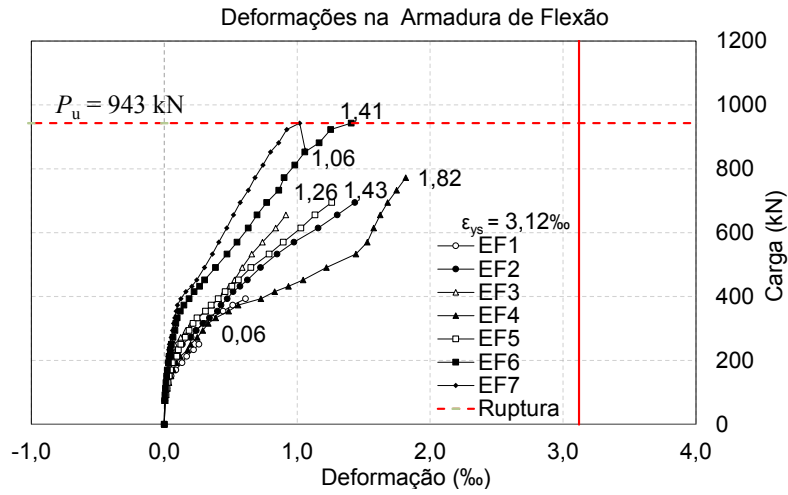


Figura 4.18 – Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP-A01

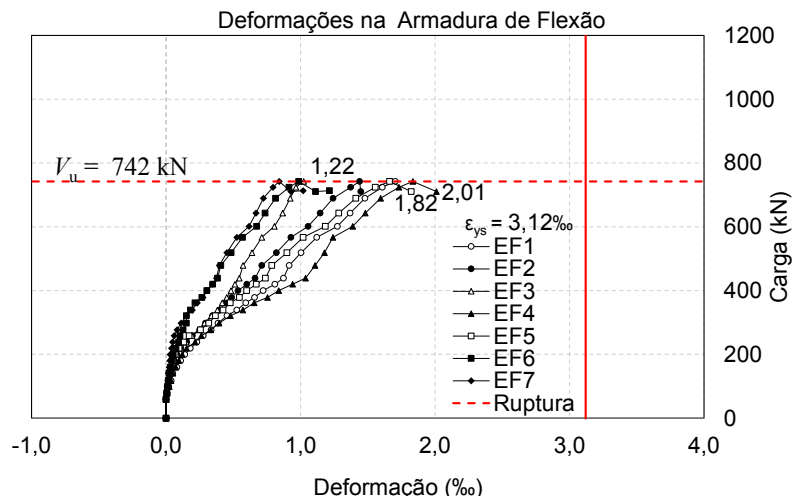


Figura 4.19 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A01

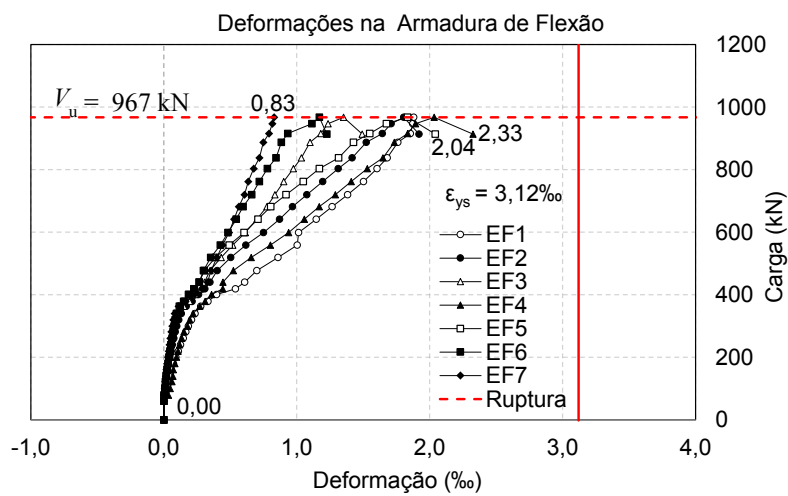


Figura 4.20 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A02

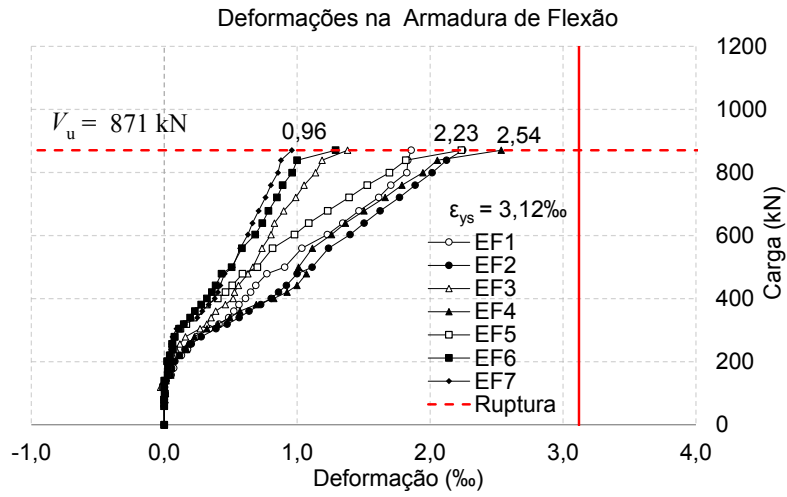


Figura 4.21 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A03

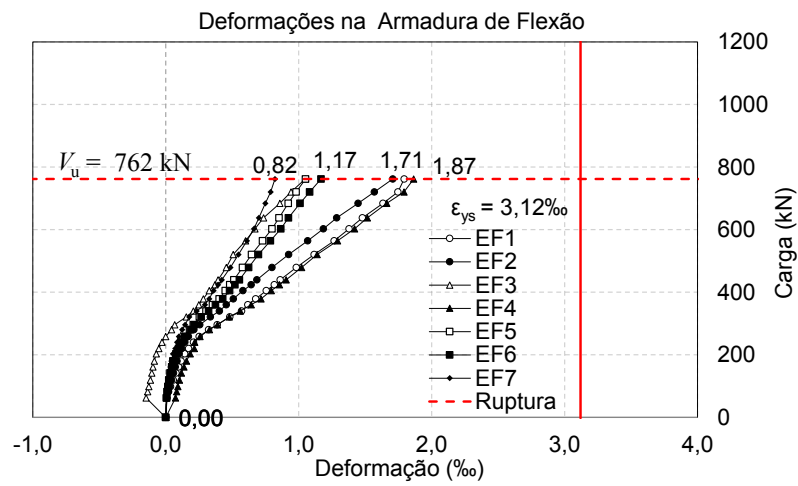


Figura 4.22 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A04

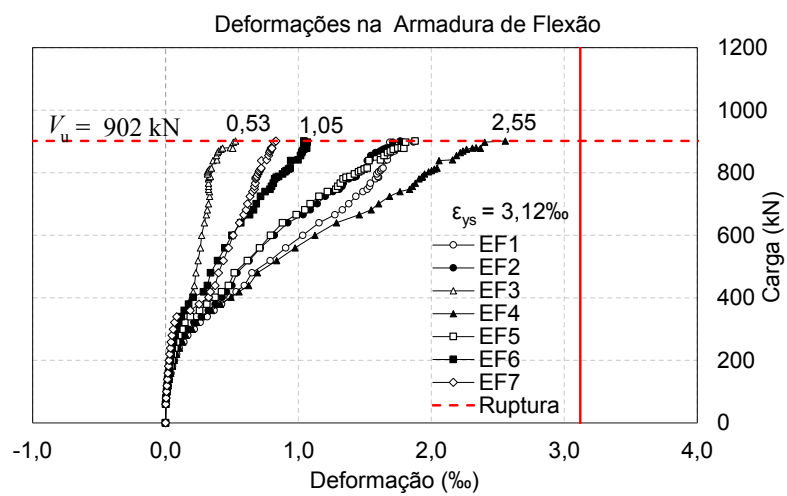


Figura 4.23 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD-A05



A Tabela 4.4 apresenta a síntese do comportamento das armaduras de flexão de todas as lajes ensaiadas no instante da ruptura. Isto permite observar conjuntamente o nível de solicitação de cada uma das barras de flexão monitoradas, mostrando quais delas escoaram e quais não. Definiu-se como escoamento as barras que tiveram uma deformação acima de 90% de  $\varepsilon_{ys}$ .

Analisando a Tabela 4.4 é possível observar que nas seis lajes ensaiadas quase nenhuma das barras monitoradas alcançaram deformações com níveis de escoamento, sendo que apenas as barras número quatro das lajes BD-A03 e BD-A05 apresentaram deformações acima de 90% de  $\varepsilon_{ys}$ . Como esperado as lajes romperam por punção e não por flexão, pois antes da confecção das lajes foi realizada uma avaliação dos resultados experimentais obtidos em pesquisas similares, feitas na Universidade de Brasília, nesta avaliação observou-se a dificuldade em determinar o tipo de ruptura, pelo qual decidiu-se aumentar o diâmetro da armadura de flexão de 12,5mm a 16mm. Embora a maior parte das barras não tenham escoado, de maneira geral as maiores deformações apresentaram-se nas duas barras mais próximas do pilar.

Tabela 4.4 – Características das lajes ensaiadas

Laje	Parâmetro de análise	N° da barra de flexão						
		Oeste			Norte			
		1	2	3	4	5	6	7
		185	435	700	185	435	700	935
RSP-A01	Deformação da barra na ruptura	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$
BD-A01	Deformação da barra na ruptura	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$
BD-A02	Deformação da barra na ruptura	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$
BD-A03	Deformação da barra na ruptura	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$\geq \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$
BD-A04	Deformação da barra na ruptura	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$
BD-A05	Deformação da barra na ruptura	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$\geq \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$	$< \varepsilon_{ys}$

Comparando os gráficos das deformações da armadura de flexão das lajes BD-A03 (armadura de cisalhamento na região maciça e nervuras com treliças de 45°) e da laje BD-A05 (nervuras com treliças de 45°), com o resto das lajes, pode-se ver que elas apresentam as maiores deformações. Este comportamento poderia indicar que o uso de treliças de 45° aumenta o requerimento desta armadura, embora o incremento seja muito baixo. Para as lajes BD-A02 (armadura de cisalhamento na região maciça e nervuras com treliças de 60°) e BD-A04 (nervuras com treliças de 60°) é possível notar que o uso de treliças de 60° não gerou um aumento significativo nas deformações das barras de flexão, e seu comportamento foi similar ao das barras de flexão das lajes RSP-A01 e BD-A01.

#### 4.4 - DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

Com o objetivo de analisar o desempenho das armaduras de cisalhamento (*studs* e treliças) usadas nesta pesquisa, foram monitoradas as deformações que nelas aconteceram durante a execução de cada um dos ensaios. Para as lajes RSP-A01, BD-A01, BDA02, e BDA03, foram medidas as deformações dos *Studs* colocados na região maciça das mesmas. Os resultados destes monitoramentos podem ser visto na Figura 4.24 até a Figura 4.26. Já para o caso das lajes BD-A02, BD-A03, BDA04, e BD-A05, o monitoramento das armaduras de cisalhamento foi feito nas treliças (região nervurada). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.27 até a Figura 4.46.

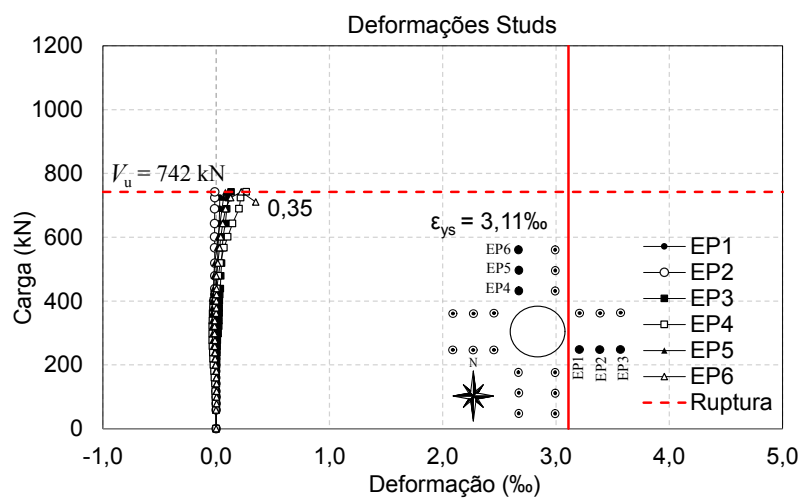


Figura 4.24 – Deformações da armadura de cisalhamento (*Studs*) na laje BD-A01

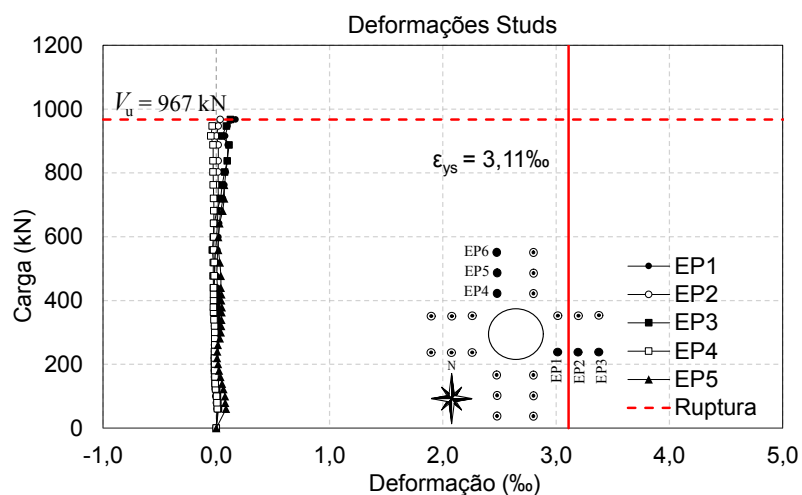


Figura 4.25 – Deformações da armadura de cisalhamento (*Studs*) na laje BD-A02

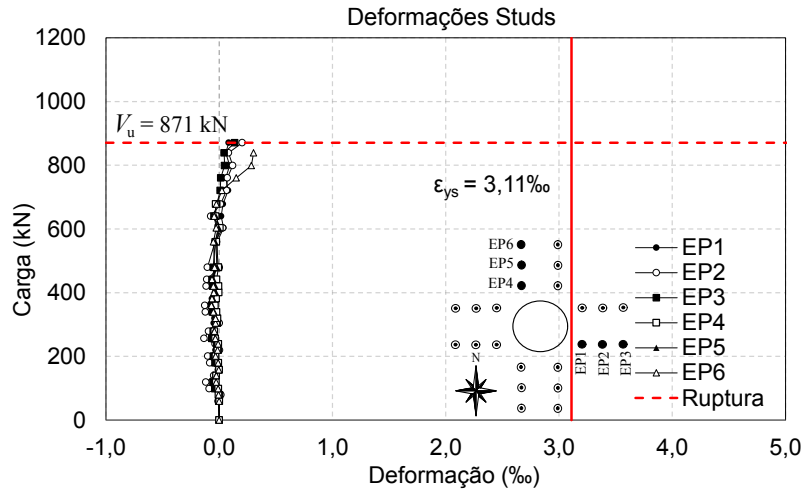


Figura 4.26 – Deformações da armadura de cisalhamento (*Studs*) na laje BD-A03

Pode-se observar que os *studs* da laje BD-A01, BD-A02 e BD-A03 apresentaram solicitações muito baixas pois em média alcançaram uma deformação de  $0,135\text{‰}$ ,  $0,131\text{‰}$  e  $0,192\text{‰}$  respectivamente, o que equivale entre o 4,5% e 6,64% da deformação de escoamento do aço ( $2,89\text{‰}$ ).

Os resultados das deformações nos *studs* da laje RSP-A01, não serão apresentados, já que foram perdidos durante o ensaio. Isto aconteceu devido a uma pequena mudança que pretendia facilitar a execução do ensaio, e que consistiu em trocar o fio que conectava os extensômetros com o sistema de aquisição de dados, por um mais leve.

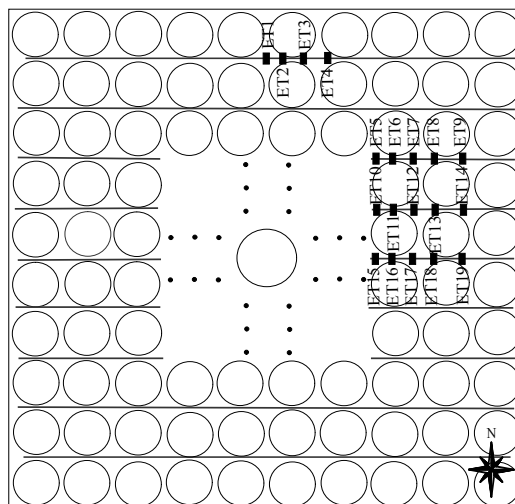


Figura 4.27 – Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A02

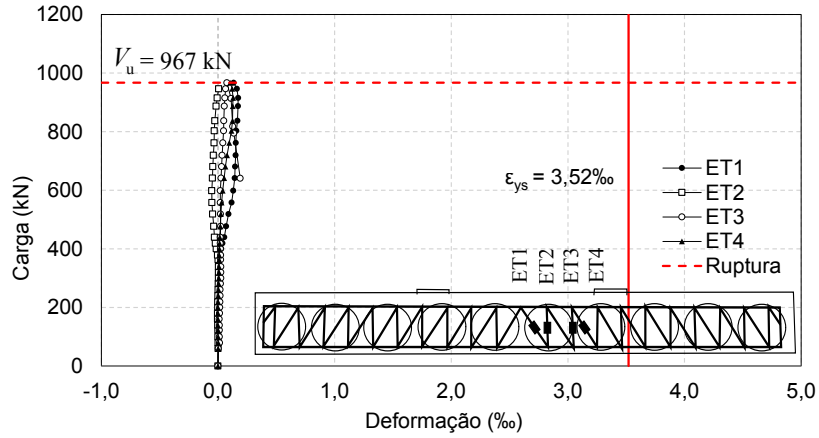


Figura 4.28 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção A-A

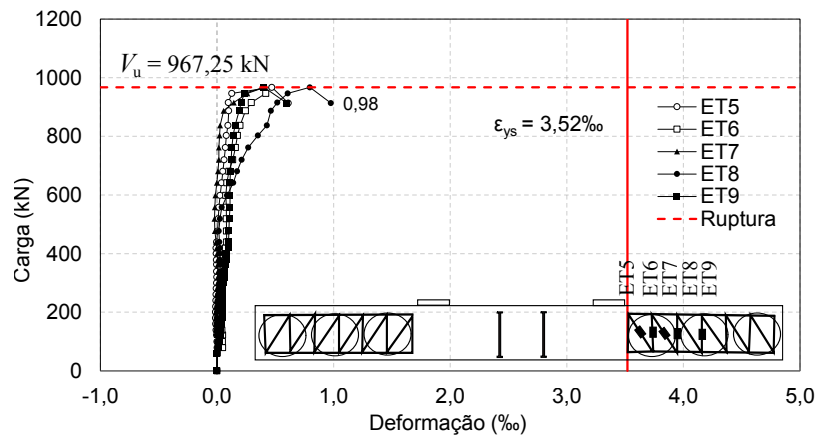


Figura 4.29 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção B-B

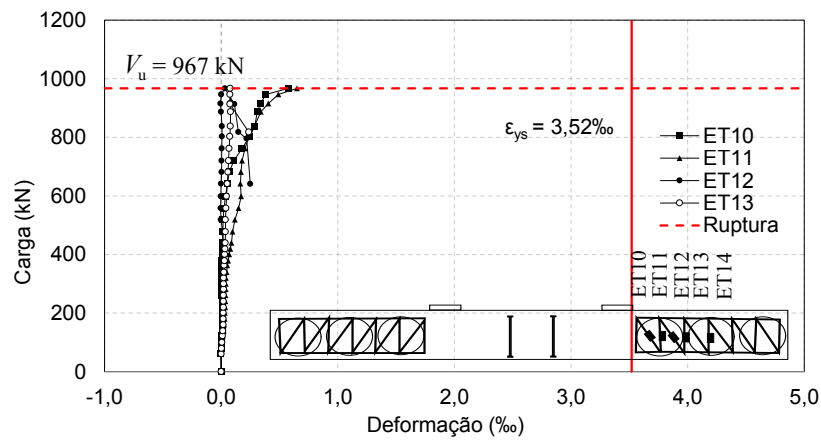


Figura 4.30 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção C-C

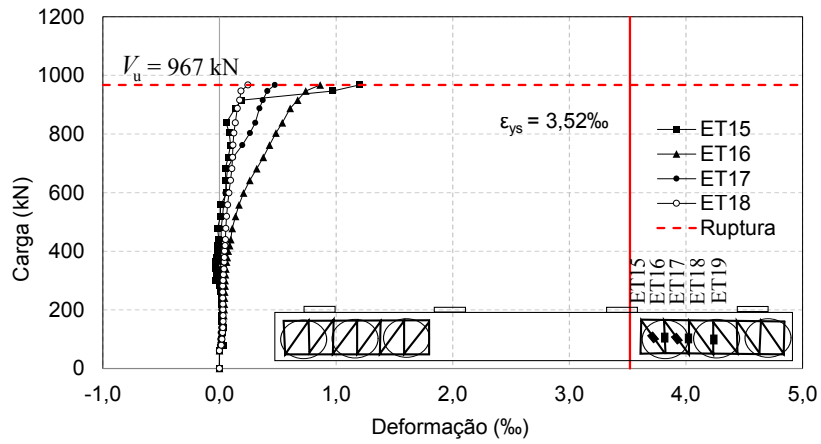


Figura 4.31 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A02, seção D-D

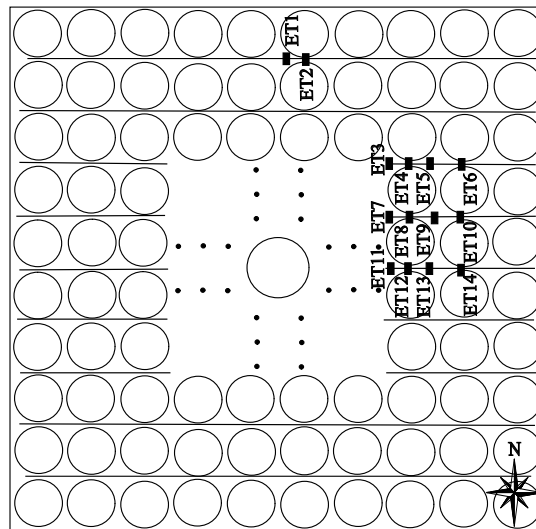


Figura 4.32 – Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A03

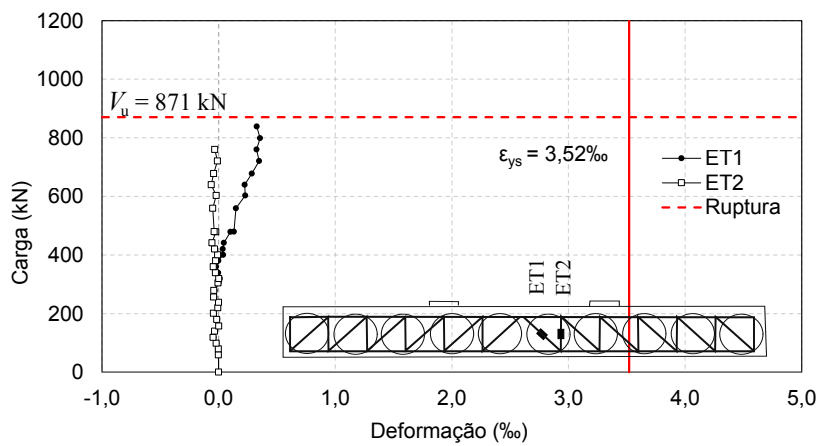


Figura 4.33 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção A-A

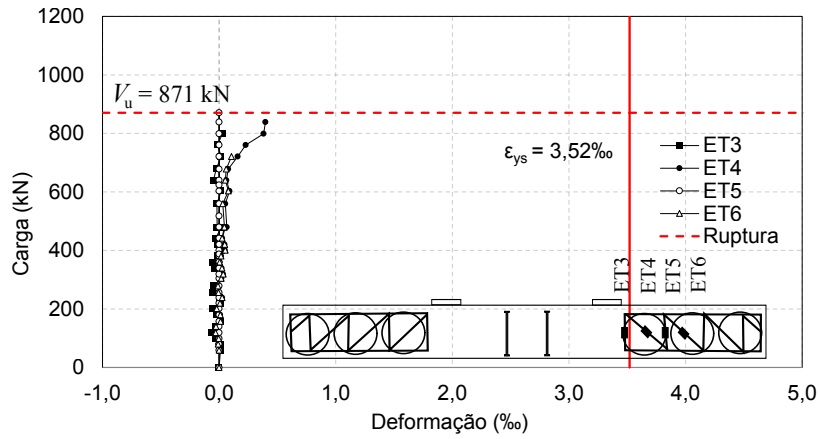


Figura 4.34 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção B-B

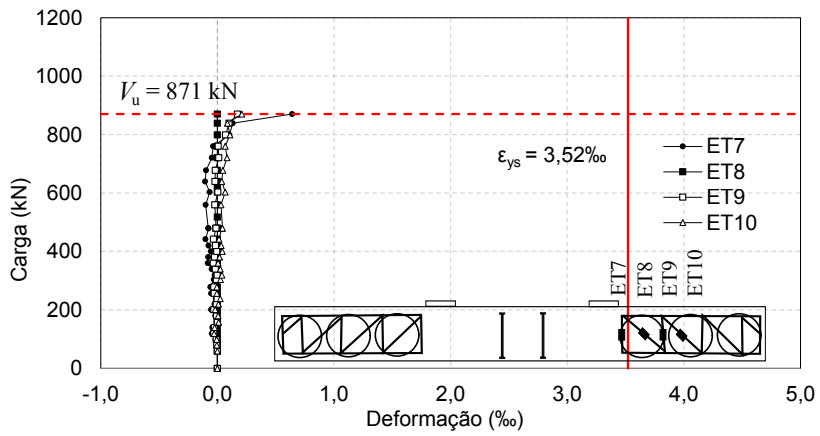


Figura 4.35 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção C-C

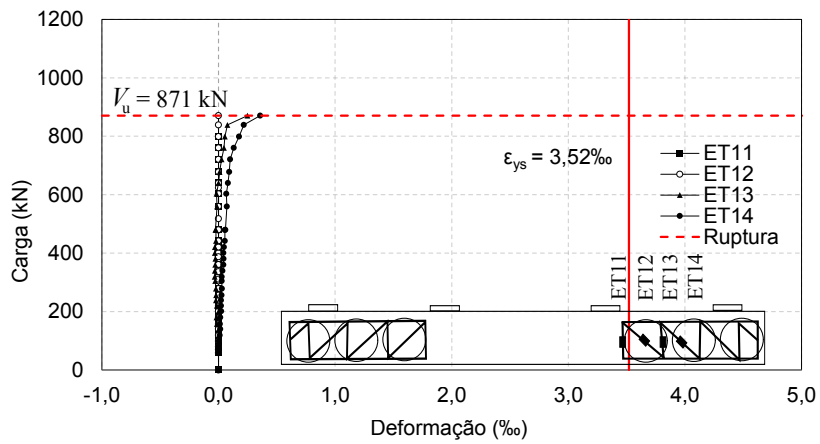


Figura 4.36 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A03, seção D-D

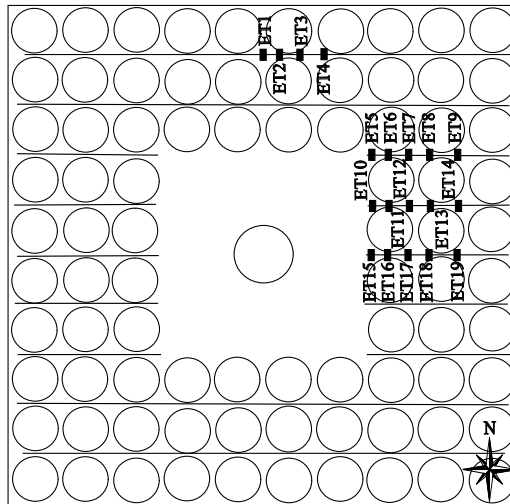


Figura 4.37 – Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A04

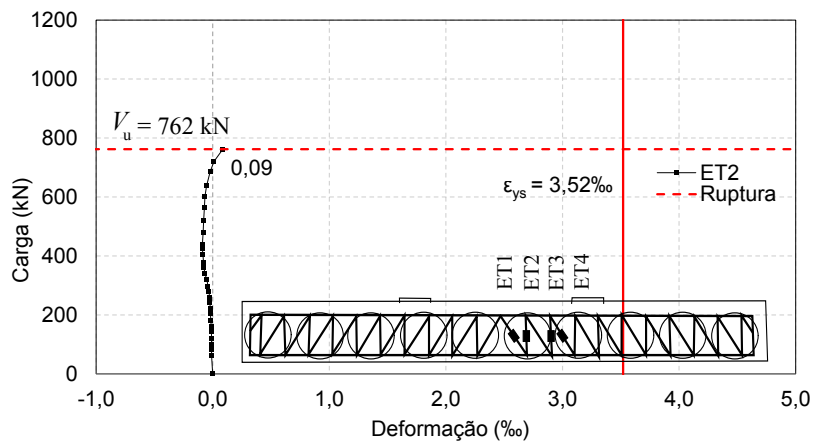


Figura 4.38 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção A-A

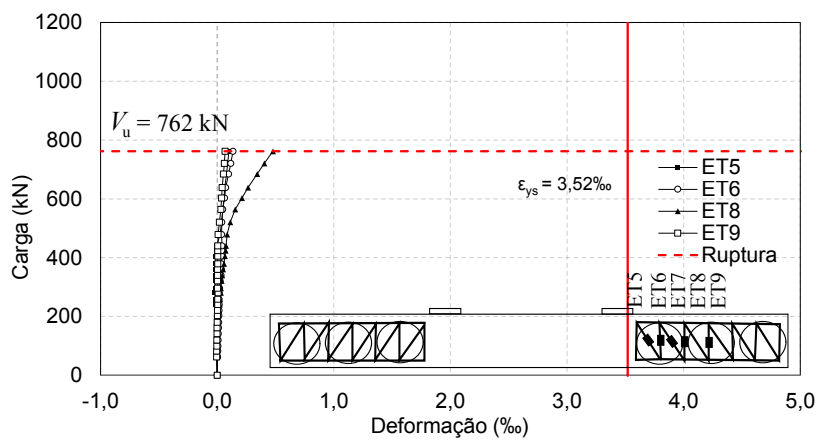


Figura 4.39 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção B-B

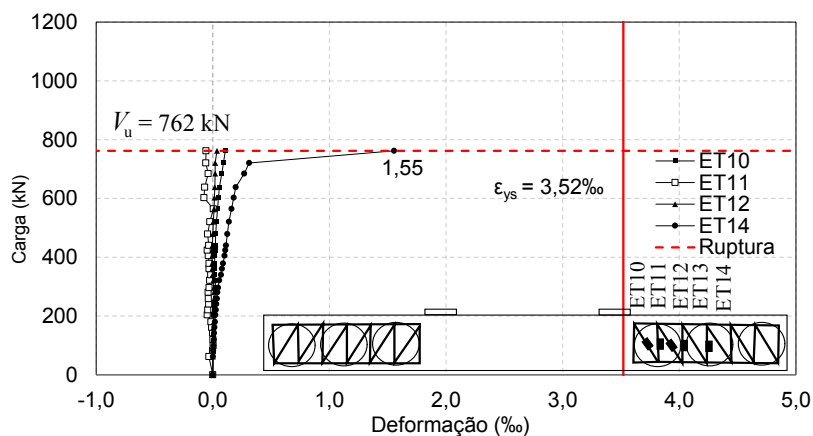


Figura 4.40 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção C-C

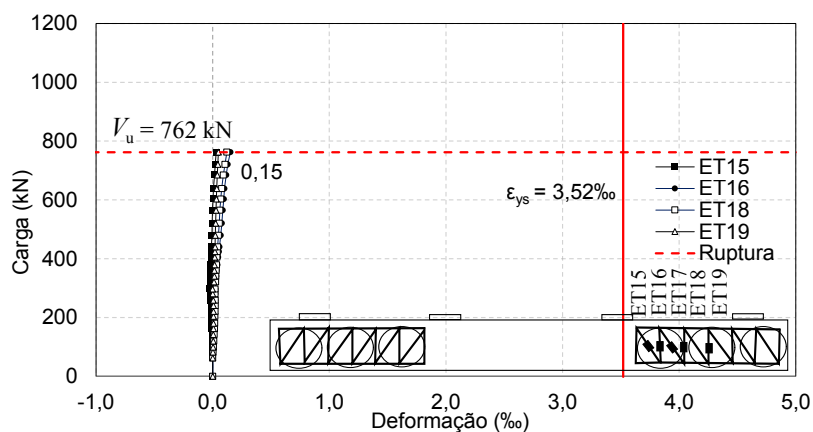


Figura 4.41 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A04, seção D-D

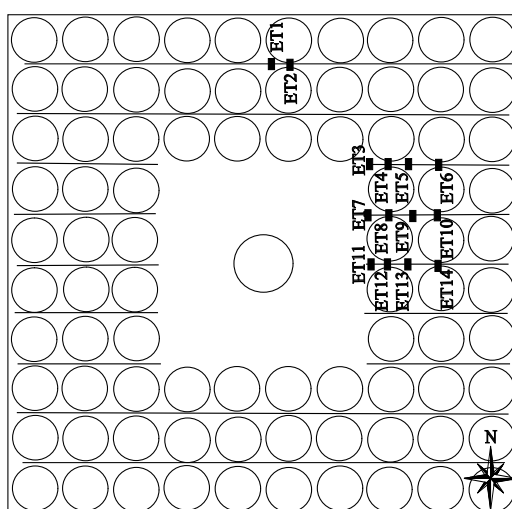


Figura 4.42 – Localização dos extensômetros nas treliças da laje BD-A05



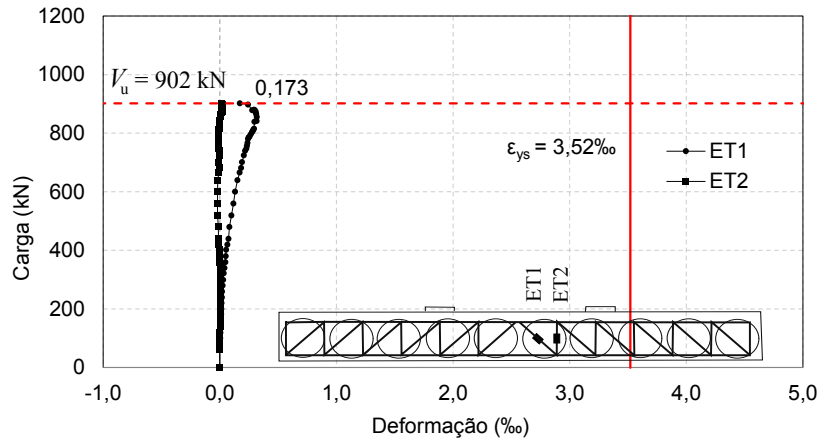


Figura 4.43 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção A-A

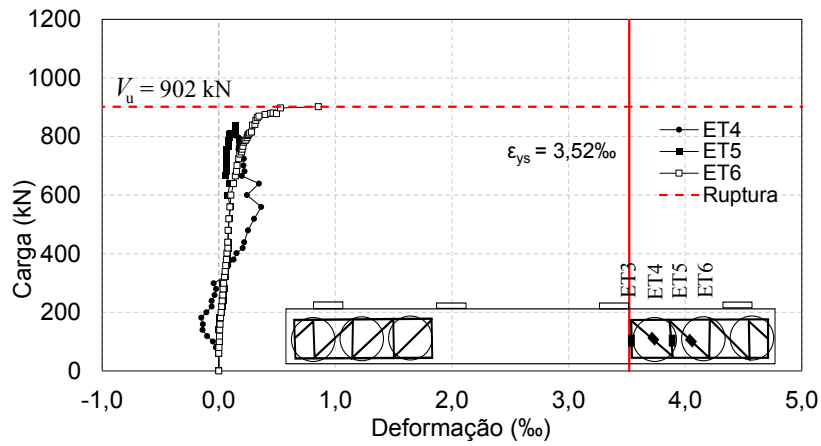


Figura 4.44 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção B-B

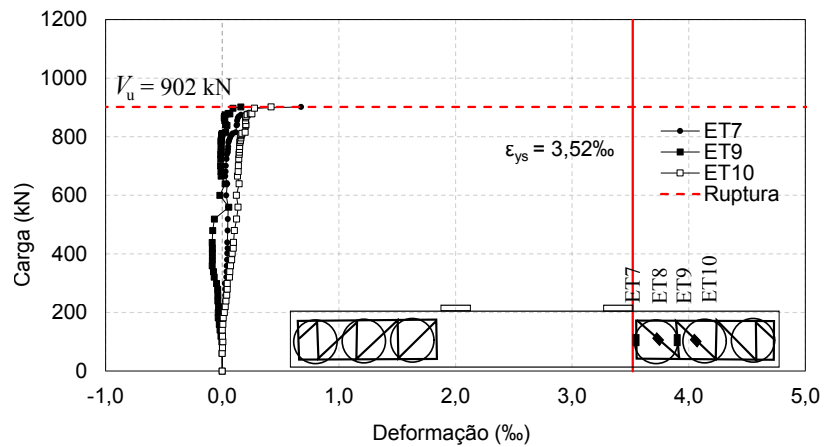


Figura 4.45 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção C-C

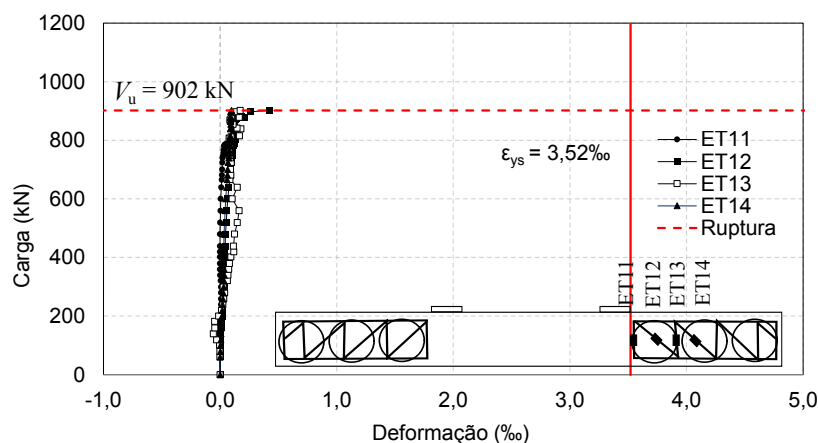


Figura 4.46 – Deformações da armadura de cisalhamento (treliças) na laje BD-A05, seção D-D

Nos gráficos anteriores, pode-se observar que as maiores deformações nas treliças, aconteceram nas nervuras da laje BD-A02. Nesta laje apresentou-se deformações próximas da deformação de escoamento do aço ( $2,89‰$ ).

Comparando-se as deformações das treliças das lajes BD-A02 e BD-A03 que apresentavam mesma armadura de cisalhamento na região maciça e diferente inclinação nas treliças, foi observado que a treliça de  $60^\circ$  usadas nas nervuras da laje BD-A02 tem um melhor desempenho que as treliças de  $45^\circ$  usadas na laje BD-A03.

Ao comparar os modelos BD-A03 e BD-A05, os quais assim como no caso anterior simplesmente divergem no uso de armadura de cisalhamento na região maciça da laje BD-A03. Pode-se notar como nas treliças da laje BD-A05 aconteceram deformações um pouco maiores que na laje BD-A03. Embora as solicitações das treliças nas laje BD-A05 tenha sido um pouco maior, o comportamento em geral das treliças das duas lajes foi similar, mostrando um desempenho baixo em comparação com as treliças de  $60^\circ$ .

#### 4.5 - DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

Para medir as deformações no concreto foram fixados quatro extensômetros na face inferior de cada uma das laje. Dois extensômetros foram posicionados com o objetivo de medir as deformações tangenciais, enquanto que os outros dois foram usados para medir as deformações radiais. Da Figura 4.47 até a Figura 4.52 apresentam-se os resultados das leituras de deformações na superfície do concreto de todas as lajes.

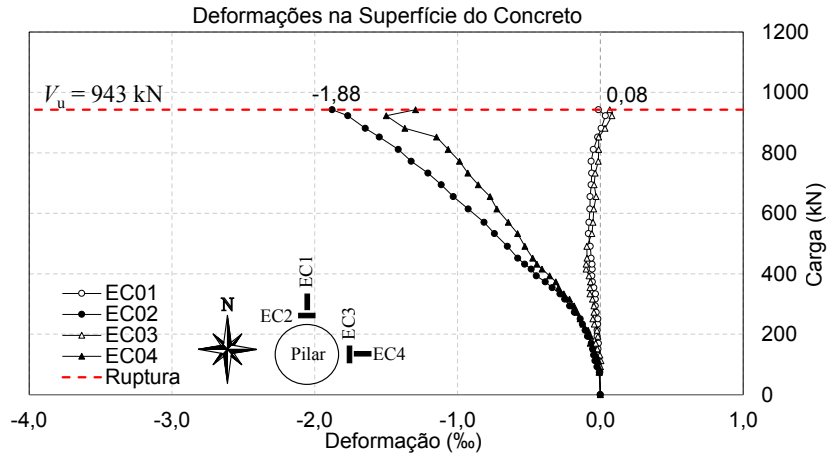


Figura 4.47 – Deformações na superfície do concreto da laje RSP-A01

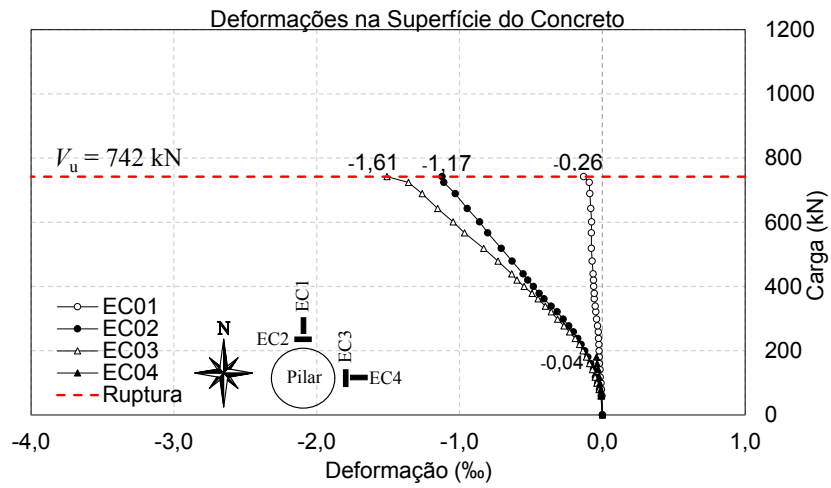


Figura 4.48 – Deformações na superfície do concreto da laje BD-A01

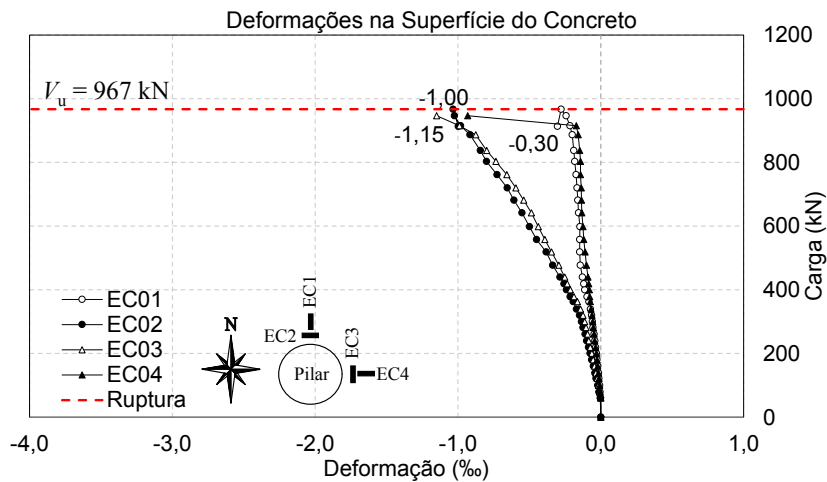


Figura 4.49 – Deformações na superfície do concreto da laje BD-A02

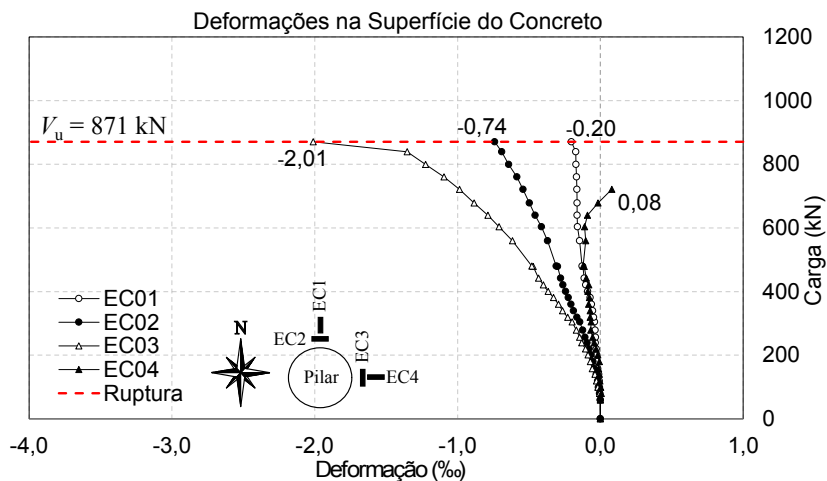


Figura 4.50 – Deformações na superfície do concreto da laje BD-A03

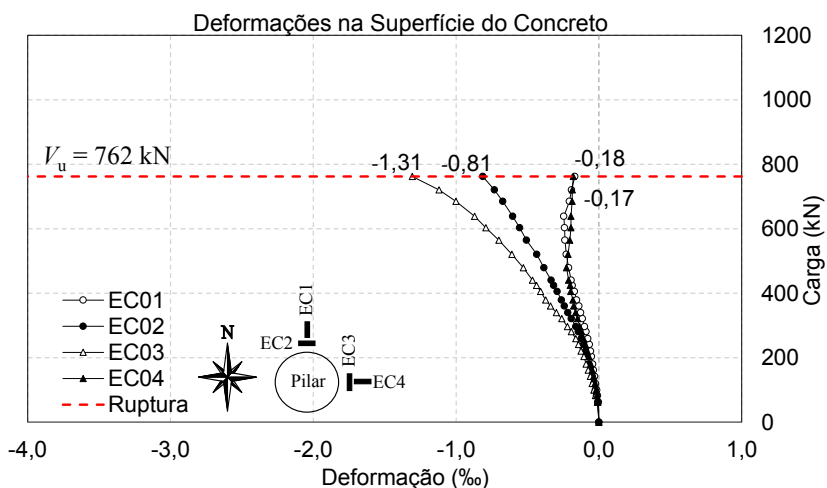


Figura 4.51 – Deformações na superfície do concreto da laje BD-A04

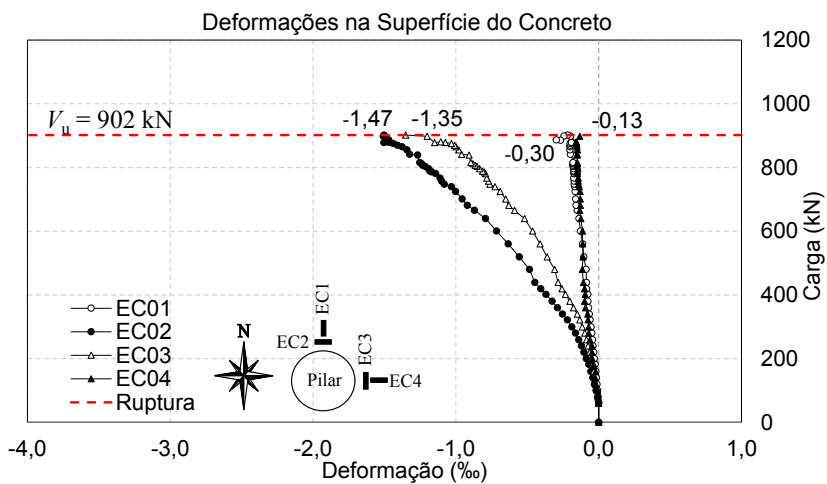


Figura 4.52 – Deformações na superfície do concreto da laje BD-A05

O comportamento em relação às deformações do concreto foi semelhante em todas as lajes ensaiadas. Observou-se que as maiores deformações aconteceram nos extensômetros tangencias (EC2, e EC3).

Notou-se também que nenhuma das lajes ensaiadas atingiu a deformação de esmagamento do concreto ( $3,5 \text{ ‰}$ ). Os maiores valores alcançados foram de  $2,65 \text{ ‰}$  para a laje BD-A03, e de  $1,88 \text{ ‰}$  para a laje RSP-A01, o qual representa aproximadamente entre o 54% a 74% da deformação de esmagamento do concreto.

Para cargas entre 0 kN a 200 kN, observou-se que as deformações radiais e tangenciais foram similares. Para valores de carga acima destes valores, pode-se observar uma mudança na inclinação dos gráficos das deformações tangenciais, sugerindo maiores deformações para mesmos intervalos de carga.

#### 4.6 - MAPA DE FISSURAÇÃO

Durante a execução dos ensaios identificou-se todas as fissuras que apareceram no quadrante S-L das lajes. As fissuras foram marcadas na superfície superior dos modelos, indicando o início e o fim de cada uma delas, além do carregamento que as originou. Por fim, uma vez terminado o ensaio procedeu-se a marcação das fissuras nos outros quadrantes, a fim de obter o mapa de fissuração que permite-se visualizar o tipo de ruptura e/ou comportamento de cada uma das lajes. Os mapas de fissuração e a vista inferior de cada laje após a ruptura são mostrados na Figura 4.53 até a Figura 4.64.

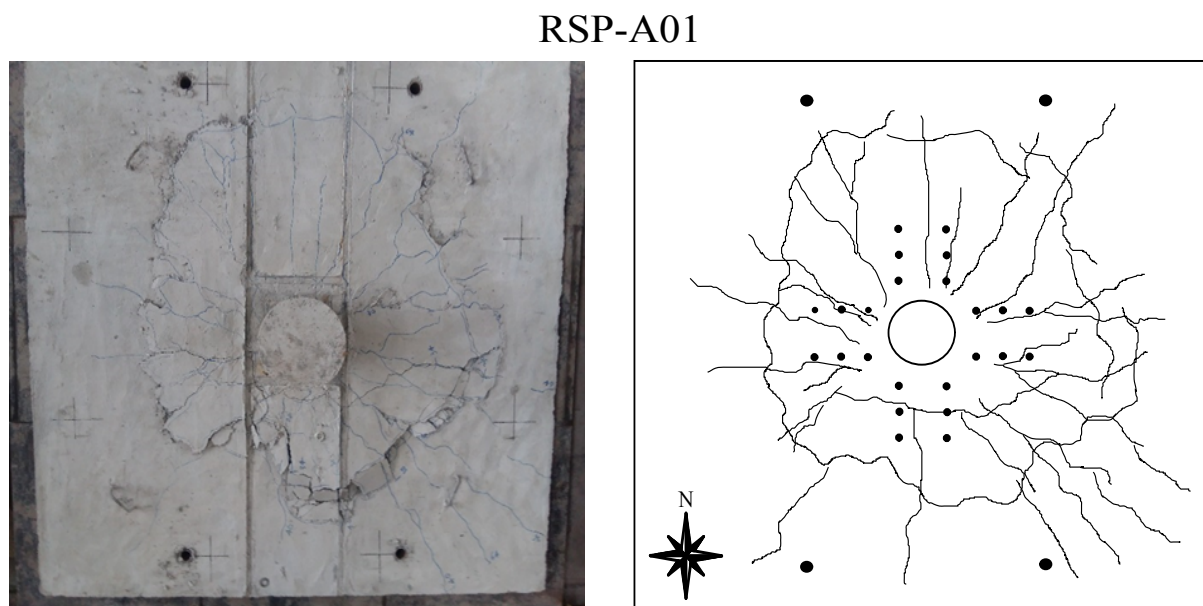


Figura 4.53 – Mapa de fissuração - Laje RSP-A01



Figura 4.54 – Vista inferior depois da ruptura – Laje RSP-A01

BD-A01

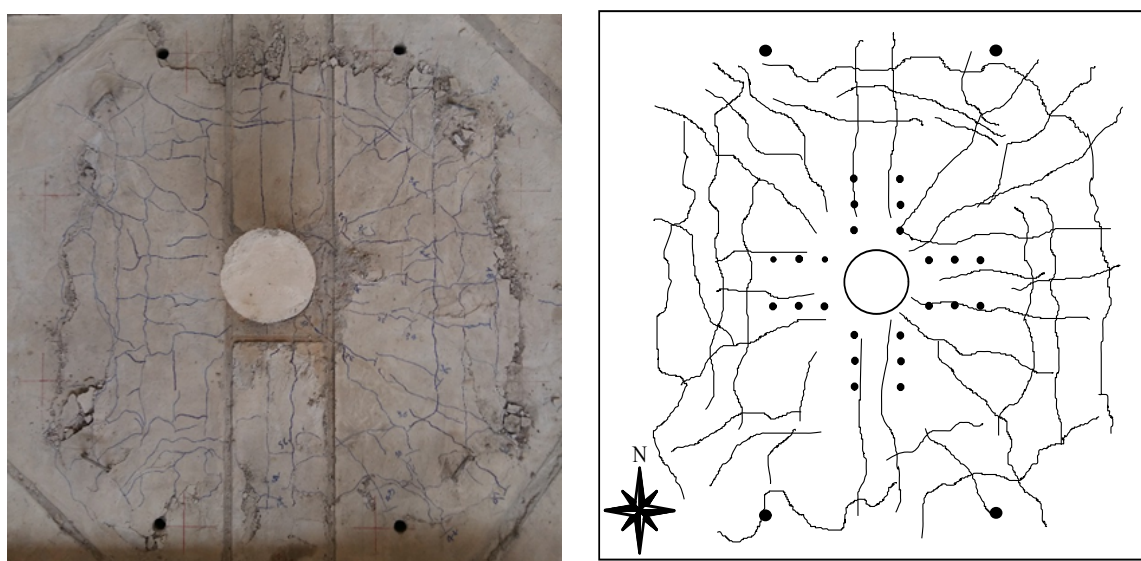


Figura 4.55 – Mapa de fissuração - Laje BD-A01



Figura 4.56 – Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A01



BD-A02



Figura 4.57 – Mapa de fissuração - Laje BD-A02



Figura 4.58 – Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A02

BD-A03

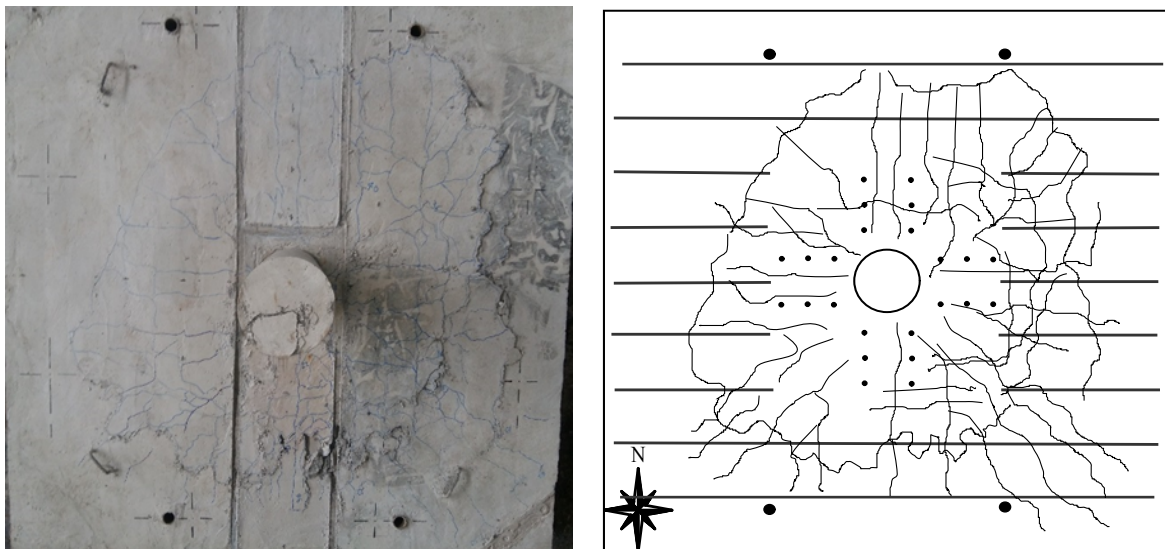


Figura 4.59 – Mapa de fissuração - Laje BD-A03



Figura 4.60 – Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A03

### BD-A04

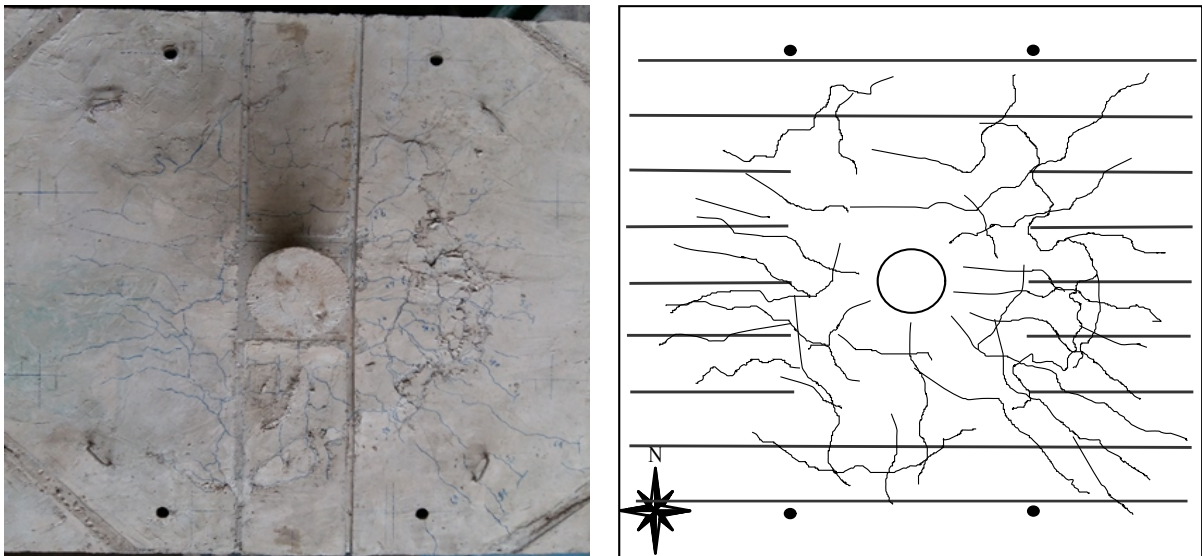


Figura 4.61 – Mapa de fissuração - Laje BD-A04



Figura 4.62 – Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A04



## BD-A05

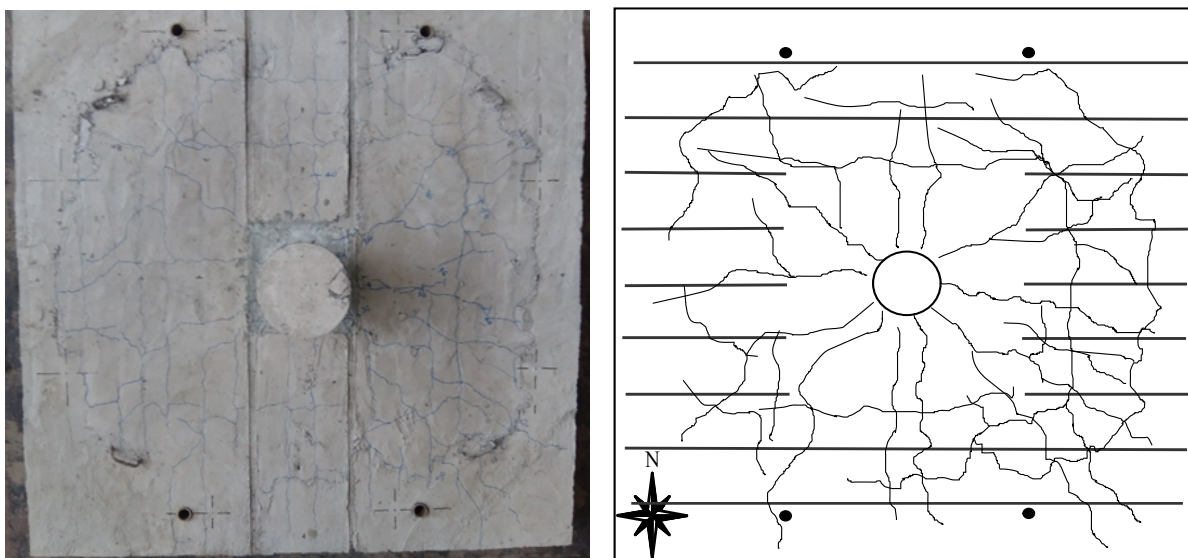


Figura 4.63 – Mapa de fissuração - Laje BD-A05



Figura 4.64 – Vista inferior depois da ruptura – Laje BD-A05

No momento da ruptura as seis lajes analisadas apresentaram na sua superfície superior a formação de um perímetro de fissuração com forma circular ou ovalada, o qual possivelmente indique a constituição do cone de ruptura, uma das características principais da punção.

Para as lajes (BD-A01, BD-A02, e BD-A03) reforçadas com armadura de cisalhamento na região maciça existiam três tipos de ruptura por punção que podiam ocorrer: a) ruptura na região localizada entre a face do pilar e a armadura de cisalhamento, b) ruptura passando pela armadura de cisalhamento, e c) ruptura fora da região reforçada. Porém a sua identificação, ficou limitada à realização de um corte da seção transversal das lajes, que permitisse identificar a inclinação das fissuras.

## 4.7 - CARGAS ULTIMAS E MODOS DE RUPTURAS

O modo de ruptura das lajes desta pesquisa, foi definido mediante o análise dos seguintes parâmetros: mapa de fissuração, deformações nas barras de flexão, deformações na superfície do concreto, além da carga última de flexão. Avaliou-se parâmetros e/ou comportamentos tais como: escoamento ou não das barras de flexão, observação de uma possível formação do tronco de cone na superfície de ruptura mediante a inspeção visual já que não foram feitos os cortes transversais que permitissem identificar este parâmetro, grandeza das deformações no concreto, e finalmente foi comparada a carga teórica (flexão) com a carga de ruptura obtida no laboratório.

Os critérios para determinação do modo de ruptura por punção são: observação do tronco de cone de punção na superfície de ruptura, constatação do não escoamento das barras da armadura de flexão, deformações relativamente baixas da superfície inferior do concreto. Por outro lado os critérios para definir a ruptura por flexão são: rápida elevação dos deslocamentos para pequenos incrementos de carga; elevado grau de fissuração; escoamento das armaduras de flexão; deformações na superfície inferior da laje próximas à deformação de esmagamento do concreto.

As cargas de ruptura no laboratório foram obtidas da soma das cargas aplicadas pelos cilindros hidráulicos e lidas nos mostradores digitais no momento da ruptura, mais o peso próprio de cada laje e dos equipamentos sobre sua superfície. O peso próprio da laje maciça mais o equipamento foi de 51 kN, enquanto que o peso próprio das lajes *Bubbledeck* mais o peso do equipamento sobre elas foi de 39 kN. Todas as lajes foram ensaiadas até atingirem a ruptura. As cargas últimas e os modos de ruptura identificados nos ensaios são apresentados na Tabela 4.5.

Como esperado todas as lajes desta pesquisa apresentaram ruptura por punção, e a grandeza de seus resultados foram influenciados pelo uso ou não de treliças.

Analisando o comportamento das lajes maciça e *Bubbledeck* de referência RSP-A01 e BD-A01, notou-se que a laje RSP-A01 atingiu uma carga de ruptura 27% maior que a alcançada pela laje BD-A01. A redução de 40% para resistência ao cisalhamento proposta pela *BubbleDeck Interantional* é satisfatória para este caso.

Em ordem decedente a laje *Bubbledeck* que maior carga de ruptura alcançou foi a laje BD-A02 (967 kN), seguido da laje BD-A05 (902 kN) e da laje BD-A03 (871 kN) e finalmente as lajes BD-A04 (762 kN) e laje BD-A01 (742 kN). O qual indica que o uso de treliças de 60° ou 45° geraram um incremento na resistência das lajes BD-A02, BD-A03, BD-A04 e BD-A05 em relação a laje *Bubbledeck* de referência (BD-A01), sendo de 30% para a laje BD-A02, 17% para a laje BD-A03, 3% para a laje BD-A04 e do 21.5% para a laje BD-A05.

Tabela 4.5 – Modos de ruptura das lajes

Laje	Tipo de Laje	Armadura de cisalhamento		Escoamento da armadura de flexão	Formação do tronco de cone	$V_u$ flex (kN)	$V_u$ lab (kN)	Tipo de ruptura
		Região maciça	Nervuras					
RSP-A01	Maciça	Pino ( <i>Stud</i> )	-	Não	Sim	1544	943	Punção
BD-A01	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	em cruz Pino ( <i>Stud</i> ) em cruz	-	Não	Sim	1563	742	Punção
BD-A02	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	Pino ( <i>Stud</i> ) em cruz	Treliças com inclinação de 60°	Não	Sim	1544	967	Punção
BD-A03	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	Pino ( <i>Stud</i> ) em cruz	Treliças com inclinação de 45°	Não	Sim	1578	871	Punção
BD-A04	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	-	Treliças com inclinação de 60°	Não	Sim	1557	762	Punção
BD-A05	<i>Bubbledeck</i> com módulo reforçado	-	Treliças com inclinação de 45°	Não	Sim	1578	902	Punção

## 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentadas comparações entre as lajes confeccionadas, analisando seus comportamentos durante os ensaios e conferindo os resultados obtidos com as adaptações feitas das normas: *ACI 318* (2014), *EUROCODE 2* (2004), *NBR 6118* (2014) e *fib MC2010* (2010). Os parâmetros analisados serão: as deformações das barras de flexão, as deformações dos *studs*, as deformações das treliças, as deformações do concreto, os deslocamentos verticais, as cargas últimas e os modos de ruptura obtidos nos ensaios.

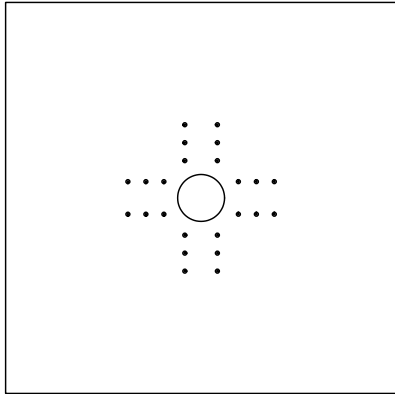
Com o fim de garantir uma melhor análise, os modelos foram divididos em sete grupos, em virtude da variação dos parâmetros de ensaio. A Tabela 5.1 apresenta os grupos estabelecidos, mostrando os parâmetros que foram estudados.

Tabela 5.1 – Grupos e parâmetros analisados

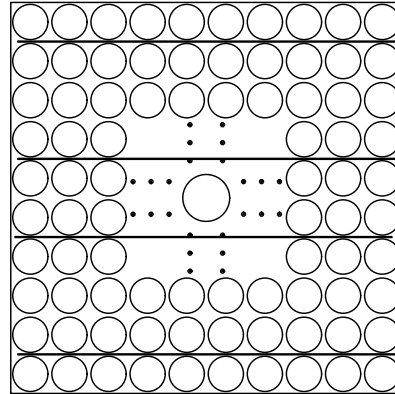
Grupos	Modelos	Parâmetros em comum	Parâmetros diferentes
1	RSP-A01 e BD-A01	Armadura de cisalhamento na região maciça ( <i>studs</i> )	Peso próprio
2	BD-A02 e BD-A03	Armadura de cisalhamento na região maciça ( <i>studs</i> ) , e treliças nas nervuras	Inclinação das diagonais das treliças BD-A02 (60°) e BD-A03 (45°)
3	BD-A04 e BD-A05	Ausência de armadura de cisalhamento na região maciça ( <i>studs</i> )	Inclinação das diagonais das treliças BD-A02 (60°) e BD-A03 (45°)
4	BD-A02 e BD-A04	Treliças de 60° nas nervuras	Armadura de cisalhamento na região maciça ( <i>studs</i> ) da laje BD-A02
5	BD-A03 e BD-A05	Treliças de 45° nas nervuras	Armadura de cisalhamento na região maciça ( <i>studs</i> ) da laje BD-A03
6	BD-A02, BD-A03 e BD-A01	Armadura de cisalhamento na região maciça ( <i>studs</i> )	Inclinação das diagonais das treliças BD-A02 (60°) e BD-A03 (45°)
7	BD-A04, BD-A05 e BD-A01	-	Inclinação das diagonais das treliças BD-A02 (60°) e BD-A03 (45°)

Para uma melhor análise do comportamento de cada modelo a Figura 5.1 apresenta um resumo das características de cada um dos modelos.

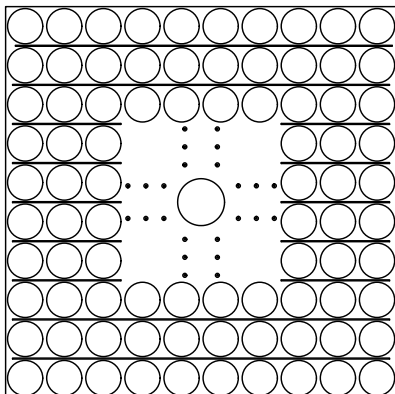
LAJE RSP-A01



LAJE BD-A01

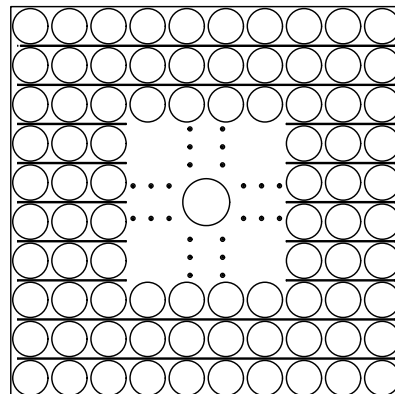


LAJE BD-A02



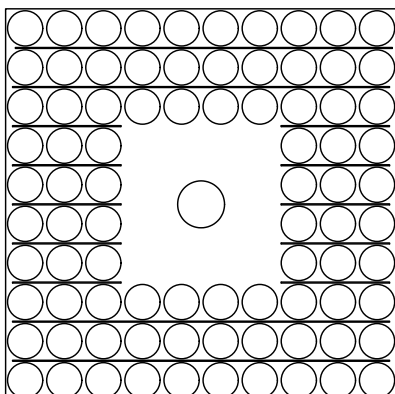
Treliça 60°

LAJE BD-A03



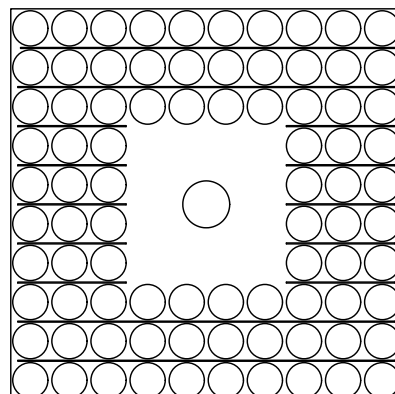
Treliça 45°

LAJE BD-A04



Treliça 60°

LAJE BD-A05



Treliça 45°

· Stud  
— Treliça

Figura 5.1 – Resumo das características dos modelos

## 5.1 - COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DOS MODELOS

### 5.1.1 - Grupo 1: Modelos RSP-A01 e BD-A01

Observou-se que a laje BD-A01 apresentou maiores deslocamentos verticais para todas as cargas, no entanto a laje RSP-A01 teve uma carga de ruptura 27% maior que a BD-A01, o que mostra que as lajes maciças, como esperado têm maior rigidez e maior resistência à punção que as lajes *Bubbledeck*.

Em relação às deformações da armadura de flexão ambos modelos apresentaram comportamentos similares. Nenhuma das barras de flexão destas lajes alcançaram a deformação de escoamento, e as maiores deformações para as duas lajes ocorreram nos extensômetros mais próximos do pilar: extensômetros EF4 e EF5 na direção S-N, e EF1, e EF2 na direção L-O.

Para este grupo não foi feita a análise das deformações nos *studs*, já que os resultados das deformações nos *studs* da laje RSP-A01 foram perdidos durante a execução do ensaio. Este fato já foi explicado no capítulo 4.

Já para o caso das deformações do concreto notou-se que estas foram semelhantes em ambas lajes, registrando maiores leituras nos extensômetros tangenciais (EC2, e EC3). Os valores máximos alcançados foram: 1,88 ‰ para a laje RSP-A01, e 1,61 ‰ para a laje BD-A01, o qual representa aproximadamente entre o 46% a 54% da deformação de esmagamento do concreto.

Finalmente depois de analisar as cargas de ruptura e padrão de fissuração dos modelos em questão, é possível dizer que o modelo BD-A01 deformou mais para uma carga de ruptura menor, enquanto que o modelo RSP-A01 deformou menos para uma carga de ruptura maior. Isto se deve ao fato da laje *Bubbledeck* ter menor quantidade de concreto por causa das esferas ocas contidas no seu interior. O modelo RSP-A01 teve carga de ruptura  $P_u = 943$  kN e o modelo BD-A01 teve carga de ruptura  $P_u = 742$  kN.

O mapa de fissuração do modelo BD-A01 mostra um maior número de fissuras tangenciais e radiais que a laje RSP-A01, isso se explica devido a uma maior ductilidade da laje BD-A01. Por outro lado é possível ver como nas duas lajes formou-se uma superfície de ruptura delimitada por um perímetro com forma circular, o qual sugere junto com outros resultados (constatação do não escoamento das barras da armadura de flexão, deformações relativamente baixas da superfície inferior do concreto) uma ruptura por punção. Por fim ao analisar as distâncias dos perímetros que demarcam as superfícies de ruptura das duas lajes, pode-se ver como na laje RSP-A01 esta ficou mais próxima da última camada de *studs*, enquanto que na laje BD-A01

esta ficou muito mais afastada. Isto possivelmente evidencia que na laje RSP-A01 a ruptura aconteceu na região reforçada, ao contrário da laje BD-A01 onde as evidências mostram uma ruptura por punção fora da região com armadura de cisalhamento (*studs*). Em todo caso isto só pode ser comprovado mediante a realização de cortes transversais nas duas lajes, procedimentos que ainda não foram executados.

### 5.1.2 - Grupo 2: Modelos BD-A02 e BD-A03

Percebeu-se uma maior rigidez na laje BD-A02, mostrando que a inclinação das treliças, que conseqüentemente propiciaram uma maior densidade de armadura vertical, provavelmente influencia na rigidez da ligação laje-pilar. Segundo isto o uso de treliças de 60° nas nervuras de uma laje *Bubbledeck* gera um melhor comportamento na sua rigidez se comparada com uma laje das mesmas características onde ao invés de usar treliças de 60° forem usadas treliças de 45°.

No caso das deformações da armadura de flexão, as duas lajes apresentam comportamentos similares, mostrando deformações entre 29% e 81% da deformação de escoamento do aço (2,89 ‰), exceto na barra com o extensômetro EF4 da laje BD-A03, a qual apresentou uma deformação de 2,73 ‰, ou seja 94% da deformação de escoamento do aço. Contudo é possível dizer de maneira geral que nenhuma das barras escoou, e que os ensaios possivelmente estiveram governados pela punção.

Tanto na laje DB-A02 como na laje BD-A03 a solicitação dos *studs* foi muito baixa alcançando apenas valores entre o 4,5% e 6,6% da deformação de escoamento do aço. Por outro lado ao analisar as deformações nas treliças dos dois modelos em questão, pode-se notar maiores solicitações nas treliças usadas na laje BD-A02 (treliças de 60°).

As deformações no concreto foram semelhantes nas duas lajes, e as maiores deformações foram registradas nos extensômetros tangenciais (EC2, e EC3). Os valores máximos alcançados foram: 1,15 ‰ para a laje BD-A02, e 2,01 ‰ para a laje BD-A03, valores que representam aproximadamente do 33% a 57% da deformação de esmagamento do concreto.

A laje BD-A02 teve uma carga de ruptura  $P_u = 967$  kN, enquanto que a laje BD-A03 teve carga de ruptura  $P_u = 871$  kN. O incremento na resistência da laje BD-A02 em relação a laje BD-A03 foi de 11%.

O mapa de fissuração do modelo BD-A03 mostra um maior número de fissuras tangenciais e radiais que a laje BD-A02, isso se explica devido a uma maior ductilidade da laje BD-A03. Ao igual que no grupo anterior, é possível ver como nas duas lajes formou-se um superfície de ruptura delimitada por um perímetro com forma circular, o qual sugere junto com outros

resultados (constatação do não escoamento das barras da armadura de flexão, deformações relativamente baixas da superfície inferior do concreto) uma ruptura por punção.

### **5.1.3 - Grupo 3: Modelos BD-A04 e BD-A05**

A laje BD-A05 (treliça de 45°) alcançou uma carga de ruptura um pouco maior que a carga de ruptura da laje BD-A04, determinando assim uma maior rigidez para a laje BD-A05, fato possivelmente associado à diferença existente entre a resistência à compressão para o concreto da laje BD-A05 ( $f_c = 37$  MPa) e a laje BD-A04 ( $f_c = 29$  MPa) .

Uma vez analisados os gráficos das deformações da armadura de flexão dos dois modelos, foi possível ver que as maiores deformações aconteceram na laje BD-A05. Embora a barra número 4 da laje BD-A05 tenha atingido o escoamento, é possível dizer em geral que ambos os modelos estiveram governados pela punção e não pela flexão. Por outro lado foram observadas maiores solicitações nas treliças de 45° (laje BD-A05), fato que poderia estar influenciado pela diferença existente entre as resistências à compressão para o concreto dos dois modelos.

Semelhantes às outras lajes, as deformações no concreto foram parecidas para os dois modelos. As maiores deformações foram registradas nos extensômetros tangenciais (EC2, e EC3). Os valores máximos alcançados foram: 1,31 ‰ para a laje DB-A04, e 1,48 ‰ para a laje BD-A05, valores que representam aproximadamente o 37% a 42% da deformação de esmagamento do concreto.

As cargas de ruptura obtidas para as lajes BD-A04, e BD-A05 foram 762 kN e 902 kN respectivamente. O qual indica que o uso de treliças de 45° gerou um incremento do 18% na resistência a punção da laje BD-A05 se comparada com a laje BD-A04.

Os mapas de fissuração e o registro fotográfico da ruptura na parte inferior dos modelos BD-A04 e BD-A05, mostram para as duas lajes uma ruptura por punção dentro da região maciça. Porém este fato só pode ser demonstrado fazendo cortes transversais nas lajes, para poder observar por onde passaram as fissuras no momento da ruptura.

### **5.1.4 - Grupo 4: Modelos BD-A02 e BD-A04**

Analisando a relação entre os deslocamentos verticais e a carga de ruptura dos dois modelos deste grupo, observou-se que a laje BD-A02 apresentou maior rigidez que a laje BD-A04, como esperado. Para as lajes BD-A02 e BD-A04 foi percebido que o uso de treliças de 60° não gerou um aumento significativo nas deformações das barras de flexão, e seu comportamento foi similar ao comportamento das barras de flexão das lajes RSP-A01 e BD-A01(lajes de referência).



Por outro lado ao avaliar a principal diferença entre os dois modelos (utilização de armadura de cisalhamento na região maciça da laje BD-A02), foi possível notar como o uso de *studs* não influenciou no desempenho ou a solicitação das treliças de 60°, e o fato das treliças da laje BD-A02 apresentar maior solicitação talvez esteja ligado à diferença existente entre as resistências à compressão do concreto com as que foram confeccionadas as duas lajes.

Além disto nenhuma das duas lajes deste grupo atingiu a deformação de esmagamento do concreto (3,5 ‰), e os maiores valores alcançados foram de 1,15 ‰ para a laje BD-A02, e de 1,31 ‰ para a laje BD-A03, o qual representa aproximadamente entre o 33% a 37% da deformação de esmagamento do concreto.

Também foi observado que a laje BD-A02 apresentou uma carga de ruptura ( $P_u=967$  kN) 27% maior que a carga de ruptura da laje BD-A04 ( $P_u=762$  kN). Finalmente os mapas de fissuração dos dois modelos analisados neste grupo mostraram uma possível ruptura por punção para os dois modelos. Fato que só pode ser comprovado fazendo um corte na seção transversal das lajes.

### 5.1.5 - Grupo 5: Modelos BD-A03 e BD-A05

Analisando a relação entre os deslocamentos verticais e a carga de ruptura dos dois modelos deste grupo, observou-se que eles apresentaram uma rigidez semelhante, diferente do que se esperava.

Quanto ao comportamento da armadura de flexão observou-se que as barras localizadas mais perto do pilar e instrumentadas com o extensômetro EF4 tanto da lajes BD-A03 como da laje BD-A05 apresentaram deformações acima de 90% de  $\varepsilon_{ys}$ .

Em relação à principal diferença entre os dois modelos (uso de *studs* na região maciça da laje BD-A03), pode-se notar como este parâmetro não influenciou na carga de ruptura das duas lajes, pois os valores obtidos para os dois modelos foram muito próximos. Ao igual que as cargas de ruptura, as deformações nas treliças dos dois modelos apresentaram um comportamento similar.

Quanto às deformações na superfície do concreto, foi observado ao igual que nas outras lajes desta pesquisa que nenhuma delas alcançaram a deformação de esmagamento do concreto (3,5 ‰), e os maiores valores alcançados foram de 2,01 ‰ para a laje BD-A03, e de 1,48 ‰ para a laje BD-A05, o qual representa aproximadamente entre o 42% a 57% da deformação de esmagamento do concreto.

A laje BD-A03 apresentou uma carga de ruptura ( $P_u=871$  kN) 3% menor que a carga de ruptura

da laje BD-A05 ( $P_u = 902$  kN).

Finalmente os mapas de fissuração dos dois modelos analisados neste grupo mostraram uma ruptura por punção tanto para a laje BD-A03 como para a laje BD-A05. Fato que só pode ser comprovado fazendo um corte na seção transversal das lajes.

### 5.1.6 - Grupo 6: Modelos BD-A01, BD-A02, e BD-A03

Observou-se que a laje BD-A01 além de apresentar os maiores deslocamentos verticais para todas as cargas, registrou a menor carga de ruptura entre os três modelos analisados. Este resultado já era esperado e possivelmente aconteceu devido à ausência de treliças nas suas nervuras. Pelo qual pode-se dizer que o uso de treliças tanto de  $60^\circ$  como de  $45^\circ$  geraram um incremento na rigidez das lajes BD-A02 e BD-A03 respectivamente, se comparadas com a laje de referência BD-A01.

Por outro lado em relação às deformações da armadura de flexão, os gráficos analisados mostraram um comportamento similar para as lajes BD-A01 e BD-A02, enquanto que para as barras da laje BD-A03 foram apresentados valores de deformações na armadura de flexão entre 15 a 30% maiores que para as lajes mencionadas anteriormente. Para as três lajes as maiores deformações aconteceram nos extensômetros posicionados na barras de flexão mais próxima do pilar: extensômetros EF4 e EF5 na direção S-N, e EF1, e EF2 na direção L-O.

Depois de realizado o análise dos resultados das deformações nos *studs* dos três modelos deste grupo (BD-A01, BD-A02 e BD-A03), foi notado como eles apresentaram solicitações muito baixas, as quais em média alcançaram uma deformação de  $0,135^\circ/\infty$ ,  $0,131^\circ/\infty$  e  $0,192^\circ/\infty$  respectivamente, o que equivale entre o 4,5% e 6,64% da deformação de escoamento do aço ( $2,89^\circ/\infty$ ).

Já para o caso das deformações do concreto notou-se que estas foram semelhantes nas três lajes, registrando-se as maiores leituras nos extensômetros tangencias (EC2, e EC3). Os valores máximos alcançados foram:  $1,61^\circ/\infty$  para a laje BD-A01,  $1,15^\circ/\infty$  para a laje BD-A02, e  $2,01^\circ/\infty$  para a laje BD-A03 o qual representa aproximadamente entre o 33% a 57% da deformação de esmagamento do concreto.

Em ordem decedente a laje que maior carga de ruptura alcançou foi a laje BD-A02 com  $P_u = 967$  kN, seguido da laje BD-A03 com  $P_u = 871$  kN e por último a laje BD-A01 com  $P_u = 742$  kN. O qual indica que o uso de treliças de  $60^\circ$  ou  $45^\circ$  geraram um incremento na resistência das lajes BD-A02 e BD-A03, sendo de 30% para a laje BD-A02 e do 17% para a laje BD-A03.

### **5.1.7 - Grupo 7: Modelos BD-A01, BD-A04, e BD-A05**

A laje BD-A01 apresentou os maiores deslocamentos verticais e a menor carga de ruptura entre os três modelos analisados, pelo qual pode-se dizer que foi a laje com menor rigidez deste grupo. Por conseguinte, o uso de treliças tanto de 60° como de 45° geraram um incremento na rigidez das lajes BD-A04 e BD-A05 respectivamente, se comparadas com a laje de referência BD-A01.

Por outro lado em relação às deformações da armadura de flexão, os gráficos analisados mostraram um comportamento similar para as lajes BD-A01 e BD-A04, enquanto que para as barras da laje BD-A05 foram apresentados valores de deformações na armadura de flexão entre 15 a 30% maiores que para as lajes mencionadas anteriormente. Para as três lajes as maiores deformações aconteceram nos extensômetros posicionados na barras de flexão mais próxima do pilar: extensômetros EF4 e EF5 na direção S-N, e EF1, e EF2 na direção L-O.

Quanto as deformações no concreto, notou-se que estas foram semelhantes nas três lajes, registrando-se as maiores leituras nos extensômetros tangencias (EC2, e EC3). Os valores máximos alcançados foram: 1,61 ‰ para a laje BD-A01, 1,31 ‰ para a laje BD-A03, e 1,48 ‰ para a laje BD-A05 o qual representa aproximadamente entre o 37% a 46% da deformação de esmagamento do concreto.

As cargas de ruptura obtidas para as lajes BD-A01, BD-A04 e BD-A05 foram 742 kN, 762 kN e 902 kN respectivamente. O qual indica que o uso de treliças de 60° ou 45° geraram um incremento na resistência das lajes BD-A04 e BD-A05 em relação com a laje de referência BD-A01, sendo de 3% para a laje BD-A04 e do 21.5% para a laje BD-A05.

Finalmente ao comparar os mapas de fissuração das três lajes, observou-se que: provavelmente na laje BD-A01 a ruptura por punção aconteceu fora da região reforçada com *studs*, enquanto que para as lajes BD-A04 e BD-A05 as rupturas talvez aconteceram dentro da região maciça.

## **5.2 - ADAPTAÇÃO ÀS NORMAS VIGENTES PARA O CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DE PUNÇÃO PARA LAJES *BUBBLEDECK***

O cálculo da resistência ao cisalhamento para as lajes *Bubbledeck* será feito mediante uma adaptação das equações propostas pelas normas *ACI 318* (2014), *EUROCODE 2* (2004), *NBR 6118* (2014) e *fib MC2010* (2010). Esta adaptação proposta por Held (2002), consistiu em descontar os vazios deixados pelas esferas plásticas ao se definir o perímetro crítico (Figura 5.2, permitindo fazer uma estimativa aproximada da área de concreto a ser considerada, como

mostrado na Equação 5.1.

$$AC_{ef} = (u \cdot d) - \sum \frac{\pi \cdot c_{arc}^2}{4} \quad (5.1)$$

Onde

$AC_{ef}$ : Área de concreto efetiva na seção do perímetro crítico;

$u$ : Perímetro crítico;

$d$  Altura útil da laje;

$c_{arc}$ : Comprimento de arco gerado pela interseção entre o perímetro crítico ( $u$ ) e a projeção da esfera na superfície da laje.

Seção transversal das Treliças usadas usadas nas nervuras

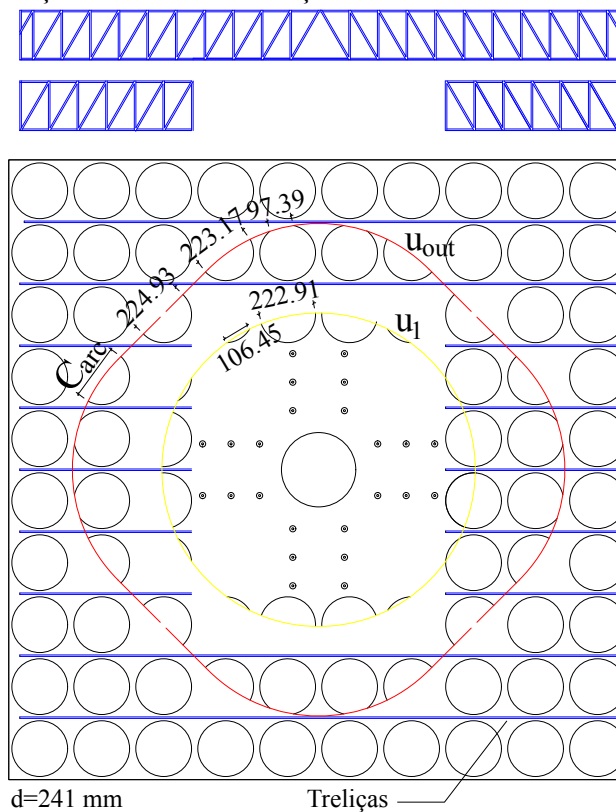


Figura 5.2 – Perímetros de controle na laje BD-A02

Como exemplos as equações: Equação 5.2, Equação 5.3, Equação 5.4, e Equação 5.5 mostram as formulas da norma *NBR 6118* (2014) para o cálculo da resistência ao cisalhamento, adaptadas

para lajes tipo *Bubbledeck*.

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot ((u_1 \cdot d) - \sum \frac{\pi \cdot c_{arc}^2}{4}) \quad (5.2)$$

$$V_{R,max} = 0,324 \cdot f_{cd} \cdot (1 - \frac{f_{ck}}{250}) \cdot u_o \cdot d \quad (5.3)$$

$$V_{R,cs} = 0,14 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot ((u_1 \cdot d) - \sum \frac{\pi \cdot c_{arc}^2}{4}) + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,d} \cdot \sin \alpha \quad (5.4)$$

$$V_{Rc,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot ((u_{out} \cdot d) - \sum \frac{\pi \cdot c_{arc}^2}{4}) \quad (5.5)$$

As treliças interceptadas pelos perímetros de controle serão consideradas nos cálculos da resistência ao cisalhamento, pelo que as equações apresentadas anteriormente ficarão assim:

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot ((u_1 \cdot d) - \sum \frac{\pi \cdot c_{arc}^2}{4}) + \frac{d}{s_{rt}} \cdot A_{swtu1} \cdot f_{yw,d} \cdot \sin \alpha_t \quad (5.6)$$

$$V_{R,max} = 0,27 \cdot f_{cd} \cdot (1 - \frac{f_{ck}}{250}) \cdot u_o \cdot d \quad (5.7)$$

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_{rs}} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,d} \cdot \sin \alpha_{st} \quad (5.8)$$

$$V_{Rc,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot ((u_{out} \cdot d) - \sum \frac{\pi \cdot c_{arc}^2}{4}) \quad (5.9)$$

$$V_{Rcs,out} = 0,75 \cdot V_{Rc,out} + \frac{d}{s_{rt}} \cdot A_{swtout} \cdot f_{yw,d} \cdot \sin \alpha_t \quad (5.10)$$

Onde:

$s_{rs}$ : Distância entre camadas de *studs*;

$s_{rt}$ : Distância entre as diagonais das treliças;

$A_{swtu1}$ : Área de aço correspondente à seção transversal das diagonais das treliças interceptadas pelo perímetro de controle  $u_1$  ;

$A_{swtOut}$ : Área de aço correspondente à seção transversal das diagonais das treliças interceptadas pelo perímetro de controle  $u_{out}$  ;

$\alpha_t$ : Ângulo de inclinação das treliças;

$\alpha_{st}$ : Ângulo de inclinação dos *studs*;

$V_{Rcs,out}$ : Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar fora da região com *studs* considerando

a contribuição das treliças.

### 5.3 - COMPARAÇÕES DAS CARGAS DE RUPTURA EXPERIMENTAIS COM AS CARGAS DE RUPTURA ESTIMADAS PELAS ADAPTAÇÕES FEITAS NAS NORMAS

Neste item é feita a comparação entre as cargas de ruptura obtidas no laboratório com as estimativas das normas analisadas neste trabalho: *ACI 318* (2014), *EUROCODE 2* (2004), *NBR 6118* (2014) e *fib MC2010* (2010). As normas estudadas não tratam da verificação à punção para lajes tipo *Bubbledeck*, por isso, foram sugeridas alterações na determinação do perímetro de controle, já descritas no Capítulo 2.

Com a finalidade de proporcionar um melhor entendimento das análises aqui feitas, foi estabelecido um critério de avaliação dos resultados obtidos pelas estimativas das normas para a relação  $V_u/V_{Norma}$  (sendo  $V_u$  a carga última de ensaio e  $V_{Norma}$  a carga última estimada pela norma). A Tabela 5.2 mostra os critérios de avaliação dos valores médios da relação  $V_u/V_{Norma}$ .

Tabela 5.2 – Critérios de avaliação

Critério de Avaliação	Classificação
$V_u/V_{Norma} < 0,95$	Superestimado
$0,95 \leq V_u/V_{Norma} \leq 1,15$	Preciso
$1,15 < V_u/V_{Norma} \leq 1,30$	Satisfatório
$V_u/V_{Norma} > 1,30$	Subestimado

A seguir a Tabela 5.3 apresenta um resumo dos principais parâmetros de cálculo da carga última à punção para cada um dos modelos.

Tabela 5.3 – Principais parâmetros de cálculo da carga última à punção

Laje	d (mm)	$\rho$	$f_c$ (MPa)	Reforço de cisalhamento (região maciça)							Reforço de cisalhamento (região nervurada)		
				Reforço de cisalhamento							$\phi_w$ (mm)	$\alpha_t$ (°)	$s_o$ (mm)
				$\phi_w$ (mm)	Arranjo camada	N° de por camada	N° de linhas (°)	$\alpha_{st}$ (mm)	$s_o$ (mm)	$s_r$ (mm)			
RSP	231	0,0068	37,0	8	Cruz	3	8	90	110	115	-	-	-
BD-A01	236	0,0083	29,0	8	Cruz	3	8	90	110	115	-	-	-
BD-A02	241	0,0081	37,0	8	Cruz	3	8	90	110	115	6,3	60	57,74
BD-A03	243	0,0080	37,0	8	Cruz	3	8	90	110	115	6,3	45	99,85
BD-A04	242	0,0081	29,0	-	-	-	-	-	-	-	6,3	60	57,74
BD-A05	244	0,0080	37,0	-	-	-	-	-	-	-	6,3	45	99,85

Onde:

$s_r$ : Distância entre as camadas do reforço.

$s_o$ : Distância entre a primeira camada do reforço de cisalhamento e a face do pilar.

$\alpha_t$ : Ângulo de inclinação das treliças;

$\alpha_{st}$ : Ângulo de inclinação dos *studs*;

Serão apresentadas da Tabela 5.4 até a Tabela 5.7 e da Figura 5.3 até a Figura 5.6 comparações entre as estimativas das normas apresentadas (*ACI 318* (2014), *EUROCODE 2* (2004), *NBR 6118* (2014) e *fib MC2010* (2010)) e os resultados de cargas últimas obtidas experimentalmente no ensaios. Por se tratar de um trabalho experimental, foi adotado um coeficiente de segurança  $\gamma_c = 1,0$  para o cálculo das tensões resistentes em todas as normas analisadas.

Tabela 5.4 – Cargas últimas de punção pelo *ACI 318* (2014) para todos os Modelos

Laje	$V_{R,c}$	$V_{R,s}$	$V_{R,cs}$	$V_{Rc,out}$	$V_{Rs,out}$	$V_{Rcs,out}$	$V_{R,max}$	$V_{ACI}$	$V_u$	$V_u/V_{ACI}$
RSP-A01	586	339	925	857	-	857	1.563	857	943	1,10
BD-A01	535	347	882	585	-	585	1.427	585	742	1,27
BD-A02	623	354	977	676	219	895	1.661	895	967	1,08
BD-A03	630	357	987	683	127	810	1.681	810	871	1,07
BD-A04	740	-	-	-	-	-	1.479	740	762	1,03
BD-A05	846	-	-	-	-	-	1.691	846	902	1,07
									Média	1,1
									Desvio padrão	0,08
									C.V (%)	0,07

Onde:

$V_{R,c}$ : Contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento;

$V_{R,s}$ : Contribuição da armadura de cisalhamento na resistência ao cisalhamento.

$V_{R,cs}$ : Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar com armadura de cisalhamento na região maciça;

$V_{Rc,out}$ : Contribuição do concreto na resistência ao cisalhamento fora da região maciça reforçada;

$V_{Rs,out}$ : Contribuição das treliças na resistência ao cisalhamento fora da região maciça reforçada;

$V_{Rcs,out}$ : Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar fora da região maciça reforçada;

$V_{R,max}$ : Resistência ao cisalhamento da ligação laje-pilar entre a face do pilar e a armadura de cisalhamento;

$V_u$ : Carga última atingida durante o ensaio

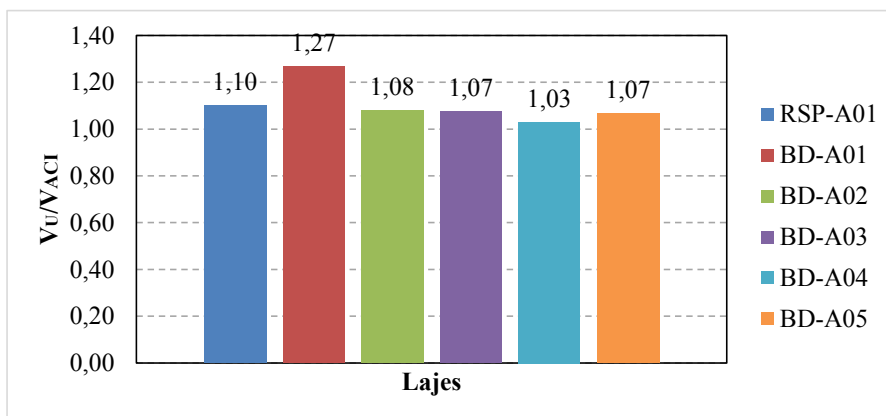


Figura 5.3 – Relação carga última experimental,  $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no *ACI 318* (2014)

Tabela 5.5 – Cargas últimas de punção pelo *EUROCODE 2* (2004) para todos os Modelos

Laje	$V_{R,c}$	$V_{R,s}$	$V_{R,cs}$	$V_{Rc,out}$	$V_{Rs,out}$	$V_{Rcs,out}$	$V_{R,max}$	$V_{EC2}$	$V_u$	$V_u/V_{EC2}$
RSP-A01	905	429	1.107	1.165	0	1.165	1.853	1.107	943	0,85
BD-A01	594	440	885	649	0	649	1.540	649	742	1,14
BD-A02	943	451	1.158	757	1.126	1.694	1.933	1.158	967	0,84
BD-A03	683	455	968	779	537	1.121	1.949	968	871	0,90
BD-A04	906	-	-	-	-	-	1.579	906	762	0,84
BD-A05	681	-	-	-	-	-	1.957	681	902	1,32
Média										0,98
Desvio padrão										0,20
C.V (%)										0,21

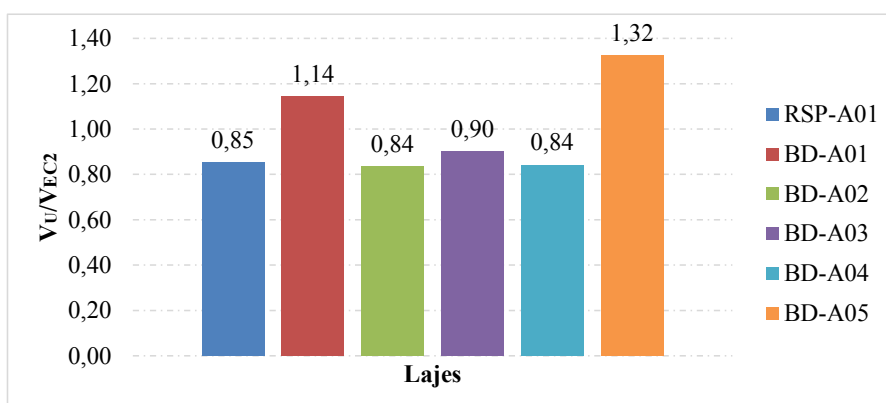


Figura 5.4 – Relação carga última experimental,  $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no *EUROCODE 2* (2004)



Tabela 5.6 – Cargas últimas de punção pelo *NBR 6118* (2014) para todos os Modelos

Laje	$V_{R,c}$	$V_{R,s}$	$V_{R,cs}$	$V_{Rc,out}$	$V_{Rs,out}$	$V_{Rcs,out}$	$V_{R,max}$	$V_{NBR}$	$V_u$	$V_u/V_{NBR}$
RSP-A01	905	381	1.060	1.335	-	1.335	2.224	1.060	943	0,89
BD-A01	594	390	835	786	-	786	1.847	786	742	0,94
BD-A02	886	398	1.062	948	993	1.704	2.320	1.062	967	0,91
BD-A03	656	401	893	991	473	1.216	2.339	893	871	0,98
BD-A04	848	-	-	-	-	-	1.894	848	762	0,90
BD-A05	654	-	-	-	-	-	2.349	654	902	1,38
Média										1,00
Desvio padrão										0,17
C.V (%)										0,17

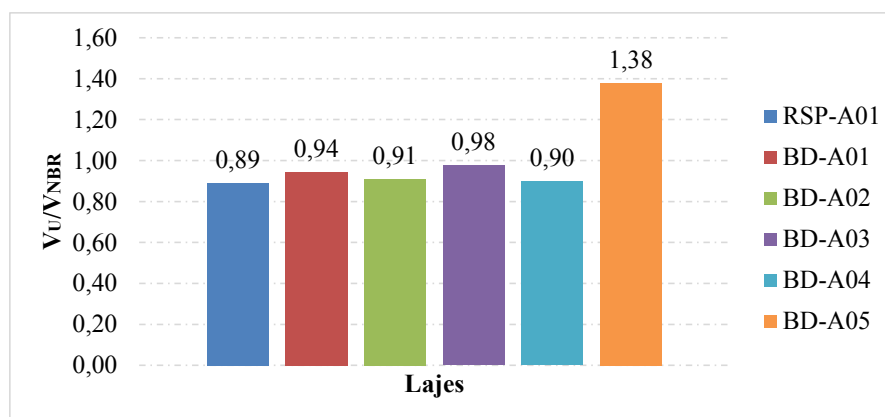


Figura 5.5 – Relação carga última experimental,  $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no *NBR 6118* (2014)

Tabela 5.7 – Cargas últimas de punção pelo *fib MC2010* (2010), usando o nível II para todos os Modelos

Laje	$V_{R,c}$	$V_{R,s}$	$V_{R,cs}$	$V_{Rc,out}$	$V_{Rs,out}$	$V_{Rcs,out}$	$V_{R,max}$	$V_{fib}$	$V_u$	$V_u/V_{fib}$
RSP-A01	327	332	886	1.037	-	-	1.551	886	943	1,06
BD-A01	299	292	834	861	-	-	1.519	834	742	0,89
BD-A02	348	318	909	893	62	955	1.654	909	967	1,06
BD-A03	352	321	913	916	50	966	1.656	913	871	0,95
BD-A04	310	-	-	-	-	-	1.888	674	762	1,13
BD-A05	354	-	-	-	-	-	2.167	774	902	1,17
Média										1,04
Desvio padrão										0,10
C.V (%)										0,10

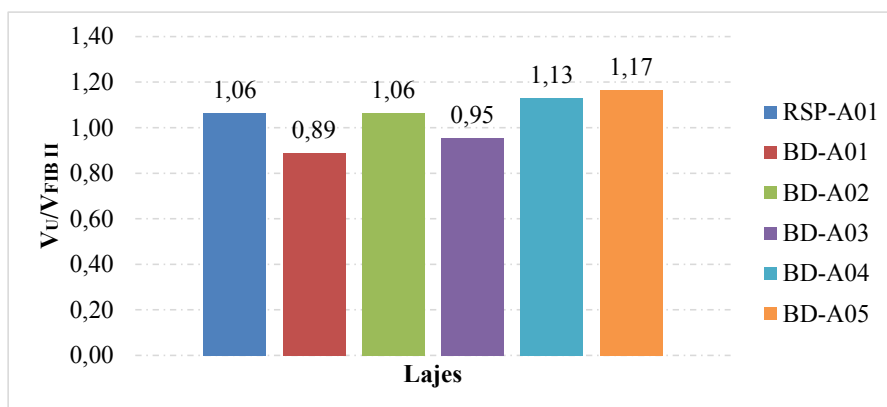


Figura 5.6 – Relação carga última experimental,  $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no *fib MC2010* (2010)

Tabela 5.8 – Cargas últimas de punção pelo *fib MC2010* (2010), usando o nível III para todos os Modelos

Laje	$V_{R,c}$	$V_{R,s}$	$V_{R,cs}$	$V_{Rc,out}$	$V_{Rs,out}$	$V_{Rcs,out}$	$V_{R,max}$	$V_{fib}$	$V_u$	$V_u/V_{fib}$
RSP-A01	327	272	900	1.118	-	-	1.758	900	943	1,05
BD-A01	299	240	849	926	-	-	1.706	849	742	0,87
BD-A02	348	272	924	967	62	1.028	1.823	924	967	1,05
BD-A03	352	265	932	990	50	1.040	1.868	932	871	0,93
BD-A04	310	-	-	-	-	-	2.017	720	762	1,06
BD-A05	354	-	-	-	-	-	2.315	827	902	1,09
Média										1,01
Desvio padrão										0,08
C.V (%)										0,08

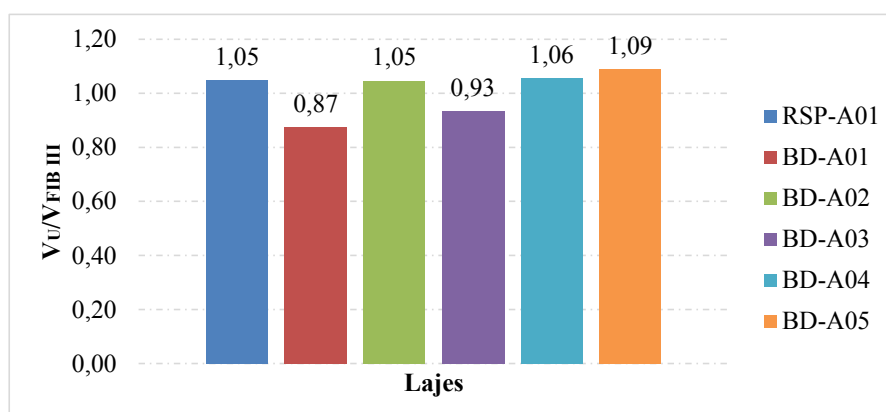


Figura 5.7 – Relação carga última experimental,  $V_u$ , dividida pela carga última obtida pelas modificações feitas no *fib MC2010* (2010)

Ao analisar os resultados obtidos das modificações feitas no *EUROCODE 2* (2004) e na *NBR*

6118 (2014) para o cálculo da punção em lajes *bubbledeck* é possível perceber como as duas normas estimaram cargas de ruptura similares, superestimando ( $V_u/V_{Norma} < 0,95$ ) a resistência em quase todas as lajes. Em quanto ao *ACI 318* (2014) verifica-se que os valores encontrados são muito precisos ( $0,95 \leq V_u/V_{Norma} \leq 1,15$ ) apresentando em média uma relação  $V_u/V_{Norma}$  igual a 1,1. Finalmente ao analisar os resultados obtidos com o *fib MC2010* (2010), pode-se observar que as modificações feitas neste código usando o nível II e o nível III, os resultados tendem a ser precisos, apresentando uma relação  $V_u/V_{Norma}$  em média de 1,04 para o nível II e 1,01 para o nível III, sendo a norma mais precisa das quatro normas usadas nesta pesquisa.

Para o *EUROCODE 2* (2004) e a *NBR 6118* (2014) a superestimação dos valores calculados possivelmente aconteceu devido ao fato de todas as diagonais das treliças interceptadas pelos perímetros de controle e a camada de *studs* nas lajes que tinham este tipo de reforço foram consideradas como tracionadas, o qual consequentemente incrementou a carga de ruptura calculada. Porém existiram algumas diagonais que: ou foram pouco solicitadas ou não foram solicitadas.

Já para o caso da laje RSP-A01 (laje maciça de referência), na qual foram usadas as normas sem modificação alguma, destaca-se o fato de ela apresentar uma carga de ruptura superestimada para o *EUROCODE 2* (2004) e a *NBR 6118* (2014), o qual indicaria uma baixa solicitação dos *studs* das lajes ensaiadas.

## 6 - CONCLUSÕES

### 6.1 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os deslocamentos verticais foram medidos através de LVDTs posicionados ortogonalmente nas direções x e y. Observou-se que o uso de treliças nas nervuras aumentou a rigidez das lajes *Bubbledeck*. Neste sentido as lajes que tiveram treliças de 60°, e conseqüentemente uma maior densidade de armadura transversal, apresentaram maior rigidez que as lajes reforçadas com treliças de 45°. Finalmente é possível dizer que o maior rigidez das seis lajes ensaiadas foi registrada na laje BD-A02 na qual foram usadas treliças de 60°.

### 6.2 - DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO

Observou-se que, como esperado, as maiores deformações foram registradas nas barras próximas ao pilar, tendo sido 2,73 ‰ a máxima deformação alcançada, verificada na laje BD-A03. Contudo, quase nenhuma das barras de flexão monitoradas nas seis lajes desta pesquisa alcançaram deformações com níveis de escoamento, devido ao seu dimensionamento, realizado para a ruptura por punção.

### 6.3 - DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE CISALHAMENTO (*STUDS*)

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o uso de *studs* não propiciaram maior capacidade de carga última à laje, visto que as deformações dos *studs* das laje BD-A01, BD-A02 e BD-A03 foram bem menores que a deformação de escoamento do aço (2,89 ‰), indicando que estas foram pouco solicitadas. Pelo qual, a contribuição dessas armaduras no combate aos esforços de punção nas lajes *Bubbledeck* foi prejudicada.

### 6.4 - DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE CISALHAMENTO (TRELIÇAS)

As maiores deformações nas treliças, aconteceram nas nervuras da laje BD-A02. Nesta laje apresentou-se deformações próximas ou superiores à deformação de escoamento do aço (2,89 ‰). Igualmente foi possível observar que as treliças de 60° apresentaram maior solicitações que as treliças de 45°.

## 6.5 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

O comportamento em relação às deformações do concreto foi semelhante em todas as lajes ensaiadas. Observou-se que as maiores deformações aconteceram nos extensômetros tangenciais (EC2, e EC3), e que nenhuma das lajes ensaiadas atingiu a deformação de esmagamento do concreto ( $3,5 \text{ ‰}$ ).

## 6.6 - MAPAS DE FISURAÇÃO

No instante da ruptura as seis lajes analisadas apresentaram na sua superfície superior um perímetro de fissuração com forma circular ou ovalada, o qual indica possivelmente a formação do cone de ruptura fora da região maciça para as lajes *Bubbledeck* BD-A02 e BD-A03.

## 6.7 - CARGAS DE RUPTURA

A laje maciça de referência RSP-A01 atingiu uma carga de ruptura 27% maior que a alcançada pela laje *Bubbledeck* BD-A01, o que significa que a redução de 40% para resistência ao cisalhamento proposta pela *BubbleDeck Interantional* é satisfatória para este caso.

O uso de treliças de  $60^\circ$  ou  $45^\circ$  geraram um incremento na resistência das lajes testadas ao serem comparadas com a laje *Bubbledeck* de referência (BD-A01), sendo de 30% para a laje BD-A02, 17% para a laje BD-A03, 3% para a laje BD-A04 e de 21.5% para a laje BD-A05.

## 6.8 - ESTIMATIVAS DAS NORMAS MODIFICADAS

Depois de realizadas as modificações nas normas usadas nesta pesquisa é possível concluir que o *EUROCODE 2* (2004) e a *NBR 6118* (2014) apresentaram resultados superestimados ( $V_u/V_{Norma} < 0,95$ ). O *ACI 318* (2014) e o *fib MC2010* (2010) para os níveis II e III, mostraram resultados precisos ( $0,95 \leq V_u/V_{Norma} \leq 1,15$ ).

## 6.9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o fim de orientar pesquisas futuras sobre o assunto tratado nesta dissertação, são propostas as seguintes recomendações:

- Executar uma nova série de ensaios onde seja possível comparar o comportamento a punção de lajes *Bubbedeck* e lajes nervuradas;
- Realizar uma análise numérica das lajes ensaiadas por meio do método dos elementos finitos;
- Melhorar o sistema de ensaio, garantindo que a aplicação e o controle do carregamento sejam feitos de forma precisa a cada passo de carga;
- Tentar no possível que os modelos para a análise experimental sejam feitos numa única concretagem, para evitar variações em características importantes como a resistência do concreto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

*ABNT NBR 5739* (2007). Associação brasileira de normas técnicas, Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Brasil.

*ABNT NBR 7222* (2011). Associação brasileira de normas técnicas, Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Brasil.

*ABNT NBR 8522* (2008). Associação brasileira de normas técnicas, Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, Brasil.

*ACI 318* (2014). American concrete institute. Farmington Hills, Michigan.

Aldejohann, M. (2008). "Zum Querkrafttragverhalten von Hohlkörperdecken mit zweiachsiger Lastabtragung". Tese de doutorado. Universität Duisburg-Essen, Alemanha, p. 185.

*Bubbledeck Brasil* (2016). URL: [www.bubbledeck.com.br](http://www.bubbledeck.com.br).

*Bubbledeck Paraguai* (2016). URL: [www.bubbledeck.com.by](http://www.bubbledeck.com.by).

Carvalho R. C., Pinheiro L. M. (2013). *Cálculos e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado*.

*CEB-FIP Model Code 1990* (1993). Comité Euro-internacional du Béton.

*EUROCODE 2* (2004). Comité Européen de Normalisation. Brussels, Belgium.

Ferreira, M. P. (2010). "Punção em lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento e momentos desbalanceados". Tese de doutorado. Universidade de Brasília UnB, Brasília, DF, p. 275.

*fib MC2010* (2010). International Federation for Structural Concrete.

Guandalini S.; Burdet, O. L.; Muttoni (2009). "Punching tests of slabs with low reinforcement ratios". Em: *ACI Structural Journal*, pp. 106–110.

Guandalini, S. (2006). "Poinçonnement Symétrique des dalles en béton armé." Tese de doutorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, p. 257.

Held M., Pfeffer K. (2002). "Punching behavior of biaxial hollow slabs". Em: *Cement & Concrete Composites Journal*.

- Lai, t (2010). “structural behavior of bubbledeck slabs and their application to lightweight bridge decks”. Diss. de mestrado. massachusetts institute of technology, cambridge, Usa, p. 41.
- Ledo, m (2016). “Análise experimental à punção de lajes lisas tipo bubbledeck com pilar interno”. Diss. de mestrado. universidade de Brasília, Brasília, Df, p. 119.
- Lima, h. J. N (2015). “Análise experimental à punção de lajes lisas tipo bubbledeck”. Diss. de mestrado. universidade de Brasília, Brasília, Df, p. 111.
- Macgregor J. G, Wigth J. K (2012). *Reinforced Concrete, Mechanics and Design*.
- Melo, g. S. S. A (1990). “behavior of reinforced concrete flat slabs after local failure”. Tese de doutorado. polytechnic of central london, london, england, p. 214.
- Nasvik (2011). “On the bubble: Placing concrete around plastic voids increases efficiency and reduces costs.” Em: *Concrete Construction - World of Concrete*, pp. 20–22.
- NBR 6118* (2014). Associação brasileira de normas técnicas. Rio de janeiro, brasil.
- Souza, shirley do s (2007). “Análise experimental de lajes lisas nervuradas de concreto Armado com armadura de cisalhamento”. Diss. de mestrado. universidade federal do pará, Belém, p. 181.
- Wood, j. G. M (1997). *pipers row car park - wolverhampton quantitative study of the causes of the partial collapse on 20th march 1997*. Report presented to structural studies & design ltd. Report presented to structural studies & design ltd.