

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PUNÇÃO DE LAJES LISAS TIPO
BUBBLEDECK**

HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PUNÇÃO DE LAJES
LISAS TIPO BUBBLEDECK**

HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA

ORIENTADOR: GUILHERME SALES SOARES DE A. MELO

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

**PUBLICAÇÃO: E.DM - 002 A/15
BRASÍLIA/DF: MARÇO - 2015
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PUNÇÃO DE LAJES LISAS TIPO
BUBBLEDECK**

HENRIQUE JORGE NERY DE LIMA

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

APROVADA POR:

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

**Prof. Marcos Honorato de Oliveira , DSc (UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Galileu Silva Santos, DSc (DNIT)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 03 DE MARÇO DE 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, HENRIQUE JORGE NERY Análise experimental à punção de lajes lisas tipo <i>Bubbledeck</i> [Distrito Federal] 2015.	
xx, 111p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2015). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Punção	2. <i>Bubbledeck</i>
3. Lajes lisas	4. Reforço
I. ENC/FT/UnB	II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, H. J. N. de (2015). Análise experimental à punção de lajes lisas tipo *Bubbledeck*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM - 002 A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Henrique Jorge Nery de Lima

TÍTULO: Análise experimental da punção de lajes lisas tipo *Bubbledeck*

GRAU: Mestre

ANO: 2015

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.

Henrique Jorge Nery de Lima
CLSW 104, Bloco C, Sala 145
70.670-533 Brasília - DF - Brasil.
e-mail: hjnery@gmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais e ao meu irmão.

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

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Guilherme Sales S. A. Melo pela orientação, acompanhamento e por toda confiança em mim depositada.

Agradeço ao professor Marcos Honorato, chefe do laboratório de estruturas, que nos auxiliou na execução dos modelos, na instrumentação e nos ensaios das lajes. Seus conhecimentos e experiência foram muito importantes. Também agradeço aos técnicos do laboratório de estruturas, Magno (sempre com perguntas que nos faziam pensar e melhorar a execução dos modelos), ao grande Pedro e ao grande Leandro pela ajuda fundamental na montagem e desmontagem dos ensaios, trabalho duro que com o auxílio de vocês foi melhor executado. Em tempo agradeço aos técnicos do laboratório de materiais Washington e Severino que nos auxiliaram na caracterização dos materiais.

Aos nobres e corajosos amigos feitos ao longo do mestrado que tanto me ajudaram na execução dos ensaios, Wallison Barbosa, Agno Vieira, Wellington Vital, Nívea Gabriela. Em especial agradeço ao Wanderley Nicácio, que mais que um companheiro de pesquisa se tornou um amigo, sua orientação e dedicação no laboratório me foram fundamentais nessa jornada. Agradeço aos amigos que, mesmo não estando presentes nessa fase de laboratório, foram muito importantes nessa jornada acadêmica, Henrique Guglielmi, Wilson Gentil, Elaine Albuquerque, Alejandro, Walter Rojas, Eduardo, Fabiano Campos, Gelson Alves, Brunno Emídio, Elvis Santana, Alejandra.

Agradeço à *Bubbledeck Brasil* por acreditar e financiar nossa pesquisa. Obrigado Wlício, Leonardo e Ricardo. À *Bubbledeck International*, representada por Kim Beuring, muito obrigado pelo auxílio no entendimento da tecnologia e projeto dos modelos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço imensamente à minha mãe Caubyra, ao meu irmão Anchiêta e ao pai que a vida me deu Flamberto, sem vocês eu não teria conseguido. Todo apoio, incentivo, palavras de conforto, educação, carinho e amor que vocês me deram foi que me motivou cada vez mais na realização desse sonho. Vocês são essenciais em cada etapa de minha vida. Meu profundo agradecimento ao meu pai Henrique Jorge Saraiva de Lima (*in memoriam*), meu avô José Anchiêta Nery (*in memoriam*) e ao meu padrinho Antônio

Wagner Nery (*in memoriam*), que com seus bons exemplos deixados aqui me serviram de norte, sei que vocês mesmo aí de cima continuam olhando por mim e me guiando.

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

RESUMO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PUNÇÃO DE LAJES LISAS TIPO *BUBBLEDECK*

Autor: Henrique Jorge Nery de Lima

Orientador: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Março de 2015

Esta pesquisa avalia experimentalmente o comportamento da ligação laje-pilar, localizadas internamente à edificação em um sistema de lajes lisas de concreto armado, de uma recente técnica construtiva de lajes de concreto armado, denominada *Bubbledeck*. Essa técnica consiste em um método construtivo composto pela adição de esferas plásticas em lajes de concreto armado, uniformemente espaçadas entre duas telas de aço, com uso cada vez mais frequente em países como Holanda, Austrália, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido e Dinamarca.

Foram analisadas quatro modelos de lajes nesse estudo experimental, três lajes do tipo *Bubbledeck* e uma laje maciça de referência, todas as lajes possuem dimensões de 2500 x 2500 mm de comprimento, altura nominal com 280 mm, pilar circular com 300 mm de diâmetro e mesma taxa de armadura. Os parâmetros variados foram: método construtivo, utilização ou não de pré-laje; e utilização de armadura de cisalhamento.

Os pontos analisados nos resultados experimentais foram: os deslocamentos verticais, deformações na superfície do concreto, deformações na armadura de flexão e cisalhamento, fissuração e o modo de ruptura de cada laje. Os dados experimentais foram comparados com os métodos teóricos estabelecidos em normas de projeto. As normas avaliadas foram: o ACI 318 (2011), o Eurocode 2 (2010) e a NBR 6118 (2014). Uma vez que nenhuma destas normas não tratam desse sistema construtivo de lajes *Bubbledeck*, foi proposta uma adaptação na determinação da área de concreto a ser considerada na seção do perímetro crítico. Verificou-se que o método construtivo não interferiu de forma considerável na resistência ao cisalhamento na ligação laje-pilar das lajes *Bubbledeck* e que a armadura de cisalhamento adotada mesmo conferindo maior ductilidade à laje, também não conferiu maior incremento de resistência à punção.

ABSTRACT

This research experimentally evaluates the behavior of slab-column connection, internally located at the building, in a reinforced concrete flat slabs system, a recent construction technique of reinforced concrete slabs, called *Bubbledeck*. This technique consists of new constructive method comprises the addition of plastic balls in reinforced concrete slabs, evenly spaced between two steel screens. Its use is increasingly common in countries like the Netherlands, Australia, USA, Canada, UK and Denmark.

Four slabs models were analyzed in this experimental study (three *Bubbledeck* type and a reference solid), all of the slabs have dimensions of 2500 x 2500 mm length, nominal height of 280 mm, centered circular cross section column of 300 mm diameter and the same flexural reinforcement ratio. The varied parameters in *Bubbledeck* slabs were: construction method, use or not of pre-slab; and use of shear reinforcement.

The points analyzed the experimental results were: vertical displacements, strains in the concrete surface deformations in the armor of bending and shear cracking and failure mode of each slab. The experimental data were compared with the theoretical methods established in design codes. The codes were evaluated: ACI 318 (2011), the Eurocode 2 (2010) and the NBR 6118 (2014). Since none of these codes do not address this constructive system *Bubbledeck* slabs, proposed an adaptation in determining the concrete area to be considered in the critical section perimeter. It was found that the construction method did not affect considerably the shear strength of the slab-column connection of *Bubbledeck* slabs and shear reinforcement adopted even giving greater ductility to the slab, also did not confer greater resistance to increase the punching.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2.	MOTIVAÇÃO.....	5
1.3.	OBJETIVOS.....	6
1.4.	METODOLOGIA.....	6
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1.	PUNÇÃO	8
2.2.	SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE LAJE <i>BUBBLEDECK</i>	10
2.2.1.	Sistema com pré-lajes	11
2.2.2.	Sistema de módulo reforçado	12
2.2.3.	Sistema de painéis acabados	13
2.3.	PESQUISAS SOBRE LAJES TIPO <i>BUBBLEDECK</i>	13
2.3.1.	Held (2002)	13
2.3.2.	Gudmand-Høyer (2003).....	15
2.3.3.	Aldejohann (2008).....	18
2.3.4.	Lai (2010).....	19
2.4.	RECOMENDAÇÕES DE CÁLCULO PROPOSTAS PELA <i>BUBBLEDECK</i> <i>INTERNATIONAL</i>	21
2.5.	RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	23
2.5.1.	ACI 318 (2011).....	24
2.5.2.	EUROCODE 2 (2010)	26
2.5.3.	NBR 6118 (2014)	28
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
3.1.	CARCTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS	31
3.2.	DETALHAMENTO DAS ARMADURAS	33
3.2.1.	Armadura de flexão	33
3.2.2.	Armadura de cisalhamento.....	35
3.2.3.	Armadura dos pilares	36
3.3.	INSTRUMENTAÇÃO	38
3.3.1.	Deslocamentos verticais.....	38
3.3.2.	Deformações na armadura de flexão	39

3.3.3.	Deformações no concreto.....	42
3.4.	FABRICAÇÃO DOS MODELOS LOCAIS	45
3.4.1.	Fôrmas.....	45
3.4.2.	Concretagem.....	46
3.5.	MATERIAIS	48
3.5.1.	Concreto.....	48
3.5.2.	Aço.....	49
3.6.	SISTEMA DE ENSAIO.....	49
3.7.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES.....	53
3.7.1.	Resistência à flexão (GUANDALINI <i>et. al.</i> , 2009)	53
3.7.2.	Resistência à flexão (Eurocode 2 (2010)).....	54
3.7.3.	Resistência à flexão adotada	55
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	57
4.1.	MATERIAIS CARACTERIZADOS.....	57
4.2.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....	58
4.3.	DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO	63
4.4.	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO	67
4.5.	DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE CISALHAMENTO - LAJE BD28 - P3	73
4.6.	MAPA DE FISSURAÇÃO	74
4.7.	MODO DE RUPTURA	77
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	78
5.1.	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	78
5.1.1.	Carga de Ruptura	78
5.1.2.	Deslocamentos verticais.....	79
5.1.3.	Deformações na superfície do concreto.....	80
5.1.4.	Deformações na armadura de flexão	81
5.1.5.	Deformações na armadura de cisalhamento.....	82
5.1.6.	Mapa de fissuração	82
5.2.	ADAPTAÇÃO ÀS NORMAS VIGENTES PARA O CÁLCULO E VERIFICAÇÃO DE PUNÇÃO PARA LAJES <i>BUBBLEDECK</i>	83
5.3.	ANÁLISE DAS EXPRESSÕES NORMATIVAS.....	84
5.3.1.	Perímetros críticos u_{out} adotados	84

5.3.2.	Análise dos resultados normativos encontrados.....	85
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
6.1.	CONCLUSÕES.....	88
6.1.1.	Programa experimental.....	88
6.1.2.	Análise das expressões normativas.....	90
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
A.	DETALHAMENTO DO PÓRTICO DE ENSAIO	96
B.	LEITURAS REGISTRADAS NOS ENSAIOS.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos ensaiados por Held (2002).....	14
Tabela 2.2 - Comparação das respostas dinâmicas obtidas (Lai, 2010)	20
Tabela 3.1 - Descrição das lajes do ensaio de punção	32
Tabela 3.2 - Resistência à flexão das lajes de acordo com Guandalini (2009).....	56
Tabela 3.3 - Resistência à flexão das lajes de acordo com o Eurocode 2 (2010).....	56
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do concreto.....	57
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço.....	58
Tabela 4.3 - Resumo do comportamento das barras de flexão instrumentadas	73
Tabela 4.4- Modos de ruptura das lajes	77
Tabela 5.1 - Cargas de Ruptura	78
Tabela 5.2 - Cargas de ruptura previstas pelo ACI 318 (2011).....	86
Tabela 5.3 - Cargas de ruptura previstas pelo Eurocode 2 (2010)	86
Tabela 5.4 - Cargas de ruptura previstas pela NBR 6118 (2014).....	86
Tabela 5.5 - Resumo das previsões normativas.....	86
Tabela B.1 - Laje RSP.....	99
Tabela B.2 - Laje BD28 - P1	100
Tabela B.3 - Laje BD28 - P2.....	101
Tabela B.4 - Laje BD28 - P3	102
Tabela B.5 - Laje RSP.....	103
Tabela B.6 - Laje BD28 - P1	104
Tabela B.7 - Laje BD28 - P2.....	105
Tabela B.8 - Laje BD28 - P3	106
Tabela B.9 - Laje RSP.....	108
Tabela B.10 - Laje BD28 - P1	109
Tabela B.11 - Laje BD28 - P2.....	110
Tabela B.12 - Laje BD28 - P3	111
Tabela B.13 - Laje BD28 - P3	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Montagem de laje tipo <i>Bubbledeck</i> (<i>Bubbledeck Brasil</i>).....	1
Figura 1.2 - Colapso parcial do edifício <i>Pipers Row Car Park</i> , Wolverhampton - (WOOD, 1997).....	3
Figura 1.3 - Exemplos de colapsos estruturais surgidos por esforços de punção.....	4
Figura 2.1 - Exemplos de laje lisa e lajes tipo cogumelo.....	9
Figura 2.2 - Diferentes situações de punção em lajes lisas de concreto armado (TASSINARI, 2011).....	10
Figura 2.3 - Sistema com pré-laje.....	11
Figura 2.4 - Exemplo de escoramento de pré-lajes com vigas metálicas	11
Figura 2.5 - Exemplo de laje <i>Bubbledeck</i> com pré-laje (<i>Bubbledeck Brasil</i> , 2014).....	12
Figura 2.6 - Módulo (<i>Bubbledeck Brasil</i> , 2014).....	12
Figura 2.7 - Módulo de laje <i>Bubbledeck</i> (<i>Bubbledeck Brasil</i> , 2014).....	12
Figura 2.8 - Painéis acabados (<i>Blubbledeck Brasil</i> , 2014).....	13
Figura 2.9 - Seção das lajes ensaiadas por Held (2002).....	14
Figura 2.10 - Comparação entre modelo de fissuração computacional e experimental (HELD, 2002).....	15
Figura 2.11 - Mecanismos de falha 1 e 2, Gudmand-Høyer (2003)	16
Figura 2.12 - Mecanismo de falha do 3a a 3c, Gudmand-Høyer (2003)	16
Figura 2.13 - Mecanismo de falha 4, Gudmand-Høyer (2003)	17
Figura 2.14 - Mecanismo de falha 5, Gudmand-Høyer (2003)	17
Figura 2.15 - Mecanismo de falha 6, Gudmand-Høyer (2003)	18
Figura 2.16 - Característica da seção proposta por Aldejohann (2008).....	19
Figura 2.17 - Deslocamento no piso do escritório estudado, ampliadas por 100 (LAI, 2010)	20
Figura 2.18 - Edifício <i>Millenium Tower</i> , Rotterdam, Holanda (<i>Bubbledeck Brasil</i> , 2014)	22
Figura 2.19 - Perímetro de controle u_l	25
Figura 2.20 - Determinação do perímetro de controle u_{out}	26
Figura 2.21 - Determinação do perímetro de controle u_l	27
Figura 2.22 - Definição do perímetro de controle u_{out}	28
Figura 2.23 - Perímetro de controle em pilares internos u_l	29
Figura 2.24 - Definição do perímetro de controle u_{out}	30
Figura 3.1 - Situação da laje estudada	31
Figura 3.2 - Dimensões das lajes ensaiadas	32
Figura 3.3 - Detalhamento genérico da armadura das lajes (medidas em mm)	34

Figura 3.4 - Detalhe da armadura de flexão (medidas em mm)	34
Figura 3.5 - Armadura das lajes RSP e BD28 - P1	35
Figura 3.6 - Detalhe da armadura de cisalhamento (medidas em mm)	36
Figura 3.7- Espaçamentos da armadura de cisalhamento (medidas em mm).....	36
Figura 3.8 - Projeto de armação dos pilares (medidas em mm)	37
Figura 3.9 - Detalhe da armadura do pilar já posicionada	37
Figura 3.10 - Posicionamento dos LVDT's (medidas em mm)	38
Figura 3.11 - Posicionamento LVDT	39
Figura 3.12 - Procedimento de colagem dos extensômetros	40
Figura 3.13 - Instrumentação das lajes RSP, BD28 - P1, BD28 - P2 e BD28-P3	41
Figura 3.14 - Barras de flexão já instrumentadas	41
Figura 3.15 - Instrumentação da armadura de cisalhamento	42
Figura 3.16 - Detalhe, em corte, da posição dos extensômetros nos estribos	42
Figura 3.17 - Instrumentação do concreto das lajes RSP e BD28-P1 (medidas em mm)	43
Figura 3.18 - Instrumentação do concreto das lajes BD28 - P2 (medidas em mm)	43
Figura 3.19 - Instrumentação do concreto da laje BD28-P3 (medidas em mm)	44
Figura 3.20 - Posicionamento dos extensômetros	44
Figura 3.21 - Fôrmas metálicas das lajes	45
Figura 3.22 - Fôrma do pilar	46
Figura 3.23 - Processo de concretagem das pré-lajes	46
Figura 3.24 - Detalhe da concretagem das lajes	47
Figura 3.25 - Ensaio de corpos de prova cilíndricos à compressão	48
Figura 3.26 - Ensaio de tração por compressão diametral	49
Figura 3.27 - Sistema de ensaio	50
Figura 3.28 - Sistema de aquisição de dados	50
Figura 3.29 - Vista lateral do pórtico de reação	51
Figura 3.30 - Vista frontal do pórtico de reação	52
Figura 3.31 - Sistema de travamento dos pilares	52
Figura 3.32 - Mecanismo de colapso	53
Figura 3.33 - Determinação do centro de carga para meia laje	55
Figura 3.34 - Ilustração do cálculo do momento solicitante das lajes	55
Figura 4.1 - Tensão deformação das barras ensaiadas	58
Figura 4.2 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje RSP	59
Figura 4.3 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje RSP	59

Figura 4.4 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD28-P1	60
Figura 4.5 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje BD28-P1	60
Figura 4.6 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD28-P2	61
Figura 4.7 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje BD28-P2	61
Figura 4.8 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD28-P3	62
Figura 4.9 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje BD28-P3	62
Figura 4.10 - Deslocamentos verticais médios das lajes.....	63
Figura 4.11 - Deformações na superfície do concreto da laje RSP	63
Figura 4.12 - Deformações na superfície do concreto da laje BD28 - P1.....	64
Figura 4.13 - Deformações na superfície do concreto da laje BD28 - P2.....	64
Figura 4.14 - Deformações na superfície do concreto da laje BD28 - P3.....	65
Figura 4.15 - Deformação média dos extensômetros tangenciais na superfície do concreto	65
Figura 4.16 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje RSP.....	66
Figura 4.17 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje BD28 - P1	66
Figura 4.18 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje BD28 - P2	66
Figura 4.19 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje BD28 - P3	67
Figura 4.20 - Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP, direção S-N	68
Figura 4.21 - Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP, direção O-L	68
Figura 4.22 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P1, direção S-N... 68	
Figura 4.23 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P1, direção O-L .. 69	
Figura 4.24 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P2, direção S-N... 69	
Figura 4.25 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P2, direção O-L .. 69	
Figura 4.26 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P3, direção S-N... 70	
Figura 4.27 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P3, direção O-L .. 70	
Figura 4.28 - Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP.....	71
Figura 4.29 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P1	71
Figura 4.30 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P2	72
Figura 4.31 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P3	72
Figura 4.32 - Deformações nas armaduras de cisalhamento	73
Figura 4.33 - Curva carga-deformação da armadura de cisalhamento	74
Figura 4.34 - Mapa de fissuração - Laje RSP.....	75
Figura 4.35 - Mapa de fissuração - Laje BD28 - P1	75

Figura 4.36 - Mapa de fissuração - Laje BD28 - P2	76
Figura 4.37 - Mapa de fissuração - Laje BD28 - P3	76
Figura 5.1 - Posicionamento da armadura de cisalhamento, em corte, na laje	79
Figura 5.2 - Junção das pré-lajes no modelo BD28 - P3.....	81
Figura 5.3 - Detalhe do comprimento de arco que o perímetro crítico corta a esfera	83
Figura 5.4 - Perímetro de controle u_{out} - ACI 318 (2011).....	84
Figura 5.5 - Perímetro de controle u_{out} - Eurocode 2 (2010).....	85
Figura 5.6 - Perímetro de controle u_{out} - NBR 6118 (2014).....	85
Figura 5.7 - Comparação entre a carga última experimental e a estimada pelas normas	87
Figura A.1- Vista superior do pórtico de ensaio, adaptado de Ferreira (2010).....	96
Figura A.2 - Cortes do pórtico de ensaio, adaptado de Ferreira (2010).....	97
Figura B.1 - Posicionamento dos LVDT's nas lajes (medidas em mm)	98
Figura B.2 - Posição dos extensômetros de concreto na face inferior das lajes (medidas em cm).....	103
Figura B.3 - Posição dos extensômetros nas lajes	107
Figura B.4 - Posição da instrumentação dos extensômetros de cisalhamento	112

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A_s	Área de aço da armadura de flexão;
A_{sw}	Área de aço da armadura de cisalhamento;
c	Dimensão do pilar;
$C.V$	Coefficiente de variação;
d	Altura útil da laje;
E_s	Módulo de elasticidade do aço da armadura de flexão;
f_c	Resistência à compressão do concreto em corpo de prova cilíndrico;
f_{ct}	Resistência à tração do concreto;
f_{ys}	Tensão de escoamento da armadura de flexão;
$f_{yw,s}$	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento;
$f_{yw,ef}$	Tensão efetiva na armadura de cisalhamento;
h	Altura efetiva da laje;
s_0	Distância da face do pilar à primeira camada de armaduras de cisalhamento;
s_r	Distância entre camadas de armadura de cisalhamento;
u	Comprimento do perímetro de controle;
u_l	Comprimento do perímetro de controle afastado a uma determinada distância da face do pilar;
u_{out}	Comprimento do perímetro de controle afastado da camada mais externa das armaduras de cisalhamento;
$u_{out,ef}$	Comprimento do perímetro de controle efetivo afastado da camada mais externa de armaduras de cisalhamento;
V_u	Carga última de ensaio;

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

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O tipo de laje a ser utilizado na edificação é definido na fase de da concepção estrutural do projeto. No Brasil, os tipos mais utilizados são as lajes maciças e nervuradas. Contudo, novas tecnologias vêm sendo estudadas de modo a subsidiar os projetistas com soluções que buscam aliar economia à segurança estrutural.

A busca pelo melhor uso do concreto está presente nessa evolução estrutural, de modo a reduzir a quantidade de material sem a perda da resistência da peça, o que é viável, visto que há regiões na estrutura onde o concreto não desempenha função relevante e é dispensável do ponto de vista estrutural.

Nesse sentido, é crescente a utilização de lajes com vazios, nas quais os vazios são deixados na zona de tração e, por tanto, o concreto é aproveitado na sua função de resistir aos esforços de compressão.

Como uma variação de lajes vazios, surgiram na Dinamarca as lajes do tipo *Bubbledeck*, ver Figura 1.1, que consiste em um novo método construtivo composto pela adição de esferas plásticas de poliestireno em lajes de concreto armado, uniformemente espaçadas entre duas telas de aço. O uso desse método é cada vez mais frequente em países como Holanda, Austrália, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido e Dinamarca.



Figura 1.1- Montagem de laje tipo *Bubbledeck* (*Bubbledeck Brasil*)

Dentro de uma laje de concreto armado há uma zona em que o concreto não desempenha função estrutural, podendo ser desprezado, nesta zona são adicionadas esferas, “*bubbles*”,

ocasionando uma diminuição em torno de 35% do peso próprio da laje, gerando uma redução considerável do consumo do concreto. Como as esferas acabam por adentrar, em parte, na zona comprimida da laje, a armação da mesma tem o papel de suprir essa retirada do concreto, resistindo aos esforços de compressão. Esse método executivo aumenta a produtividade, pois o processo pode ser industrializado.

Outro ponto que chama atenção é uma redução dos impactos ambientais gerados por esse método executivo, o que lhe auxiliou a ganhar o Selo Verde (certificado LEED - Leadership in Energy and Environmental Design) devido à redução de materiais empregados em uma mesma área gerando uma redução de emissão de gás carbônico na atmosfera por utilizar esferas plásticas, que podem ser geradas a partir de material reciclado, no lugar de concreto (Bubbledeck Brasil, 2014).

Dentre as vantagens no desenvolvimento dos projetos e execução das lajes tipo *Bubbledeck*, pode-se citar:

- Redução de peso próprio em até 35% se comparada com uma laje maciça, conferindo menores cargas nas fundações;
- Tubos e dutos podem ser passados dentro da laje, podendo ser embutidos antes da concretagem, ou até mesmo serem abertos furos para a passagem dos mesmos na laje já concretada.
- Com a utilização de pré-lajes pré-moldadas, dispensa-se o uso de fôrmas inferiores de assoalho, o que acarreta em uma redução de escoramento;
- Qualidade de acabamento final após a concretagem, dispensando retrabalho e possíveis revestimentos.

Dentre as desvantagens do sistema estão:

- A necessidade de mão de obra especializada;
- Por ser um sistema relativamente novo não é normatizado em alguns países;
- Por ter que obedecer alguns requisitos de projeto (largura mínima, espaçamento) pode gerar dificuldade na execução;
- Requer um cuidado especial quando o transporte é realizado por de gruas;
- Caso as lajes sejam feitas antes da concretagem, há necessidade de uma área destinada para sua produção no canteiro.

- Surgem problemas na ligação laje-pilar pois há uma concentração de forças cisalhantes, que podem levar à ruína da laje.

Uma vez conhecidas as vantagens e desvantagens desse sistema, é necessário fazer uma investigação do seu comportamento estrutural em serviço. Um ponto de extrema importância é como o sistema *Bubbledeck* se comporta sob o efeito do punçionamento, nas ligações laje-pilar.

A laje tipo *Bubbledeck* se comporta como uma laje lisa, armada em duas direções, e dispensa o uso de vigas, sendo apoiada diretamente sobre o pilar, podendo ter, também uma liberdade de projetos (*layouts* flexíveis). Dentre as desvantagens desse tipo de sistema está a redução da rigidez do edifício quanto aos esforços horizontais e as flechas do pavimento devem ser controladas com atenção. O ponto mais crítico para a segurança estrutural desse sistema é a ruptura localizada por punção na ligação laje-pilar, pois ele pode se propagar e levar a estrutura à ruína, parcial ou total, devido ao colapso progressivo.

Melo (1990) ressaltou que o primeiro caso identificado de ruptura por punção foi o do edifício *Prest-o-Lite*, em Indianápolis (1911), em que as lajes se soltaram completamente dos pilares e levaram a estrutura toda à ruína. A Figura 1.2 ilustra outro caso de ruptura por punção, ocorrido no edifício *Pipers Row Car Park*, localizado na cidade de *Wolverhampton*, Inglaterra, onde houve apenas um colapso parcial da estrutura (WOOD, 1997).

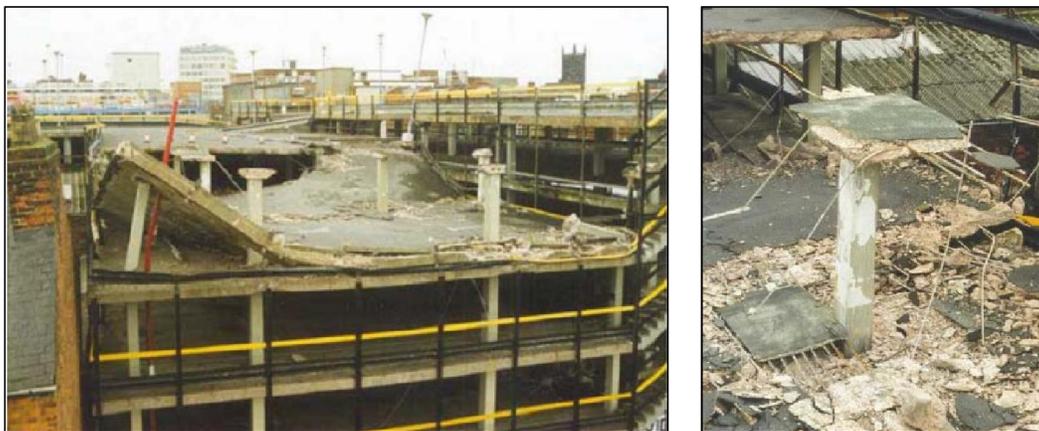


Figura 1.2 - Colapso parcial do edifício *Pipers Row Car Park*, Wolverhampton - (WOOD, 1997)

Como exemplos de mais colapsos estruturais surgidos por esforços de punção cita-se os ilustrados na Figura 1.3, em que Figura 1.3.a é referente à ruptura por punção ocorrida no pátio de estacionamento na cidade *Smith Dundas* em 2011, Nova Zelândia; a Figura 1.3.b

ilustra uma ruptura por punção em uma piscina, em 2013, na Rússia; a Figura 1.3.c é referente à uma ruptura por punção em um tabuleiro de ponte, em 1989, localizada na cidade de *Santa Cruz Country*, nos Estados Unidos; a Figura 1.3.d ilustra o colapso por puncionamento em um edifício de 16 pavimentos, em 1971, situado na Avenida *Commonwealth*, Boston - Massachusetts, Estados Unidos; a Figura 1.3.e ilustra o colapso no edifício garagem do *Tropicana Cassino* em 2003, localizado em *Atlantic City*, Estados Unidos.



a) Pátio de estacionamento em Smith Dundas, Nova Zelândia



b) Piscina, Rússia



c) Colapso em ponto em Santa Cruz Country, Estados Unidos



d) Edifício de apartamentos em Boston, Massachusetts, Estados Unidos



e) Calapso em edifício Garagem, *Atlantic City*, Estados Unidos

Figura 1.3 - Exemplos de colapsos estruturais surgidos por esforços de punção

Sabe-se que a ruptura a punção está associada a esforços de cisalhamento e pode provocar a separação completa entre o pilar e laje. Essa separação é representada na Figura 1.4, na qual as fissuras que originam a ruína partem do contorno da área carregada e se estendem até a outra face da laje, com angulação que pode variar entre 25° e 45° em relação ao plano da laje. Esse conceito de punção é reiterado por Guandalini (2006) quando o autor afirma que, devido a ação de uma carga concentrada em uma área (em geral uma reação de um pilar ou uma carga concentrada) uma ruptura brusca pode ocorrer na laje devido às elevadas tensões de cisalhamento.

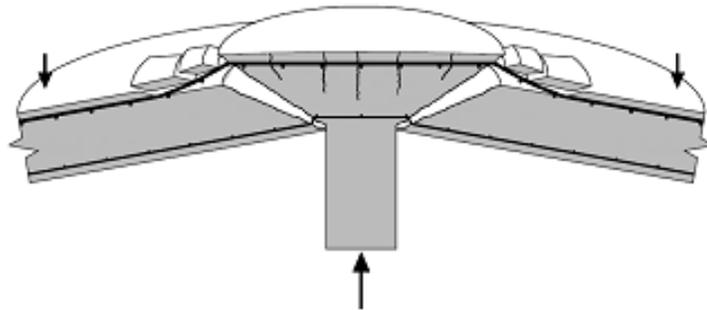


Figura 1.4 - Ruptura por punção (GUANDALINI, 2006)

Melo (1990) definiu que a resistência após o puncionamento das ligações entre laje e pilar é essencial para evitar o colapso progressivo da estrutura, pois após o puncionamento ocorrer, uma fração da carga é conduzida aos pilares vizinhos, podendo gerar novas rupturas localizadas.

1.2. MOTIVAÇÃO

A utilização da tecnologia construtiva com lajes tipo *Bubbledeck* vem crescendo ao em todo o mundo e esse método vem demanda devida atenção, necessitando de comprovação através de estudos de seu comportamento.

Sua capacidade estrutural, atrelada à redução do consumo de materiais e à economia de mão-de-obra envolvida no processo, tornam essa tecnologia uma crescente e atraente alternativa frente aos tipos convencionais de lajes de concreto armado. Porém, muitos projetistas e construtores têm dúvidas quanto ao comportamento e dimensionamento dessa estrutura (qual inércia considerar, quanto a resistência ao cisalhamento é reduzida se comparada a uma laje maciça, como determinar os esforços atuantes, dentre outras).

Dentre os estudos realizados no mundo estão algumas publicações alemãs e dinamarquesas e, alguns trabalhos encomendados pela *Bubbledeck International*, porém aqui no Brasil sua pesquisa ainda é incipiente. Este trabalho, em sua principal motivação, almeja estudar e apresentar ao meio técnico, científico e construtivo, as características desse sistema para que ele possa ser utilizado com maiores níveis de adequabilidade e segurança.

1.3. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar experimentalmente o comportamento de lajes tipo *Bubbledeck* submetidas à punção. Para isso, serão confeccionados modelos em escala real de ligações laja-pilar. Esses modelos serão submetidos a um ensaio com carregamento simétrico, o que simula um pilar situado internamente à edificação.

Com os resultados experimentais, busca-se contribuição para melhoria dos métodos de determinação dessa resistência à punção. Serão avaliados os parâmetros: presença de armadura de cisalhamento e a utilização ou não da pré-laje na etapa de construção.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar a influência dos parâmetros presença de armadura de cisalhamento e a utilização ou não da pré-laje na etapa de construção no comportamento de lajes tipo *Bubbledeck* à punção;
- Comparar os resultados experimentais encontrados com adaptações sugeridas das prescrições normativas referentes ao ACI 318 (2011), ao Eurocode 2 (2010) e à NBR 6118 (2014).

1.4. METODOLOGIA

A metodologia a ser seguida será a execução e instrumentação de quatro lajes, sendo três do tipo *Bubbledeck* e uma laje maciça de referência, a ser realizada no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. As cargas serão aplicadas até a ruptura das lajes. Estes ensaios também fazem parte da pesquisa de doutorado de Nicácio (2014).

Todas as lajes *Bubbledeck* possuem as mesmas dimensões e taxa da armadura de flexão, variando-se o método construtivo e o uso ou não de armadura de cisalhamento. Os

resultados dos ensaios serão analisados quanto aos deslocamentos verticais, cargas de ruptura, deformação específica no concreto, no aço e na armadura de cisalhamento. As cargas de ruptura serão comparadas com as estimadas segundo as normas ACI 318 (2011), Eurocode 2 (2010) e NBR 6118 (2014).

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação é composta por seis capítulos mais a Referência Bibliográfica conforme descritos sucintamente a seguir.

O *capítulo 2* é composto pela revisão bibliográfica que se inicia explanando sobre o efeito de punção e posteriormente uma breve explanação sobre o processo construtivo das lajes tipo *Bubbledeck*, sendo, também descritos, resultados de pesquisas pertinentes, publicadas por outros autores, na área e assuntos relacionados. É feita, também, uma revisão normativa, evidenciando-se o processo de cálculo proposto pelas normas ACI 318 (2011), Eurocode 2 (2010) e NBR 6118 (2014), bem como o modelo de cálculo proposto pela própria *Bubbledeck*.

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

O *capítulo 4* contém os resultados experimentais obtidos com os ensaios. Dentre esses resultados estão as deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento, as deformações do concreto e os deslocamentos verticais das lajes. Com base nos resultados e nos mapas de fissuração apresentados é descrito o modo de ruptura das lajes. Concomitantemente, são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados para a confecção das lajes.

No *capítulo 5* são analisados os resultados descritos no capítulo anterior e é feita uma comparação das cargas últimas das lajes com as prescrições normativas abordadas no presente estudo.

O *capítulo 6* contém as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os tipos e características das lajes *Bubbledeck*. Será feita uma exposição de alguns trabalhos sobre o tema, a partir daí apresenta-se as prescrições de cálculo propostas pela *Bubbledeck International* e as recomendações normativas para modelo em estudo.

2.1. PUNÇÃO

Segundo Carvalho e Pinheiro (2013) uma força cortante de grande intensidade está presente na ligação entre as lajes e os pilares, provocando tensões de cisalhamento que podem causar a ruptura da laje, fenômeno esse conhecido como punção. Os autores descrevem que esse fenômeno ocorre quando uma força atuando em uma pequena área de uma placa ocasiona a sua perfuração, ruptura, fato que pode ocorrer no sistema de lajes lisas, em que há uma elevada força concentrada, relativa à reação de apoio junto ao pilar.

Ainda segundo os autores, para reduzir essas tensões e evitar o puncionamento, pode ser feito um espessamento da laje na região adjacente à ligação laje-pilar, chamado de capitel, ou então a laje tem sua espessura engrossada nessa região, este chamado de ábaco. Dentre outras alternativas para aumentar a resistência da ligação entre laje e pilar pode-se citar: aumentar a resistência do concreto; utilizar armadura de cisalhamento; aumentar a taxa de armadura de flexão. Na Figura 2.1 são ilustrados exemplos de laje lisa e lajes tipo cogumelo.

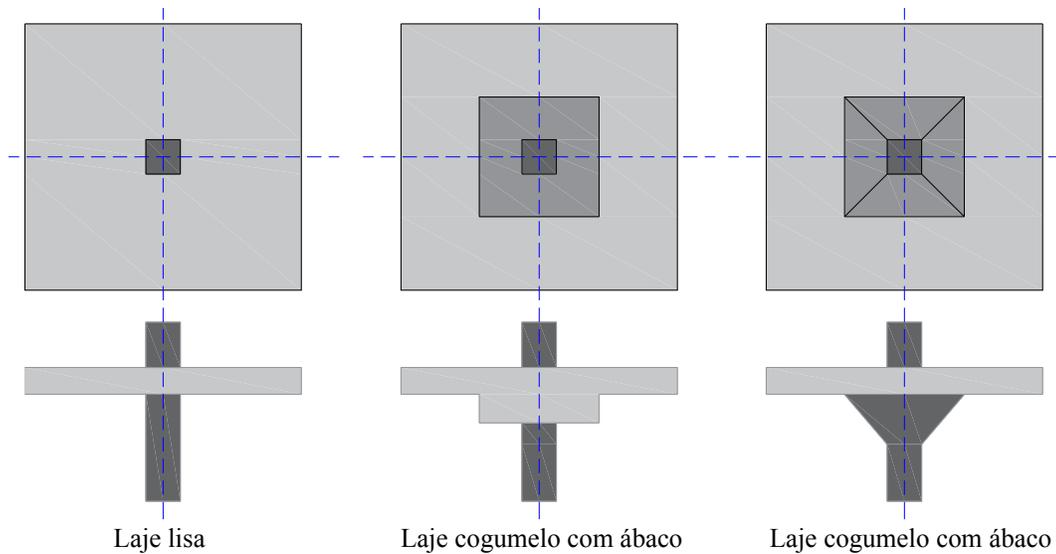


Figura 2.1 - Exemplos de laje lisa e lajes tipo cogumelo

Por conta da ruptura por punção geralmente ocorrer antes do escoamento da armadura de flexão, essa ruptura normalmente tem comportamento frágil, ou seja, sem aviso prévio, ocasionando uma ruptura localizada na ligação laje-pilar podendo levar a estrutura ao colapso progressivo. Então, as lajes devem ser projetadas, em função da resistência da ligação laje-pilar, para evitar o fenômeno de punção.

Como tipos de punção descreve-se dois quanto à distribuição dos esforços: punção simétrica e punção não simétrica (ou assimétrica). Sendo que, o que define essa separação de tipo são fatores como: a geometria do pavimento, os carregamentos, as condições de contorno e a distribuição da armadura de flexão. Quando todos os fatores antes descritos são simétricos em relação aos eixos de simetria da ligação laje-pilar, a punção é dita simétrica (Figura 2.2a e 2.2b), caso algum desses fatores não forem satisfeitos a punção será assimétrica (Figura 2.2c e 2.2d).

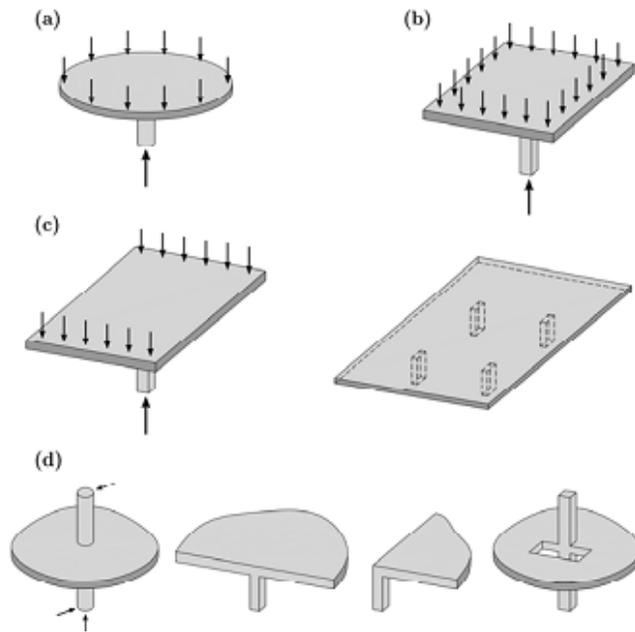


Figura 2.2 - Diferentes situações de punção em lajes lisas de concreto armado (TASSINARI, 2011)

Os principais fatores que influenciam na resistência de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento são, principalmente, a resistência à compressão do concreto (f'_c), a taxa de armadura tracionada (ρ), o tamanho e geometria do pilar e o *size effect* (ζ), ou efeito de tamanho (tradução livre), fator que leva em consideração a altura útil d da laje. Outro fator que atua significativamente no aumento dessa resistência é a utilização de armaduras de cisalhamento, cuja escolha está relacionada com a disponibilidade e praticidade de uso dentro do canteiro de obras, vale ressaltar que sua eficiência pode estar intimamente ligada com a suas condições de ancoragem, devido às lajes serem elementos delgados.

2.2. SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE LAJE *BUBBLEDECK*

O sistema construtivo tipo *Bubbledeck* possui três possibilidades construtivas: sistema com pré-laje, sistema com módulo reforçado e sistema com painéis acabados. Porém, uma vez que as peças são conectadas no local, não há diferença de capacidade de carga entre elas (Lai, 2010).

2.2.1. Sistema com pré-lajes

O sistema consiste em produzir painéis pré-moldados com pré-laje com seis centímetros de espessura já incorporando armações com as esferas plásticas, conforme Figura 2.3. Esta pré-laje dispensa o uso de fôrmas inferiores, sendo colocada diretamente sobre vigas metálicas e escoras, ver Figura 2.4. Após a montagem dos painéis, são adicionadas as armaduras de reforço e barras de ligação entre as placas, sendo então concluída a concretagem.

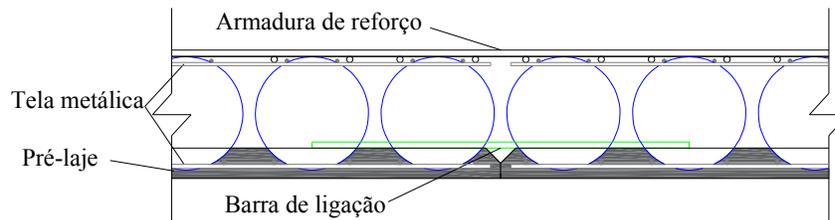


Figura 2.3 - Sistema com pré-laje



Figura 2.4 - Exemplo de escoramento de pré-lajes com vigas metálicas

Esse sistema com utilização de pré-lajes é o tipo mais utilizado, e para sua montagem necessita de utilização de guindastes para elevação das peças. É ideal para construções novas, pois se pode industrializar a produção dos painéis, reduzindo o tempo gasto. A Figura 2.5 ilustra uma laje *Bubbledeck* com pré-laje.



Figura 2.5 - Exemplo de laje *Bubbledeck* com pré-laje (*Bubbledeck Brasil*, 2014)

2.2.2. Sistema de módulo reforçado

O sistema construtivo de módulo reforçado consiste em adicionar as esferas entre telas de aço (armaduras) para posteriormente posicioná-las nas fôrmas onde serão colocadas as armações adicionais, ilustrado na Figura 2.6. A concretagem é realizada em dois estágios, sendo o primeiro de uma camada com apenas seis centímetros, assim como nas pré-lajes.

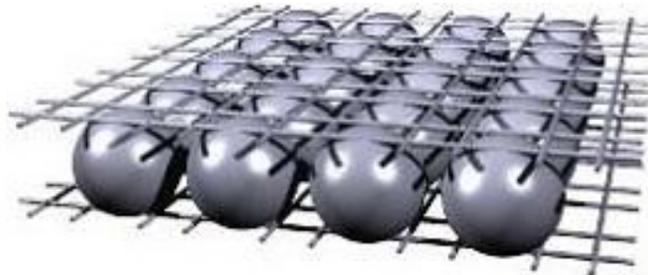


Figura 2.6 - Módulo (*Bubbledeck Brasil*, 2014)

Seu uso se faz mais presente em obras de reforma, pisos térreos ou de difícil acesso, pois os módulos reforçados podem ser posicionados e transportados manualmente. A Figura 2.7 mostra um exemplo de módulo de laje *Bubbledeck*.



Figura 2.7 - Módulo de laje *Bubbledeck* (*Bubbledeck Brasil*, 2014)

2.2.3. Sistema de painéis acabados

Tipo de sistema construtivo de laje *Bubbledeck* com painéis acabados em que as lajes são armadas e concretadas por completo em fábricas, sendo entregues na obra já prontas. Um exemplo de painel acabado está representado na Figura 2.8.

Quando os painéis já estão posicionados em seu local final as armaduras de flexão são conectadas e as barras de ligação são posicionadas para que sua união seja perfeita. Como as lajes distribuem seus esforços em apenas uma direção, se comportando como uma laje pré-moldada unidirecional, necessitam do uso de vigas ou de paredes para suporte.



Figura 2.8 - Painéis acabados (*Bubbledeck Brasil*, 2014)

2.3. PESQUISAS SOBRE LAJES TIPO *BUBBLEDECK*

2.3.1. Held (2002)

Held (2002) considera a resistência ao cisalhamento uma das propriedades mais importantes para o dimensionamento e verificação de lajes tipo *Bubbledeck*. Em sua pesquisa, a autora realizou um programa experimental e análise não linear pelo Método dos Elementos Finitos para investigar a influência dos vazios na resistência ao cisalhamento dessas lajes.

Inicialmente, a autora realizou ensaios experimentais e em seguida conduziu uma análise numérica não-linear, e comparou os resultados obtidos com os métodos analíticos propostos por normas existentes, sugerindo modificações de modo a adequá-las ao sistema.

Os modelos experimentais (ver Figura 2.9) se resumem a três lajes de 240 mm de espessura e três lajes com 450 mm de espessura. A Tabela 2.1 as principais características das lajes avaliadas.

Tabela 2.1 - Modelos ensaiados por Held (2002)

Autora	Modelos	d (mm)	Dimensão dos pilares (mm)	$f_{c,150}$ (N/mm ²)	$f_{c,t}$ (N/mm ²)	Carga última <i>Bubbledeck</i> (teste) (kN)	Carga última laje maciça (calculada)* (kN)
HELD (2015)	D1-24	190	300	44,4	2,8	530	840
	D2-24	190	300	50,8	2,5	580	945
	D3-24	190	300	46,7	2,9	525	893
	D4-45	380	300	29,6	2,9	935	1503
	D5-45	380	300	37,9	2,1	990	1701
	D56-45	380	300	40,5	3,0	1180	1795

* De acordo com a norma DIN 1045.

Após o corte das lajes ensaiadas Held (2002) verificou que os vazios deixados pelas esferas não influenciaram na formação da superfície de ruptura em comparação com uma laje maciça, as superfícies de ruptura da laje com vazios apresentou inclinações entre 30° e 40°, porém a resistência ao puncionamento foi menor, essa redução pode se dar em função do número de esferas que atravessam a superfície cônica de ruptura por punção.

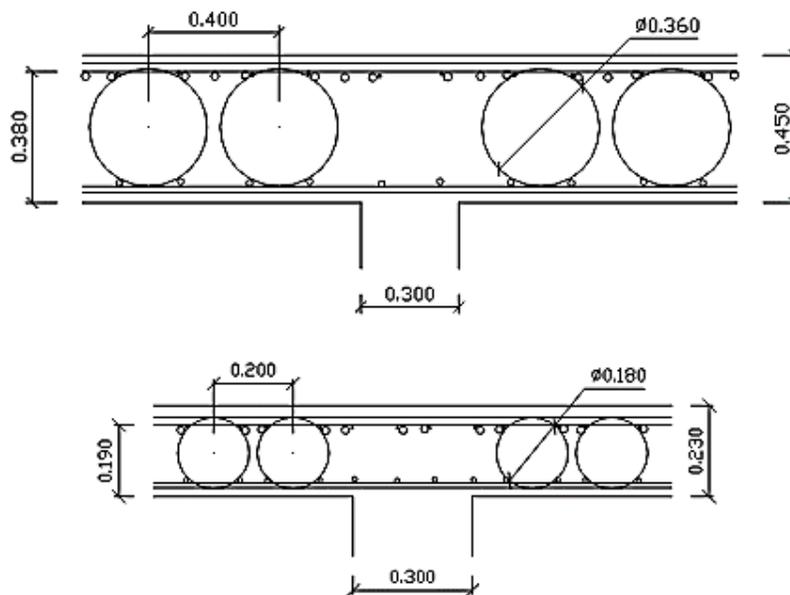


Figura 2.9 - Seção das lajes ensaiadas por Held (2002)

Para o modelo numérico Held (2002) utilizou o *software Diana* que utiliza o Método dos Elementos Finitos em sua modelagem. Após a modelagem computacional da laje verificou-se que o modelo numérico apresentou resultados satisfatórios ao ser comparado com os resultados experimentais. A Figura 2.10 ilustra a comparação entre os padrões de fissuração numérico e experimental para a laje

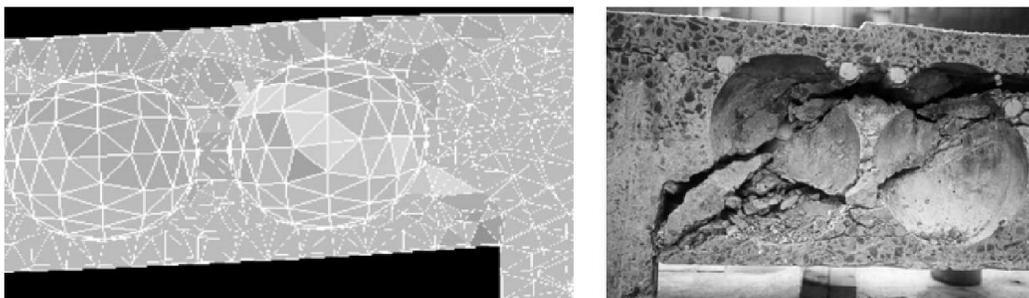


Figura 2.10 - Comparação entre modelo de fissuração computacional e experimental (HELD, 2002)

Held (2002) então conclui que de posse das análises feitas por ela o modo de ruptura de lajes com vazios esféricos é semelhante ao de lajes maciças. Então a autora define que para a determinação da resistência ao cisalhamento das lajes com vazios, caso alguma esfera esteja situada entre o perímetro de controle e a borda do pilar, deve-se desconsiderar o vazio deixado por essas esferas na determinação da área considerada nos cálculos, para determinação da resistência.

2.3.2. Gudmand-Høyer (2003)

Gudmand-Høyer (2003) desenvolveu um estudo que discorre sobre a ancoragem de barras de reforço em lajes com vazios esféricos internos, analisando os tipos de ruptura gerados na ligação dos painéis e determinando como encontrar a resistência de ligação analiticamente para cada situação de ruptura. Sua pesquisa foi baseada na teoria da plasticidade, com algumas modificações, utilizando um limite superior de soluções para encontrar a capacidade de carga que essa ligação de lajes suporta.

Na execução de uma laje tipo *Bubbledeck*, há diferentes tipos de união entre os módulos das lajes. O estudo de Gudmand-Høyer versa sobre a resistência da ligação em uma articulação entre duas lajes pré-moldadas, em que a força de ligação é influenciada pela

aderência entre a laje pré-moldada e o concreto lançado na segunda concretagem. Seis tipos de falhas podem ocorrer nessa ligação das lajes. Estas falhas são:

- Nos mecanismos de falhas 1 e 2 (ver Figura 2.11) há escoamento do aço do reforço e da armadura inferior. A ductilidade nessa falha se mostra elevada, tornando-se um mecanismo de falha desejável.

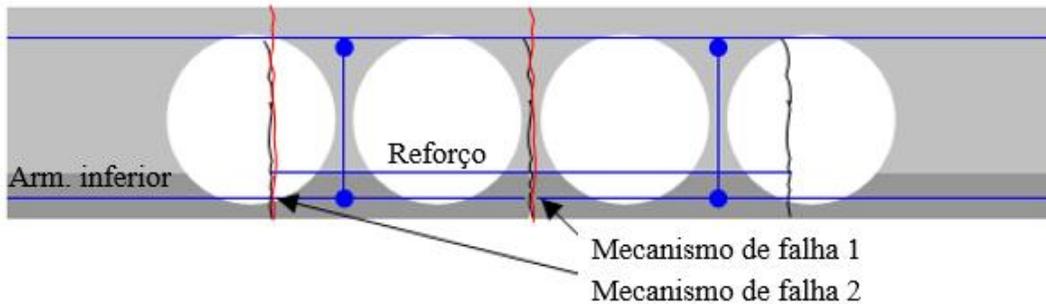


Figura 2.11 - Mecanismos de falha 1 e 2, Gudmand-Høyer (2003)

- Os mecanismos de falhas 3a a 3c (ver Figura 2.12) são variações de falha em que o reforço é arrancado, em conjunto, da laje, devido esforços de flexão, envolvendo um mecanismo de falha local e mecanismo de falha no concreto envolvente.

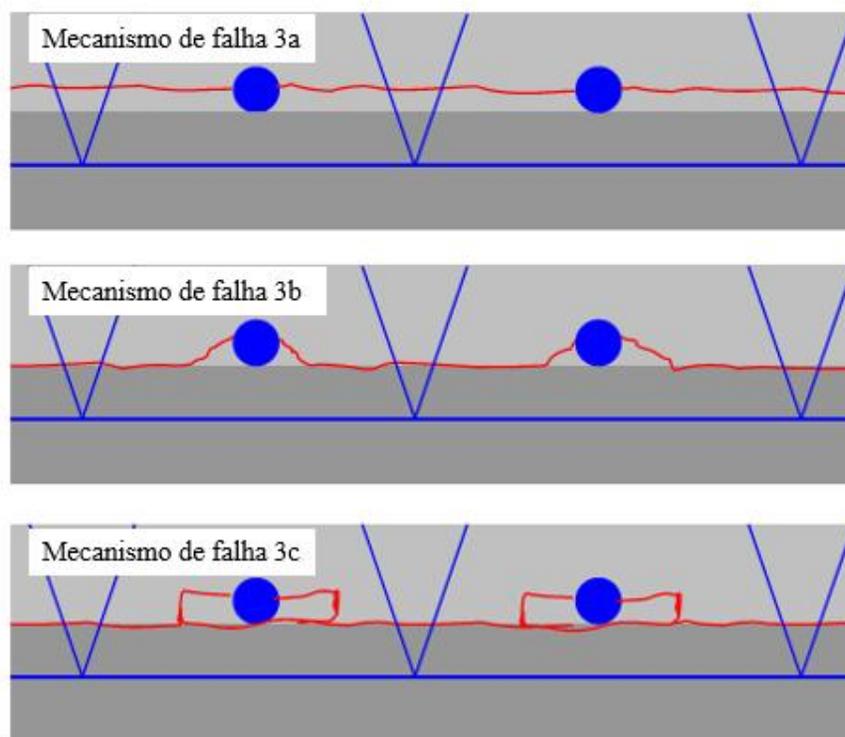


Figura 2.12 - Mecanismo de falha do 3a a 3c, Gudmand-Høyer (2003)

- O mecanismo de falha 4 (ver Figura 2.13) tem o comportamento similar ao mecanismo 3, porém, no caso 4, a armadura de reforço inferior é arrancada do resto da laje, diferente do caso 3, no qual a armadura superior é arrancada.

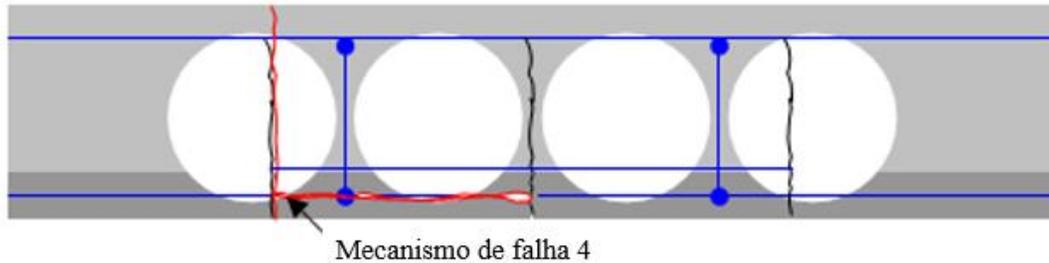


Figura 2.13 - Mecanismo de falha 4, Gudmand-Høyer (2003)

- O mecanismo de falha 5 (Figura 2.14) é devido ao cisalhamento na junta de construção. Podendo ser ocasionada por uma rotação em torno da linha de tensão nula na zona de compressão associada com um deslocamento da pré-laje.

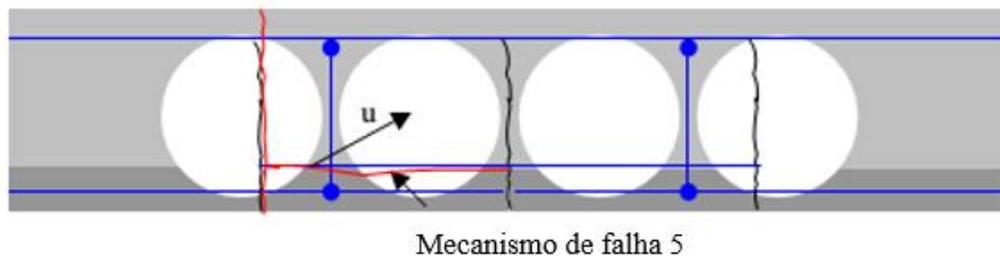


Figura 2.14 - Mecanismo de falha 5, Gudmand-Høyer (2003)

- O mecanismo de falha 6 (Figura 2.15) é semelhante à falha tipo 3, sendo geometricamente possível se inclinação da ruptura de tração é igual para o ângulo de atrito, assim só as armaduras de reforço contribuem para o trabalho interno.

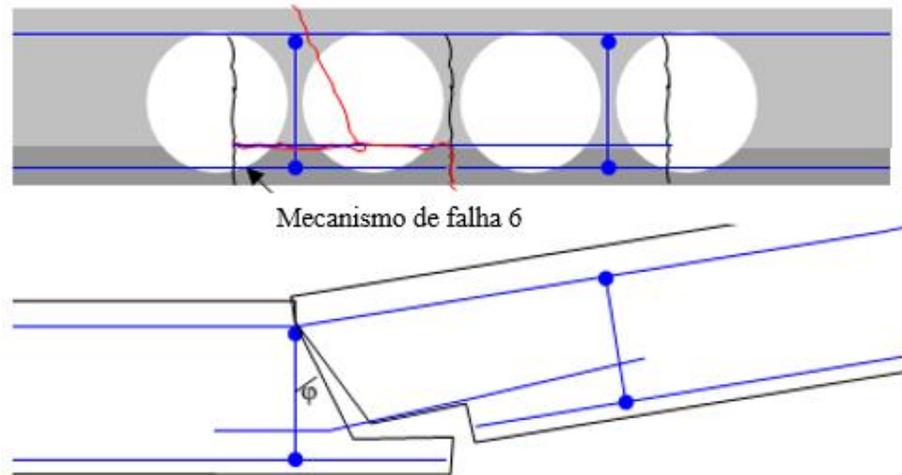


Figura 2.15 - Mecanismo de falha 6, Gudmand-Høyer (2003)

2.3.3. Aldejohann (2008)

De acordo com os manuais propostos pela *Bubbledeck International*, a resistência para lajes com este sistema é dada como a resistência calculada pela norma, minorada por coeficiente igual a 0,6. Então, com o intuito de validação e comprovação de parâmetros, Aldejohann (2008) propôs modificações na formulação proposta pela norma DIN 1045-1, adaptando o cálculo da resistência ao cisalhamento para lajes de concreto armado com vazios esféricos em seu interior, para verificação e validação desse fator redutor de resistência. A capacidade de carga da laje com vazios depende então da capacidade da laje maciça, sendo determinada pela Equação 1, em função das Equações 2 e 3.

$$V_{Rd,oca} = k \cdot \left(\frac{A_{DG}}{A_{SOL}} \right) \cdot V_{Rd,solida} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$V_{Rd,oca}$ refere-se à resistência ao cisalhamento da laje com vazios;

k é um coeficiente que relaciona o cobrimento da região com vazios e a posição do eixo neutro da laje;

A_{SOL} é a área de concreto de uma laje maciça de referência;

A_{DG} é a área de concreto determinada pelo plano inclinado de 45° da seção da laje, passando pelas esferas. Tais coeficientes são ilustrados na Figura 2.16.

Sendo:

$$k = 1,16 - \frac{c_o}{x} \cdot 0,03, \text{ se } 0,90 < \frac{c_o}{x} \leq 1,2 \quad \text{Equação 2}$$

ou

$$k = 0,80 + \frac{c_o}{x} \cdot 0,40, \text{ se } \frac{c_o}{x} \leq 0,90 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

c_o é referente ao cobrimento da região com vazios

x é a posição do eixo neutro.

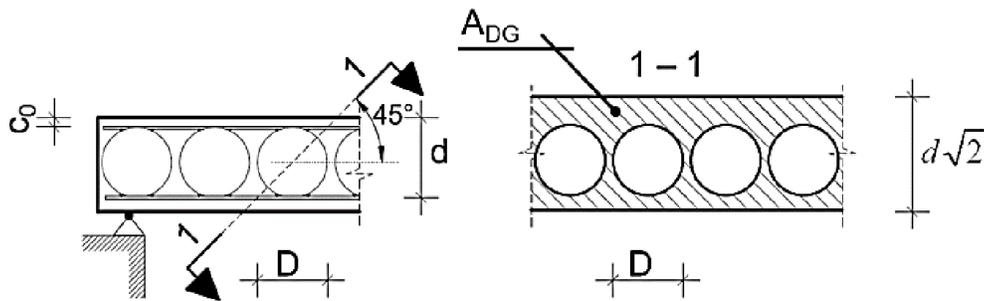


Figura 2.16 - Característica da seção proposta por Aldejohann (2008)

Através de análise experimental Aldejohann (2008) comprovou que suas premissas de cálculo são suficientes para determinação da resistência ao cisalhamento de lajes com esferas ocas internas.

2.3.4. Lai (2010)

Lai (2010) iniciou sua pesquisa analisando um piso de escritório feito com o sistema *Bubbledeck* no software SAP2000, a análise foi feita tanto para resposta estática quanto para dinâmica sob uma carga de peso próprio e carga variável.

Na análise estática foi verificado que as forças cortantes e tensões no plano são menores na ordem de 30% a 40% quando comparadas com uma laje maciça. Verificou-se, também, que os deslocamentos nas lajes tipo *Bubbledeck* são maiores da ordem de 10% que as na laje maciça, devido à rigidez reduzida proporcionada pelo vazio das esferas. Tais resultados condisseram com os esperados, e pesquisadores sugerem um fator de redução de

0,9 na capacidade última de flexão para compensar tal efeito. Na Figura 2.17 estão representados os deslocamentos sofridos no piso de escritório estudado, tanto para a laje maciça quanto para a laje *Bubbledeck*.

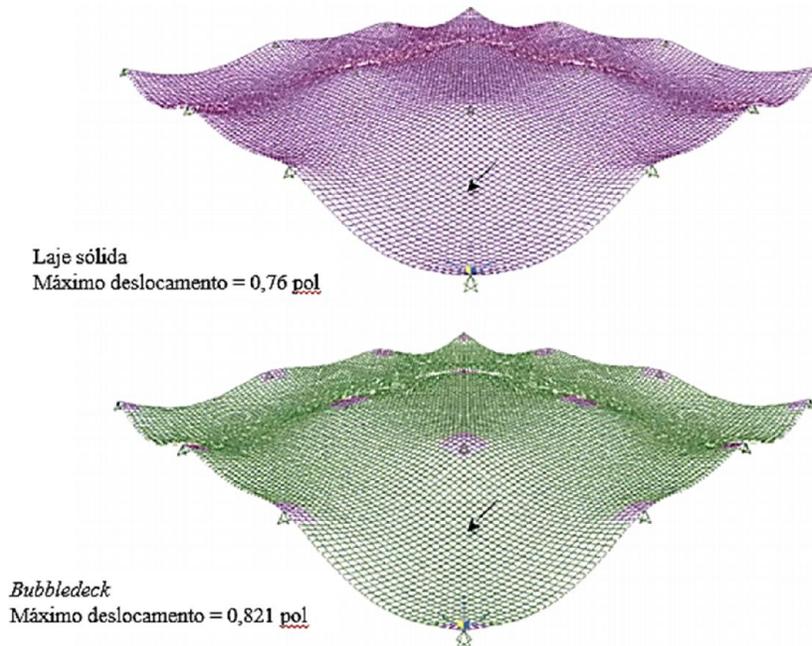


Figura 2.17 - Deslocamento no piso do escritório estudado, ampliadas por 100 (LAI, 2010)
As respostas dinâmicas da laje tipo *Bubbledeck* eram quase idênticas às obtidas para as lajes maciças, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Comparação das respostas dinâmicas obtidas (Lai, 2010)

RESPOSTA MODAL - LAJE DE ESCRITÓRIO				
MODO	LAJE MACIÇA		<i>BUBBLEDECK</i>	
	Frequência (Hz)	Período (s)	Frequência (Hz)	Período (s)
1	4,234	0,236	4,226	0,237
2	4,482	0,223	4,522	0,221
3	4,482	0,223	4,522	0,221
4	4,558	0,219	4,524	0,220
5	4,575	0,219	4,679	0,214
6	5,192	0,193	5,322	0,188
7	5,192	0,193	5,322	0,188
8	5,641	0,177	5,692	0,176
9	6,928	0,159	6,640	0,151
10	8,292	0,121	8,224	0,122
11	8,404	0,119	8,397	0,119
12	8,404	0,119	8,397	0,119

A autora apresentou, sob seu ponto de vista, algumas das principais qualidades no comportamento estrutural da laje tipo *Bubbledeck* em pisos de escritórios, utilizando análise de elementos finitos com o *software* SAP 2000. Lai (2010) testou essa técnica em um tabuleiro de ponte, onde a criação da ponte foi feita considerando-se o peso próprio da estrutura e pelas cargas e tensões concentradas oriundas do tráfego de veículos.

Na análise estática da ponte verificou-se que o máximo momento e tensões internas na laje *Bubbledeck* foi 64% superior e o deslocamento da ponte em torno de 68% superior ao da laje maciça, enquanto o cisalhamento foi similar em ambas situações. Esses resultados mostram uma significativa diferença de comportamento entre os dois modelos. A resposta dinâmica gerou resultados similares à estática.

Lai (2010) então concluiu que para pisos de escritórios o desempenho da *Bubbledeck* é semelhante ao de uma laje maciça, armada nas duas direções. Entretanto para tabuleiro de ponte seu comportamento foi considerado não satisfatório. Dentre os fatores que contribuem para tal comportamento pode estar a continuidade da laje e as dimensões do sistema, pois para laje de ponte havia apenas uma direção de armaduras, e como a ponte era feita para pedestres, as dimensões gerais do vão e o tamanho das esferas (*bubbles*) foram reduzidos com o intuito de manter uma geometria esbelta e a massa total da estrutura mais leve, tal fato pode ter contribuído para a redução da performance da laje *Bubbledeck* aplicado ao sistema estrutural de pontes.

2.4. RECOMENDAÇÕES DE CÁLCULO PROPOSTAS PELA *BUBBLEDECK* INTERNATIONAL

O sistema de lajes *Bubbledeck* surgiu de uma proposta criada pelo engenheiro dinamarquês Jorgen Beuning quando participou de um concurso nacional apoiado pelo governo dinamarquês, em meados da década de 1980. Concurso, esse, que buscava desenvolver sistemas construtivos inovadores que deveriam ser flexíveis e aplicadas em larga escala, além de se obter uma melhor solução ecológica e econômica. O edifício *Millennium Tower*, na cidade de Rotterdam na Holanda, foi a primeira edificação construída utilizando o sistema *Bubbledeck*, com conclusão em 2010. O edifício tem 149 m

de altura, distribuídos em 35 andares, sendo o segundo maior arranha céu da Holanda à época, ver Figura 2.18.



Figura 2.18 - Edifício *Millenium Tower*, Rotterdam, Holanda (*Bubbledeck Brasil*, 2014)

Para nortear o cálculo das lajes *Bubbledeck*, a *Bubbledeck International* listou recomendações baseadas em dados experimentais encomendados pela empresa, e ressaltou que o cálculo das lajes pode ser feito similar ao de uma laje maciça armada em duas direções, pois a forma circular dos vazios permite que as forças se transfiram livre e homogeneamente dentro da laje.

Os parâmetros de cálculos que devem ser levados em consideração são:

- Usar fator de redução para o peso próprio, reduzindo-se em média um terço o peso próprio da laje se comparada com uma laje maciça;
- No cálculo dos deslocamentos, utilizar um fator de minoração de 0,9 na rigidez, em relação a uma laje maciça;
- Em uma laje *Bubbledeck* sua resistência ao esforço cortante é proporcional à quantidade de concreto presente, portanto, a resistência a essa solicitação deve ser reduzida. Tal redução é da ordem de 30%, ou seja, é aplicado um fator de minoração no esforço cortante de 70% se comparado ao esforço cortante de uma laje maciça de mesma altura. Em algumas áreas, de esforço cortante elevado, convém deixar a zona maciça.

2.5. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Nesta seção é apresentado o cálculo da resistência ao cisalhamento segundo três diferentes normas - ACI 318 (2011), Eurocode 2 (2010) e NBR 6118 (2014) - para ligações laje-pilar interiores, com e sem armadura de cisalhamento. Para a determinação da capacidade ao cisalhamento de lajes lisas sem armadura de cisalhamento em todas as normas, há uma expressão geral que consiste no produto da tensão de cisalhamento, perímetro de controle e altura útil (Equação 2.1). Vale ressaltar que cada norma varia a forma de determinar o perímetro de controle.

$$V_{R,c} = v \cdot u \cdot d \quad \text{Equação 2.1}$$

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.

Quando as lajes lisas de concreto armado possuem armadura de cisalhamento, de acordo com as normas em questão, deve-se 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 a ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento. Para a capacidade de carga fora da região das armaduras pode-se utilizar a Equação 2.1, alterando o perímetro de controle u de acordo com a disposição da armadura de cisalhamento. Na região armada ao cisalhamento, a forma de se obter a capacidade de carga é de acordo com a Equação 2.2.

$$V_{R,cs} = V_{R,c} + V_{R,s} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

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

$V_{R,c}$ é a contribuição do concreto na capacidade de carga;

$V_{R,s}$ é a contribuição da armadura de cisalhamento na capacidade de carga.

A forma de determinação dessas parcelas varia de acordo com cada norma. Toda a formulação das normas descritas seguir não considera a combinação última das ações e resistências envolvidas no problema, ou seja, são desconsiderados quaisquer fatores de segurança, uma vez que se trata de um trabalho experimental onde os valores característicos representam os efeitos reais dos modelos locais.

2.5.1. ACI 318 (2011)

Para a determinação da resistência à punção de uma laje sem armadura de cisalhamento, o ACI 318 (2011) determina que seja adotado o mínimo valor encontrado dentre as três expressões dadas na Equação 2.3. O perímetro de controle u_l é localizado afastado $d/2$ da face do pilar, conforme ilustrado na Figura 2.19.

$$V_{R,c} = \min \begin{cases} 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d\right) \\ 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{u_1} + 2\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{cases} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto;

β_c é obtido pela razão entre a maior e a menor dimensão do pilar;

α_s é uma constante que leva em consideração a posição do pilar na edificação (valor igual a 40 para o caso de pilares internos);

u_l é o comprimento do perímetro de controle afastado $d/2$ da face do pilar;

d é a altura útil.

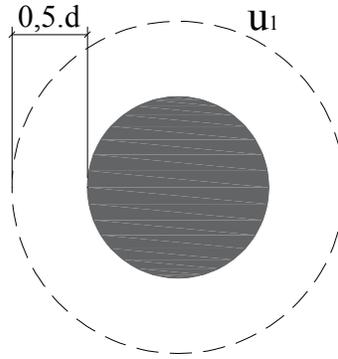


Figura 2.19 - Perímetro de controle u_1 .

Para o interior da região com armadura de cisalhamento a capacidade de carga ($V_{R,cs}$) deve ser obtida através da Equação 2.4, sendo limitada pela Equação 2.5. Já na região fora da armadura de cisalhamento a capacidade de carga ($V_{R,out}$) é obtida através da Equação 2.6, sendo que o perímetro de controle u_{out} é determinado conforme Figura 2.20.

$$V_{R,cs} = (0,25 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d) + \left(\frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ys,w}\right) \quad \text{Equação 2.4}$$

$$V_{R,cs} < 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.5}$$

$$V_{R,out} = 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

A_{sw} é a área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento;

$f_{ys,w}$ representa a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento;

s_r é a distância entre as camadas do reforço.

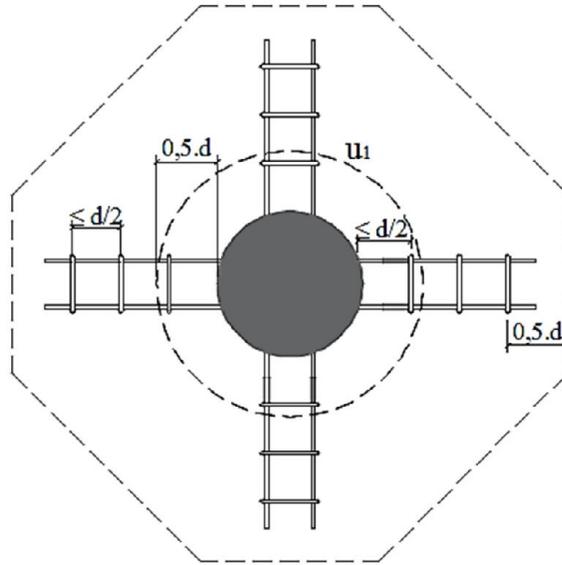


Figura 2.20 - Determinação do perímetro de controle u_{out} .

2.5.2. EUROCODE 2 (2010)

A verificação da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento, segundo o Eurocode 2 (2010), é obtida de acordo com a Equação 2.7, devendo ser feita em um perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ das faces do pilar, ver Figura 2.21, levando em conta a taxa de armadura de flexão e o *size effect*.

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde

d é a altura útil da laje;

f_c é a resistência à compressão do concreto, de acordo com o Eurocode deve ser menor que 90 MPa, porém respeitando-se os limites estabelecidos pelos Anexos de cada país membro da comunidade europeia;

ρ é a taxa de armadura de flexão tracionada média da laje, calculada como $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$, onde ρ_x e ρ_y são as taxas nas direções x e y , respectivamente (devem ser consideradas as barras de uma região afastada $3 \cdot d$ da face do pilar);

ξ é o *size effect*, definido como $\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$, com d em milímetros;

u_1 é o comprimento do perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar.

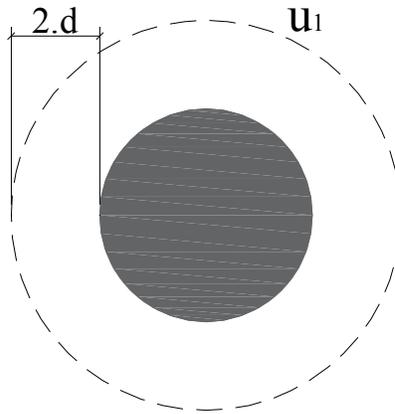


Figura 2.21 - Determinação do perímetro de controle u_1 .

Para o interior da região com reforço ao cisalhamento a capacidade de carga ($V_{R,cs}$) deve ser obtida através da Equação 2.8. A Equação 2.9 define o modelo de cálculo para a verificação da resistência da biela comprimida próxima das extremidades do pilar ($V_{R,max}$). Já na região fora da armadura de cisalhamento a capacidade de carga ($V_{R,out}$) é obtida através da Equação 2.10, sendo que o perímetro de controle u_{out} é determinado conforme Figura 2.22.

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + (1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ys,wef}) \quad \text{Equação 2.8}$$

$$V_{R,max} = 0,3 \cdot f_c \cdot (1 - \frac{f_c}{250}) \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação 2.9}$$

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde:

u_0 é o perímetro do pilar;

u_1 é o comprimento do perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar;

u_{out} é o comprimento do perímetro de controle afastado $1,5 \cdot d$ da camada mais externa da armadura de cisalhamento, respeitando-se um limite de $2 \cdot d$ para a distância máxima entre duas linhas concêntricas de armadura;

s_r é a distância entre as camadas da armadura de cisalhamento.

A_{sw} é a área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento;

$f_{ysw,ef}$ representa a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, calculada como $f_{ysw,ef} = 0,15 \cdot (250 + 0,25 \cdot d) \leq f_{ysw}$, dado em N/mm² e com d em milímetro.

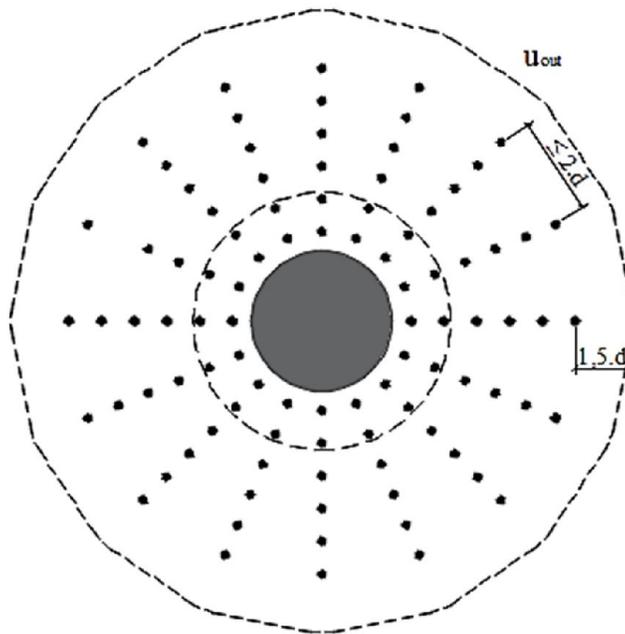


Figura 2.22 - Definição do perímetro de controle u_{out} .

2.5.3. NBR 6118 (2014)

A verificação da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento, segundo a NBR 6118 (2014), é obtida de acordo com a Equação 2.11, devendo ser feita em um perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da borda do pilar, ver Figura 2.23, levando em conta a taxa de armadura de flexão (que pode assumir valor superior a 2%) e o *size effect* (podendo assumir valor superior a 2,0), diferentemente da norma Eurocode 2 (2010).

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.11}$$

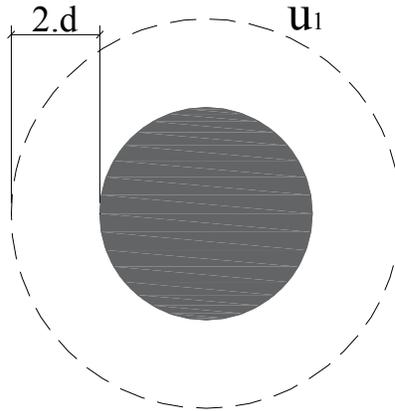


Figura 2.23 - Perímetro de controle em pilares internos u_1 .

Para o interior da região com armadura de cisalhamento a capacidade de carga ($V_{R,cs}$) deve ser obtida através da Equação 2.12. A Equação 2.13 define o modelo de cálculo para a verificação da resistência da diagonal comprimida no contorno do pilar ($V_{R,max}$). Já na região fora da armadura de cisalhamento a capacidade de carga ($V_{R,out}$) é obtida através da Equação 2.14, sendo que o perímetro de controle u_{out} é determinado conforme Figura 2.24.

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ysw,ef}\right) \quad \text{Equação 2.12}$$

$$V_{R,max} = 0,27 \cdot f_c \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação 2.13}$$

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde:

u_{out} é o comprimento do perímetro de controle afastado $1,5 \cdot d$ da camada mais externa da armadura de cisalhamento, respeitando-se um limite de $2 \cdot d$ para a distância máxima entre duas linhas concêntricas de armadura.

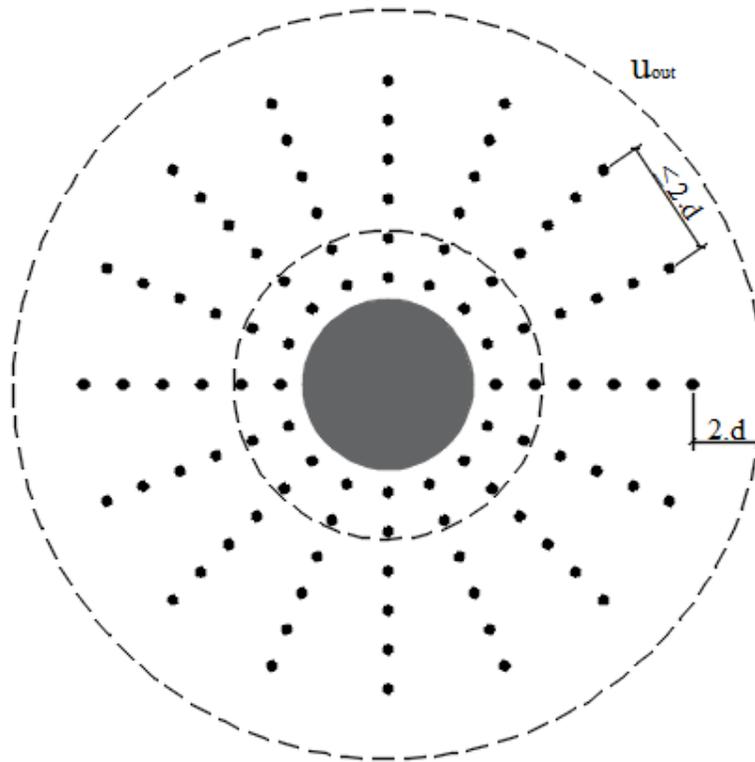


Figura 2.24 - Definição do perímetro de controle u_{out} .

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CARCTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS

A simulação de lajes de um pavimento de uma edificação com dimensões reais em um laboratório é uma tarefa árdua e muito dispendiosa. Então, para solucionar esse entrave, pesquisadores adotam modelos experimentais que simulam o comportamento dessas estruturas quando são submetidas a diferentes níveis de carregamento.

Nesta pesquisa, foram ensaiados à punção quatro modelos locais de ligação laje-pilar submetidos a carregamento simétrico. Três desses modelos foram construídos com a técnica *Bubbledeck* e foram comparadas com o quarto modelo, de referência, o qual foi construído como laje maciça. Todas as peças foram produzidas e ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília.

O modelo local de laje representa uma região de momento negativo em torno do pilar considerando um pavimento de geometria e carregamentos simétricos. Essa região é limitada por pontos de momentos nulos à uma distância de aproximadamente 22% do vão entre pilares, conforme Figura 3.1. Para as lajes deste estudo, o vão considerado foi de 5,7 m, em uma situação de laje quadrada com pilar interno e carregamento simétrico. As lajes então ficaram com dimensões de 2500 x 2500 mm, altura nominal de 280 mm e pilares internos circulares medindo 300 mm de diâmetro. As esferas de poliestireno utilizadas têm diâmetro de 225 mm.

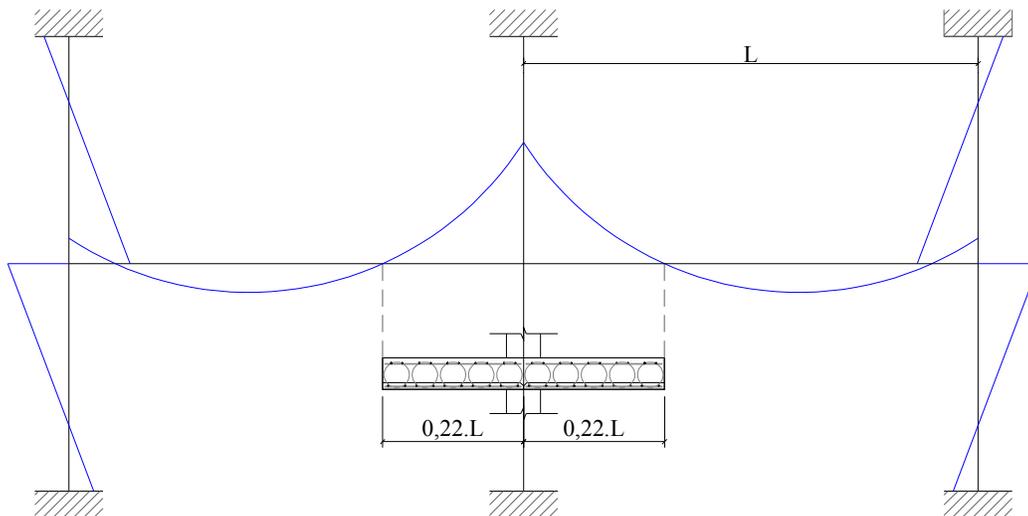


Figura 3.1 - Situação da laje estudada

Das lajes tipo *Bubbledeck* ensaiadas, duas delas possuíam pré-laje pré-moldada e uma delas não possuía pré-laje. O terceiro modelo *Bubbledeck* possuía armadura de cisalhamento do tipo estribo fechado. As características das lajes a serem ensaiadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 3.1 - Descrição das lajes do ensaio de punção

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

A Figura 3.2 apresenta as dimensões das lajes ensaiadas.

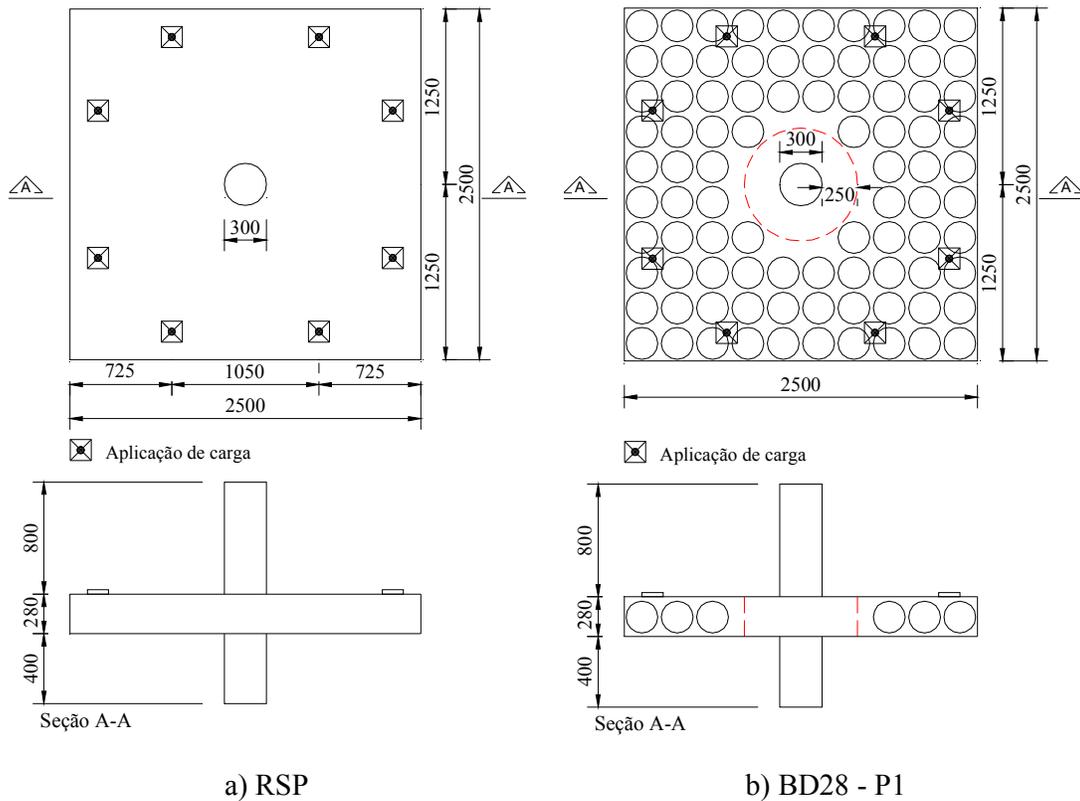


Figura 3.2 - Dimensões das lajes ensaiadas

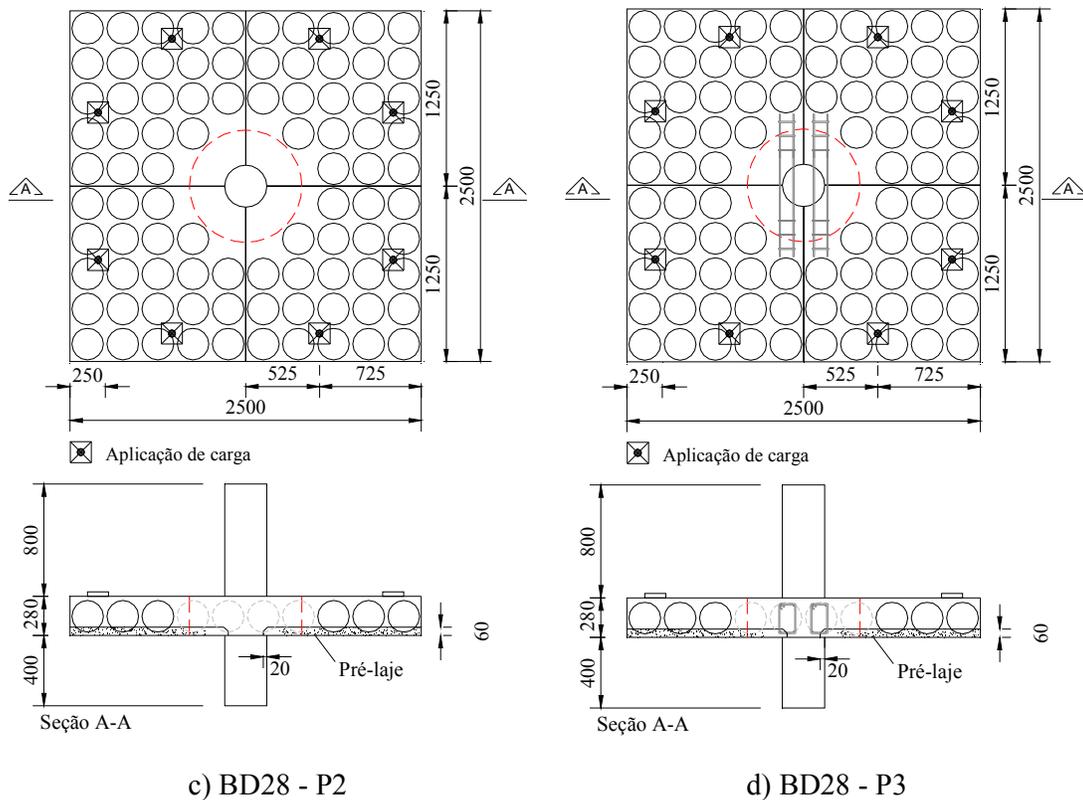


Figura 3.2 - Continuação

3.2. DETALHAMENTO DAS ARMADURAS

3.2.1. Armadura de flexão

A armação das lajes foi composta por fios de aço CA60 formando uma tela na face superior e outra tela com barras de aço CA50 na face inferior da laje. A tela superior foi composta de fios com 6,0 mm de diâmetro e espaçamento variando entre 100 mm e 150 mm, enquanto a tela inferior foi fabricada com barras com 8,0 mm de diâmetro e com o mesmo espaçamento adotado da tela superior. Foram feitos reforços na borda das lajes com barras de diâmetro igual a 12,5 mm. Nas lajes BD28 - P2 e BD28 - P3 foram feitas ligações entre os painéis de pré-laje pré-moldada com barras de diâmetro igual a 10,0 mm. A armadura de flexão principal também foi fabricada com aço do tipo CA50 com diâmetro igual a 12,5 mm.

A Figura 3.3 mostra a vista superior da armadura de flexão das lajes e a Figura 3.4 mostra em corte a armação (telas mais reforço de flexão) de cada laje da série de ensaios.

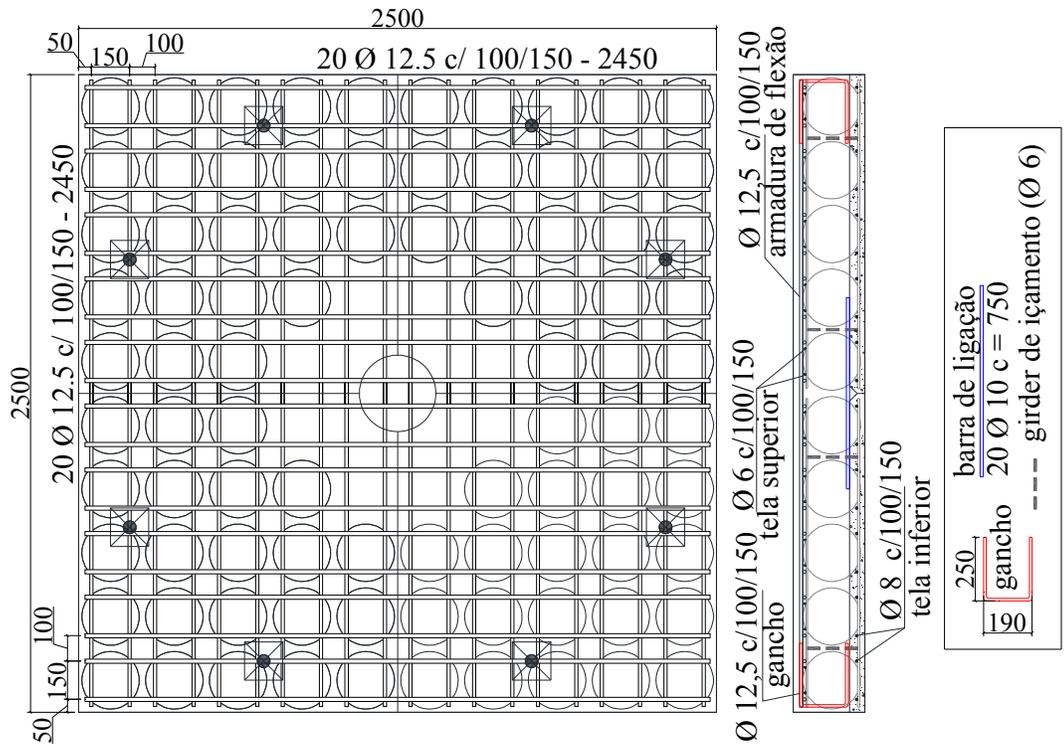
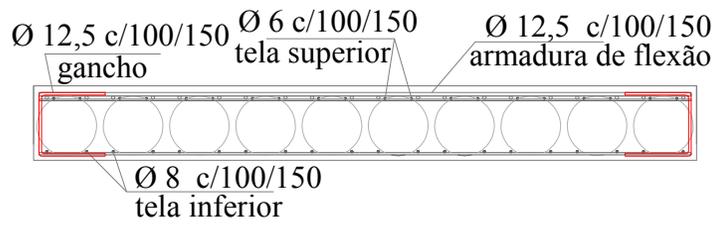
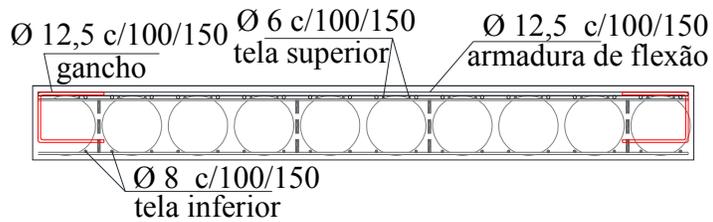


Figura 3.3 - Detalhamento genérico da armadura das lajes (medidas em mm)

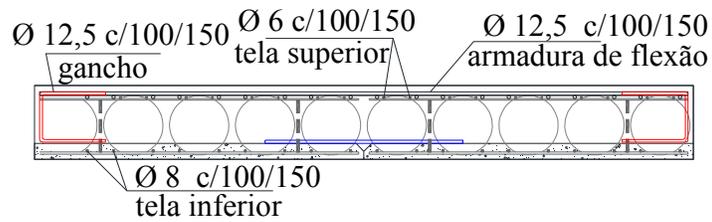


a) RSP

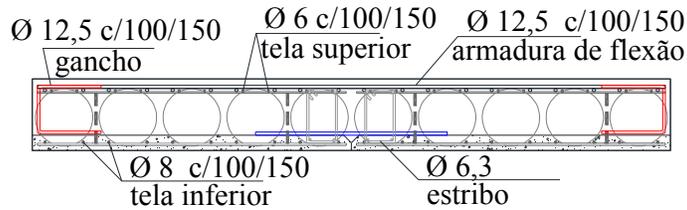


b) BD28 - P1

Figura 3.4 - Detalhe da armadura de flexão (medidas em mm)



c) BD28 - P2



d) BD28 - P3

Figura 3.4 - Continuação

A Figura 3.5 apresenta a armação das lajes RSP e BD28 - P1.



a) Armação da laje RSP.



b) Armação da laje BD28 - P1.

Figura 3.5 - Armadura das lajes RSP e BD28 - P1

3.2.2. Armadura de cisalhamento

A armadura de cisalhamento seguiu um padrão sugerido pela *Bubbledeck International*, sendo composta por armadura tipo estribo fechado de aço CA50 disposta em uma única direção. Essas armaduras foram fabricadas no próprio Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. O processo de montagem dessa armadura se deu no corte de barras com 8,0 mm de diâmetro e 1013 mm de comprimento e produção de estribos com 6,3 mm de diâmetro, sendo então montadas as vigotas com 20 mm de altura e 120 mm de

base, cada uma com 6 estribos. A área de armadura de cisalhamento é igual a 249,4 mm² (ver Figura 3.6 e Figura 3.7).

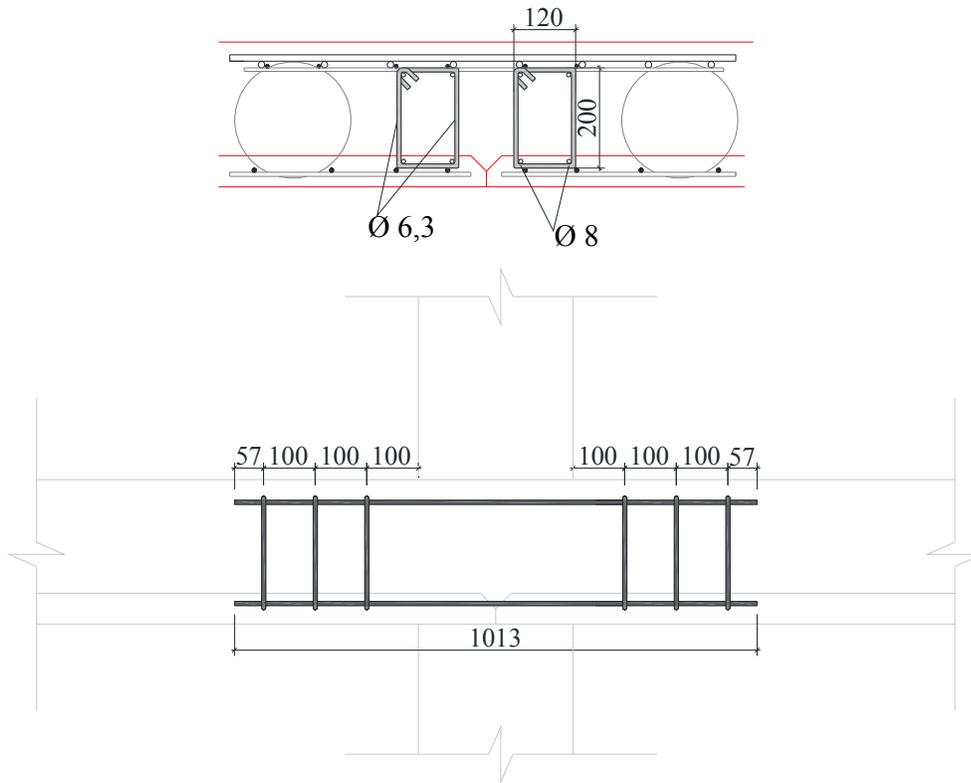


Figura 3.6 - Detalhe da armadura de cisalhamento (medidas em mm)

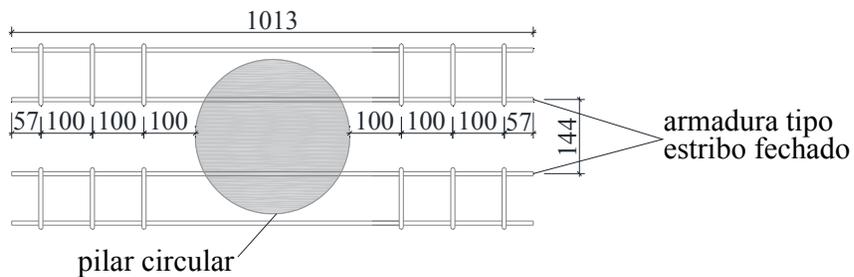


Figura 3.7- Espaçamentos da armadura de cisalhamento (medidas em mm)

3.2.3. Armadura dos pilares

A armadura dos pilares foi composta por 8 barras longitudinais de aço CA50 com 12,5 mm de diâmetro e mais 16 estribos de aço CA50 com 8,0 mm de diâmetro espaçados a cada 100 mm. Essa armadura foi instalada em todas as lajes, conforme Figura 3.8. Ao se

verificar os resultados, constata-se que a armação utilizada foi satisfatória. A Figura 3.9 apresenta a armação do pilar da laje RSP.

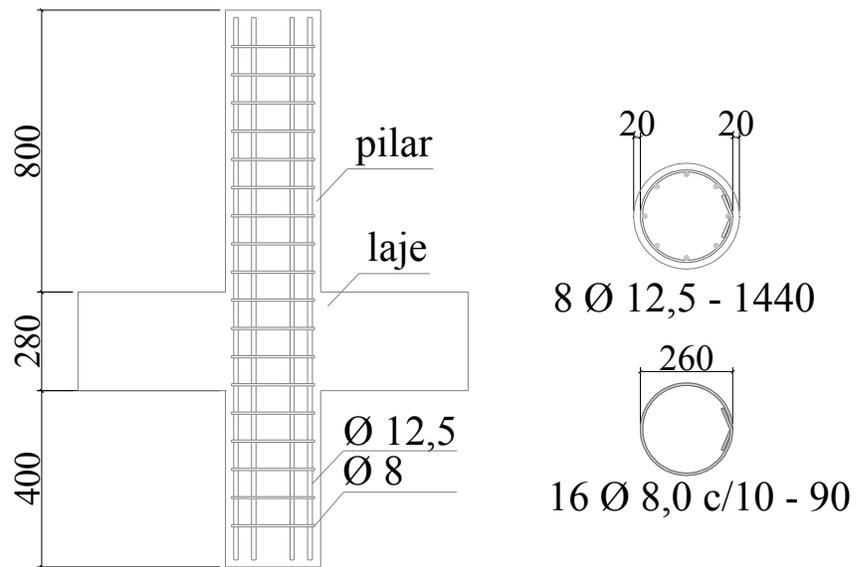


Figura 3.8 - Projeto de armação dos pilares (medidas em mm)



Figura 3.9 - Detalhe da armadura do pilar já posicionada

3.3. INSTRUMENTAÇÃO

3.3.1. Deslocamentos verticais

Foram selecionados 12 pontos na parte superior das lajes para medição dos deslocamentos verticais, utilizando-se LVDT's (transdutores de variação de deslocamento linear) fabricados pela empresa HBM. Em dois quadrantes das lajes os deslocamentos foram medidos em quatro pontos distintos, e nos dois quadrantes restantes, o deslocamento foi medido em 2 pontos distintos. Todos os LVDT's foram posicionados na face superior da laje. Na Figura 3.10 estão mostradas as posições dos LVDT's.

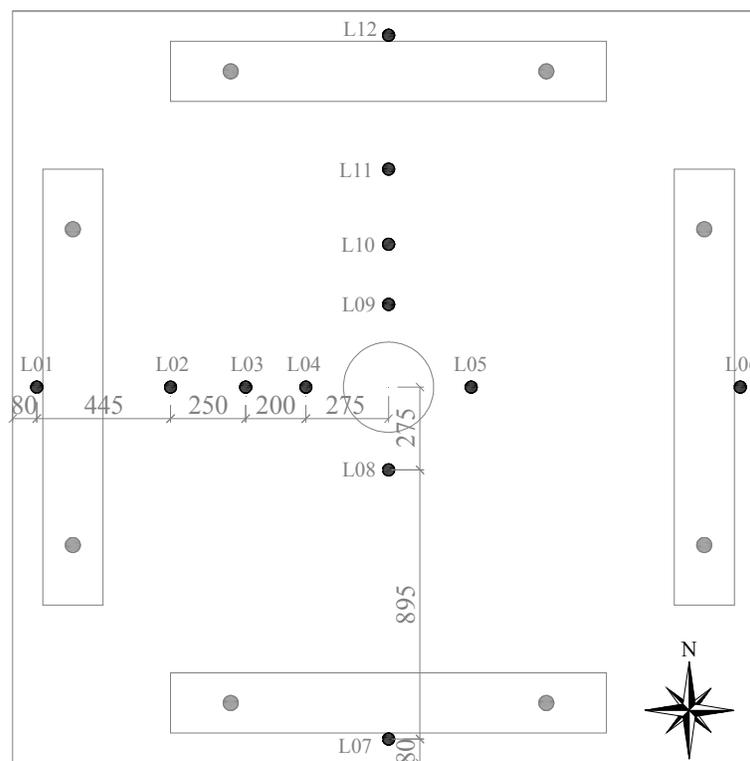


Figura 3.10 - Posicionamento dos LVDT's (medidas em mm)

Para garantir a precisão das leituras dos deslocamentos feitas pelos LVDT's foram coladas chapas de aço no ponto de medição com o intuito de deixar a superfície plana, conforme ilustrado na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Posicionamento LVDT

3.3.2. Deformações na armadura de flexão

Com o intuito de acompanhar o comportamento das lajes durante todas as fases de carregamento foram aferidas as deformações sofridas pelas barras da armadura de flexão e armadura de cisalhamento ao longo do ensaio.

Para medição dessas deformações foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) da marca *Kyowa Electronic Instruments*, tipo KDFG-2-120-C1-11. O posicionamento dos extensômetros foi feito colocando-se dois deles em cada ponto diametralmente opostos na barra de aço de modo a eliminar efeitos de flexão localizada das barras. Para se obter a deformação na barra foi tomada uma média aritmética dos resultados registrados pelos pares de extensômetros.

A fixação dos extensômetros seguiu alguns passos importantes. Inicialmente as barras foram limadas e lixadas com o objetivo de retirar toda a nervura na região a ser instrumentada, sem retirar seção nominal. Após esse passo essa área foi limpa com álcool para total retirada de qualquer resíduo presente na superfície da barra. A colagem dos extensômetros foi feita com adesivo instantâneo à base de cianoacrilato (cola *SUPER BONDER*).

Com os extensômetros fixados, cada terminal foi soldado à ponta de um cabo paralelo flexível, fixado à barra com o auxílio de braçadeiras plásticas. Para proteção dessa região

de solda, contra atrito e outros choques mecânicos, foi colocada uma camada de adesivo a base de resina epóxi, funcionando também como isolamento elétrico. Então a área instrumentada é envolta com uma camada de silicone em gel para garantir proteção aos choques mecânicos e por fim foi envolvida com uma fita isolante de auto-fusão. Na Figura 3.12 são apresentadas algumas etapas do procedimento de colagem dos extensômetros nas barras de aço.



a) Superfície limpa, limada e lixada da barra



b) Colagem e posicionamento dos extensômetros



c) Soldagem dos terminais dos extensômetros



d) Proteção e isolamento com resina epóxi



e) Proteção mecânica com silicone



f) Proteção mecânica com fita isolante de auto-fusão

Figura 3.12 - Procedimento de colagem dos extensômetros

Para as lajes ensaiadas optou-se por instrumentar 8 barras em dois quadrantes da laje. A Figura 3.13 apresenta essa instrumentação. A Figura 3.14 apresenta as armaduras instrumentadas já posicionadas na laje BD28 - P1.

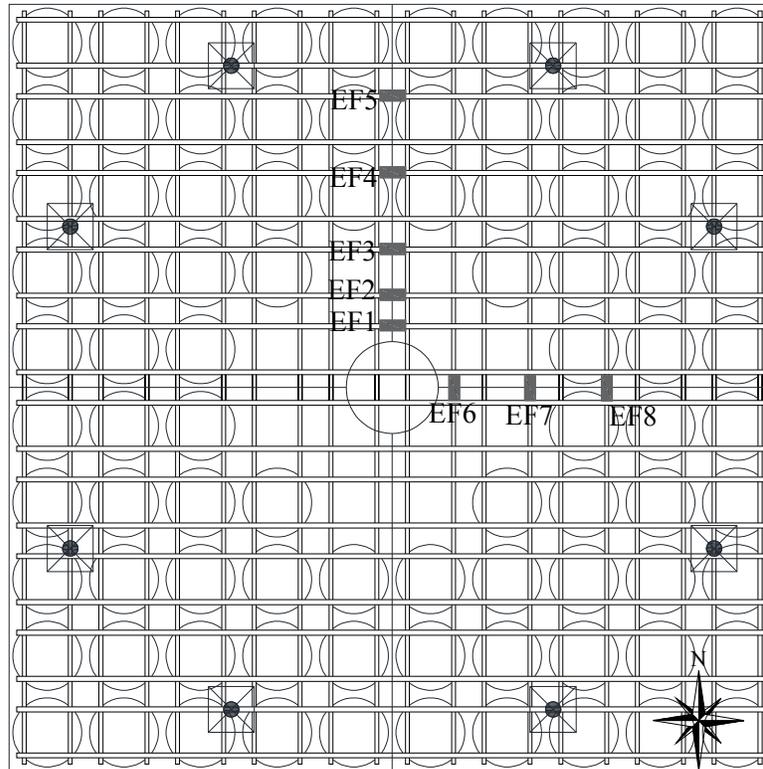


Figura 3.13 - Instrumentação das lajes RSP, BD28 - P1, BD28 - P2 e BD28-P3



Figura 3.14 - Barras de flexão já instrumentadas

A armadura de cisalhamento da laje BD28 - P3 foi instrumentada com o mesmo modelo de extensômetros utilizados na armadura de flexão, ver Figura 3.15. Na Figura 3.16 está ilustrada a posição do extensômetro nos estribos, em corte.

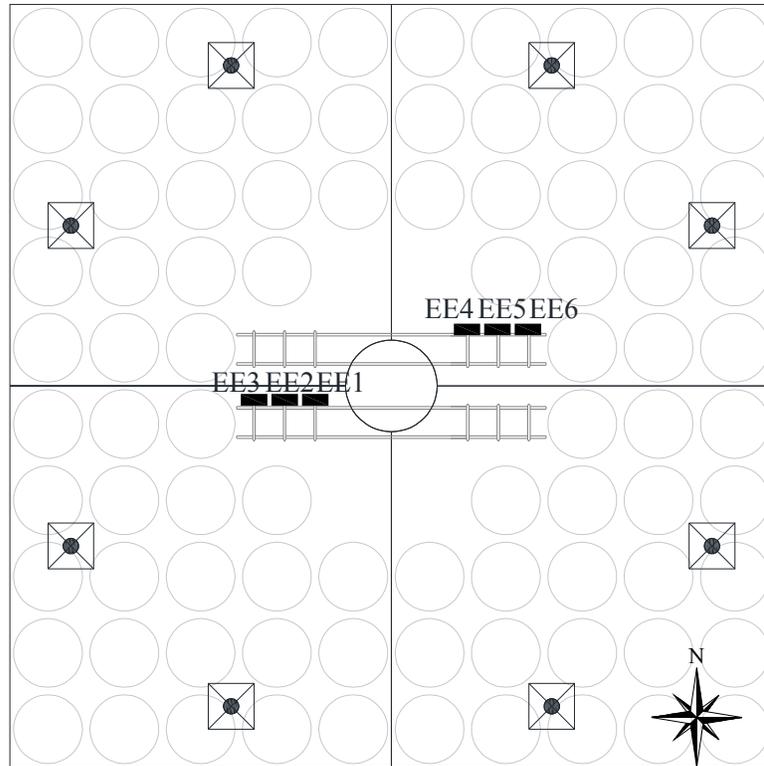


Figura 3.15 - Instrumentação da armadura de cisalhamento

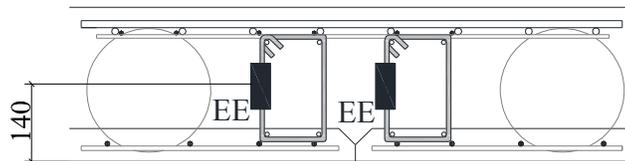


Figura 3.16 - Detalhe, em corte, da posição dos extensômetros nos estribos

3.3.3. Deformações no concreto

Os extensômetros utilizados para medição das deformações do concreto são da marca *Kyowa Electronic Instruments*, modelo KC-70-120-A1-11, sendo dois para registrar as deformações radiais e dois para registrar as deformações tangenciais. Os extensômetros foram locados nas regiões adjacentes ao pilar, onde esperou-se encontrar as maiores deformações do concreto. As Figuras 3.17, 3.18 e 3.19, respectivamente, ilustram a instrumentação utilizadas nas lajes RSP, BD28 - P1, na laje BD28 - P2, e na laje BD28 - P3.

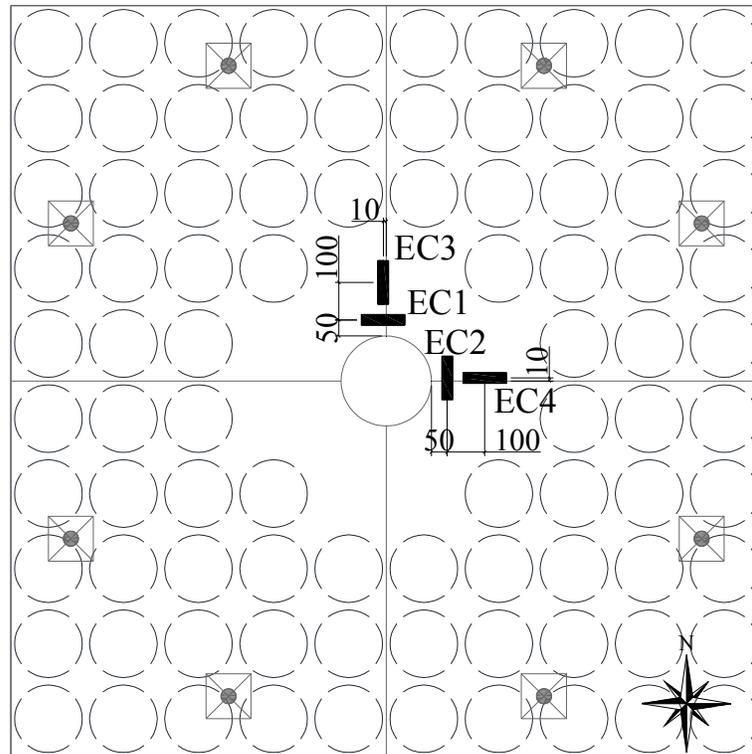


Figura 3.17 - Instrumentação do concreto das lajes RSP e BD28-P1 (medidas em mm)

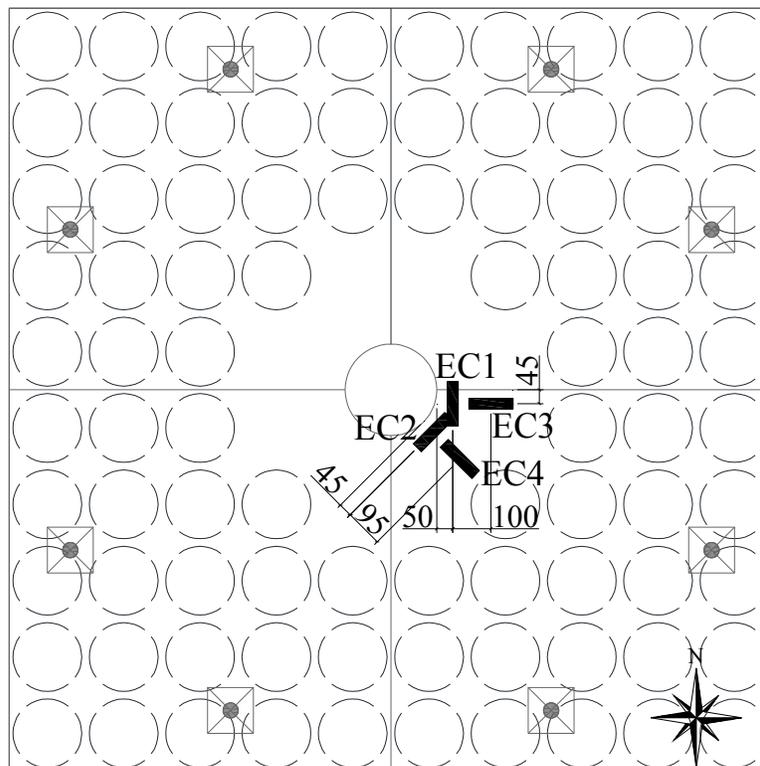


Figura 3.18 - Instrumentação do concreto das lajes BD28 - P2 (medidas em mm)

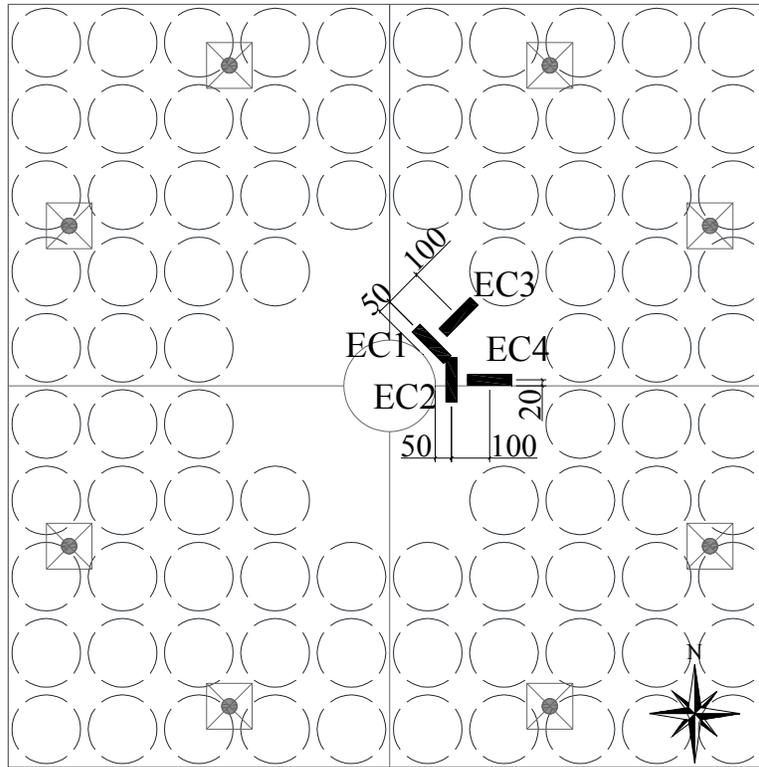


Figura 3.19 - Instrumentação do concreto da laje BD28-P3 (medidas em mm)

Para a colocação dos extensômetros de concreto alguns cuidados devem ser tomados, tais como: a superfície do concreto deve estar limpa, para as lajes desta pesquisa, a limpeza foi feita com álcool e algodão; deve-se, também, garantir a perfeita aderência dos extensômetros com a superfície do concreto, nesse caso, foi utilizado adesivo instantâneo à base de cianoacrilato. A união entre cada terminal do extensômetro e a ponta do cabo flexível foi feita por solda. A Figura 3.20 exemplifica essa colocação.



a) Extensômetros posicionados.



b) Extensômetros já soldados aos cabos flexíveis.

Figura 3.20 - Posicionamento dos extensômetros

3.4. FABRICAÇÃO DOS MODELOS LOCAIS

3.4.1. Fôrmas

Foram utilizadas fôrmas metálicas, conforme Figura 3.21, fabricadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Essas fôrmas permitem a concretagem simultânea de quatro lajes. Algumas adaptações foram feitas utilizando pontaletes de madeira e perfis metálicos dobrados para dar acabamento às extremidades das lajes.



a) Laje BD28 - P1

b) Laje BD28-P3

Figura 3.21 - Fôrmas metálicas das lajes

Para as fôrmas dos pilares circulares foram empregados tubos de PVC. Esses tubos foram posicionados em um suporte que, a princípio, era utilizado na confecção de pilares quadrados de pesquisas anteriores. A adaptação consistiu no aproveitamento desses suportes com arranjo do tubo de PVC na posição do novo pilar, o que foi possível devido ao diâmetro do tubo ser inferior às dimensões da fôrma metálica existente. A Figura 3.22 demonstra a fôrma posicionada.



a) Tubo de PVC



b) Surporte para fôrma do pilar

Figura 3.22 - Fôrma do pilar

3.4.2. Concretagem

As lajes foram concretadas em duas etapas. Primeiramente foram concretadas as pré-lajes das lajes BD28 - P2 e BD28 - P3, ambas com espessura igual a 60 mm (ver Figura 3.23), na segunda etapa foi concluída a concretagem total das lajes e concretadas as lajes BD28 - P1 e a maciça RSP. Ao todo foram utilizados aproximadamente 6,5 m³ de concreto, considerando já o concreto utilizado para moldagem dos corpos-de-prova. A Figura 3.24 mostra todo o processo de concretagem das lajes, desde o recebimento do concreto até a cura com panos úmidos das lajes.



Figura 3.23 - Processo de concretagem das pré-lajes



a) Ensaio abatimento de tronco de cone



b) Moldagem dos corpos de prova



c) Durante a concretagem e vibração



d) Acabamento das lajes



e) Cura das lajes

Figura 3.24 - Detalhe da concretagem das lajes

3.5. MATERIAIS

3.5.1. Concreto

O concreto utilizado para a confecção das lajes foi do tipo usinado comprado da empresa *Concrecon*. Foram especificados 30 MPa, como resistência característica para 28 dias e 19 ± 2 cm, como resultado de teste de abatimento. Para a usinagem do concreto foi utilizada Brita 0 como agregado graúdo.

Foram seguidas as recomendações das normas brasileiras de referência NBR 5739:1994 e da NBR 7222:2011, para a determinação das propriedades mecânicas do concreto utilizado nas lajes. Para cada laje foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm. A Figura 3.25 ilustra o ensaio dos corpos de prova cilíndricos submetidos a esforços de compressão utilizando máquina da marca *Dinateste*.



a) Corpo de prova posicionado na prensa

b) Corpo de prova no momento da ruptura

c) Corpos de prova rompidos

Figura 3.25 - Ensaio de corpos de prova cilíndricos à compressão

Os corpos de prova também foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral, conforme Figura 3.26.



a) Prensa utilizada no ensaio

b) Corpo de prova posicionado na prensa

c) Corpos de prova rompidos

Figura 3.26 - Ensaio de tração por compressão diametral

3.5.2. Aço

Foram retirados 3 corpos de prova (500 mm) de uma das barras inteiras de diâmetro igual a 12,5 mm, com aço tipo CA50, utilizadas para montagem das armaduras de flexão. Para caracterização das propriedades mecânicas do aço em uso, foram seguidas as recomendações da NBR 6892:2002.

3.6. SISTEMA DE ENSAIO

O ensaio das lajes foi feito no pórtico de reação, montado sobre uma laje de reação, existente no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília.

Para o ensaio das lajes foram aplicados carregamentos simétricos, por meio de cilindros hidráulicos acionados por 2 bombas hidráulicas. O sistema do ensaio foi composto por 4 conjuntos de células de carga e indicadores digitais fabricados pela empresa *Kratos Equipamentos Industriais Ltda.*, sendo 2 das células com capacidade de 500 kN e outras 2 com capacidade de 1000 kN, ambos apresentando uma precisão média de 1 kN; 1 cilindro hidráulico da marca *Yellow Power* e 3 da marca *Enerpac*, sendo 2 deles com capacidade de 500 kN e outros 2 com capacidade de 1000 kN; para a distribuição do carregamento aplicado pelos cilindros, apoiados em 2 chapas de aço, foram utilizadas 4 vigas metálicas rígidas, conferindo assim 8 pontos de aplicação de carga na laje; para aplicar o carregamento foram utilizados 4 tirantes de aço de alta resistência da marca

Dywidag com diâmetro igual a 32,0 mm; além da laje de reação do pórtico. Um exemplo esquemático do esquema de ensaio está ilustrado na Figura 3.27.



Figura 3.27 - Sistema de ensaio

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o sistema *Spider 8* (modelos SR30 e SR55) ambos fabricados pela empresa *HBM*, mostrados na Figura 3.28. O sistema de aquisição de dados coleta os dados fornecidos pelos extensômetros nas armaduras flexão, cisalhamento e extensômetros do concreto. Esse sistema trabalha em conjunto com o *software CATMAN*.



Figura 3.28 - Sistema de aquisição de dados

A aplicação do carregamento ocorreu de cima para baixo no sentido vertical, com passos de carga de 4 t. Durante o processo de carregamento, era dada atenção a eventuais desbalanceamentos que a laje pudesse vir a sofrer pela instabilidade do próprio sistema. Esses desbalanceamentos eram corrigidos durante o ensaio, até a ruptura do modelo.

As Figuras 3.29 e 3.30 demonstram o pórtico utilizado no sistema de ensaio, já com a laje posicionada. Na Figura 3.31 é demonstrado o sistema de travamento dos pilares no pórtico de ensaio.



Figura 3.29 - Vista lateral do pórtico de reação



Figura 3.30 - Vista frontal do pórtico de reação.



a) Travamento superior



b) Travamento inferior

Figura 3.31 - Sistema de travamento dos pilares

3.7. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES

3.7.1. Resistência à flexão (GUANDALINI *et. al.*, 2009)

O método utilizado para determinação da resistência das lajes à flexão foi o proposto por Guandalini *et. al.* (2009), em que ele utiliza a teoria das linhas de ruptura, expressa em uma formulação analítica, conforme Equação 3.1 e Equação 3.2. O mecanismo de colapso adota está representado na Figura 3.32.

$$V_{flex} = \left(\frac{4m_u}{r_q \cdot (\cos\theta + \sin\theta) - c} \right) \cdot \left(\frac{B^2 - B \cdot c - \frac{c^2}{4}}{B} - c \right) \quad \text{Equação 3.1}$$

$$m_u = \rho \cdot f_y \cdot d^2 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \rho \cdot \frac{f_y}{f_c} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

B é a dimensão da laje;

c equivale à distância entre duas linhas de ruptura consideradas multiplicada por 2;

r_q equivale à distância do centro do pilar ao ponto de aplicação da carga;

ρ é a taxa de armadura de flexão adotada;

f_y é igual à tensão de escoamento da armadura de flexão;

f_c equivale à resistência característica à compressão do concreto.

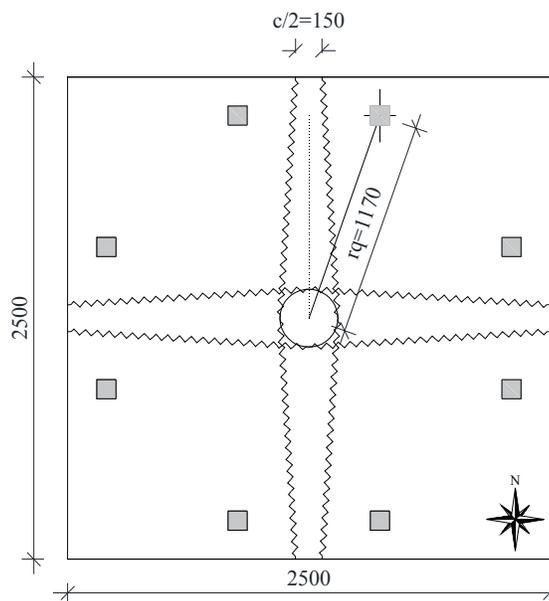


Figura 3.32 - Mecanismo de colapso

3.7.2. Resistência à flexão (Eurocode 2 (2010))

Para a determinação da resistência à flexão de acordo com o Eurocode 2 (2010) admite-se que a ruptura por flexão ocorre devido ao esgotamento da resistência da armadura de flexão, em que todas as barras do reforço à flexão atingem o escoamento ao longo da seção da laje, ignorando-se as barras de flexão distribuídas na face comprimida da laje.

Com a Equação 3.3 se determina a resultante de tração nas armaduras, já a Equação 3.4 serve para se determinar a resultante de compressão do concreto, onde foi desconsiderado o efeito Rüsç visto que a carga não é de longa duração. O momento resistente da seção da laje pode ser calculado de acordo com a Equação 3.5.

$$F_{st} = \sum A_s \cdot f_{ys} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

A_s é a área das armaduras superiores ao longo de toda a seção da laje;

f_{ys} é a tensão de escoamento das armaduras.

$$F_{cc} = 0,95 \cdot f_c \cdot b_w \cdot x \quad \text{Equação 3.4}$$

onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto;

b_w é a largura da seção da laje;

x é a altura da linha neutra, determinada por $x = \frac{\sum A_s \cdot f_{ys}}{0,95 \cdot f_c \cdot b_w}$

$$M_R = \sum A_s \cdot f_{ys} \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad \text{Equação 3.5}$$

A resistência à flexão é obtida igualando-se o momento resistente (M_R) com o momento solicitante (M_s). Em que o momento solicitante é a soma dos momentos devido ao peso próprio da laje e da carga aplicada, atuando através das reações nas placas de aço sob a laje. Na Figura 3.33 é apresentado o centro de carga para pilar circular. Para se calcular o momento solicitante pode-se seguir o esquema ilustrado na Figura 3.34.

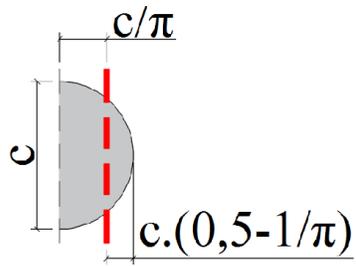


Figura 3.33 - Determinação do centro de carga para meia laje

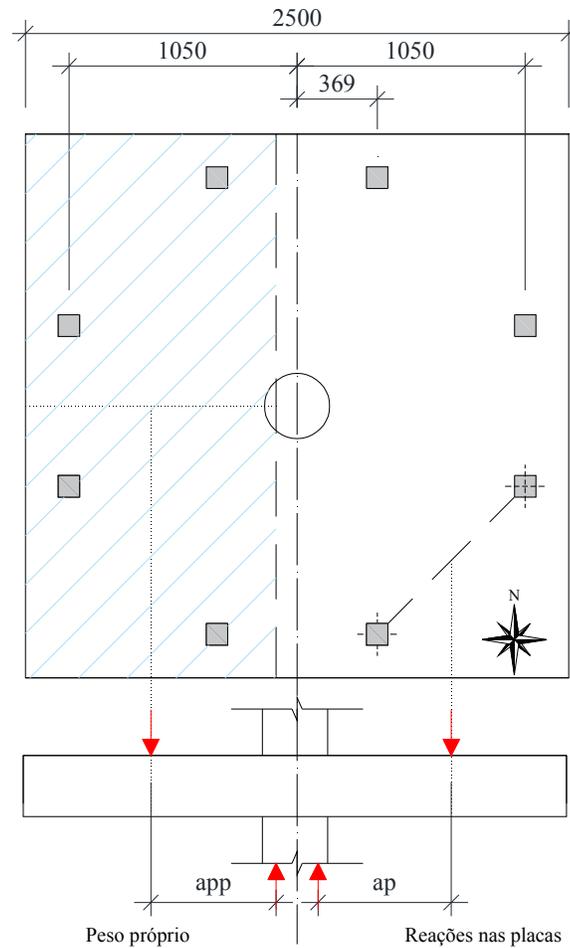


Figura 3.34 - Ilustração do cálculo do momento solicitante das lajes

3.7.3. Resistência à flexão adotada

Analisando os dois métodos de obtenção da resistência à flexão para as lajes, optou-se por adotar o que obteve menores resistências, que é o das linhas de ruptura proposto pelo Eurocode 2 (2010). Nas Tabelas 3.2 e 3.3 estão listados os resultados encontrados para cada método.

Tabela 3.2 - Resistência à flexão das lajes de acordo com Guandalini (2009)

Modelos	d (mm)	ρ (%)	Materiais		m_u kNm/m	V_{flex} kN
			f_c (MPa)	f_y (MPa)		
RSP	238	0,41	47,7	583	132	1018
BD28 - P1	250	0,39	47,7	583	139	1074
BD28 - P2	255	0,39	47,7	583	142	1094
BD28 - P3	255	0,39	47,7	583	142	1095

Tabela 3.3 - Resistência à flexão das lajes de acordo com o Eurocode 2 (2010)

Modelos	d (mm)	ρ (%)	Materiais		MR kNm/m	V_{flex} kN	MÉTODO UTILIZADO
			f_c (MPa)	f_y (MPa)			
RSP	238	0,41	47,7	583	135	1004	
BD28 - P1	250	0,39	47,7	583	142	1058	
BD28 - P2	255	0,39	47,7	583	145	1076	
BD28 - P3	255	0,39	47,7	583	145	1077	

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos com a realização dos ensaios descritos no capítulo anterior. São expostos a seguir os resultados das resistências do concreto e do aço caracterizados nesse estudo; os deslocamentos verticais das lajes; as deformações na armadura de flexão; e as deformações na armadura de cisalhamento do modelo BD28 - P3; as deformações na superfície do concreto e o mapa das fissuras visíveis durante os ensaios. São apresentadas, ainda, as cargas últimas de ruptura aferidas no final de cada ensaio, as quais, associadas aos resultados acima descritos, possibilitaram a definição do modo de ruptura das lajes.

4.1. MATERIAIS CARACTERIZADOS

Os valores médios das propriedades mecânicas do concreto utilizado para fabricação dos modelos, nas idades de controle, são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do concreto

Origem	CP	Tipo de Ensaio	Idade*	f_c	f_{ct}	E_{ci}
			(dias)	(MPa)	(MPa)	(GPa)
Concretagem final	CP1	Compressão	44	46,2	-	-
	CP2	Compressão	44	49,5	-	-
	CP3	Compressão	44	47,2	-	-
	CP4	Tração	44	-	3,5	-
	CP5	Tração	44	-	2,8	-
	CP6	Tração	44	-	5,0	-
	CP7	Módulo de Elasticidade	54	-	-	30,6
	CP8	Módulo de Elasticidade	54	-	-	21,0
Média				47,7	3,8	25,8
Desvio Padrão				1,7	1,2	6,8
C.V				3,53%	30,66%	26,43%
Pré-moldado	PW1	Compressão	44	56,3	-	-
	PW2	Compressão	44	54,5	-	-
	PW3	Compressão	44	59,0	-	-
	PW4	Tração	44	-	3,3	-
	PW5	Tração	44	-	4,0	-
	PW6	Tração	44	-	3,0	-
	PW7	Módulo de Elasticidade	54	-	-	27,4
	PW8	Módulo de Elasticidade	54	-	-	27,6
Média				56,6	3,4	27,5
Desvio Padrão				2,3	0,5	0,1
C.V				3,99%	15,70%	0,54%

* Idade de rompimento dos corpos de prova

Na Tabela 4.2 estão relacionadas as propriedades mecânicas do aço da armadura de flexão com 12,5 mm de diâmetro, e a Figura 4.1 mostra a curva tensão-deformação das barras ensaiadas.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço

Modelo	Lote (Aço)	Ø 12,5 mm		
		f_{ys}	E_s	ϵ_{ys}
		(MPa)	(GPa)	(‰)
RSP	1	584	189	3,01
BD28 - P1				
BD28 - P2				
BD28 - P3				

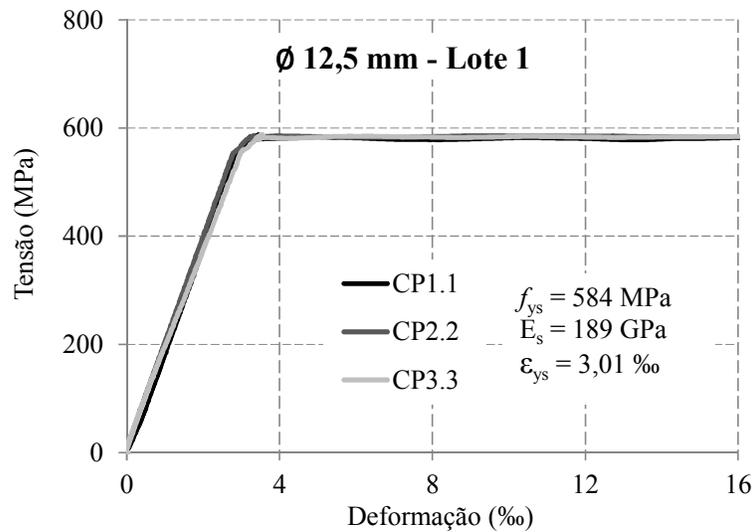


Figura 4.1 - Tensão deformação das barras ensaiadas

4.2. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Para medir os deslocamentos das lajes foram utilizados 12 LVDT's posicionados na face superior das lajes ensaiadas. Em todas as lajes os pontos monitorados foram os mesmos para que se fizesse uma comparação direta dos resultados obtidos. Esse posicionamento dos LVDT's permitiu leituras até a ruptura da laje e, após esse carregamento de pico, foi mapeado todo o deslocamento da laje sem interrupções. As leituras foram realizadas a cada passo de carga.

Serão apresentados nas Figuras de 4.2 à 4.9 os deslocamentos verticais de cada laje na direção Sul - Norte (S-N) e na direção Oeste - Leste (O-L), a orientação dos pontos cardiais está localizada na própria figura.

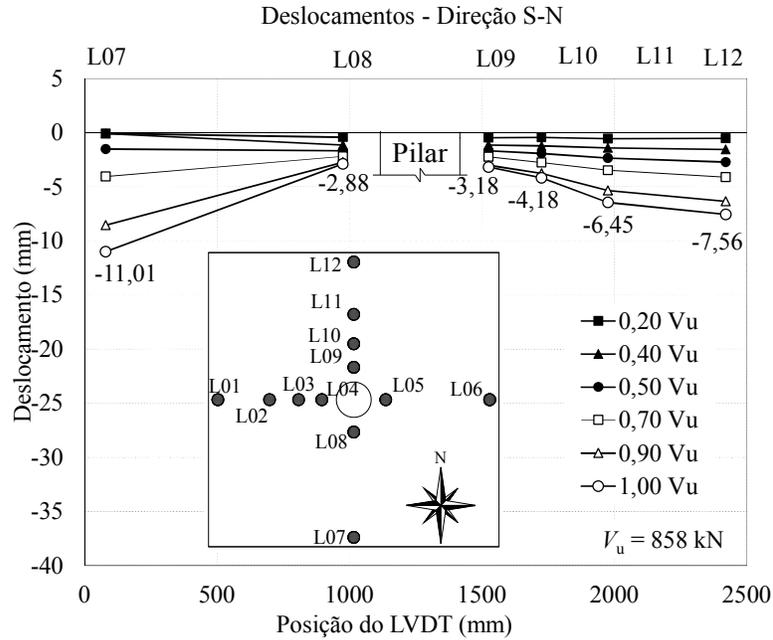


Figura 4.2 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje RSP

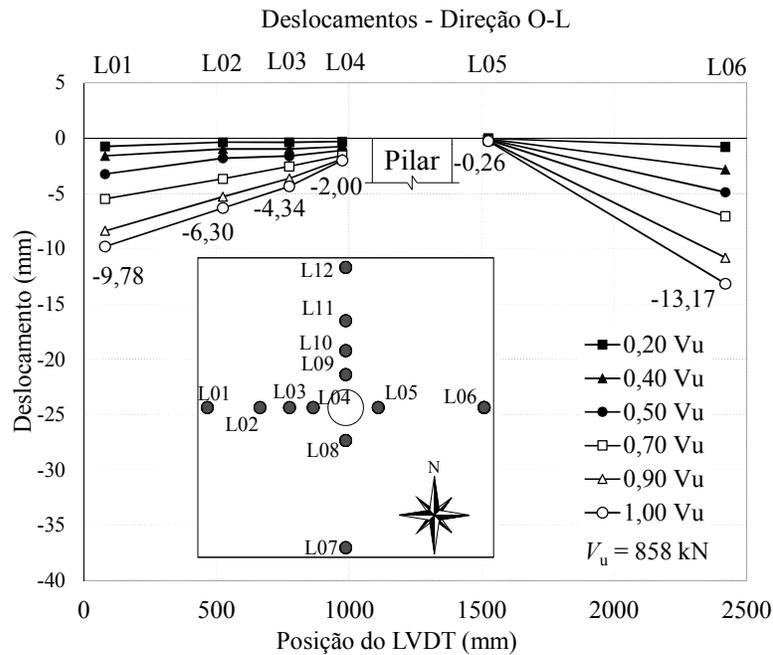


Figura 4.3 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje RSP

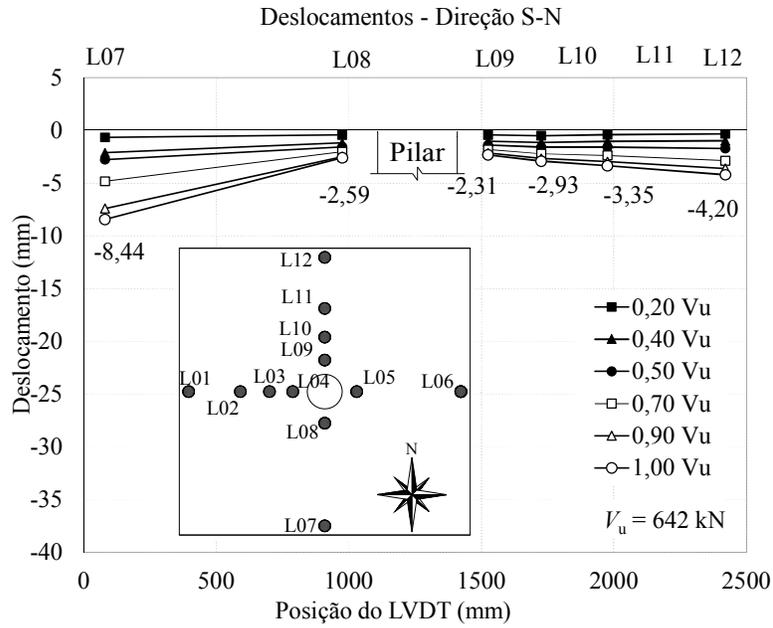


Figura 4.4 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD28-P1

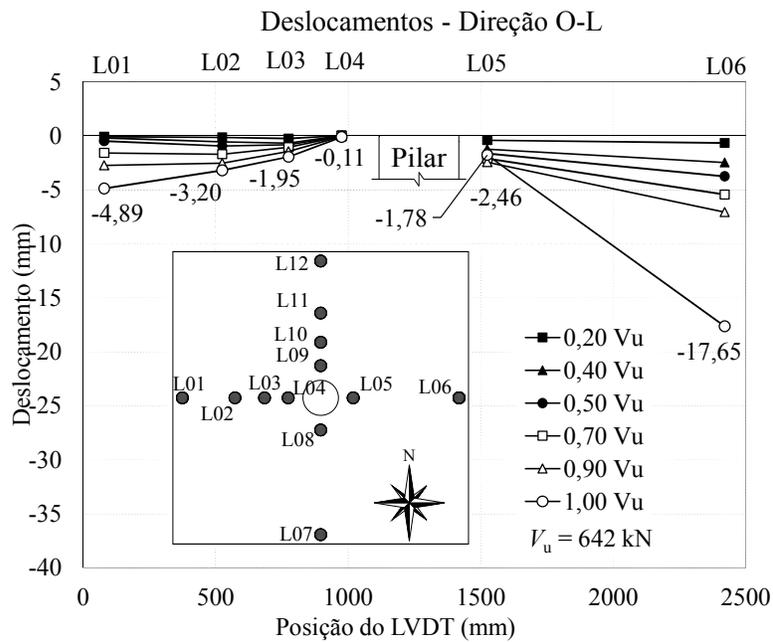


Figura 4.5 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje BD28-P1

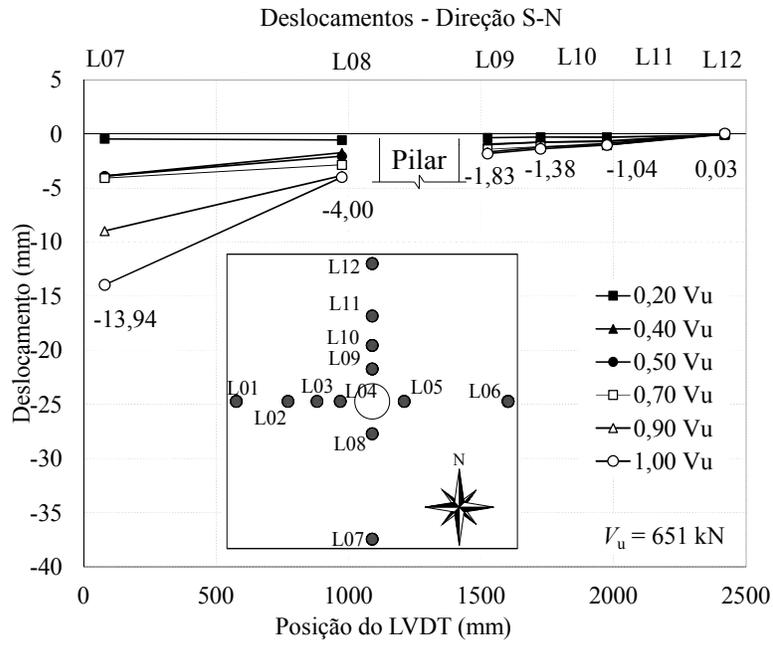


Figura 4.6 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD28-P2

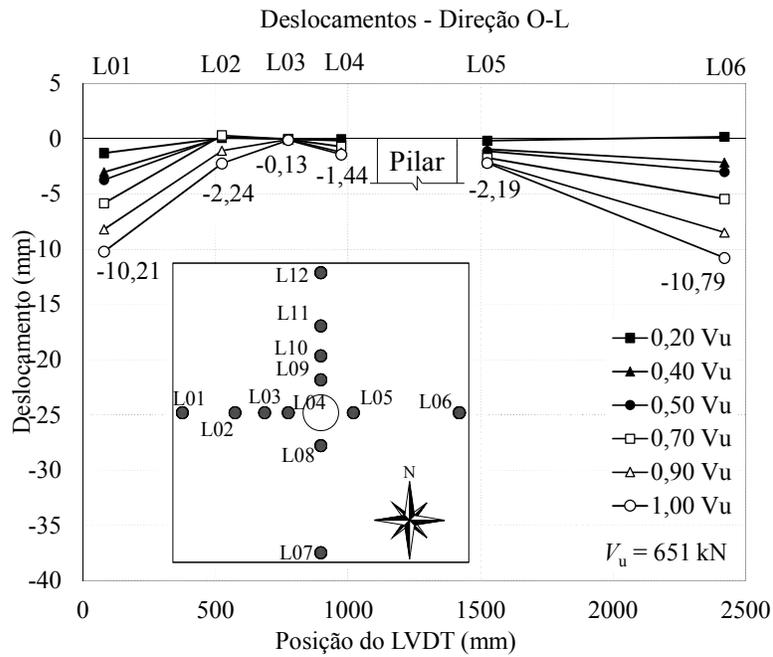


Figura 4.7 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje BD28-P2

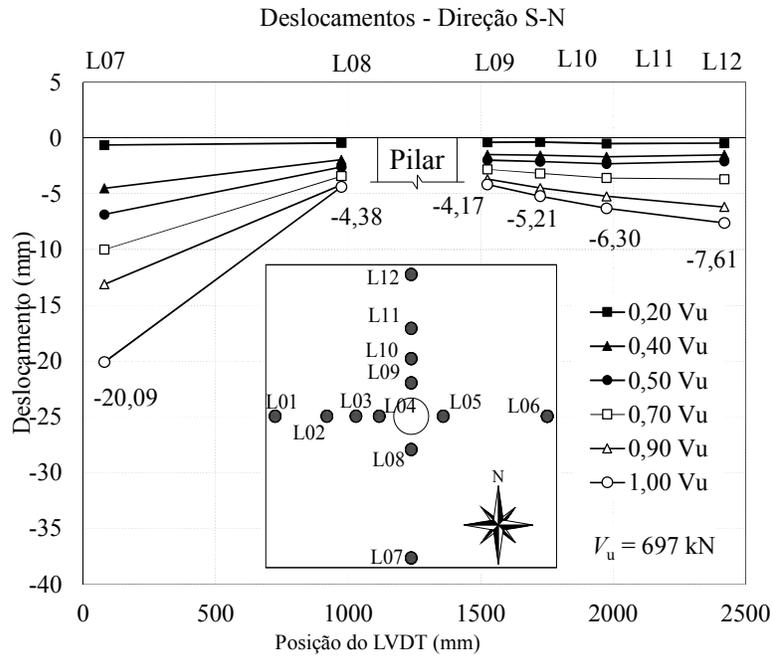


Figura 4.8 - Deslocamentos verticais na direção S-N da laje BD28-P3

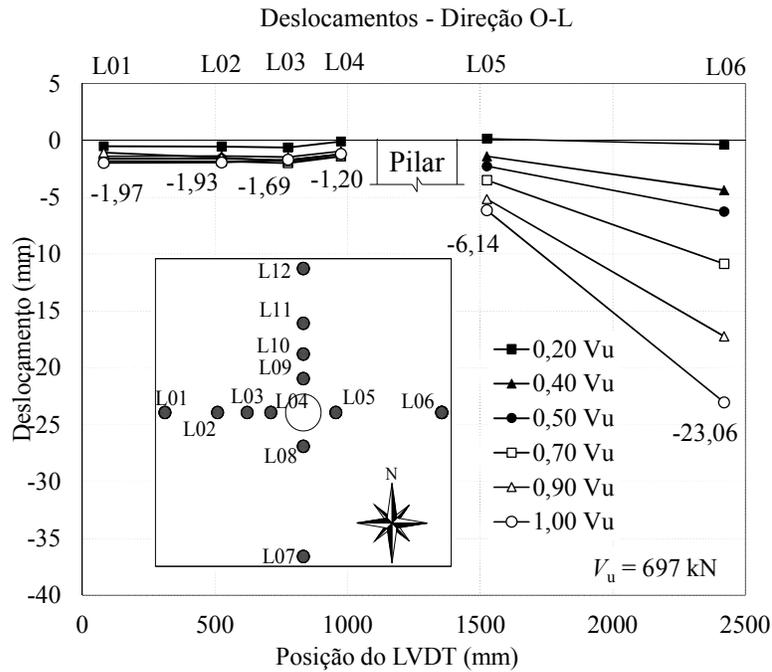


Figura 4.9 - Deslocamentos verticais na direção O-L da laje BD28-P3

A Figura 4.10 apresenta um gráfico comparativo entre as lajes para os deslocamentos médios calculados a partir das leituras dos LVDT's posicionados no extremo de cada laje (L01, L06, L07 e L12).

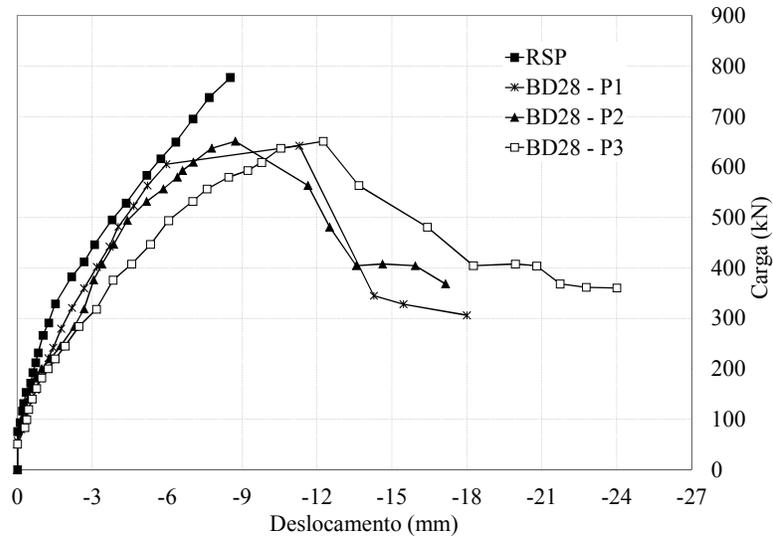
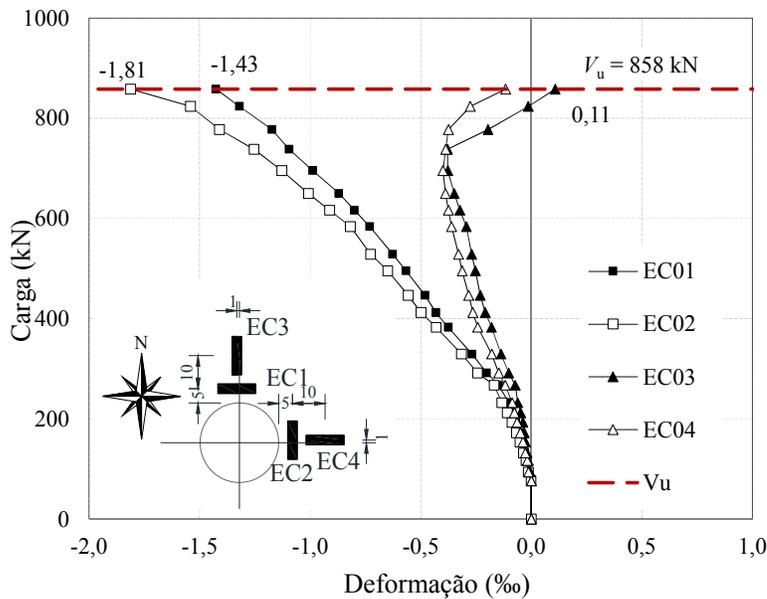


Figura 4.10 - Deslocamentos verticais médios das lajes

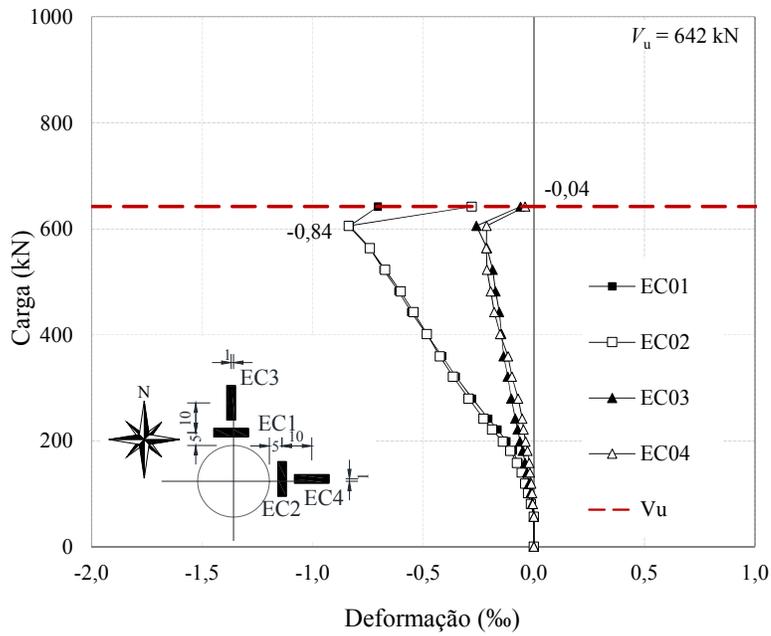
4.3. DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO

Para a medição das deformações na superfície do concreto foram utilizados extensômetros elétricos posicionados na superfície inferior das lajes, próximo às extremidades dos pilares. Os extensômetros foram estrategicamente posicionados de modo a medir as deformações tangenciais e as deformações radiais, foram utilizados quatro extensômetros por laje. As Figuras 4.11 à 4.14 apresentam os resultados das leituras de deformações na superfície do concreto de todas as lajes.



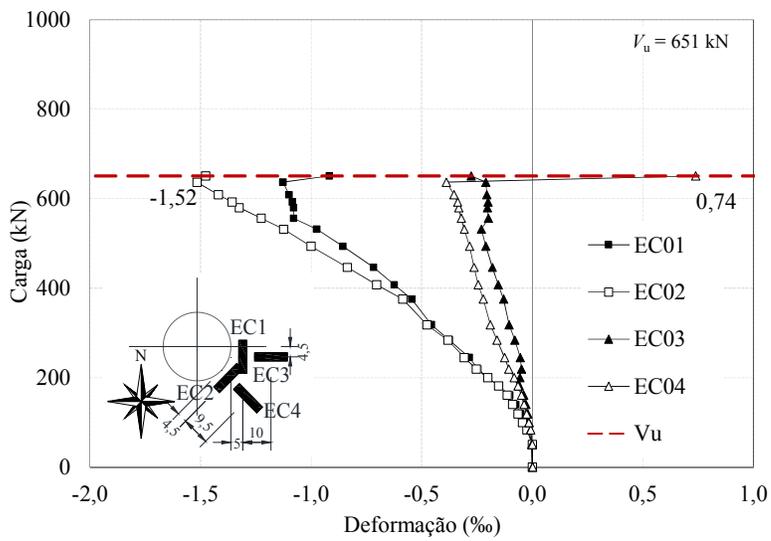
Vista inferior da laje após a ruptura

Figura 4.11 - Deformações na superfície do concreto da laje RSP



Vista inferior da laje após a ruptura

Figura 4.12 - Deformações na superfície do concreto da laje BD28 - P1



Vista inferior da laje após a ruptura

Figura 4.13 - Deformações na superfície do concreto da laje BD28 - P2

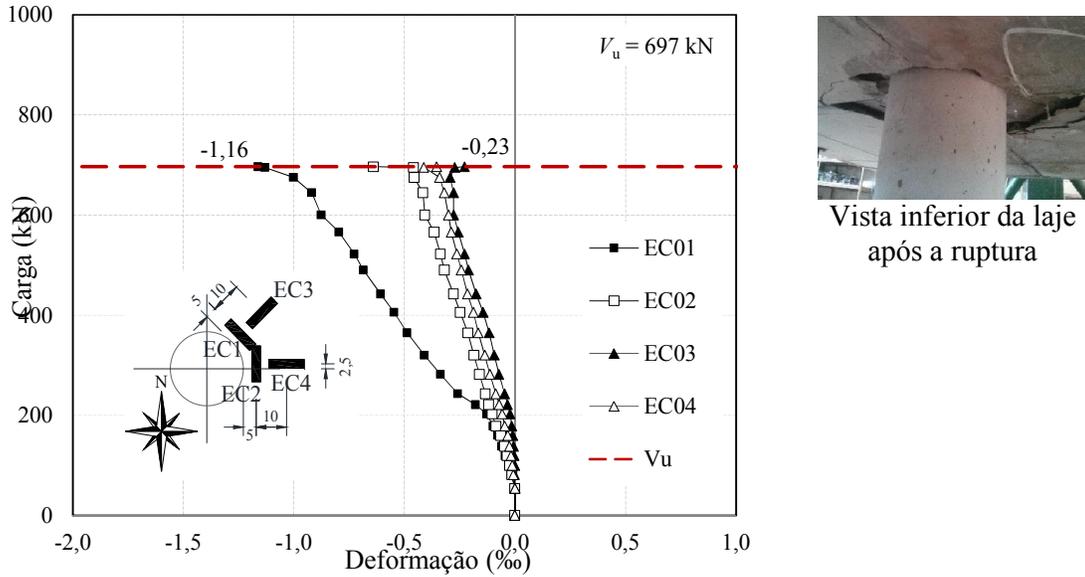


Figura 4.14 - Deformações na superfície do concreto da laje BD28 - P3

Na Figura 4.15 está uma comparação entre as deformações médias nos extensômetros tangenciais, os quais apresentaram os maiores valores de deformação. Observa-se que a deformação aumentou de forma similar, a cada passo de carga, para todas as lajes.

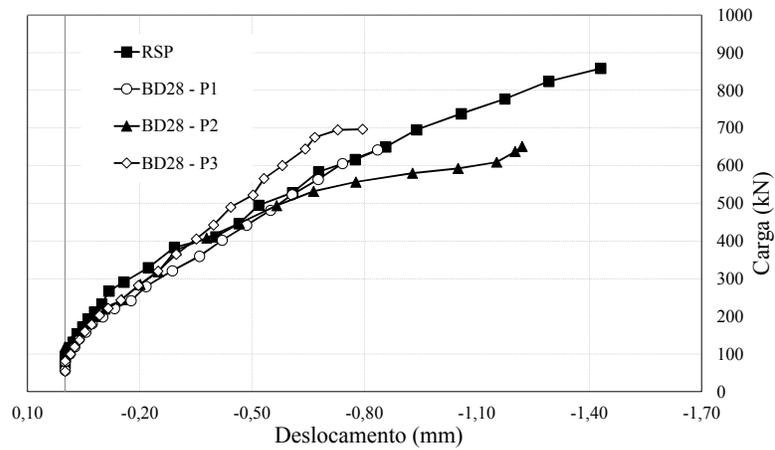


Figura 4.15 - Deformação média dos extensômetros tangenciais na superfície do concreto

As Figuras 4.16 à 4.19 apresentam uma comparação entre as deformações médias radiais e tangenciais na superfície do concreto em cada laje.

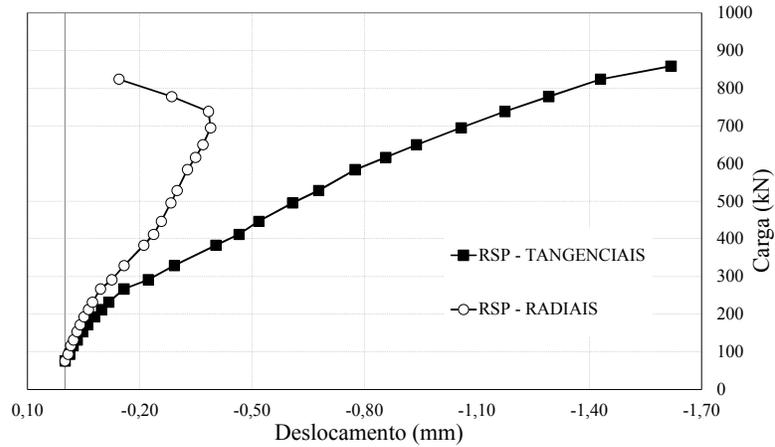


Figura 4.16 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje RSP

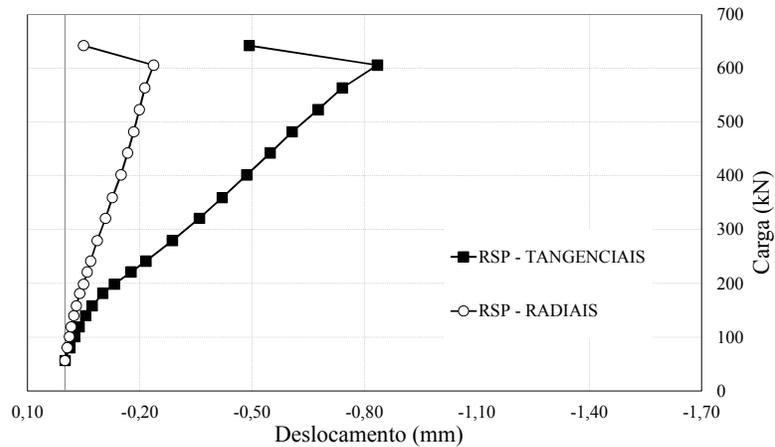


Figura 4.17 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje BD28 - P1

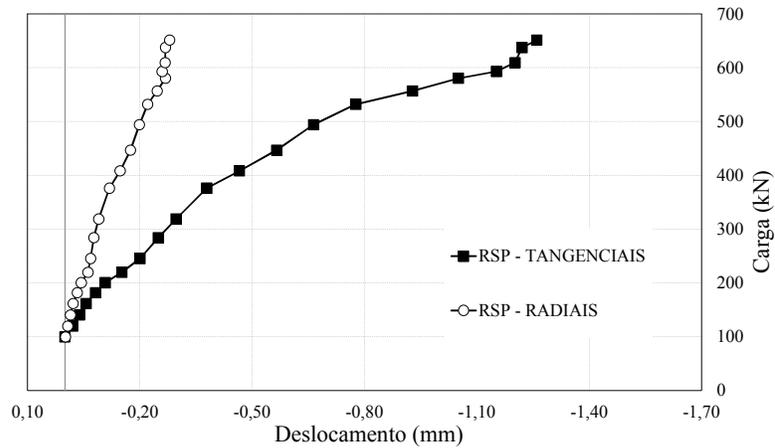


Figura 4.18 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje BD28 - P2

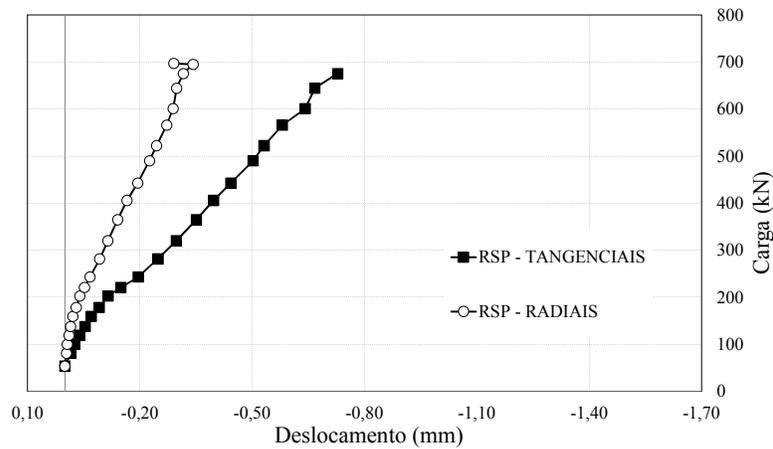


Figura 4.19 - Comparação entre as deformações radiais e as deformações tangenciais para a laje BD28 - P3

4.4. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO

Para medir as deformações nas armaduras de flexão foram monitoradas barras distribuídas nas duas direções ortogonais da laje. Foram instrumentadas 5 barras na direção S-N e 3 barras na direção O-L.

As deformações nas barras de flexão foram tomadas pela média aritmética das deformações medidas nos dois extensômetros colados diametralmente opostos em cada ponto a ser instrumentado.

As Figuras 4.20 à 4.27 apresentam os gráficos das deformações nas armaduras de flexão superiores da laje em função de sua posição, para diferentes estágios de carregamento. Com a análise desses gráficos pôde-se avaliar a distribuição dos esforços de flexão ao longo da seção transversal das lajes, podendo-se observar a relação entre a ruptura das lajes e o escoamento das barras de flexão.

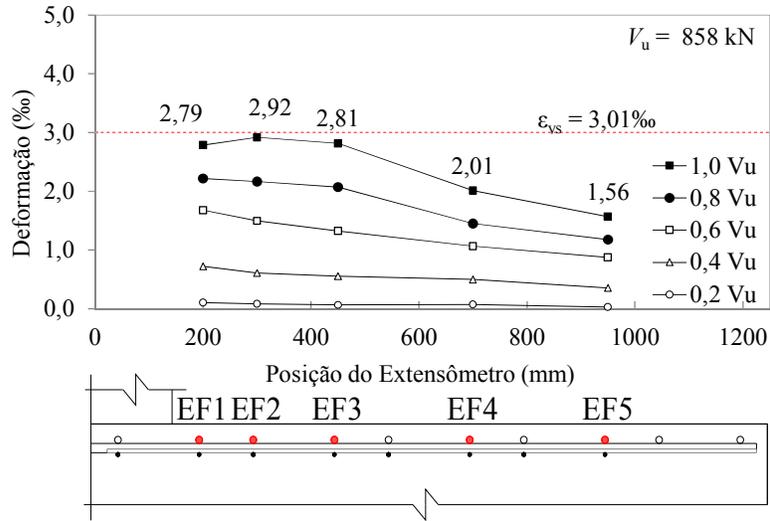


Figura 4.20 - Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP, direção S-N

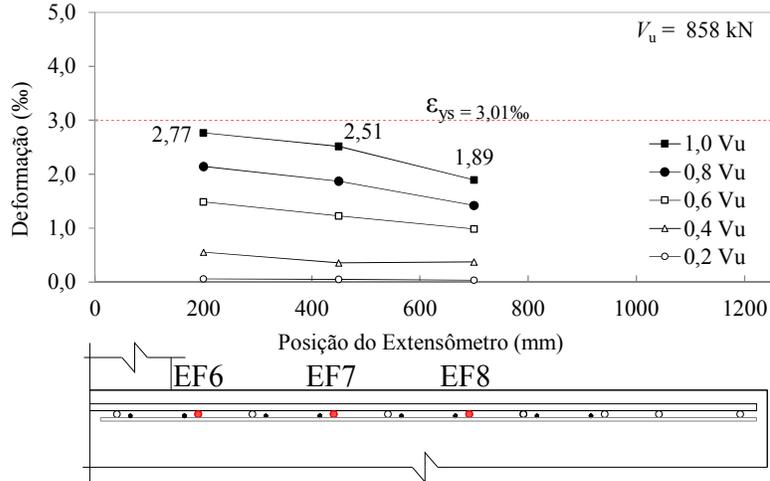


Figura 4.21 - Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP, direção O-L

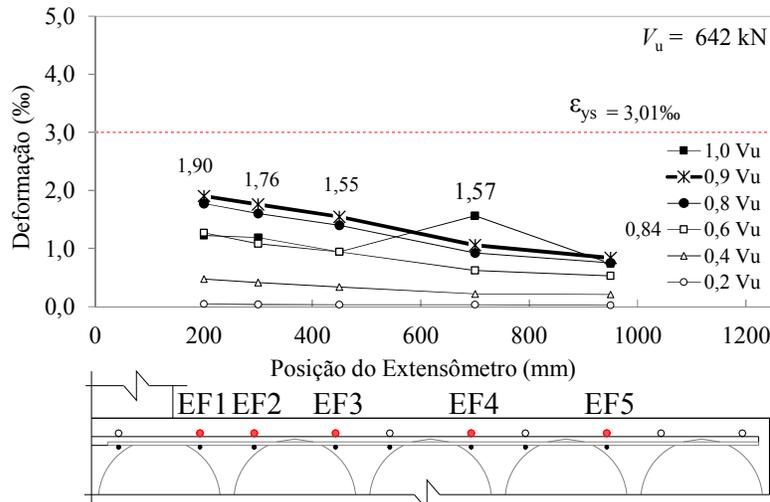


Figura 4.22 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P1, direção S-N

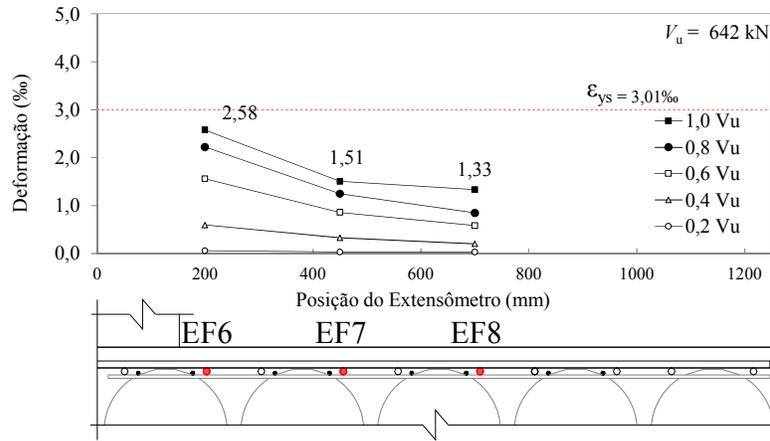


Figura 4.23 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P1, direção O-L

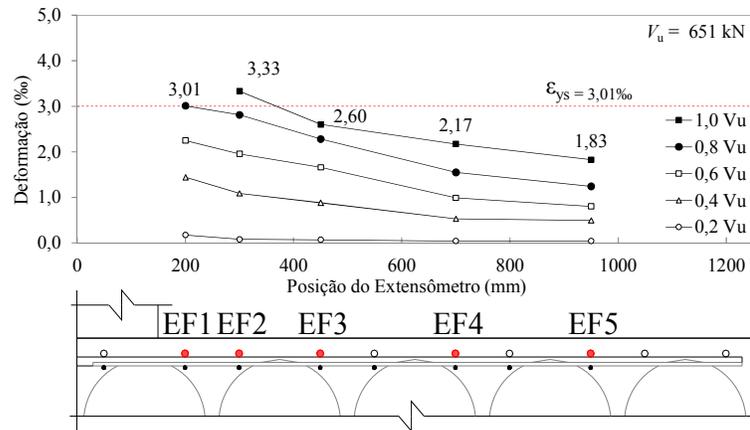


Figura 4.24 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P2, direção S-N

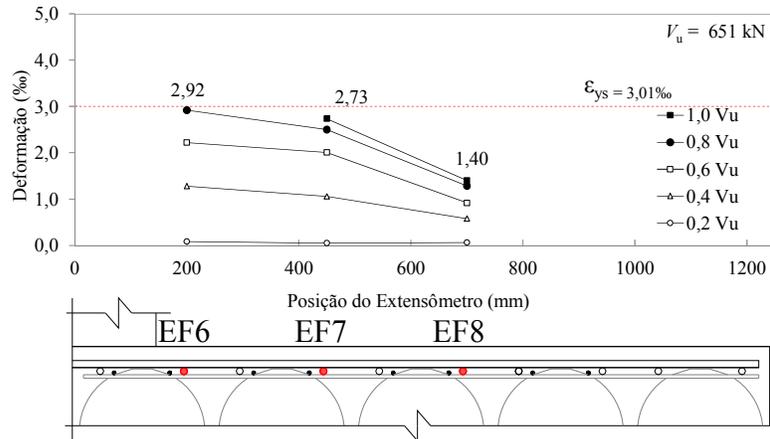


Figura 4.25 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P2, direção O-L

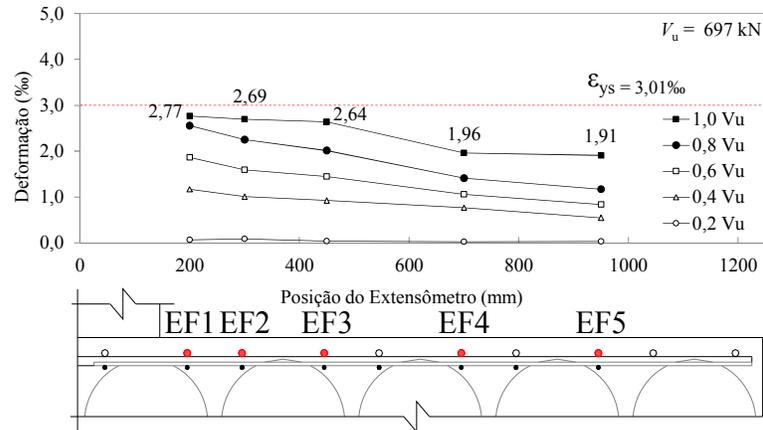


Figura 4.26 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P3, direção S-N

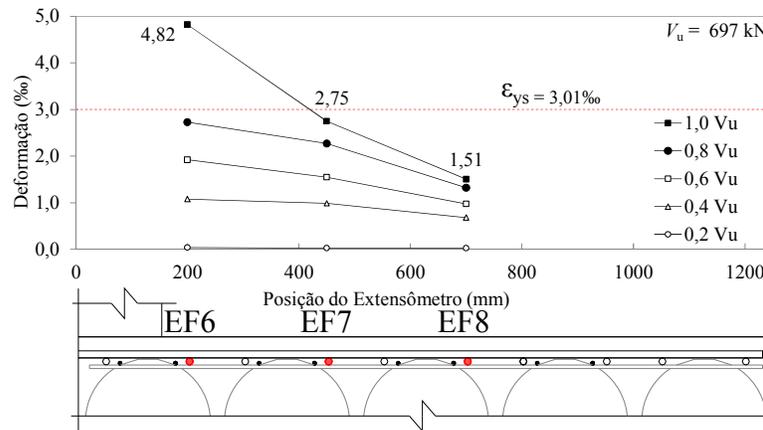


Figura 4.27 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P3, direção O-L

Nas Figuras 4.28 à 4.31 são apresentadas as curvas de carga-deformação nas armaduras de flexão em todas as lajes.

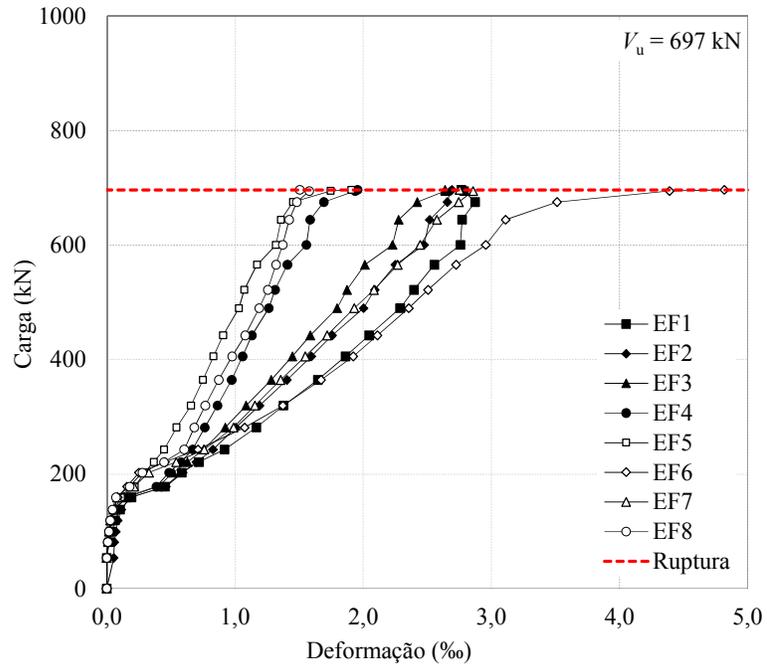


Figura 4.28 - Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP

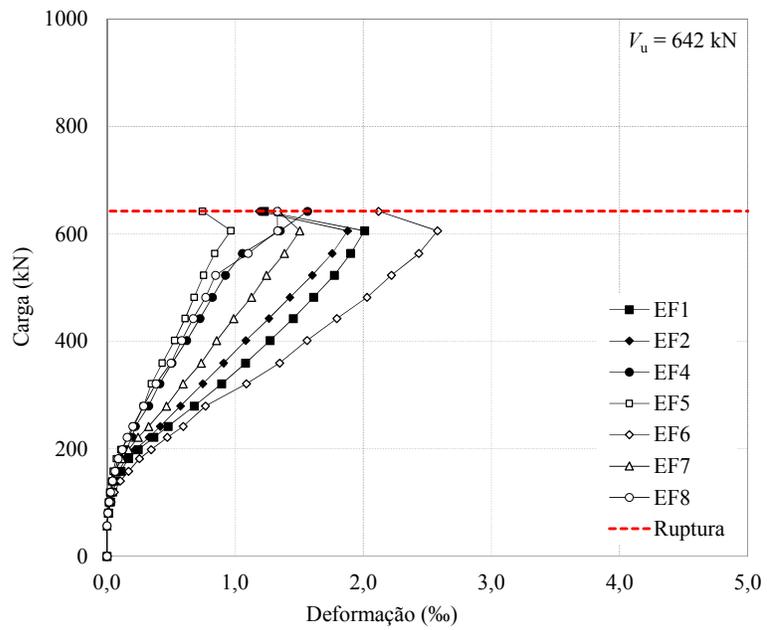


Figura 4.29 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P1

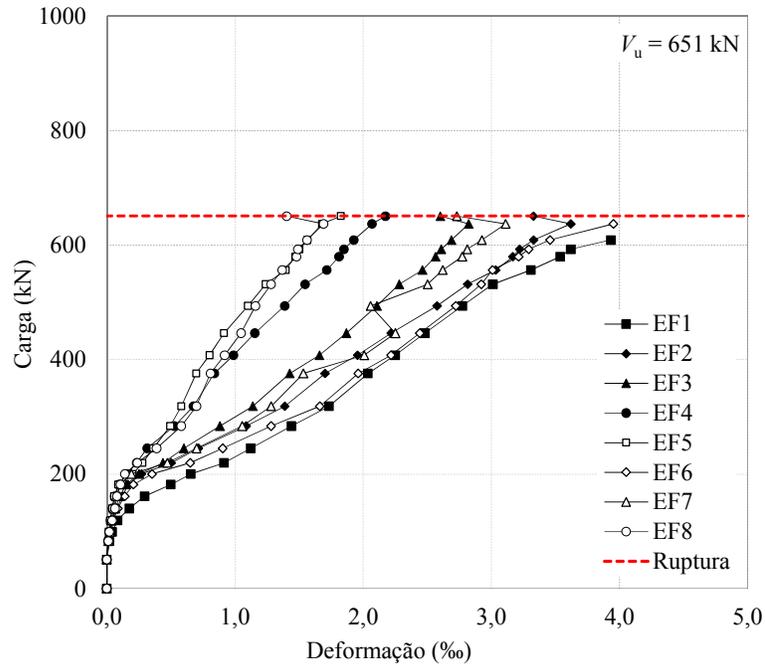


Figura 4.30 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P2

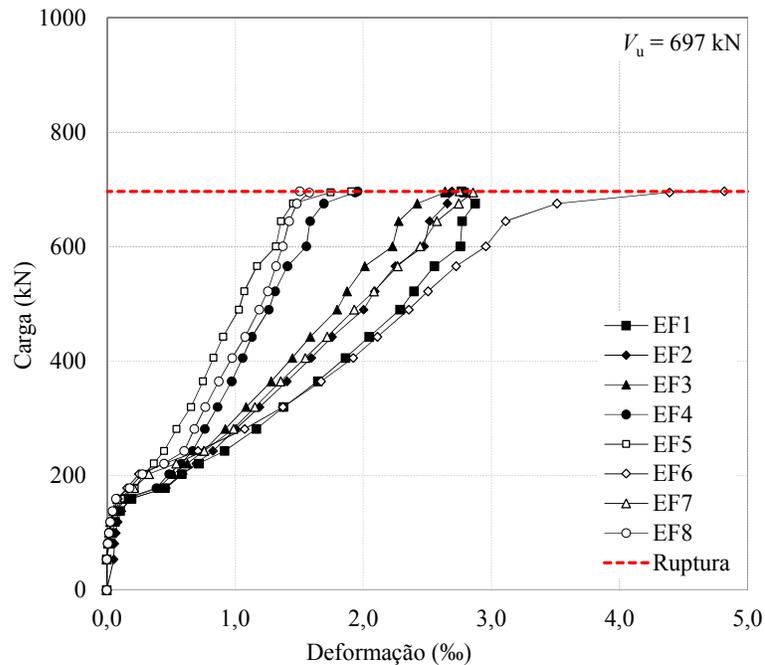


Figura 4.31 - Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28 - P3

Para avaliar o comportamento das barras de flexão no momento da ruptura, foi feito um resumo na Tabela 4.3 onde é possível observar que apenas três barras, das oito instrumentadas, na laje BD28 - P2 e uma barra na laje BD28 - P3 atingiram o patamar de escoamento, ou seja, as lajes romperam antes das armaduras escoarem. Fato que demonstra

que as lajes estão mais suscetíveis à uma ruptura frágil, sem maiores avisos relacionados às deformações, e conseqüentemente, à fissuração.

Tabela 4.3 - Resumo do comportamento das barras de flexão instrumentadas

Laje	Parâmetros de análise	Posição da barra instrumentada							
		Direção S-N					Direção O-L		
		EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
RSP	Dist. até o eixo da laje (mm)	200	300	450	700	950	200	450	700
	Deform. da barra na ruptura	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$
BD28 - P1	Dist. até o eixo da laje (mm)	200	300	450	700	950	200	450	700
	Deform. da barra na ruptura	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$
BD28 - P2	Dist. até o eixo da laje (mm)	200	300	450	700	950	200	450	700
	Deform. da barra na ruptura	$\geq \epsilon_{ys}$	$\geq \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$\geq \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$
BD28 - P3	Dist. até o eixo da laje (mm)	200	300	450	700	950	200	450	700
	Deform. da barra na ruptura	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$\geq \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$	$< \epsilon_{ys}$

4.5. DEFORMAÇÕES DA ARMADURA DE CISALHAMENTO - LAJE BD28 - P3

Para o monitoramento da armadura de cisalhamento da laje BD28 - P3 foi instrumentada uma perna de estribo em cada camada. A Figura 4.32 apresenta as deformações na armadura de cisalhamento em função da posição dos extensômetros. Já a Figura 4.33 apresenta a curva carga-deformação. Vale ressaltar que o extensômetro EE05 foi perdido, não registrando as deformações.

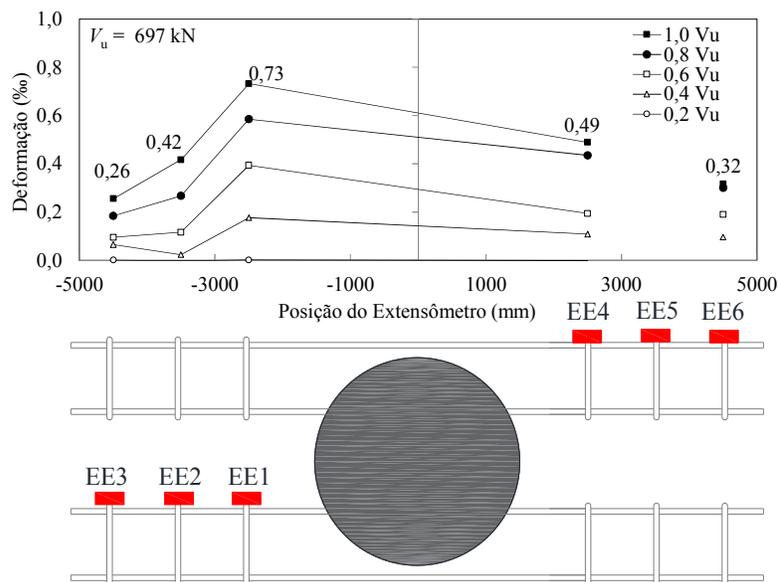


Figura 4.32 - Deformações nas armaduras de cisalhamento

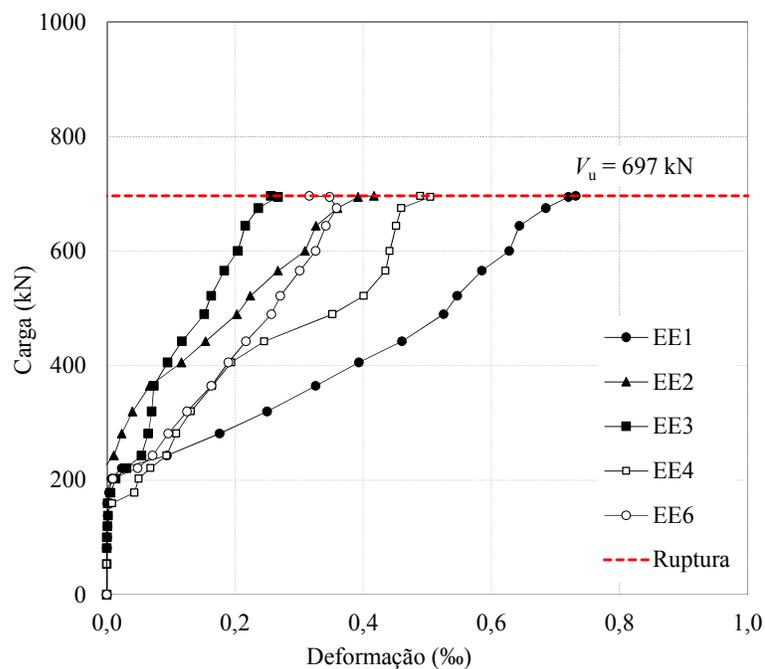


Figura 4.33 - Curva carga-deformação da armadura de cisalhamento

4.6. MAPA DE FISSURAÇÃO

O mapa de fissuração das lajes foi feito com o acompanhamento da abertura das fissuras à medida que o carregamento aumentava. Nas lajes foram marcados, na superfície superior, os pontos de início e fim das fissuras, assim como o respectivo nível de carga. Os mapas de fissuração das lajes são mostrados nas Figuras 4.34 à Figura 4.38.

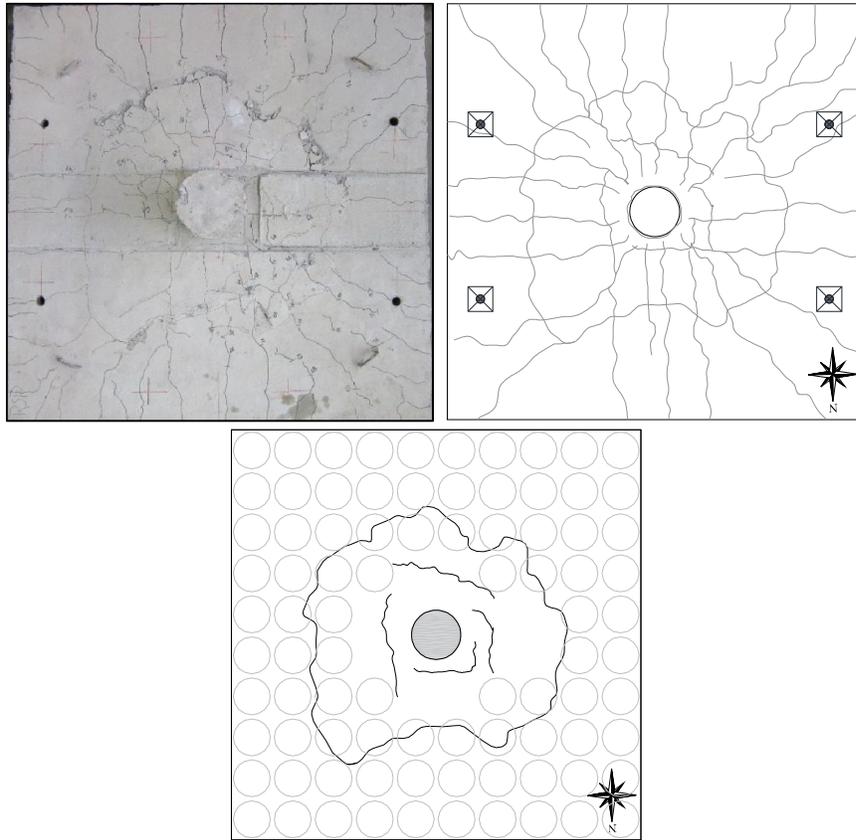


Figura 4.34 - Mapa de fissuração - Laje RSP.

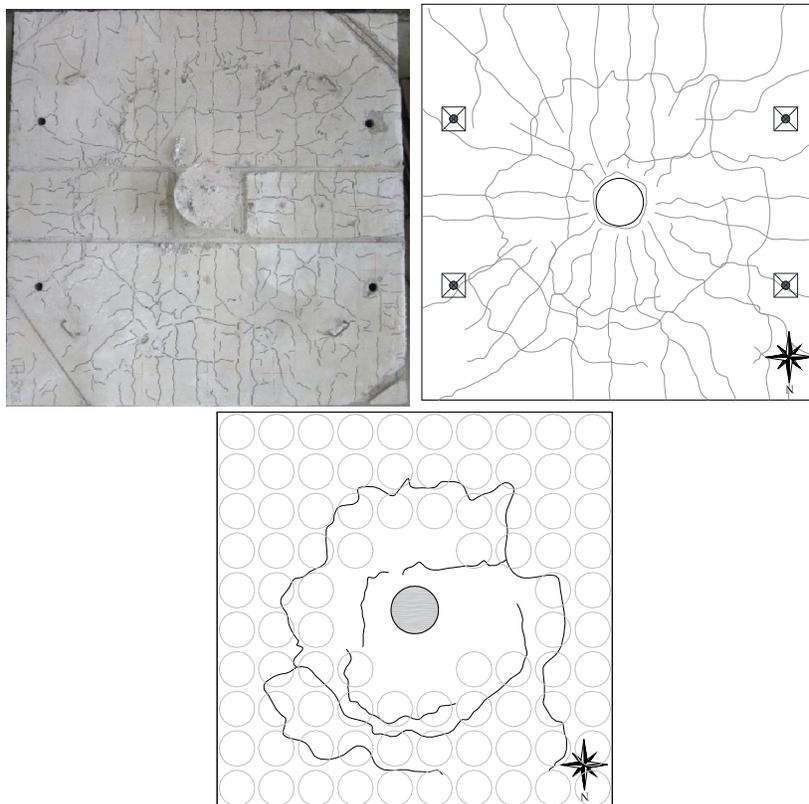


Figura 4.35 - Mapa de fissuração - Laje BD28 - P1

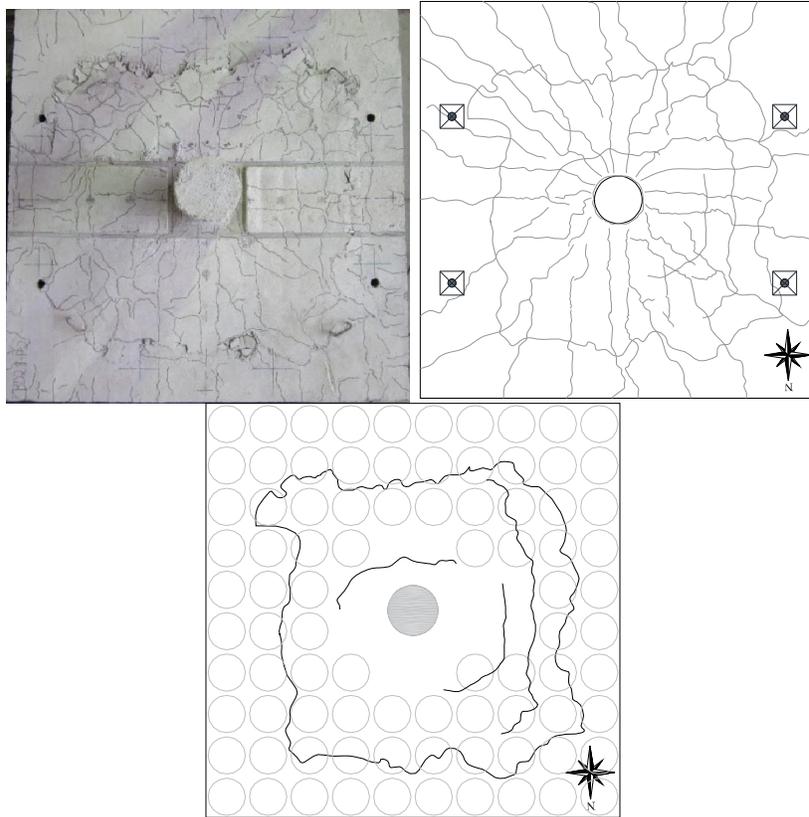


Figura 4.36 - Mapa de fissuração - Laje BD28 - P2

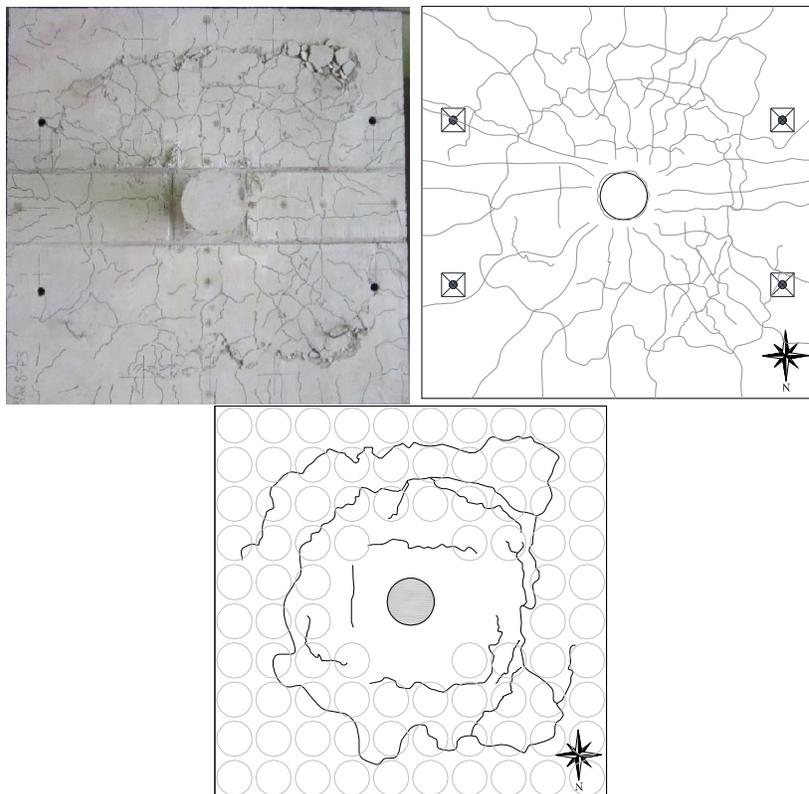


Figura 4.37 - Mapa de fissuração - Laje BD28 - P3

4.7. MODO DE RUPTURA

Por meio de observação do comportamento das lajes durante os ensaios, considerando-se a fissuração, a superfície de ruptura, as deformações no concreto e nas armaduras, e comparando-se com a carga última resistente por flexão, pôde-se determinar o modo de ruptura das lajes.

O critério básico para determinação do modo de ruptura por punção é a observação do tronco de cone de punção na superfície de ruptura, e também pela constatação do não escoamento das barras da armadura de flexão, bem como deformações relativamente baixas da superfície inferior do concreto. Rupturas com essas características podem ser classificadas como rupturas frágeis, ou seja, sem avisos.

A ruptura por flexão se caracteriza por ocorrer de forma mais dúctil que a punção, em que a laje apresenta um ou mais dos seguintes sinais antes da ruína completa: rápida elevação dos deslocamentos para pequenos incrementos de carga; elevado grau de fissuração; escoamento das armaduras de flexão; deformações na armadura inferior da laje próximas à deformação de esmagamento do concreto. Na Tabela 4.4 são apresentados os modos de ruptura das lajes.

Tabela 4.4- Modos de ruptura das lajes

Laje	ϵ_{cu} (‰)	Comportamento à flexão		V_u (kN)	V_{flex} (kN)	V_u / V_{flex}	Posição da superfície de Ruptura	Modo de ruptura
		ϵ_{ys} EF1 (‰)	ϵ_{ys} EF2 (‰)					
RSP	-1,81	2,79	2,92	858	1004	0,85	-	Punção*
BD28 - P1	-0,84	1,90	1,76	642	1058	0,61	-	Punção*
BD28 - P2	-1,52	**	3,33	651	1076	0,60	-	Punção
BD28 - P3	-1,16	2,77	2,69	697	1077	0,65	out	Punção
Obs.:								
ϵ_{cu} é a deformação última na superfície de concreto registrada durante o ensaio;								
* laje em que nenhuma das barras da armadura de flexão atingiu o escoamento								
** a leitura foi perdida durante o ensaio								

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados experimentais, fazendo comparações entre os resultados dos modelos experimentais e os métodos de cálculo das normas estudadas.

5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1.1. Carga de Ruptura

Para todas as lajes foram adotadas as mesmas dimensões e aproximadamente a mesma taxa de armadura de flexão. Na Tabela 5.1 apresentam-se as cargas últimas e a resistência à flexão das lajes, bem como a relação entre a carga última e a resistência à flexão. Observa-se que as lajes tipo *Bubbledeck* atingiram cargas inferiores quando comparadas com a carga de ruptura da laje maciça. As reduções de carga variaram entre 19%, para a laje BD28 - P3, e 25%, para a laje BD28 - P1.

Tabela 5.1 - Cargas de Ruptura

Lajes	ρ	V_{flex}	V_u	V_u/V_{flex}	Redução de carga em relação à laje maciça (%)
	(%)	kN	kN	kN	
RSP	0,41	1004	858	0,85	-
BD28 - P1	0,39	1058	642	0,61	25%
BD28 - P2	0,39	1076	651	0,60	24%
BD28 - P3	0,39	1077	697	0,65	19%

onde:

ρ é a taxa de armadura de flexão adotada;

V_{flex} é a carga estimada de ruptura por flexão;

V_u a carga última atingida durante o ensaio.

As lajes sem armadura de cisalhamento, BD28 - P1 e BD28 - P2, tiveram um comportamento bem semelhante o que evidencia que o sistema construtivo utilizando o pré-moldado ou o módulo, para laje *Bubbledeck*, não interferiu em perdas ou ganhos de resistência.

Observa-se que a laje BD28 - P3 atingiu uma carga de ruptura superior aos outros dois modelos de laje *Bubbledeck*, porém com uma diferença pequena em relação às demais. Em porcentagem, a laje BD28 - P3 foi 7% mais resistente que a BD28 - P2 e cerca de 9% mais resistente que a laje BD28 - P1, esses valores mostram que o ganho não foi tão considerável, tal situação pode estar relacionada com o baixo desempenho da armadura de cisalhamento na laje BD28 - P3. Dois fatores principais contribuíram para que a armadura de cisalhamento não funcionasse de maneira eficiente, o primeiro deles é que, a armadura de cisalhamento foi disposta em apenas uma direção, de acordo com a orientação da *Bubbledeck International*, que sugeriu que os ensaios fossem realizados seguindo o atual padrão de execução em obra desse tipo de armadura. O segundo fator, foi que os estribos que compunham a armadura de cisalhamento, não estavam ancorados nas barras da armadura de flexão, sendo ancorados em barras internas às barras da armadura de flexão, como mostra a Figura 5.1, este fato demonstra que a eficiência da ancoragem dos estribos ficou bastante comprometida, resultando em um baixo ganho de resistência na ligação laje-pilar.

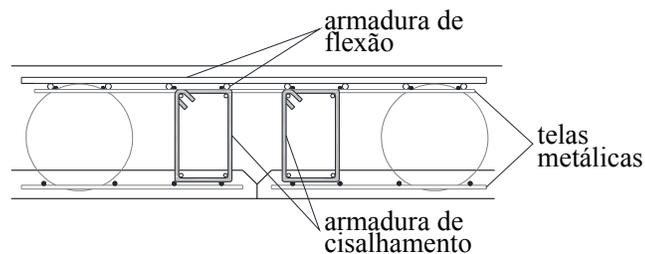


Figura 5.1 - Posicionamento da armadura de cisalhamento, em corte, na laje

Para efeito de comparação entre as lajes *Bubbledeck* e a laje maciça, verifica-se que o coeficiente de redução de 30% da resistência ao cisalhamento proposto pela *Bubbledeck International* é satisfatório, visto que a maior diferença encontrada nos resultados experimentais entre as lajes tipo *Bubbledeck* e a laje maciça foi de 25%, para a laje BD28 - P2.

5.1.2. Deslocamentos verticais

Observou-se que as lajes tiveram um deslocamento inicial similar, até aproximadamente o passo de carga de 200 kN, esse comportamento semelhante se deu pelo fato de ambas terem a mesma taxa de armadura de flexão, uma pequena variação de altura útil e também

está relacionado ao fato de que neste nível de carregamento, com 200 kN, se iniciava o processo de fissuração da ligação laje-pilar.

Ao se comparar a laje BD28 - P1 e a laje BD28 - P2, observou-se que as lajes possuem um deslocamento médio bem semelhante para cada passo de carga, então concluiu-se que o método executivo não interferiu na rigidez do modelo.

A laje BD28 - P3 apresentou deslocamentos ligeiramente maiores, fato associado a o emprego da armadura de cisalhamento. Para análise do efeito que a armadura de cisalhamento impõe nos deslocamentos da laje BD28 - P3, foi observada como a quantidade de armadura de cisalhamento influencia na ductilidade da laje. Verificou-se, então, que o acréscimo da armadura de cisalhamento, com uma quantidade relativamente pequena (A_{sw} igual a 249 mm²), conferiu maior ductilidade para laje, porém não houve um acréscimo considerável em capacidade de carga.

O comportamento mais rígido da RSP já era esperado, devido às lajes *Bubbledeck* apresentarem considerável quantidade de vazios, que visivelmente alteraram a rigidez da ligação e, conseqüentemente, do pavimento construído.

Na laje BD28 - P3 foi observado que os deslocamentos na direção Leste foram superiores aos da direção Oeste, mesmo com carregamento simétrico e mesmo nível de carga e este comportamento também foi observado na laje BD28 - P2 com deslocamento superior na direção Sul em relação a Norte. Esse comportamento está relacionado às folgas no travamento superior dos pilares durante a montagem do ensaio.

5.1.3. Deformações na superfície do concreto

Pôde-se observar com os resultados das deformações nas superfícies do concreto que até o surgimento da primeira fissura de flexão, geralmente em uma faixa compreendida entre 150 kN e 200 kN, as deformações em ambas direções dos extensômetros encontravam-se em estado similar. Porém, após essa fase inicial, as deformações desenvolveram-se em proporções diferentes, sendo que os valores mais elevados foram observados nas deformações tangenciais.

As maiores deformações tangenciais foram observadas na laje BD 28 - P2 e laje BD28 - P3, com valores em máximos de 1,52% e 1,16% respectivamente. A laje

BD28 - P1, conseqüentemente tem a menor deformação tangencial, no valor de 0,84‰. A laje maciça RSP apresentou deformação tangencial máxima de 1,81‰. Foi observado um alívio nas deformações radiais das lajes próximo à carga de ruptura, nos últimos passos de carga. Foram observadas deformações de tração apenas na laje BD28 - P2 e na laje de referência RSP, com valores máximos de 0,74‰ (extensômetros EC04) e 0,11‰ (extensômetro EC03) respectivamente.

O posicionamento não uniforme dos extensômetros nas lajes BD28 - P2 e BD28 - P3 se deve ao acabamento da superfície inferior da laje após a concretagem final, visto que elas possuem pré-laje e no encontro dessas pré-lajes (quatro por laje) ocorreu um afastamento das faces das pré-lajes quando as mesmas foram posicionadas para a concretagem, conforme apresenta a Figura 5.2.



Figura 5.2 - Junção das pré-lajes no modelo BD28 - P3

5.1.4. Deformações na armadura de flexão

Ao se analisar as Figuras 4.20 à 4.27 verifica-se que, para um mesmo nível de carregamento, com o aumento da distância do extensômetro em relação à face do pilar as deformações medidas na armadura de flexão decrescem. Na laje com armadura de cisalhamento, BD28 - P3, apenas um extensômetro próximo à face do pilar (EF 06) atingiu deformação superior à deformação de escoamento, chegando a um valor de 4,82‰. No modelo BD28 - P2 três extensômetros atingiram deformação superior à deformação de escoamento, o extensômetro EF1 antes da ruptura ($0,94 \cdot V_u$) atingiu 3,93‰ de deformação (após essa deformação o mesmo deixou de registrar deformações) e o extensômetro EF2 atingiu 3,33‰ de deformação ao chegar na carga de ruptura.

5.1.5. Deformações na armadura de cisalhamento

As maiores deformações medidas nas armaduras de cisalhamento foram medidas nos estribos mais próximos do pilar (EF1 e EF3).

Ao se observar a Figura 4.32 pode-se afirmar que a armadura de cisalhamento passou a ser solicitada a partir do valor de carga de 200 kN, abaixo deste valor as deformações para todos os extensômetros são aproximadamente iguais a zero. Todos os extensômetros apresentaram deformação relativamente baixas.

5.1.6. Mapa de fissuração

O carregamento nas lajes foi aplicado com passos de carga de 4 t e, após cada passo, era dado um intervalo para aquisição dos dados das deformações do aço e do concreto e também para o acompanhamento da fissuração da laje. Foi observado que as primeiras fissuras que surgiram foram de flexão em torno do pilar, essas fissuras surgiram circundando praticamente todo o pilar devido a aplicação simétrica do carregamento e consequente distribuição uniforme dos esforços, com cargas em torno de 15% da carga última.

Com o avanço do carregamento das lajes surgiram novas fissuras, essas agora radiais. Elas apareceram com um carregamento em torno de 25% a 35% da carga de ruptura de cada laje, elas irrompiam da face pilar e atingiram as bordas das lajes. Com essas fissuras radiais surgiram novas, que atingiram ou não a borda das lajes.

Após o surgimento dessas fissuras houve um período em que não surgiram novas fissuras radiais, e as existentes apenas aumentavam de tamanho. Com certo carregamento surgiram uma ou duas camadas de fissuras tangenciais, entre as fissuras radiais, sendo que a segunda camada surgia já bem próxima da carga de ruptura.

Na laje BD28 - P3 foi observado um número maior de fissuras tangenciais e radiais, isso se explica devido a uma maior ductilidade da laje, ductilidade essa, conferida por conta do uso da armadura de cisalhamento.

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

Para a determinação da resistência ao cisalhamento para as lajes tipo *Bubbledeck* foi adotada uma adaptação na determinação da área de concreto a ser considerada na seção do perímetro crítico.

Para descontar os vazios deixados pelas esferas plásticas ao se definir o perímetro crítico, adotou-se a Equação 5.1 para a zona de concreto da seção do perímetro crítico. A Figura 5.3 detalha o modelo de cálculo proposto pela equação abaixo.

$$A_{c,ef} = u \cdot d - \sum c_{arc} \cdot d_e \quad \text{Equação 5.1}$$

onde

$A_{c,ef}$ é a área de concreto efetiva na seção do perímetro crítico;

u é o perímetro crítico;

d é a 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;

d_e é o diâmetro da esfera.

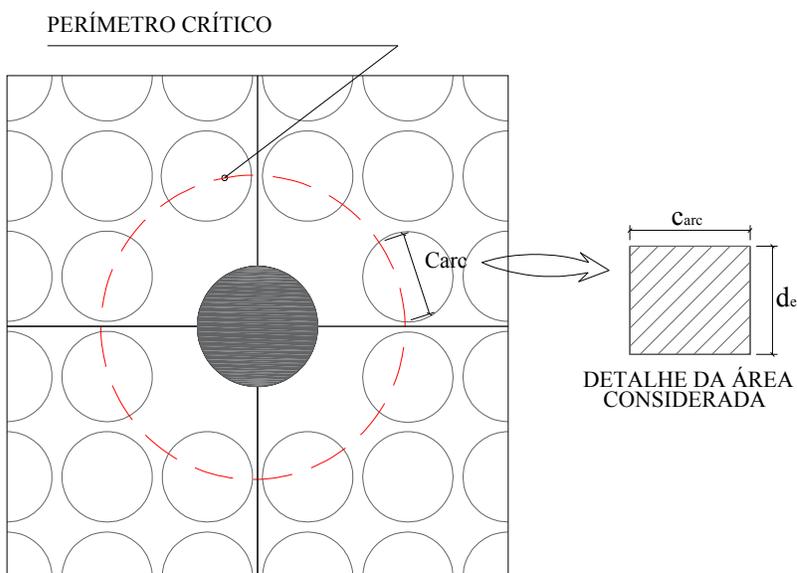


Figura 5.3 - Detalhe do comprimento de arco que o perímetro crítico corta a esfera

Como exemplo desse desconto de vazios, a Equação 5.2 demonstra como ficou o cálculo da resistência ao cisalhamento para lajes sem armadura de cisalhamento adaptadas para lajes tipo *Bubbledeck* para o ACI 318 (2011) e a Equação 5.3 demonstra como ficou para o Eurocode 2 (2010) e para a NBR 6118 (2014).

$$V_{R,out} = 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot (u_{out} \cdot d - \sum c_{arc} \cdot d_e) \quad \text{Equação 5.2}$$

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot (A_{C,ef}) \quad \text{Equação 5.3}$$

5.3. ANÁLISE DAS EXPRESSÕES NORMATIVAS

5.3.1. Perímetros críticos u_{out} adotados

O perímetro crítico fora da zona com armadura de cisalhamento, u_{out} , foi tomado de forma diferente para cada uma das normas, descontando os vazios deixados pelas esferas. Na Figura 5.4 à Figura 5.6 está demonstrado o perímetro considerado nessa situação para cada norma.

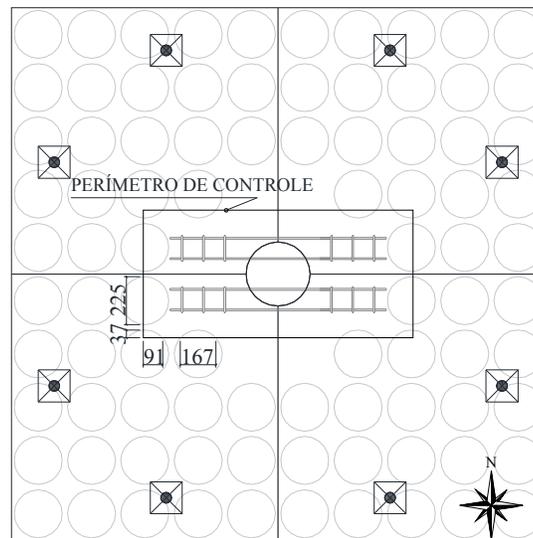


Figura 5.4 - Perímetro de controle u_{out} - ACI 318 (2011)

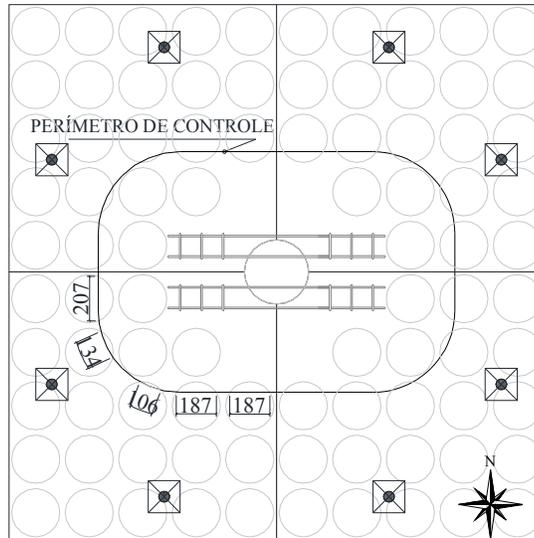


Figura 5.5 - Perímetro de controle u_{out} - Eurocode 2 (2010)

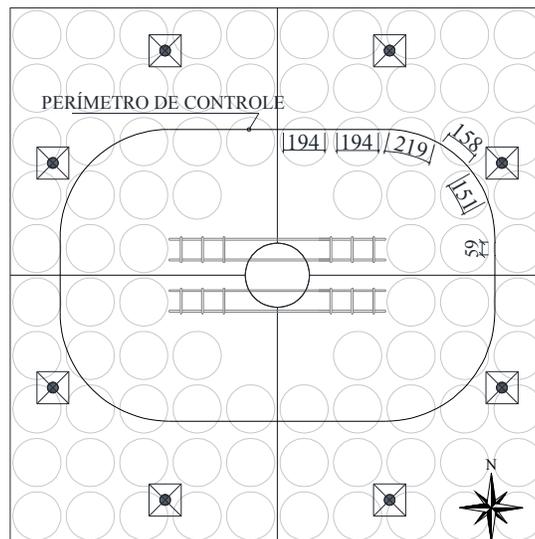


Figura 5.6 - Perímetro de controle u_{out} - NBR 6118 (2014)

5.3.2. Análise dos resultados normativos encontrados

Inicialmente, vale ressaltar que os *guiders* ou treliças de içamento foram desconsiderados no cálculo da armadura de cisalhamento.

As comparações entre as cargas obtidas experimentalmente e as estimadas pelas normas estão descritas da Tabela 5.2 até a Tabela 5.4. As normas estudadas não tratam da verificação ao cisalhamento para as lajes tipo *Bubbledeck*, foram então sugeridas alterações na determinação do perímetro de controle, já descritas no Capítulo 5.4. A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos resultados das previsões normativas.

Tabela 5.2 - Cargas de ruptura previstas pelo ACI 318 (2011)

Modelos	V_u (kN)	$V_{R,Asw}$ (kN)	$V_u/V_{R,ASW}$	$V_{R,out}$ (kN)	$V_u/V_{R,out}$	$V_{R,max}$ (kN)	$V_u/V_{R,max}$	V_{ACI} (kN)	V_u/V_{ACI}	Méd.	C.V.
RSP	858	-	-	-	-	1847	0,46	924	0,93	0,87	0,34
BD28 - P1	642	-	-	-	-	1992	0,32	996	0,64		
BD28 - P2	651	-	-	-	-	2043	0,32	1021	0,64		
BD28 - P3	697	1058	0,66	555	1,26	2045	0,34	555	1,26		

Tabela 5.3 - Cargas de ruptura previstas pelo Eurocode 2 (2010)

Modelos	V_u (kN)	$V_{R,Asw}$ (kN)	$V_u/V_{R,ASW}$	$V_{R,out}$ (kN)	$V_u/V_{R,out}$	$V_{R,max}$ (kN)	$V_u/V_{R,max}$	V_{EC02} (kN)	V_u/V_{EC02}	Méd.	C.V.
RSP	858	-	-	-	-	2592	0,33	870	0,99	1,19	0,19
BD28 - P1	642	-	-	-	-	2730	0,24	560	1,15		
BD28 - P2	651	-	-	-	-	2778	0,23	583	1,12		
BD28 - P3	697	928	0,75	462	1,51	2781	0,25	462	1,51		

Tabela 5.4 - Cargas de ruptura previstas pela NBR 6118 (2014)

Modelos	V_u (kN)	$V_{R,Asw}$ (kN)	$V_u/V_{R,ASW}$	$V_{R,out}$ (kN)	$V_u/V_{R,out}$	$V_{R,max}$ (kN)	$V_u/V_{R,max}$	V_{NBR} (kN)	V_u/V_{NBR}	Méd.	C.V.
RSP	858	-	-	-	-	2333	0,37	870	0,99	1,12	0,09
BD28 - P1	642	-	-	-	-	2457	0,26	560	1,15		
BD28 - P2	651	-	-	-	-	2501	0,26	583	1,12		
BD28 - P3	697	823	0,85	565	1,23	2502	0,28	565	1,23		

Tabela 5.5 - Resumo das previsões normativas

Modelos	Modo de Ruptura	ACI 318:2011		EUROCODE 2:2010		NBR 6118:2014	
		V_u/V_{ACI}	Ruptura	V_u/V_{EC02}	Ruptura	V_u/V_{NBR}	Ruptura
RSP	-	0,93	-	0,99	-	0,99	-
BD28 - P1	-	0,64	-	1,15	-	1,15	-
BD28 - P2	-	0,64	-	1,12	-	1,12	-
BD28 - P3	<i>out</i>	1,26	<i>out</i>	1,51	<i>out</i>	1,23	<i>out</i>
	MÉDIA	0,87		1,19		1,12	

Verificou-se que a determinação da resistência das lajes está diretamente relacionada com tamanho do maciço de concreto em redor do pilar e com a dependência do perímetro de controle cruzar este maciço ou não. Para lajes do tipo *Bubbledeck* caso o perímetro de controle cruze apenas a zona de maciço, a determinação da resistência gera valores altos, acima da carga real de ruptura, já caso esse perímetro passe na região com as esferas a

resistência determinada fica mais próxima da resistência real, desde que e a devida redução de seção por conta dos vazios deixados pelas esferas seja feita.

Ao se analisar os resultados obtidos das estimativas do ACI 318 (2011) verifica-se os valores encontrados tendem a superestimar a resistência ao cisalhamento das lajes. Isso se deve ao fato de pela norma o perímetro de controle adotado, $0,5 \cdot d$, estar limitado à zona de maciço do concreto, não passando pelas esferas, o que acaba por desconsiderar os vazios deixados pelas mesmas.

O Eurocode 2 (2010) e a NBR 6118 (2014) obtiveram resultados iguais na estimativa das cargas de ruptura, $V_{R, Norma}$, visto que a parcela do *size effect* calculada para as lajes é a mesma para as duas normas, variando apenas o valor da resistência efetiva da armadura de cisalhamento, $V_{R, Asw}$, e a resistência $V_{R, out}$, pois os valores para a resistência do aço da armadura de cisalhamento e os valor do perímetro de controle, u_{out} , são determinados de maneira diferente em cada norma. A NBR 6118 (2014) e o Eurocode 2 (2010) mostraram ser satisfatórios para determinação da carga última das lajes, estando a favor da segurança, apresentado média para a relação $V_u / V_{R, Norma}$ de 1,12 e 1,19, respectivamente.

Para a previsão da superfície de ruptura as normas mostraram-se eficazes para o modelo BD28 - P3, em que a laje teve modo de ruptura *out*. Na Figura 5.7 é apresentado, graficamente, a relação entre as cargas experimentais e as previstas pelas normas.

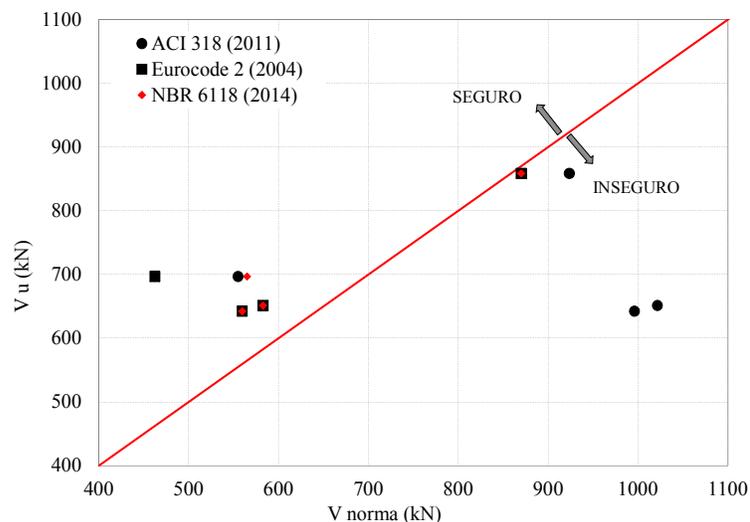


Figura 5.7 - Comparação entre a carga última experimental e a estimada pelas normas

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

6.1.1. Programa experimental

6.1.1.1. Cargas últimas e modo de ruptura

Foram ensaiados três sistemas construtivos de laje *Bubbledeck* e com a análise de suas cargas últimas pôde-se concluir que os sistemas funcionam de forma similar, validando essa técnica construtiva. Observa-se que o modelo BD28 - P1 e o BD28 - P2 se comportam de forma bastante semelhante, evidenciando que o processo executivo não interferiu na resistência à punção da laje. Já a laje com armadura de cisalhamento BD 28 - P3, atingiu a carga última um pouco superior que as outras duas lajes *Bubbledeck*, o baixo desempenho da armadura de cisalhamento no aumento da capacidade de carga da ligação laje-pilar, pode estar relacionado com o tipo de armadura de cisalhamento e a sua forma de execução.

Com a observação da formação do tronco de cone, a avaliação das cargas de ruptura experimentais e as cargas estimadas para ruptura por flexão, pôde-se determinar o tipo de ruptura da laje, com os critérios citados e ordenados em grau de relevância. Todas as lajes romperam por punção, baseado nesses critérios.

6.1.1.2. Deslocamentos verticais

Analisando os resultados dos deslocamentos, pode-se afirmar que a distribuição e quantidade dos LVDT's utilizados atendeu às expectativas e, seu posicionamento na face superior da laje, permitiu registrar os deslocamentos até a ruptura.

Comparando-se as lajes BD28 - P1 e BD28 - P2, quanto aos deslocamentos verticais, concluiu-se que o sistema construtivo não interferiu na rigidez da laje, pois ambas possuem um deslocamento médio bem semelhante para cada passo de carga. Verificou-se também, que os vazios presentes nas lajes *Bubbledeck* alteraram a rigidez da ligação laje-pilar, pois ao se comparar os deslocamentos das mesmas com os deslocamentos da laje maciça, constatou-se que a maciça se comporta de forma mais rígida, conforme o esperado.

O sistema de travamento dos pilares apresentou folgas no travamento superior durante a montagem do ensaio, o que acarretou em uma rotação das lajes BD28 - P3, sentido Oeste - Leste, e na laje BD28 - P2, sentido Norte - Sul.

6.1.1.3. Deformações na superfície do concreto

O posicionamento não uniforme dos extensômetros nas lajes BD28 – P2 e BD28 – P3 ocorreu por conta da junta formada na ligação entre os painéis de pré-laje, porém as deformações lidas foram satisfatórias para o estudo.

As deformações na superfície do concreto surgiam com o aparecimento da primeira fissura de flexão, geralmente em uma faixa compreendida entre 150 kN e 200 kN, sendo que as deformações em ambas direções dos extensômetros encontravam-se em estado similar. Porém, após essa fase inicial, as deformações desenvolveram-se em proporções diferentes, sendo que os valores mais elevados foram observados nas deformações tangenciais.

6.1.1.4. Deformações na armadura de flexão

Comparando-se os pontos monitorados da armadura de flexão para todas as lajes, verificou-se que as armaduras com maiores deformações estavam localizadas mais próximas à face do pilar. Em alguns casos deformações consideradas elevadas também foram medidas nos extensômetros adjacentes, afastados 150 mm da face do pilar. De um modo geral, pode-se afirmar que a quantidade de barras instrumentadas e a disposição das mesmas nas lajes atente satisfatoriamente ao estudo, pois forneceu uma boa noção do nível de tensão nestas armaduras ao longo da laje.

Como o modo de ruptura das lajes foi por punção, de forma frágil e sem maiores avisos, as armaduras de flexão apresentaram deformações relativamente baixas, pois esse tipo de ruptura ocorre antes do escoamento dessas armaduras.

6.1.1.5. Deformações na armadura de cisalhamento

As maiores deformações na armadura de cisalhamento foram medidas nos extensômetros mais próximos à face do pilar. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o uso de

armadura de cisalhamento adotado não propiciou maior capacidade de carga última à laje, visto que a carga de ruptura da laje BD28 – P3 é bem similar à carga dos outros dois modelos de laje *Bubbledeck*. Concluiu-se que a eficiência da ancoragem dos estribos ficou bastante comprometida, resultando em um baixo ganho de resistência na ligação laje-pilar visto que os estribos que compunham a armadura de cisalhamento, não estavam ancorados nas barras da armadura de flexão, sendo ancorados em barras internas às barras da armadura de flexão. Outro fator que contribuiu para que a armadura de cisalhamento não funcionasse de maneira eficiente, foi que a armadura de cisalhamento foi disposta em apenas uma direção, seguindo orientação da *Bubbledeck International*.

Mesmo não aumentando de forma eficiente a capacidade resistente da ligação laje-pilar, observou-se que a armadura de cisalhamento aumentou a ductilidade da ligação, visto que a laje apresentou maiores deslocamentos e maior nível de fissuração em relação às lajes sem armadura de cisalhamento.

6.1.2. Análise das expressões normativas

As normas analisadas não têm prescrições para as lajes tipo *Bubbledeck*, foi então proposta uma adaptação para atender o estudo. Com base nos dados experimentais verifica-se que as adaptações feitas para método de cálculo das normas NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2010) apresentaram resultados satisfatórios para obtenção da resistência à punção das lajes.

Já a adaptação feita para método de cálculo da norma ACI 318 (2011) não apresentou resultados satisfatórios para os modelos *Bubbledeck*, visto que o perímetro de controle adotado para estimar a resistência ao cisalhamento não passa pela região que contém as esferas, somente pela região do maciço, induzindo a adotar resultados acima da carga última para esse tipo de laje, considerando a laje como uma laje convencional sem a presença dos vazios. Pode-se então prever, para trabalhos futuros, uma nova forma de estimar o perímetro crítico para o ACI 318 (2011) propondo uma verificação dentro do maciço e outra verificação na primeira e segunda camadas de esferas, e assim, adotar o menor valor, para então se determinar a resistência.

Quanto à previsão do tipo de ruptura, todas as normas foram satisfatórias.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de orientar pesquisas futuras sobre o assunto tratado aqui, neste capítulo são propostas algumas recomendações. São elas:

- 1- Variar o tipo de armadura de cisalhamento adotada, identificando a influência da sua disposição e quantidade na resistência da laje. Pode-se aumentar gradativamente a camada de armadura de cisalhamento para que se possa testar as formas de determinação do perímetro de controle externo;
- 2- Executar nova série de ensaios com armadura de cisalhamento tipo estribo ancorando-os na armadura de flexão, pois para que a armadura de cisalhamento seja considerada eficiente do ponto de vista técnico, é necessário que esta esteja bem ancorada, aumentando assim a capacidade resistente das barras que compõem a armadura de cisalhamento;
- 3- Realizar uma análise numérica das lajes ensaiadas por meio do método dos elementos finitos;
- 4- Aplicar carregamentos desbalanceados nas lajes para avaliar como elas se comportam sob essa solicitação;
- 5- Melhorar o sistema de ensaio, garantindo que a aplicação e o controle do carregamento sejam feitos de forma precisa a cada passo de carga e principalmente da carga de ruptura;
- 6- Variar a região do maciço na ligação da laje-pilar, para que se possa verificar de forma mais precisa a influência dos vazios deixados pelas esferas na resistência ao cisalhamento;
- 7- Realizar novos ensaios variando-se fatores como: geometria do pilar, altura e dimensões da laje, taxa de armadura de flexão adotada, espaçamento entre as esferas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318 - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-11) and Commentary (ACI 318RM-11)*. Farmington Hills, 2011.

ALBUQUERQUE, N. G. *Análise Experimental de Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com Região Maciça de Geometria Variável ao Puncionamento*. Belém. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 2009, 190p.

ALDEJOHANN, M. *Zum Querkrafttragverhalten von Hohlkörperdecken mit zweiachsiger Lastabtragung*. Doktor-Ingenieurs, Universität Duisburg-Essen, Alemanha, 2008, 185 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - *Projeto de estruturas de concreto - procedimentos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2014, 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2007 - *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 - *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2011, 5 p.

BUBBLEDECK BRASIL, disponível em <<http://www.bubbledeck.com.br>>, Acesso em: 19 de maio de 2014.

CARVALHO, R. C., PINHEIRO, L. M., *Cálculos e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: volume 2*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.

DIN 1045-1, *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, Fassung, Juli 2008, 183 p.

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

FERREIRA, M., P., *Punção em lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento e momentos desbalanceados*. Tese de doutorado em Estruturas e Construção

Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2010, 275 p.

GUANDALINI, S., *Poinçonnement Symétrique des dalles en béton armé*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2006, 257p.

GUANDALINI, S.; BURDET, O. L. e MUTTONI, A., *Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios*. ACI Structural Journal, January-February 2009. Nº 106-S10.

GUDMAND-HØYER, T., *Note on the moment capacity in a Bubble deck*. PhD Notes, Technical University of Denmark, Denmark, 2003, 36 p.

HELD, M., PFEFFER, K., *Punching behavior of biaxial hollow slabs*. Cement & Concrete Composites Journal, No. 24, Institute for Concrete Structures and Materials, Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany, 2002.

LAI, T., *Structural behavior of bubbledeck slabs and their application to livetweight bridge decks*. Msc-Thesis, Massachusetts Institute of Tecnology, Cambridge, USA, 2010. 41 p.

MELO, G. S. S. A., *Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure*. PhD Thesis, Polytechnic of Central London, London, England, 1990, 214p.

Model Code CEB-FIP 2010, *New Model Code*. 2010, 653p.

MUTTONI, A., *Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement*, ACI Structural Journal, vol. 105, No. 4, 2008, pp. 440-450.

OLIVEIRA, M. H. *Punção em Lajes Lisas com Armadura de Cisalhamento Submetidas a Carregamento Excêntrico e Apoiadas sobre Pilares Retangulares*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD - 02 A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013, 223 p.

SOUZA, S. S. M. *Análise Experimental de Lajes lisas Nervuradas de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento*. Dissertação. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 2007. 181p.

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

WOOD, J. G. M. *Pipers Row Car Park - Wolverhampton Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997*.

APÊNDICES

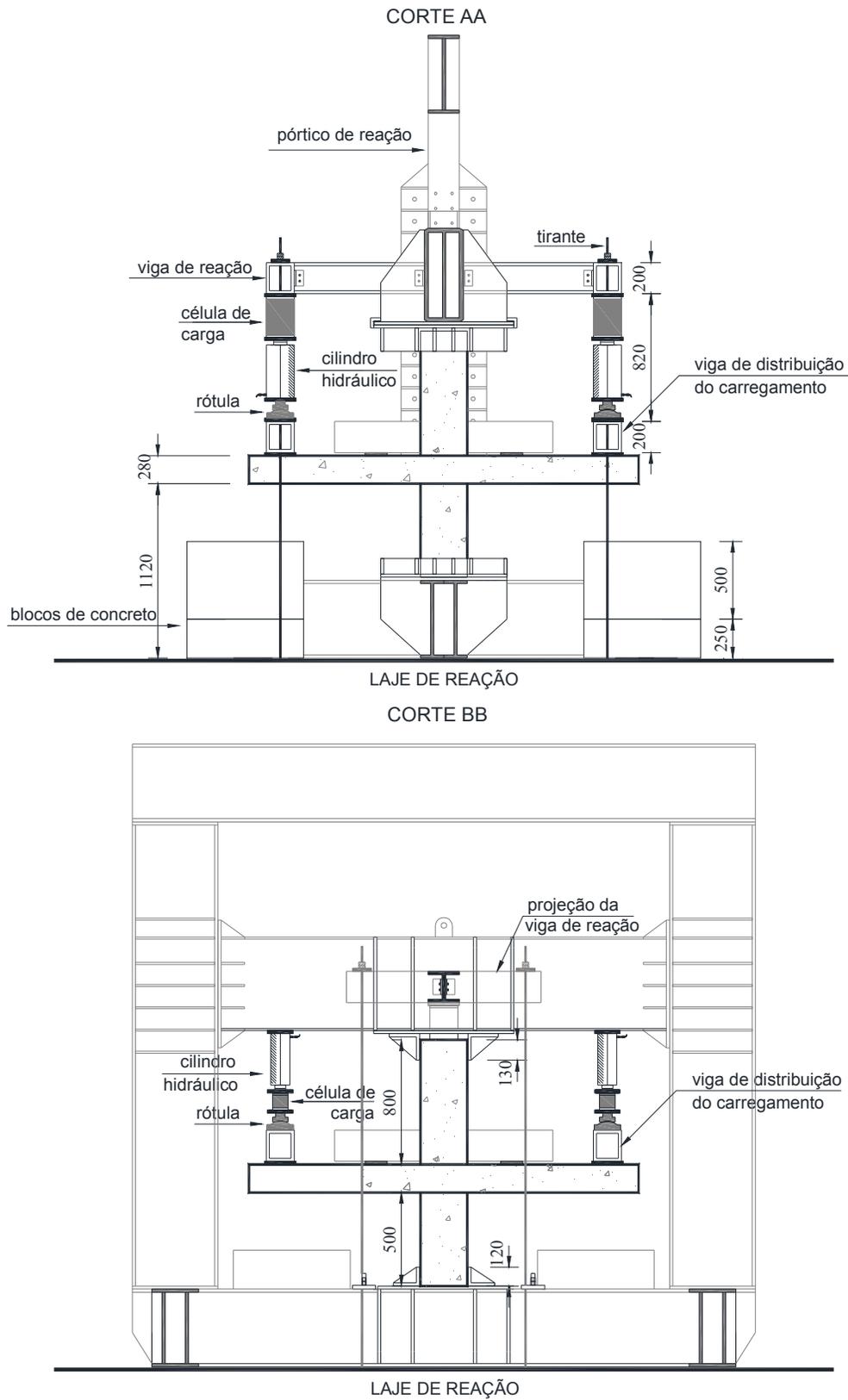


Figura A.2 - Cortes do pórtico de ensaio, adaptado de Ferreira (2010)

B. LEITURAS REGISTRADAS NOS ENSAIOS

B.1 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS

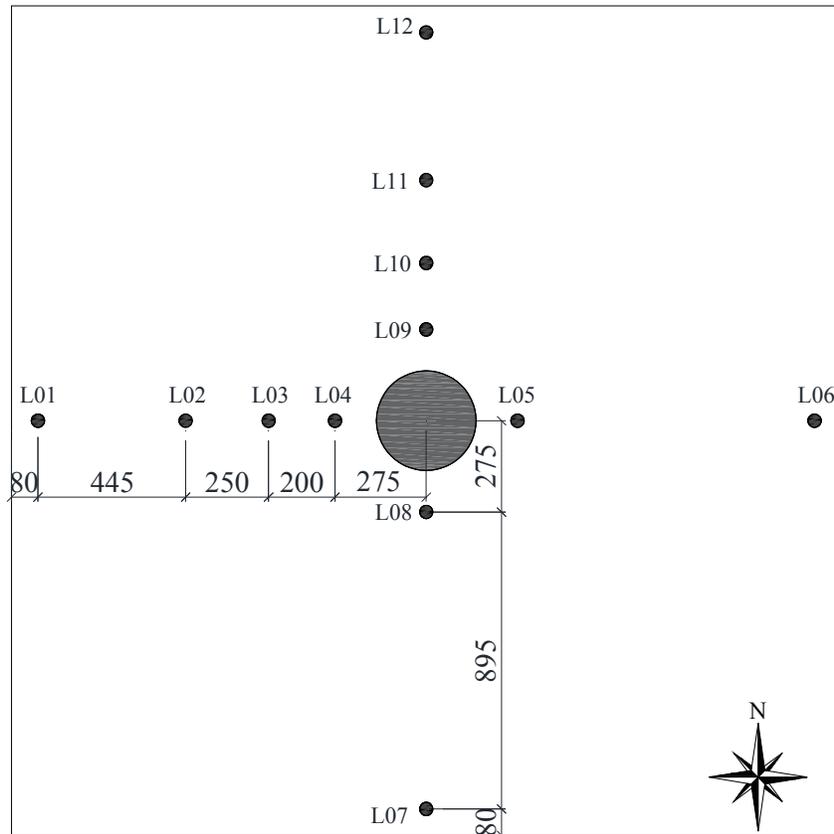


Figura B.1 - Posicionamento dos LVDT's nas lajes (medidas em mm)

Tabela B.1 - Laje RSP

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06	LVDT07	LVDT08	LVDT09	LVDT10	LVDT11	LVDT12
		mm											
1	76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	0,00	0,00	0,00
2	94	0,03	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	-0,26	-0,02	-0,07	-0,10	-0,06	-0,05	-0,02
3	117	-0,13	-0,13	-0,13	-0,10	-0,01	-0,32	-0,03	-0,16	-0,19	-0,16	-0,13	-0,12
4	132	-0,15	-0,15	-0,18	-0,15	-0,01	-0,46	-0,05	-0,24	-0,27	-0,23	-0,18	-0,15
5	154	-0,32	-0,28	-0,29	-0,25	-0,01	-0,60	-0,06	-0,34	-0,37	-0,34	-0,26	-0,23
6	172	-0,75	-0,36	-0,37	-0,30	-0,01	-0,78	-0,07	-0,42	-0,46	-0,43	-0,32	-0,29
7	193	-0,81	-0,41	-0,43	-0,36	-0,01	-1,00	-0,10	-0,53	-0,55	-0,52	-0,39	-0,35
8	212	-0,95	-0,50	-0,53	-0,44	-0,02	-1,15	-0,13	-0,62	-0,64	-0,62	-0,47	-0,44
9	232	-1,13	-0,62	-0,63	-0,52	-0,02	-1,25	-0,13	-0,71	-0,73	-0,72	-0,55	-0,53
10	267	-1,15	-0,67	-0,68	-0,59	-0,03	-1,74	-0,13	-0,81	-0,87	-0,89	-0,71	-0,74
11	291	-1,34	-0,81	-0,80	-0,66	-0,04	-2,28	-0,12	-0,98	-0,99	-1,03	-0,82	-0,87
12	329	-1,59	-0,97	-0,98	-0,76	-0,06	-2,83	-0,10	-1,15	-1,14	-1,22	-0,98	-1,08
13	383	-2,09	-1,12	-1,11	-0,88	-0,09	-4,21	-0,34	-1,38	-1,36	-1,51	-1,27	-1,46
14	412	-2,72	-1,48	-1,39	-0,99	-0,09	-4,58	-0,96	-1,53	-1,52	-1,73	-1,48	-1,73
15	446	-3,24	-1,80	-1,62	-1,12	-0,10	-4,88	-1,51	-1,66	-1,66	-1,92	-1,68	-1,95
16	495	-3,68	-2,62	-1,82	-1,23	-0,12	-5,91	-2,30	-1,83	-1,88	-2,23	-1,99	-2,35
17	529	-4,15	-2,88	-2,02	-1,32	-0,14	-6,55	-3,07	-1,98	-2,03	-2,45	-2,20	-2,60
18	584	-5,48	-3,66	-2,54	-1,54	-0,15	-7,05	-4,05	-2,18	-2,23	-2,75	-2,50	-2,96
19	616	-5,71	-3,71	-2,58	-1,56	-0,18	-7,96	-4,68	-2,28	-2,41	-3,03	-2,78	-3,30
20	650	-6,25	-3,97	-2,76	-1,60	-0,19	-8,56	-5,77	-2,39	-2,51	-3,16	-2,90	-3,43
21	695	-6,85	-4,35	-3,03	-1,68	-0,20	-9,35	-6,64	-2,51	-2,67	-3,42	-3,17	-3,75
22	738	-7,54	-4,77	-3,30	-1,77	-0,21	-9,94	-7,64	-2,63	-2,81	-3,56	-3,38	-3,99
23	777	-8,37	-5,29	-3,64	-1,87	-0,22	-10,81	-8,56	-2,73	-3,00	-3,77	-3,83	-4,51
24	824	-9,07	-5,75	-3,94	-1,94	-0,23	-11,83	-9,48	-2,82	-3,07	-3,97	-4,18	-4,93
25	858	-9,78	-6,30	-4,34	-2,00	-0,26	-13,17	-11,01	-2,88	-3,18	-4,18	-4,57	-5,31

Tabela B.2 - Laje BD28 - P1

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06	LVDT07	LVDT08	LVDT09	LVDT10	LVDT11	LVDT12
		mm											
1	57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	81	-0,05	-0,11	-0,10	0,01	-0,10	-0,08	-0,26	-0,13	-0,12	-0,08	-0,06	-0,03
3	101	-0,07	-0,13	-0,18	0,02	-0,28	-0,46	-0,44	-0,30	-0,30	-0,41	-0,15	-0,10
4	119	-0,08	-0,16	-0,26	0,02	-0,42	-0,66	-0,67	-0,43	-0,43	-0,51	-0,22	-0,15
5	140	-0,10	-0,21	-0,34	0,02	-0,57	-0,92	-0,79	-0,55	-0,56	-0,66	-0,33	-0,27
6	158	-0,13	-0,26	-0,41	0,02	-0,71	-1,18	-1,06	-0,68	-0,64	-0,73	-0,38	-0,28
7	181	-0,15	-0,31	-0,49	0,02	-0,88	-1,49	-1,26	-0,81	-0,77	-0,87	-0,49	-0,43
8	199	-0,16	-0,41	-0,57	0,02	-0,99	-1,73	-1,32	-0,91	-0,88	-1,00	-0,60	-0,55
9	221	-0,18	-0,47	-0,63	0,02	-1,13	-2,12	-1,71	-1,05	-0,97	-1,09	-0,67	-0,61
10	242	-0,20	-0,56	-0,69	0,02	-1,25	-2,47	-2,11	-1,18	-1,03	-1,15	-0,71	-0,65
11	280	-0,23	-0,75	-0,78	0,01	-1,44	-3,09	-2,41	-1,38	-1,19	-1,34	-0,88	-0,87
12	321	-0,49	-0,96	-0,82	0,00	-1,64	-3,75	-2,78	-1,56	-1,38	-1,59	-1,11	-1,22
13	360	-0,76	-1,18	-0,93	-0,01	-1,83	-4,44	-3,64	-1,77	-1,48	-1,70	-1,20	-1,30
14	402	-1,18	-1,43	-0,94	-0,01	-1,98	-4,92	-4,15	-1,89	-1,68	-2,00	-1,50	-1,76
15	442	-1,61	-1,72	-1,06	-0,02	-2,12	-5,44	-4,83	-2,03	-1,83	-2,21	-1,71	-2,07
16	482	-1,60	-1,86	-0,90	-0,09	-2,01	-5,86	-5,70	-2,25	-1,92	-2,31	-1,79	-2,16
17	523	-2,27	-2,20	-1,27	-0,05	-2,35	-6,54	-6,38	-2,32	-2,06	-2,54	-2,02	-2,47
18	563	-2,75	-2,53	-1,45	-0,07	-2,46	-7,08	-7,42	-2,49	-2,15	-2,65	-2,13	-2,60
19	606	-3,24	-2,68	-1,63	-0,07	-2,61	-7,97	-8,44	-2,59	-2,31	-2,93	-2,41	-3,02
20	642	-4,89	-3,20	-1,95	-0,11	-1,78	-17,65	-15,95	-2,22	-1,40	-1,74	-1,87	-4,71
21	345	-7,13	-3,13	-1,74	-0,13	-1,61	-21,37	-21,29	-2,37	-1,08	-1,19	-1,34	-5,13
22	328	-7,83	-3,10	-1,72	-0,13	-1,61	-23,03	-23,46	-2,42	-1,03	-1,08	-1,23	-5,28
23	306	-8,74	-3,05	-1,67	-0,15	-1,54	-27,18	-27,97	-2,48	-0,90	-0,85	-0,98	-5,67

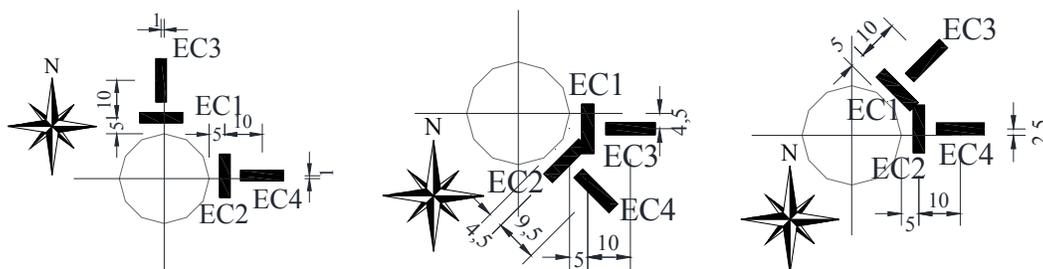
Tabela B.3 - Laje BD28 - P2

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06	LVDT07	LVDT08	LVDT09	LVDT10	LVDT11	LVDT12
		mm											
1	51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	83	-1,07	0,06	0,03	-0,02	0,15	0,81	-0,04	-0,16	-0,12	-0,12	-0,07	0,02
3	99	-1,03	0,06	0,03	-0,02	0,04	0,56	-0,04	-0,28	-0,17	-0,15	-0,06	0,03
4	119	-1,14	0,06	0,02	-0,02	-0,06	0,38	-0,21	-0,42	-0,26	-0,21	-0,10	0,03
5	140	-1,29	0,06	0,01	-0,02	-0,17	0,18	-0,47	-0,56	-0,36	-0,29	-0,14	0,03
6	161	-1,42	0,06	0,01	-0,02	-0,28	-0,02	-0,69	-0,69	-0,47	-0,40	-0,23	0,03
7	182	-1,56	0,06	0,00	-0,02	-0,41	-0,29	-0,95	-0,83	-0,58	-0,51	-0,33	0,03
8	200	-1,76	0,08	-0,01	-0,02	-0,49	-0,52	-1,53	-1,00	-0,63	-0,53	-0,31	0,04
9	220	-1,99	0,10	-0,02	-0,03	-0,61	-0,91	-2,26	-1,21	-0,70	-0,56	-0,31	0,05
10	245	-2,39	0,10	-0,02	-0,05	-0,76	-1,45	-3,00	-1,42	-0,81	-0,66	-0,38	0,05
11	284	-3,02	0,10	-0,03	-0,09	-0,94	-2,16	-3,89	-1,72	-0,94	-0,76	-0,43	0,06
12	319	-3,73	0,16	-0,05	-0,19	-1,12	-3,00	-3,89	-2,06	-1,00	-0,77	-0,39	0,07
13	376	-4,39	0,22	-0,06	-0,38	-1,37	-3,92	-3,86	-2,35	-1,21	-1,01	-0,62	0,07
14	408	-5,12	0,30	-0,06	-0,57	-1,55	-4,65	-3,69	-2,59	-1,33	-1,11	-0,68	0,07
15	447	-5,84	0,31	-0,06	-0,73	-1,73	-5,45	-4,09	-2,86	-1,43	-1,18	-0,71	0,07
16	494	-6,61	-0,10	-0,06	-0,90	-1,95	-6,44	-4,49	-3,18	-1,53	-1,22	-0,70	0,07
17	532	-7,22	-0,45	-0,07	-1,03	-2,07	-7,23	-6,22	-3,43	-1,60	-1,24	-0,67	0,09
18	557	-7,67	-0,75	-0,07	-1,13	-2,07	-7,85	-7,87	-3,68	-1,65	-1,23	-0,60	0,12
19	580	-8,20	-1,08	-0,08	-1,22	-2,11	-8,48	-8,97	-3,86	-1,68	-1,23	-0,58	0,13
20	593	-8,38	-1,17	-0,08	-1,24	-2,13	-8,68	-9,40	-3,93	-1,70	-1,23	-0,57	0,13
21	609	-8,76	-1,39	-0,08	-1,29	-2,16	-9,15	-10,29	-4,06	-1,72	-1,23	-0,56	0,13
22	637	-9,41	-1,81	-0,11	-1,40	-2,19	-9,93	-11,81	-4,26	-1,80	-1,29	-0,58	0,14
23	651	-10,21	-2,24	-0,13	-1,44	-2,19	-10,79	-13,94	-4,00	-1,83	-1,38	-0,69	0,13
24	563	-11,54	-2,47	-0,10	-1,40	-1,76	-15,65	-19,39	-3,59	-1,77	-1,47	-1,00	0,13
25	481	-11,64	-1,89	-0,10	-1,22	-1,75	-17,99	-20,35	-3,40	-1,57	-1,26	-0,78	0,12
26	404	-11,82	-1,79	-0,10	-1,21	-1,74	-20,30	-21,91	-3,37	-1,50	-1,16	-0,66	-0,09
27	408	-12,13	-1,70	-0,09	-1,18	-1,74	-22,25	-23,15	-3,30	-1,50	-1,21	-0,73	-0,64
28	404	-13,82	-1,46	-0,10	-1,05	-1,75	-23,51	-24,78	-3,15	-1,48	-1,25	-0,82	-1,14
29	368	-15,44	-1,39	-0,09	-1,00	-1,74	-24,40	-26,41	-3,07	-1,49	-1,29	-0,89	-1,65
30	362	-17,17	-1,39	-0,09	-1,01	-1,74	-25,49	-28,33	-3,06	-1,49	-1,30	-0,91	-2,19
31	360	-19,53	-1,38	-0,10	-1,00	-1,74	-27,30	-31,63	-3,12	-1,46	-1,25	-0,87	-2,61
32	39	-22,03	-1,34	-0,10	-1,01	-1,74	-29,24	-35,92	-3,15	-1,45	-1,23	-0,84	-2,64

Tabela B.4 - Laje BD28 - P3

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01	LVDT02	LVDT03	LVDT04	LVDT05	LVDT06	LVDT07	LVDT08	LVDT09	LVDT10	LVDT11	LVDT12
		mm											
1	54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	81	-0,12	-0,11	-0,10	-0,10	-0,05	-0,19	-0,16	-0,13	-0,12	-0,12	-0,09	-0,09
3	100	-0,44	-0,43	-0,52	0,03	0,33	-0,07	-0,45	-0,29	-0,24	-0,22	-0,15	-0,13
4	119	-0,51	-0,53	-0,63	-0,09	0,16	-0,36	-0,63	-0,43	-0,39	-0,37	-0,27	-0,24
5	138	-0,64	-0,66	-0,77	-0,23	-0,02	-0,64	-0,92	-0,61	-0,54	-0,52	-0,37	-0,32
6	160	-0,67	-0,73	-0,87	-0,35	-0,23	-1,02	-1,20	-0,78	-0,70	-0,68	-0,50	-0,44
7	178	-0,82	-0,89	-1,00	-0,48	-0,42	-1,34	-1,74	-1,00	-0,85	-0,84	-0,62	-0,55
8	203	-0,80	-0,92	-1,08	-0,58	-0,63	-1,93	-2,05	-1,17	-1,05	-1,07	-0,81	-0,75
9	221	-0,84	-0,98	-1,13	-0,67	-0,81	-2,48	-2,68	-1,37	-1,14	-1,15	-0,85	-0,75
10	243	-1,00	-1,11	-1,25	-0,78	-1,06	-3,29	-3,50	-1,63	-1,28	-1,29	-0,95	-0,85
11	282	-1,39	-1,38	-1,47	-0,95	-1,39	-4,38	-4,51	-1,94	-1,49	-1,54	-1,18	-1,05
12	320	-1,57	-1,52	-1,62	-1,08	-1,81	-5,38	-5,51	-2,23	-1,76	-1,87	-1,47	-1,33
13	365	-1,59	-1,59	-1,73	-1,19	-2,26	-6,27	-6,86	-2,60	-1,98	-2,11	-1,65	-1,48
14	406	-1,73	-1,71	-1,84	-1,28	-2,62	-7,61	-7,80	-2,86	-2,22	-2,41	-1,90	-1,74
15	442	-1,86	-1,82	-1,92	-1,35	-3,00	-8,95	-8,60	-3,08	-2,47	-2,75	-2,22	-2,18
16	490	-1,83	-1,85	-1,99	-1,41	-3,51	-10,85	-9,99	-3,42	-2,80	-3,17	-2,58	-2,66
17	522	-1,62	-1,77	-1,96	-1,42	-3,89	-12,19	-10,52	-3,60	-2,98	-3,44	-2,81	-2,98
18	566	-1,31	-1,61	-1,87	-1,40	-4,46	-14,28	-11,39	-3,83	-3,30	-3,91	-3,26	-3,63
19	601	-1,29	-1,60	-1,88	-1,39	-4,83	-15,83	-12,72	-4,08	-3,56	-4,27	-3,51	-4,06
20	644	-1,06	-1,50	-1,82	-1,37	-5,17	-17,25	-13,12	-4,19	-3,69	-4,48	-3,75	-4,39
21	675	-0,87	-1,39	-1,75	-1,33	-5,61	-19,08	-13,70	-4,32	-3,99	-4,95	-4,24	-5,10
22	695	-1,32	-1,67	-1,76	-1,28	-6,01	-21,59	-17,21	-4,40	-4,13	-5,14	-4,43	-5,32
23	697	-1,97	-1,93	-1,69	-1,20	-6,14	-23,06	-20,09	-4,38	-4,17	-5,21	-4,47	-5,34
24	534	-2,92	-1,71	-1,28	-0,85	-5,35	-29,10	-24,89	-3,82	-3,60	-4,55	-4,20	-5,80
25	392	-6,14	-0,22	-0,31	-0,23	-5,59	-31,19	-29,77	-3,88	-3,21	-4,02	-3,51	-6,00
26	383	-8,06	-0,20	-0,25	-0,19	-5,59	-33,24	-33,42	-3,86	-3,15	-3,96	-3,33	-6,38
27	377	-10,08	-0,19	-0,19	-0,15	-5,63	-33,92	-33,80	-3,74	-3,28	-4,23	-3,33	-8,58
28	379	-12,59	0,35	0,24	0,13	-5,75	-33,92	-35,27	-3,64	-3,21	-4,20	-3,28	-10,18
29	343	-15,27	0,24	0,23	0,14	-5,75	-33,92	-36,95	-3,66	-3,17	-4,14	-3,24	-11,43
30	339	-17,19	0,10	0,20	0,12	-5,71	-33,92	-38,93	-3,68	-3,11	-4,05	-3,22	-12,72
31	341	-19,10	-0,04	0,16	0,10	-5,71	-33,92	-40,97	-3,71	-3,08	-4,03	-3,21	-13,95
32	343	-21,56	-0,11	0,18	0,11	-5,71	-33,92	-41,52	-3,70	-3,09	-4,07	-3,23	-14,98

B.2 - DEFORMAÇÕES NO CONCRETO



RSP e BD28 - P1

BD28 - P2

BD28 - P3

Figura B.2 - Posição dos extensômetros de concreto na face inferior das lajes

(medidas em cm)

Tabela B.5 - Laje RSP

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EC1	EC2	EC3	EC4
		$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$
1	76	0,2	-0,5	0,5	0,0
2	94	-11,3	-13,6	-4,4	-12,9
3	117	-20,0	-23,7	-13,1	-18,1
4	132	-29,4	-36,1	-18,8	-27,1
5	154	-42,5	-51,4	-25,7	-37,9
6	172	-54,7	-67,5	-31,0	-49,8
7	193	-70,0	-87,3	-37,7	-64,1
8	212	-86,8	-108,4	-48,2	-77,2
9	232	-101,5	-132,7	-60,6	-85,7
10	267	-146,8	-168,1	-72,3	-117,4
11	291	-201,6	-242,5	-102,4	-147,2
12	329	-268,5	-315,3	-136,9	-178,4
13	383	-375,3	-429,9	-179,4	-241,6
14	412	-430,9	-498,1	-208,5	-264,3
15	446	-479,3	-556,0	-230,4	-283,4
16	495	-566,6	-649,0	-252,6	-312,3
17	529	-627,4	-726,7	-269,4	-329,6
18	584	-731,3	-818,3	-293,3	-360,3
19	616	-799,9	-912,7	-322,7	-374,6
20	650	-869,7	-1007,5	-348,4	-388,1
21	695	-988,0	-1127,7	-377,8	-399,8
22	738	-1095,0	-1254,4	-379,2	-386,8
23	777	-1173,6	-1409,9	-195,4	-374,1
24	824	-1319,2	-1541,1	-13,6	-275,4
25	858	-1425,3	-1811,6	108,2	-115,8

Tabela B.6 - Laje BD28 - P1

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EC1	EC2	EC3	EC4
		$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$
1	57	-0,2	0,0	0,0	0,0
2	81	-12,4	-13,8	-7,6	-4,1
3	101	-25,5	-25,7	-14,9	-7,3
4	119	-37,0	-38,6	-21,8	-11,0
5	140	-54,4	-55,6	-30,5	-17,0
6	158	-69,1	-75,8	-39,7	-20,4
7	181	-94,9	-106,8	-50,1	-28,0
8	199	-123,8	-140,1	-61,8	-37,0
9	221	-164,2	-189,0	-72,6	-45,9
10	242	-205,1	-227,1	-84,1	-52,6
11	280	-277,9	-295,3	-101,5	-70,7
12	321	-352,8	-365,2	-117,6	-98,5
13	360	-413,6	-425,1	-136,9	-116,7
14	402	-486,4	-483,7	-146,8	-152,3
15	442	-553,5	-543,6	-156,2	-178,7
16	482	-611,1	-602,0	-172,7	-194,8
17	523	-679,3	-672,5	-186,0	-211,3
18	563	-740,2	-741,6	-212,2	-214,3
19	606	-831,8	-837,1	-259,5	-213,4
20	642	-704,2	-279,7	-60,4	-38,8
21	345	-680,0	-330,3	-70,5	-33,1
22	328	-675,7	-337,4	-70,5	-31,9
23	306	-617,3	-289,6	-52,1	-18,4

Tabela B.7 - Laje BD28 - P2

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EC1	EC2	EC3	EC4
		$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$
1	51	0,0	0,0	0,0	0,0
2	83	-0,2	0,2	-3,2	0,0
3	99	-18,1	-23,7	-8,5	-6,2
4	119	-33,8	-43,9	-14,2	-15,2
5	140	-50,3	-63,6	-19,8	-24,6
6	161	-73,5	-88,4	-27,6	-37,7
7	182	-100,8	-113,5	-38,1	-48,9
8	200	-151,1	-152,7	-57,6	-64,8
9	220	-200,3	-201,0	-55,6	-81,3
10	245	-245,3	-253,1	-48,2	-105,6
11	284	-284,8	-308,0	-54,4	-125,4
12	319	-375,5	-381,2	-78,1	-159,2
13	376	-455,2	-476,3	-105,2	-188,8
14	408	-545,0	-585,6	-129,5	-220,7
15	447	-623,8	-703,2	-153,6	-244,4
16	494	-717,2	-836,0	-179,8	-262,3
17	532	-855,5	-1000,2	-209,2	-282,7
18	557	-974,9	-1124,9	-229,4	-306,6
19	580	-1079,2	-1225,5	-198,0	-321,5
20	593	-1079,4	-1324,7	-202,6	-332,6
21	609	-1084,5	-1356,9	-199,8	-336,7
22	637	-1099,6	-1420,0	-205,1	-354,1
23	651	-1127,0	-1515,8	-209,7	-388,1
24	563	-918,2	-1477,0	-276,3	739,1
25	481	-704,6	-1305,6	-8812,7	-9458,1
26	404	-606,8	-1224,1	-8812,7	-9458,1
27	408	-547,8	-1193,6	-8812,7	-9458,1
28	404	-520,0	-1174,7	-8812,7	-9458,1
29	368	-452,7	-1107,4	-8812,7	-9458,1
30	362	-420,3	-1069,6	-8812,7	-9458,1
31	360	-415,5	-1057,6	-8812,7	-9458,1
32	39	-425,1	-1057,4	-8812,7	-9458,1

Tabela B.8 - Laje BD28 - P3

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EC1	EC2	EC3	EC4
		$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m}$
1	54	0,0	0,0	0,7	0,5
2	81	-16,8	-14,0	-1,4	-6,7
3	100	-28,7	-23,2	-0,7	-11,7
4	119	-43,2	-34,7	-3,2	-17,5
5	138	-59,3	-47,8	-6,0	-24,1
6	160	-76,7	-64,5	-9,9	-32,4
7	178	-98,5	-85,2	-14,5	-45,2
8	203	-127,9	-103,1	-21,8	-57,4
9	221	-178,7	-119,4	-32,8	-71,2
10	243	-257,7	-133,7	-46,9	-86,4
11	282	-336,2	-160,3	-72,1	-112,8
12	320	-409,5	-185,3	-93,2	-136,2
13	365	-488,0	-212,9	-116,2	-165,1
14	406	-546,4	-247,1	-143,5	-187,6
15	442	-607,5	-277,9	-174,5	-214,0
16	490	-684,9	-319,0	-209,2	-242,5
17	522	-726,2	-336,9	-227,1	-262,3
18	566	-795,3	-365,6	-256,1	-287,3
19	601	-875,5	-407,9	-277,0	-300,4
20	644	-918,9	-415,5	-277,2	-319,0
21	675	-1000,7	-455,9	-292,8	-339,9
22	695	-1130,2	-458,6	-272,2	-411,8
23	697	-1161,4	-640,5	-228,1	-353,7
24	534	-781,1	-8665,0	-149,1	64,8
25	392	-626,3	-8665,0	-71,7	42,5
26	383	-587,5	-8665,0	-46,9	54,2
27	377	-601,3	-8665,0	-88,7	66,4
28	379	-564,5	-8665,0	-177,1	103,3
29	343	-583,1	-8665,0	-95,1	121,7
30	339	-594,1	-8665,0	-66,8	125,6
31	341	-605,4	-8665,0	-8306,3	127,2
32	343	-624,2	-8665,0	-8306,3	130,0

B.3 - DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE FLEXÃO

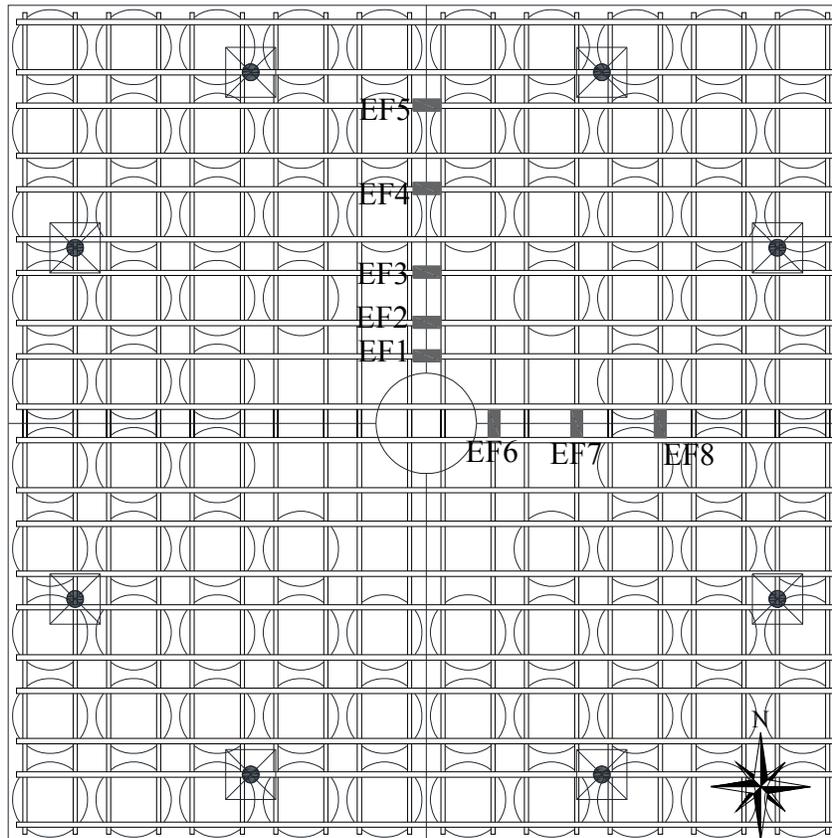


Figura B.3 - Posição dos extensômetros nas lajes

Tabela B.9 - Laje RSP

Passo de Carga	Carga Total (kN)	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
		‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
1	76	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
2	94	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
3	117	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01
4	132	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
5	154	0,07	0,06	0,04	0,07	0,02	0,04	0,04	0,02
6	172	0,10	0,08	0,06	0,07	0,03	0,06	0,05	0,03
7	193	0,14	0,12	0,10	0,07	0,04	0,08	0,06	0,04
8	212	0,20	0,17	0,14	0,08	0,05	0,10	0,08	0,05
9	232	0,28	0,24	0,21	0,14	0,08	0,14	0,10	0,07
10	267	0,35	0,30	0,26	0,18	0,11	0,22	0,15	0,14
11	291	0,53	0,44	0,40	0,35	0,21	0,35	0,24	0,24
12	329	0,72	0,61	0,56	0,50	0,35	0,55	0,35	0,37
13	383	0,97	0,83	0,75	0,65	0,52	0,86	0,61	0,58
14	412	1,15	0,98	0,88	0,80	0,62	1,01	0,76	0,69
15	446	1,30	1,13	1,00	0,88	0,70	1,12	0,88	0,77
16	495	1,50	1,32	1,16	0,98	0,79	1,34	1,08	0,89
17	529	1,68	1,49	1,32	1,06	0,87	1,48	1,23	0,99
18	584	1,89	1,72	1,55	1,17	0,96	1,71	1,48	1,15
19	616	2,02	1,86	1,70	1,26	1,03	1,83	1,58	1,21
20	650	2,09	1,99	1,88	1,35	1,10	1,95	1,70	1,29
21	695	2,22	2,16	2,07	1,45	1,18	2,14	1,87	1,42
22	738	2,37	2,34	2,27	1,56	1,26	2,30	2,02	1,52
23	777	2,55	2,56	2,50	1,70	1,37	2,48	2,17	1,62
24	824	2,69	2,75	2,67	1,83	1,45	2,63	2,34	1,77
25	858	2,79	2,92	2,81	2,01	1,56	2,77	2,51	1,89

Tabela B.10 - Laje BD28 - P1

Passo de Carga	Carga Total (kN)	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
		%	%	%	%	%	%	%	%
1	57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	81	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
3	101	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02
4	119	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,06	0,03	0,03
5	140	0,07	0,06	0,05	0,05	0,03	0,10	0,04	0,04
6	158	0,11	0,09	0,07	0,07	0,05	0,17	0,07	0,06
7	181	0,17	0,15	0,12	0,11	0,08	0,25	0,12	0,09
8	199	0,24	0,22	0,18	0,15	0,11	0,35	0,17	0,12
9	221	0,37	0,33	1,06	0,20	0,17	0,47	0,24	0,16
10	242	0,48	0,42	0,34	0,22	0,21	0,60	0,33	0,20
11	280	0,68	0,57	0,48	0,33	0,29	0,77	0,47	0,29
12	321	0,90	0,75	0,64	0,41	0,35	1,09	0,59	0,38
13	360	1,08	0,91	0,79	0,51	0,43	1,35	0,74	0,50
14	402	1,27	1,08	0,94	0,62	0,53	1,56	0,86	0,58
15	442	1,45	1,26	1,11	0,73	0,61	1,79	0,99	0,67
16	482	1,61	1,43	1,25	0,82	0,68	2,03	1,13	0,77
17	523	1,77	1,60	1,40	0,92	0,76	2,22	1,25	0,85
18	563	1,90	1,76	1,55	1,06	0,84	2,43	1,39	1,10
19	606	2,01	1,88	1,65	1,35	0,97	2,58	1,51	1,33
20	642	1,23	1,19	0,94	1,57	0,75	2,12	1,34	1,33
21	345	1,22	1,19	0,95	1,52	0,69	2,07	1,32	1,48
22	328	1,25	1,20	0,96	1,47	0,67	2,08	1,33	1,69
23	306	1,29	1,23	0,97	1,17	0,58	2,03	1,33	1,96

Tabela B.11 - Laje BD28 - P2

Passo de Carga	Carga Total (kN)	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
		‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
1	51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	83	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
3	99	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
4	119	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04
5	140	0,18	0,08	0,07	0,04	0,04	0,08	0,05	0,06
6	161	0,29	0,12	0,10	0,06	0,06	0,14	0,07	0,08
7	182	0,50	0,16	0,15	0,09	0,09	0,21	0,11	0,11
8	200	0,65	0,27	0,25	0,16	0,20	0,35	0,19	0,14
9	220	0,91	0,50	0,44	0,23	0,28	0,65	0,47	0,24
10	245	1,12	0,72	0,60	0,31	0,36	0,90	0,70	0,39
11	284	1,44	1,09	0,88	0,53	0,50	1,28	1,06	0,58
12	319	1,73	1,39	1,14	0,68	0,58	1,66	1,28	0,70
13	376	2,04	1,70	1,43	0,84	0,70	1,96	1,53	0,81
14	408	2,25	1,96	1,66	0,99	0,80	2,22	2,01	0,92
15	447	2,48	2,22	1,87	1,15	0,91	2,44	2,25	1,05
16	494	2,77	2,58	2,11	1,39	1,10	2,72	2,06	1,16
17	532	3,01	2,81	2,28	1,55	1,24	2,92	2,50	1,28
18	557	3,31	3,03	2,46	1,72	1,39	3,01	2,62	1,37
19	580	3,54	3,17	2,57	1,81	1,47	3,21	2,77	1,48
20	593	3,62	3,22	2,61	1,85	1,50	3,29	2,81	1,49
21	609	3,93	3,33	2,69	1,93	1,56	3,46	2,93	1,56
22	637	-7,34	3,62	2,82	2,07	1,68	3,95	3,11	1,69
23	651	-7,34	3,33	2,60	2,17	1,83	-7,33	2,73	1,40
24	563	-7,34	3,04	2,31	1,62	1,08	-7,33	2,27	1,71
25	481	-7,34	2,83	2,15	1,52	0,89	-7,33	2,21	1,75
26	404	-7,34	2,80	2,11	1,46	0,85	-7,33	2,18	1,87
27	408	-7,34	2,75	2,08	1,44	0,80	-7,33	2,18	2,01
28	404	-7,34	2,64	1,99	1,40	0,78	-7,33	2,19	1,30
29	368	-7,34	2,58	1,96	1,39	0,80	-7,33	2,22	1,43
30	362	-7,34	2,60	1,97	1,39	0,79	-7,33	2,28	1,52
31	360	-7,34	2,65	2,01	1,39	0,78	-7,33	2,39	1,48
32	39	-7,34	2,73	2,08	1,41	0,78	-7,33	2,51	1,25

Tabela B.12 - Laje BD28 - P3

Passo de Carga	Carga Total (kN)	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6	EF7	EF8
		‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
1	54	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	81	0,02	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3	100	0,04	0,07	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
4	119	0,06	0,08	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
5	138	0,10	0,11	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04
6	160	0,19	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07
7	178	0,45	0,46	0,40	0,39	0,22	0,16	0,21	0,18
8	203	0,58	0,59	0,52	0,49	0,29	0,25	0,33	0,28
9	221	0,72	0,70	0,63	0,58	0,37	0,45	0,54	0,45
10	243	0,92	0,83	0,76	0,67	0,45	0,71	0,76	0,60
11	282	1,17	1,01	0,92	0,76	0,54	1,08	0,99	0,68
12	320	1,38	1,19	1,09	0,86	0,66	1,37	1,15	0,77
13	365	1,65	1,41	1,28	0,97	0,75	1,67	1,36	0,87
14	406	1,86	1,60	1,45	1,06	0,83	1,92	1,55	0,98
15	442	2,05	1,76	1,59	1,13	0,91	2,11	1,72	1,08
16	490	2,29	2,00	1,80	1,26	1,03	2,36	1,93	1,19
17	522	2,40	2,09	1,87	1,31	1,07	2,50	2,08	1,26
18	566	2,56	2,25	2,01	1,41	1,17	2,72	2,27	1,32
19	601	2,76	2,48	2,23	1,56	1,32	2,96	2,44	1,37
20	644	2,77	2,52	2,28	1,59	1,36	3,11	2,57	1,42
21	675	2,87	2,66	2,42	1,69	1,45	3,51	2,75	1,48
22	695	2,79	2,68	2,64	1,94	1,74	4,39	2,86	1,58
23	697	2,77	2,69	2,64	1,96	1,91	4,82	2,75	1,51
24	534	2,21	2,28	1,82	1,48	1,35	3,59	1,83	1,47
25	392	2,09	2,19	1,69	1,41	1,32	3,39	1,76	-7,65
26	383	2,08	2,20	1,66	1,32	1,56	3,39	1,81	-7,65
27	377	2,06	2,57	1,60	1,23	1,60	3,40	1,88	-7,65
28	379	1,98	2,60	1,55	1,36	1,43	3,32	1,94	-7,65
29	343	1,99	2,59	1,55	1,34	1,45	3,39	2,01	-7,65
30	339	2,00	2,60	1,56	1,30	1,49	3,45	2,10	-7,65
31	341	2,06	2,65	1,60	1,29	1,53	3,53	2,22	-7,65
32	343	2,13	2,71	1,64	1,27	1,57	3,61	2,38	-7,65

B.4 - DEFORMAÇÕES NA ARMADURA DE CISALHAMENTO

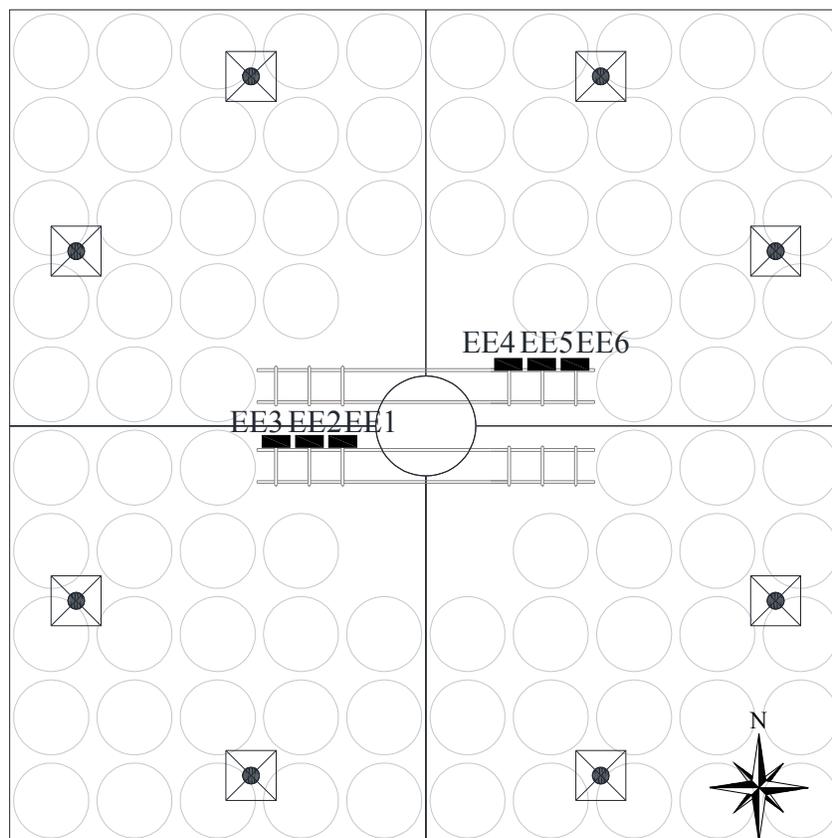


Figura B.4 - Posição da instrumentação dos extensômetros de cisalhamento

Tabela B.13 - Laje BD28 - P3

Passo de Carga	Carga Total (kN)	EFC1	EFC2	EFC3	EFC4	EFC5	EFC6
		‰	‰	‰	‰	‰	‰
1	54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	119	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	138	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
6	160	0,00	-0,01	0,00	0,01	0,00	-0,01
7	178	0,01	-0,01	0,00	0,04	0,00	0,00
8	203	0,01	-0,01	0,01	0,05	0,00	0,01
9	221	0,03	-0,01	0,02	0,07	0,00	0,05
10	243	0,05	0,01	0,09	0,09	0,00	0,07
11	282	0,06	0,02	0,18	0,11	0,00	0,10
12	320	0,07	0,04	0,25	0,13	0,00	0,13
13	365	0,07	0,07	0,33	0,16	0,00	0,16
14	406	0,09	0,12	0,39	0,19	0,00	0,19
15	442	0,12	0,15	0,46	0,25	0,00	0,22
16	490	0,15	0,20	0,53	0,35	0,00	0,26
17	522	0,16	0,22	0,55	0,40	0,00	0,27
18	566	0,18	0,27	0,59	0,43	0,00	0,30
19	601	0,20	0,31	0,63	0,44	0,00	0,33
20	644	0,22	0,33	0,64	0,45	0,00	0,34
21	675	0,24	0,36	0,69	0,46	0,00	0,36
22	695	0,27	0,39	0,72	0,50	0,00	0,35
23	697	0,26	0,42	0,73	0,49	0,00	0,32
24	534	0,25	0,36	0,57	0,43	0,00	0,28
25	392	0,24	0,34	0,53	0,42	0,00	0,28
26	383	0,23	0,33	0,53	0,41	0,00	0,28
27	377	0,23	0,34	0,53	0,41	0,00	0,28
28	379	0,23	0,33	0,52	0,41	0,00	0,27
29	343	0,23	0,32	0,52	0,40	0,00	0,28
30	339	0,22	0,31	0,52	0,40	0,00	0,28
31	341	0,22	0,32	0,52	0,40	0,00	0,28
32	343	0,23	0,32	0,52	0,40	0,00	0,29